



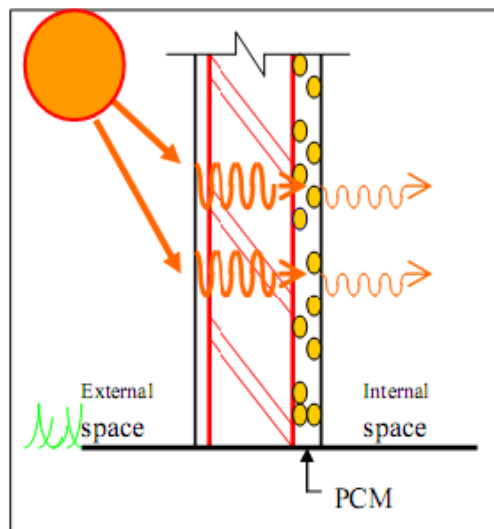
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παθητική ηλιακή θέρμανση κτιρίων με χρήση στρώματος υλικών αλλαγής φάσης (PCM) στους εσωτερικούς τοίχους



ΕΚΠΟΝΗΣΗ: Καζάνη Βασιλική

ΕΠΙΒΛΕΨΗ: Κίμωνας Α. Αντωνόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Πολυτεχνείου

ΑΘΗΝΑ 2011

Πρόλογος

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάδειξη των πλεονεκτημάτων που προκύπτουν από τη χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCMs) στο τομέα των κτιρίων. Αποτελείται από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος πραγματοποιείται μια σύντομη αναφορά των ειδών των υλικών αλλαγής φάσης που υπάρχουν και γενικών χαρακτηριστικών τους καθώς και ανάλυση ορισμένων περιπτώσεων στις οποίες εφαρμόζονται με έμφαση στα δομικά στοιχεία και λοιπά στοιχεία των κτιρίων. Στο δεύτερο μέρος μελετώνται συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων οι συνέπειες της ενσωμάτωσης στρώματος με υλικό αλλαγής φάσης σε εσωτερικό τοίχο νότιου προσανατολισμού όσον αφορά την παθητική ηλιακή θέρμανση χώρου και την ικανοποίηση των συνθηκών ανθρώπινης άνεσης όσο γίνεται πιο αποτελεσματικά και ανέξοδα.

Η εργασία αυτή δεν θα είχε ολοκληρωθεί χωρίς τη καθοριστική συμβολή του καθηγητή κ. Κίμωνα Αντωνόπουλο που με την καθοδήγηση και τις υποδείξεις του βοήθησε στην επίλυση και αντιμετώπιση των προβλημάτων που ανέκυπταν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής. Γι' αυτό το λόγο λοιπόν θα ήθελα να τον ευχαριστήσω ιδιαίτερα. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τη συμφοιτήτρια και φίλη μου Καλλινίκου Ζαφειρία για την πολύτιμη στήριξή της και την άψογη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μας. Τέλος οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και ιδιαίτερα στον πατέρα μου που είναι πάντα δίπλα μου και στηρίζει την κάθε μου επιλογή.

Περιεχόμενα

I. Θεωρητική Διερεύνηση

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή.....	σελ. 8
1.1 Η ενέργεια στη ζωή μας.....	8
1.2 Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας και συνέπειες.....	8
1.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	12
1.4 Ενεργειακό πρόβλημα.....	14
1.5 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας – Ηλιακή ενέργεια.....	15
1.6 Συστήματα με βάση την ηλιακή ενέργεια.....	17
1.6.1 Παθητικά ηλιακά συστήματα.....	18
1.6.1.1 Άμεσου κέρδους.....	18
1.6.1.2 Έμμεσου κέρδους.....	21
1.6.1.3 Απομονωμένου κέρδους.....	23
1.6.2 Ενεργητικά ηλιακά συστήματα.....	24
1.6.3 Φωτοβολταϊκά ηλιακά συστήματα.....	25
1.7 Μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας.....	26
1.7.1 Αποθήκευση μηχανικής ενέργειας.....	27
1.7.2 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας.....	28
1.7.3 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας.....	28
1.7.3.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας.....	29
1.7.3.2 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας.....	29
1.7.3.3 Αποθήκευση θερμοχημικής ενέργειας.....	30
Βιβλιογραφία 1 ^{ου} Κεφαλαίου.....	31
Κεφάλαιο 2^ο: Υλικά αλλαγής φάσης.....	σελ. 32
2.1 Θεωρία αλλαγής φάσης.....	32
2.1.1 Αλλαγή φάσης μιας ιδανικής καθαρής ουσίας.....	33
2.1.2 Αλλαγή φάσης ενός μίγματος.....	36
2.2 Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης.....	40
2.2.1 Η μέθοδος της ενθαλπίας.....	42
2.2.2 Η μέθοδος της ενεργούς θερμοχωρητικότητας.....	43
2.3 Ταξινόμηση των PCMs.....	44
2.3.1 Υλικά αλλαγής φάσης (από στερεό σε υγρό και αντίστροφα).....	45
2.3.1.1 Οργανικά PCM.....	46

2.3.1.1.1	Παραφίνες.....	46
2.3.1.1.2	Λιπαρά οξέα.....	49
2.3.1.1.3	Σάκχαρο – αλκοόλες.....	50
2.3.1.2	Ανόργανα PCM.....	51
2.3.1.2.1	Ένυδρα άλατα.....	51
2.3.1.2.2	Άλας Glauber.....	53
2.3.1.3	Εύτηκτα μίγματα.....	55
2.3.1.4	Clathrates.....	55
2.3.2	Υλικά αλλαγής στερεάς φάσης.....	57
2.4	Ιδιότητες των PCMs.....	57
2.4.1	Θερμοδυναμικές ιδιότητες.....	58
2.4.2	Κινητικές ιδιότητες.....	59
2.4.3	Χημικές ιδιότητες.....	59
2.4.4	Οικονομικές ιδιότητες.....	60
2.5	Μέθοδοι μέτρησης των ιδιοτήτων.....	61
2.5.1	Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA).....	61
2.5.2	Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (DSC).....	63
2.5.3	Μέθοδος T-history.....	65
2.5.4	Μέθοδος διπλού κελιού (double cell).....	68
2.6	Ανάλυση των κυριότερων προβλημάτων των PCMs και πιθανοί τρόποι αντιμετώπισης.....	70
2.6.1	Διαχωρισμός των φάσεων.....	70
2.6.2	Υπόψυξη (ή υπέρψυξη).....	73
2.6.3	Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα.....	76
2.6.4	Συμβατότητα με άλλα υλικά.....	76
2.6.5	Συσκευασία PCM.....	77
2.6.5.1	Ενσωμάτωση σε κάψουλες των υλικών αλλαγής φάσης.....	77
2.6.5.1.1	Μακροενσωμάτωση.....	77
2.6.5.1.2	Μικροενσωμάτωση.....	78
2.6.5.1.3	Μαζική αποθήκευση.....	82
2.6.5.2	Σύνθετα υλικά.....	82
	Βιβλιογραφία 2 ^{ου} Κεφαλαίου.....	85
	Κεφάλαιο 3^ο: Γενικές εφαρμογές των PCMs.....	σελ.89
3.1	Εισαγωγή.....	89
3.2	Ηλιακά μαγειρικά σκεύη.....	89
3.3	Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	94

3.4	Ηλεκτρονικά Εξαρτήματα.....	97
3.4.1	Συσκευές: φορητοί υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα και PDAs.....	97
3.4.2	Τεχνολογία μνήμης (CDs και DVDs).....	102
3.4.3	Τηλεπικοινωνίες.....	104
3.5	Οχήματα.....	107
3.5.1	Ψύξη κινητήρων.....	107
3.5.2	Θερμική άνεση.....	109
3.5.3	Καταλυτικός μετατροπέας.....	110
3.5.4	Μονάδες μπαταρίας ηλεκτρικών οχημάτων.....	114
3.6	Κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα.....	115
3.6.1	Διαστημικές στολές.....	118
3.6.2	Γιλέκα για διάφορες εφαρμογές.....	118
3.6.3	Ρούχα και εσώρουχα.....	119
3.6.4	Αξεσουάρ ένδυσης (κράνος, γάντια).....	120
3.6.5	Υποδήματα.....	122
3.6.6	Αγώγιμα υφάσματα.....	122
3.6.7	Κλινοσκεπάσματα και αξεσουάρ.....	123
3.7	Ιατρικές εφαρμογές.....	124
3.8	Συσκευασία για αποθήκευση και μεταφορά αγαθών.....	127
3.8.1	Πολλαπλού σκοπού κιβώτια μεταφοράς και δοχεία.....	128
3.8.2	Δοχεία για τρόφιμα και ποτά.....	131
3.8.3	Ιατρικά προϊόντα.....	133
	Βιβλιογραφία 3 ^{ου} Κεφαλαίου.....	135
	Κεφάλαιο 4^ο: Κτιριακές εφαρμογές των PCMs	σελ. 139
4.1	Ιστορική αναδρομή.....	139
4.1.1	Πρώτες προσπάθειες.....	139
4.1.1.1	Δρ. Maria Telkes.....	139
4.1.1.2	Δρ. Lawrence Gardshire.....	140
4.1.1.3	Δρ J. W. Hodgins και Δρ T. W. Hoffman.....	140
4.1.2	Ερευνητική δραστηριότητα.....	141
4.1.2.1	ΗΠΑ.....	141
4.1.2.2	Ευρώπη.....	143
4.1.2.3	Άπω ανατολή (Ιαπωνία).....	144
4.2	Αρχές λειτουργίας των PCMs για θέρμανση/ψύξη σε κτίρια.....	145
4.2.1	Προϋποθέσεις ανθρώπινης άνεσης.....	145
4.2.2	Παράγοντες που επηρεάζουν την εσωτερική θερμοκρασία του αέρα... 146	146

4.2.3	Δυνατότητα των PCMs για έλεγχο της θερμοκρασίας.....	147
4.2.4	Σύγκριση PCM με τα συμβατικά οικοδομικά υλικά.....	149
4.2.5	Παράγοντες αξιολόγησης ενός τοίχου με PCM.....	150
4.2.5.1	Παράγοντες «φ» και «f».....	150
4.2.5.2	Παράγοντες «α», «b» και «ΔT».....	152
4.3	Εφαρμογές PCMs στην τοιχοποιία και λοιπά στοιχεία κτιρίου.....	154
4.3.1	Ενσωμάτωση των PCMs σε δομικά υλικά.....	154
4.3.1.1	Γυψοσανίδες εμποτισμένες με PCMs.....	154
4.3.1.2	Μπλοκ σκυροδέματος εμποτισμένα με PCMs.....	163
4.3.1.3	PCM ενσωματωμένο σε μείγμα ξύλου- ελαφρού βάρους σκυροδέματος.....	169
4.3.1.4	Ενσωμάτωση PCM σε τούβλο.....	170
4.3.2	Τοίχος Trombe.....	173
4.3.3	Ηλιακός τοίχος αποθήκευσης θερμότητας για αερισμό κτιρίου.....	176
4.3.4	Θερμικά ενισχυμένο πλαίσιο τοίχου με PCMs.....	177
4.3.5	Υποδαπέδιο σύστημα θέρμανσης με αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας.....	180
4.3.6	Οροφές.....	190
4.3.7	Παράθυρα με PCMs.....	196
	Βιβλιογραφία 4 ^{ου} Κεφαλαίου.....	201
	Κεφάλαιο 5^ο: Συστήματα θέρμανσης, ψύξης και συνδυασμός αυτών με PCMs.....	σελ.204
5.1	Συστήματα θέρμανσης με PCMs.....	204
5.1.1	Ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού.....	204
5.1.2	Ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα.....	213
5.1.3	Ηλιακό θερμοκήπιο.....	218
5.2	Συστήματα ψύξης με PCMs.....	221
5.2.1	Συστήματα αποθήκευσης με πάγο.....	223
5.2.1.1	Στατικά συστήματα.....	224
5.2.1.1.1	Ice on Coil.....	224
5.2.1.1.2	Ice Banks.....	224
5.2.1.2	Δυναμικά συστήματα.....	225
5.2.1.2.1	Ice Harvester.....	225
5.2.1.2.2	Slurry ice.....	226
5.2.2	Συστήματα αποθήκευσης με εύτηκτα άλατα.....	226
5.2.3	Εφαρμογές PCMs σε συστήματα ψύξης κτιρίων.....	227

5.2.3.1	Κλιματιστικά συστήματα.....	227
5.2.3.2	Free cooling.....	231
5.3	PCM ενσωματωμένο σε συνδυασμένο σύστημα ψύξης και θέρμανσης.....	237
	Βιβλιογραφία 5 ^{ου} Κεφαλαίου.....	239

II. Θεωρητική Προσομοίωση

Κεφάλαιο 6^ο: Περιγραφή της διάταξης, του τρόπου υπολογισμού διαφόρων μεγεθών και σύνταξη του μαθηματικού μοντέλου.....σελ.241

6.1	Γενική περιγραφή της μελέτης.....	241
6.2	Υπολογισμός προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.....	242
6.3	Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα PCM.....	244

Κεφάλαιο 7^ο: Μελέτες της συμπεριφοράς του στρώματος PCM συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων.....σελ.247

7.1	1 ^η Παραμετρική μελέτη ως προς το πάχος του στρώματος PCM στο 24hr.....	247
7.2	2 ^η Παραμετρική μελέτη του πάχους του στρώματος του μπτεόν έναντι του αντίστοιχου του PCM στο 24hr.....	256
7.3	3 ^η Παραμετρική μελέτη ως προς το πάχος του στρώματος PCM στο 48hr.....	261
7.4	4 ^η Παραμετρική μελέτη ως προς την εσωτερική θερμοκρασία του αέρα του δωματίου.....	265
7.5	5 ^η Παραμετρική μελέτη ως προς τα χαρακτηριστικά του PCM.....	269
7.6	6 ^η Παραμετρική μελέτη της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας.....	284
	Βιβλιογραφία Θεωρητικής Προσομοίωσης.....	294

I. Θεωρητική Διερεύνηση

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

1.1 Η ενέργεια στη ζωή μας [1,2]

Η ενέργεια είναι σε τέτοιο βαθμό συνυφασμένη με την καθημερινή μας ζωή που μόνο η έλλειψή της καθιστά πρόδηλη την αναγκαιότητά της. Εισέρχεται στην καθημερινή μας ζωή με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Ειδικότερα η ενέργεια στα τρόφιμα που τρώμε διατηρεί τη θερμοκρασία του σώματός μας και μας επιτρέπει να μιλάμε, να περπατάμε, να σηκώνουμε πράγματα κ.ο.κ. Η χρήση της ενέργειας στα τρόφιμα έχει αποδειχθεί ουσιαστική για την ύπαρξη της ανθρωπότητας και των ζώων καθ' όλη την εξέλιξή μας σε αυτόν τον πλανήτη. Ενέργεια σε μορφές άλλες από τα τρόφιμα είναι επίσης απαραίτητες για τη λειτουργία μιας τεχνικής κοινωνίας. Καταπληκτικά ποσά ενέργειας χρησιμοποιούνται για να κινηθούν αυτοκίνητα, να θερμανθούν σπίτια, να κατασκευαστούν προϊόντα, να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια και να εκτελεστούν διάφορες άλλες εργασίες. Γενικά λοιπόν το σύνολο των ανθρώπινων δραστηριοτήτων δεσμεύει, παράγει, καταναλώνει, μετατρέπει, αποθηκεύει και υποβαθμίζει τεράστια ποσά ενέργειας. Υπολογίζεται ότι κάθε πολίτης των αναπτυγμένων κρατών καταναλώνει ημερησίως τόση ενέργεια όση παράγουν οι μύες 100 μεγαλόσωμων αντρών ή 12 δυνατών αλόγων. Για την παροχή αυτής της ενέργειας και προκειμένου η κοινωνία μας να λειτουργεί με τα σημερινά της πρότυπα τεράστιες ποσότητες άνθρακα, φυσικού αερίου και πετρελαίου εξάγονται από τη γη και καίγονται.

1.2 Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας και συνέπειες

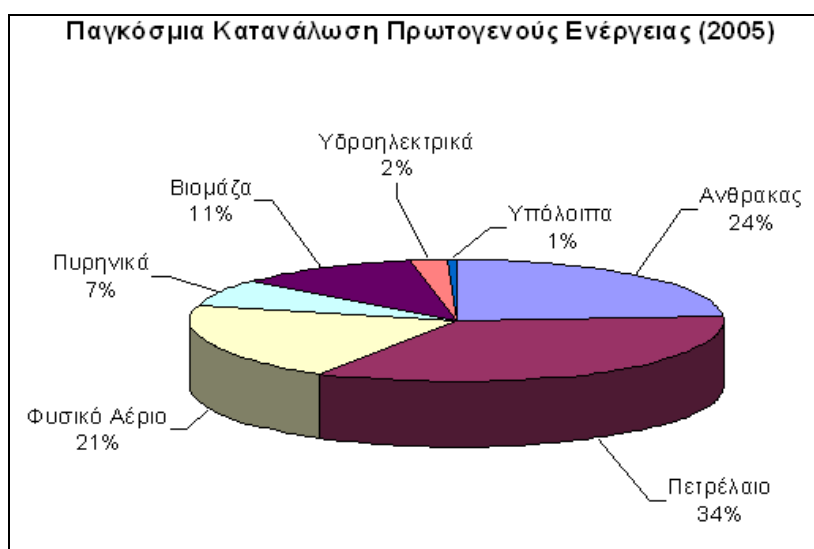
Η παγκόσμια ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας [3] προβλέπεται να επεκταθεί κατά 60% περίπου από το 2002 έως 2030, με μια κατά μέσο όρο ετήσια αύξηση κατά 1,7%. Η ζήτηση θα φθάσει τους 16,5 δισεκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (ΤΙΠ), έναντι 10,3 δισεκατομμυρίων ποδιών το 2002 όπως φαίνεται στον πίνακα 1.1. Από την άλλη πλευρά τα ορυκτά καύσιμα θα εξακολουθήσουν να κυριαρχούν στην παγκόσμια χρήση ενέργειας. Θα αντιπροσωπεύουν περίπου το 85% της αύξησης της παγκόσμιας πρωτογενούς ζήτησης κατά τη διάρκεια 2002-2030. Και μερίδιό τους στη συνολική ζήτηση θα αυξηθεί ελαφρώς, από 80% το 2002 σε 82% το 2030. Το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα παραμείνει στο ίδιο επίπεδο, γύρω στο 4%, ενώ εκείνο της πυρηνικής ενέργειας θα μειωθεί από 7% σε 5%. Το πετρέλαιο θα παραμείνει το μοναδικό μεγαλύτερο καύσιμο στο παγκόσμιο πρωτογενές ενεργειακό μείγμα, μολονότι το μερίδιό του θα υποχωρήσει οριακά, από 36% το 2002 σε 35% το

2030. Η ζήτηση για πετρέλαιο αναμένεται να αυξάνεται κατά 1,6% ανά έτος, από 77MBD το 2002 σε 121MBD σε 2030.

	1971	2002	2010	2030	2002-2030 (%)
Coal	617	502	516	526	0.2
Oil	1893	3041	3610	5005	1.8
Gas	604	1150	1336	1758	1.5
Electricity	377	1139	1436	2263	2.5
Heat	68	237	254	294	0.8
Biomass and waste	641	999	1101	1290	0.9
Other renewable	0	8	13	41	6.2
Total	4200	7075	8267	11,176	1.6

% μέσο ετήσιο ποσοστό αύξησης

Πίνακας 1.1: Παγκόσμια συνολική τελική κατανάλωση (Mtoe) [3].

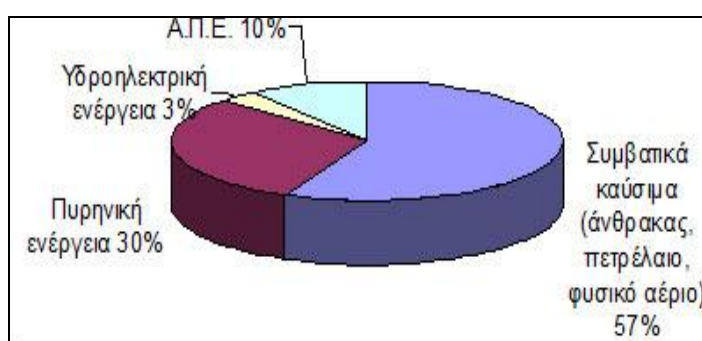


Σχήμα 1.1: Παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο – 2005 [2].

Η απαίτηση για παγκόσμια οικονομική σταθερότητα και ανάπτυξη έχει οδηγήσει στην αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας με ταχύτατους ρυθμούς και έχει καταστήσει τη χρήση της ενέργειας ανάμεσα σε πολλές ανθρώπινες δραστηριότητες που παράγουν αέρια θερμοκηπίου (GHGs) τη μεγαλύτερη πηγή εκπομπών [1]. Η ενέργεια αντιπροσωπεύει πάνω από το 80% των παγκόσμιων ανθρωπογενών αερίων του θερμοκηπίου, με τις εκπομπές να προκύπτουν από την παραγωγή, μετατροπή, χειρισμό, και κατανάλωση όλων των ειδών των ενεργειακών προϊόντων. Ο τομέας της ενέργειας σε μεγάλο βαθμό κυριαρχείται από την άμεση καύση καυσίμων, μια διαδικασία που οδηγεί σε μεγάλες εκπομπές CO₂. Ένα παραπροϊόν της καύσης των καυσίμων, το CO₂, προέρχεται από την οξείδωση του άνθρακα στα καύσιμα. Κάρβουνο και πετρέλαιο είναι καύσιμα με βάση τον άνθρακα που συμβάλλουν καθοριστικά στους 7,2 δισεκατομμύρια τόνους διοξειδίου του άνθρακα που

απελευθερώθηκαν στην ατμόσφαιρα ως αποτέλεσμα των βιομηχανικών δραστηριοτήτων σε παγκόσμια κλίμακα κατά το 2004. Υπεύθυνο για το 95% των εκπομπών που σχετίζονται με την ενέργεια, το CO₂ από την ενέργεια αντιπροσωπεύει, επομένως, περίπου το 80% των παγκόσμιων εκπομπών ανθρωπογενών αερίων του θερμοκηπίου. Το ποσοστό αυτό ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό ανά χώρα, σύμφωνα με τις διαφορετικές εθνικές δομές ενέργειας και με το ισοζύγιο ενέργειας κάθε μιας.

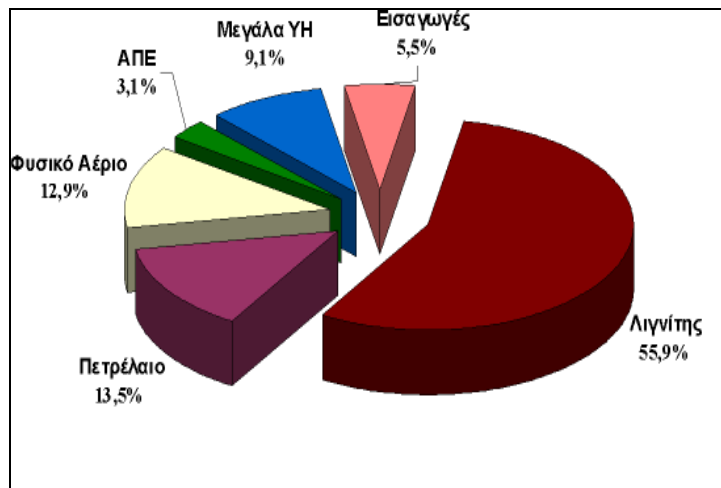
Για παράδειγμα το μεγαλύτερο μέρος των ενεργειακών αναγκών των 27 χωρών μελών της Ε.Ε. καλύπτεται από συμβατικές μορφές ενέργειας [4], που έχουν ως αποτέλεσμα την έκλυση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα και την παραγωγή αέριων ρύπων, που εντείνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Με βάση το ενεργειακό ισοζύγιο του 2005, ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο καλύπτουν περίπου το 57% της πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσης. Το υπόλοιπο ποσοστό καλύπτεται από την πυρηνική ενέργεια σε ποσοστό 30%, την υδροηλεκτρική σε ποσοστό 3% και τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας σε ποσοστό 10% όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 1.2: Ενεργειακό ισοζύγιο στην Ε.Ε. (των 27) – 2005 [4].

Η ενεργειακή κατανάλωση [4] συνδέεται με την οικονομική ανάπτυξη καθώς έχει αποδειχθεί ότι οι οικονομικά ισχυρές χώρες - μέλη της Ε.Ε. (Γερμανία, Γαλλία, Ηνωμένο Βασίλειο κ.λπ.) έχουν υψηλότερη ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με τις υπόλοιπες.

Στη χώρα μας η μόνη αξιοσημείωτη εγχώρια πηγή ορυκτών καυσίμων είναι ο λιγνίτης [2]. Τα βιομηχανικά αξιοποιήσιμα κοιτάσματα λιγνίτη υπολογίζονται σε 4 δισεκατομμύρια τόνους ή 550 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου. Παρόλο που ο Ελληνικός λιγνίτης είναι ένα φτωχής ποιότητας καύσιμο, αποτελεί την κύρια ενεργειακή πηγή της χώρας και χρησιμοποιείται σχεδόν εξ' ολοκλήρου στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Κατά τα τελευταία χρόνια πολλές βιομηχανικές μονάδες της χώρας έχουν στραφεί στο φυσικό αέριο για την παραγωγή ενέργειας και την κάλυψη των αναγκών τους. Παραμένει όμως μεγάλος αριθμός μονάδων που παράγουν θερμότητα ή ηλεκτρισμό με λέβητες υγρών και στερεών καυσίμων.



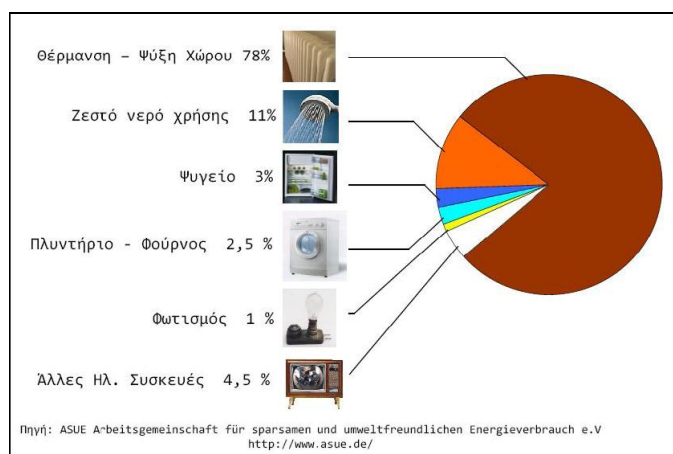
Σχήμα 1.3: Παραγωγή ηλεκτρισμού στην Ελλάδα ανά τύπο μονάδων (2005) [2].

Ενεργειακή κατανάλωση κτιρίων

Σε ημερήσια βάση, η παγκόσμια πρωτογενής ενεργειακή κατανάλωση που σχετίζεται με τα κτίρια [5] ξεπερνάει τα 17 εκατομμύρια βαρέλια πετρελαίου, ποσότητα περίπου ίση με την συνολική παραγωγή των χωρών του ΟΠΕΚ. Στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ο τομέας των κτιρίων απορροφά, κατά μέση τιμή, το 40% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης. Η ανά χώρα κύμανση ποικίλει από 20% για την Πορτογαλία, έως και 45% για την Ιρλανδία, ενώ στην Ελλάδα κυμαίνεται περίπου στο 30%. Τα κτίρια καταναλώνουν ενέργεια για την επίτευξη θερμικής και οπτικής άνεσης εντός των χώρων, καθώς και για την χρήση ειδικών συσκευών. Η τελική ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι της τάξης των 350 Mtoe ανά έτος, χωρίς να υπολογίζεται η συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το μεγαλύτερο μέρος της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων καλύπτεται από το φυσικό αέριο, 116 Mtoe, το πετρέλαιο 99 Mtoe, τον ηλεκτρισμό 91 Mtoe και τα στερεά καύσιμα με 11 Mtoe. Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι αντιστοιχεί περίπου ένας τόνος ισοδύναμου πετρελαίου ανά έτος και ανά κάτοικο για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των κτιρίων στην Ευρώπη. Η διαχρονική μεταβολή κατά τα τελευταία χρόνια είναι ελαφρά αυξητική και η ετήσια αύξηση του ρυθμού κατανάλωσης στα κτίρια είναι ίση με 0,7%.

Ειδικότερα για την Ελλάδα [5,6] η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στα μεγάλα αστικά κέντρα έχει συντελέσει στη δραματική αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας για το δροσισμό των κτιρίων κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η απαιτούμενη ενέργεια για τον δροσισμό ενός κτιρίου στο κέντρο της Αθήνας είναι σχεδόν διπλάσια από την απαιτούμενη στην περιφέρεια της πόλης. Η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων στην Ελλάδα, είναι της τάξης των 4.6

Mtoe, και αντιστοιχούν 0.55 Mtoe ενέργειας ανά κάτοικο το έτος, δηλαδή περίπου το μισό της αντίστοιχης κατανάλωσης στην υπόλοιπη Ευρώπη. Η διαχρονική μεταβολή της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων στην Ελλάδα είναι καθαρά αυξητική και ο ετήσιος ρυθμός αύξησης της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων είναι περίπου 1,8% με τα τελευταία όμως 8 χρόνια η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας στα σπίτια και στους χώρους εργασίας να αγγίζει ρυθμούς του 4% ετησίως. Η σπατάλη ενέργειας των ελληνικών κτιρίων έφθασε το 2005 στο 34% της συνολικής ενέργειας και στο 65% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας με αποτέλεσμα το ποσοστό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που αντιστοιχεί στα κτίρια να υπερβαίνει το 43%. Τη σημαντικότερη ειδική ενεργειακή κατανάλωση για όλα τα κτίρια στην χώρα αποτελεί η θέρμανση των χώρων. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε μια σειρά από παραμέτρους που σχετίζονται με το πλήθος των εγκαταστημένων συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού, το είδος της προστασίας των κτιρίων κατά την διάρκεια του χειμώνα και του θέρους, καθώς και στο γεγονός ότι για τον δροσισμό των χώρων χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια και συσκευές με συντελεστή απόδοσης κατά πολύ μεγαλύτερο της μονάδας. Επίσης σύμφωνα με στοιχεία της ΕΣΥΕ το 2006 το 71% των ελληνικών κτιρίων κατασκευάστηκαν πριν το 1980, ημερομηνία έκδοσης του κανονισμού θερμομόνωσης και είναι θερμικά εντελώς απροστάτευτα ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζουν και χαμηλή ενεργειακή απόδοση καθώς στην πλειοψηφία τους διαθέτουν παλαιές Η/Μ εγκαταστάσεις. Από το σύνολο των ελληνικών κτιρίων το 77% αντιστοιχεί σε κτίρια κατοικιών και το 23% σε κτίρια του τριτογενή τομέα.



Σχήμα 1.4: Κατανομή μιας τυπικής κατανάλωσης ενέργειας ενός σπιτιού στη χώρα μας [7].

1.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Το σοβαρότερο περιβαλλοντικό πρόβλημα [7], που ο πλανήτης μας καλείται να αντιμετωπίσει είναι η αλλαγή του κλίματος, με άμεσο αντίκτυπο στην αύξηση της

θερμοκρασίας της γης (φαινόμενο του θερμοκηπίου). Η θερμοκρασία της γης αυξάνεται ολοένα και περισσότερο λόγω κυρίως της καύσης ορυκτών καυσίμων. Κατά την καύση ορυκτών καυσίμων εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα αέριοι ρύποι (αέρια του θερμοκηπίου - κυριότερος ρύπος είναι το διοξείδιο του άνθρακα CO₂). Τα ποσά εκπομπών αέριων ρύπων αυξάνονται α) από την παραγωγή ενέργειας, β) από τη χρήση ενέργειας στα μέσα μεταφοράς, γ) από τη χρήση ενέργειας στις βιομηχανίες και δ) από τη χρήση ενέργειας στα σπίτια μας. Η θερμοκρασία της γης ήταν σταθερή επί 10.000 χρόνια μέχρι τη βιομηχανική επανάσταση. Από το 1850 και μετά, έτος από το οποίο υπάρχουν σταθερά ακριβείς μετρήσεις, η θερμοκρασία της γης έχει αυξηθεί κατά 0,76 °C . Αν δεν λάβουμε μέτρα, πιθανόν να αυξηθεί περισσότερο και υπολογίζεται κατά 1,8 - 4,0 °C . Κατά τη διάρκεια του αιώνα μας, ενδεχομένως αυτή η αύξηση να φτάσει και τους 6,4 °C εάν δεν ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα.

Φαινόμενο του θερμοκηπίου [4,7]

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου συχνά ταυτίζεται με την κλιματική αλλαγή. Στην πραγματικότητα όμως, το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι ένα φυσικό φαινόμενο με ευεργετικά αποτελέσματα στο κλίμα της Γης. Η Γη έχει ένα φυσικό σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας της. Ορισμένα αέρια της ατμόσφαιρας, γνωστά και ως θερμοκηπιακά αέρια, επιτρέπουν τη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας προς τη Γη, ενώ αντίθετα απορροφούν και επανεκπέμπουν προς το έδαφος ένα μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια της Γης. Αυτή η παγίδευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας από τα συγκεκριμένα αέρια ονομάζεται φαινόμενο του θερμοκηπίου. Τα αέρια αυτά επενεργούν ως θερμική «κουβέρτα» γύρω από τη Γη, διατηρώντας τη θερμοκρασία της. Αν δεν υπήρχε αυτός ο μηχανισμός, η μέση θερμοκρασία της Γης θα ήταν περίπου κατά 35°C χαμηλότερη, δηλαδή -20°C αντί για +15°C που είναι σήμερα, οπότε η ύπαρξη ζωής θα ήταν αδύνατη. Επομένως, το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι θεμελιώδες για την ύπαρξη, διατήρηση και εξέλιξη της ζωής στον πλανήτη μας. Σήμερα είναι γενικά παραδεκτό ότι πολλές ανθρωπογενείς δραστηριότητες συντελούν στην αύξηση της συγκέντρωσης των θερμοκηπιακών αερίων, και ακολούθως στην αύξηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας που παγιδεύεται από την ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα την ενίσχυση του φυσικού φαινομένου του θερμοκηπίου. Οι δύο πιο καταστροφικές συνέπειες των παραπάνω για τον πλανήτη είναι (1) Η αύξηση της στάθμης της θάλασσας λόγω του λιώσιματος των πάγων που είναι συγκεντρωμένοι στους πόλους της γης και (2) Η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της γης που προκαλεί ξηρασίες και μετακίνηση των ζωνών βροχόπτωσης από τον ισημερινό προς βορρά. Έτσι αρχίζει η ερημοποίηση του κατωτέρου τμήματος της εύκρατης ζώνης. Τα κυριότερα αέρια της

ατμόσφαιρας που ευθύνονται για την ενίσχυση του φαινομένου (ανθρωπογενής συνιστώσα) είναι: το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο, το όζον, το υποξείδιο του αζώτου και οι χλωροφθοράνθρακες.

1.4 Ενεργειακό πρόβλημα [1,8]

Οι κύριοι παράγοντες που συνθέτουν ό,τι είναι σήμερα γνωστό ως «ενεργειακό πρόβλημα» παρουσιάζονται και αναλύονται παρακάτω.

Πρώτον, η πηγή ορυκτού καυσίμου περιορίζεται σε ποσότητα. Τα ορυκτά παρήχθησαν με ηλιακή ενέργεια εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια πριν, και όταν εκλείψουν δε θα υπάρξουν περισσότερα. Είναι αλήθεια βέβαια ότι καύσιμα διαμορφώνονται ακόμα αλλά με έναν εντελώς αμελητέο ρυθμό σε σύγκριση με το ρυθμό με τον οποίο εμείς τα καταναλώνουμε. Αρχικά ξεκινήσαμε την κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων με ένα σημαντικό ρυθμό μόνο περίπου 150 χρόνια πριν. Σε παγκόσμια κλίμακα, θα έχουμε ακόμη κάποιο άνθρακα για μερικούς αιώνες, αλλά το φυσικό αέριο και πετρέλαιο θα παρουσιάσουν έλλειμμα σε λίγες μόνο δεκαετίες. Η συγκέντρωση του κόσμου στα μεγάλα αστικά κέντρα, η ένταση των δραστηριοτήτων, τα μέσα μεταφοράς και γενικότερα ο τρόπος ζωής οδήγησαν στην αύξηση των ενεργειακών αναγκών με αποτέλεσμα την τόσο μεγάλη αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας που γίνεται αντιληπτή αν αναλογιστούμε το πλήθος των ηλεκτρικών συσκευών που έχουμε σήμερα στο σπίτι μας σε σχέση με τις συσκευές που είχαμε, ας πούμε, πριν 30 χρόνια, ή τον αριθμό των αυτοκινήτων που κυκλοφορούν τώρα στους δρόμους σε σχέση με τότε. Ενδεικτικά το 1979 ο πληθυσμός της γης ήταν 4 δισεκατομμύρια και κατά μέσο όρο κάθε άνθρωπος δαπανούσε ενέργεια 27 προβιομηχανικών ανθρώπων ενώ προβλέπεται για το 2020 ο πληθυσμός της γης να είναι 9 δισεκατομμύρια περίπου και κάθε άνθρωπος να καταναλώνει ενέργεια 43 προβιομηχανικών ανθρώπων.

Δεύτερον, ακούσιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις προκύπτουν από την εκτεταμένη κλίμακα της χρήσης ορυκτών καυσίμων για τα πάντα, από τη θέρμανση των σπιτιών μας μέχρι την τροφοδοσία των αυτοκινήτων μας. Όταν καίμε άνθρακα, φυσικό αέριο ή πετρέλαιο για την απόκτηση ενέργειας αέριες ενώσεις σχηματίζονται και απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα, οι οποίες στην αρχή θεωρούνταν ασήμαντες λόγω της απεραντοσύνης της ατμόσφαιρας της γης. Αλλά τώρα με έναν συνεχώς αυξανόμενο παγκόσμιο πληθυσμό και βιομηχανοποίηση, αυτό δεν ισχύει πλέον. Η ατμοσφαιρική ρύπανση παράγει προβλήματα υγείας και ακόμη και το θάνατο, και τώρα αρχίζει να αναγνωρίζεται όλο και ευρύτερα ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα απειλούν να παράγουν κλιματικές αλλαγές για ολόκληρη την υδρόγειο όπως είδαμε και στην παράγραφο 1.3.

Παρουσιάζεται λοιπόν ολοένα και επιτακτικότερη η ανάγκη καθιέρωσης ενός νέου σχεδίου δράσης σε τοπικό και διεθνές επίπεδο ώστε να επιτευχθεί άμβλυση του προβλήματος λόγω της αστάθειας που έχει δημιουργήσει στις τιμές των πετρελαιοειδών τα τελευταία χρόνια, της ανάγκης για διασφάλιση του ενεργειακού εφοδιασμού των χωρών, της αλλαγής των κλιματικών συνθηκών του πλανήτη, της αύξησης της ενεργειακής εξάρτησης από τις εισαγωγές σε συνδυασμό με την έκρηξη της ενεργειακής ζήτησης των αναδυόμενων οικονομιών, ιδίως της Κίνας και της Ινδίας.

Προς αυτή την κατεύθυνση επομένως κινούνται και οι νέες τεχνολογίες στον ενεργειακό τομέα που βασίζονται κυρίως στις καθαρές τεχνολογίες ορυκτών καυσίμων και στην ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σαφώς μπορούν να συνεισφέρουν ως ένα βαθμό τόσο στην ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού όσο και στην προστασία του περιβάλλοντος όπως θα δούμε στη συνέχεια.

1.5 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας – Ηλιακή ενέργεια [2,9,10]

Οι ήπιες μορφές ενέργειας (ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), ή νέες πηγές ενέργειας, ή πράσινη ενέργεια) είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Ο όρος «ήπιες» αναφέρεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους. Καταρχάς, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερον, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, πολύ «φιλικές» στο περιβάλλον, που δεν αποδεδμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Χρησιμοποιούνται είτε άμεσα (κυρίως για θέρμανση) είτε μετατρέπόμενες σε άλλες μορφές ενέργειας (κυρίως ηλεκτρισμό ή μηχανική ενέργεια). Υπολογίζεται ότι το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό απ' τις ήπιες μορφές ενέργειας είναι πολλαπλάσιο της παγκόσμιας συνολικής κατανάλωσης ενέργειας.

Είδη ήπιων μορφών ενέργειας

- Αιολική ενέργεια η οποία δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, γιατί η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μια περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό τους ανέμους
- Υδροηλεκτρική ενέργεια η οποία προκύπτει από τη μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού όταν βρίσκεται σε περιοχές με μεγάλο

υπόμετρο αρχικά σε κινητική καθώς ρέει προς χαμηλότερες περιοχές και τέλος σε ηλεκτρική με τη χρήση υδραυλικών τουρμπίνων

- Βιομάζα η οποία ουσιαστικά είναι αποθηκευμένη ηλιακή ενέργεια που δεσμεύτηκε από τα φυτά κατά τη φωτοσύνθεση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας
- Γεωθερμική ενέργεια η οποία προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται απ' τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια, π.χ. στους θερμοπίδακες ή στις πηγές ζεστού νερού.
- Ενέργεια από παλίρροιες η οποία προκύπτει με εκμετάλλευση της βαρύτητας του Ήλιου και της Σελήνης, που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού. Το νερό αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει και για να ξανακατέβει αναγκάζεται να περάσει μέσα από μια τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρισμό.
- Ενέργεια από κύματα η οποία προκύπτει με εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας των κυμάτων της θάλασσας.
- Ενέργεια από τους ωκεανούς η οποία προκύπτει λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων.
- Ηλιακή ενέργεια

Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Τέτοιες είναι το φως ή φωτεινή ενέργεια, η θερμότητα ή θερμική ενέργεια καθώς και διάφορες ακτινοβολίες ή ενέργεια ακτινοβολίας. Ο ήλιος είναι ένας τεράστιος πυρηνικός αντιδραστήρας. Η θερμοκρασία των 15.000.000 °C που επικρατεί στο εσωτερικό του δημιουργεί τις κατάλληλες συνθήκες για το φαινόμενο της πυρηνικής σύντηξης. Αποτέλεσμα της αυξημένης (λόγω πολύ υψηλών θερμοκρασιών) κινητικότητας των ηλεκτρονίων μεταξύ των ενεργειακών στοιβάδων είναι η εκπομπή τεραστίων ποσοτήτων ενέργειας με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών. Από τη συνολική ενέργεια που εκπέμπει ο ήλιος στο διαστημικό χώρο που τον περιβάλλει μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό, το 1:2.000.000.000, προσπίπτει στη Γη. Παρ' όλα αυτά είναι 15.000 φορές περισσότερη από την παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας. Αν τη συγκρίνουμε με τα συνολικά αποθέματα των καύσιμων απολιθωμάτων της Γης παρατηρούμε ότι αυτά ισοδυναμούν με την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στη Γη σε διάστημα 15 ημερών. Στη συνέχεια συνοψίζονται ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ηλιακής ενέργειας.

Πλεονεκτήματα

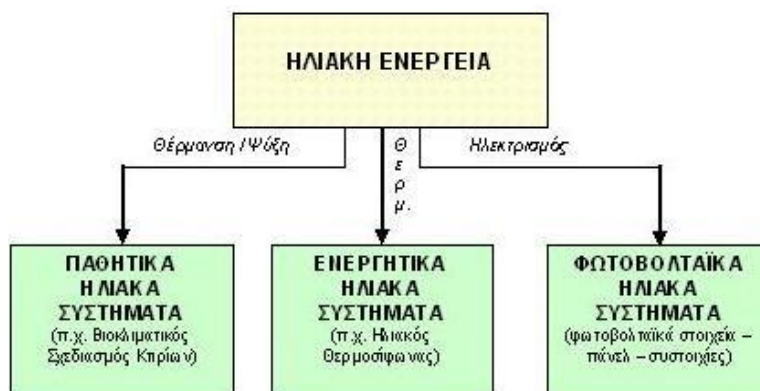
- Μηδενική ρύπανση
- Αθόρυβη λειτουργία
- Αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής
- Απεξάρτηση από τροφοδοσία καυσίμων για την παραγωγή της ενέργειας (μπαταρίες)
- Δυνατότητα επέκτασης
- Μηδενικό κόστος παραγωγής ενέργειας - ελάχιστη συντήρηση

Μειονεκτήματα

- Υψηλό κόστος κατασκευής
- Έλλειψη επιδοτήσεων
- Προβλήματα στην αποθήκευση

1.6 Συστήματα με βάση την ηλιακή ενέργεια

Όσον αφορά τώρα την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, μπορούμε να την χωρίσουμε [11] σε τρεις βασικές κατηγορίες εφαρμογών: τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, και τα φωτοβολταϊκά συστήματα όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα. Τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, (για παράδειγμα οι ηλιακοί θερμοσίφωνες) ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα.



Σχήμα 1.5: Συστήματα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας [12].

Γενικά λοιπόν μπορούμε να πούμε ότι στην εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας ακολουθούμε δύο δρόμους [10]:

- Την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα
- Την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική

1.6.1 Παθητικά ηλιακά συστήματα

Εν γένει ονομάζουμε παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης [13] τα δομικά στοιχεία του κτιρίου, που, αξιοποιώντας τις αρχές της φυσικής (τους νόμους μεταφοράς θερμότητας) συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια, την αποθηκεύουν υπό μορφή θερμότητας και τη διανέμουν στο χώρο. Η συλλογή της ηλιακής ενέργειας βασίζεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και ειδικότερα, στην είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω του γυαλιού ή άλλου διαφανούς υλικού και τον εγκλωβισμό της προκύπτουσας θερμότητας στο εσωτερικό του χώρου που καλύπτεται από το γυαλί.

Αναγκαία προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία των παθητικών ηλιακών συστημάτων ώστε να αξιοποιήσουν όσο το δυνατό περισσότερη ηλιακή ενέργεια είναι ένας κατάλληλος σχεδιασμός του κτιρίου [14]. Αυτό σημαίνει ότι το κέλυφος πρέπει να επιτρέπει:

- Τη μέγιστη ηλιακή συλλογή
- Τη μέγιστη θερμοχωρητικότητα
- Τις ελάχιστες θερμικές απώλειες

Η λειτουργία [14] των παθητικών συστημάτων βασίζεται σε 3 μηχανισμούς:

- Το φαινόμενο του θερμοκηπίου (συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας και διατήρησή της στο εσωτερικό του κτιρίου για θέρμανση των χώρων)
- Τη θερμική υστέρηση των υλικών (θερμοχωρητικότητα)
- Τις αρχές μετάδοσης θερμότητας (την ιδιότητα της θερμότητας να μεταφέρεται από το θερμό στο κρύο αντικείμενο)

Είδη παθητικών ηλιακών συστημάτων [14] για θέρμανση:

- Άμεσου κέρδους
- Έμμεσου κέρδους
- Απομονωμένου κέρδους

1.6.1.1. Άμεσου κέρδους [13,15]

Στα κτίρια άμεσου κέρδους ο ήλιος εισάγεται άμεσα στους κατοικημένους χώρους μέσα από συμβατικά παράθυρα, φεγγίτες, κλπ. Η μάζα του οικοδομήματος του κτιρίου ενεργεί η ίδια ως το απαραίτητο υλικό θερμικής αποθήκευσης, αποθηκεύοντας την περίσσεια ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια των ηλιόλουστων ωρών και απελευθερώνοντας αυτή κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των κτιρίων άμεσου κέρδους είναι οι εξής:

- ο προσανατολισμός και η θέση των ηλιακών υαλοπινάκων. Τα ηλιακά τζάμια εξ' ορισμού θα πρέπει να προσανατολίζονται τη χειμερινή περίοδο προς τον ήλιο το οποίο όμως καθορίζεται ως ένα βαθμό και από τον προσανατολισμό

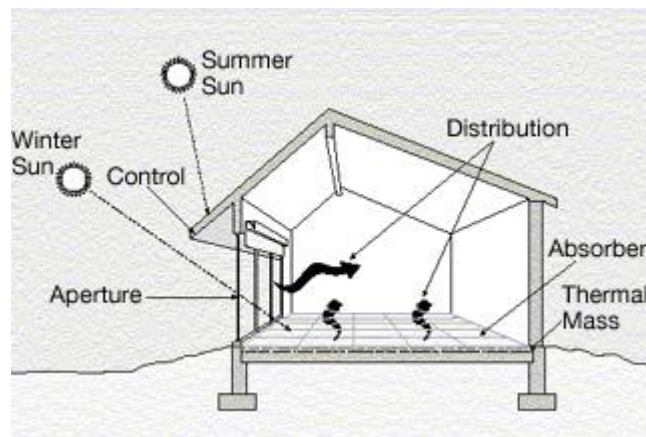
του ίδιου του κτιρίου. Γενικά γνωρίζουμε ότι τα νότια ανοίγματα δέχονται την περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία το χειμώνα και, με το κατάλληλο οριζόντιο σκίαστρο, ελάχιστη το καλοκαίρι. Ανοίγματα τώρα στο βορρά βοηθούν στην καλύτερη ποιότητα φωτισμού στο χώρο γιατί δέχονται μόνο διάχυτο και όχι άμεσο φως, συνιστώνται για το καλοκαίρι, αλλά πρέπει να είναι περιορισμένης επιφάνειας γιατί παρουσιάζουν μεγάλες απώλειες και ελάχιστα κέρδη το χειμώνα. Ανατολικά και δυτικά ανοίγματα τέλος έχουν τη χειρότερη συμπεριφορά όλο το χρόνο, γι' αυτό συνιστώνται μόνο όπου είναι απαραίτητα για λόγους φωτισμού ή θέας. Όσον αφορά τώρα κτίρια με δυσμενείς προσανατολισμούς και με ελάχιστη πρόσβαση στο άμεσο ηλιακό φως, η χρήση φεγγιτών ή κατάλληλων ανοιγμάτων στην οροφή μπορούν να καταστήσουν δυνατή την παροχή άμεσου κέρδους.

- το μέγεθος και ο τύπος των ηλιακών υαλοπινάκων. Αυξάνοντας την επιφάνεια των ηλιακών υαλοπινάκων σε κτίρια άμεσου κέρδους αυξάνει αναλογικά, το ηλιακό κέρδος κατά τη διάρκεια της ημέρας το οποίο είναι επιθυμητό σε περιόδους θέρμανσης αρκεί η εσωτερική θερμοκρασία να μην υπερβεί τις συνθήκες θερμικής άνεσης το χειμώνα κατά τις ηλιόλουστες μέρες, αλλά αυξάνει επίσης και την απώλεια θερμότητας μέσω της περιοχής των υαλοπινάκων κατά τη διάρκεια των χειμωνιάτικων νυχτών και μάλιστα αναλογικά. Επίσης παρατηρείται και μια ανεπιθύμητη αύξηση της θερμότητας κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού που μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα υπερθέρμανσης και να οδηγήσει στην ανάγκη εγκατάστασης μηχανικού κλιματισμού. Η σχέση μεταξύ αυτών των διαφορετικών θερμικών επιδράσεων εξαρτάται από τη σχετική ένταση των χειμερινών και των καλοκαιρινών περιόδων σε μια συγκεκριμένη περιοχή, από τις ιδιότητες και τα στοιχεία των ηλιακών υαλοπινάκων, τη διαθεσιμότητα νυχτερινής μόνωσης κατά τη διάρκεια του χειμώνα, την έκθεση στον ήλιο και τη διαθεσιμότητα της ημερησίας μόνωσης (πέραν της σκίαση) κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Ο τύπος τώρα του ηλιακού υαλοπίνακα επιλέγεται από σχετικά εγχειρίδια με βάση το κλάσμα της ηλιακής εξοικονόμησης (SSF), το κλίμα, το λόγο φορτίου του συλλέκτη (LCR) και τη διαθεσιμότητα της νυχτερινής μόνωσης.
- η ποσότητα και οι σχεδιαστικές λεπτομέρειες της διαθέσιμης μάζας για θερμική αποθήκευση. Η θερμική μάζα αποθηκεύει ενέργεια τις ηλιόλουστες ώρες για να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της νύχτας. Από την πλευρά του ημερήσιου κύκλου, μόνο τα περιορισμένα πάχη των στοιχείων αποθήκευσης είναι χρήσιμα. Όσον αφορά στη συνέχεια τα υλικά για θερμική αποθήκευση τα

συνηθέστερα και οικονομικώς αποδοτικά είναι τα υλικά τοιχοποιίας όπως σκυρόδεμα, τούβλο, πέτρα, κλπ, η θερμοχωρητικότητα των οποίων είναι συνάρτηση της ειδικής θερμότητας που είναι παρόμοια σχεδόν για το σύνολο των υλικών τοιχοποιίας και περίπου ίση με $860 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ και της μάζας που είναι ανάλογη με το συνολικό όγκο και την πυκνότητα του υλικού. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα των στοιχείων θερμικής αποθήκευσης εξαρτάται από το ρυθμό με τον οποίο η θερμότητα απορροφάται και αργότερα από το ρυθμό με τον οποίο δίνεται πίσω στον εσωτερικό αέρα που με τη σειρά του εξαρτάται από την επιφάνεια των στοιχείων αποθήκευσης που εκτίθενται στον εσωτερικό χώρο, καθώς και από τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Για την επιφάνεια των στοιχείων θερμικής αποθήκευσης έχει δειχθεί ότι θα πρέπει να είναι τουλάχιστον έξι φορές την περιοχή του ηλιακού υαλοπίνακα, ανεξαρτήτως του πάχους.

- ο συντελεστής απωλειών θερμότητας του κτιρίου ως σύνολο. Η πραγματική εξοικονόμηση ενέργειας ενός παθητικού ηλιακού συστήματος συγκεκριμένου μεγέθους, η ηλιακή εξοικονόμηση, και το κλάσμα ηλιακής εξοικονόμησης που επιτυγχάνεται αυξάνεται καθώς το κτίριο είναι από υψηλότερο συντελεστή απώλειας θερμότητας (J/ημέραK), και συγκεκριμένα δηλαδή με χειρότερη μόνωση του κελύφους. Ο λόγος είναι ότι κατά τη διάρκεια περιόδων όταν ένα εξαιρετικά μονωμένο κτίριο θα υπερθερμαινόταν (δηλαδή, η εισροή ηλιακής ενέργειας θα πρέπει να σταματήσει ή η πλεονάζουσα θερμότητα θα πρέπει να αεριστεί), ένα κακώς μονωμένο κτίριο μπορεί να κάνει χρήση ακόμα της ηλιακής ενέργειας.
- η διάταξη των επίπλων στα ηλιακά δωμάτια. Σε κτίρια με άμεσο ηλιακό κέρδος μέσα από τα παράθυρα τα δάπεδα θεωρούνται συχνά το προφανές στοιχείο του κτιρίου που παρέχει την κύρια θερμική αποθήκευση διότι είναι περισσότερο εκτεθειμένο στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Στην πραγματικότητα όμως τα έπιπλα και τα χαλιά εμποδίζουν ένα μεγάλο μέρος της επιφάνειας του δαπέδου από τον ήλιο, μονώνοντας αποτελεσματικά το πάτωμα που είναι από κάτω από την άμεση ηλιακή ενέργεια μ' αποτέλεσμα ένα μικρό κλάσμα της συνολικής επιφάνειας του δαπέδου τελικά να εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία. Γι' αυτό το λόγο λοιπόν προσοχή πρέπει να δοθεί σε όλες επιφάνειες που περιβάλλουν τον εσωτερικό χώρο λόγω των ικανοτήτων τους για θερμική αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας διασκορπισμένης από τις ακτινοβολούμενες επιφάνειες.

- η θερμική σύνδεση μεταξύ των ηλιακών και μη ηλιακών δωματίων. Προκειμένου να επιτευχθεί υψηλό ποσοστό ηλιακής κάλυψης μέσω άμεσου κέρδους είναι απαραίτητο να υπάρχει αποτελεσματική κυκλοφορία αέρα μεταξύ ηλιακών και μη ηλιακών χώρων. Μπορεί λοιπόν σε ορισμένες περιπτώσεις να είναι αναγκαία η χρήση ανεμιστήρα για την ενίσχυση της κυκλοφορίας μέσω των ανοιγμάτων στους τοίχους μεταξύ των δωματίων καθώς και μέσω αγωγών ή ψευδοροφών αν και οι μικρές διαφορές θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα δυσχεραίνουν τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή.



Σχήμα 1.6: Στοιχεία παθητικού ηλιακού σχεδιασμού όπως φαίνονται σε εφαρμογή άμεσου κέρδους [16].

1.6.1.2. Έμμεσου κέρδους [13,15]

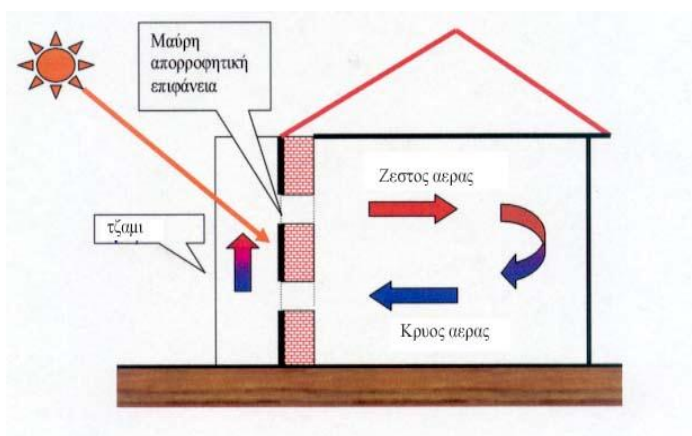
Συστήματα έμμεσου κέρδους είναι τα παθητικά ηλιακά συστήματα που συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια και την αποδίδουν με έμμεσο τρόπο στους εσωτερικούς χώρους του κτιρίου μέσω είτε δομικών στοιχείων είτε ανοιγμάτων διαφόρων ειδών (π.χ. θυρίδων, αγωγών κ.α.). Συνήθως προσαρτώνται σε νότιες όψεις κτιρίων (συνιστάται μέχρι 30° απόκλιση από το Νότο).

Τα συστήματα έμμεσου κέρδους διακρίνονται εν γένει στις εξής κατηγορίες:

- Τοίχος – συλλέκτης θερμικής αποθήκευσης. Οι τοίχοι - συλλέκτες θερμικής αποθήκευσης συνδυάζουν σε ένα στοιχείο κτιρίου τις λειτουργίες της συλλογής ηλιακής ενέργειας, της αποθήκευσης θερμότητας και της μεταφοράς θερμότητας στο εσωτερικό. Οι τοίχοι θερμικής αποθήκευσης αποτελούνται από υαλοπίνακα τοποθετημένο μπροστά από έναν ογκώδη τοίχο κατασκευασμένο από υλικά υψηλής θερμοχωρητικότητας όπως σκυρόδεμα, πέτρα, συμπαγή τούβλα, ή δοχεία που περιέχουν νερό ή άλλο υλικό (υλικό αλλαγής φάσης) με ένα κενό αέρος μεταξύ τους. Η εξωτερική τους επιφάνεια είναι σκούρου χρώματος για αύξηση της απορρόφησης της ηλιακής

ακτινοβολίας, η οποία στη συνέχεια μεταδίδεται με αγωγή, ακτινοβολία και συναγωγή (μεταφορά μέσω του αέρα) στον εσωτερικό χώρο. Οι τοίχοι θερμικής αποθήκευσης μπορεί να είναι:

- απλοί τοίχοι μάζας (μη θερμοσιφωνικής ροής, χωρίς θυρίδες) είτε συμπαγούς κατασκευής, είτε αποτελούμενοι από δοχεία νερού ή με υλικά αλλαγής φάσης όπως θα δούμε αναλυτικά και παρακάτω
- τοίχοι μάζας θερμοσιφωνικής ροής (Trombe - Michel) όπου μέρος της συλλεγόμενης θερμότητας στο διάκενο μεταξύ τοίχου και υαλοπίνακα μεταφέρεται μέσω θυρίδων στον εσωτερικό χώρο με φυσική κυκλοφορία του αέρα. Οι θυρίδες του τοίχου βρίσκονται στο άνω και κάτω τμήμα του όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα, που μας δίνει μια οπτική απεικόνιση της λειτουργίας του τοίχου Trombe.



Σχήμα 1.7: Λειτουργία τοίχου Trombe [10].

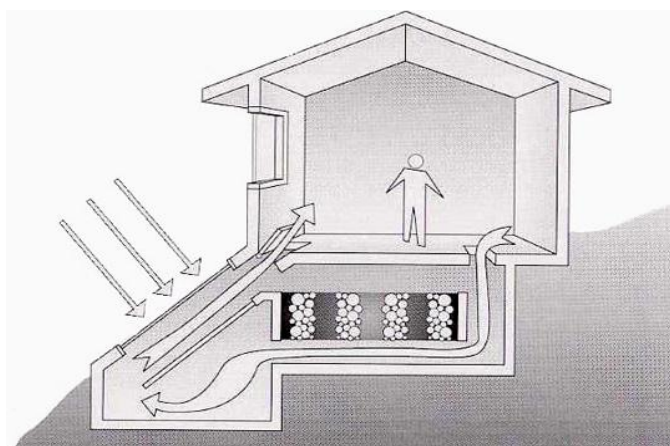
- Ηλιακός χώρος - θερμοκήπιο. Είναι ενδιάμεσο χρησιμοποιήσιμο περιβάλλον μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού του κτιρίου με μεγάλο ποσοστό γυάλινης επιφάνειας το οποίο μοιράζεται μόνο έναν τοίχο με το υπόλοιπο κτίριο. Συμβάλλει στη θερμική άνεση στους βασικούς χώρους καθώς απομονώνει τους κύριους χώρους από τις ακραίες καταστάσεις έκθεσης, μειώνοντας έτσι πιθανή θερμοκρασιακή διακύμανση και την αντηλία ενώ παράλληλα αυξάνει τις δυνατότητες συλλογής θερμότητας μιας δεδομένης πρόσοψης, με το να επιτρέπει μια μεγαλύτερη περιοχή από υαλοπίνακες από ό,τι είναι δυνατόν και επιθυμητό με άμεσο κέρδος.
- Ηλιακό αίθριο. Περιλαμβάνει μια οριζόντια αδιαφανή οροφή και περιβάλλεται σε όλες τις πλευρές από δωμάτια. Η ηλιακή ενέργεια συλλέγεται από το γυάλινο στοιχείο της οροφής, συσσωρεύεται στον εσωτερικό χώρο του

αίθριου και μέρος της μεταφέρεται στους περιβάλλοντες εσωτερικούς χώρους του κτιρίου ή των κτιρίων μέσω ανοιγμάτων, ενώ μέρος αποθηκεύεται στα δομικά στοιχεία. Αξιοσημείωτη είναι τέλος η συνεισφορά των αίθριων, είτε ανοιχτά, είτε με κάλυψη, στη βελτίωση των συνθηκών φυσικού φωτισμού, ιδιαίτερα σε κτίρια μεγάλης επιφάνειας.

1.6.1.3. Απομονωμένου κέρδους [13,14,16]

Στα συστήματα απομονωμένου κέρδους η επιφάνεια ηλιοσυλλογής δεν βρίσκεται σε επαφή με τον χώρο που επιθυμούμε να θερμάνουμε. Μεταξύ αυτής της επιφάνειας και του χώρου διαβίωσης υπάρχει ένας μηχανισμός μετάδοσης της θερμότητας όπως για παράδειγμα ένας ανεμιστήρας. Στα πραγματικά παθητικά ηλιακά συστήματα η μετάδοση της θερμότητας γίνεται με μη μηχανικά μέσα και βασίζεται κυρίως στην άνωση, μεταγωγή και ακτινοβολία της θερμότητας.

Παράδειγμα απομονωμένου κέρδους είναι το θερμοσιφωνικό πανέλο με rock bed. Το σύστημα αυτό αποτελείται από υαλοπίνακα, διάκενο αέρα και μεταλλική σκουρόχρωμη επιφάνεια, που φέρει μόνωση εξωτερικά και τοποθετείται εν γένει χαμηλότερα από τους κύριους χώρους του κτιρίου με κλίση 40° περίπου. Η θερμότητα που συλλέγεται στο διάκενο αέρα, μεταφέρεται μέσω αγωγών με θερμοσιφωνική ροή είτε απ' ευθείας στους χώρους του κτιρίου, είτε σε αποθήκη θερμότητας (rock bed) απ' όπου αποδίδεται σταδιακά στους χώρους όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.



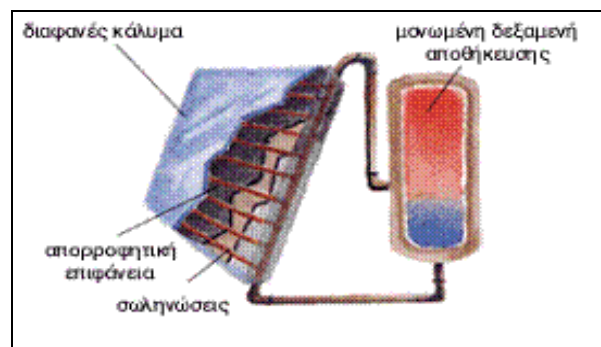
Σχήμα 1.8: Θερμοσιφωνικό πανέλο εκτός κτιριακού περιβλήματος [13].

Γενικά ένα σύστημα απομονωμένου κέρδους περιλαμβάνει την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για μεταφορά της θερμότητας με παθητικό τρόπο από ή προς το χώρο διαβίωσης χρησιμοποιώντας ένα ρευστό όπως νερό ή αέρα με φυσική ή εξαναγκασμένη συναγωγή. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι: ο θερμοσίφοντας, το σύστημα του Barra, η ηλιακή καμινάδα κ.ο.κ..

1.6.2 Ενεργητικά ηλιακά συστήματα [2,8,17]

Ονομάζονται τα συστήματα που συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία, και στη συνέχεια τη μεταφέρουν με τη μορφή θερμότητας σε νερό, αέρα ή σε κάποιο άλλο ρευστό. Ειδικότερα η "καρδιά" ενός ενεργητικού ηλιακού συστήματος είναι ο ηλιακός συλλέκτης. Ο συλλέκτης αυτός περιλαμβάνει μια μαύρη, συνήθως επίπεδη μεταλλική επιφάνεια, η οποία απορροφά την ακτινοβολία και θερμαίνεται. Πάνω από την απορροφητική επιφάνεια βρίσκεται ένα διαφανές κάλυμμα (συνήθως από γυαλί ή πλαστικό) που παγιδεύει τη θερμότητα (φαινόμενο θερμοκηπίου). Σε επαφή με την απορροφητική επιφάνεια τοποθετούνται λεπτοί σωλήνες μέσα στους οποίους διοχετεύεται κάποιο υγρό, που απάγει την θερμότητα και τη μεταφέρει, με τη βοήθεια μικρών αντλιών (κυκλοφορητές), σε μια μεμονωμένη δεξαμενή αποθήκευσης. Επομένως τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα αποτελούνται από δύο βασικά μέρη:

- Το τμήμα συλλογής (οι ηλιακοί συλλέκτες, η επιφάνεια απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας).
- Το τμήμα αποθήκευσης (η δεξαμενή αποθήκευσης του νερού) που συνήθως διαθέτει και ηλεκτρική αντίσταση με θερμοστάτη, για να μπορεί να παράγεται ζεστό νερό και σε περιόδους μικρής ή μηδενικής ηλιοφάνειας.



Σχήμα 1.9: Τυπικό ενεργητικό σύστημα [8].

Ανάλογα με το κύκλωμα κυκλοφορίας του θερμαινόμενου μέσου τα ενεργητικά συστήματα διακρίνονται σε ανοικτού και κλειστού κυκλώματος. Στα ανοικτού κυκλώματος έχουμε απευθείας θέρμανση του νερού χρήσης δηλαδή το θερμαινόμενο μέσο είναι το ίδιο το νερό που θα χρησιμοποιήσουμε. Ενώ στα κλειστού κυκλώματος η θέρμανση του νερού χρήσης γίνεται έμμεσα δηλαδή το θερμαινόμενο μέσο κυκλοφορεί σε ιδιαίτερο κύκλωμα το οποίο θερμαίνει το νερό που θα χρησιμοποιήσουμε χωρίς να γίνεται ανάμιξή τους, μέσω εναλλάκτη θερμότητας. Οι ηλιακοί θερμοσίφωνες ανοικτού κυκλώματος είναι απλούστεροι και φθηνότεροι, έχουν όμως προβλήματα σε χαμηλές θερμοκρασίες (παγετούς) γιατί δεν μπορούμε να τους προσθέσουμε αντιψυκτικά μίγματα (το θερμαινόμενο μέσο είναι το ίδιο το νερό

χρήσης). Στους ηλιακούς θερμοσίφωνες κλειστού κυκλώματος μπορεί το θερμαινόμενο μέσο να είναι και άλλο ρευστό (π.χ. λάδι). Αν είναι νερό, έχει αντιψυκτικά και αντιδιαβρωτικά πρόσθετα για προστασία της συσκευής. Επίσης ανάλογα με τον αριθμό των ενεργειακών πηγών που μπορούν να εκμεταλλευτούν χωρίζονται σε διπλής και τριπλής ενέργειας.

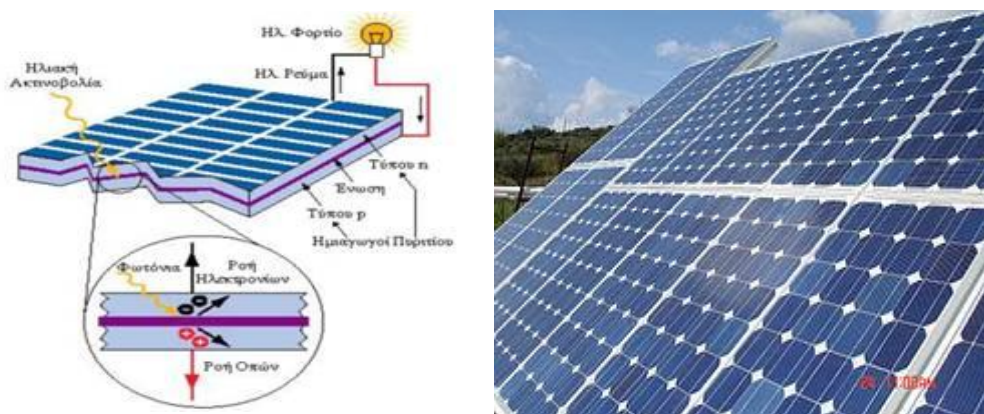
Η πλέον διαδεδομένη εφαρμογή παραγωγής ζεστού νερού χρήσης είναι ο ηλιακός θερμοσίφωνα. Λειτουργεί εκμεταλλευόμενος το φυσικό φαινόμενο της ροής των ρευστών λόγω διαφοράς θερμοκρασίας (διαφοράς πυκνότητας), γνωστό και σαν αρχή του θερμοσίφωνα. Έτσι πετυχαίνεται με φυσικό τρόπο χωρίς κυκλοφορητή (αντλία) συνεχής ροή του θερμαινόμενου μέσου, από το θερμότερο σημείο (ηλιακοί συλλέκτες) προς το ψυχρότερο (δεξαμενή νερού), μέχρις ότου τα δύο σημεία να αποκτήσουν παρόμοιες θερμοκρασίες. Για να είναι όμως αυτό δυνατό πρέπει το ψυχρότερο σημείο να είναι ψηλότερα από το θερμότερο σημείο και για τον λόγο αυτό σε όλους τους ηλιακούς θερμοσίφωνες η δεξαμενή αποθήκευσης είναι πάντα ψηλότερα από τους ηλιακούς συλλέκτες. Η συνολική απόδοση του ηλιακού θερμοσίφωνα εξαρτάται κι απ' τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, τη νεφοκάλυψη και την αποτελεσματικότητα της θερμικής μόνωσης του συστήματος. Μια ακόμα εφαρμογή είναι ο συνδυασμός παραγωγής ζεστού νερού χρήσης και θέρμανσης χώρων με ενεργητικά ηλιακά συστήματα.

Ενεργητικά ηλιακά συστήματα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε επίσης για ψύξη χώρων καθώς και γενικότερα οπουδήποτε απαιτείται θερμότητα χαμηλής θερμοκρασιακής στάθμης (όπως στη θέρμανση / ψύξη χώρου, στα συστήματα αφαλάτωσης νερού, στη θέρμανση νερού πισίνας κ.ο.κ.).

1.6.3 Φωτοβολταϊκά ηλιακά συστήματα [2,8,18]

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, αντλώντας ενέργεια από τον ήλιο. Η λειτουργία τους βασίζεται στο γεγονός ότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι δυνατό να αλλάξει τις ιδιότητες ορισμένων υλικών (ημιαγωγών) παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του “φωτοβολταϊκού φαινομένου”, σύμφωνα με το οποίο το ηλιακό φως που προσπίπτει σε έναν ημιαγωγό δυο στρωμάτων δημιουργεί ηλεκτρικό δυναμικό μεταξύ τους. Η τάση αυτή μπορεί να ενεργοποιήσει μια, ανάλογης τάσης και ισχύος, συσκευή ή να διανεμηθεί στο ηλεκτρικό σύστημα. Το σύνολο των φωτοβολταϊκών στοιχείων που συνδέονται ηλεκτρονικά μεταξύ τους ονομάζεται φωτοβολταϊκή γεννήτρια και το σύνολο των φωτοβολταϊκών γεννητριών συνδεδεμένων μεταξύ τους ονομάζεται φωτοβολταϊκή συστοιχία. Η φωτοβολταϊκή συστοιχία αποτελεί το βασικότερο μέρος του φωτοβολταϊκού συστήματος και συνοδεύεται από κατάλληλα ηλεκτρονικά κυκλώματα

για έλεγχο και διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας, καθώς και από σύστημα αποθήκευσης (μπαταρίες). Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται με τον τρόπο αυτό μπορεί να καλύψει ανάγκες όπως λειτουργία επιστημονικών συσκευών (δορυφόρων), κίνηση ελαφρών αυτοκινήτων (ηλιακά αυτοκίνητα), λειτουργία φάρων, ή την κάλυψη έστω και μέρους των ενεργειακών αναγκών μικρών κατοικιών όπως φωτισμός, τηλεπικοινωνίες, ψύξη κτλ.



Σχήμα 1.10: Σχηματική απεικόνιση του φωτοβολταϊκού φαινομένου (αριστερή εικόνα) [8] και μια τυπική φωτοβολταϊκή συστοιχία (δεξιά εικόνα) [18].

Στην σημερινή εποχή ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου βρίσκεται στο 13 – 19%, ο οποίος, συγκρινόμενος με την απόδοση άλλου συστήματος (συμβατικού, αιολικού, υδροηλεκτρικού κλπ.), παραμένει ακόμη αρκετά χαμηλός. Αυτό σημαίνει ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα καταλαμβάνει μεγάλη επιφάνεια προκειμένου να αποδώσει την επιθυμητή ηλεκτρική ισχύ. Η απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση συστημάτων περιστροφής των πλαισίων τα οποία ακολουθούν την κίνηση του ήλιου, ωστόσο η εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων είναι δυνατόν να αυξήσει σημαντικά το κόστος της επένδυσης.

1.7 Μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας [20]

Το πρόβλημα ενέργειας όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 1.6 αποτελεί τη βασική κινητήρια δύναμη πίσω από τις προσπάθειες για αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των διαφόρων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μια από τις επιλογές εκτός από την αναζήτηση νέων ανανεώσιμων πηγών είναι η ανάπτυξη συσκευών αποθήκευσης που είναι εξίσου σημαντική.

Η αποθήκευση της ενέργειας όχι μόνο μειώνει την έλλειψη ισορροπίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης, αλλά επίσης βελτιώνει τις επιδόσεις και την αξιοπιστία των συστημάτων ενέργειας και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της ενέργειας.

Οδηγεί σε εξοικονόμηση των βασικών καυσίμων και καθιστά το σύστημα πιο αποδοτικό με τη μείωση της σπατάλης της ενέργειας και του κεφαλαίου. Για παράδειγμα, η αποθήκευση θα βελτιώνει την απόδοση ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την εξομάλυνση του φορτίου και αυτή η αύξηση της αποδοτικότητας θα οδηγούσε σε εξοικονόμηση ενέργειας και χαμηλότερο κόστος παραγωγής. Οι διάφορες μορφές ενέργειας που μπορούν να αποθηκευτούν περιλαμβάνουν τη μηχανική, την ηλεκτρική και τη θερμική ενέργεια.

1.7.1 Αποθήκευση μηχανικής ενέργειας [19,20]

Τα συστήματα αποθήκευσης μηχανικής ενέργειας περιλαμβάνουν αποθήκευση ενέργειας με βαρύτητα, αποθήκευση ενέργειας με άντληση νερού (PHPS), αποθήκευση ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα (CAES) και με σφονδύλους.

Η αποθήκευση ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα (CAES) περιγράφει ένα σύστημα που αποθηκεύει δυναμική ενέργεια μέσω της αποθήκευσης του συμπιεσμένου αερίου που αντλείται σε φυσικά υπόγεια πετρώματα ή μεγάλες δεξαμενές αποθήκευσης. Ένα σύστημα CAES χρησιμοποιεί ένα συμπιεστή κινούμενο από κινητήρα κατά καιρούς χαμηλών τιμών ηλεκτρικής ενέργειας για να αποθηκεύσει αέρα, πιο ευρέως, σε κοιλότητες που απαντώνται στη φύση κάτω από το έδαφος. Κατά τη διάρκεια ωρών αυξημένων τιμών ηλεκτρικής ενέργειας, ο συμπιεσμένος αέρας καίγεται με φυσικό αέριο για να λειτουργήσει μια τουρμπίνα, η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Αυτό το μοτίβο λειτουργίας χρησιμοποιείται όταν CAES συνδυάζεται με τεχνολογία αιολικής ενέργειας, συμπιέζοντας αέρα κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής ταχύτητας του ανέμου και χρησιμοποιώντας το συμπιεσμένο αέρα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις περιόδους χαμηλής ταχύτητας του ανέμου.

Η αποθήκευση ενέργειας με άντληση νερού (PHPS) χρησιμοποιεί δύο ταμιευτήρες σε διαφορετικά υψόμετρα για μετατροπή της αποθηκευμένης βαρυτικής δυναμικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα σύστημα άντλησης με αποθήκευση λειτουργεί με χρήση της περίσσειας της ενεργειακής παραγωγής κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης για την άντληση νερού από το χαμηλότερο ταμιευτήρα στο πάνω ταμιευτήρα που πρέπει να αποθηκευτεί ως βαρυτική δυναμική ενέργεια. Σε περιόδους φορτίου μεγάλης ζήτησης, το νερό στο πάνω ταμιευτήρα απελευθερώνεται μέσω τουρμπίνων παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια για παροχή στο δίκτυο. Σε γενικές γραμμές, ένα σύστημα PHPS λειτουργεί χρησιμοποιώντας το πλεόνασμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για την άντληση νερού σε μια δεξαμενή σε μεγαλύτερο υψόμετρο.

Οι σφόνδυλοι αποθηκεύουν ενέργεια επιταχύνοντας έναν ογκώδη περιστρεφόμενο κύλινδρο σε μια υψηλή ταχύτητα και διατηρώντας εκείνη την ενέργεια εντός του συστήματος ως περιστροφική ενέργεια. Καθώς λειτουργεί σε ένα μικρό κενό περίβλημα για μείωση της αντίστασης, η ροπή επιτάχυνσης προκαλεί ένα σφόνδυλο να αυξήσει ταχύτητα και να αποθηκεύσει ενέργεια, ενώ η ροπή επιβράδυνσης προκαλεί ένα σφόνδυλο να επιβραδύνει και την ενέργεια να εξαχθεί σύμφωνα με τους νόμους της εξοικονόμησης ενέργειας.

Οι τεχνολογίες PHPS και CAES ,μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεγάλης κλίμακας αποθήκευση ενέργειας, ενώ οι σφόνδυλοι είναι πιο κατάλληλοι για προσωρινή αποθήκευση. Η κοινή γραμμή και των τριών είναι ότι αποθήκευση γίνεται όταν φθινή εκτός αιχμής ισχύς είναι διαθέσιμη, π.χ., το βράδυ ή τα Σαββατοκύριακα. Ενώ αποφόρτιση γίνεται όταν ενέργεια είναι αναγκαία λόγω της ανεπαρκούς προσφοράς από τις εγκαταστάσεις βασικού φορτίου.

1.7.2 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας [19,20]

Η αποθήκευση ενέργειας μέσω μπαταριών είναι μια επιλογή για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Μία μπαταρία φορτίζεται συνδέοντας τη με μια πηγή άμεσου ηλεκτρικού ρεύματος και όταν αυτή αποφορτίζεται η αποθηκευμένη χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι πιο κοινοί τύποι μπαταριών αποθήκευσης είναι του οξέος του μολύβδου και Ni-Cd. Αν και πιο συχνά χρησιμοποιούνται σε συσκευές, μια μπαταρία με βάση το νικέλιο-κάδμιο (Ni-Cd) κυρίως χρησιμοποιείται για αποθήκευση ενέργειας στο δίκτυο. Μπαταρίες με βάση το νικέλιο διαρκούν σχεδόν δύο φορές όσο οι μπαταρίες του οξέος του μολύβδου ωστόσο, κοστίζουν σχεδόν δέκα φορές περισσότερο και έχουν κατά μέσο όρο απόδοση της τάξης του 70%, σημαντικά χαμηλότερη από αυτή της μπαταρίας του οξέος. Γρήγορη απόκριση είναι ένα από τα ισχυρά σημεία της τεχνολογίας της μπαταρίας: ορισμένες μπαταρίες μπορούν να ανταποκριθούν στις αλλαγές φορτίου σε περίπου 20 χιλιοστά του δευτερολέπτου. Πιθανές εφαρμογές των μπαταριών είναι χρήση τους εκτός των ωρών αιχμής ισχύος για εξομάλυνση του φορτίου και αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται συνήθως από ανεμογεννήτριες ή φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις.

1.7.3 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας [20,21]

Η θερμική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί ως μια αλλαγή στην εσωτερική ενέργεια ενός υλικού. Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μπορούν να είναι αισθητής αποθήκευσης θερμότητας ή λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας, ή συνδυασμός των δύο.

1.7.3.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας

Στην αποθήκευση αισθητής θερμότητας (SHS), η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ενός στερεού ή υγρού. Το σύστημα SHS χρησιμοποιεί τη θερμοχωρητικότητα και την αλλαγή στη θερμοκρασία του υλικού κατά τη διαδικασία φόρτισης και αποφόρτισης. Το ποσό της θερμότητας που αποθηκεύεται εξαρτάται από την ειδική θερμότητα του μέσου, την αλλαγή της θερμοκρασίας και το ποσό του υλικού αποθήκευσης. Νερό φαίνεται να είναι το καλύτερο διαθέσιμο υγρό SHS, επειδή είναι φθινό και έχει υψηλή ειδική θερμότητα. Ωστόσο, πάνω από τους 100 °C, έλαια, τετηγμένα άλατα και τήγματα, κλπ., χρησιμοποιούνται συνήθως.

1.7.3.2 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας

Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας (LHS) κάνει χρήση της ενέργειας που αποθηκεύεται όταν μια ουσία αλλάζει από τη μια φάση στην άλλη π.χ. από στερεό σε υγρό ή από υγρό σε αέριο κ.ο.κ..

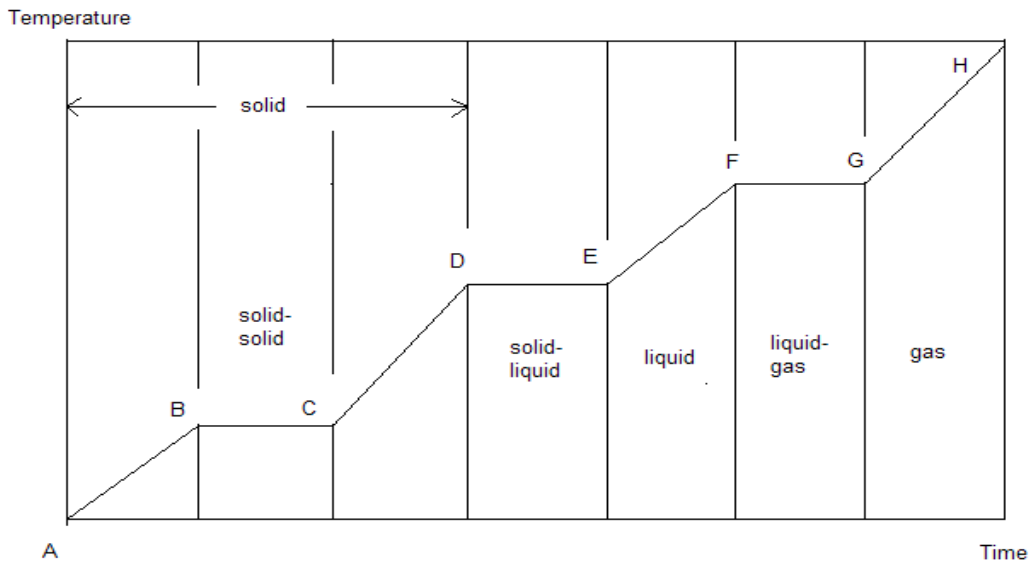
Γενικά όταν σε μια ουσία προστίθεται ενέργεια υπό μορφή θερμότητας, προκύπτει αύξηση της εσωτερικής ενέργειας όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα. Η προσθήκη αυτή της θερμότητας συνεπάγεται αύξηση στη θερμοκρασία (αισθητή θέρμανση) ή αλλαγή της φάσης (λανθάνουσα θέρμανση). Εκκίνηση γίνεται με μια αρχικά στερεά κατάσταση στο σημείο A, προσθήκη θερμότητας στην ουσία, πρώτα προκαλεί αισθητή θέρμανση του στερεού (περιοχή A-B) ακολουθούμενη από μια αλλαγή φάσης από στερεό σε στερεό με μεταβολή στην κρυσταλλική δομή (περιοχή B-C), και πάλι αισθητή θέρμανση του στερεού (περιοχή C-D), αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό (περιοχή D-E), αισθητή θέρμανση του υγρού (περιοχή E-F), αλλαγή φάσης από υγρό σε αέριο (περιοχή F-G) και αισθητή θέρμανση του αερίου (περιοχή G-H).

Το συνολικό ποσό της ενέργειας που αποθηκεύεται μπορεί να γραφεί ως

$$Q = m \cdot \left[\int_{T_A}^{T_D} C_{ps} (T) dT + L_p + L + \int_{T_E}^{T_F} C_{pl} (T) dT + L_g + \int_{T_G}^{T_H} C_{pg} (T) dT \right] \quad (1.1)$$

όπου

m είναι η μάζα του υλικού, C_{ps} η ειδική θερμότητα του υλικού σε στερεά φάση, C_{pl} η ειδική θερμότητα του υλικού σε υγρή φάση, C_{pg} η ειδική θερμότητα του υλικού σε αέρια φάση, L_p η λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης από στερεό σε στερεό, L η λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης από στερεό σε υγρό και L_g η λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης από υγρό σε αέριο.



Σχήμα 1.11: Διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου για την περίπτωση θέρμανσης μιας ουσίας [21].

Καταλήγουμε λοιπόν με βάση τα παραπάνω ότι η ικανότητα αποθήκευσης του υλικού εξαρτάται εκτός από την ειδική θερμότητα και από την τιμή της λανθάνουσας θερμότητας. Ως εκ τούτου, είναι επιθυμητό για το μέσο αποθήκευσης να έχει υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα και λανθάνουσα θερμότητα. Η αποθήκευση της λανθάνουσας θερμότητας μπορεί να χαρακτηριστεί με βάση τη διαδικασία αλλαγής φάσης σε στερεά-στερεά, στερεά-υγρή, στερεά-αέρια και υγρή-αέρια. Οι μετασχηματισμοί από τη στερεά στην αέρια κατάσταση και από την υγρή στην αέρια γενικά δεν χρησιμοποιούνται για αποθήκευση της ενέργειας παρά τις υψηλότερες λανθάνουσες θερμότητες, δεδομένου ότι τα αέρια καταλαμβάνουν μεγάλους όγκους. Μεγάλες όμως μεταβολές του όγκου καθιστούν το σύστημα μεγάλο, σύνθετο και ανέφικτο. Στις μεταβάσεις από στερεό σε στερεό, θερμότητα αποθηκεύεται καθώς το υλικό μετατρέπεται από μια κρυσταλλική μορφή σε μια άλλη. Αυτές οι μεταβάσεις έχουν γενικά μικρές λανθάνουσες θερμότητες καθιστώντας τέτοια υλικά λιγότερο επιθυμητά. Αποθήκευση της λανθάνουσας θερμότητας τώρα κατά την μετάβαση από τη στερεά στην υγρή φάση παρέχει υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας και έχει την ικανότητα να αποθηκεύει ενέργεια ως λανθάνουσα θερμότητα τήξης σε μια σταθερή θερμοκρασία που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία μετάβασης φάσης. Αυτό σημαίνει ότι πολύ μικρότερο βάρος και όγκος υλικού απαιτείται για να αποθηκεύσει μια ορισμένη ποσότητα ενέργειας όταν αποθήκευση της ενέργειας αλλαγής φάσης χρησιμοποιείται.

1.7.3.3 Αποθήκευση θερμοχημικής ενέργειας

Τα θερμοχημικά συστήματα βασίζονται στην απορροφούμενη και εκλυόμενη ενέργεια με το σπάσιμο και τον ανασχηματισμό των μοριακών δεσμών σε μια πλήρως

αναστρέψιμη χημική αντίδραση. Στην περίπτωση αυτή, η αποθηκευόμενη θερμότητα εξαρτάται από την ποσότητα του υλικού αποθήκευσης, τη θερμότητα της ενδόθερμης αντίδρασης, καθώς και την έκταση της μετατροπής.

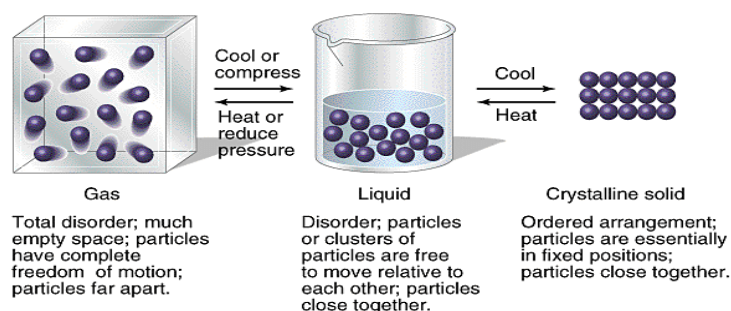
Βιβλιογραφία 1^{ου} Κεφαλαίου

- [1] S. Keleş, Fossil Energy Sources, Climate Change, and Alternative Solutions
- [2] <http://www.allaboutenergy.gr/>
- [3] K.H. Solangi, M.R. Islam, R. Saidur, N.A. Rahim, H. Fayaz , A review on global solar energy policy
- [4] <http://www.kee.gr/perivallontiki/teacher.html>
- [5] http://www.buildings.gr/greek/aiforos/exikonomisi/m_santamouris.html
- [6] http://www.alfaconstructions.gr/news/2011/03/ενεργειακά_κτίρια-και-εξοικονόμηση-ε/
- [7] [http://www.cea.org.cy/kids_corner/teachers/Secondary Education/Teacher Secondary.pdf](http://www.cea.org.cy/kids_corner/teachers/Secondary_Education/Teacher_Secondary.pdf)
- [8] <http://www.cie.org.cy/sxoliko.html>
- [9] http://el.wikipedia.org/wiki/Ηπιες_μορφές_ενέργειας
- [10] <http://epas-amarous.att.sch.gr/daidalosapospasmata.htm>
- [11] <http://www.inout.gr/showthread.php?t=77152>
- [12] http://el.wikipedia.org/wiki/Ηλιακή_ενέργεια
- [13] http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/thermans/pathitika_iliaka_systimata.htm
- [14] http://users.sch.gr/kpara/ape2009_10/sun_energy2.html
- [15] B. Givoni, Characteristics, design implications, and applicability of passive solar heating systems for buildings
- [16] http://en.wikipedia.org/wiki/Passive_solar_building_design
- [17] http://el.wikipedia.org/wiki/Ηλιακός_θερμοσίφωνας
- [18] http://el.wikipedia.org/wiki/Φωτοβολταϊκό_σύστημα
- [19] Christine Schoppe, Wind and Pumped-Hydro Power Storage: Determining Optimal Commitment Policies with Knowledge Gradient Non-Parametric Estimation
- [20] Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications
- [21] A. Felix Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review

Κεφάλαιο 2^ο: Υλικά αλλαγής φάσης

2.1 Θεωρία αλλαγής φάσης

Οι φάσεις [1] αποτελούν «κατηγορίες» του τύπου της μοριακής κίνησης της ύλης που βρέθηκε σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλή, η κίνηση των μορίων κυριαρχείται από το γεγονός ότι κολλάνε μεταξύ τους και το αποτέλεσμα είναι μια φάση της ύλης που είναι άκαμπτη και πυκνή. Όταν η θερμοκρασία είναι υψηλή, η κίνηση των μορίων κυριαρχείται από την ενέργεια τους να μετακινηθούν, έτσι οι διαμοριακές δυνάμεις μπορούν σχεδόν να αγνοηθούν. Σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες, τα μόρια κινούνται αλλά εξακολουθούν να μένουν μαζί. Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται και στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 2.1: Διάταξη των μορίων στην αέρια, υγρή και στερεά κατάσταση της ύλης [1].

Στερεά [1] (σφιχτά – συνδεδεμένα μόρια)

- Σε χαμηλές θερμοκρασίες οι πυρήνες των ατόμων ενός στερεού δονούνται σε σχέση με μια θέση ισορροπίας, αλλά είναι παγιδευμένοι στις θέσεις του πλέγματός τους, αδυνατούν δηλαδή να ρέυσουν ή να διαχυθούν.
- Οι διαμοριακές δυνάμεις είναι εντονότερες από τη μέση θερμική ενέργεια του συστήματος.
- Μεγάλη ποικιλία ακτινικής και γωνιακής τάξης (δομής) υπάρχει κατά κανόνα στα ενιαία κρυσταλλικά στερεά. Ακόμα και τα άμορφα στερεά έχουν σχετικά καλή χωρική διάταξη, ειδικά σε μικρές αποστάσεις, (10 – 100 μορίων).

Υγρά [1]

- Καθώς η ενέργεια σύνδεσης στο χώρο του πλέγματος καταλαμβάνεται από θερμική ενέργεια, τα μόρια των στερεών μπορεί να καταφέρουν να γλιστρήσουν μεταξύ τους, αλλά διατηρώντας τη στενή επαφή.
- Η συνολική ουσία είναι υγρό αλλά όχι πολύ συμπιέσιμο.

- Ορισμένες μεγάλης εμβέλειας ακτινικές διατάξεις παραμένουν, αλλά συνήθως μόνο πάνω από το μέγεθος μερικών μοριακών διαμέτρων

Αέρια [1] (ελεύθερη κίνηση)

- Τα αέρια περιγράφονται από την κινητική θεωρία των αερίων. Σε αυτό το όριο τα μόρια του αερίου έχουν αμελητέο μέγεθος, δεν έχουν καθόλου αξιόλογες διαμοριακές δυνάμεις και βρίσκονται σε τυχαία κίνηση.
- Αέρια έχουν μέσες ελεύθερες διαδρομές που είναι μεγαλύτερες από τις μοριακές διαμέτρους, δηλαδή είναι συνήθως απομονωμένα, αλλά κατά καιρούς έχουν συγκρούσεις.
- Η κατάσταση ενός αερίου παγκοσμίως περιγράφεται, κατά προσέγγιση, από την εξίσωση της κατάστασης του ιδανικού αερίου.

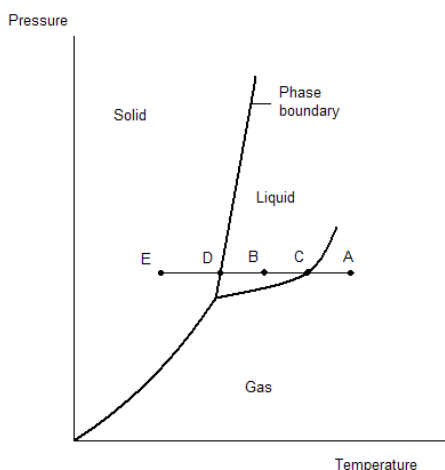
Το υλικό μπορεί να είναι μια καθαρή ουσία, ένα ευτηκτικό μείγμα ή μη ευτηκτικό μείγμα [2]. Η διαφορά μεταξύ ευτηκτικών και μη ευτηκτικών μειγμάτων είναι η θερμοκρασία αλλαγής φάσης: για ένα ευτηκτικό μείγμα, οι αλλαγές φάσης συμβαίνουν σε μια σταθερή θερμοκρασία ενώ, για ένα μη-ευτηκτικό μείγμα, οι αλλαγές φάσης κατά τη διάρκεια ενός εύρους θερμοκρασιών.

2.1.1 Αλλαγή φάσης μιας ιδανικής καθαρής ουσίας [2 – 4]

Μια ουσία που έχει μια σταθερή χημική σύσταση ολόκληρη ονομάζεται καθαρή ουσία όπως το νερό, ο αέρας και το άζωτο. Μια καθαρή ουσία μπορεί να μην είναι από ένα μόνο στοιχείο ή ένωση. Ένα μείγμα από δύο ή περισσότερες φάσεις μιας καθαρής ουσίας είναι ακόμα καθαρή ουσία εφόσον η χημική σύνθεση όλων των φάσεων είναι η ίδια.

Ο ακριβής τώρα ορισμός της φάσης μιας καθαρής ουσίας είναι «μια περιοχή στο χώρο των θερμοδυναμικών παραμέτρων (T , p , V) ενός συστήματος που απαρτίζεται αποκλειστικά από το καθαρό σώμα». Οι περιοχές του συστήματος καθορισμένου όγκου V που καταλαμβάνονται από κάθε φάση μπορούν να παριστάνονται με ένα σχέδιο του οποίου η τετμημένη είναι η θερμοκρασία T και η τεταγμένη είναι η πίεση p . Αυτή η αναπαράσταση καλείται συνήθως διάγραμμα φάσης και το οποίο με λίγα λόγια δείχνει τις συνθήκες p και T στις οποίες οι διάφορες φάσεις της ουσίας αυτής είναι θερμοδυναμικά πιο σταθερές. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα όπου στο σημείο A της εικόνας η αέρια φάση της ουσίας είναι θερμοδυναμικά η πιο σταθερή ενώ στο B η υγρή φάση είναι η πιο σταθερή. Τα όρια μεταξύ των περιοχών, τα οποία ονομάζονται όρια φάσης, δείχνουν τις τιμές των p και T στις οποίες δύο γειτονικές φάσεις είναι σε ισορροπία. Για παράδειγμα, εάν το σύστημα είναι καθορισμένο να έχει μια πίεση και θερμοκρασία ώστε να εκπροσωπείται από το σημείο C , τότε το υγρό και ο ατμός του είναι σε ισορροπία (όπως το νερό σε υγρή

μορφή και οι υδρατμοί στη 1 atm και 100 °C). Αν η θερμοκρασία μειώνεται με σταθερή πίεση, το σύστημα κινείται προς το σημείο B, όπου το υγρό είναι σταθερό (όπως το νερό σε 1 atm και σε θερμοκρασίες μεταξύ 0 °C και 100 °C). Εάν η θερμοκρασία μειώνεται ακόμη περισσότερο στο D, τότε οι φάσεις του στερεού και του υγρού είναι σε ισορροπία (όπως ο πάγος και νερό σε 1 atm και 0 °C). Μια περαιτέρω μείωση της θερμοκρασία παίρνει το σύστημα στην περιοχή, όπου το στερεό είναι η σταθερή φάση.



Σχήμα 2.2: Ένα τυπικό διάγραμμα φάσης που δείχνει τις περιοχές πίεσης και θερμοκρασίας στις οποίες κάθε φάση είναι η πιο σταθερή [4]. Η σημασία των γραμμάτων A, B, C, D και E εξηγείται στο παραπάνω κείμενο.

Όρια φάσης

Τάση ατμών της ουσίας ονομάζεται η πίεση του ατμού σε ισορροπία με τη συμπυκνωμένη φάση του. Η τάση ατμών αυξάνεται με τη θερμοκρασία γιατί καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, περισσότερα μόρια έχουν επαρκή ενέργεια για να εγκαταλείψουν τους γείτονές τους στο υγρό. Οποιοδήποτε σημείο που βρίσκεται σε ένα όριο φάσης αντιπροσωπεύει μια πίεση και θερμοκρασία στην οποία υπάρχει μια δυναμική ισορροπία μεταξύ των δύο παρακείμενων φάσεων. Μια κατάσταση δυναμικής ισορροπίας είναι εκείνη κατά την οποία μια αντίστροφη διαδικασία λαμβάνει χώρα στο ίδιο ρυθμό όπως η προς τα εμπρός διαδικασία. Παρά το γεγονός ότι μπορεί να υπάρχει μεγάλη δραστηριότητα σε μοριακό επίπεδο, δεν υπάρχει καμία καθαρή μεταβολή στο μεγαλύτερο μέρος των ιδιοτήτων ή στην όψη του δείγματος. Για παράδειγμα, οποιοδήποτε σημείο του ορίου μεταξύ υγρού και αερίου αντιπροσωπεύει μια κατάσταση δυναμικής ισορροπίας στην οποία εξάτμιση και συμπύκνωση συνεχίζει σε ποσοστά συμφωνίας. Μόρια αποχωρούν από την επιφάνεια του υγρού με ένα ορισμένο ρυθμό, και μόρια ήδη στην αέρια φάση επιστρέφουν στο υγρό με τον ίδιο ρυθμό, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα, να μην υπάρχει καθαρή μεταβολή στον αριθμό των μορίων στο αέριο και συνεπώς καμία καθαρή μεταβολή στην πίεση του.

Χαρακτηριστικά σημεία

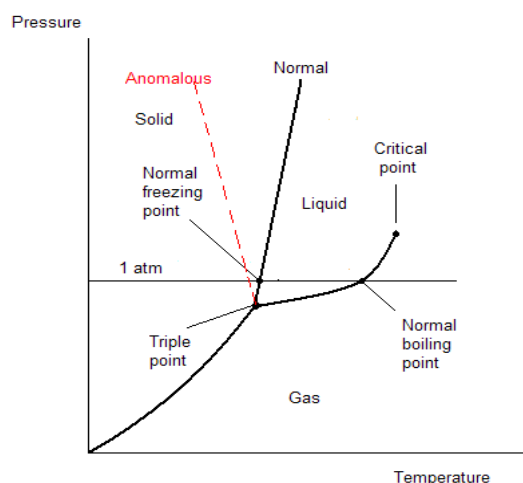
Η θέρμανση του υγρού σε ένα ανοικτό δοχείο έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης των ατμών του και εν συνεχεία την εξίσωσή της με την εξωτερική πίεση σε μια θερμοκρασία. Σε αυτήν την θερμοκρασία, ο ατμός οδηγείται στην περιρρέουσα ατμόσφαιρα και επεκτείνεται επ' αόριστον. Επιπλέον, επειδή δεν υπάρχει κανένας περιορισμός στην επέκταση, φυσαλίδες ατμού μπορεί να σχηματιστούν σε όλο το σώμα του υγρού. Αυτή η κατάσταση είναι γνωστή ως βρασμός. Η θερμοκρασία στην οποία η τάση ατμών ενός υγρού είναι ίση με την εξωτερική πίεση ονομάζεται θερμοκρασία βρασμού. Όταν η εξωτερική πίεση είναι 1 atm, η θερμοκρασία βρασμού ονομάζεται **κανονικό σημείο βρασμού**, T_b .

Η θέρμανση τώρα υγρού σε κλειστό δοχείο, το οποίο σημαίνει ότι ο ατμός δε μπορεί να διαφύγει, συνεπάγεται αύξηση της πυκνότητας του ατμού καθώς αυξάνεται η τάση ατμών και εν καιρώ η πυκνότητα του ατμού γίνεται ίση με εκείνη του υπόλοιπου υγρού. Σε αυτό το στάδιο η επιφάνεια μεταξύ των δύο φάσεων εξαφανίζεται και η θερμοκρασία τότε είναι η κρίσιμη θερμοκρασία, T_c . Η πίεση των ατμών στη κρίσιμη θερμοκρασία ονομάζεται κρίσιμη πίεση, p_c , και η κρίσιμη θερμοκρασία και η κρίσιμη πίεση μαζί προσδιορίζουν το **κρίσιμο σημείο** της ουσίας. Αν ασκήσουμε πίεση τώρα σε ένα δείγμα που είναι πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία του, δεν παράγουμε ένα πυκνότερο ρευστό (υγρό) καθώς καμία επιφάνεια δε φαίνεται να διαχωρίζει τα δύο μέρη του δείγματος και μία μεμονωμένη ομοιόμορφη φάση συνεχίζει να καλύπτει το δοχείο. Γι' αυτό και το όριο μεταξύ υγρού και αερίου σε ένα διάγραμμα φάσης ολοκληρώνεται στο κρίσιμο σημείο.

Η θερμοκρασία στην οποία οι φάσεις υγρού και στερεού μιας ουσίας συνυπάρχουν σε ισορροπία σε μια καθορισμένη πίεση ονομάζεται θερμοκρασία τήξης της ουσίας. Επειδή μια ουσία λιώνει στην ίδια θερμοκρασία μ' αυτή στην οποία ψύχεται, η θερμοκρασία τήξης είναι η ίδια με την θερμοκρασία πήξεως. Το όριο στερεού-υγρού δείχνει ως εκ τούτου πώς η θερμοκρασία τήξης ενός στερεού ποικίλλει ανάλογα με την πίεση. Η θερμοκρασία τήξης όταν η πίεση στο δείγμα είναι 1 atm ονομάζεται **κανονικό σημείο τήξης** ή **κανονικό σημείο κατάψυξης**, T_f . Ένα υγρό παγώνει όταν η ενέργεια των μορίων του είναι τόσο χαμηλή ώστε να μην μπορούν να ξεφύγουν από τις ελκτικές δυνάμεις των γειτόνων τους χάνοντας έτσι στη συνέχεια την κινητικότητά τους.

Η ταυτόχρονη συνύπαρξη σε ισορροπία τριών διαφορετικών φάσεων (συνήθως στερεάς, υγρής και αέριας) εκπροσωπείται από το **τριπλό σημείο** όπου συναντώνται τα όρια των τριών φάσεων. Το τριπλό σημείο μιας καθαρής ουσίας είναι ένα χαρακτηριστικό, μια αμετάβλητη φυσική ιδιότητα της ουσίας. Για το νερό το τριπλό

σημείο βρίσκεται στους 273.16 K και 611Pa, και πάγος, νερό σε υγρή μορφή, και υδρατμός δε συνυπάρχουν σε ισορροπία σε κανένα άλλο συνδυασμό πίεσης και θερμοκρασίας. Στο τριπλό σημείο, τα ποσοστά κάθε εμπρός και όπισθεν διαδικασίας είναι ίσα (αλλά τα τρία επιμέρους ποσοστά δεν είναι απαραίτητα τα ίδια).



Σχήμα 2.3: Τα σημαντικά σημεία ενός διαγράμματος φάσης: τριπλό σημείο, κρίσιμο σημείο, κανονικό σημείο κατάψυξης ή τήξης και κανονικό σημείο βρασμού [4].

Σύμφωνα με το διάγραμμα $p - T$ του σχήματος 2.3 το τριπλό σημείο και το κρίσιμο σημείο είναι σημαντικά χαρακτηριστικά μιας ουσίας επειδή ενεργούν ως «μεθοριακοί σταθμοί» για την ύπαρξη της υγρής φάσης. Ειδικότερα το κρίσιμο σημείο σηματοδοτεί την υψηλότερη θερμοκρασία στην οποία το υγρό μπορεί να υπάρξει. Ενώ το τριπλό σημείο σηματοδοτεί την χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία το υγρό μπορεί να υπάρξει το οποίο όμως με βάση και το σχήμα 2.3 δεν ισχύει για όλες τις ουσίες μόνο για όσες συστέλλονται κατά την κατάψυξη (καμπύλη Normal ως όριο στερεού – υγρού). Για παράδειγμα για το νερό που διαστέλλεται κατά την κατάψυξη το όριο μεταξύ στερεάς και υγρής φάσης μετατοπίζεται προς την αντίθετη κατεύθυνση (καμπύλη Anomalous) και επομένως ισχύει μόνο το πρώτο από τα παραπάνω συμπεράσματα.

2.1.2 Αλλαγή φάσης ενός μίγματος [2,5-7]

Όμως πολύ πιο σύνθετοι τύποι διαγραμμάτων φάσης μπορούν να κατασκευαστούν, ιδιαίτερα όταν περισσότερα από ένα καθαρά συστατικά υπάρχουν. Στην περίπτωση αυτή η συγκέντρωση γίνεται μια σημαντική μεταβλητή. Ένας τύπος διαγράμματος φάσης που απεικονίζει τη θερμοκρασία συναρτήσει των σχετικών συγκεντρώσεων των δύο ουσιών σε ένα διμερές μίγμα ονομάζεται διμερές διάγραμμα φάσης. Αυτό το μείγμα μπορεί να είναι ένα στερεό διάλυμα, είτε ευτηκτικό είτε περιτεκτικό, μεταξύ άλλων. Αυτοί οι δύο τύποι μειγμάτων οδηγούν σε πολύ

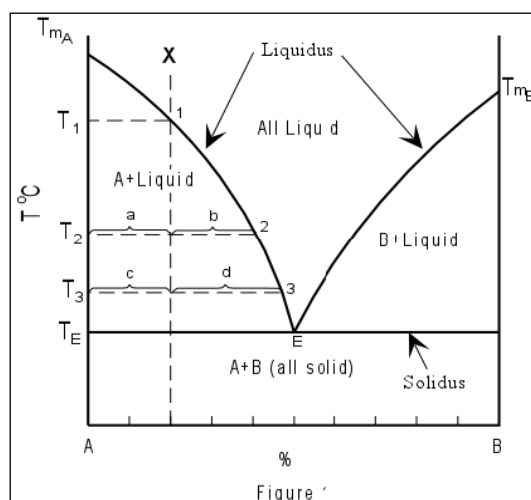
διαφορετικές γραφικές παραστάσεις. Ένα ευτηκτικό μίγμα είναι ένα μίγμα σε τέτοιες αναλογίες που το σημείο τήξης να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερα και που να κρυσταλλώνουν όλα τα συστατικά ταυτόχρονα. Όσον αφορά τώρα τους περιτεκτικούς μετασχηματισμούς που είναι παρόμοιοι με τις ευτηκτικές αντιδράσεις, εδώ, μια υγρή και στερεά φάση με προκαθορισμένη αναλογία αντιδρούν σε μια σταθερή θερμοκρασία ώστε να προκύψει μια ενιαία στερεά φάση. Δεδομένου ότι το στερεό προϊόν σχηματίζεται στη διεπιφάνεια μεταξύ των δύο αντιδρώντων, μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο διάχυσης και γενικά να προκαλέσει τις εν λόγω αντιδράσεις να προχωρήσουν πολύ πιο αργά από ό,τι στους ευτηκτικούς ή ευτηκτοειδείς μετασχηματισμούς. Εξαιτίας αυτού, όταν μια περιτεκτική σύνθεση στερεοποιείται δεν δείχνει την ελασματοειδή δομή που υπάρχει με την ευτηκτική στερεοποίηση. Ένας τέτοιος μετασχηματισμός υπάρχει στο σύστημα σιδήρου-άνθρακα.

Θα ασχοληθούμε με την περιγραφή αλλαγής φάσης ενός ευτηκτικού συστήματος δύο συνιστωσών, το διάγραμμα του οποίου είναι και ένα από τα πιο απλά διαγράμματα φάσης δύο συνιστωσών. Οι συνιστώσες όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα είναι οι A και B και οι πιθανές φάσεις είναι καθαρά κρύσταλλα της A, καθαρά κρύσταλλα της B, και υγρό με συνθέσεις που κυμαίνονται μεταξύ καθαρής A και καθαρής B. Οι συνθέσεις απεικονίζονται στο κάτω μέρος του διαγράμματος και μπορούν να εκφραστούν είτε ως ποσοστό της A ή ως ποσοστό της B, αφού το συνολικό ποσοστό πρέπει να έχει άθροισμα 100. Στον κάθετο άξονα τώρα έχουμε την απεικόνιση της θερμοκρασίας καθώς θεωρούμε ότι η πίεση είναι σταθερή. Οι καμπύλες που χωρίζουν τα πεδία A + υγρό από όλο υγρό και B + υγρό από όλο υγρό ονομάζονται καμπύλες liquidus. Ενώ η οριζόντια γραμμή που χωρίζει τα πεδία A + υγρό και B + υγρό από A + B όλα στερεά, καλείται solidus. Το σημείο, E, όπου οι καμπύλες liquidus και solidus τέμνονται, αποκαλείται ευτηκτικό σημείο. Στο σημείο αυτό και οι τρεις φάσεις, που είναι το υγρό, τα κρύσταλλα της A και τα κρύσταλλα της B, υπάρχουν σε ισορροπία. Το σημείο αυτό είναι το μόνο σημείο του διαγράμματος όπου αυτό ισχύει. Επίσης είναι ένα αμετάβλητο σημείο σύμφωνα με τον κανόνα φάσεων του Gibbs:

$$F=C+1-P \quad (2.1)$$

με αριθμό συνιστωσών $C=2$ και αριθμό φάσεων $P=3$. Αν τώρα αλλάξουμε τη σύνθεση του υγρού ή τη θερμοκρασία, ο αριθμός των φάσεων θα μειωθεί σε δύο. Αν το σύστημα περιέχει μόνο καθαρή A, τότε είναι ένα σύστημα μιας συνιστώσας και η φάση της A λιώνει μόνο σε μία θερμοκρασία, τη θερμοκρασία τήξεως της καθαρής A, T_{mA} . Αν το σύστημα περιέχει μόνο τη καθαρή B, τότε είναι ένα σύστημα μιας συνιστώσας και η B λιώνει μόνο στη θερμοκρασία τήξης της καθαρής B, T_{mB} . Για όλες

τις συνθέσεις μεταξύ καθαρής A και καθαρής B, η θερμοκρασία τήξης μειώνεται δραστικά, και η τήξη ξεκινά από το ευτηκτική θερμοκρασία T_E . Να σημειωθεί ότι για όλες τις συνθέσεις μεταξύ A και B η τήξη εμφανίζεται επίσης σε ένα εύρος θερμοκρασιών μεταξύ της solidus και της liquidus εκτός της ευτηκτικής, που λιώνει μόνο σε μια θερμοκρασία την T_E .



Σχήμα 2.4: Ένα διάγραμμα φάσης για ένα διμερές σύστημα που εμφανίζει ένα ευτηκτικό σημείο [5].

Η κρυστάλλωση ενός υγρού με σύνθεση έστω X, η οποία αποτελείται από ένα μίγμα 80% A και 20% B, θα έχει ως τελικό κρυσταλλικό προϊόν, ένα μίγμα 80% κρύσταλλα της A και 20% κρύσταλλα της B σύμφωνα με τον κανόνα ότι κατά την κρυστάλλωση ή τήξη σε ένα κλειστό σύστημα η τελική σύνθεση του συστήματος θα είναι ταυτόσημη με την αρχική σύνθεση του συστήματος.

Η σύνθεση X θα είναι όλη υγρή πάνω από τη θερμοκρασία T_1 , γιατί θα βρίσκεται στην περιοχή όλο υγρό. Αν η θερμοκρασία μειωθεί σε T_1 , στην T_1 κρύσταλλα του A θα αρχίσουν να σχηματίζονται. Περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας προκαλεί περισσότερα κρύσταλλα της A να σχηματιστούν. Ως αποτέλεσμα, η υγρή σύνθεση πρέπει να γίνει πιο εμπλουτισμένη σε B καθώς περισσότεροι κρύσταλλοι της A σχηματίζονται έξω από το υγρό. Έτσι, με την πώση της θερμοκρασίας, η σύνθεση του υγρού θα αλλάξει από το σημείο 1 στο σημείο 2 στο σημείο 3 στο σημείο E καθώς η θερμοκρασία θα μειώνεται από T_1 σε T_2 σε T_3 σε T_E αντίστοιχα. Σε όλες τις θερμοκρασίες μεταξύ T_1 και T_E , δύο φάσεις θα παρίστανται στο σύστημα, υγρό και κρύσταλλα της A. Στην ευτηκτική θερμοκρασία, T_E , κρύσταλλα της B θα αρχίζουν να διαμορφώνονται, και τρεις φάσεις θα συνυπάρχουν, κρύσταλλα της A, κρύσταλλα της B, και υγρό. Η θερμοκρασία θα πρέπει να παραμείνει στην T_E έως ότου μία από τις φάσεις εξαφανιστεί. Έτσι, όταν το υγρό θα έχει κρυσταλλώσει εντελώς, μόνο καθαρή στερεά A και καθαρή στερεά B θα παραμείνουν και το μείγμα

αυτών των δύο στερεών φάσεων θα είναι στις αναλογίες του αρχικού μείγματος, που είναι 80% A και 20% B.

Η ιστορία κρυστάλλωσης της σύνθεσης X μπορεί να γραφτεί συνοπτικά ως εξής:

- $T > T_1 \rightarrow$ όλο υγρό
- $T_1 - T_E \rightarrow$ υγρό + A
- στην $T_E \rightarrow$ υγρό + A + B
- $T < T_E \rightarrow$ A + B όλα στερεά

Στη συνέχεια επιλέγουμε δύο οποιοδήποτε σημεία κατά τη διάρκεια της κρυστάλλωσης της σύνθεσης X και παρατηρούμε το ποσό από κάθε φάση που είναι παρούσα.

Ειδικότερα στην θερμοκρασία T_2 το ποσό των κρυστάλλων της A και του υγρού (οι μόνες δύο φάσεις που είναι παρούσες σ' αυτή τη θερμοκρασία) θα μπορούμε να καθοριστεί με μέτρηση των αποστάσεων a και b στο σχήμα 2.4. Τα ποσοστά τότε σύμφωνα με τον κανόνα του μοχλού θα προέκυπταν ως εξής:

$$\% \text{ κρυστάλλων της A} = b / (a + b) \times 100$$

$$\% \text{ υγρού} = a / (a + b) \times 100$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι εφόσον το ποσό των κρυστάλλων πρέπει να αυξηθεί με την πτώση της θερμοκρασίας η ανάλογη απόσταση μεταξύ της κατακόρυφης γραμμής, η οποία σηματοδοτεί την αρχική σύνθεση και της καμπύλης liquidus αυξάνεται όσο πέφτει η θερμοκρασία.

Στην θερμοκρασία T_3 τώρα, σύμφωνα με παραπάνω περισσότερα κρύσταλλα πρέπει να έχουν σχηματιστεί δεδομένου ότι ο λόγος αποστάσεων $d / (c + d)$ είναι μεγαλύτερος από το λόγο αποστάσεων $b / (a + b)$. Έτσι, στην T_3 ο κανόνας του μοχλού δίνει:

$$\% \text{ κρυστάλλων της A} = d / (c + d) \times 100$$

$$\% \text{ υγρού} = c / (c + d) \times 100$$

Οπότε συνοψίζοντας στην T_3 έχουμε τη σύνθεση του υγρού που δίνεται στο σημείο 3 να είναι περίπου 53% A, τη σύνθεση του στερεού να είναι καθαρή A και τη σύνθεση του συστήματος να εξακολουθεί να είναι 80% A και 20% B.

Όσον αφορά τη διαδικασία της τήξης, αυτή είναι ακριβώς το αντίστροφο της διαδικασίας κρυστάλλωσης. Δηλαδή αν αρχίζαμε με σύνθεση X σε κάποια θερμοκρασία κάτω της T_E το πρώτο υγρό θα σχηματιζόταν στην T_E . Η θερμοκρασία θα παρέμενε σταθερή στην T_E έως ότου όλα τα κρύσταλλα της B έλιωναν. Η σύνθεση του υγρού τότε θα άλλαζε κατά μήκος της καμπύλης liquidus από το E στο σημείο 1, καθώς η θερμοκρασία θα αυξανόταν μέχρις ότου η θερμοκρασία T_1 επιτυγχανόταν. Πάνω από την T_1 το σύστημα θα περιέχει μόνο το υγρό με μια σύνθεση

αποτελούμενη από 80% A και 20% B. Η διαδικασία τήξης συνοπτικά παρατίθεται παρακάτω:

- $T < T_E \rightarrow A + B$ όλα στερεά
- στην $T_E \rightarrow$ υγρό + A + B
- $T_E - T_1 \rightarrow$ υγρό + A
- $T > T_1 \rightarrow$ όλο υγρό

Αναλόγως των συνιστωσών υπάρχουν αρκετά διαγράμματα φάσης η μορφή των οποίων όμως μεταβάλλεται και με τη συμπεριφορά αλλαγής φάσης του μείγματος. Για παράδειγμα όσον αφορά τα συστήματα δύο συνιστωσών, ένα διάγραμμα φάσης που έχει μια ενδιάμεση ένωση που λιώνει ανομοιόμορφα δηλαδή μια φάση λιώνει σε ένα υγρό με διαφορετική σύνθεση από το στερεό και παράγει ένα στερεό διαφορετικής σύνθεσης με το αρχικό στερεό, ένα διάγραμμα φάσης που δείχνει ένα πλήρες στερεό διάλυμα μεταξύ των δύο συνιστωσών του, ένα διάγραμμα φάσης που δείχνει πλήρες στερεό διάλυμα σε υψηλή θερμοκρασία και «exsolution» σε χαμηλή θερμοκρασία όπου ως «exsolution» ορίζεται η διαδικασία μέσω της οποίας ένα αρχικά ομογενές στερεό διάλυμα διαχωρίζεται σε δύο τουλάχιστον διαφορετικά κρυσταλλικά ανόργανα συστατικά, χωρίς την προσθήκη ή την αφαίρεση οποιουδήποτε υλικού το οποίο συμβαίνει με ψύξη κάτω από τη θερμοκρασία της αμοιβαίας διαλυτότητας ή σταθερότητας του διαλύματος, ένα διάγραμμα ενός ευτηκτικού συστήματος το οποίο αναλύσαμε διεξοδικά παραπάνω κ.ο.κ. παρουσιάζουν τελείως διαφορετικές γραφικές παραστάσεις. Φυσικά για μείγματα που περιέχουν όλο και περισσότερα συστατικά παρόλο που η θεωρία της αλλαγής φάσης είναι αρκετά παρόμοια η αναπαράστασή της γίνεται ιδιαίτερα περίπλοκη.

2.2 Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης

Από τα τέλη της δεκαετίας του '70 μια σειρά μελετών έχουν διεξαχθεί για την αξιολόγηση της συνολικής θερμικής συμπεριφοράς των θερμικών συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Δίνεται έμφαση τόσο στην ανάλυση συγκεκριμένων υλικών αλλαγής φάσης και στα προβλήματα που παρουσιάζουν όσο και στη μελέτη των χαρακτηριστικών νέων υλικών. Το σημαντικότερο μειονέκτημα όπως αναφέρθηκε από πολλούς ερευνητές ήταν οι χαμηλές θερμικές αγωγιμότητες από τις οποίες διακατέχονται πολλά PCMs, που οδηγεί σε χαμηλά ποσοστά φόρτισης και αποφόρτισης. Η ανάπτυξη ενός θερμικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας ως λανθάνουσα θερμότητα συνεπάγεται ως εκ τούτου την κατανόηση κυρίως της μεταφοράς θερμότητας / των ανταλλαγών στα PCMs όταν υποβάλλονται σε μετάβαση από τη στερεά στην υγρή φάση στο απαιτούμενο λειτουργικό εύρος θερμοκρασίας και τη διατύπωση του προβλήματος αλλαγής φάσης.

Η ανάλυση των προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας σε διεργασίες αλλαγής φάσης είναι πολύπλοκη αλλά και μεγάλης σημασίας για πολλές βιομηχανικές εφαρμογές, π.χ. για εφαρμογές επεξεργασίας τροφίμων, χύτευσης και ηλιακής ενέργειας. Τα προβλήματα στερεοποίησης και τήξης είναι μη γραμμικά με την μαθηματική έννοια, λόγω της ύπαρξης ενός κινούμενου ορίου (διεπιφάνεια) μεταξύ των δύο φάσεων το οποίο κινείται ανάλογα με την ταχύτητα με την οποία η λανθάνουσα θερμότητα απορροφάται ή χάνεται στο όριο. Επομένως ούτε η θέση ούτε η ταχύτητα της διεπιφάνειας μπορούν να προβλεφθούν εκ των προτέρων. Επίσης η πρόβλεψη της μεταφοράς θερμότητας δυσχεραίνεται περαιτέρω καθώς η ζώνη όπου λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης δεν έχει διακριτά όρια με εξαίρεση των υλικών με αλλαγή φάσης υπό πρακτικά μιας σταθερής θερμοκρασίας και διότι κατά την τήξη η φυσική συναγωγή προκαλεί απόσπαση και έπειτα μετακίνηση του στερεού υλικού στο εσωτερικό της υγρής φάσης ενώ κατά τη στερεοποίηση κοιλότητες μπορεί να προκληθούν εντός της στερεάς φάσης εξαιτίας αλλαγών του όγκου. Η μαθηματική ανάλυση γίνεται τέλος πιο περίπλοκη όταν οι φυσικές ιδιότητες του υλικού αλλαγής φάσης (PCM) εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και όταν οι οριακές συνθήκες είναι του τύπου που εφαρμόζονται σε συναγωγή και ακτινοβολία.

Αναλυτικές λύσεις για τα προβλήματα αλλαγής φάσης είναι μόνο γνωστές για μερικές φυσικές καταστάσεις που έχουν μια απλή γεωμετρία και συνθήκες απλών ορίων. Η πιο γνωστή επακριβής αναλυτική λύση για ένα μονοδιάστατο πρόβλημα μετακίνησης ορίου, που ονομάζεται πρόβλημα Stefan, είχε δρομολογηθεί από Neumann. Μερικές αναλυτικές προσεγγίσεις για προβλήματα μονοδιάστατης μετακίνησης ορίου με διαφορετικές οριακές συνθήκες έχουν παραχθεί στις οποίες έχει υποτεθεί ότι η θερμοκρασία τήξης ή στερεοποίησης είναι σταθερή, γεγονός το οποίο απέχει από την πραγματικότητα καθώς τα περισσότερα PCMs έχουν ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασίας στα σημεία όπου η τήξη και η στερεοποίηση συμβαίνουν. Επίσης, οι προαναφερθείσες προσεγγίσεις είναι κατάλληλες μόνο για τον υπολογισμό ημι-άπειρης ή άπειρης αποθήκευσης, το οποίο όμως δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα όπου οι αποθηκεύσεις είναι πεπερασμένες και πρέπει να αντιμετωπιστούν σε τρεις ή τουλάχιστον δύο διαστάσεις, έτσι ώστε να επιτευχθεί μια αρκετά ακριβής λύση.

Αντίθετα αριθμητικές μέθοδοι με βάση τις πεπερασμένες διαφορές, τα πεπερασμένα στοιχεία και πιο πρόσφατα τα στοιχεία των ορίων φαίνεται να προσφέρουν μια πιο πρακτική προσέγγιση για την επίλυση των προβλημάτων αλλαγής φάσης. Όλες αυτές οι μέθοδοι μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες ομάδες, τις μεθόδους εμπρός εντοπισμού και καθορισμένου πεδίου. Το βασικό

μειονέκτημα αυτών που αφορούν την πρώτη ομάδα είναι ότι απαιτούν κάποια κανονικότητα του κινούμενου ορίου καθώς και της εξέλιξής του. Σε αντίθεση με τις μεθόδους καθορισμένου πεδίου, οι οποίες βασίζονται σε αδύναμες συνθέσεις της ενεργειακής εξίσωσης και μπορούν να χειριστούν πολύπλοκες τοπολογικές εξελίξεις της διεπιφάνειας, αλλά ως αντιστάθμισμα η ανάλυση του προφίλ θερμοκρασιών είναι κάπως υποβαθμισμένη, αφού αντιπροσωπεύουν τις κλίσεις θερμοκρασιών ως μια ομαλή συνάρτηση ακόμα κι αν είναι ασυνεχής στη διεπιφάνεια. [8 – 12]

Οι πιο συνηθισμένες αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται και οι οποίες θα αναλυθούν εν συντομία στη συνέχεια είναι η μέθοδος της ενθαλπίας και η μέθοδος της ενεργούς θερμοχωρητικότητας.

2.2.1 Η μέθοδος της ενθαλπίας [10,13-15]

Η μέθοδος της ενθαλπίας εισάγεται σε πολλές αναφορές ως μια αριθμητική μέθοδος για την επίλυση των προβλημάτων αλλαγής φάσης και βασίζεται στην αδύνατη επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Χρησιμοποιείται έτσι ώστε η μόνη άγνωστη μεταβλητή να είναι η θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης. Η μέθοδος αυτή συνεπώς αντιμετωπίζει την ενθαλπία ως μια μεταβλητή εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία και υλοποιεί τη ροή λανθάνουσας θερμότητας μέσω της ογκομετρικής ολοκλήρωσης με τη χρήση της ενθαλπίας του συστήματος.

Η τάξη των προβλημάτων του Stefan για τα οποία αναλυτικές λύσεις υπάρχουν είναι μικρή εξαιτίας της απαίτησης να είναι με ακρίβεια εντοπίσιμο το όριο αλλαγής φάσης, $x = X(t)$. Ένας τρόπος για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα είναι να αναδιατυπωθεί το πρόβλημα Stefan από την άποψη της ενθαλπίας H όπου H η συνολική ογκομετρική ενθαλπία η οποία είναι το άθροισμα της αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας του PCM. Στην περίπτωση αυτή οι εξισώσεις Stefan για το μονοδιάστατο πρόβλημα μειώνονται σε μία μόνο εξίσωση:

$$\frac{\theta}{\theta x} \left(k \frac{\theta T}{\theta x} \right) = \rho \frac{\theta H}{\theta t}, \quad x \geq 0 \quad (2.2)$$

όπου η αγωγιμότητα k και η πυκνότητα ρ είναι συναρτήσεις της θερμοκρασίας. Τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι ότι: (i) δεν υπάρχουν συνθήκες που πρέπει να πληρούνται στο όριο αλλαγής φάσης $x = X(t)$ (ii) δεν υπάρχει καμιά ανάγκη να παρακολουθείται με ακρίβεια το όριο αλλαγής φάσης (iii) δεν υπάρχει καμιά ανάγκη να εξεταστούν οι περιοχές και στις δύο πλευρές του $x = X(t)$ χωριστά και (iv) είναι εύκολο να εισαχθεί μια «πολτώδης» περιοχή δηλαδή όταν η αλλαγή φάσης συμβαίνει σε ένα εύρος θερμοκρασιών αντί σε ένα μόνο σημείο.

Η σχέση μεταξύ των θερμοκρασιών και της ενθαλπίας θα εξαρτηθεί από τη φύση της αλλαγής φάσης. Για παράδειγμα για ένα καθαρό υλικό, που υφίσταται μια

αλλαγή φάσης τήξη / πήξη, όλη η συναφή λανθάνουσα θερμότητα εξελίσσεται σε μια σταθερή θερμοκρασία $T = T_m$ και η σχέση είναι:

$$H(T) = \begin{cases} CT, & T < T_m \\ CT + L, & T > T_m \end{cases} \quad (2.3)$$

όπου C είναι η ειδική θερμότητα και L είναι η λανθάνουσα θερμότητα. Σε πολλά όμως φυσικά προβλήματα η αλλαγής φάσης λαμβάνει μέρος σε ένα εύρος θερμοκρασιών και όχι σε μία μόνο τιμή. Στην περίπτωση αυτή η ενθαλπία $H(T)$ αντικαθίσταται από μια ομαλή συνεχή συνάρτηση, ή μια τμηματικά συνεχή συνάρτηση, π.χ.

$$H(T) = \begin{cases} CT, & T \leq T_m - \varepsilon \\ H(T_m - \varepsilon) + L(T - T_m + \varepsilon) / 2\varepsilon, & T_m - \varepsilon < T < T_m + \varepsilon \\ H(T_m + \varepsilon) + C(T - T_m - \varepsilon), & T_m + \varepsilon \leq T \end{cases} \quad (2.4)$$

όπου ε είναι το ήμισυ του εύρους θερμοκρασιών της αλλαγής φάσης. Έχει αποδειχθεί ότι όταν $H(T)$ ορίζεται με αυτό τον τρόπο, ομαλή (δηλαδή χωρίς ταλάντωση) ιστορία θερμοκρασιών θα μπορεί μόνο να προβλεφθεί όταν τουλάχιστον δύο κομβικές θερμοκρασίες βρίσκονται στην περιοχή αλλαγής φάσης σε όλα τα χρονικά βήματα. Ως εκ τούτου, η αποτελεσματικότητα του συστήματος είναι κρίσιμα εξαρτώμενη από το μέγεθος του ε για οποιοδήποτε πρόβλημα.

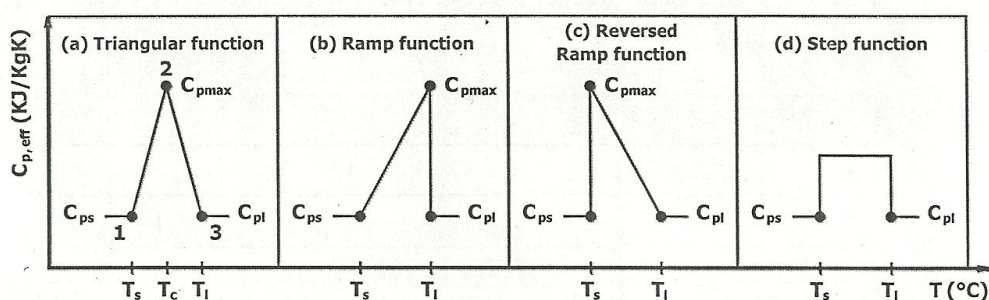
Επομένως η μέθοδος της ενθαλπίας εκτός από το γεγονός ότι είναι μια απλή και ευέλικτη τεχνική για επίλυση προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας, που αφορούν είτε τήξη είτε κατάψυξη, ένα μεγάλο της πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί με οποιονδήποτε υλικό και όχι μόνο με υλικά αλλαγής φάσης.

2.2.2 Η μέθοδος της ενεργούς θερμοχωρητικότητας [10,12,16]

Η μη ισοθερμική αλλαγή φάσης στο PCM είναι επίσης δυνατόν να περιγραφεί με την ενεργό θερμοχωρητικότητα. Η ενεργός θερμοχωρητικότητα του υλικού (c_{eff}) είναι ευθέως ανάλογη προς την ενέργεια που αποθηκεύεται και απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης και την ειδική θερμότητα. Ωστόσο, είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το εύρος της περιοχής θερμοκρασιών τήξης ή στερεοποίησης. Στη μέθοδο αυτή η θερμοχωρητικότητα αντιμετωπίζεται ως μια συνάρτηση της θερμοκρασίας στην περιοχή θερμοκρασιών αλλαγής φάσης (μεταξύ τήξης και στερεοποίησης). Κάτω από τη θερμοκρασία τήξης το υλικό έχει αποφορτιστεί πλήρως και επιπλέον ενέργεια αποθηκεύεται ως αισθητή θερμότητα. Κατά τη διάρκεια του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης, οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του υλικού περιορίζονται από σχεδόν ισοθερμική διαδικασία, τήξης ή στερεοποίησης. Θερμοκρασία ίση ή πάνω από τη θερμοκρασία στερεοποίησης είναι δυνατή μόνο για κατάσταση πλήρους φορτίου. Ως εκ τούτου, το υλικό μπορεί να είναι εκτός της περιοχής θερμοκρασιών αλλαγής φάσης μόνο σε δύο περιπτώσεις: όταν είναι

πλήρως φορτισμένο, ή αποφορτισμένο. Επομένως το μοντέλο της ενεργούς θερμοχωρητικότητας είναι ο πιο απλός τρόπος προσομοίωσης της αλλαγής φάσης σε συνδυασμό με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών για περιπτώσεις όπως είναι η ανάλυση θερμικής συμπεριφοράς κτιρίων που περιέχουν PCM όπου η αλλαγή φάσης παρουσιάζει ενδιαφέρον μόνο ως ένα μακροσκοπικό φαινόμενο δηλαδή λεπτομέρειες όπως η κίνηση της διεπιφάνειας στερεού – υγρού ή η εξάπλωση της «πολτώδους» ζώνης δεν είναι πρωτεύοντος ενδιαφέροντος.

Μοναδική δυσκολία της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η επιλογή της σωστής συνάρτησης $c_{p,eff}(T)$. Τα δεδομένα που χρειάζονται για να προκύψουν απλές συναρτήσεις της $c_{p,eff}(T)$ είναι η θερμότητα αλλαγής φάσης H του PCM και οι θερμοκρασίες T_s και T_l στα άκρα της διφασικής περιοχής του PCM καθώς επίσης και οι αντίστοιχες θερμοχωρητικότητες c_{ps} και c_{pl} . Στο ακόλουθο σχήμα 2.5 παρουσιάζονται τέσσερις διαφορετικές συναρτήσεις $c_{p,eff}(T)$ απλής γεωμετρικής διαμόρφωσης.



Σχήμα 2.5: Συναρτήσεις ενεργού θερμοχωρητικότητας $c_{p,eff}(T)$ απλού γεωμετρικού σχήματος για PCM [12].

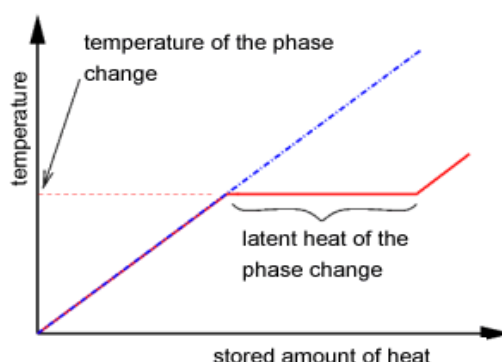
Εκτεταμένες συγκρίσεις έδειξαν όμως ότι στα τελικά αποτελέσματα μόνο η συνάρτηση τριγωνικής μορφής από τις παραπάνω συναρτήσεις δίνει αμελητέες διαφορές σε σύγκριση με την ακριβή πειραματική συνάρτηση.

2.3 Ταξινόμηση των PCMs

Τα υλικά που αλλάζουν φάση στο εύρος των θερμοκρασιών της εφαρμογής που χρησιμοποιούνται ονομάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία PCMs (Phase Change Materials) [17]. Υπάρχουν τέσσερις δυνατότητες στις αλλαγές της φάσης: στερεά – αέρια, υγρή – αέρια, στερεά – στερεά και στερεά – υγρή τα χαρακτηριστικά των οποίων δόθηκαν στην παράγραφο 1.7.3.2 του 1^{ου} Κεφαλαίου. Αν χρησιμοποιήσουμε ως κριτήριο το μηχανισμό αποθήκευσης θερμότητας τα PCMs είναι υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας σε ένα τμήμα του θερμοκρασιακού εύρους χρήσης τους ενώ στο υπόλοιπο συναλλάσσουν θερμότητα με τη μορφή αισθητής θερμότητας.

2.3.1 Υλικά αλλαγής φάσης (από στερεό σε υγρό και αντίστροφα)

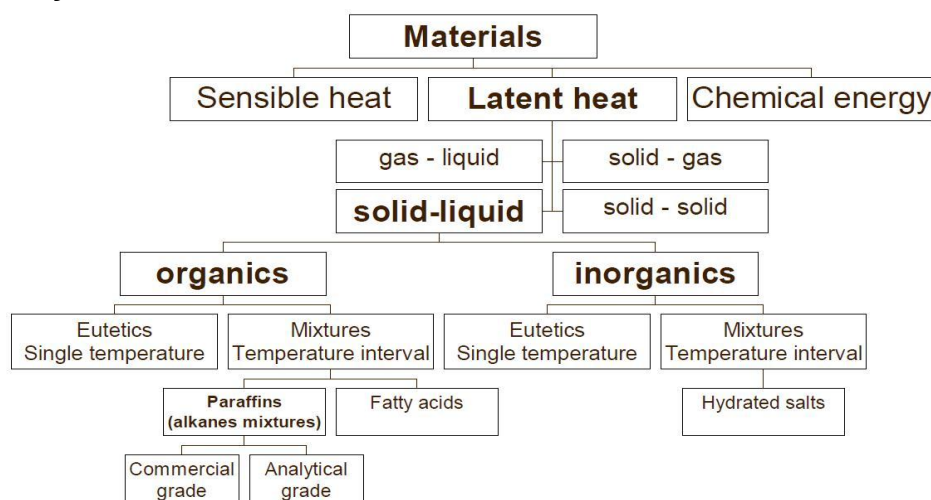
Ως υποψήφια PCMs θεωρούνται συνήθως τα υλικά που αλλάζουν μεταξύ στερεάς και υγρής φάσης [17,18]. Το πλέον γνωστό PCM είναι το νερό, η χρήση του οποίου όμως είναι περιορισμένη παρά την ικανότητά του να αποθηκεύει μεγάλα ποσά θερμότητας λόγω κυρίως της χαμηλής θερμοκρασίας τήξης του (0°C). Η μεταφορά της θερμικής ενέργειας εμφανίζεται όταν ένα υλικό αλλάζει από στερεό σε υγρό, ή υγρό σε στερεό. Ειδικότερα αρχικά τα PCMs που μεταπίπτουν από τη στερεά στην υγρή φάση συμπεριφέρονται όπως τα συμβατικά υλικά αποθήκευσης, η θερμοκρασία τους δηλαδή αυξάνεται καθώς απορροφούν θερμότητα. Αντίθετα όμως από τα συμβατικά (που απορροφούν αισθητή θερμότητα) υλικά αποθήκευσης, στη συνέχεια το PCM απορροφά και απελευθερώνει θερμότητα σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία. Αποθηκεύουν 5-14 φορές περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα όγκου από ό,τι υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, όπως το νερό σε υγρή μορφή και τα συμβατικά δομικά υλικά.



Σχήμα 2.6: Σύγκριση των διαδικασιών αποθήκευσης για αισθητή (μπλε) και λανθάνουσα (κόκκινο) θερμότητα [19].

Τα PCMs μπορούν να ομαδοποιηθούν [17] ανάλογα με τη θερμοκρασία ή το εύρος θερμοκρασιών που λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης (από στερεό σε υγρό) και συνεπώς σύμφωνα με τις εφαρμογές που καλύπτουν: σε υλικά που αλλάζουν φάση κάτω από τους 15°C και χρησιμοποιούνται για αποθήκευση ψύξης σε εφαρμογές κλιματισμού ή μεταφορά ευπαθών υλικών (ιατρικές εφαρμογές) και σε υλικά που αλλάζουν φάση πάνω από τους 90°C και χρησιμοποιούνται για εφαρμογές ψύξης με απορρόφηση. Όλα τα άλλα υλικά με ενδιάμεσες τιμές της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές θέρμανσης σε συνεργασία με ηλιακά συστήματα ή εφαρμογές ομαλοποίησης των φορτίων κλιματισμού καθώς και για αποθήκευση θερμότητας. Άλλου τύπου κατηγοριοποίηση μπορεί να γίνει για τα υλικά που μεταπίπτουν από τη στερεά στην υγρή φάση με βάση τη σύστασή τους σε οργανικά, ανόργανα και σε μια κατηγορία PCMs που βρίσκεται ακόμα υπό έρευνα και η οποία περιλαμβάνει υλικά προερχόμενα από ανακυκλούμενα φυτικά ή ζωικά έλαια

των οποίων η διαθεσιμότητα αυξάνεται, λαμβανομένης υπόψη και της παγκόσμιας αύξησης της παραγωγής απορριμμάτων με μεγάλη περιεκτικότητα τροφίμων στη μάζα τους.



Σχήμα 2.7: Κατηγοριοποίηση των υλικών αλλαγής φάσης ως προς τη σύσταση [17].

2.3.1.1 Οργανικά PCM

Η κατηγορία των οργανικών υλικών [20] αντιπροσωπεύεται κυρίως από τις παραφίνες, τα λιπαρά οξέα και τις σάκχαρο αλκοόλες. Αυτά τα υλικά καλύπτουν ένα θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 0 °C και περίπου 200 °C. Λόγω των ομοιοπολικών δεσμών στα οργανικά υλικά τα περισσότερα από αυτά δεν είναι σταθερά σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Στις περισσότερες περιπτώσεις η πυκνότητα των οργανικών PCM είναι μικρότερη από 103kg/m³ και επομένως μικρότερη από την πυκνότητα των περισσότερων ανόργανων υλικών. Το αποτέλεσμα είναι ότι με την εξαίρεση των σάκχαρο αλκοολών τα οργανικά υλικά έχουν συνήθως μικρότερες ενθαλπίες τήξης κατ' όγκο από τα ανόργανα υλικά. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο οργανικό PCM από τα παραπάνω είναι οι παραφίνες.

2.3.1.1.1 Παραφίνες [20 – 23]

Οι παραφίνες είναι προϊόντα ορυκτού λαδιού (πετρελαίου) που αποτελούνται κυρίως από την οργανική οικογένεια των βαρέων υδρογονανθράκων που ονομάζονται αλκάνια, με χημικό τύπο C_nH_{2n+2} με n ≥ 16. Καθαρές παραφίνες περιέχουν μόνο αλκάνια. Τα πρώτα τέσσερα αλκάνια της σειράς (από το μεθάνιο CH₄ μέχρι το βουτάνιο C₄H₁₀) είναι αέρια σε θερμοκρασία δωματίου και ατμοσφαιρική πίεση. Οι ενώσεις μεταξύ C₅H₁₂ και C₁₇H₃₆ είναι υγρά και ενώσεις με περισσότερα από 17 άτομα άνθρακα ανά μόριο είναι κηρώδη στερεά σε θερμοκρασία δωματίου. Τα κεριά παραφίνης αποτελούνται από μείγματα κυρίως κανονικών αλκανίων. Το ποσό των κανονικών αλκανίων σε κεριά παραφίνης υπερβαίνει συνήθως το 75% (και μπορεί να φθάσει σχεδόν το 100%), ενώ το υπόλοιπο αποτελείται κυρίως

από ισο-αλκάνια, κυκλο-αλκάνια, και αλκύλια βενζολίου. Για παράδειγμα, ένα δείγμα κεριού που παράγεται από τη Sun Refining and Marketing Company (Suntech P116), περιέχει κατά 99% υδρογονάνθρακες με μήκος ανθρακικής αλυσίδας από 20 έως 32 και το υπόλοιπο 1% αποτελείται από υδρογονάνθρακες με μήκος ανθρακικής αλυσίδας μεγαλύτερο από 32 με εκθετική μείωση του κλάσματος. Τα μοριακό βάρος των υδρογονανθράκων σε κερι παραφίνης είναι περίπου της τάξης του 280-560 ($C_{20} - C_{40}$), με κάθε επιμέρους κερι να έχει εύρος από περίπου 8 έως 15 άτομα άνθρακα. Στη στερεά φάση τους, οι παραφίνες γενικά βρίσκονται σε δύο αλλοτροπικές τροποποιήσεις που διαφέρουν ως προς τις φυσικές ιδιότητες και την κρυσταλλική δομή. Η πρωταρχική τροποποίηση που υπάρχει σε υψηλότερη θερμοκρασία, δηλαδή ελαφρώς πάνω από το σημείο τήξης της ουσίας, είναι μαλακή και πλαστική, τα μεμονωμένα κρύσταλλα είναι σε σχήμα βελόνας. Η δευτερεύουσα τροποποίηση που υπάρχει σε χαμηλότερη θερμοκρασία, δηλαδή κάτω από το σημείο τήξης, είναι σκληρή και εύθραυστη, τα κρύσταλλα είναι δισκοειδή. Η μετάβαση από μία μορφή κρυστάλλων σε άλλη είναι αναστρέψιμη.

Με την αύξηση του αριθμού των ατόμων C στο C_nH_{2n+2} η θερμοκρασία τήξης των αλκανίων αυξάνεται. Το όριο είναι το πολυαιθυλένιο με χιλιάδες άτομα C. Ενώ λοιπόν το σημείο τήξης αλλά και η πυκνότητα σε σχέση με τον αριθμό των ατόμων άνθρακα έχουν μια ομαλή μεταβολή, η λανθάνουσα θερμότητα τήξης περνά από διακυμάνσεις. Ειδικότερα λόγω των «steric effects», που προκύπτουν από το γεγονός ότι κάθε άτομο μέσα σε ένα μόριο καταλαμβάνει μια ορισμένη ποσότητα χώρου καθώς και από τη γενικότερη διάταξη των ατόμων στο μόριο, υπάρχει μια διαφορά μεταξύ αλκανίων με μόνο και ζυγό αριθμό ατόμων άνθρακα. Τα αλκάνια ζυγού αριθμού έχουν υψηλότερη λανθάνουσα θερμότητα από εκείνα με μονό αριθμό. Humphries (1974) έδειξαν ότι αλκάνια με ένα ζυγό αριθμό ατόμων άνθρακα (μεταξύ 20 και 32) και αλκάνια με μονό αριθμό ατόμων άνθρακα (άνω του 7), παρουσιάζουν μια μετάβαση πλέγματος στη στερεά κατάσταση. Τα αλκάνια ζυγού αριθμού ατόμων άνθρακα εμφανίζουν αυτή τη μετάβαση πιο κοντά στο σημείο τήξης τους από τα αλκάνια με μονό αριθμό. Η μετάβαση πλέγματος στα αλκάνια συνοδεύεται από την απελευθέρωση της θερμότητας της μετάβασης. Γενικά, η μετάβαση πλέγματος εμφανίζεται στη στερεά κατάσταση σε περίπου 2-5K κάτω από το σημείο τήξης. Η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας μετάβασης και θερμοκρασίας τήξης μικραίνει με την αύξηση του μοριακού βάρους και, τέλος, εξαφανίζεται για αλκάνια με περισσότερα από 36 άτομα άνθρακα, όπως έχει αποδειχθεί. Η θερμότητα που σχετίζεται με αυτή τη μετάβαση στερεό – στερεό αφαιρείται από τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης. Επομένως οι λανθάνουσες θερμότητες τήξης δύο διαδοχικών αλκανίων δεν αυξάνουν

πάντα με αύξηση του αριθμού των ατόμων άνθρακα. Κάθε ζυγού αριθμού αλκάνιο (με 8 άτομα άνθρακα ή μεγαλύτερο) παρουσιάζει χαμηλότερη λανθάνουσα θερμότητα από ένα μονού αριθμού αλκάνιο που έχει ένα άτομο άνθρακα λιγότερο από αυτό. Αυτή η διακύμανση της λανθάνουσας θερμότητας τήξης εξαφανίζεται καθώς ο αριθμός των ατόμων άνθρακα προσεγγίζει το 40, και μετά απ' αυτό η λανθάνουσα θερμότητα τήξης αυξάνει με την αύξηση του αριθμού των ατόμων άνθρακα. Γενικά προτιμούνται οι παραφίνες με άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα, καθώς είναι φθηνές, πιο άφθονες και πιο σταθερές. Πρέπει να σημειωθεί στο σημείο αυτό όμως ότι η θερμοκρασία τήξης των εμπορικών παραφινών που όπως είπαμε προέρχονται από απόσταξη πετρελαίου και περιέχουν έναν αριθμό διαφορετικών υδρογονανθράκων είναι χαμηλότερη από αυτή των καθαρών αλκανίων τα οποία αποφεύγονται καθώς είναι ιδιαίτερα ακριβά. Επίσης εκτός από διαφορετικούς υδρογονάνθρακες αναμειγνύονται και αλκάνια διαφορετικού μήκους αλυσίδας προκειμένου να προκύψουν PCM με διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης.

Τα μείγματα παραφίνης έχει αποδειχθεί ότι καταδεικνύουν καλή πυκνότητα αποθήκευσης σε σχέση με τη μάζα, λιώνουν και στερεοποιούνται ομοιόμορφα με ελάχιστη ή καμία υπόψυξη και παρουσιάζουν μικρό διαχωρισμό των συστατικών τους, μικρές αλλαγές στη δομή τους κατά τη διάρκεια επαναλαμβανόμενων μεταβάσεων φάσης καθώς και χαμηλή τιμή. Όμως η θερμική αγωγιμότητά τους είναι συγκριτικά πολύ χαμηλή και εντός ενός πολύ μικρού χώρου μπορεί να υπάρχουν σε όλες τις φάσεις. Οι κλίσεις της θερμοκρασίας συνεπώς είναι αναπόφευκτες, και μεταλλικά υλικά πληρώσεως πρέπει να χρησιμοποιούνται για την αύξηση της «ενεργούς» αγωγιμότητας. Αλουμίνιο κυψελωτό έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία ως υλικό πληρώσεως. Όσον αφορά τη σταθερότητα των εμπορευματοκιβωτίων, η τάση ατμών τους συνήθως δεν είναι σημαντική και η αύξηση του όγκου τους κατά την τήξη είναι της τάξης του 10% κατ' όγκο, η οποία είναι παρόμοια με εκείνη πολλών ανόργανων υλικών, αλλά λιγότερο κρίσιμη καθώς οι παραφίνες είναι πιο μαλακές και ως εκ τούτου δημιουργούνται μικρότερες δυνάμεις κατά την επέκταση. Οι παραφίνες επίσης είναι αδιάλυτες στο νερό καθώς είναι νερό απωθητικές και δεν αντιδρούν με τα περισσότερα κοινά χημικά αντιδραστήρια. Σε υψηλές τώρα θερμοκρασίες δεσμοί παραφινών ενδέχεται να σπάσουν και η προκύπτουσα μικρή αλυσίδα μορίων να εξατμιστεί. Αξίζει να σημειωθεί όμως ότι παρόλο που είναι εύφλεκτες, δεν καίγονται εύκολα ως σύνολο. Τέλος η συμβατότητα των παραφινών με τα μέταλλα είναι πολύ καλή, πράγμα που δε συμβαίνει με τις πλαστικές ύλες στις οποίες μπορεί να προκαλέσουν χαλάρωση.

2.3.1.1.2 Λιπαρά οξέα [20,24,25]

Στη χημεία ένα λιπαρό οξύ είναι ένα καρβοξυλικό οξύ με μια μακρά χωρίς διακλαδώσεις αλειφατική ουρά (αλυσίδα), η οποία είναι είτε κορεσμένη είτε ακόρεστη. Ειδικότερα τα ακόρεστα λιπαρά οξέα έχουν έναν ή περισσότερους διπλούς δεσμούς μεταξύ των ατόμων του άνθρακα. Ζεύγη ατόμων άνθρακα που συνδέονται με διπλούς δεσμούς μπορεί να γίνουν κορεσμένα με την προσθήκη ατόμων υδρογόνου σε αυτά, μετατρέποντας έτσι τους διπλούς δεσμούς σε μονούς. Επομένως, οι διπλοί δεσμοί ονομάζονται ακόρεστα. Αντίθετα τα κορεσμένα λιπαρά οξέα είναι μακριές αλυσίδες από καρβοξυλικά οξέα που έχουν συνήθως 12 με 24 άτομα άνθρακα και δεν έχουν διπλούς δεσμούς. Έτσι, τα κορεσμένα λιπαρά οξέα έγιναν κορεσμένα με υδρογόνο (αφού οι διπλοί δεσμοί μειώνουν τον αριθμό των υδρογόνων σε κάθε άνθρακα). Επειδή τα κορεσμένα λιπαρά οξέα έχουν μόνο μονούς δεσμούς, κάθε άτομο άνθρακα εντός της αλυσίδας έχει 2 άτομα υδρογόνου. Τα περισσότερα φυσικά λιπαρά οξέα έχουν μια αλυσίδα από άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα, από 4 έως 28. Όταν δεν συνδέονται με άλλα μόρια, είναι γνωστά ως «ελεύθερα» λιπαρά οξέα. Τα λιπαρά οξέα προέρχονται συνήθως από τριγλυκερίδια ή φωσφολιπίδια και κατηγοριοποιούνται με βάση το μήκος της αλυσίδας τους σε λιπαρά οξέα μικρής, μεσαίας, μακριάς και πολύ – μακριάς αλυσίδας.

Ένα κορεσμένο λιπαρό οξύ όπως είναι το καπρικό, λαυρικό, παλμιτικό, μυριστικό και το στεατικό οξύ χαρακτηρίζεται από τον τύπο $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$. Σε αντίθεση με μια παραφίνη το ένα άκρο του μορίου τελειώνει με μια ομάδα $-\text{COOH}$ αντί για $-\text{CH}_3$. Τα οξέα αυτά έχουν σημεία τήξης μεταξύ 30°C και 70°C με τη θερμοκρασία να αυξάνεται με το μήκος του μορίου και λανθάνουσες θερμότητες στην περιοχή 160 έως 185 J/gr, δηλαδή παραπλήσιες με εκείνες των παραφινών. Παρουσιάζουν μικρές μεταβολές του όγκου κατά τη διάρκεια της μετάβασης φάσης και έχουν ασήμαντη ή καθόλου υπέρψυξη κατά τη διάρκεια της κατάψυξης. Ακόμα διαθέτουν καλή χημική σταθερότητα, χαμηλή τάση ατμών σε θερμοκρασία δωματίου αν και όπως οι παραφίνες έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Μια διαφορά με τις παραφίνες αναμένεται στη συμβατότητα των λιπαρών οξέων με τα μέταλλα λόγω του οξύ χαρακτήρα. Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα επίσης είναι ότι δεν μπορεί να υπάρξει διαχωρισμός των φάσεων καθώς αποτελούνται από ένα μόνο συστατικό. Το πιο σημαντικό όμως απ' όλα είναι ότι οι πρώτες ύλες για την κατασκευή των λιπαρών οξέων αποτελούνται από ανανεώσιμες πηγές φυτικών και ζωικών πηγών. Αυτό εξασφαλίζει μια συνεχιζόμενη πηγή εφοδιασμού, ανεξάρτητη από εξάντληση αποθεμάτων στον κόσμο και από προμήθειες ορυκτών καυσίμων. Ο χαρακτηρισμός λιπαρό οξύ είναι μια ιστορική ορολογία που χρησιμοποιείται επειδή αυτές οι χημικές

ουσίες, παράγονται κατά κύριο λόγο από φυσικά λίπη και έλαια που αναφέρονται και ως τριγλυκερίδια. Όταν χωρίζονται με υδρόλυση αυτά παράγουν μικτά λιπαρά οξέα και διαλύουν τη γλυκερίνη. Τα λιπαρά οξέα επομένως που έχουν αποκτηθεί στη συνέχεια διαχωρίζονται, εξευγενίζονται και καθαρίζονται έως τον επιθυμητό βαθμό καθαρότητας. Παρόλα αυτά όμως το κόστος τους αποτελεί σοβαρό ανασταλτικό παράγοντα επιλογής τους καθώς είναι γενικά πιο μεγάλο από εκείνο των ανόργανων ένυδρων αλάτων και ακατέργαστων παραφινών.

2.3.1.1.3 Σάκχαρο – αλκοόλες

Μια σάκχαρο αλκοόλη [20,26] (επίσης γνωστή ως πολυόλη, πολυυδρική αλκοόλη, ή πολυαλκοόλη) είναι μια υδρογονωμένη μορφή υδατάνθρακα, της οποίας η καρβονυλική ομάδα (αλδεΐδη ή κετόνη, με μείωση της ζάχαρης) έχει μειωθεί σε μια κύρια ή δευτερεύουσα ομάδα υδροξυλίου (εξ ου και η αλκοόλη). Η γενική χημική δομή είναι $\text{HOCH}_2\left[\text{CH}(\text{OH})\right]_n\text{CH}_2\text{OH}$. Διαφορετικές μορφές λαμβάνονται ανάλογα με τον προσανατολισμό των ομάδων OH. Οι σάκχαρο αλκοόλες είναι μια μάλλον νέα κατηγορία υλικών, επομένως πολύ λίγες γενικές πληροφορίες είναι διαθέσιμες. Έχουν θερμοκρασίες τήξης στην περιοχή από 90°C έως 200°C, και οι μαζικές ειδικές ενθαλπίες τήξης τους είναι συγκριτικά υψηλές στις περισσότερες περιπτώσεις. Επιπλέον, η πυκνότητά τους είναι επίσης υψηλή, γεγονός που οδηγεί σε πολύ υψηλές ογκομετρικές ειδικές ενθαλπίες τήξης. Σε αντίθεση με πολλά άλλα οργανικά υλικά, οι σάκχαρο αλκοόλες δείχνουν, ωστόσο, κάποια υπόψυξη. Η απλούστερη σάκχαρο αλκοόλη, αιθυλενογλυκόλη, είναι το γλυκό, αλλά εμφανώς τοξικό, χημικό που χρησιμοποιείται ως αντιψυκτικό. Οι ανώτερες σάκχαρο αλκοόλες είναι ως επί το πλείστον μη τοξικές.

Πολυαιθυλενογλυκόλη – PEG [20,27,28]

Πολυαιθυλενογλυκόλη ή εν συντομία PEG είναι ένα πολυμερές με το γενικό τύπο $\text{C}_{2n}\text{H}_{4n+2}\text{O}_{n+1}$. Παράγεται από την αλληλεπίδραση του οξειδίου του αιθυλενίου με το νερό, αιθυλενογλυκόλη, ή ολιγομερή αιθυλενογλυκόλης. Η αντίδραση καταλύεται από όξινους ή βασικούς καταλύτες. Αιθυλενογλυκόλη και τα ολιγομερή της, είναι προτιμότερα ως πρώτη ύλη αντί για νερό, επειδή επιτρέπουν την δημιουργία πολυμερών με χαμηλή πολυδιασπαρσιμότητα (στενή κατανομή μοριακών βαρών). Η βασική μονάδα μιας γραμμικής αλυσίδας PEG, το μήκος της οποίας εξαρτάται από την αναλογία των αντιδρώντων, είναι μονομερή του $-\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{O} -$. Τα μονομερή έχουν μοριακό βάρος της τάξης του 44 g/mole. Πολυαιθυλενογλυκόλες συνεπώς είναι διαθέσιμες σε ένα εύρος τιμών μοριακού βάρους από περίπου 200 – 35000 g/mole που αντιστοιχεί σε 5 και σε περίπου 800 μονομερή αντίστοιχα. Τα σημεία τήξης τους στη συνέχεια ποικίλουν ανάλογα με το βάρος του τύπου του

πολυμερούς. Ειδικότερα PEGs με μέσο μοριακό βάρος μεταξύ 200 και 400 είναι υγρά σε θερμοκρασία δωματίου ενώ PEG με 600 λιώνει στους 17 - 22°C. Η θερμοκρασία τήξης τώρα όλων των PEGs με μοριακό βάρος που υπερβαίνει τα 4.000 g/mol είναι περίπου 58 - 65°C. Πρέπει να διευκρινιστεί στο σημείο αυτό τα διάφορα διαθέσιμα είδη PEG δεν έχουν επακριβώς καθορισμένη μοριακή μάζα καθώς τα περισσότερα περιλαμβάνουν μόρια με μια κατανομή μοριακών βαρών, δηλαδή, είναι πολυδιάσπαρατα.

Η PEG θεωρείται ένα πολλά υποσχόμενο υλικό αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, λόγω της σχετικά μεγάλης θερμότητας τήξης, της ομοιόμορφης συμπεριφοράς τήξεως, της μη διαβρωτικότητας και της ευρείας περιοχής του σημείου τήξης ως υλικό αλλαγής φάσης (PCM). Για να χρησιμοποιηθεί η PEG ως υλικό αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, δεν πρέπει να υποβαθμιστεί κατά την περίοδο της εφαρμογής. Όμως η PEG είναι ευαίσθητη στην οξειδωτική επίθεση ελεύθερων ριζών επειδή οι υψηλές πιέσεις στις πτυχώσεις της αλυσίδας της ελασματοειδούς δομής χαμηλώνουν την ενέργεια ενεργοποίησης αφαίρεσης του υδρογόνου. Θερμική υποβάθμιση της PEG παράγει προϊόντα χαμηλού μοριακού βάρους, τα οποία προκαλούν μείωση του σημείου τήξης και της θερμότητας τήξης. Καθώς η θερμική υποβάθμιση προχωρά, το ποσό των χαμηλού μοριακού βάρους προϊόντων μεγαλώνει, και ως εκ τούτου η απόδοση του θερμικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας μειώνεται. Έχει αποδειχθεί ότι θερμική υποβάθμιση της PEG σε 80°C στον αέρα προκαλεί σημαντικές αλλαγές και στο σχήμα της. Μετά από 100 h θερμικής οξειδωσης, η PEG μετατρέπεται από μια σκόνη ελεύθερης ροής σε ένα μαλακό κηρώδες στερεό.

2.3.1.2 Ανόργανα PCM

2.3.1.2.1 Ένυδρα άλατα [20,22,23,29,30]

Το εύρος θερμοκρασιών μεταξύ 5°C και 130°C καλύπτεται από τα ένυδρα άλατα. Τα ένυδρα άλατα αποτελούνται από αλάτι και νερό σε μια διακριτή αναλογία μείξης. Είναι συνήθως ένα ακέραιος αριθμός μορίων νερού ανά ζεύγος ιόντων αλατιού με μια σταθερή κρυσταλλική δομή να σχηματίζεται. Οι δεσμοί είναι συνήθως ιοντικοί διπολικοί δεσμοί ή δεσμοί υδρογόνου. Τα μόρια του νερού βρίσκονται και προσανατολίζονται στη δομή με ένα σαφώς καθορισμένο τρόπο. Σε ορισμένες δομές, το νερό είναι περισσότερο προσανατολισμένο προς τα ανιόντα, σε άλλες προς τα κατιόντα του αλατιού. Ο γενικός χημικός τύπος των κρυσταλλικών ένυδρων αλάτων είναι $X(Y)_n \cdot mH_2O$.

Με θέρμανση μέχρι τη θερμοκρασία μετάβασης θερμοχημική αντίδραση των ένυδρων αλάτων εμφανίζεται και το κρυσταλλικό ένυδρο απελευθερώνει λίγο νερό για την παραγωγή είτε χαμηλότερου ένυδρου είτε άνυδρου άλατος. Το άνυδρο υλικό αποθηκεύει την ενέργεια που χρησιμοποιείται για την αφυδάτωση του υλικού καθώς έχει μεγαλύτερο ενεργειακό περιεχόμενο και μπορεί σταθερά να αποθηκεύει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για μεγάλες διάρκειες. Αρνητικό όμως είναι το γεγονός ότι τα περισσότερα ένυδρα άλατα υποβάλλονται σε ανομοιόμορφη μετάβαση, δηλαδή το νερό που απελευθερώνεται δεν αρκεί για να διαλύσει όλη την παρούσα φάση του στερεού. Έτσι, στο σημείο μετάβασης, δύο φάσεις στερεού μπορεί να είναι παρούσες, μαζί με ένα κορεσμένο διάλυμα του κατώτερου ένυδρου. Σε τέτοιες περιπτώσεις το κατώτερο ένυδρο (ή το άνυδρο άλας), που είναι συνήθως μεγαλύτερης πυκνότητας, κατακάθεται στο κάτω μέρος των εμπορευματοκιβωτίων, αποτρέποντας την πλήρη επανακρυσταλλοποίηση κατά την ψύξη. Ειδικότερα με τη ψύξη η επανυδάτωση η οποία πραγματοποιείται με μια ροή υδρατμών κατά μήκος του αλατιού μπορεί να αρχίσει μόνο στη διεπιφάνεια διαλύματος – ιζήματος. Έτσι η ενυδάτωση δεν είναι δυνατόν να προχωρήσει περαιτέρω, επειδή το ένυδρο άλας αποτελεί ένα εμπόδιο επαφής μεταξύ του υγρού και του άνυδρου άλατος διαλύματος.

Επομένως ο διαχωρισμός των φάσεων, που προκύπτει από το γεγονός ότι τα ένυδρα άλατα αποτελούνται από διάφορα στοιχεία και έχει ως συνέπεια προβλήματα σταθερότητας σε κυκλική φόρτιση καθώς και το φαινόμενο της υπέρψυξης είναι δύο από τα σημαντικότερα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Ειδικότερα για την σταθεροποίηση των PCMs διάφορες μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί, όπως η ανάδευση του εμπορευματοκιβωτίου με PCM, φυσικοχημική τροποποίηση με την προσθήκη επιπλέον νερού, ενσωμάτωση σε μικροκάψουλες του PCM μέσω χημικής αντίδρασης και πάχυνση. Η μέθοδος της πάχυνσης είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για την πρόληψη του διαχωρισμού φάσεων η οποία προκαλεί αύξηση του ιξώδους με πρόσθετες ύλες στο PCM. Όταν το κατάλληλο πυκνωτικό προστίθεται στα PCMs, αιωρούνται άνυδρα άλατα ομοιογενώς κατά την τήξη τα οποία ενδέχεται να έχουν μια πιο μεγαλύτερη πιθανότητα επαφής με το νερό, έτσι ώστε η επανυδάτωση των αλάτων να μπορεί να βελτιωθεί. Επίσης, μπορεί να βοηθήσει στην αναστολή αδιάλυτων παραγόντων σχηματισμού πυρήνων κατά την τήξη για μείωση της υπέρψυξης. Η ικανότητα σταθεροποίησης πυκνωτικών παραγόντων για κάθε ένυδρο άλας ποικίλει ευρέως και δεν είναι εύκολο να προβλεφθεί. Ως εκ τούτου, η βέλτιστη συγκέντρωση και η ικανότητα σταθεροποίησης του υποψηφίου πυκνωτικού για κάθε PCM θα πρέπει να καθορίζεται από πειραματικές μελέτες. Όσον αφορά τώρα την υπέρψυξη αυτή μπορεί να αποφευχθεί με την προώθηση της πυρήνωσης, είτε με: (α)

μηχανικά μέσα (ρωγμές ή κοιλώματα στο δοχείο για αποτροπή της αφυδάτωσης μικρών ποσοτήτων του αρχικού υλικού και οι οποίοι θύλακες, στη συνέχεια, ενεργούν ως τοποθεσίες πυρήνωσης), ή με (β) την προσθήκη μικρών ποσοτήτων παραγόντων πυρήνωσης που έχουν κρυσταλλική δομή παρόμοια με αυτή της μητρικής ουσίας ή με (γ) την προώθηση ετερογενούς πυρήνωσης δηλαδή χρήση (σκληρών) μεταλλικών επιφανειών ανταλλαγής θερμότητας σε επαφή με το ένυδρο άλας.

Παρόλα αυτά τα ανόργανα ένυδρα άλατα καθίστανται κατάλληλα για αποθήκευση της θερμικής ενέργειας και ιδιαίτερα σε μακροπρόθεσμες εφαρμογές. Για παράδειγμα μπορούμε, αξιοποιώντας την ηλιακή ενέργεια για το διαχωρισμό ενός ένυδρου άλατος το καλοκαίρι και στη συνέχεια αποθηκεύοντας το αφυδατωμένο άλας και τους υδρατμούς χωριστά έως το χειμώνα, να θερμάνουμε τα κτίρια με την θερμότητα που απελευθερώνεται από το ανασυνδυασμό τους. Ορισμένα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες υλικών αλλαγής φάσης είναι η υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης όσον αφορά τη μάζα, αλλά ακόμη περισσότερο όσον αφορά τον όγκο λόγω της μεγάλης πυκνότητά τους. Επίσης η θερμική τους αγωγιμότητα είναι σχετικά υψηλή καθώς είναι παρόμοια με εκείνη του νερού και των ευτηκτικών διαλυμάτων άλατος νερού, οι μεταβολές του όγκου τους ακόμα είναι μικρές, δεν ξεπερνάνε την τιμή του 10% κατ' όγκο και η τάση ατμών τους είναι κάπως χαμηλότερη απ' ό,τι για το νερό εξαιτίας της μείωσης που υφίσταται λόγω της παρουσίας του αλατιού, γεγονός που απομακρύνει κινδύνους ανάφλεξης. Ωστόσο όμως πολλά απ' αυτά είναι πιθανώς διαβρωτικά ειδικά για τα μέταλλα και ελαφρώς τοξικά. Σημαντικός λόγος που επιλέγονται σε πολλές εφαρμογές είναι το κόστος τους, η τιμή τους είναι συνήθως χαμηλή, της τάξης από 1 έως 3 €/kg εκτός αν αγοράζονται σε καθαρή μορφή.

Προκειμένου να πάρουμε υλικά με διαφορετική θερμοκρασία τήξης ή βελτιωμένες ιδιότητες, έχουν δοκιμαστεί μείγματα ανόργανων υλικών. Για παράδειγμα, μικρές ποσότητες από NaCl και KCl προστέθηκαν στο $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ για να επιτευχθεί καλύτερη συμπεριφορά τήξης, χωρίς σημαντική μεταβολή της θερμοκρασίας τήξεως (Lane 1986). Ένα ακόμη παράδειγμα, αποτελεί ο συνδυασμός των $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ και $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα μια πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης του μείγματος σε σχέση με τα βασικά υλικά του μείγματος κ.ο.κ..

2.3.1.2.2 Άλας Glauber [17,31,32]

Αν και ανήκει στην κατηγορία των ένυδρων αλάτων θα αναλυθεί ξεχωριστά καθώς θεωρείται ως ένα από τα πιο πολυεξετασμένα υλικά για εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας. Το άλας Glauber ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) με τυπική κατά βάθος

σύσταση ίση με: 44% Na_2SO_4 και 56% H_2O έχει μια βολική θερμοκρασία τήξης ($32,4^\circ\text{C}$) και μια μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα τήξης ($56 - 60 \text{ cal/gr}$) η οποία του δίνει μια υψηλή ενεργειακή πυκνότητα (δηλαδή ενέργεια / όγκο) στο σημείο τήξης του. Το Na_2SO_4 αντιστοιχεί στο θειικό νάτριο που είναι το άλας νατρίου του θειικού οξέος και το οποίο όταν είναι άνυδρο, είναι ένα λευκό κρυσταλλικό στερεό ενώ ως άλας Glauber θεωρείται το δεκαένυδρο με τύπο $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Το θειικό νάτριο έχει ασυνήθιστα χαρακτηριστικά διαλυτότητας στο νερό. Η διαλυτότητά του στο νερό αυξάνεται περισσότερο από δέκα φορές μεταξύ 0°C έως $32,384^\circ\text{C}$, όπου φτάνει το πολύ 497 g/L . Σε αυτό το σημείο η καμπύλη διαλυτότητας αλλάζει κλίση, και η διαλυτότητα γίνεται σχεδόν ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία. Το δεκαένυδρο θειικό νάτριο είναι επίσης ασυνήθιστο μεταξύ των ένυδρων αλάτων, λόγω του γεγονότος ότι έχει ένα μετρήσιμο υπόλοιπο εντροπίας (εντροπία στο απόλυτο μηδέν) της τάξης του $6,32 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$. Αυτό αποδίδεται στην ικανότητά του να διανέμει το νερό πολύ πιο γρήγορα σε σύγκριση με τα περισσότερα ένυδρα.

Ωστόσο οι εφαρμογές του περιορίζονται από το γεγονός ότι το καθαρό άλας Glauber λιώνει ανομοιόμορφα, υποψύχεται σοβαρά και πυρηνώνει αυθόρμητα το ανεπιθύμητο επταένυδρο. Ειδικότερα όσον αφορά την ανομοιόμορφη τήξη το άλας Glauber λιώνει ανομοιόμορφα επειδή το άνυδρο Na_2SO_4 είναι αδιάλυτο στο νερό της κρυστάλλωσης που απελευθερώνεται κατά τη τήξη. Κατά συνέπεια, όταν το άλας Glauber λιώνει, περίπου το 15 τοις εκατό του στερεού άλας Glauber καθιζάνει καθώς το άνυδρο Na_2SO_4 , όντας πιο πυκνό από το διάλυμα εγκαθίσταται στο πυθμένα του δοχείου. Η μείωση της θερμοκρασίας στη συνέχεια κάτω από το σημείο τήξης του άλατος Glauber έχει σαν αποτελέσματα το σχηματισμό μιας μετασταθούς κατάστασης κατά την οποία το αδιάλυτο Na_2SO_4 συνυπάρχει με το νεοσύστατο αλάτι Glauber και την περίσσεια του διαλύματος. Για τους σκοπούς της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, αυτή η μετασταθής κατάσταση είναι ανεπιθύμητη δεδομένου ότι η χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας καθορίζεται από το ποσό του άλατος Glauber που σχηματίστηκε. Έτσι, όταν μια τήξη του καθαρού άλατος Glauber ψύχεται κάτω από το σημείο τήξης του δεν σχηματίζεται όλο από το πιθανά διαθέσιμο άλας. Η καθιέρωση της ενιαίας φάσης του άλατος Glauber καθυστερεί καθώς το νεοσύστατο άλας Glauber κρυσταλλώνεται στην κορυφή του στρώματος του άνυδρου Na_2SO_4 παρακωλύοντας με αυτόν τον τρόπο τον επιθυμητό ανασυνδυασμό του Na_2SO_4 και του επιπλέον διαλύματος.

Μια λύση στο πρόβλημα της ανομοιόμορφης τήξης έχει προταθεί από Telkes, που υποστήριξε ότι ομοιογενή αναστολή των μορίων Na_2SO_4 στην τήξη θα απέτρεπε

το άλας Glauber από κρυστάλλωση σε ένα στρώμα πάνω από τα μόρια του Na_2SO_4 και ως εκ τούτου η μετάβαση από τη μετασταθή κατάσταση στην επιθυμητή ενιαία κατάσταση ισορροπίας φάσης θα προωθούνταν. Όσον αφορά τώρα τα δύο άλλα προβλήματα η προσθήκη του τετραβορικού νατρίου $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (βόρακας) ως παράγοντα πυρήνωσης αποτελεί ικανοποιητική λύση. Ο βόρακας έχει αποδειχθεί ότι πυρηνώνει το άλας Glauber επανειλημμένως για πάνω από 100 θερμικούς κύκλους με μια κρίσιμη υπέρψυξη της τάξης των 7°C και πυρηνώνει το δεκαένυδρο αποκλειστικά έτσι ώστε το επταένυδρο να μην σχηματίζεται.

2.3.1.3 Εύτηκτα μίγματα [18,33-35]

Ένα εύτηκτο μίγμα είναι μια σύνθεση με ελάχιστο σημείο τήξης δύο ή περισσότερων συστατικών, καθένα από τα οποία λιώνει και παγώνει ταυτόχρονα σχηματίζοντας ένα μείγμα με συστατικά από κρυστάλλους κατά τη διάρκεια της κρυσταλλοποίησης. Ένα εύτηκτο μίγμα σχεδόν πάντα λιώνει και παγώνει χωρίς διαχωρισμό, δεδομένου ότι αυτά παγώνουν σε ένα ομοιογενές μείγμα κρυστάλλων, αφήνοντας ελάχιστα περιθώρια για τις συνιστώσες του να διαχωριστούν. Κατά την τήξη και οι δύο συνιστώσες υγροποιούνται ταυτόχρονα, όπου και πάλι η εμφάνιση του διαχωρισμού είναι απίθανη. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των εύτηκτων μιγμάτων πέρα από το σημείο τήξης που είναι παρόμοιο με καθαρής ουσίας είναι η ογκομετρική πυκνότητα αποθήκευσης που είναι ελαφρώς πάνω από αυτή των οργανικών ενώσεων. Το κύριο πρόβλημα όμως που αντιμετωπίζουν οι ενώσεις αυτές είναι το κόστος, το οποίο είναι περίπου δύο ή τρεις φορές μεγαλύτερο από ό,τι των απλών οργανικών ή ανόργανων PCMs. Ενδεικτικά παραδείγματα εύτηκτων μιγμάτων που μπορεί γενικά να είναι είτε οργανικά είτε ανόργανα είτε μίγματα οργανικών και ανόργανων PCMs είναι τα ακόλουθα.

- $66.6\% \text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 33.3\% \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ με σημείο τήξης 25°C ,
- $48\% \text{CaCl}_2 + 4.3\% \text{NaCl} + 0.4\% \text{KCl} + 47.3\% \text{H}_2\text{O}$ με σημείο τήξης $26,8^\circ\text{C}$ και
- $47\% \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + 53\% \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ με σημείο τήξης 30°C

2.3.1.4 Clathrates [20,36,37]

Clathrates ή κλειθρίτες είναι μια κατηγορία υλικών που δεν είναι γενικά οργανικά ή ανόργανα. Είναι κρυσταλλικές δομές, όπου μόρια ενός τύπου περικλείονται στο κρυσταλλικό πλέγμα ενός άλλου. Δεν έχουν στοιχειομετρική σύνθεση και άντ' αυτού, υπάρχει μια ιδανική σύνθεση, όταν είναι κατειλημμένες όλες οι ελεύθερες θέσεις πλέγματος. Όταν τώρα το κρυσταλλικό πλέγμα σχηματίζεται από το νερό, ο clathrate ονομάζεται ένυδρος clathrate και η κρυσταλλική δομή του στερεού ένυδρου clathrate είναι μια τροποποίηση της κρυσταλλικής δομής του πάγου. Τα μόρια της ουσίας που προστέθηκε είναι εγκλωβισμένα μέσα στους ελεύθερους χώρους στο κρυσταλλικό

πλέγμα του πάγου και έτσι το σταθεροποιούν και αυξάνουν την θερμοκρασία τήξης. Με βάση το μέγεθος του παγιδευμένου μορίου, τρεις τύποι δομών παρατηρούνται: κυβική I, κυβική II και εξαγωνική H. Αυτές οι δομές αντιστοιχούν σε διαφορετικές ρυθμίσεις από τα μόρια του νερού.

Αν τα εσώκλειστα αυτά μόρια είναι από αέριο και το γύρω κρυσταλλικό πλέγμα είναι το νερό, ο κλειθρίτης ονομάζεται υδρίτης. Οι υδρίτες έχουν θερμοκρασία τήξης στην περιοχή από 0°C έως 30°C, με τα εσώκλειστα μόρια να είναι ευγενή αέρια, χλωροφθοράνθρακες, ή υδρογονάνθρακες ευθείας αλυσίδας. Ο πιο γνωστός υδρίτης είναι το ένυδρο μεθάνιο. Αυτά βρίσκονται κυρίως στα ηπειρωτικά περιθώρια, εκεί όπου το νερό είναι σχετικά ψυχρό, η πίεση αρκετά υψηλή και η οργανική ύλη αρκετή για να ικανοποιήσει τα βακτήρια που παράγουν μεθάνιο. Τα μόρια αερίου σε έναν υδρίτη συνήθως διαλύονται μόνο σε υψηλότερες πιέσεις στο νερό και έτσι οι υδρίτες συχνά δεν είναι σταθεροί στην πίεση περιβάλλοντος ενώ είναι πολύ ασταθείς αν η θερμοκρασία αυξηθεί και η πίεση ελαττωθεί, το οποίο μπορεί να γίνει κατά την μεταβολή των κλιματικών συνθηκών, κατά τις τεκτονικές κινήσεις ή τις υποθαλάσσιες κατολισθήσεις. Κάτω απ' αυτές τις συνθήκες αποσυντίθεται, ο πάγος υγροποιείται και το περιεχόμενο μεθάνιο αποδομείται ως αέριο και αποκτά όγκο 164 φορές μεγαλύτερο.

Έντονη έρευνα για τους φυσικούς υδρίτες διεξήχθη από τη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, όταν επισημάνθηκε ότι οι ενώσεις αυτές ήταν υπεύθυνες για το βούλωμα των αγωγών φυσικού αερίου. Ειδικότερα υπάρχει μια τάση διαμόρφωσης σταδιακά ενός πώματος που χωρίζει το σωλήνα σε δύο τμήματα πίεσης: τμήμα υψηλής πίεσης μεταξύ του πηγαδιού και του πώματος και ένα δεύτερο τμήμα σε χαμηλή πίεση μεταξύ του πώματος και του τμήματος αποκατάστασης. Στο ανάντι τμήμα, μια έκρηξη αγωγού μπορεί να προκληθεί από την αύξηση της πίεσης. Ενώ το πώμα μπορεί επίσης να συμπεριφερθεί ως ένα βλήμα που καταστρέφει τον αγωγό, όταν η διαφορά πίεσης μεταξύ των ανάντι και κατόντι τμημάτων αυξάνει. Αν και από πολλούς θεωρούνται ως η κύρια πηγή υδρογονανθράκων για το μέλλον, τα κοιτάσματα υδριτών μπορεί να αποτελέσουν μια πραγματική απειλή για το περιβάλλον. Πράγματι, κατά την εξέταση των υπεράκτιων ένυδρων ως παγκόσμια δεξαμενή μεθανίου, η εκμετάλλευση αυτών των ιζημάτων σε δυσμενείς συνθήκες θα μπορούσε να τροποποιήσει δραστικά το θαλάσσιο οικοσύστημα και ακόμη και να προκαλέσει υποβρύχιες εκρήξεις αερίου. Επιπλέον, η αποσταθεροποίηση ένυδρων ιζημάτων διαδραματίζει αναμφισβήτητο ρόλο στην κλιματική αλλαγή. Σύμφωνα με τον Brewer, μια μικρή υπερθέρμανση του πλανήτη θα αυξήσει την θερμοκρασία των ένυδρων πάνω από το σημείο ισορροπίας, με αποτέλεσμα το διαχωρισμό και την

απελευθέρωση μιας μεγάλης ποσότητας μεθανίου. Δεδομένου ότι ένα μόριο μεθανίου είναι περίπου 24 φορές πιο αποτελεσματικό στην απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας και στον επηρεασμό του κλίματος από ένα μόριο διοξειδίου του άνθρακα, τέτοια απόρριψη θα μπορούσε να προκαλέσει ένα μηχανισμό αλυσιδωτής αντίδρασης.

Όσον αφορά τώρα στην αποθήκευση ενέργειας παρά το γεγονός ότι οι ένυδροι κλειθρίτες έχουν την τάση να υποψύχονται και να λιώνουν ομοιόμορφα ή ανομοιόμορφα προσφέρουν υψηλή λανθάνουσα θερμότητα διαχωρισμού και μπορεί να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές ψύξης, όπως η ψυχρή αποθήκευση ή ο κλιματισμός. Η ψυχρή αποθήκευση που χρησιμοποιεί ένυδρα ως υλικά αλλαγής φάσης είναι μια πολλά υποσχόμενη εφαρμογή στη δευτερογενή ψύξη χάρη στη μεγάλη ποσότητα ενέργειας του ένυδρου διαχωρισμού (υψηλότερη από τη θερμότητα τήξης του πάγου). Επιπλέον, εφόσον η θερμοκρασία αλλαγής φάσης τους, είναι πάνω από το σημείο πήξης του νερού, η χρήση της ένυδρης ενέργειας είναι σαφώς σχετική και για τον τομέα του κλιματισμού.

2.3.2 Υλικά αλλαγής στερεάς φάσης [18,38]

Αποτελούν μια πρόσφατα εξειδικευμένη ομάδα PCMs που υποβάλλονται σε μια στερεά / στερεά μετάβαση φάσης. Είναι διαθέσιμα σε περιορισμένα εύρη θερμοκρασιών και πιο συγκεκριμένα επί του παρόντος, έχουμε μια σειρά από διαλύματα από +25°C (77°F) έως και +180°C (356°F). Τα υλικά αυτά αλλάζουν την κρυσταλλική δομή τους από μια διαμόρφωση πλέγματος σε άλλη σε μια σταθερή και καλά καθορισμένη θερμοκρασία, και η μετατροπή μπορεί να συνεπάγεται ακόμα και λανθάνουσες θερμότητες συγκρίσιμες με τα πιο αποτελεσματικά στερεά / υγρά PCMs αν και γενικά είναι μικρότερες. Τέτοια υλικά είναι χρήσιμα, διότι, σε αντίθεση με τα στερεά / υγρά PCMs, δεν απαιτούν πυρήνωση για την πρόληψη της υπέρψυξης. Επιπλέον, επειδή είναι μια στερεά / στερεά αλλαγή φάσης, δεν υπάρχει καμία ορατή αλλαγή στην εμφάνιση του PCM (εκτός από μια μικρή διαστολή / συστολή), και δεν υπάρχουν προβλήματα που σχετίζονται με το χειρισμό υγρών, δηλαδή συγκράτηση, πιθανές διαρροές, κλπ, το οποίο συνεπάγεται λιγότερο αυστηρές απαιτήσεις των εμπορευματοκιβωτίων και μεγαλύτερη ευελιξία σχεδιασμού.

2.4 Ιδιότητες των PCMs [20,35,39-41]

Στην επιλογή του σωστού υλικού, δεν υπάρχει πάντα ένα ενιαίο οριστικό κριτήριο επιλογής. Οι σχεδιαστές και οι μηχανικοί πρέπει να λαμβάνουν υπόψη ένα μεγάλο αριθμό κριτηρίων επιλογής υλικού ανάλογα με την εφαρμογή. Απαιτείται προσεκτική εξέταση των ιδιοτήτων των διαφόρων υποψηφίων, ζυγίζοντας τα σχετικά πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες τους, και, σε ορισμένες περιπτώσεις, ένας ορισμένος βαθμός συμβιβασμού. Με βάση λοιπόν και τη διαπίστωση που προκύπτει από την

προηγούμενη παράγραφο ότι δηλαδή ένα υλικό δεν μπορεί να έχει όλες τις απαιτούμενες ιδιότητες ώστε να αποτελέσει ένα ιδανικό μέσο θερμικής αποθήκευσης, πρέπει κανείς να επιλέγει ένα τέτοιο PCM που θα δώσει την επιθυμητή θερμική απόδοση με το ελάχιστο κόστος. Η επιλογή του βέλτιστου υλικού για μια εφαρμογή μηχανικής μεταξύ δύο ή περισσότερων εναλλακτικών υλικών, με βάση δύο ή περισσότερα χαρακτηριστικά ή κριτήρια είναι ένα πολλαπλό πρόβλημα λήψης απόφασης των ιδιοτήτων (MADM). Θα πρέπει να σημειωθεί, ακόμα, ότι οι ιδιότητες των προϊόντων βιομηχανικής ποιότητας, που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε πρακτικές εφαρμογές, γενικά μπορεί να αποκλίνουν από τις τιμές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία, λόγω των ακαθαρσιών, λόγω της σύνθεσης (μίγματα, απόσταξη, τεμάχια), και λόγω της κατανομής του μήκους της αλυσίδας (στην περίπτωση των πολυμερών). Στη συνέχεια αναφέρονται οι ιδιότητες που πρέπει να έχει ένα PCM προκειμένου να αποτελεί ένα ιδανικό μέσο αποθήκευσης.

2.4.1 Θερμοδυναμικές ιδιότητες

- Κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης $T_{pc} \Rightarrow$ προκειμένου να εξασφαλιστεί η αποθήκευση και απελευθέρωση της θερμότητας σε μια εφαρμογή με δεδομένες τις θερμοκρασίες για την πηγή θερμότητας και τη δεξαμενή θερμότητας. Για παράδειγμα σε μια κτιριακή εφαρμογή η θερμοκρασία τήξης θα πρέπει να ανήκει στο θερμοκρασιακό εύρος ανθρώπινης άνεσης καθώς για μια δεδομένη κατάσταση κλίματος και δεδομένα κτίρια, αν η θερμοκρασία τήξης είναι πολύ υψηλή, η ποσότητα της θερμότητας της ηλιακής ακτινοβολίας που θα αποθηκευθεί από το PCM θα είναι πολύ χαμηλή στη διάρκεια της ημέρας, ενώ αν τώρα η θερμοκρασία τήξης είναι πολύ χαμηλή, είναι δύσκολο να διατηρήσει την εσωτερική θερμοκρασία του αέρα σε ένα άνετο επίπεδο κατά τη διάρκεια της νύχτας. Θα πρέπει ακόμα να αναφερθεί ότι ενώ οι καθαρές ουσίες έχουν ένα ακριβές σημείο τήξης και πήξης, το οποίο όμως εύκολα επηρεάζεται από ακαθαρσίες, ακόμη και σε μικρές ποσότητες, τα πολυμερή και τα μείγματα έχουν μια πιο σύνθετη συμπεριφορά, με μια πραγματική, και μερικές φορές πολύ μεγάλη, μεταβατική ζώνη στην οποία η τήξη ή η στερεοποίηση είναι προοδευτικές.
- Μεγάλη ενθαλπία αλλαγής φάσης $\Rightarrow \Delta_{pc}h$ ώστε να επιτευχθεί υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης σε σύγκριση με την αποθήκευση αισθητής θερμότητας. Η ιδιότητα αυτή είναι πολύ σημαντική καθώς η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας μιας μονάδας είναι κατά κύριο λόγο συνάρτηση της θερμότητας τήξης του PCM.
- Υψηλή ειδική θερμότητα. Οι ειδικές θερμότητες του στερεού και υγρού PCM δεν είναι κρίσιμοι παράγοντες στην απόδοση ενός συστήματος, εκτός εάν η διάρκεια

λειτουργίας της μονάδας αποθήκευσης υπερβαίνει κατά πολύ την μεταβατική ζώνη του PCM (και στη συνέχεια ο τρόπος λειτουργίας τείνει προς την αισθητή αποθήκευση θερμότητας και η σχετική συμβολή της λανθάνουσας θερμότητας στην απόδοση μειώνεται).

- Μικρές μεταβολές του όγκου κατά το μετασχηματισμό φάσης και μικρή τάση ατμών στις θερμοκρασίες λειτουργίας \Rightarrow για μείωση των αναγκών μηχανικής σταθερότητας και στεγανότητας στο δοχείο που περιέχει το PCM. Επίσης η πυκνότητα ενός PCM είναι σημαντική διότι επηρεάζει την αποδοτικότητα αποθήκευσης ανά μονάδα όγκου.
- Καλή θερμική αγωγιμότητα διότι η αποτελεσματικότητα με την οποία η θερμότητα μεταφέρεται προς και από μια μονάδα αποθήκευσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις θερμικές αγωγιμότητες του στερεού και υγρού PCM. Όσο υψηλότερες είναι οι αγωγιμότητες, τόσο πιο αποτελεσματική είναι και σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα πραγματοποιείται η μεταφορά για ένα δεδομένο σχεδιασμό. Ωστόσο, το φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας, κατά τη διάρκεια της τήξης ή στερεοποίησης ενός PCM είναι πολύ περίπλοκο για τους λόγους που δόθηκαν στην παράγραφο 2.2.

2.4.2 Κινητικές ιδιότητες

- Υψηλό ποσοστό πυρήνωσης για να αποφευχθεί η υπέρψυξη της υγρής φάσης. Η υπόψυξη πρέπει να είναι μικρή προκειμένου να υπάρχει διαβεβαίωση ότι η τήξη και στερεοποίηση μπορεί να προχωρήσει σε ένα στενό εύρος τιμών θερμοκρασίας. Υπόψυξη (ονομάζεται επίσης υπέρψυξη) είναι το ότι μια θερμοκρασία σημαντικά κάτω από τη θερμοκρασία τήξης πρέπει να επιτευχθεί, έως ότου ένα υλικό αρχίζει να στερεοποιείται και θερμότητα να εκλύεται. Εάν η θερμοκρασία δεν επιτευχθεί, το PCM δεν θα στερεοποιηθεί καθόλου και έτσι θα αποθηκεύσει μόνο αισθητή θερμότητα. Το πρόβλημα αυτό θα επεξηγηθεί αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο.
- Υψηλός ρυθμός ανάπτυξης των κρυστάλλων, έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις ανάκτησης θερμότητας από το σύστημα αποθήκευσης.

2.4.3 Χημικές ιδιότητες

- Χημική σταθερότητα του PCM \Rightarrow ώστε να διασφαλιστεί μεγάλη διάρκεια ζωής για το PCM αν εκτίθενται σε υψηλότερες θερμοκρασίες, ακτινοβολία, αέρια, κ.ο.κ.
- Αναπαραγωγίμη αλλαγή φάσης, που ονομάζεται επίσης \Rightarrow σταθερότητα κυκλικής φόρτισης προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το υλικό αποθήκευσης, τόσες φορές για αποθήκευση και απελευθέρωση θερμότητας, όσες απαιτείται

από μια εφαρμογή. Ο αριθμός των κύκλων ποικίλλει από μόνο έναν, όταν το PCM χρησιμοποιείται για προστασία από τη θερμότητα που παράγεται σε περίπτωση πυρκαγιάς, έως αρκετές χιλιάδες κύκλους, όταν χρησιμοποιείται για θέρμανση ή ψύξη των κτιρίων. Ένα από τα κύρια προβλήματα της σταθερότητας σε κυκλική φόρτιση είναι ο διαχωρισμός των φάσεων. Όταν ένα PCM αποτελείται από διάφορα συστατικά, φάσεις με διαφορετικές συνθέσεις μπορεί να σχηματιστούν κατά την κυκλική φόρτιση οι οποίες χωρίζονται η μία από την άλλη μακροσκοπικά. Το φαινόμενο θα μελετηθεί με περισσότερες λεπτομέρειες σε επόμενη παράγραφο.

- Μη τοξικά, μη εύφλεκτα και μη εκρηκτικά υλικά για λόγους όχι μόνο ασφάλειας αλλά και περιβαλλοντικούς.
- Συμβατότητα του PCM με άλλα υλικά \Rightarrow ώστε να διασφαλιστεί μεγάλη διάρκεια ζωής του δοχείου που περιέχει το PCM, και των γύρω υλικών στην περίπτωση διαρροής του PCM.

2.4.4 Οικονομικές ιδιότητες

- Χαμηλή τιμή \Rightarrow για να είναι ανταγωνιστικά με τις άλλες επιλογές για αποθήκευση θερμότητας και ψύχους, και για να είναι ανταγωνιστικά με τις μεθόδους της παροχής θερμότητας και ψύξης χωρίς καθόλου αποθήκευση. Το κόστος παραμένει, φυσικά, ένας σημαντικός παράγοντας αλλά όχι τόσο κυρίαρχο δηλαδή είναι ένα κριτήριο μεταξύ άλλων. Γι' αυτό και θεωρείται ως ένας από τους παράγοντες στην ανάλυση κόστους - αποτελεσματικότητας ενός συγκεκριμένου συστήματος για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Το κόστος των υλικών των βασικών προϊόντων, που είναι τα PCMs, είναι συνάρτηση της ζήτησης και της ικανότητας παραγωγής, μια κατάσταση που αναμφισβήτητα θα επηρεαστεί από τη δημιουργία νέων μεγάλου όγκου αγορών. Επίσης παρατηρείται μια σημαντική αύξηση του κόστους όταν απαιτούνται πρόσθετα σταθεροποίησης, ή σε περιπτώσεις ενθυλάκωσης δηλαδή εγκλωβισμού του PCM σε μικροκάψουλα κ.ο.κ.
- Ανακυκλωσιμότητα \Rightarrow για οικονομικούς αλλά κυρίως για περιβαλλοντικούς λόγους.
- Αφθονία
- Διαθεσιμότητα

Κατά κανόνα, ένα υλικό δεν είναι σε θέση να εκπληρώσει όλες τις απαιτήσεις που αναφέρονται ανωτέρω. Μια πρώτη επιλογή υλικού γίνεται συνήθως σε σχέση με τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, την ενθαλπία, τη σταθερότητα σε κυκλική φόρτιση, και την υπόψυξη.

2.5 Μέθοδοι μέτρησης των ιδιοτήτων

Ο υπολογισμός των ιδιοτήτων των PCMs [17,42,43] είναι ζήτημα εξαιρετικής σημασίας για την επιλογή υλικού ανά εφαρμογή. Η θερμική ανάλυση περιλαμβάνει μια ομάδα από τεχνικές με τις οποίες μια φυσική ιδιότητα μιας ουσίας μετριέται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, ενώ η ουσία υποβάλλεται σε ελεγχόμενο πρόγραμμα θερμοκρασίας. Στις μεθόδους θερμικής ανάλυσης απαιτείται προσοχή κατά την προετοιμασία του δείγματος για μέτρηση, καθώς θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το δείγμα πρέπει να εκπροσωπεί το υλικό που διερευνάται. Μερικά PCM είναι ανομοιογενή ή σύνθετα υλικά, ή περιέχουν παράγοντες πυρήνωσης που δεν μπορούν να διαλυθούν στην υγρή φάση. Προκείμενου να υπάρχει διαβεβαίωση ότι το δείγμα έχει τη σωστή φυσική και χημική σύνθεση αντιπροσωπευτική του μεγαλύτερου μέρους του υλικού, ο όγκος του θα πρέπει να είναι κάποια cm^3 ή περισσότερο, αν είναι δυνατόν. Επίσης, η εμφάνιση της υπόψυξης είναι πολύ πιο συχνή σε μικρά δοχεία. Καθώς το PCM για αποθήκευση θερμότητας και κρύου εφαρμόζεται σε ποσότητες κιλών ή τόνων, το μέγεθος του δείγματος επομένως θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερο από αυτή την άποψη. Από την άλλη πλευρά όμως, μεγαλύτερα μεγέθη δειγμάτων οδηγούν σε μεγαλύτερες κλίσεις θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δείγματος κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Συνήθως η θερμοκρασία μετράται σε ένα μόνο σημείο του δείγματος, έτσι είναι σημαντικό να ελαχιστοποιηθούν οι θερμοκρασιακές διαφορές στο δείγμα, ώστε να έχουμε μια καλή συμφωνία μεταξύ της πραγματικής και της μετρούμενης θερμοκρασίας του δείγματος.

Στη συνέχεια θα δοθεί η αρχή λειτουργίας των συνηθέστερων μεθόδων καθώς και θα πραγματοποιηθεί περιγραφή των πειραματικών διατάξεών τους, που χρησιμοποιούνται για μέτρηση του σημείου τήξης, της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση και της λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης - στερεοποίησης.

2.5.1 Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA) [42,44]

Διαφορική Θερμική Ανάλυση ή DTA είναι μια τεχνική θερμικής ανάλυσης κατά την οποία μετράται η διαφορά θερμοκρασίας που αναπτύσσεται μεταξύ ενός δείγματος του υλικού που εξετάζεται και ενός αδρανούς υλικού αναφοράς όταν αμφότερα υπόκεινται σε πανομοιότυπο θερμοκρασιακό καθεστώς εντός περιβάλλοντος ελεγχόμενης θέρμανσης ή ψύξης. Στη συνέχεια οι διαφορές αυτές της θερμοκρασίας που παρατηρούνται κατά τη θέρμανση ή τη ψύξη του δείγματος και του υλικού αναφοράς καταγράφονται είτε συναρτήσεως του χρόνου είτε συναρτήσεως της θερμοκρασίας (καμπύλη DTA). Έτσι τυχόν αλλαγές στο δείγμα που οδηγούν στην απορρόφηση ή έκλυση θερμότητας μπορούν να ανιχνευθούν μετά από σύγκριση με το αδρανές υλικό αναφοράς. Εκτός όμως από διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ

δείγματος και υλικού αναφοράς, διαφορές θερμοκρασίας μπορούν να προκύψουν μεταξύ δύο αδρανών δειγμάτων όταν η απόκριση τους στη θερμική επεξεργασία που εφαρμόζεται δεν είναι ταυτόσημη. Επομένως η DTA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη των θερμικών ιδιοτήτων και των αλλαγών φάσης χωρίς μεταβολή της ενθαλπίας.

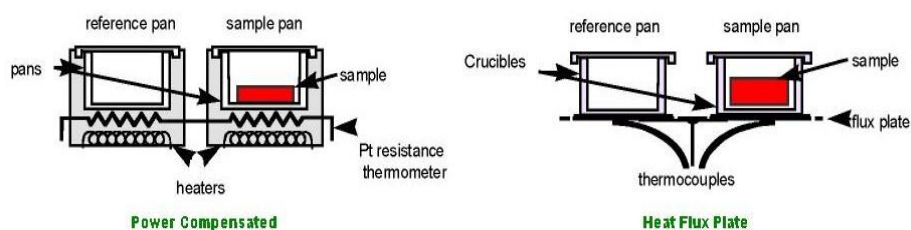
Η καμπύλη της DTA παρέχει στοιχεία σχετικά με τους μετασχηματισμούς που έχουν σημειωθεί, όπως είναι οι μεταβάσεις γυαλιού, η κρυστάλλωση, η τήξη και η εξάχνωση. Η μορφή της παρουσιάζει ασυνέχειες στις θερμοκρασίες μετάβασης και η κλίση της καμπύλης σε οποιοδήποτε σημείο θα εξαρτηθεί από τη συγκρότηση της μικροδομής στη συγκεκριμένη θερμοκρασία. Ειδικότερα η καμπύλη DTA μπορεί να αποτελείται από γραμμικά τμήματα μετατοπιζόμενα από την τετμημένη διότι οι θερμοχωρητικότητες και οι θερμικές αγωγιμότητες των δειγμάτων δοκιμής και αναφοράς δεν είναι ίδιες, και από κορυφές που αντιστοιχούν στην έκλυση ή απορρόφηση της θερμότητας μετά από φυσικές ή χημικές αλλαγές στο εξεταζόμενο δείγμα. Έτσι η περιοχή που βρίσκεται κάτω από ένα μέγιστο της καμπύλης DTA, η μορφή του οποίου εξαρτάται από το βάρος του δείγματος και το ρυθμό θέρμανσης που χρησιμοποιείται, αντιστοιχεί στη μεταβολή της ενθαλπίας και δεν επηρεάζεται από τη θερμοχωρητικότητα του δείγματος. Μια καμπύλη DTA μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δακτυλικό αποτύπωμα για σκοπούς ταυτοποίησης αν και συνήθως οι εφαρμογές της μεθόδου αυτής είναι ο προσδιορισμός των διαγραμμάτων φάσης, μετρήσεις της θερμότητας ανταλλαγής και αποσύνθεσης σε διάφορες ατμόσφαιρες.

Η DTA αποτελείται από ένα σύστημα συγκράτησης του δείγματος που περιλαμβάνει θερμοζεύγη, τα δοχεία δείγματος και μια κεραμική ή μεταλλική κατασκευή (block), από έναν κλίβανο, έναν προγραμματιστή θερμοκρασίας, και ένα σύστημα καταγραφής. Ο κλίβανος θα πρέπει να παρέχει μια σταθερή και αρκετά μεγάλη ζεστή ζώνη και πρέπει να μπορεί να ανταποκρίνεται γρήγορα στις εντολές από το προγραμματιστή θερμοκρασίας. Ένας προγραμματιστής θερμοκρασίας τώρα είναι απαραίτητος για να επιτευχθεί σταθερός ρυθμός θέρμανσης. Το καταγραφικό σύστημα έπειτα πρέπει να έχει χαμηλή αδράνεια για να αναπαραγάγει πιστά τις διακυμάνσεις στην πειραματική διάταξη. Το πιο σημαντικό όμως από όλα είναι η ύπαρξη των δύο θερμοζευγών του συστήματος συγκράτησης που συνδέονται με ένα βολτόμετρο. Το ένα θερμοζεύγος τοποθετείται σε ένα αδρανές υλικό, όπως Al_2O_3 , ενώ το άλλο τοποθετείται σε ένα δείγμα του υλικού που μελετάται. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, θα υπάρξει μια σύντομη εκτροπή του βολτόμετρο αν το δείγμα υφίσταται μετάβαση φάσης. Αυτό συμβαίνει επειδή η είσοδος της θερμότητας

θα αυξήσει τη θερμοκρασία της αδρανούς ουσίας, αλλά θα ενσωματωθεί ως λανθάνουσα θερμότητα στο υλικό με αλλαγή της φάσης του.

2.5.2 Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (DSC) [45,46]

Διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης ή DSC είναι μια τεχνική θερμικής ανάλυσης κατά την οποία η διαφορά στο ποσό της θερμότητας που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας ενός δείγματος και ενός υλικού αναφοράς, μετρείται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Ειδικότερα μετρά την θερμοκρασία και τη ροή θερμότητας που συνδέονται με μεταβάσεις στα υλικά ως συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας. Παρέχει ποιοτικές και ποσοτικές πληροφορίες σχετικά με τις φυσικές και χημικές αλλαγές που αφορούν ενδόθερμες ή εξώθερμες διαδικασίες ή αλλαγές στη θερμοχωρητικότητα χρησιμοποιώντας ελάχιστες ποσότητες του δείγματος. Έχει πολλά πλεονεκτήματα όπως γρήγορο χρόνο ανάλυσης, συνήθως τριάντα λεπτά, εύκολη προετοιμασία του δείγματος, εφαρμοσιμότητα όχι μόνο στα υγρά αλλά και στα στερεά, δυνατότητα εφαρμογής σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασίας κλπ. Τόσο το δείγμα όσο και το υλικό αναφοράς διατηρούνται σχεδόν στην ίδια θερμοκρασία σε όλο το πείραμα. Σε γενικές γραμμές, το πρόγραμμα θερμοκρασίας για μια ανάλυση DSC είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε η θερμοκρασία του δείγματος να αυξάνεται γραμμικά ως συνάρτηση του χρόνου. Το δείγμα αναφοράς επίσης πρέπει να έχει μια καλά καθορισμένη θερμοχωρητικότητα στην περιοχή των θερμοκρασιών που πρόκειται να σαρωθεί. Υπάρχουν δύο είδη οργάνων DSC σήμερα που χρησιμοποιούνται: τα όργανα «ροής θερμότητας» και «αντιστάθμισης ισχύος», τα οποία αν και είναι ριζικά διαφορετικά στο σχεδιασμό, τα δεδομένα που παράγονται είναι συγκρίσιμα.

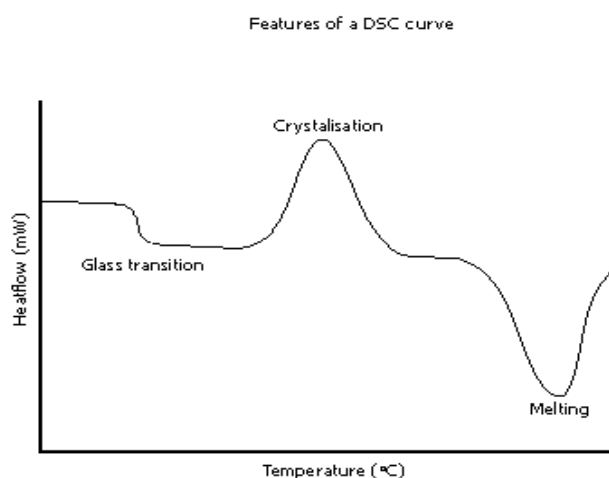


Σχήμα 2.8: Σχηματική απεικόνιση του εξοπλισμού για κάθε ρύθμιση της μεθόδου DSC [47].

Η βασική αρχή που διέπει αυτήν την τεχνική είναι ότι όταν το δείγμα υφίσταται κάποιο φυσικό μετασχηματισμό όπως μεταβάσεις φάσης, περισσότερη ή λιγότερη θερμότητα, θα χρειαστεί να ρεύσει σε αυτό από ό, τι στο υλικό αναφοράς για να διατηρηθεί και στα δύο η ίδια θερμοκρασία. Κατά πόσο λιγότερη ή περισσότερη θερμότητα πρέπει να μεταβιβαστεί προς το δείγμα εξαρτάται από το αν η διαδικασία είναι εξώθερμη ή ενδόθερμη. Για παράδειγμα, καθώς στερεό δείγμα λιώνει σε ένα

υγρό θα απαιτηθεί περισσότερη ροή θερμότητας προς το δείγμα για αύξηση της θερμοκρασίας του με τον ίδιο ρυθμό με το υλικό αναφοράς. Αυτό οφείλεται στην απορρόφηση θερμότητας από το δείγμα, καθώς υφίσταται ενδόθερμη μετάβαση φάσης από στερεό σε υγρό. Ομοίως, καθώς το δείγμα υφίσταται εξώθερμες διαδικασίες (όπως είναι η κρυστάλλωση) λιγότερη θερμότητα απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία του δείγματος. Παρατηρώντας τη διαφορά στη ροή θερμότητας μεταξύ του δείγματος και του υλικού αναφοράς, διαφορικά θερμιδόμετρα σάρωσης είναι σε θέση να μετρήσουν την ποσότητα της θερμότητας που απορροφάται ή απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια τέτοιων μεταβάσεων. Η DSC μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την παρατήρηση πιο λεπτών αλλαγών φάσης, όπως υαλώδεις μεταβάσεις.

Υαλώδεις μεταβάσεις μπορεί να εμφανιστούν καθώς η θερμοκρασία ενός άμορφου στερεού αυξάνεται. Αυτές οι μεταβάσεις εμφανίζονται ως ένα βήμα στη βασική γραμμή του καταγραφόμενου σήματος DSC. Αυτό οφείλεται στο ότι το δείγμα υποβάλλεται σε μια αλλαγή στη θερμοχωρητικότητα με καμιά όμως επίσημη αλλαγή φάσης να εμφανίζεται. Καθώς στη συνέχεια η θερμοκρασία αυξάνεται, το άμορφο στερεό θα γίνει λιγότερο ιξώδες. Σε κάποιο σημείο τα μόρια είναι πιθανό να αποκτήσουν αρκετή ελευθερία κίνησης για να οργανωθούν τα ίδια αυθόρμητα σε μια κρυσταλλική μορφή. Αυτή είναι γνωστή ως θερμοκρασία κρυστάλλωσης (T_c). Η μετάβαση αυτή από άμορφο στερεό σε κρυσταλλικό στερεό είναι μια εξώθερμη διαδικασία, και οδηγεί σε ένα μέγιστο το σήμα DSC. Καθώς η θερμοκρασία συνεχίζει να αυξάνεται το δείγμα φτάνει τελικά θερμοκρασία τήξης του (T_m). Τα αποτελέσματα της διαδικασίας τήξης έχουν σαν αποτέλεσμα μία ενδόθερμη κορυφή στην καμπύλη DSC. Έτσι προκύπτει το ακόλουθο σχήμα για την καμπύλη DSC.



Σχήμα 2.9: Μια σχηματική αναπαράσταση της καμπύλης DSC η οποία παρουσιάζει τα σημεία εμφάνισης ορισμένων κοινών χαρακτηριστικών [45].

Αυτή η δυνατότητα καθορισμού των θερμοκρασιών μετάβασης και των ενθαλπιών κάνει τη DSC ένα πολύτιμο εργαλείο για την παραγωγή διαγραμμάτων φάσης για διάφορα χημικά συστήματα. Όσον αφορά τον υπολογισμό των ενθαλπιών αυτός μπορεί να γίνει με την ενσωμάτωση της κορυφής που αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη μετάβαση και με τη βοήθεια της ακόλουθης εξίσωσης:

$$\Delta H = KA \quad (2.5)$$

όπου ΔH είναι η ενθαλπία της μετάβασης, K είναι η θερμοδομετρική σταθερά, και A είναι η περιοχή κάτω από την καμπύλη. Η θερμοδομετρική σταθερά ποικίλλει από όργανο σε όργανο, και μπορεί να προσδιοριστεί με την ανάλυση ενός σαφώς καθορισμένου δείγματος με γνωστές ενθαλπίες μετάβασης. Επομένως συνοψίζοντας η Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση πολλών χαρακτηριστικών ιδιοτήτων ενός δείγματος όπως υαλώδεις μεταβάσεις, σημεία τήξης και βρασμού, χρόνος κρυστάλλωσης και θερμοκρασία, ποσοστό κρυσταλλικότητας, θερμότητα τήξης και αντιδράσεις, ειδική θερμότητα και θερμοχωρητικότητα κ.ο.κ. Ακόμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της οξειδωσης, καθώς και άλλων χημικών αντιδράσεων.

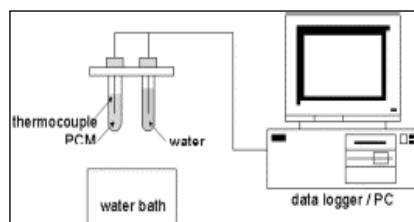
2.5.3 Μέθοδος T-history [17,43,48-50]

Αν και οι μέθοδοι DTA και DSC είναι καλά ανεπτυγμένες, οι ανεπάρκειες τους είναι προφανείς: τα δείγματα που ελέγχονται από αυτές είναι πολύ μικρά (1-10 mg), έτσι ώστε οι θερμοφυσικές ιδιότητες των δειγμάτων να είναι συνήθως διαφορετικές από εκείνες του μεγαλύτερου μέρους των υλικών που χρησιμοποιούνται σε πρακτικά συστήματα (για παράδειγμα, για διαδικασίες αλλαγής φάσης υγρό-στερεό των πιο σύνθετων PCMs, ειδικά των ένυδρων αλάτων, εάν το υλικό αλλαγής φάσης τοποθετείται σε ένα μικρό δοχείο, ο βαθμός υπέρψυξης του PCM αυξάνεται, ενώ ο βαθμός του διαχωρισμού φάσης μειώνεται). Ακόμα οι εξοπλισμοί των μετρήσεων με DTA και DSC είναι περίπλοκοι και ακριβή και δεν μπορούν να μετρήσουν θερμοότητες τήξης, ειδικές θερμοότητες και θερμικές αγωγιμότητες διαφόρων δειγμάτων PCM ταυτόχρονα.

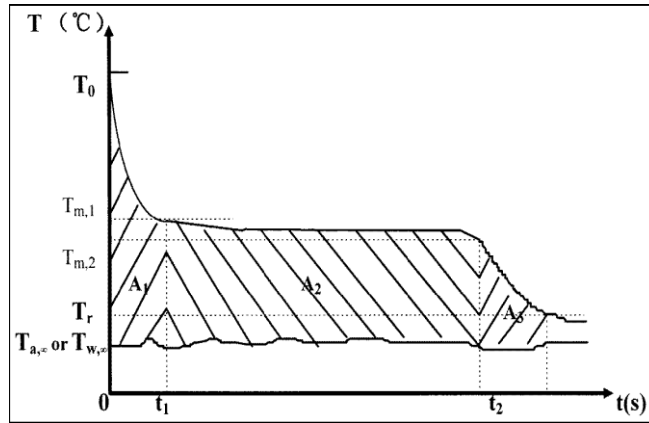
Με βάση λοιπόν τις παραπάνω παρατηρήσεις, αναπτύχθηκε μια νέα μέθοδος. Η μέθοδος T-history με βάση την οποία μπορούν να καθοριστούν το σημείο τήξης, ο βαθμός υπέρψυξης, η θερμοκρασία τήξης, η ειδική θερμότητα και η θερμική αγωγιμότητα διαφόρων δειγμάτων PCM ταυτόχρονα. Στη μέθοδο αυτή η οποία παρουσιάστηκε από τον Zhang Yinping το δείγμα PCM και ένα δείγμα με γνωστές θερμικές ιδιότητες των οποίων η θερμοκρασία είναι ομοιόμορφη και ίση με T_0 ($T_0 > T_m$, όπου T_m είναι η θερμοκρασία τήξης του PCM) υπόκεινται σε ατμοσφαιρικό

αέρα η θερμοκρασία του οποίου είναι η $T_{a,\infty}$ (και η οποία μπορεί να είναι χρονικά εξαρτώμενη). Η ιστορία της θερμοκρασίας τους κατά την ψύξη από την ίδια αρχική θερμοκρασία μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος καταγράφεται όπως φαίνεται και στα ακόλουθα σχήματα. Μια σύγκριση των δύο καμπυλών, χρησιμοποιώντας μια μαθηματική περιγραφή της μεταφοράς θερμότητας, επιτρέπει τον προσδιορισμό της θερμοχωρητικότητας, c_p , και της ενθαλπίας, h , του PCM από το γνωστό c_p του υλικού αναφοράς.

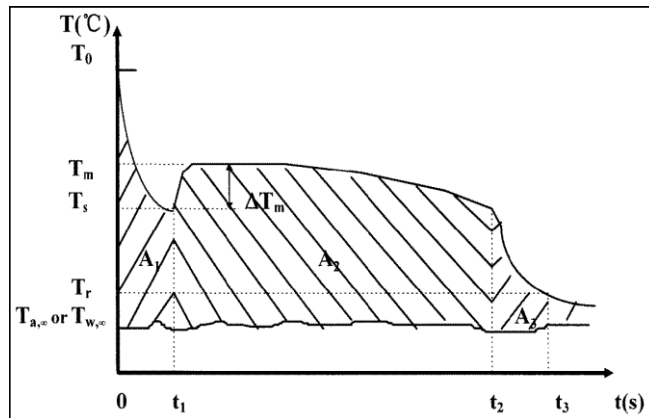
Η πειραματική διάταξη που παρουσιάζεται σε ακόλουθο σχήμα περιλαμβάνει δοκιμαστικούς σωλήνες των οποίων ο λόγος L / D πληροί τον όρο $Bi < 0.1$ που είναι απαραίτητος ώστε η γεωμετρία των σωλήνων να επιτρέπει η μεταφορά της θερμότητας να θεωρείται μονοδιάστατη, και κάθε σωλήνας ως ένα μονοδιάστατο σύστημα μπροστά στον αέρα του περιβάλλοντος. Ο αριθμός Biot ισούται με $Bi = \alpha R / (2\lambda)$ όπου R είναι η ακτίνα του δείγματος, λ η θερμική αγωγιμότητα του και α ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του σωλήνα και του περιβάλλοντος. Στον έναν από αυτούς τους δύο πανομοιότυπους σωλήνες περιέχεται το PCM, που εξετάζεται και στον άλλο μια ουσία αναφοράς, της οποίας η ειδική θερμότητα είναι γνωστή, συνήθως αποσταγμένο νερό. Εκτός όμως από τους δοκιμαστικούς σωλήνες η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει ακόμα μονωμένο ψυχόμενο θάλαμο στον οποίο παρατηρείται μια μικρή μόνο αλλαγή της θερμοκρασίας και αμελητέα κάθετη διαστρωμάτωση της θερμοκρασίας, λουτρό θερμού ύδατος, για τη θέρμανση του δείγματος και του υλικού αναφοράς στην αρχική θερμοκρασία, αισθητήρες θερμοκρασίας, θερμοζεύγη τύπου T για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του PCM, του νερού και του ατμοσφαιρικού αέρα και εξοπλισμό λήψης δεδομένων συνδεδεμένο με έναν υπολογιστή.



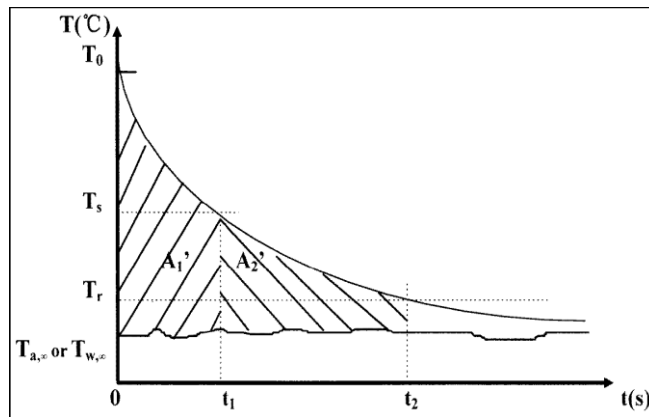
Σχήμα 2.10: Σχηματική απεικόνιση της χρησιμοποιούμενης διάταξης για τη μέθοδο T-history [17].



Σχήμα 2.11: Μια τυπική T-history καμπύλη ενός PCM κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας ψύξης (χωρίς υπέρψυξη) [48].



Σχήμα 2.12: Μια τυπική T-history καμπύλη ενός PCM κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας ψύξης (με υπέρψυξη) [48].



Σχήμα 2.13: Μια τυπική T-history καμπύλη νερού κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας ψύξης [48].

Συνοψίζοντας τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου T-history είναι τα εξής: μπορεί να χρησιμοποιηθεί, λόγω του μεγάλου μεγέθους του δείγματος, για τα ανόργανα και οργανικά, ενσωματωμένα σε κάψουλες ή σύνθετα PCM, τα εύρη των ρυθμών θέρμανσης και ψύξης και τα θερμοκρασιακά εύρη είναι αρκετά μεγάλα για να ταιριάζουν PCM για πολύ διαφορετικές εφαρμογές και τα όργανα μέτρησης και η διαμόρφωση που απαιτείται είναι απλά γεγονός ότι συνεπάγεται χαμηλό κόστος εξοπλισμού. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα οπτικής παρατήρησης του φαινομένου

δηλαδή της διαδικασίας αλλαγής φάσης του δείγματος PCM καθώς και ταυτόχρονη μέτρηση πολλών δειγμάτων σε ένα πείραμα.

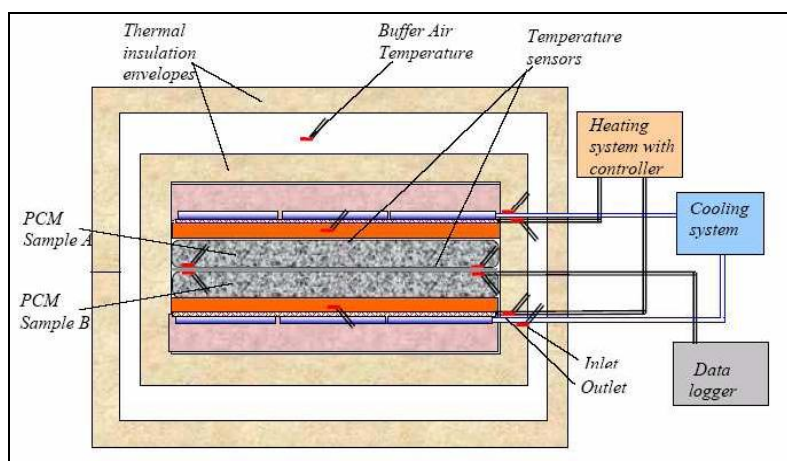
Η μέθοδος T-history παρόλο που είναι ένα πολύ χρήσιμο και απλό εργαλείο για τη μέτρηση των θερμικών ιδιοτήτων των μεικτών δειγμάτων, έχει όρια στην ανάλυση των δεδομένων. Ένα από τα κυριότερα προβλήματα στην αρχική μέθοδο είναι να υιοθετηθεί το σημείο απελευθέρωσης της υπέρψυξης ως το τέλος της περιόδου αλλαγής φάσης. Ένας βαθμός υπέρψυξη ποικίλει ανάλογα με συνθήκες όπως είναι η ταχύτητα ψύξης, η καθαρότητα και οι δονήσεις και είναι ανεξάρτητος από το τέλος της αλλαγής φάσης. Έτσι λοιπόν δημιουργήθηκε η τροποποιημένη μέθοδος, η οποία χρησιμοποιεί ένα σημείο καμπής ως το σύνορο μεταξύ των περιόδων της αλλαγής φάσης και της στερεάς κατάστασης, όπου η πρώτη παράγωγος της καμπύλης T-history για PCM γίνεται ελάχιστη. Αυτό μπορεί φυσικά να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή ή μειώνεται σταδιακά με την απελευθέρωση λανθάνουσας θερμότητας, αλλά μειώνεται εκθετικά κατά τη διαδικασία ψύξης που συνοδεύει μόνο την αισθητή θερμότητα. Ένα ακόμα πρόβλημα της συγκεκριμένης μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι το σφάλμα των μετρήσεων έχει άμεση σχέση με την προσεκτική κατασκευή της διάταξης και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται καθώς και τη διεξαγωγή του πειράματος.

2.5.4 Μέθοδος διπλού κελιού (double cell) [51]

Η μέθοδος T-history όπως περιγράφηκε παραπάνω καθώς είναι πολύ απλή, είναι σχετικά χρονοβόρα και προβληματίζει όταν εφαρμόζεται για μακροπρόθεσμη αξιολόγηση της καταπόνησης σε κυκλική φόρτιση. Αναπτύχθηκε επομένως στη συνέχεια μια νέα μέθοδος με την ονομασία «double cell», για τη διενέργεια μακροπρόθεσμων δοκιμών των υλικών PCM. Η μέθοδος «double cell» είναι μέθοδος θερμιδομετρικού τύπου, που επιτρέπει τη μέτρηση και σύγκριση της ικανότητας αποθήκευσης της θερμότητας μετά από πολλούς κύκλους. Η στρατηγική δοκιμών με συσκευές κυκλικής φόρτισης βασίζεται σε εναλλασσόμενη συμμετρική θέρμανση και ψύξη υπό ελεγχόμενες συνθήκες σε ένα σχετικά μεγάλο δείγμα PCM (1-2kg), που βρίσκεται μέσα σε ένα καλά μονωμένο περίβλημα. Αν και δεν είναι τόσο ακριβής μέθοδος για τον προσδιορισμό της χωρητικότητας αποθήκευσης της θερμότητας των μικρών δειγμάτων, πιστεύεται όμως ότι παρέχει τις απαιτούμενες πληροφορίες για τους ερευνητές και σχεδιαστές των εμπορικών ή μεγαλύτερης κλίμακας προϊόντων, που θέλουν να δουν τη συνολική απόδοση αποθήκευσης θερμότητας του μεγαλύτερου μέρους των δειγμάτων σε ένα μεγάλο αριθμό κύκλων. Στη μέθοδο αυτή η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας προσδιορίζεται με μέτρηση της ποσότητας της

θερμικής ενέργειας που απαιτείται για να λιώσει το δείγμα PCM υπό σαφώς καθορισμένες συνθήκες.

Το υλικό PCM, με συνολικό βάρος 2.000g, χωρίζεται σε δύο μέρη ίσου μεγέθους, που περικλείονται σε δύο πλαστικές θήκες και τίθενται σε καλά θερμομονωμένο πλαίσιο σε κατακόρυφη θέση. Οι θήκες χωρίζονται από μια λεπτή μεταλλική μεμβράνη και είναι τοποθετημένες μεταξύ δύο θερμαινόμενων / ψυχόμενων πλακών χαλκού. Οι συμμετρικά θερμαινόμενες ή ψυχόμενες θήκες είναι εξοπλισμένες με μια σειρά από αισθητήρες θερμοκρασίας που βρίσκονται και στις δύο πλευρές των θηκών. Οι θήκες υπόκεινται σε εναλλασσόμενους κύκλους θέρμανσης (ηλεκτρική θέρμανση) και ψύξης (ψυκτικό υγρό). Η όλη εγκατάσταση παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 2.14: Συσσκευή θερμικής καταπόνησης σε κυκλική φόρτιση για μακροπρόθεσμη δοκιμή PCM [51].

Κατά τη διάρκεια τώρα της θέρμανσης, ο ελεγκτής θερμοκρασίας προσαρμόζει αυτόματα τη θερμοκρασία των πλακών θέρμανσης στην προκαθορισμένη θερμοκρασία (π.χ. 60°C για τον κύκλο θέρμανσης). Ο κύκλος θέρμανσης διαρκεί για όσο διάστημα απαιτείται για να επιτευχθεί η προκαθορισμένη θερμοκρασία στον εσωτερικό χώρο μεταξύ των δειγμάτων PCM. Συνήθως αυτή η θερμοκρασία είναι ρυθμισμένη περίπου 5°C πάνω από τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης του υλικού που εξετάζεται. Γίνεται η παραδοχή ότι μόλις το σύνολο των αισθητήρων θερμοκρασίας στο δείγμα υπερβαίνει το καθορισμένο σημείο θερμοκρασίας, πλήρης τήξη του PCM έχει επιτευχθεί. Εφόσον η φάση της τήξης ολοκληρωθεί το ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης απενεργοποιείται και το σύστημα ψύξης ενεργοποιείται. Το ψυκτικό τώρα υγρό, με θερμοκρασία περίπου 8°C, κυκλοφορεί μέσω του σωλήνα που είναι συγκολλημένος στις πλάκες του χαλκού. Ο κύκλος ψύξης συνεχίζεται έως ότου η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου μεταξύ των δειγμάτων PCM μειωθεί στους περίπου 6°C κάτω από το επίπεδο της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης και στερεά κατάσταση του δείγματος PCM επιτευχθεί. Μόλις το χαμηλό όριο της θερμοκρασίας

επιτευχθεί, ο κύκλος ψύξης θεωρείται ότι έχει ολοκληρωθεί, το νερό ψύξης απενεργοποιείται και το ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης ενεργοποιείται ξανά. Οι δύο αυτές θερμοκρασίες, χαμηλή και υψηλή μπορούν να ρυθμιστούν από τον ελεγκτή ανεξάρτητα. Η χωρητικότητα αποθήκευσης θερμότητας του PCM υπολογίζεται μετρώντας την κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας μόνο κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης.

Επομένως καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το πλήρως αυτοματοποιημένο αυτό σύστημα ελέγχου είναι πολύ βολικό για μακροπρόθεσμες δοκιμές καταπόνησης των PCM σε κυκλική φόρτιση. Το μεγάλο μέγεθος του δείγματος PCM δίνει τη δυνατότητα να διερευνηθεί η επίπτωση της κλίσης της θερμοκρασίας, η κινητική ψύξης και κατάψυξης, να παρατηρηθεί το φαινόμενο της υπέρψυξης και οι επιδράσεις της καθίζησης ή της διαστρωμάτωσης. Κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων της δοκιμής υπήρχε ένα πρόβλημα με περιστασιακές διαρροές της θήκης, το οποίο όμως εξαλείφθηκε με την εφαρμογή θηκών διπλού τοιχώματος.

2.6 Ανάλυση των κυριότερων προβλημάτων των PCMs και τρόποι αντιμετώπισης

Τα πιο σημαντικά κριτήρια που έχουν περιορίσει τη χρήση της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας είναι η ωφέλιμη ζωή των συστημάτων PCM-εμπορευματοκιβωτίου και ο αριθμός των κύκλων που μπορούν να αντέξουν χωρίς κανένα υποβιβασμό των ιδιοτήτων τους [52]. Η μακροπρόθεσμη σταθερότητα των υλικών αποθήκευσης οφείλεται σε δύο παράγοντες: κακή σταθερότητα των ιδιοτήτων των υλικών και / ή διάβρωση μεταξύ του PCM και του δοχείου.

2.6.1 Διαχωρισμός των φάσεων [20,53]

Όταν μια καθαρή ουσία με μόνο μία συνιστώσα, όπως το νερό, θερμαίνεται πάνω από τη θερμοκρασία τήξης της και κατά συνέπεια λιώνει, θα έχει την ίδια ομοιογενή σύνθεση στο υγρό, όπως πριν στο στερεό. Όταν το υλικό στερεοποιείται πάλι με ψύξη κάτω από τη θερμοκρασία τήξεως, ολόκληρο το στερεό θα είναι και πάλι της ίδιας ομοιογενούς σύνθεσης και η ίδια ενθαλπία αλλαγής φάσης και θερμοκρασία τήξης θα παρατηρείται σε οποιαδήποτε θέση. Ένα τέτοιο υλικό λέγεται ότι λιώνει ομοιόμορφα.

Το σύστημα δύο συστατικών συμπεριφέρεται τώρα πολύ διαφορετικά. Ένα διάλυμα αλατιού- νερού με μια σύνθεση από 10% κ.β. αλάτι και 90% κ.β. νερό, είναι ένα ομοιογενές υγρό πάνω από τους -4°C . Όταν ψύχεται κάτω από τους -4°C , το νερό παγώνει από το διάλυμα και ως εκ τούτου το υπόλοιπο διάλυμα έχει υψηλότερη συγκέντρωση σε αλάτι. Αυτό σημαίνει ότι η ουσία χωρίζεται σε δύο διαφορετικές φάσεις, μία με μόνο νερό, και μία δεύτερη με μια υψηλότερη συγκέντρωση αλατιού από ό,τι η αρχική. Λόγω της βαρύτητας, η φάση με την υψηλότερη πυκνότητα θα

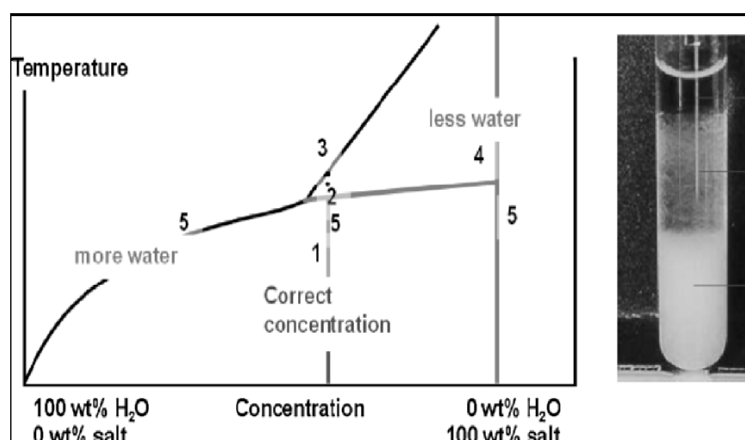
βυθιστεί στον πυθμένα και η μία με τη χαμηλότερη πυκνότητα θα κατευθυνθεί προς την κορυφή. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται διαχωρισμός φάσης ή αποσύνθεση, γιατί η αρχική σύνθεση αλλάζει. Όταν η θερμοκρασία μειώνεται περαιτέρω, περισσότερο νερό παγώνει έξω, και η συγκέντρωση αλατιού στο υπόλοιπο υγρό αυξάνεται. Για διαφορετικές αρχικές συνθέσεις, η θερμοκρασία του νερού όπου αρχίζει να παγώνει είναι επίσης διαφορετική: όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση αλατιού, τόσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία όπου το νερό αρχίζει να παγώνει από το διάλυμα.

Ανάλογα με το πόσο σοβαρός διαχωρισμός φάσεων εμφανίζεται και πόσο δύσκολο είναι να απαλλαγούμε από αυτόν, η συμπεριφορά τήξεως ενός PCM που δείχνει διαχωρισμό των φάσεων περιγράφεται ως ημι-ομοιόμορφη τήξη ή ως ανομοιόμορφη τήξη, σε αντίθεση με την ομοιόμορφη τήξη όπου καθόλου διαχωρισμός των φάσεων δεν εμφανίζεται. Ανάλογα με το ρυθμό θέρμανσης και ψύξης, ο βαθμός διαχωρισμού φάσεων σε ημι-ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη τήξη PCM θα είναι διαφορετικός.

Το πρόβλημα με το διαχωρισμό των φάσεων είναι ότι μπορεί να μειώσει σημαντικά την πυκνότητα αποθήκευσης. Επειδή σε τοπικό επίπεδο η σωστή συγκέντρωση των μορίων για το σχηματισμό του PCM δεν είναι πια δεδομένη, το PCM δεν μπορεί να στερεοποιηθεί ολόκληρο. Αυτό σημαίνει ότι η λανθάνουσα θερμότητα της στερεοποίησης μπορεί συνήθως να μην απελευθερώνεται πλήρως, μερικές φορές μόνο σε ένα μικρό κλάσμα. Για την ανάκτηση της λανθάνουσας θερμότητας που αποθηκεύεται στο αρχικό υλικό, η σωστή συγκέντρωση των χημικών συστατικών απαιτείται σε όλο το σύνολο του δείγματος. Μόνο τότε, το PCM μπορεί να στερεοποιηθεί εντελώς.

Ο διαχωρισμός των φάσεων επεξηγείται και στο ακόλουθο σχήμα με τη βοήθεια ενός ένυδρου άλατος ως παράδειγμα. Το ένυδρο άλας αποτελείται από δύο συνιστώσες, το αλάτι (π.χ. CaCl_2) και το νερό (π.χ. $6\text{H}_2\text{O}$). Η ενιαία φάση του ένυδρου άλατος πρώτα θερμαίνεται από το σημείο 1 (στερεό), στο σημείο 2. Στο σημείο 3 η γραμμή liquidus διασταυρώνεται και το υλικό θα είναι εντελώς υγρό. Μετά την θέρμανση ή ψύξη, μεταξύ των σημείων 2 και 3, δύο φάσεις σχηματίζονται, το υγρό και ένα μικρό ποσό μιας φάσης με λιγότερο νερό (σημείο 4). Εάν αυτές οι φάσεις διαφέρουν στην πυκνότητα, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μακροσκοπικό διαχωρισμό των φάσεων και ως εκ τούτου διαφορές συγκέντρωσης των χημικών που σχηματίζουν το υλικό PCM (σημείο 5 και σχήμα δεξιά). Όταν το δείγμα θερμαίνεται σε μια θερμοκρασία όπου το σημείο της φάσης του συνόλου του δείγματος είναι στην υγρή περιοχή (σημείο 3) οι διάφορες φάσεις θα πρέπει να αναμειχθούν ξανά με

μοριακή διάχυση, το οποίο μπορεί να διαρκέσει όμως πολλές ώρες ή ακόμα και ημέρες.



Σχήμα 2.15: Διαχωρισμός των φάσεων ενός ένυδρο άλατος (π.χ. $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) σε τρεις διακριτές φάσεις με διαφορετική συγκέντρωση νερού και πυκνότητα (δεξιά) και το αντίστοιχο διάγραμμα φάσης (αριστερά) [53].

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί ο διαχωρισμός φάσεων, μπορεί βέβαια να χρησιμοποιηθεί τεχνητή ανάμιξη. Αυτή είναι μια πολύ γνωστή προσέγγιση για τη διάλυση της ζάχαρης στον καφέ ή του αλατιού στο νερό. Εφαρμογή της σε PCM, το PCM επιτρέπεται να διαχωριστεί σε μακροσκοπικές αποστάσεις, αλλά αντί να περιμένει τη διάχυση για να ομογενοποιηθεί, η ταχύτερη διαδικασία της ανάμειξης χρησιμοποιείται. Αυτή η προσέγγιση έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς με πολλά ένυδρα άλατα. Το κυριότερο μειονέκτημά της είναι ο απαραίτητος εξοπλισμός.

Μια εύκολη προσέγγιση τώρα στο επίπεδο του υλικού είναι η προσθήκη επιπλέον νερού στο ένυδρο άλας. Για παράδειγμα αντί για $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ με περίπου 50% κ.β. από CaCl_2 , ένα πιο αραιωμένο μείγμα με λιγότερο από 45% κ.β. μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Στη συνέχεια, το επιπλέον νερό θα κάνει την ομογενοποίηση της υγρής φάσης με διάχυση του $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ γρηγορότερα. Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι λόγω της προσθήκης του νερού, η συνολική πυκνότητα αποθήκευσης μειώνεται, και ότι η περιοχή του σημείου τήξεως γίνεται ευρύτερη.

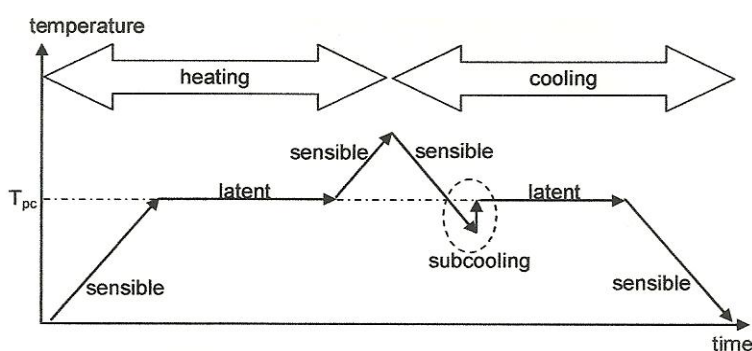
Ένας δεύτερος τρόπος για να μειωθεί το πρόβλημα του διαχωρισμού φάσης στο επίπεδο υλικού είναι με τη χρήση διαδικασιών διάχυσης για ομογενοποίηση. Διάχυση είναι όμως μόνο αποτελεσματική σε μικρές κλίμακες, επειδή η ταχύτητα των διαδικασιών διάχυσης πηγαίνει με το τετράγωνο της απόστασης. Ως εκ τούτου, αυτή η προσέγγιση μπορεί να λειτουργήσει μόνο εάν το PCM χωρίζεται σε μικρές αποστάσεις. Ένας τρόπος για να περιοριστούν οι αποστάσεις που οι φάσεις μπορεί να χωριστούν σε κλίμακα ορισμένων mm είναι να χρησιμοποιηθούν ρηχά δοχεία για το PCM. Ωστόσο συνήθως αυτό δεν είναι αρκετό. Για να μειωθεί η απόσταση ώστε οι

φάσεις να μπορούν να διαχωριστούν σε μικροσκοπική κλίμακα, «gelling» μπορεί να χρησιμοποιηθεί που έχει σαν αποτέλεσμα τη διαμόρφωση ενός τρισδιάστατου δικτύου στο μεγαλύτερο μέρος του PCM. Το δίκτυο αυτό έχει τις διαφορετικές φάσεις του PCM μαζί σε μικροσκοπική κλίμακα. Το τζελ αυτό μπορεί να σχηματιστεί για παράδειγμα από ένα πολυμερές. Το ίδιο αποτέλεσμα με το τζελ μπορεί να επιτευχθεί εάν το PCM διεισδύσει σε ένα μικρό πορώδες υλικό.

Ένας άλλος τρόπος για να μειωθεί η απόσταση που οι φάσεις μπορούν να είναι ξεχωριστές είναι με την πάχυνση του PCM. Πάχυνση σημαίνει την προσθήκη ενός υλικού για το PCM ώστε να αυξηθεί το ιξώδες του. Λόγω του υψηλού ιξώδους, οι διαφορετικές φάσεις δεν μπορούν να διαχωριστούν πολύ μέχρι τελικά ολόκληρο το PCM να γίνει στερεό. Η περιγραφή εφαρμογής της μεθόδου αυτής πραγματοποιήθηκε στην παράγραφο για τα ένυδρα άλατα. Υπάρχει ένας τρίτος τρόπος τέλος σε επίπεδο υλικού για να μειωθεί ο διαχωρισμός των φάσεων. Είναι ίσως ο καλύτερος αλλά και πιο πολύπλοκος. Με αυτό τον τρόπο αλλάζει το διάγραμμα φάσης του ίδιου του PCM με την προσθήκη άλλων υλικών έως ότου προκύψει ομοιόμορφη τήξη.

2.6.2 Υπόψυξη (ή υπέρψυξη) [20]

Ως υπόψυξη ή υπέρψυξη ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο πολλά PCM δεν στερεοποιούνται αμέσως μετά την ψύξη κάτω από τη θερμοκρασία τήξεως, αλλά η έναρξη της κρυσταλλοποίησης επιτυγχάνεται μόνο μετά από μια θερμοκρασία αρκετά κάτω από τη θερμοκρασία τήξεως. Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου παρατίθεται στη συνέχεια.

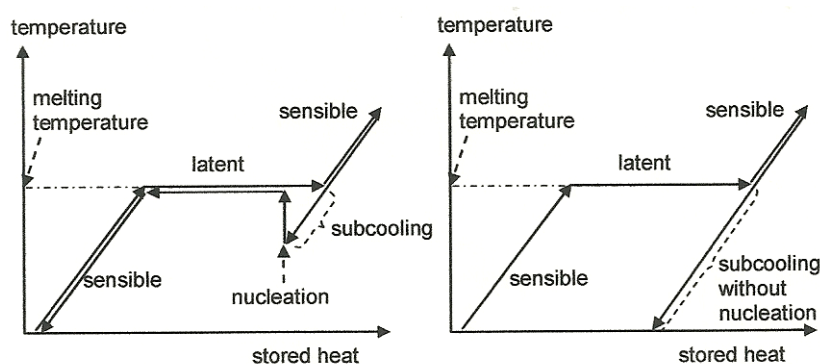


Σχήμα 2.16: Σχηματική μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της θέρμανσης (τήξη) και ψύξης (στερεοποίηση) ενός PCM με υπόψυξη [20].

Κατά τη διάρκεια της παροχής της θερμότητας, δεν υπάρχει καμία διαφορά αν ένα PCM δείχνει υπόψυξη ή όχι. Κατά την άντληση θερμότητας, ωστόσο, η λανθάνουσα θερμότητα δεν απελευθερώνεται όταν η θερμοκρασία τήξεως προσεγγισθεί λόγω υπόψυξης. Η επίδραση της υπόψυξης καθιστά απαραίτητο να μειωθεί η θερμοκρασία αρκετά κάτω από τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης για να

αρχίσει η κρυσταλλοποίηση και να απελευθερωθεί η λανθάνουσα θερμότητα που αποθηκεύεται στο υλικό. Εάν πυρήνωση δεν συμβαίνει καθόλου, η λανθάνουσα θερμότητα δεν απελευθερώνεται καθόλου και το υλικό μόνο αποθηκεύει αισθητή θερμότητα. Σε τεχνικές εφαρμογές του PCM, η υπόψυξη ως εκ τούτου μπορεί να είναι ένα σοβαρό πρόβλημα.

Για παράδειγμα, το νερό σε υγρή μορφή μπορεί να ψυχθεί σε θερμοκρασίες πολύ κάτω από 0°C, ειδικότερα αν είναι πολύ καθαρό και σε μικρές ποσότητες, ακόμη και κάτω από -15°C. Όταν το νερό υποψύχεται έστω στους -8°C και αρχίζει η κρυστάλλωση, η λανθάνουσα θερμότητα της κρυστάλλωσης απελευθερώνεται. Σε αυτή τη θερμοκρασία των -8°C, $8K \cdot 4 \text{ kJ/kgK} = 32 \text{ kJ/kg}$ αισθητής θερμότητας χάθηκαν λόγω υπόψυξης, πολύ λιγότερο από ό,τι η λανθάνουσα θερμότητα των 333 kJ/kg που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της κρυστάλλωσης. Εάν η θερμότητα που εκλύεται κατά την στερεοποίηση είναι μεγαλύτερη από την αισθητή θερμότητα που χάνεται λόγω υπόψυξης, η θερμοκρασία αυξάνεται στη θερμοκρασία τήξης και παραμένει εκεί μέχρι η αλλαγή φάσης να ολοκληρωθεί. Η υπόθεση αυτή εμφανίζεται και στο ακόλουθο σχήμα. Εάν τώρα η απώλεια της αισθητής θερμότητας κατά τη διάρκεια της υπόψυξης είναι όμως μεγαλύτερη από τη λανθάνουσα θερμότητα που εκλύεται κατά την κρυστάλλωση, ή εάν το ποσοστό της απώλειας θερμότητας προς το περιβάλλον είναι μεγαλύτερο από το ποσοστό απελευθέρωσης θερμότητας κατά τη διάρκεια κρυστάλλωσης, είναι πιθανό ότι η θερμοκρασία δεν θα αυξηθεί στη θερμοκρασία τήξης πάλι.



Σχήμα 2.17: Επίδραση της υπόψυξης για την αποθήκευση θερμότητας. Αριστερά: με λίγη υπόψυξη και πυρήνωση, δεξιά: σοβαρή υπόψυξη χωρίς πυρήνωση [20].

Η έναρξη της στερεοποίησης της υγρής φάσης στην διεπιφάνεια με τη στερεά φάση μπορεί να είναι ένα πρόβλημα. Στην αρχή, δεν υπάρχει κανένα ή μόνο ένα μικρό στερεό σωματίδιο, που ονομάζεται πυρήνας. Προκειμένου ο πυρήνας να αυξηθεί στερεοποιώντας την υγρή φάση στην επιφάνειά του, το σύστημα πρέπει να απελευθερώσει θερμότητα για να φτάσει στο ενεργητικό του ελάχιστο. Υπάρχει

ωστόσο ένας ανταγωνισμός μεταξύ της επιφανειακής ενέργειας, η οποία είναι ανάλογη με το εμβαδόν επιφανείας και ως εκ τούτου με r^2 (όπου r είναι η ακτίνα του πυρήνα), και της θερμότητας που παράγεται με την αλλαγή της φάσης, η οποία είναι ανάλογη προς τον όγκο και κατά συνέπεια με r^3 . Σε μικρή ακτίνα, είναι πιθανό ότι η θερμότητα που εκλύεται από την κρυστάλλωση να είναι μικρότερη από την ενέργεια της επιφάνειας που έχει αποκτηθεί. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ένα ενεργητικό φράγμα. Μόνο όταν ένας πυρήνας αρκούτσως μεγάλης ακτίνας είναι παρόν ξεκινά η στερεοποίηση. Γι' αυτό, σε ορισμένες περιπτώσεις, θερμοκρασίες σημαντικά χαμηλότερες από τις θερμοκρασίες τήξης είναι απαραίτητες.

Η πυρήνωση χωρίζεται σε δύο περιπτώσεις:

- Ομοιογενής πυρήνωση σημαίνει πυρήνωση αποκλειστικά και μόνο από το ίδιο το PCM. Ομοιογενής πυρήνωση περιλαμβάνει πυρήνωση από αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες και μια δεύτερη δυνατότητα, με σωματίδια στερεού PCM να προστίθεται στο υποψυχόμενο PCM. Το τελευταίο μερικές φορές ονομάζεται και ως δευτερογενή πυρήνωση.
- Ετερογενής πυρήνωση σημαίνει πυρήνωση όχι από το ίδιο το PCM. Η προέλευση της ετερογενούς πυρήνωσης μπορεί να είναι από ειδικά πρόσθετα που σκόπιμα προστίθεται στο PCM, αλλά επίσης και ακαθαρσίες, ή ρωγμές στο τοίχωμα του δοχείου που να περιέχουν στερεά PCM.

Η πιο κοινή προσέγγιση για να απαλλαγούμε από υπόψυξη στο επίπεδο του PCM είναι να προστεθούν ειδικά πρόσθετα, που ονομάζονται επίσης πυρήνες, στο PCM για να προκαλέσουν ετερογενή πυρήνωση. Πυρήνες έχουν αναπτυχθεί για τα περισσότερα εξεταζόμενα PCM, και μειώνουν την υπόψυξη κατά κανόνα σε μερικά K. Οι περισσότεροι πυρήνες είναι υλικά με μια παρόμοια δομή κρυστάλλου μ' αυτή του στερεού PCM για να επιτρέψουν στη στερεά φάση του PCM να αυξηθεί στην επιφάνειά τους, αλλά μιας υψηλότερης θερμοκρασίας τήξης για να αποφευχθεί η απενεργοποίηση όταν το PCM είναι λιωμένο. Το πρόβλημα με αυτή τη μέθοδο είναι ότι συνήθως μια παρόμοια κρυσταλλική δομή σημαίνει επίσης μια παρόμοια θερμοκρασία τήξης. Ως εκ τούτου, πολλοί πυρήνες είναι σταθεροί μόνο μέχρι μια θερμοκρασία 10K έως 20K πάνω από τη θερμοκρασία τήξης του PCM.

Η δυσκολία του να βρεθεί ένας πυρήνας μπορεί να παρακαμφθεί εάν το PCM σε τοπικό επίπεδο ψύχεται σε αρκετά χαμηλή θερμοκρασία για να έχει πάντα κάποια εναπομένουσα στερεά φάση η οποία να ενεργεί ως ομοιογενής παράγοντας πυρήνωσης. Η αναγκαία τοπική ψύξη μπορεί να γίνει από ένα στοιχείο Peltier ή μέσω της τεχνικής «cold finger». Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί ένα ψυχρό σημείο στη συσκευασία που προκαλείται για παράδειγμα από σκόπιμα κακή μόνωση, για να έχει

πάντα κάποιο στερεό PCM. Συνεπώς, είναι μόνο χρήσιμη όταν η θερμοκρασία τήξης του PCM είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Επίσης μια τεχνική έναρξης της στερεοποίησης, η οποία βρίσκεται ακόμα όμως σε πειραματικό στάδιο είναι η χρήση πιέσεων που σχετίζονται με κρουστικά κύματα. Αυτό που έχει αποδειχθεί μέχρι τώρα είναι ότι η εφαρμογή στατικών πιέσεων αρκετών kbar είναι απαγορευτική για εφαρμογές PCM εξαιτίας του απαραίτητου εξοπλισμού.

2.6.3 Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα [20,53]

Όλα τα μη μεταλλικά υγρά, συμπεριλαμβανομένου και των PCM έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Δεδομένου ότι το PCM αποθηκεύει μεγάλες ποσότητες θερμότητας ή ψύχους σε ένα μικρό όγκο, και επειδή είναι ανάγκη να μεταφερθεί αυτή η θερμότητα έξω από την αποθήκευση προκειμένου να χρησιμοποιηθεί, η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα μπορεί να είναι ένα πρόβλημα. Στην υγρή φάση, η συναγωγή μπορεί να ενισχύσει σημαντικά τη μεταφορά θερμότητας, όμως συχνά αυτό δεν είναι αρκετό καθώς στη στερεά φάση, δεν υπάρχει καμία συναγωγή. Όταν γρήγορη μεταφορά θερμότητας είναι απαραίτητη, μία πιθανότητα να αυξηθεί η θερμική αγωγιμότητα του PCM είναι η προσθήκη υλικών με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα. Αυτό μπορεί να γίνει σε μακροσκοπική κλίμακα, για παράδειγμα με την προσθήκη μεταλλικών αντικειμένων. Μια ειδική περίπτωση ακόμα είναι πτερύγια τα οποία είναι συνδεδεμένα απευθείας με το εναλλάκτη θερμότητας.

2.6.4 Συμβατότητα με άλλα υλικά [40,53]

Η συμβατότητα του PCM με άλλα υλικά είναι σημαντική σε σχέση με τη διάρκεια ζωής των καψουλών ή γενικότερα των δοχείων που περιέχουν το PCM, και τη πιθανή ζημία στο άμεσο περιβάλλον εντός του συστήματος, σε περίπτωση διαρροής του PCM. Κοινά προβλήματα στη συμβατότητα υλικών με PCM είναι τα εξής:

- διάβρωση των μετάλλων που έρχονται σε επαφή με ανόργανα PCMs,
- απώλεια σταθερότητας των πλαστικών που είναι σε επαφή με οργανικά PCMs και
- μετανάστευση του υγρού ή αερίου μέσω πλαστικών που επηρεάζει την απόδοση όχι μόνο του περιεχόμενου οργανικού ή ανόργανου PCM αλλά και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Ειδικότερα, το υλικό κατασκευής για το φάκελο ή το δοχείο του PCM πρέπει να αποτελεί αποτελεσματικό φραγμό στη μετανάστευση για να αποτρέψει την απώλεια του υλικού ή του νερού ή, όταν το PCM είναι υγροσκοπικό, το κέρδος νερού (διείσδυση οξυγόνου και επακόλουθη οξειδωση μπορεί επίσης να είναι επιβλαβής).

Για την αποφυγή λοιπόν προβλημάτων συμβατότητας, δοκιμές συμβατότητας υπό συνθήκες τυπικές για τη σχεδιαζόμενη εφαρμογή εκτελούνται. Από τα αποτελέσματά τους κατάλληλοι συνδυασμοί υλικών επιλέγονται.

2.6.5 Συσκευασία PCM

2.6.5.1 Ενσωμάτωση σε κάψουλες των υλικών αλλαγής φάσης

Η ενσωμάτωση σε κάψουλες του PCM παρουσιάζει ενδιαφέροντα πλεονεκτήματα [54,55] για την ένταξή του σε διάφορες εφαρμογές και έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον διαφόρων ερευνητών. Τα ενσωματωμένα σε κάψουλες υλικά αλλαγής φάσης (PCMs) αποτελούνται από μια ενθουλακωμένη ουσία με υψηλή θερμότητα τήξης. Το υλικό αλλαγής φάσης απορροφάει και απελευθερώνει την θερμική ενέργεια, προκειμένου να διατηρήσει σε ελεγχόμενη θερμοκρασία το προϊόν εντός του οποίου βρίσκεται. Το τείχος ή το κέλυφος της κάψουλας παρέχει ένα μικροσκοπικό δοχείο για το PCM. Ακόμα και όταν ο πυρήνας είναι σε υγρή κατάσταση, οι κάψουλες εξακολουθούν να λειτουργούν ως ένα στερεό αποτρέποντας τη διαφυγή του PCM κατά την τήξη.

Σε γενικές γραμμές οι λειτουργίες και οι απαιτήσεις της συσκευασίας [54] του PCM θα πρέπει να είναι οι ακόλουθες:

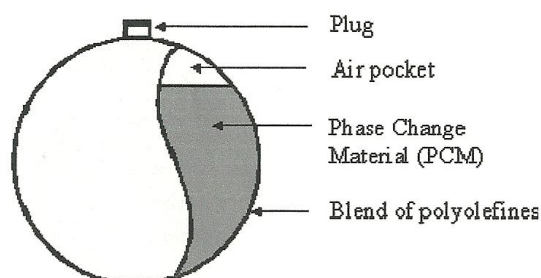
- Τήρηση των απαιτήσεων της αντοχής, της ευελιξίας, της αντίστασης σε διάβρωση και της θερμικής σταθερότητας.
- Συμπεριφορά ως ένα εμπόδιο για την προστασία του PCM από επιβλαβή αλληλεπίδραση με το περιβάλλον.
- Παροχή επαρκούς επιφάνειας για τη μεταφορά θερμότητας.
- Παροχή δομικής σταθερότητας και εύκολου χειρισμού.

Είδη συσκευασίας που έχουν μελετηθεί και τα οποία θα αναλύσουμε και παρακάτω είναι η ενσωμάτωση σε κάψουλες η οποία ανάλογα με το μέγεθος των καψουλών διακρίνεται σε μικροενσωμάτωση και μακροενσωμάτωση καθώς και η μαζική αποθήκευση σε δεξαμενές ανταλλαγής θερμότητας.

2.6.5.1.1 Μακροενσωμάτωση [20,54]

Μακροενσωμάτωση σε κάψουλες περιλαμβάνει την ενσωμάτωση του PCM σε κάποια μορφή συσκευασίας, όπως σωλήνες, σακουλάκια, σφαίρες (σχήμα 2.18), πάνελ ή γενικά σε δοχείο με διάμετρο μεγαλύτερη από 1cm. Η μάζα του PCM για κάθε μονάδα μπορεί να κυμαίνεται από πολλά ml μέχρι αρκετά lt. Η μακροενσωμάτωση είναι πολύ συνηθισμένη, διότι τέτοια δοχεία ή σακούλες είναι διαθέσιμα στην αγορά σε μια μεγάλη ποικιλία ήδη από άλλες εφαρμογές. Στην περίπτωση αυτή, μακροενσωμάτωση γίνεται κυρίως για να κρατηθεί το υγρό PCM, να αποτραπούν αλλαγές στη σύνθεσή του από την επαφή με το περιβάλλον καθώς και μεγάλος διαχωρισμός φάσεων. Εάν το εμπορευματοκιβώτιο είναι αρκετά άκαμπτο, η ενσωμάτωση σε μακροκάψουλα μπορεί επίσης να προσθέσει μηχανική σταθερότητα σε ένα σύστημα. Το κύριο πλεονέκτημά της όμως είναι η δυνατότητα εφαρμογής της

και σε αέρια ρευστά μεταφοράς θερμότητας καθιστώντας έτσι πιο εύκολο το χειρισμό αλλά και τη μεταφορά τους. Ενώ πρόβλημα αποτελεί η μεγάλη αναλογία επιφάνειας προς όγκο που απαιτείται για να ανταποκριθεί στη ζητούμενη μεταφοράς θερμότητας.



Σχήμα 2.18: Σφαιρικό οξίδιο γεμάτο από PCM που αναπτύχθηκε από Christopia [54].

2.6.5.1.2 Μικροενσωμάτωση [20,54-57]

Είναι η διαδικασία με την οποία μεμονωμένα σωματίδια ή σταγονίδια του στερεού ή υγρού υλικού (πυρήνας) περιβάλλονται ή επικαλύπτονται με μία συνεχή μεμβράνη πολυμερούς υλικού (περίβλημα) ώστε να προκύψουν κάψουλες που θα κυμαίνονται από μερικά μικρόμετρα έως κάποια χιλιοστά, που είναι γνωστές ως μικροκάψουλες. Όσον αφορά τη μήτρα στην οποία τα επικαλυμμένα σωματίδια μπορεί στη συνέχεια να ενσωματωθούν πρέπει να είναι συμβατή με τη μεμβράνη. Εάν η μήτρα που ενσωματώνει το PCM δεν έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα, το σύστημα ενσωμάτωσης σε κάψουλες πάσχει από χαμηλό ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Η ακαμψία της μήτρας αποτρέπει ρεύματα συναγωγής και αναγκάζει όλη τη μεταφορά θερμότητας να συμβεί με αγωγή. Αυτό μπορεί να μειώσει σημαντικά τα ποσοστά μεταφοράς θερμότητας, ειδικά κατά την λειτουργία φόρτισης. Οι μικροκάψουλες συνοψίζοντας μπορεί να έχουν σφαιρικό σχήμα, με ένα συνεχές, σκληρό κέλυφος να περιβάλλει τον πυρήνα, ενώ άλλες μπορεί να είναι ασύμμετρες και μεταβλητού σχήματος, με μια ποσότητα από μικρότερα σταγονίδια του υλικού του πυρήνα ενσωματωμένα σε όλη τη μικροκάψουλα.

Και οι τρεις καταστάσεις της ύλης (στερεά, υγρά και αέρια) μπορούν να μικροενσωματωθούν σε κάψουλες. Αυτό επιτρέπει υλικά υγρής ή αέριας κατάστασης να αντιμετωπίζονται ευκολότερα σε στερεά, παρέχοντας παράλληλα και κάποιο μέτρο προστασίας κατά το χειρισμό επικίνδυνων υλικών. Δεν παρουσιάζονται προβλήματα λόγω των αλλαγών φάσης συμπεριλαμβανομένων και των ογκομετρικών αλλαγών στον πυρήνα τους. Εκτός όμως από τη συγκράτηση της υγρής φάσης, άλλα πλεονεκτήματα σχετικά με την μικροενσωμάτωση PCM σε κάψουλες είναι η βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας προς το περιβάλλον λόγω της μεγάλης αναλογίας επιφάνειας προς όγκο των καψουλών, και η βελτίωση της σταθερότητας της

καταπόνησης σε κυκλική φόρτιση δεδομένου ότι ο διαχωρισμός των φάσεων περιορίζεται σε μικροσκοπικές αποστάσεις. Περαιτέρω, είναι επίσης δυνατόν να ενσωματωθούν μικροκάψουλες με PCM σε άλλα υλικά. Ειδικότερα οι μικροκάψουλες μπορούν να επεξεργαστούν σε κάποιο διασκορπισμένο υγρό ή σε σκόνη και να ενσωματωθούν σε πολλά οικοδομικά υλικά που περνούν από ένα στάδιο σκόνης κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Θερμοκρασίες αλλαγής φάσης μεταξύ -10 και 80°C είναι πιθανές στην κατασκευή με μικροκάψουλες. Ένα σοβαρό μειονέκτημα της μικροενσωμάτωσης σε κάψουλες είναι, ωστόσο, ότι η πιθανότητα υπόψυξης αυξάνεται. Επί του παρόντος, μικροενσωμάτωση σε κάψουλες σε εμπορική κλίμακα εφαρμόζεται μόνο σε PCM που δεν είναι ευδιάλυτα σε νερό. Ο λόγος είναι η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία. Πέρα από αυτό όμως, οι ενσωματώσεις σε μικροκάψουλα ένυδρων αλάτων δημιουργούν ένα επιπλέον πρόβλημα: η στενότητα του υλικού του κελύφους για τα μικρά μόρια του νερού πρέπει να είναι επαρκή για την πρόληψη αλλαγών της σύνθεσης των ένυδρων αλάτων.

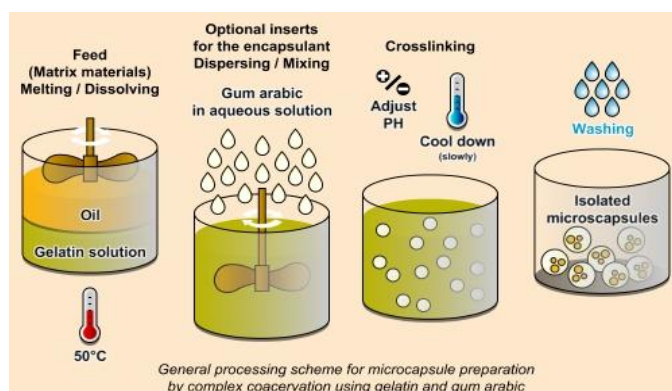
Πολλές φυσικές και χημικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την παραγωγή των μικροκαψουλών. Οι φυσικές διεργασίες που χρησιμοποιούνται για την ενσωμάτωση σε μικροκάψουλα είναι η ξήρανση με ψεκασμό, διεργασίες φυγοκέντρωσης και ρευστοποιημένης κλίνης, ή διεργασίες επίστρωσης π.χ. σε κυλιόμενους κυλίνδρους. Ενώ οι χημικές διεργασίες που χρησιμοποιούνται είναι επί τόπου ενσωματώσεις σε κάψουλα όπως «complex coacervation» με ζελατίνη, διεπιφανειακή πολυσυμπύκνωση προκειμένου να πάρουμε ένα κέλυφος πολυαμιδίου ή πολυουρεθάνης, καθίζηση λόγω πολυσυμπύκνωσης αμινορητινών, και άλλες. Οι επί τόπου διεργασίες έχουν την ικανότητα να αποφέρουν μικροκάψουλες με την καλύτερη ποιότητα από άποψη διάδοσης της στεγανότητας του κελύφους. Δύο χημικές διεργασίες για την μικροενσωμάτωση σε κάψουλες θα περιγραφούν στη συνέχεια με περισσότερες λεπτομέρειες.

- Complex coacervation

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ικανότητα των κατιόντων και ανιόντων υδατοδιαλυτών πολυμερών να αλληλεπιδρούν με το νερό για να σχηματίσουν μια υγρή φάση, πλούσια σε πολυμερή. Η φάση αυτή υπάρχει σε ισορροπία με μια αραιά φάση ισορροπίας. Καθώς το υλικό του πυρήνα μη αναμίξιμο με νερό εισάγεται στο σύστημα, λεπτές ταινίες του πολυμερούς επικαλύπτουν τα διασκορπισμένα σταγονίδια από το υλικό του πυρήνα. Οι λεπτές ταινίες, έπειτα σταθεροποιούνται για να κάνουν συγκομιδίσιμες τις κάψουλες. Απαραίτητη προϋπόθεση όμως για την πραγματοποίηση της παραπάνω διαδικασίας είναι οι φορτίσεις να είναι αρκετά μεγάλες για να επάγουν αλληλεπίδραση μεταξύ των αντίθετα φορτισμένων

πολυηλεκτρολυτών, αλλά όχι πάρα πολύ μεγάλες ώστε να μην προκληθεί καθίζηση. Παράμετροι της μεθόδου αυτής είναι το pH, η ιοντική δύναμη, η θερμοκρασία, το μοριακό βάρος και η συγκέντρωση.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα μικροενσωμάτωσης σε κάψουλες με τη συγκεκριμένη μέθοδο αποτελεί η αντίδραση μιας πρωτεΐνης όπως είναι η ζελατίνη με το αραβικό κόμμι, η σχηματική αναπαράσταση της οποίας δίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το πρώτο βήμα της μικροενσωμάτωσης σε κάψουλες με τη μέθοδο αυτή είναι να διασκορπιστεί το υλικό του πυρήνα (PCM) στο υδατικό διάλυμα της ζελατίνης σε ένα θερμοκρασιακό εύρος της τάξης των 40 - 60°C, στην οποία το διάλυμα του υλικού του τοίχου είναι υγρό. Σε αυτό το σημείο, προστίθεται στη συνέχεια το αραβικό κόμμι στη ζελατίνη. Ακολουθείται προσαρμογή του pH και της συγκέντρωσης του πολυμερούς και το προκύπτον σύστημα ψύχεται σε θερμοκρασία δωματίου. Το τελικό βήμα είναι σκλήρυνση και απομόνωση των μικροκαψουλών. Σκλήρυνση μπορεί να γίνει με φορμαλδεΐδη, η οποία διασταυρώνεται με το υλικό του τοίχου αντιδρώντας με τις ομάδες αμινοξέων που βρίσκονται στην αλυσίδα. Μετά από αυτό, το pH πρέπει να αυξηθεί στο 9 - 11 με διάλυμα NaOH. Στη συνέχεια, οι κάψουλες ψύχονται περίπου στους 5 - 10°C και διατηρούνται σε αυτή τη θερμοκρασία για 2 έως 4 ώρες. Τέλος φιλτράρονται και αποξηραίνονται.



Σχήμα 2.19: Προετοιμασία μικροκαψουλών χρησιμοποιώντας ζελατίνη και αραβικό κόμμι με τη μέθοδο «complex coacervation» [56].

- Πολυμερισμός

Διεπιφανειακός πολυμερισμός (IFP) είναι μια άλλη χημική μέθοδος εγκλωβισμού σε μικροκάψουλα. Η τεχνική αυτή χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό τοίχου μέσω ταχύ πολυμερισμού μονομερών στην επιφάνεια των σταγονιδίων ή σωματιδίων του διάσπαρτου υλικού του πυρήνα. Ένα πολυλειτουργικό μονομερές διαλύεται στο υλικό του πυρήνα, και αυτό το διάλυμα είναι διάσπαρτο σε μια υδατινή φάση. Ένα αντιδρών συστατικό στο μονομερές προστίθεται στην υδατινή φάση, και ο πολυμερισμός επέρχεται γρήγορα στις επιφάνειες των σταγονιδίων του πυρήνα, σχηματίζοντας τα

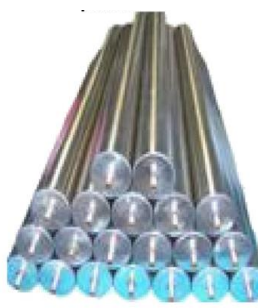
τείχη των κάψουλων. Ο IFP μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προετοιμασία μεγαλύτερων μικροκάψουλων, αλλά οι περισσότερες εμπορικές διαδικασίες IFP παράγουν μικρότερες κάψουλες στην περιοχή 20-30 μικρό διαμέτρων για χρήσεις ζιζανιοκτόνων και φυτοφαρμάκων, ή ακόμη και μικρότερες 3-6 μικρό διαμέτρων.

Εκτός από το διεπιφανειακό πολυμερισμό μια χημική τεχνική ενσωμάτωσης σε κάψουλες πολύ παρόμοια είναι και ο επί τόπου πολυμερισμός. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του επί τόπου πολυμερισμού είναι ότι δεν υπάρχουν αντιδρώντα που να περιλαμβάνονται στο υλικό του πυρήνα. Όλος ο πολυμερισμός συμβαίνει στη συνεχή φάση, και όχι στις δύο πλευρές της διεπιφάνειας μεταξύ της συνεχούς φάσης και του υλικού του πυρήνα, όπως στο IFP.

Παράδειγμα της τελευταίας αυτής μεθόδου αποτελεί το σύστημα ενσωμάτωσης σε κάψουλες ουρίας-φορμαλδεΰδης (UF) σε ένα γαλάκτωμα λαδιού σε νερό. Καταρχάς, στους περίπου 20°C έως 24°C, μη ιονισμένο νερό και ένα υδατικό διάλυμα του συμπολυμερούς αιθυλενίου μηλεϊνικού ανυδρίτη (EMA) αναμιγνύονται σε δοχείο με μια ελεγχόμενη θερμοκρασία. Ενώ αναμιγνύονται, ουρία, χλωριούχο αμμώνιο, και ρεσορκινόλη διαλύονται στο διάλυμα. Το pH αυξάνεται από περίπου 2.60 έως 3,50 με προσθήκη σταγονιδίων υδροξειδίου του νατρίου (NaOH) και υδροχλωρικού οξέος (HCl). Μια αργή ροή του PCM προστίθεται στη συνέχεια για να σχηματίσει ένα γαλάκτωμα και επιτρέπεται να σταθεροποιηθεί για 10 λεπτά. Μετά τη σταθεροποίηση, ένα υδατικό διάλυμα φορμαλδεΰδης προστίθεται. Το γαλάκτωμα θερμαίνεται στην επιδιωκόμενη θερμοκρασία των 55°C και παραμένει εκεί για 4h υπό συνεχή ανάμειξη. Αφού κρυώσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, οι μικροκάψουλες χωρίζονται υπό κενό με ένα τραχύ-διάτρητο φίλτρο. Οι μικροκάψουλες ξεπλένονται με απιονισμένο νερό και ξηραίνονται με αέρα επί 24 έως 48 h. Ένα κόσκινο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το διαχωρισμό των μικροκάψουλων.



EPS Ltd stainless ball capsule



EPS Ltd module beam



TEAP Polypropylene flat panel



TEAP Polyolefine spherical capsule

Σχήμα 2.20: Εμπορικά κατασκευασμένα προϊόντα αποθήκευσης θερμότητας με αλλαγή φάσης [60].

2.6.5.1.3 Μαζική αποθήκευση [54]

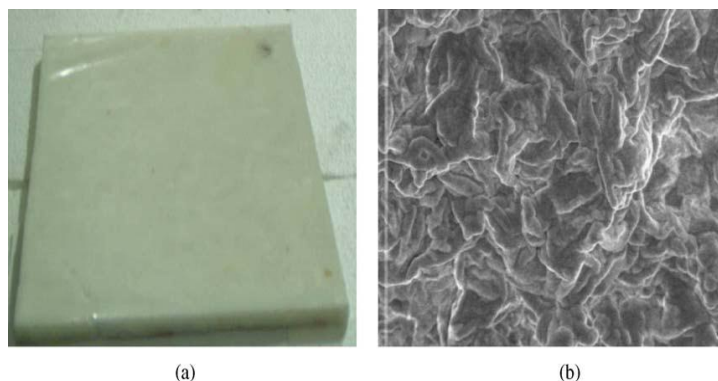
Τα συστήματα μαζικής αποθήκευσης αναφέρονται στην ενσωμάτωση PCM's σε δεξαμενές ανταλλαγής θερμότητας που είναι παρόμοιες στο σχεδιασμό με τις υπάρχουσες δεξαμενές που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της ενέργειας, αλλά με μερικές σημαντικές διαφορές. Το βασικό μοναδικό χαρακτηριστικό των μαζικών συστημάτων PCM είναι η ανάγκη για μια πιο εκτενή μεταφορά θερμότητας από αυτή που υπάρχει σε δεξαμενές χωρίς PCM, επειδή η πυκνότητα αποθήκευσης θερμότητας των PCM's είναι υψηλότερη σε σύγκριση με άλλα μέσα αποθήκευσης. Η περιοχή μεταφοράς θερμότητας είναι μικρότερη, αλλά εξακολουθεί να απαιτεί ένα υψηλό ρυθμό απελευθέρωσης της θερμότητας ή του κέρδους. Οι διάφορες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι η εισαγωγή πτερυγίων ή η χρήση υψηλής αγωγιμότητας σωματιδίων, μεταλλικών κατασκευών, ινών στην πλευρά του PCM, εναλλάκτες θερμότητας άμεσης επαφής ή χρήση της μεθόδου του κυλιόμενου κυλίνδρου.

2.6.5.2 Σύνθετα υλικά [17,20,53,58,59]

Τα σύνθετα υλικά είναι υλικά που αποτελούνται από ένα PCM και τουλάχιστον ένα άλλο υλικό. Το άλλο υλικό συντελεί στη βελτίωση τουλάχιστον μίας από τις ιδιότητες του PCM. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτή είναι ο χειρισμός του PCM, αλλά τα σύνθετα υλικά μπορούν επίσης να βελτιώσουν τη σταθερότητα της καταπόνησης σε κυκλική φόρτιση, και πάλι με μικροσκοπικές δομές που μειώνουν το διαχωρισμό των φάσεων καθώς και να βελτιώσουν τη μεταφορά θερμότητας, μέσω της προσθήκης υλικών με μεγάλη θερμική αγωγιμότητα όπως για παράδειγμα γραφίτη. Για να διατηρηθούν οι ιδιότητες του υλικού, η τάξη μεγέθους των δομών στην σύνθεση θα πρέπει να είναι μικροσκοπική, ή τουλάχιστον κάτω από την κλίμακα των nm. Σε αντίθετη περίπτωση, οι ιδιότητες της σύνθεσης θα εξαρτώνται από το μέγεθος του δείγματος και το σύνθετο υλικό ως εκ τούτου δεν μπορεί να ονομάζεται υλικό πια. Ένα σύνθετο μπορεί να διαμορφωθεί με διαφορετικούς τρόπους: με ενσωμάτωση άλλου υλικού στο PCM ή με ενσωμάτωση του PCM στη μήτρα ενός άλλου υλικού.

Σύνθετα υλικά ενός PCM και ενός άλλου υλικού ως μια μηχανικά σταθερή δομή συχνά ονομάζεται σταθεροποιημένου σχήματος PCM (SS-PCM). Ανεξάρτητα από τη φάση του PCM, στερεά ή υγρή, το σχήμα διατηρείται από τη φέρουσα κατασκευή. Σε σύγκριση με τις τεχνικές ενσωμάτωσης σε κάψουλες που περιγράφονται πριν, αυτά τα νέα υλικά θα μπορούσαν να κοπούν σε αυθαίρετα σχήματα χωρίς διαρροή. Έχουν πολλές πιθανές εφαρμογές, ιδίως στον τομέα των κτιρίων ενεργειακής απόδοσης π.χ. για θέρμανση χώρου το χειμώνα. Ειδικότερα οι πλάκες σταθεροποιημένου σχήματος

PCM (σχήμα 2.21) θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην υποδαπέδια ηλεκτρική θέρμανση χώρου, στο πάτωμα για να απορροφούν την ηλιακή ενέργεια περιορίζοντας την ταλάντευση θερμοκρασίας καθ' όλη τη διάρκεια μιας μέρας το χειμώνα.



Σχήμα 2.21: Φωτογραφίες από πλάκα σταθεροποιημένου σχήματος PCM (α) Φωτογραφία της πλάκας (β) ηλεκτρονική μικροσκοπική εικόνα από ηλεκτρικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) HITACHI S-450 [58].

Ένα παράδειγμα είναι η σταθεροποιημένου σχήματος παραφίνη, η οποία μπορεί να παραχθεί με την ενσωμάτωση παραφίνης σε μικροσκοπικό επίπεδο, σε μια δομή στήριξης, όπως για παράδειγμα σε υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE). Δεδομένου ότι το ποσοστό της μάζας της παραφίνης μπορεί να είναι στο μέτρο του 80% περίπου, η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια είναι συγκρίσιμη με αυτή των παραδοσιακών PCMs. Inaba και Tu, μελέτησαν τη θερμική συμπεριφορά του σταθεροποιημένου σχήματος υλικού αλλαγής φάσης (PCM), που αποτελείται από παραφίνη και HDPE. Το υλικό περιείχε 74% κ.β. παραφίνη, με θερμοκρασία τήξης των 54°C και θερμότητα τήξης 121,4 kJ/kg. Ye και Ge διερεύνησαν διάφορα είδη υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου (HDPE), με διαφορετικό δείκτη τήξης (MI) για χρήση ως υποστηρικτικό υλικό και προέβαλαν το βέλτιστο.

Εκτός όμως από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE) χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά. Ειδικότερα Xavier ετοίμασε σταθεροποιημένου σχήματος PCM από παραφίνη-επεκτάσιμο γραφίτη με υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Οι θερμοκρασίες τήξης των παραφινών ήταν 70-80, 18.1 και 9°C, αντίστοιχα. Επίσης Χiao επέλεξε συμπολυμερές στυρενίου - βουταδιενίου - στυρενίου (SBS) ως υποστηρικτικό υλικό για το σχηματισμό σταθεροποιημένου σχήματος PCM. Το υλικό περιείχε έως και 80% κ.β. παραφίνη. Η θερμοκρασία τήξεως και η θερμότητα τήξης είναι 56-58°C και 165,21kJ/kg, αντίστοιχα. Προκειμένου να αυξηθεί η θερμική αγωγιμότητα, μερικός επεκτάσιμος γραφίτης προστέθηκε στο υλικό. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η παραφίνη έχει την τάση να διαχέεται στην επιφάνεια και να χάνεται σιγά-σιγά, το SBS μπορεί να είναι το καλύτερο υλικό υποστήριξης. Ωστόσο, έχει το ελάττωμα της ακαμψίας,

δηλαδή, εάν το κατασκευασμένο προϊόν από SBS-παραφίνη έχει μεγάλο όγκο, αυτό δεν μπορεί να αντέξει το βάρος του και θα παραμορφωθεί. Βλέπουμε λοιπόν ότι κάθε συστατικό διαδραμάτισε και ένα διαφορετικό ρόλο: σκόνη-όπως το HDPE προίκισε την ακαμψία του PCM, το SBS απορρόφησε την παραφίνη έντονα, ενώ ήταν σε υγρή κατάσταση και ο γραφίτης ή τα ανθρακονήματα λειτούργησαν ως ένα συστατικό θερμικά αγωγίμο.

Οι δυνατότητες του γραφίτη για αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας όταν παραφίνες και ένυδρα άλατα χρησιμοποιούνται ως PCM έκαναν τους Satzger, Mehling και Py να προτείνουν ένα σύνθετο υλικό με γραφίτη, όπου το PCM είναι ενσωματωμένο μέσα στη μήτρα του γραφίτη. Το κύριο πλεονέκτημα ενός τέτοιου υλικού είναι η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του PCM χωρίς ιδιαίτερη μείωση της αποθήκευσης ενέργειας, άλλα πλεονεκτήματα θα μπορούσαν να είναι η μείωση της υπόψυξης των ένυδρων αλάτων και η μείωση της αλλαγής του όγκου σε παραφίνη. Γενικά η τεχνική της χρήσης μιας μήτρας γραφίτη χρησιμοποιείται για να ξεπεραστούν τα χαμηλά ποσοστά μεταφοράς θερμότητας παρέχοντας τα ακόλουθα πλεονεκτήματα: (α) Η ανισοτροπία του γραφίτη επιτρέπει την οδήγηση της μεταφοράς θερμότητας προς την κατεύθυνση του ενδιαφέροντος. (β) Η μήτρα γραφίτη καταλαμβάνει μόνο ένα μικρό χώρο, έτσι ώστε η πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας να παραμένει πολύ κοντά στην τιμή που έχει μόνο με PCM. (γ) Η μήτρα δεν εισάγει προβλήματα διάβρωσης, και (δ) Είναι εμπορικά διαθέσιμη. Με βάση πειραματικά αποτελέσματα για σύνθετα υλικά PCM-γραφίτη με έως και 85% κ.ο. από PCM έχουν αναφερθεί θερμικές αγωγιμότητες από 2 έως 30 W/m²K .

Ο εμποτισμός τώρα μηχανικά σταθερών, πορώδη υλικών με PCM θεωρείται ως μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος παραγωγής σύνθετων υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες. Μια χαρακτηριστική εφαρμογή είναι οι κεραμικοί κόκκοι και πλακάκια που έχουν υποστεί διείσδυση με άλατα ως PCM για να γίνουν έτσι μονάδες αποθήκευσης για θερμοκρασίες αρκετών εκατοντάδων °C. Ένα άλλο παράδειγμα είναι ο εμποτισμός πορώδους οικοδομικού υλικού (όπως γυψοσανίδα, τούβλο ή μπλοκ από μπετόν). Η διαδικασία έχει ως εξής: το υλικό βυθίζεται στο καυτό λειωμένο PCM, το οποίο απορροφάται από τους πόρους λόγω του τριχοειδούς φαινομένου. Το πορώδες υλικό στη συνέχεια αφαιρείται από το υγρό PCM και αφήνεται να κρυώσει με το PCM να παραμένει στους πόρους του δομικού υλικού. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι επιτρέπει σε κάποιον να μετατρέψει π.χ. μια συνήθη γυψοσανίδα σε γυψοσανίδα PCM, όταν απαιτείται, αφού ο εμποτισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί πρακτικά σε κάθε τόπο και χρόνο. Οι Hawes και Feldman εξέτασαν τους μηχανισμούς της απορρόφησης και καθιέρωσαν ένα μέσο ανάπτυξης και χρήσης σταθερών

απορρόφησης για το PCM στο σκυρόδεμα προκειμένου να επιτευχθεί διάχυση του επιθυμητού ποσού του PCM. Ωστόσο, όπως ο Schossig υπογράμμισε, η διαρροή μπορεί να είναι πρόβλημα σε ένα διάστημα πολλών ετών για τη μέθοδο αυτή. Στις περιπτώσεις αυτές επομένως σημαντικό κριτήριο για την επιτυχημένη ενσωμάτωση ενός υλικού (PCM) στο πορώδες άλλου υλικού είναι η μη αλληλεπίδραση του PCM με το υλικό και η περιορισμένη έως μηδενική μετανάστευση του από το πορώδες όταν βρίσκεται στην υγρή φάση.

Βιβλιογραφία 2^{ου} Κεφαλαίου

- [1] http://itl.chem.ufl.edu/2041_u99/lectures/lec_f.html
- [2] Frederic Kuznik, Damien David, Kevyn Johannes, Jean-Jacques Roux: A review on phase change materials integrated in building walls
- [3] http://www.mhtlab.uwaterloo.ca/courses/ece309/lectures/pdffiles/summary_ch2.pdf
- [4] <http://fds.oup.com/www.oup.co.uk/pdf/bt/echem/chapter05.pdf>
- [5] <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens211/2compphasdiag.pdf>
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Phase_diagram
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Eutectic_point
- [8] Francis Agyenim, Neil Hewitt, Philip Eames, Mervyn Smyth: A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)
- [9] Y. RABINI, E. KORIN: An efficient numerical solution for the multidimensional solidification (or melting) problem using a microcomputer
- [10] Piia Lamberg, Reijo Lehtiniemi, Anna-Maria Henell: Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage
- [11] <http://www.springerlink.com/content/p22804478m533488>
Sergio R. Idelsohn, Mario A. Storti and Luis A. Crivelli: Numerical methods in phase-change problems
- [12] Eleftherios Dimitrios Kravvaritis, Kimon Antonopoulos, Christos Tzivanidis: Solar energy management using PCM passive systems in the Athens area buildings*
*το παρόν άρθρο είναι υπό έκδοση
- [13] V. Voller and M. Cross: Accurate Solutions of moving boundary problems using the enthalpy method
- [14] V. R. Voller: An implicit enthalpy solution for phase change problems: with application to a binary alloy solidification

- [15] Atul Sharma, Lee Dong Won, D Buddhi, Jun Un Park: Numerical heat transfer studies of the fatty acids for different heat exchanger materials on the performance of a latent heat storage system
- [16] Dariusz Heim: Two solution methods of heat transfer with phase change within whole building dynamic simulation
- [17] Χ. Τζιβανίδης: «Σημειώσεις του μαθήματος Θερμική Συμπεριφορά Κτιρίων» Εκδόσεις Ε.Μ.Π. Μάιος 2006
- [18] Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications
- [19] <http://195.20.235.12/en/>
- [20] Harald Mehling and Luisa F. Cabeza: Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications, Chapter 2: Solid – liquid phase change materials
http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloadaddocument/9783540685562-c1.pdf?SGWID=0-0-45-562404-p173821439
- [21] Syukri Himran, Aryadi Suwono, G. Ali Mansoori: Characterization of Alkanes and Paraffin Waxes for Application as Phase Change Energy Storage Medium
- [22] A. Abhat: Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials
- [23] K. K. Pillai and B. J. Brinkworth: The Storage of Low Grade Thermal Energy using Phase Change Materials
- [24] http://en.wikipedia.org/wiki/Fatty_acid
- [25] D. Feldman, M.M. Shapiro, D. Banu and C.J. Fuks: Fatty acids and their mixtures as Phase – Change Materials for Thermal Energy Storage
- [26] http://en.wikipedia.org/wiki/Sugar_alcohol
- [27] Seongok Han, Chongyoun Kim and Dongsook Kwon: Thermal / oxidative degradation and stabilization of polyethylene glycol
- [28] http://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene_glycol
- [29] Hee W. Ryu, Sung W. Woo, Byung C. Shin and Sang D. Kim: Prevention of supercooling and stabilization of inorganic salt hydrates as latent heat storage materials
- [30] Ganesh Balasubramanian, Mehdi Ghommem, Muhammad R. Hajj, William P. Wong, Jennifer A. Tomlin, Ishwar K. Puri: Modeling of thermochemical energy storage by salt hydrates
- [31] http://en.wikipedia.org/wiki/Glauber's_salt

- [32] Stephen Marks: An investigation of the thermal energy storage capacity of Glauber's salt with respect to thermal cycling
- [33] <http://www.scribd.com/doc/57770636/149/Classification-of-PCM>
- [34] http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/09-10/Hybrid_systems/thermal-storage.htm
- [35] http://en.wikipedia.org/wiki/Phase_change_material
- [36] Imen Chatti, Anthony Delahaye, Laurence Fournaison, Jean-Pierre Petit: Benefits and drawbacks of clathrate hydrates: a review of their areas of interest
- [37] <http://www.otyposnews.gr/archives/7396>
- [38] http://www.pcmproducts.net/Solid_Solid_PCMS.htm
- [39] Manish K. Rathod, Hiren V. Kanzaria: A methodological concept for phase change material selection based on multiple criteria decision analysis with and without fuzzy environment
- [40] Jean Paris, Michel Falardeau, Cécile Villeneuve: Thermal Storage by Latent Heat: A Viable Option for Energy Conservation in Buildings
- [41] Yinping Zhang, Guobing Zhou, Kunping Lin, Qunli Zhang, Hongfa Di: Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook
- [42] H.K.D.H. Bhadeshia, "Thermal Analysis Techniques", University of Cambridge, Materials Science & Metallurgy
- [43] Ana Lazaro, Eva Gunther, Harald Mehling, Stefan Hiebler, Jose M Marin and Belen Zalba: Verification of a T-history installation to measure enthalpy versus temperature curves of phase change materials
- [44] http://en.wikipedia.org/wiki/Differential_thermal_analysis
- [45] http://en.wikipedia.org/wiki/Differential_scanning_calorimetry
- [46] <http://www.npl.co.uk/science-technology/advanced-materials/measurement-techniques/thermal-analysis/differential-scanning-calorimetry>
- [47] <http://materials.npl.co.uk/matsol/thermal.html>
- [48] Zhang Yinping, Jiang Yi: A simple method, the T –history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials
- [49] Jose M Marin, Belen Zalba, Luisa F Cabeza and Harald Mehling: Determination of enthalpy–temperature curves of phase change materials with the temperature-history method: improvement to temperature dependent properties
- [50] Jong Hyeon Peck, Jae-Jun Kim, Chaedong Kang, Hiki Hong: A study of accurate latent heat measurement for a PCM with a low melting temperature using T-history method

- [51] Victor delValle, Dale Bessette, Lisa Sopkow, John Zhou and Kaz Szymocha: Long-term Performance of the Phase Change Material Applied for Heat Storage
- [52] L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, A.I. Fernández: Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review
- [53] Harald Mehling and Luisa F. Cabeza: 17. Phase Change Materials and their basic properties από το βιβλίο «Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption Fundamentals, Case Studies and Design»
- [54] Pablo Arce Maldonado: Application of passive thermal energy storage in buildings using PCM and awnings
- [55] <http://www.microteklabs.com/>
- [56] http://www.gate2tech.com/article.php3?id_article=12
- [57] V.V. Tyagi, S.C. Kaushik, S.K. Tyagi, T. Akiyama: Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review
- [58] Y.P. Zhang, K.P. Lin, R. Yang, H.F. Di, Y. Jiang: Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings
- [59] Jose M. Marin, Belen Zalba, Luisa F. Cabeza, Harald Mehling: Improvement of a thermal energy storage using plates with paraffin–graphite composite
- [60] Murat Kenisarin, Khamid Mahkamov: Solar energy storage using phase change materials

Κεφάλαιο 3^ο: Γενικές εφαρμογές των PCMs

3.1 Εισαγωγή

Η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας (TES) αποτελεί σήμερα μία από τις πιο μελετημένες μεθόδους εξοικονόμησης ενέργειας και έχει αρχίσει να εφαρμόζεται σε διάφορους τομείς ιδιαίτερα κατά την τελευταία δεκαετία [1]. Σε γενικές γραμμές, TES αναφέρεται σε μια σειρά από τεχνολογίες, που αποθηκεύουν ενέργεια σε θερμική δεξαμενή για μελλοντική χρήση. Η θερμική δεξαμενή μπορεί να διατηρείται σε μια θερμότερη ή ψυχρότερη θερμοκρασία από αυτήν του περιβάλλοντος. Υπάρχουν διάφοροι τύποι συστημάτων TES ανάλογα με τη θερμοκρασία, το επίπεδο ισχύος και τα εμπλεκόμενα υγρά μεταφοράς θερμότητας καθώς κάθε εφαρμογή έχει τις δικές της ειδικές παραμέτρους λειτουργίας. Οι κύριοι και τελικοί στόχοι ενός συστήματος TES είναι όμως πάντα η μείωση του κόστους και η αποτελεσματικότητα καθώς και η βελτίωση της αξιοπιστίας, για την οποία τα εμπλεκόμενα υλικά, ο σχεδιασμός, και η ενσωμάτωση στο σύστημα πρέπει να εξεταστούν.

Η σύγκριση [1,2] τώρα μεταξύ λανθάνουσας και αισθητής αποθήκευσης θερμότητας, που αποτελούν τα δύο πιο σημαντικά από τα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας δείχνει ότι χρησιμοποιώντας λανθάνουσα αποθήκευση θερμότητας, η οποία εκμεταλλεύεται την υψηλή ενθαλπία αλλαγής φάσης, επιτυγχάνεται πολύ υψηλότερη πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας με μικρότερη διακύμανση κατά την ανάκτησή της με μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά από την πηγή θερμότητας μέχρι και ισοθερμοκρασιακά. Παρά την εμφάνιση κάποιων πρακτικών δυσκολιών, που οφείλονται στη χαμηλή τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας, στη μεταβολή της πυκνότητας, στην αξιοπιστία – σταθερότητα των ιδιοτήτων σε μακρόχρονη χρήση καθώς και στο διαχωρισμό των φάσεων και εμφάνιση του φαινομένου supercooling τα υλικά αλλαγής φάσης για αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας εξαιτίας της ελευθερίας, που δίνει το θερμοκρασιακό εύρος που παράγονται έχουν εφαρμοστεί σε πλήθος περιπτώσεων έμμεσης ή άμεσης αποθήκευσης, μερικές από τις οποίες θα αναλύσουμε στη συνέχεια.

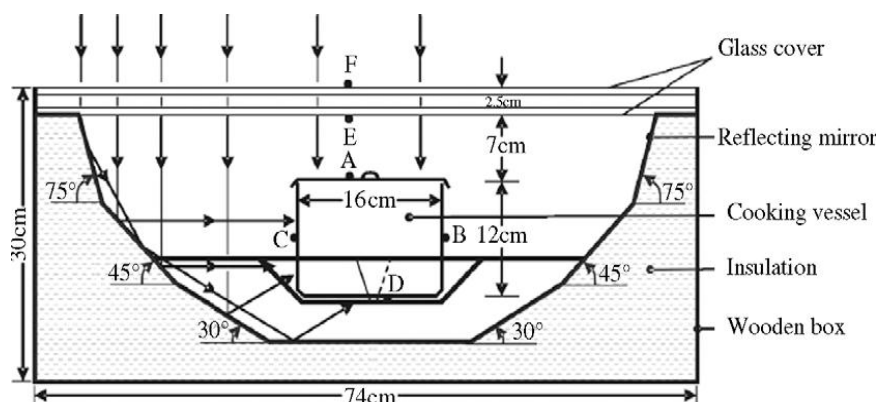
3.2 Ηλιακά μαγειρικά σκεύη [3]

Η κατανάλωση ενέργειας στο μαγείρεμα στις αναπτυσσόμενες χώρες είναι ένα σημαντικό στοιχείο της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων εμπορικών και μη εμπορικών ενεργειακών πηγών. Η μεγαλύτερη από την ενεργειακή απαίτηση για μαγείρεμα ικανοποιείται από μη εμπορικά καύσιμα, όπως καυσόξυλα, γεωργικά απορρίμματα και περιπτώματα αγελάδας σε αγροτικές περιοχές και κηροζίνη

και υγρό πετρέλαιο (LPG) σε αστικές περιοχές. Οι διάφοροι τύποι των ηλιακών σκευών που αναπτύχθηκαν για μαγείρεμα είναι (i) τύπου συγκέντρωσης (ii) τύπου κουτιού και (iii) έμμεσου τύπου. Ηλιακά σκεύη τύπου κουτιού είναι πιο δημοφιλή λόγω της απλότητας του χειρισμού και της λειτουργίας τους. Η χρήση παραβολικού ηλιακού σκεύους (PSC) ενώ έχει μια μοναδική ιδιότητα παραγωγής υψηλότερης θερμοκρασίας μέχρι 250°C και ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, δημιουργεί μια ενόχληση στο χρήστη λόγω της υπερβολικής αντηλιάς. Ηλιακά μαγειρικά σκεύη χρησιμοποιούνται για το μαγείρεμα ρυζιού, λαχανικών, κρέατος, κέικ, κ.λ.π. Όμως, η χρήση αυτών των ηλιακών σκευών είναι περιορισμένη, διότι δεν έχουν καμία αποθήκευση, δηλαδή αυτά τα σκεύη δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μερικώς συννεφιασμένες ημέρες ή / και ημέρες ή αργά τις βραδινές ώρες. Εάν η αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας μπορεί να παρασχεθεί σε ένα ηλιακό σκεύος, τότε υπάρχει μια πιθανότητα το μαγείρεμα των τροφίμων κατά τη διάρκεια μερικής συννεφιάς και / ή σε βραδινές ώρες και ως εκ τούτου, η αποθήκευση θα αυξήσει τη χρησιμότητα και την αξιοπιστία των ηλιακών σκευών.

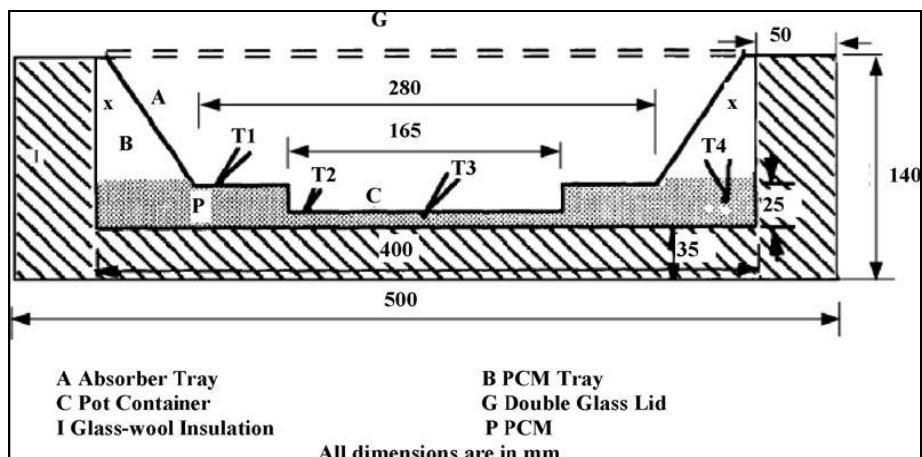
Domanski διερεύνησε τη δυνατότητα του μαγειρέματος κατά τη διάρκεια ωρών μη ηλιοφάνειας, χρησιμοποιώντας PCM. Σχεδίασαν το δοχείο μαγειρέματος με αποθήκευση για χωρίς ηλιοφάνεια ώρες (σχήμα 3.1). Δύο ομόκεντρα κυλινδρικά δοχεία, κατασκευασμένα από αλουμίνιο, συνδέονται μεταξύ τους στο πάνω μέρος τους, χρησιμοποιώντας τέσσερις βίδες για να σχηματίσουν ένα διπλού τοιχώματος δοχείο με ένα κενό μεταξύ των εξωτερικών και εσωτερικών τοιχωμάτων. Αυτό το κενό καλύπτεται από ένα αφαιρούμενο κάλυμμα αλουμινίου στο οποίο τρεις κυκλικές τρύπες ανοίγονται με τρυπάνι για να επιτραπεί η εισαγωγή των θερμοζευγών και επομένως η άμεση οπτικοποίηση κατά την πλήρωση ή την αφαίρεση των PCMs. Ένα κυκλικό κάλυμμα αλουμινίου χρησιμοποιείται ως πώμα για το εσωτερικό δοχείο. Οι εξωτερικές επιφάνειες του εξωτερικού δοχείου και τα καλύμματα είναι βαμμένα με συνηθισμένο μαύρο χρώμα για μέγιστη απορρόφηση της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας. Το κενό μεταξύ των εξωτερικών και εσωτερικών δοχείων είναι γεμάτο με 1,1 kg στεατικού οξέος, 95% καθαρό, ή 2 κιλά εξαένυδρου νιτρικού μαγνησίου, 99% καθαρό, που αφήνει επαρκή χώρο για την επέκταση των PCMs κατά τη τήξη. Ανέφεραν ότι η απόδοση εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία, τη μάζα του μέσου, που είναι για μαγείρεμα και τις θερμοφυσικές ιδιότητες του PCM. Η συνολική απόδοση του σκεύους κατά τη διάρκεια αποφόρτισης διαπιστώθηκε ότι ήταν τρεις έως τέσσερις φορές μεγαλύτερη από αυτή ηλιακών σκευών ατμού και σωληνώσεων θέρμανσης, που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για εσωτερικό μαγείρεμα. Σε ένα τέτοιο τύπο σχεδιασμού, το ποσοστό της μεταφοράς θερμότητας από το PCM στο μαγειρικό

σκεύος είναι αργή, και περισσότερος χρόνος απαιτείται για το μαγείρεμα του βραδινού γεύματος.



Σχήμα 3.1: Σχηματική απεικόνιση ηλιακού σκεύους από Domanski [3].

Buddhi και Sahoo σχεδίασαν ένα ηλιακό σκεύος τύπου κουτιού ή κιβωτίου με αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας για τις σύνθετες κλιματολογικές συνθήκες της Ινδίας. Τα πειραματικά αποτελέσματα καταδεικνύουν τη δυνατότητα της χρήσης ενός υλικού αλλαγής φάσης ως μέσο αποθήκευσης σε ηλιακά μαγειρικά σκεύη καθώς μπορεί να παρέχει μια σχεδόν σταθερή θερμοκρασία πλάκας αργά το βράδυ. Τα πειραματικά αποτελέσματα επίσης συγκρίθηκαν με αυτά ενός συμβατικού ηλιακού σκεύους. Εμπορικής ποιότητας στεατικό οξύ (σημείο τήξης $55,1^{\circ}\text{C}$ και λανθάνουσα θερμότητα τήξης 160 kJ/kg) χρησιμοποιήθηκε ως PCM. Το σχήμα 3.2 δείχνει το σκίτσο από ένα ηλιακό σκεύος τύπου κουτιού για ένα δοχείο, που έχει PCM για αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας. Το σκεύος αποτελείται από ένα αλουμίνιο δίσκο απορρόφησης «Α». Στο κέντρο της πλάκας απορρόφησης, ένα κυλινδρικό δοχείο έχει συγκολληθεί (φαίνεται στο σχήμα 3.2 με «C»), και το σκεύος πρέπει να κρατείται σφιχτά σε αυτό. Αυτό το δοχείο θα παράσχει μια καλύτερη μεταφορά θερμότητας από την πλάκα απορρόφησης και το PCM. Επιπλέον, πτερύγια αλουμινίου παρέχονται στην εσωτερική πλευρά του δίσκου και του κυλινδρικού εμπορευματοκιβωτίου. Δίσκος «B» γέμισε με $3,5\text{ kg}$ από εμπορικής ποιότητας στεατικό οξύ και έγινε σίγουρο ότι το PCM ήταν σε καλή επαφή με το κάτω μέρος του δίσκου «Α». Αυτοί οι δύο δίσκοι ήταν συσκευασμένοι σε κουτί από αλουμίνιο. Ο χώρος μεταξύ δίσκου «B» και του περιβλήματος γέμισε με υαλοβάμβακα για την παροχή θερμικής μόνωσης στο κάτω μέρος και στις πλευρές του ηλιακού σκεύους. Ο δίσκος απορρόφησης εφοδιάστηκε με διπλού γυαλιού κάλυμμα με μεντεσέδες στη μία πλευρά του περιβλήματος στο επάνω μέρος. Το μαγειρικό σκεύος αλουμινίου με κάλυμμα κρατήθηκε στο δοχείο κατσαρόλας «C». Ο δίσκος «Α» από αλουμίνιο, το μαγειρικό σκεύος και το κάλυμμά του ήταν βαμμένα με ένα θαμπό μαύρο χρώμα εξωτερικά.

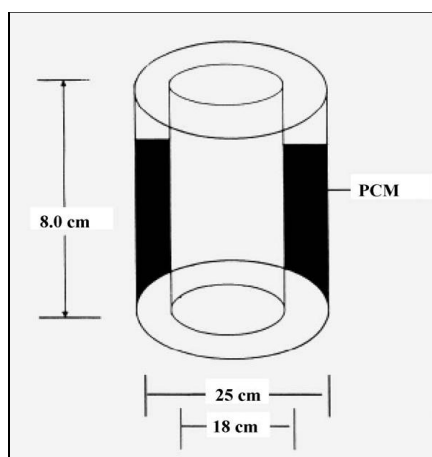


Σχήμα 3.2: Σχηματικό διάγραμμα του κουτιού ενός ηλιακού σκεύους με αποθήκευση [3].

Πειράματα με ηλιακά σκεύη υποδεικνύουν ότι τα τρόφιμα μαγειρεύονται σε θερμοκρασίες μεταξύ 95 και 97°C. Κανένα κατάλληλο και υποσχόμενο PCM, με θερμοκρασία τήξης μεταξύ 95 και 105°C δεν είναι όμως διαθέσιμο στη βιβλιογραφία. Ως εκ τούτου, Sharma χρησιμοποίησε εμπορικά διαθέσιμο ακεταμίδιο (με το σημείο τήξης να είναι 82°C και η λανθάνουσα θερμότητα τήξης 263 kJ/kg) ως υλικό αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, που έχει την πλησιέστερη θερμοκρασία τήξης από τα αναφερόμενα υλικά στη βιβλιογραφία. Επίσης σχεδίασαν, κατασκεύασαν και δοκίμασαν μια κυλινδρική μονάδα αποθήκευσης με PCM για ένα ηλιακό σκεύος τύπου κιβωτίου ώστε να μαγειρέψουν το φαγητό αργά το βράδυ. Αυτή η μονάδα περιβάλλει το δοχείο μαγειρέματος, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του PCM και του φαγητού είναι υψηλότερος, και το μαγείρεμα μπορεί να είναι συντομότερο. Για το σκοπό αυτό, έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί ένα δοχείο PCM για να κρατά το σκεύος μαγειρέματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.

Έχει δύο κοίλους ομόκεντρους κυλίνδρους αλουμινίου με διάμετρο 18 και 25cm, και είναι 8cm βαθύ με πάχος 2 mm. Ο χώρος μεταξύ των κυλίνδρων καλύφθηκε με ακεταμίδιο ως PCM. Οι διαστάσεις του δοχείου που χρησιμοποιείται για μαγείρεμα ήταν 17,5 και 10cm διάμετρος και ύψος, αντίστοιχα, και μπορεί να τοποθετηθεί μέσα στο δοχείο PCM για σκοπούς μαγειρέματος. Για να ενισχυθεί το ποσοστό της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του PCM και του εσωτερικού τοιχώματος του δοχείου PCM, οκτώ πτερύγια ήταν συγκολλημένα στο εσωτερικό τοίχωμα του δοχείου PCM. Ανέφεραν ότι με τη χρήση 2,0kg από ακεταμίδιο ως υλικό αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, η δεύτερη παρτίδα των τροφίμων θα μπορούσε να μαγειρευτεί, εάν φορτωνόταν πριν από τη 15.30μ.μ. κατά τη χειμερινή περίοδο. Μαγειρική τριών παρτίδων την ημέρα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και δύο παρτίδων την ημέρα κατά τη διάρκεια χειμώνα έγιναν με επιτυχία με τη σχεδιασμένη μονάδα αποθήκευσης.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα, οι συγγραφείς καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι (i) η αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας δεν επηρεάζει την απόδοση του ηλιακού σκεύους για μαγείρεμα το μεσημέρι και (ii) εάν ένα PCM με θερμοκρασία τήξης μεταξύ 105 και 110°C χρησιμοποιείται, τότε το μαγείρεμα με το παρόν σχέδιο θα είναι δυνατό ακόμη και κατά τη διάρκεια της νύχτας.



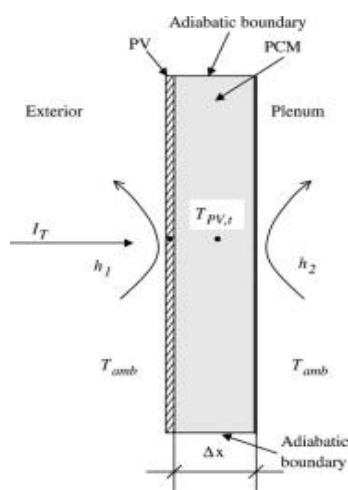
Σχήμα 3.3: Σχηματικό διάγραμμα μονάδας αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας [3].

Πρόσφατα, Chen διερεύνησε θεωρητικά τα PCMs, που χρησιμοποιούνται ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας για ηλιακά σκεύη τύπου κουτιού. Τα επιλεγμένα PCMs ήταν το εξαένυδρο νιτρικό μαγνήσιο, στεατικό οξύ, ακεταμίδιο, ακετανιλίδιο και ερυθριπόλη. Για ένα δισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης με βάση την προσέγγιση ενθαλπίας, υπολογισμοί έχουν γίνει για το κλάσμα τήξης με αγωγιμότητα μόνο. Διαφορετικό υλικό, όπως γυαλί, ανοξείδωτος χάλυβας, κασσίτερος, μίγμα αλουμινίου, αλουμίνιο και χαλκός χρησιμοποιούνται ως υλικά του δοχείου ανταλλαγής θερμότητας στους αριθμητικούς υπολογισμούς. Διαπιστώθηκε από την προσομοίωση αυτή ότι η αρχική θερμοκρασία του PCM δεν έχει πολύ σημαντικές επιπτώσεις στο χρόνο τήξης, ενώ η θερμοκρασία του ορίου του τοίχου παίζει σημαντικό ρόλο κατά τη διάρκεια της τήξης και έχει ισχυρή επίδραση στο κλάσμα τήξης. Τα αποτελέσματα δείχνουν επίσης ότι η επίδραση του πάχους του υλικού του δοχείου στο κλάσμα τήξης είναι ασήμαντη. Ένα σημαντικό συμπέρασμα, που προκύπτει ακόμα είναι ότι ακεταμίδιο και στεατικό οξύ, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ως μέσα αποθήκευσης σε ένα ηλιακό σκεύος τύπου κουτιού για μαγείρεμα ή / και διατήρηση των τροφίμων ζεστά αργά το βράδυ με διαφορετικά υλικά του δοχείου ανταλλαγής θερμότητας. Η μεγάλη τιμή της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού του δοχείου δεν συμβάλλει σημαντικά στο κλάσμα τήξης εκτός της περίπτωσης που είναι πολύ χαμηλές οι θερμικές αγωγιμότητες.

3.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα [4-6]

Έχει αποδειχθεί ότι οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας φωτοβολταϊκών συστημάτων πυριτίου μειώνουν την απόδοση μετατροπής της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια κατά 0,4-0,5% K^{-1} . Ειδικότερα μόνο περίπου το 16% της ηλιακής ενέργειας, που προσπίπτει σε μια φωτοβολταϊκή συσκευή (PV) μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, η υπόλοιπη απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε θερμότητα. Ανεξάρτητη δοκιμή της "BP Saturn" φωτοβολταϊκών κυττάρων έδειξε μείωση της απόδοσης της μετατροπής από 15,8%, που ήταν στους 25°C στο 12% στους 80°C, παράγοντας ένα συντελεστή θερμοκρασίας σχετικά με την απόδοση της μετατροπής προς τη θερμοκρασία της μονάδας 0,44% K^{-1} .

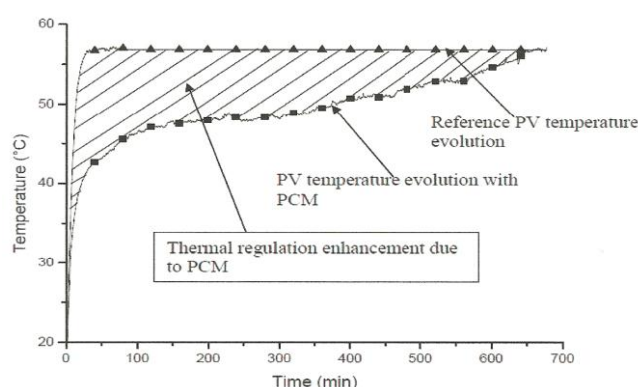
Μια προσέγγιση για τον έλεγχο της θερμοκρασίας BIPV είναι η χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCM), που μπορούν να απορροφήσουν / απελευθερώσουν ένα μεγάλο ποσό ενέργειας για ένα περιορισμένο εύρος θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης. Ανάλογα με τις συνθήκες περιβάλλοντος, ένα σύστημα PV / PCM μπορεί να καταστήσει δυνατό το PV να λειτουργεί κοντά στη χαρακτηριστική θερμοκρασία του και συνεπώς να διατηρήσει τη μέγιστη απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η μεταφορά θερμότητας εξωτερικά ενός συστήματος PV / PCM.



Σχήμα 3.4: Σχηματικό διάγραμμα της μεταφοράς θερμότητας στο σύστημα PV / PCM [4].

Στο πρώτο στάδιο, η θερμοκρασία του PV είναι κάτω από τη θερμοκρασία τήξης του PCM, το οποίο σημαίνει ότι απορροφά τη θερμότητα ως αισθητή αποθήκευση θερμότητας. Αν η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού συστήματος φτάσει τη θερμοκρασία τήξεως του PCM, αυτό αρχίζει να λειτουργεί ως αποθήκη λανθάνουσας θερμότητας και απορροφά ένα μεγάλο ποσό θερμότητας κατά τη διαδικασία τήξης. Αυτό απαιτεί ένα ορισμένο ποσό χρόνου και θερμοκρασίας μέχρι το συνολικό PCM

να λιώσει και να μην μπορεί να λειτουργήσει πια ως αποθήκη θερμότητας. Σε εκείνο το σημείο η θερμοκρασία του συστήματος θα αυξηθεί πάνω από τη θερμοκρασία τήξεως και θα φτάσει στην ίδια θερμοκρασία με το σύστημα αναφοράς. Η ποσότητα της θερμότητας που αποθηκεύεται εξαρτάται από την ειδική θερμότητα, την μεταβολή της θερμοκρασίας και την ποσότητα του υλικού PCM. Μια καλή απεικόνιση της ιδέας αυτής φαίνεται στο σχήμα 3.5, όπου η εξέλιξη της θερμοκρασίας του συστήματος PV / PCM αυξάνει σταδιακά στη θερμοκρασία αναφοράς του PV λόγω της απορρόφησης θερμότητας από την πλάκα PCM. Το εμβαδόν μεταξύ των δύο θερμοκρασιών αντιπροσωπεύει την ενίσχυση της θερμικής ρύθμισης, τη μείωση της θερμοκρασίας, που επιτεύχθηκε με την εφαρμογή του PCM.



Σχήμα 3.5: Εξέλιξη της θερμοκρασίας για PV αναφοράς και σύστημα PV / PCM [6].

Μια έρευνα ενός συστήματος, το οποίο χρησιμοποιεί PCMs για απορρόφηση της ενέργειας ως λανθάνουσα θερμότητα σε σταθερή θερμοκρασία μετάβασης φάσης και για τη ρύθμιση της αύξησης της θερμοκρασίας στο PV (PV / PCM) έχει πραγματοποιηθεί πρόσφατα. Οι μελέτες αυτές χρησιμοποίησαν κερί παραφίνης για βάση ως PCM με διάφορες μορφές αλλαγής φάσης (στερεό-υγρό και στερεό-στερεό) προκειμένου να καθοριστούν οι βέλτιστες ιδιότητες για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας PV. Χρησιμοποιώντας το σύστημα PV / PCM με μόνο PCM RT25, η θερμοκρασία στο PV θα μπορούσε να φθάσει τους 38°C κατά το στάδιο της μετάβασης φάσης, που ήταν 18°C μικρότερη από το απλό πάνελ αναφοράς PV (56°C), στις ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος. Διαπιστώθηκε ότι η θερμική αγωγιμότητα του PCM και η αύξηση του όγκου κατά την τήξη είναι τα κύρια εμπόδια για αυτήν την εφαρμογή.

Για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας μια σειρά από ρυθμίσεις με διαφορετικούς τύπους πτερυγίων να τοποθετούνται μέσα στο σύστημα PV / PCM πραγματοποιήθηκε επίσης πειραματικά. Αν και τα μεταλλικά πτερύγια, που τοποθετούνται μέσα στο PCM μπορούν να βελτιώσουν τη μεταφορά θερμότητας στο εσωτερικό του συστήματος PV / PCM, η περίοδος θερμικής ρύθμισης μειώνεται

καθώς ο όγκος του PCM υποκαθίστανται από τη μάζα του μετάλλου του συστήματος PV / PCM. Διαπιστώθηκε επίσης ότι κατά τη διάρκεια της κρυστάλλωσης η κοιλότητα αέρα, που σχηματίζεται στο εσωτερικό του PCM θα αυξήσει τη θερμική αντίσταση όταν χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τα μεταλλικά πτερύγια στο PCM αυξάνουν τη μεταφορά θερμότητας στο εσωτερικό του PCM με την αύξηση της επιφάνειας επί της οποίας μεταφορά θερμότητας προς το PCM συμβαίνει και επίσης λειτουργούν ως δρόμος απελευθέρωσης της πίεσης για το λιωμένο PCM. Έτσι σχεδιάστηκε σύστημα PV / PCM με μικρά μεταλλικά κελιά για να κρατά δύο τύπους PCMs για την ενίσχυση της μεταφοράς της θερμότητας. Χρησιμοποιώντας διαφορετικούς συνδυασμούς των PCMs: RT21, RT31, RT27, RT60 που έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης και δύο σχήματα πτερυγίων (πτερύγια τριγώνου και ημικυκλίου) προκύπτει ένα σύστημα που μπορεί να διατηρήσει το PV σε θερμοκρασία λειτουργίας πιο κοντά στην χαρακτηριστική τιμή των 25°C και ως εκ τούτου να οδηγήσει σε βελτίωση στον τομέα της απόδοσης μετατροπής της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια κάτω από μεταβλητή ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία. Μάλιστα όσο πιο χαμηλή είναι η θερμοκρασία τήξης του προκύπτοντος PCM τόσο καλύτερη θερμική ρύθμιση έχει. Το τριγωνικό σχήμα των κελιών είναι καλό για την καθοδήγηση των φουσαλίδων που παράγονται κατά τη διαδικασία τήξης και συνεπώς διαλύει την πίεση που οφείλεται στην αύξηση του όγκου, που θέτει υπό αμφισβήτηση πολλές εφαρμογές PCM. Σε σύγκριση με τα προηγούμενα συστήματα PV / PCM με ευθεία πτερύγια, το σύστημα με τα τριγωνικά μεταλλικά κελιά για τη κράτηση των PCMs μπορεί να διευκολύνει την αύξηση του όγκου και την επέκταση της περιόδου θερμικής ρύθμισης.

Περαιτέρω μελέτες, που χρησιμοποίησαν διαφορετικούς τύπους PCMs για την εφαρμογή PV / PCM μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται και ένα εύτηκτο μείγμα καπρικού-λαυρικού οξέος (CL), ένα εμπορικό μείγμα ένυδρου άλατος και παραφίνης (SP22) ως υλικό αλλαγής φάσης, ένα εύτηκτο μείγμα καπρικού παλμιτικού οξέος (CP) και ενός εξαένυδρου χλωριούχου ασβεστίου (CaCl_2), πραγματοποιήθηκαν. Αποδείχτηκε ότι το εύτηκτο μείγμα καπρικού παλμιτικού οξέος και $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ με μεγαλύτερες θερμικές αγωγιμότητες από κερι παραφίνης έχει μια καλύτερη απόδοση θερμικής ρύθμισης σε BIPV για εσωτερικές συνθήκες και τα εξωτερικά κλίματα της Ιρλανδίας και Πακιστάν. Έτσι λοιπόν προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα PCMs που αξιολογούνται σε διαφορετικούς συνδυασμούς δείχνουν ότι η απόδοση θερμικής ρύθμισης του PV / PCM εξαρτάται από (α) τη θερμική μάζα των PCMs, (β) τις θέσεις των PCMs μέσα στο σύστημα PV / PCM, και (γ) τα θερμικά χαρακτηριστικά τόσο του PCM όσο και της δομής του συστήματος PV / PCM.

3.4 Ηλεκτρονικά Εξαρτήματα

3.4.1 Συσκευές: φορητοί υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα και PDAs [7 – 13]

Φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, όπως φορητοί υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα, προσωπικοί ψηφιακοί βοηθοί (PDAs), μίνι φορητοί υπολογιστές, και άλλα, χρησιμοποιούνται από όλο και περισσότερους και, επίσης, δεδομένου ότι οι χρήστες θα φορούν ή μεταφέρουν τις συσκευές κατά τη διάρκεια του χρόνου εκτέλεσης καθηκόντων, απαιτούνται αυτές οι συσκευές να είναι ελαφριές σε βάρος και συμπαγείς μ' αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας ισχύος των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων τους. Επιφάνειες επέκτασης μπορούν να τοποθετηθούν στην εξωτερική επιφάνεια της συσκευής, αλλά αυτές είναι ανεπιθύμητες, διότι το σχετικά υψηλό βάρος τους αυξάνει το μέγεθος της συσκευής. Ανεμιστήρες ψύξης, επίσης, δεν προτιμούνται ως μέθοδος ψύξης, λόγω του θορύβου που παράγουν και της επιπλέον ενέργειας, που καταναλώνουν από την μπαταρία της συσκευής. Εάν το φορτίο εργασίας τώρα είναι πολύ βαρύ και η φυσική συναγωγή στην εξωτερική θήκη είναι το μόνο μέσο απαγωγής θερμότητας, δεν μπορεί να εξισορροπηθεί η εσωτερική θερμότητα που παράγεται. Έτσι, η θερμότητα θα συσσωρευτεί στη συσκευή και μια αποτυχία λόγω υπερθέρμανσης είναι πιθανό να συμβεί. Ενεργητική θερμική διαχείριση μπορεί να αποτρέψει τη συσκευή από την υπερθέρμανση, αλλά κυκλικές εκρήξεις παραγωγής ενέργειας αυξάνουν την πιθανότητα αποτυχίας λόγω θερμικής καταπόνησης.

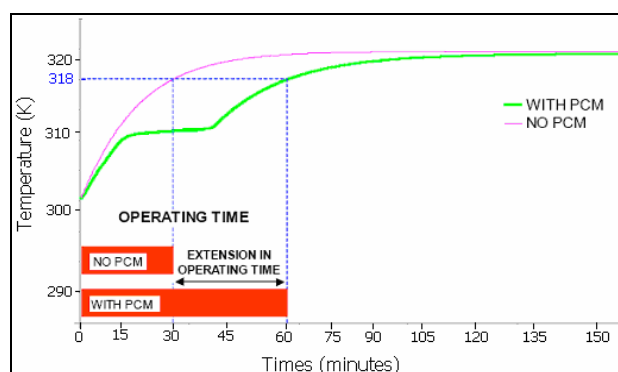
Η αξιοπιστία ενός ηλεκτρονικού εξαρτήματος ορίζεται ως η ικανότητα να εκτελεί κάποια συγκεκριμένη λειτουργία στο πλαίσιο ορισμένων συνθηκών για ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα. Μια ηλεκτρονική συσκευή αποτυγχάνει να ολοκληρώσει την επιδιωκόμενη λειτουργία της όταν η εφαρμογή της ή οι περιβαλλοντικές συνθήκες υπερβαίνουν το όριο εφαρμογής της. Μια έρευνα από την Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ δείχνει ότι το ποσοστό των αποτυχιών που σχετίζονται με τη θερμοκρασία στα ηλεκτρονικά υπερέβαινε το 55%. Αυτό το υψηλό ποσοστό είναι απόδειξη ότι οι τρέχουσες μέθοδοι ψύξης είναι ανεπαρκείς για την εκπλήρωση της απαίτησης ψύξης της συσκευής. Οι πρόοδοι στην ηλεκτρονική συσκευασία και οι αυξήσεις στην πολυπλοκότητα και λειτουργικότητα των τσιπ οδηγεί σε αυτό το υψηλό ποσοστό. Mithal μελέτησε την επίδραση της θερμοκρασίας στην αξιοπιστία των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι μείωση κατά 1°C στη θερμοκρασία ενός στοιχείου μπορεί να μειώσει το ποσοστό αποτυχίας μέχρι και 4%. Επιπλέον, η έρευνα δείχνει ότι μια αύξηση στη θερμοκρασία στοιχείου από 10°C έως 20°C μπορεί να αυξήσει το ποσοστό αποτυχίας του κατά 100%.

Ένα εναλλακτικό παθητικό μέσο ψύξης, που είναι ελαφρύ και απλό είναι η χρήση στερεού-υγρού οργανικού υλικού αλλαγής φάσης (PCM), το οποίο έχει υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης. Η απαγόμενη θερμότητα από τα ηλεκτρονικά στοιχεία μπορεί αποτελεσματικά να αποθηκευθεί σε μια αποθήκη θερμότητας PCM, καθώς το PCM αλλάζει φάση από στερεό σε υγρό. Η αποθήκη θερμότητας με PCM μπορεί να παραχθεί με μια απλή διαμόρφωση, όπως ενσωμάτωση στερεού PCM σε κάψουλες σε ένα λεπτό μέταλλο. Λιωμένο PCM μπορεί ξανά να στερεοποιηθεί με διάχυση της θερμότητας προς το περιβάλλον, όταν η ηλεκτρονική συσκευή είναι αδρανής. Δεδομένου ότι η αλλαγή φάσης εμφανίζεται στη σταθερή θερμοκρασία τήξης του PCM, η θερμοκρασία των ηλεκτρονικών συσκευών μπορεί να διατηρηθεί μέχρι το PCM να λιώσει πλήρως. Η τήξη των PCMs μπορεί να ταξινομηθεί σε τρεις φάσεις. Στη φάση 1, η αρχική θερμοκρασία του στερεού PCM αυξάνει από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στη θερμοκρασία τήξης του. Στη φάση 2, η αλλαγή φάσης προκύπτει καθώς το στερεό PCM λιώνει κάτω από μια σταθερή θερμοκρασία τήξης, λανθάνουσα θερμότητα αποθηκεύεται. Στη φάση 3, η θερμοκρασία του υγρού PCM αυξάνεται καθώς θερμότητα συνεχώς παρέχεται στο PCM και η οποία αποθηκεύεται στο υγρό PCM ως αισθητή θερμική ενέργεια. Για την επίτευξη αποτελεσματικής ψύξης, είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί ότι η λειτουργία της κινητής συσκευής δεν υπερβαίνει την διάρκεια της φάσης 2, καθώς αυτή μειώνει την αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της συσκευής πριν φτάσει στην επιτρεπόμενη θερμοκρασία.

Μια μονάδα θερμικού ελέγχου (TCU) εκτός από ένα υλικό αλλαγής φάσης αποτελείται και από έναν ενισχυτή θερμικής αγωγιμότητας (TCE) προκειμένου να ανταποκριθεί στις ανάγκες ψύξης για φορητές ηλεκτρονικές συσκευές. Καθώς όλα τα υλικά αλλαγής φάσης με υψηλή ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας έχουν απαραίτητα χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, γεγονός που καθιστά αργή τη φόρτιση και αποφόρτιση θερμότητας κατά την τήξη του PCM. Μια αύξηση της μεταφοράς της θερμότητας κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης των PCMs με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα αποδεικνύεται με την εισαγωγή μιας εξαιρετικά αγωγίμης μεταλλικής μήτρας στο PCM, που είναι διάσπαρτη σε όλο το PCM έτσι ώστε το μείγμα θερμικά να συμπεριφέρεται σαν ένα ομοιογενές υλικό τόσο με υψηλή θερμική αγωγιμότητα όσο και με υψηλή θερμοχωρητικότητα. Στην πράξη, μια εφαρμογή επιβάλλει περιορισμούς στο μέγεθος της TCU, και ο TCE μειώνει τον όγκο που διατίθενται για το PCM. Ως εκ τούτου, κατά την εξέταση της ικανότητας θερμικής αποθήκευσης, η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας του PCM εκτοπίζεται από ένα προϊόν αισθητής θερμοχωρητικότητας για την TCU, η οποία είναι πολύ χαμηλότερη από την λανθάνουσα θερμοχωρητικότητα των PCMs. Αλουμίνιο, τιτάνιο και

ανοξειδωτος χάλυβας είναι τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται για τον TCE. Η θερμική αγωγιμότητα των μετάλλων αυτών είναι υψηλή. Είναι ανθεκτικά στη διάβρωση και υψηλού λόγου αντοχής προς βάρος.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα ηλεκτρονικής συσκευής είναι τα κινητά τηλέφωνα για τα οποία η επικρατούσα τάση είναι αύξηση της λειτουργικότητας δηλαδή όχι μόνο να παρέχουν κλήσεις και λειτουργίες υπηρεσίας σύντομων μηνυμάτων (SMS), αλλά και να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φωτογραφικές μηχανές, συσκευές αναπαραγωγής μουσικής κ.ο.κ. με παράλληλη μείωση του βάρους και του μεγέθους τους, το οποίο συνεπάγεται μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος και συνεπώς περισσότερη θερμότητα. Η χρήση του PCM ως μονάδα θερμικής αποθήκευσης λειτουργεί ως εξής (σχήμα 3.6): Καθώς το κινητό τηλέφωνο θερμαίνεται, φτάνει τη θερμοκρασία τήξης του PCM, που ενσωματώνεται στο εσωτερικό της μονάδας αποθήκευσης θερμότητας (HSU). Το PCM λιώνει και απορροφά τη θερμότητα από την πηγή θερμότητας, αφήνοντας τη μονάδα σε μια σχετικά σταθερή θερμοκρασία. Όταν όλο το PCM έχει λιώσει, το κινητό τηλέφωνο συνεχίζει να ζεσταίνεται μέχρι να φτάσει σε κατάσταση σταθερής θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, εάν το όριο της θερμοκρασίας λειτουργίας για το περίβλημα έχει οριστεί στους 318K, ο χρόνος λειτουργίας της μονάδας μπορεί να παραταθεί. Η παράταση του χρόνου λειτουργίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, μεταξύ των οποίων είναι τα ποσά του PCM που χρησιμοποιούνται και η θερμοκρασία τήξης του. Φυσικά, όσο περισσότερο PCM χρησιμοποιείται, τόσο περισσότερη ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί, αλλά καθώς το ποσό αυξάνεται, το βάρος και το μέγεθος αυξάνει, επίσης. Η θερμοκρασία τήξης του PCM υπαγορεύει τι ποσοστό της διαχεόμενης θερμότητας πηγαίνει στο PCM έναντι του περιβάλλοντος. Μια υψηλότερη θερμοκρασία τήξης θα αυξήσει το ρυθμό με τον οποίο η θερμότητα διαχέεται στο περιβάλλον και θα μειώσει το ρυθμό με τον οποίο αποθηκεύεται στο PCM. Αυτό θα παρατείνει το χρόνο τήξης του PCM και έτσι το χρόνο λειτουργίας του κινητού τηλεφώνου.



Σχήμα 3.6: Η γενική ιδέα πίσω από την ψύξη με χρήση PCM [9].

Εκτός όμως από τα κινητά τηλέφωνα και η χρήση επίσης των φορητών υπολογιστών, που είναι πολύ διαδεδομένη ειδικά τα τελευταία χρόνια, αντιμετωπίζει σοβαρά προβλήματα υπερθέρμανσης. Για τους επιτραπέζιους αυτό δεν είναι τόσο πρόβλημα αν και, κάτι που να μπορεί να μειώσει την παραγόμενη θερμότητα είναι σχεδόν βέβαιο ότι παρατείνει τη διάρκεια ζωής του υπολογιστή. Έτσι η Thermaltake κατασκεύασε μια φορητή συσκευή εξαιρετικής ψύξης χωρίς ανεμιστήρα με το λανσάρισμα «iXoft Fanless Notebook Cooling pad» που φαίνεται στη συνέχεια.



Σχήμα 3.7: iXoft - επίθεμα ψύξης για φορητό υπολογιστή χωρίς ανεμιστήρα που κατασκευάζεται από τη Thermaltake [14].

Το πιο καινοτόμο θερμικό χαρακτηριστικό σχεδιασμού βρίσκεται στην πατενταρισμένη τεχνολογία μετατόπισης της θερμότητας, η οποία αποτελείται από υλικό αλλαγής φάσης, που στην αρχή παρουσιάζει ψυχρές και στερεές ιδιότητες όταν δεν χρησιμοποιείται, ενώ στη συνέχεια μετατρέπεται σε υγρή μορφή όταν απάγει τη θερμότητα μακριά από την πηγή θερμότητας. Κατά την επαφή με μια πηγή θερμότητας όπως είναι ένας φορητός υπολογιστής, το iXoft απορροφά γρήγορα τη θερμότητα από την πηγή και επιταχύνει απαγωγή θερμότητας με διανομή της θερμότητας σε όλες τις διαθέσιμες επιφάνειες, στην επιφάνεια του iXoft και στο περιβάλλον μέσω φυσικής συναγωγής. Όλα αυτά γίνονται χωρίς κινούμενα μέρη που εγγυάται ότι το iXoft θα λειτουργεί συνεχώς, χωρίς να καταναλώνει καθόλου πολύτιμη μπαταρία από το φορητό υπολογιστή και χωρίς να παράγει θόρυβο. Εξίσου σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό του iXoft έπαιξε και η δυνατότητα μεταφοράς, έτσι ζυγίζει μόλις 650g, καθιστώντας το το ελαφρύτερο ψύκτη φορητού υπολογιστή του κόσμου, που διατίθενται σήμερα. Εκτός όμως από την ιδιότητα του ελαφρύ βάρους, το iXoft μπορεί να διπλωθεί για εύκολη μεταφορά και αποθήκευση.

Αναπόσπαστο στοιχείο όλων των ηλεκτρονικών συσκευών αποτελούν τα τσιπ, τα οποία πρέπει να διατηρούνται κάτω από την αντίστοιχη επιτρεπόμενη μέγιστη θερμοκρασία τους ανά πάσα στιγμή κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας, η οποία όμως επειδή διαφοροποιείται για κάθε τσιπ λαμβάνεται μια παγκόσμια μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία, που κυμαίνεται από 85 έως 120°C για την αποφυγή της

υπερθέρμανσης. Επιπλέον θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η ανεκτή θερμοκρασία από τον άνθρωπο. Henry Dreyfuss Associates (1993) αναφέρει ότι η μέγιστη περιβαλλοντική θερμοκρασία που μπορεί να γίνει ανεκτή για μια περίοδο είναι 49°C και ότι τα μέταλλα και μη μέταλλα προκαλούν διάσπαση των ανθρώπινων ιστών στους 50 και 62°C, αντίστοιχα. Με βάση αυτή την έκθεση, Leoni και Amon υπέθεσαν ότι οι άνθρωποι μπορούν να κρατήσουν άνετα πλαστικά αντικείμενα μέχρι 45°C.

Ένας καθαρός τρόπος ψύξης των τσιπ είναι η χρήση υλικών αλλαγής φάσης ως θερμικά υλικά διεπαφής (TIM). Τα υλικά αλλαγής φάσης παρέχουν ένα συνδυασμό θερμικής απόδοσης ανάλογης του γράσου με ευκολία χειρισμού και εγκατάστασης ανάλογης του επιθέματος. Χρησιμοποιούνται πιο συχνά μεταξύ μικροεπεξεργαστών υψηλών επιδόσεων και καταβόθρων θερμότητας. Αυτά τα υλικά αλλαγής φάσης είναι στερεά σε θερμοκρασία δωματίου, αλλά συμπεριφέρονται σαν θερμικοί πολτοί ή γράσο αφού φτάσουν στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης ή τήξης τους. Τα υλικά αυτά δεν υφίστανται μια πραγματική αλλαγή φάσης και δε μετατρέπονται σε υγρό, αλλά το ιξώδες τους μειώνεται ραγδαία και ρέουν σε όλη την θερμική σύνδεση για να γεμίσουν τα κενά αέρος που αρχικά ήταν παρόντα. Αυτή η διαδικασία απαιτεί κάποια δύναμη συμπίεσης, συνήθως μερικά psi, για να φέρει τις δύο επιφάνειες μαζί και να προκληθεί η ροή του υλικού. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου οι δύο επιφάνειες έρθουν σε επαφή σε τουλάχιστον τρία σημεία, ή η σύνδεση γίνει τόσο λεπτή ώστε το ιξώδες του υλικού να αποτρέψει περαιτέρω ροή. Τα υλικά αυτά δεν παρέχουν ηλεκτρική μόνωση, επειδή μπορεί να επιτρέψουν στις δύο επιφάνειες να έρθουν σε επαφή.



Σχήμα 3.8: Υλικά διεπαφής αλλαγής φάσης υψηλής απόδοσης από Loctite (αριστερή εικόνα) [15], υλικά αλλαγής φάσης που συνδυάζουν θερμική απόδοση όπως το γράσο και ευκολία χειρισμού και εγκατάστασης όπως το επίθεμα (μεσαία εικόνα) [11] και PCM που δένουν σε μικροεπεξεργαστές, κρυφά τσιπ, ηλεκτρονόμους, και ανορθωτές σε επιτραπέζιους και φορητούς υπολογιστές, τηλεπικοινωνίες, δίκτυα και βιομηχανικά εργαλεία (δεξιά εικόνα) [10].

Επομένως ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του PCM είναι το πάχος, που ακολουθεί την αλλαγή φάσης. Για να λειτουργήσει σωστά το PCM θα πρέπει να συμπληρώσει όσο το δυνατόν πλήρως τα κενά που ακόμη παραμένουν. Λεπτότερα

στρώματα μειώνουν τη θερμική αντίσταση και βελτιώνουν τη μεταφορά θερμότητας. Πόσο λεπτό το υλικό γίνεται εξαρτάται από την λειότητα της επιφάνειας σύζευξης, την πίεση σύσφιξης και το ιξώδες του PCM. Οι επιφάνειες επεξεργαστή και ψύκτη μπορεί να αποκλίνουν από το επίπεδο από 0.002 in/in. Έτσι κενά ανάμεσα σε μια επιφάνεια επεξεργαστή και 2.0 sq-in. ψύκτη θα μπορούσαν να ισούνται με 0.004 in, για παράδειγμα. Άλλα βασικά χαρακτηριστικά είναι η θερμική αντίσταση και η αγωγιμότητα. Η θερμική αντίσταση ισούται με τη θερμική αντίσταση του PCM συν τη θερμική αντίσταση της διεπαφής με τις επιφάνειες ανάμεσα στις οποίες βρίσκεται. Όσο χαμηλότερη είναι η τιμή της αντίστασης, τόσο λιγότερη είναι η αντίσταση στη ροή θερμότητας. Σε συνηθισμένες πιέσεις, που εφαρμόζονται, η αντίσταση κυμαίνεται μεταξύ 0,02-0,25 °C · in² / W. Η θερμική αγωγιμότητα τώρα είναι μια συνάρτηση του τύπου και του όγκου του υλικού πληρώσεως και κυμαίνεται από περίπου 0,5 έως 1,9 W/mK. Υψηλότερη αγωγιμότητα αυξάνει τη ροή θερμότητας.

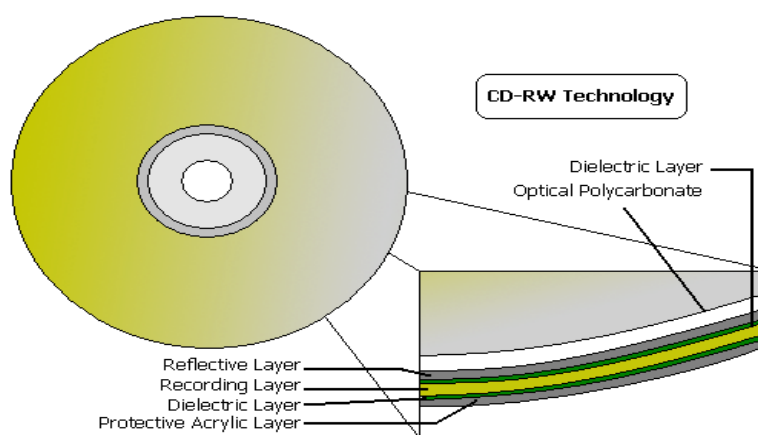
3.4.2 Τεχνολογία μνήμης (CDs και DVDs) [16 – 18]

Ζώντας στην εποχή της πληροφορίας, η αποθήκευση δεδομένων είναι ένα ουσιαστικό μέρος της καθημερινής μας ζωής, τόσο στο χώρο εργασίας όσο και στο σπίτι. Όλοι έχουμε καταλήξει να εξαρτόμαστε από το επανεγγράψιμο CD, τη μνήμη του υπολογιστή και το φορητό στικ μνήμης, USB για αποθήκευση και μεταφορά των πληροφοριών. Και στο μέλλον, η αποθήκευση δεδομένων θα γίνει ακόμα πιο σημαντική στην όλο και πιο εξαρτημένη από την τεχνολογία κοινωνία μας. Τα υλικά αλλαγής φάσης έχουν χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία σε όλα τα σύγχρονα οπτικά επανεγγράψιμα μέσα αποθήκευσης, όπως είναι τα CDs και DVDs, όπως δούμε αναλυτικά και στη συνέχεια.

Τα υλικά αλλαγής φάσης είναι κατάλληλα για χρήση στην αποθήκευση δεδομένων, δεδομένου ότι μπορούν να υπάρχουν σε δύο διακριτές φάσεις. Μια κρυσταλλική φάση και μια άμορφη, υαλώδη φάση. Αν μια μικρή περιοχή ενός υλικού αλλαγής φάσης θερμαίνεται πάνω από το σημείο τήξης του από ένα ηλεκτρικό παλμό ή ένα λέιζερ, λιώνει. Εάν αυτή η περιοχή αφήνεται να κρυώσει από μόνη της, κρυσταλλώνει πολύ γρήγορα και σχηματίζει μια άμορφη υαλώδη φάση, παρόμοια με οψιανό ή ηφαιστειακό γυαλί, που σχηματίζεται όταν λιωμένο πέτρωμα έρχεται σε επαφή με κρύο νερό. Ωστόσο, εάν η περιοχή ψύχεται σταδιακά με την εφαρμογή θερμότητας για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, η περιοχή θα σχηματίσει μια κρυσταλλική δομή. Αυτές οι διαφορετικές φάσεις έχουν διαφορετικές ιδιότητες υλικού, και έτσι κάθε μικρή περιοχή αλλαγής φάσης μιας συσκευής μνήμης μπορεί να διαβαστεί (διερευνητικά με περαιτέρω λέιζερ ή ηλεκτρικούς παλμούς), είτε ως 1 ή 0 ανάλογα με το ποια φάση είναι. Η άμορφη φάση έχει χαμηλότερη ανακλαστικότητα και υψηλότερη ηλεκτρική

αντίσταση από την κρυσταλλική φάση, έτσι ώστε τα δεδομένα να μπορούν να καταγράφονται ως σκοτεινά, ηλεκτρικά ανθεκτικά σημεία σε ένα κρυσταλλικό φόντο.

Τα υλικά που επιλέγονται μπορούν να αλλάζουν γρήγορα μεταξύ καταστάσεων, έτσι ώστε τα δεδομένα να μπορούν να καταγραφούν γρήγορα. Οι δύο κύριες οικογένειες των υλικών αλλαγής φάσης είναι κράματα γερμανίου αντιμονίου τελλουρίου (GeSbTe), και κράματα αργύρου ινδίου αντιμονίου τελλουρίου (AgInSbTe). Τα υλικά αυτά τοποθετούνται στη μέση ενός CD (σχήμα 3.9) ή DVD και περιβάλλονται από διηλεκτρικά στρώματα. Ένα ανακλαστικό στρώμα είναι πάνω από το υλικό αλλαγής φάσης, έτσι ώστε το φως που παράγεται από τη συσκευή ανάγνωσης να μπορεί να ανακλάται πίσω αν περνά μέσα από το κρυσταλλικό υλικό. Στη συνέχεια, λαμβάνεται από έναν ανιχνευτή. Τα άλλα στρώματα είναι εκεί για προστασία.



Σχήμα 3.9: Διάρθρωση των στρωμάτων στην τεχνολογία CD – RW [19].

Η τεχνολογία CD-RW ήταν από τις πρώτες, όπου πραγματοποιήθηκε χρήση των υλικών αλλαγής φάσης στα οπτικά μέσα λόγω της απαίτησης ενός υλικού που θα μπορούσε εύκολα να αλλάξει τη φυσική του κατάσταση και θα κρατούσε αυτή την κατάσταση μέχρι να αλλάξει και πάλι. Έτσι προστέθηκε στο CD ένα εγγραψίμο στρώμα που θα μπορούσε να αλλάξει την επιφάνεια του με ένα αρκετά ισχυρό λέιζερ. Ειδικότερα κάθε συσκευή εγγραφής CD με δυνατότητα ανάγνωσης CD-RW έχει δύο λέιζερ στο εσωτερικό, το λέιζερ ανάγνωσης και το πιο ισχυρό λέιζερ εγγραφής. Το λέιζερ εγγραφής θα είναι σε θέση να στείλει το υλικό σε μια άμορφη κατάσταση, αλλάζοντας τις ιδιότητες, την ικανότητα ανάκλασής του και έτσι μετατρέποντας εκείνο το bit του CD σε μια κατάσταση ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης, βασικό δυαδικό σύστημα. Το λέιζερ ανάγνωσης θα είναι τότε σε θέση να καθορίσει ποια δεδομένα είναι γραμμένα στο CD. Το λέιζερ ανάγνωσης φυσικά δεν είναι αρκετά ισχυρό ώστε να αλλάξει την κατάσταση του στρώματος εγγραφής έτσι ώστε τα δεδομένα να μην

καταστραφούν. Για τη διαγραφή δεδομένων σε ένα CD-RW το λέιζερ εγγραφής έχει οριστεί σε παλμό διαφορετικού επιπέδου αντιστρέφοντας τις αλλαγές που έγιναν στο δίσκο. Αξιοσημείωτο είναι ότι ενώ στην πραγματικότητα τίποτα δεν αγγίζει το δίσκο με τεχνολογία αλλαγής φάσης, εξακολουθεί να υπάρχει ένα όριο στο πόσες φορές αυτό μπορεί να γίνει σε ένα μόνο δίσκο. Είναι γνωστό ότι για τα περισσότερα CD-RW, το όριο είναι περίπου 1000 αλλαγές πριν ο δίσκος αρχίζει να φθείρεται και αρχίζει να αποτυγχάνει στη διατήρηση των δεδομένων.

3.4.3 Τηλεπικοινωνίες [20 – 22]

Οι εξοπλισμοί του παγκόσμιου συστήματος κινητών επικοινωνιών ή τηλεπικοινωνιών, GSM ή UMTS, που τοποθετούνται σε ένα κανονικής βάσης καταφύγιο τηλεπικοινωνιών ή σε ηλεκτρονικό περίβλημα απάγουν μεγάλες ποσότητες θερμότητας. Λόγω της συμπύκνωσης της τεχνολογίας και της προόδου στο τομέα της επικοινωνίας, και ακόμα η εισαγωγή της επόμενης γενιάς κινητών τηλεφώνων έχει αυξήσει το αριθμό των σταθμών βάσης και των αποκεντρωμένων καταφυγίων, που μετακινούνται από το προστατευόμενο περιβάλλον του γραφείου σε απομακρυσμένες περιοχές. Οι απομακρυσμένες περιοχές είναι εκτεθειμένες στη βροχή και την υγρασία, τη σκόνη και τους ρύπους, σε σημαντικές ημερήσιες και ετήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, σε μεγάλες διακυμάνσεις του ηλιακού θερμικού φορτίου και σε φυσική κακοποίηση. Ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός που στεγάζεται στα καταφύγια, που επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από το σκληρό απομακρυσμένο περιβάλλον, έχει επιβάλει σοβαρούς περιορισμούς για το σχεδιασμό ενός επαρκούς συστήματος ψύξης.

Η θερμοκρασία και η υγρασία είναι οι δύο σημαντικότερες αιτίες της αποτυχίας ηλεκτρονικών στον τομέα της βιομηχανίας των τηλεπικοινωνιών. Ωστόσο, εάν τα περιβλήματα είτε σφραγίζονται είτε οι θερμοκρασίες τους είναι πολύ υψηλότερες από τη θερμοκρασία του σημείου δρόσου του αέρα, η υγρασία δεν είναι γενικά ένα πρόβλημα. Όμως όσον αφορά τη θερμοκρασία, είναι απαραίτητο να διερευνηθεί μια νέα τεχνική ψύξης για τη δημιουργία κατάλληλων συνθηκών εσωτερικού χώρου για τον τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό προκειμένου να παρουσιάζει καλύτερες επιδόσεις και μεγάλη διάρκεια ζωής. Οι προδιαγραφές θερμοκρασίας και υγρασίας που απαιτούνται κανονικά για τον τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό είναι ως εξής: θερμοκρασία 30-40°C, σχετική υγρασία κάτω από 85%.

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος ψύξης καταφυγίου τηλεπικοινωνιών, που βρίσκεται σε περιοχές με υψηλή θερμοκρασία και υγρασία είναι η χρήση των συσκευασμένων κλιματιστικών. Το σημαντικότερο μειονέκτημα των συμβατικών κλιματιστικών είναι ότι καταναλώνουν μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας.

Επιπλέον, απαιτούνται μεγάλες γεννήτριες κινητήρα για την ηλεκτροδότηση κλιματιστικών, λόγω της απουσίας δικτύων ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές και κατά τη διάρκεια διακοπής ρεύματος ως εφεδρικό σύστημα. Αυτό συνεπάγεται σημαντικό κόστος κεφαλαίου ή/και λειτουργικό κόστος. Οι συχνές εκκινήσεις και σταματήματα των κλιματιστικών λόγω ακατάλληλου προφίλ θερμοκρασίας και η συμπύκνωση των υδρατμών, που εξατμίζονται εκ νέου από την επιφάνεια του εξατμιστήρα είναι τα άλλα προβλήματα που έχουν ανακύψει.

Τα υλικά αλλαγής φάσης (PCMs) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εφεδρεία για το κύριο σύστημα κλιματισμού. Ειδικότερα τα PCMs λειτουργούν ως αποθήκη θερμότητας κατά την κανονική λειτουργία αυτού του συστήματος. Σε περίπτωση που το σύστημα αποτύχει, τα PCMs θα απορροφήσουν τη θερμότητα, που παράγεται μέσα στο καταφύγιο, προλαμβάνοντας τη συσσώρευση θερμότητας για όσο χρόνο χρειαστεί, έως ότου το κύριο σύστημα κλιματισμού μπορεί ξανά να επανέλθει σε λειτουργία. Τα PCMs συνήθως αποθηκεύονται σε διάφορα μεγέθη και σχήματα δοχείων αν και γενικά έχουν τις καλύτερες επιδόσεις όντας μικρά. Τυπικές διαμορφώσεις δοχείου είναι τα πάνελ τοίχου, σωλήνες από χάλυβα, φιάλες αλουμινίου, ή πλαστικές μπάλες. Είναι σημαντικό για το υλικό να είναι αγωγίμο, στεγανό και ευέλικτο ώστε να διευκολυνθούν οι αλλαγές του όγκου. Τα PCMs μπορούν να λειτουργήσουν ακόμα και ως κύριο σύστημα κλιματισμού για ένα καταφύγιο, εάν υπάρχει επαρκής διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ημέρας και νύχτας. Σε αυτή την περίπτωση, τα PCMs αποθηκεύουν ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας από το καταφύγιο και την απελευθερώνουν στην ατμόσφαιρα τη νύχτα.



Σχήμα 3.10: Εφεδρεία AC για καταφύγιο τηλεπικοινωνιών σε σωλήνες αλουμινίου (αριστερή εικόνα), εγκατεστημένο PCM σε καταφύγιο τηλεπικοινωνιών για εφεδρεία AC στους 29°C (δεξιά εικόνα) [23].

Marongiu και Clarksean σχεδίασαν και ανέπτυξαν έναν εναλλάκτη θερμότητας PCM για θερμική διαχείριση των ηλεκτρονικών περιβλημάτων. Αυτοί οι εναλλάκτες θερμότητας κατασκευάζονται από δέσμες σωλήνων αλουμινίου στους οποίους

περιλαμβάνονται ενσωματωμένα σε κάψουλες υλικά αλλαγής φάσης. Κατά τη διάρκεια συνθηκών ενεργοποίησης, αέρας από το περίβλημα ρέει μέσω του εναλλάκτη θερμότητας, έτσι ώστε το PCM να αποθηκεύσει ενέργεια αλλάζοντας φάση, και αργότερα, κατά τη διάρκεια συνθηκών απενεργοποίησης, αέρας από έξω χρησιμοποιείται για τη αφαίρεση της θερμότητας από το εναλλάκτη θερμότητας.

Ένα στοιχείο του εξοπλισμού που επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, που περιγράφονται από ένα εύρος θερμοκρασίας -40°C έως $+50^{\circ}\text{C}$, είναι οι μπαταρίες. Ειδικότερα η διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας σχετίζεται άμεσα με το εφαρμοζόμενο φορτίο, καθώς και η σωστή επαναφόρτιση, περισσότερο απ' όλα όμως η θερμοκρασία της μπαταρίας, η οποία πρέπει να διατηρείται σε βέλτιστες συνθήκες. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται για λόγους εφεδρείας συνήθως αποθηκεύονται σε προσκολλημένους θαλάμους ή μέσα σε καμπίνες εξωτερικού χώρου. Αυτά τα διαμερίσματα εκτίθενται σε ηλιακά φορτία και πρέπει να διατηρούνται σε βέλτιστες θερμοκρασίες, 77F (25°C), όπως ορίζεται από τους κατασκευαστές. Επιπλέον, τα διαμερίσματα αυτά πρέπει να επιτρέπουν τον καλό αερισμό αναθυμιάσεων υδρογόνου που μπορεί να εκλυθούν από τις μπαταρίες κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Το jacket μπαταρίας (σχήμα 3.11) είναι μια παθητική προσέγγιση για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων των φορτίων αιχμής θερμότητας την ημέρα. Η χρήση των υλικών αλλαγής φάσης (PCM) επιτρέπει τα φορτία θερμότητας να απορροφούνται στη διάρκεια της ημέρας και να απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια της νύχτας ενώ η θερμοκρασία του PCM κατά τη διάρκεια του κύκλου αλλαγής φάσης, μένει σταθερή. Μονώνοντας τις μπαταρίες με αυτό το υλικό PCM, οι μπαταρίες μπορούν να διατηρηθούν σε μια πιο σταθερή θερμοκρασία κατά τη διάρκεια ενός ημερήσιου κύκλου.



Σχήμα 3.11: Jacket μπαταρίας για εξωτερικό καταφύγιο τηλεπικοινωνιών [23].

3.5 Οχήματα

3.5.1 Ψύξη κινητήρων [24]

Οι πρόσφατες τάσεις αύξησης της αποδοτικότητας της ισχύος των κινητήρων έχουν αυξήσει τη ζήτηση για τα συστήματα ψύξης του κινητήρα περισσότερο από ποτέ. Ενώ μειώνοντας το μέγεθος του συστήματος ψύξης και το βάρος, πολλές προσπάθειες έχουν επιχειρηθεί για το χειρισμό του αυξημένου φορτίου θερμότητας από το σύστημα με καινοτόμες στρατηγικές ψύξης. Στα πλαίσια του σχεδιασμού του συστήματος, έχει δειχθεί ότι η διατήρηση της στρατηγικής της παθητικής ψύξης μπορεί να είναι το πιο απλό και πιο πρακτικό από την τυχόν εφαρμογή σημαντικών αλλαγών. Vetrovec (2008) πρότεινε τη χρήση ενός συσσωρευτή θερμότητας που έχει ένα υλικό αλλαγής φάσης (PCM) εντός του συστήματος ψύξης των αυτοκινήτων. Η υπερβολική θερμότητα που παράγεται κατά τη διάρκεια συνθηκών σοβαρής λειτουργίας αποθηκεύεται στο θερμοσυσσωρευτή, και διαχέεται κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλού θερμικού φορτίου. Η ικανότητα απαγωγής θερμότητας του ψύκτη και το ποσό του ψυκτικού υγρού στο σύστημα ψύξης συνήθως σχεδιάζονται κατά τρόπον ώστε το σύστημα να μπορεί να συντηρηθεί από μόνο του κατά το φορτίο αιχμής θερμότητας π.χ. κατά την επιτάχυνση και σε αναβάσεις υψωμάτων σε θερμές περιόδους του καλοκαιριού. Ως εκ τούτου, το άνευ λόγου μεγάλο απόθεμα ψύξης δημιουργεί μια υπερφόρτωση του οχήματος, το οποίο αυξάνει το ποσοστό κατανάλωσης καυσίμου. Ένας συσσωρευτής θερμότητας που μετατοπίζει τα φορτία αιχμής θερμότητας μπορεί να μειώσει το σύνολο του συστήματος ψύξης εντυπωσιακά από την άποψη τόσο του όγκου όσο και του βάρους. Αυτό είναι επίσης συμφέρον για τη μείωση του χρόνου προθέρμανσης του κινητήρα, που μπορεί να συμβάλει και σε σημαντική μείωση των επιβλαβών εκπομπών κατά τη διάρκεια ψυχρής εκκίνησης.

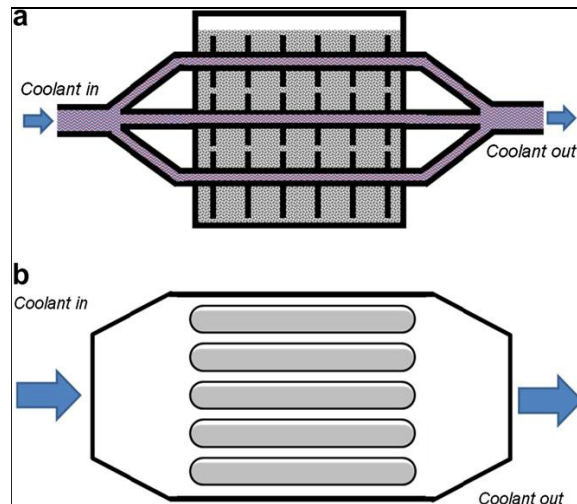
Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα χρήσης του PCM για ψύξη αυτοκινήτων είναι η εξάλειψη της μεγάλης απόκλισης της θερμοκρασίας του ψυκτικού υγρού κατά τη διάρκεια οδήγησης υπό διάφορες ταχύτητες του κινητήρα και συνθήκες φορτίου, μετριάζοντας τα φορτία αιχμής θερμότητας στο σύστημα ψύξης. Δεδομένου ότι η τυπική ταχύτητα νερού αντλίας σε αυτοκίνητο εξαρτάται από την ταχύτητα του κινητήρα, μια συχνή αλλαγή στροφών του κινητήρα γίνεται άμεση αιτία απότομης πτώσης ή ανόδου της θερμοκρασίας του ψυκτικού υγρού, με αποτέλεσμα αύξηση των επιβλαβών εκπομπών από το κινητήρα και της κατανάλωσης καυσίμου.

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης θερμότητας που χρησιμοποιούν υλικά αλλαγής φάσης (PCM) για αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας διευρύνουν σημαντικά την ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας. Πολυάριθμα PCM έχουν ερευνηθεί σύμφωνα με

τα τυπικά κριτήρια (π.χ. θερμοδυναμικά, κινητικά, χημικά). Λαμβάνοντας υπόψη τη σκοπιμότητα των PCM για πρακτικές εφαρμογές, η θερμοκρασία τήξης του PCM θα πρέπει να εμπίπτει εντός του κατάλληλου εύρους για το συγκεκριμένο σκοπό μιας συγκεκριμένης εφαρμογής. Επιπλέον, μια μεγάλη ικανότητα λανθάνουσας θερμότητας είναι καλύτερη για υψηλή αποδοτικότητα αποθήκευσης θερμότητας από θερμοδυναμική άποψη. Μια ομαλή μετάβαση μεταξύ της τήξης και στερεοποίησης του PCM με χαμηλό φαινόμενο υπέρψυξης είναι επίσης αναγκαία. Τοξικότητα, διαβρωτικότητα, και υποβάθμιση λόγω των χημικών αντιδράσεων θα πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη για την κατάλληλη επιλογή PCM. Η θερμοκρασία λειτουργίας του ψυκτικού υγρού του αυτοκινήτου είναι γενικά 110-115°C. Θερμοκρασίες ψυκτικού άνω των 115°C προκαλούν δυσμενείς συνέπειες για τον κινητήρα όπως χτύπημα.

Η ερυθριτόλη μπορεί να είναι ένα κατάλληλο PCM για τα συστήματα ψύξης των αυτοκινήτων λαμβάνοντας υπόψη την υψηλή λανθάνουσα θερμότητά των 339,8 kJ/kg και το σημείο τήξης της από 118°C. Kakiuchi διερεύνησε τη σκοπιμότητα της ερυθριτόλης ως υλικό αλλαγής φάσης από την άποψη των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων, της κινητικής συμπεριφοράς και θερμικής σταθερότητας. Δεν ήταν το μόνο χρήσιμο η υψηλή λανθάνουσα θερμότητα, όπως προαναφέρθηκε, αλλά η ερυθριτόλη χαρακτηρίζεται επίσης ως κάτοχος μιας υψηλής θερμικής αγωγιμότητας και χαμηλής υπέρψυξης. Υπάρχει στη φύση, και χρησιμοποιείται συχνά ως γλυκαντική ουσία, συνεπώς, είναι οικονομικά αποδοτική και δεν είναι ούτε τοξική ούτε διαβρωτική. Επιπλέον, η διάρκεια ζωής της ερυθριτόλης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, αφού μπορεί να μειωθεί με την υποβάθμιση που προκύπτει από τη θέρμανση σε θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τους 140°C ή με την υποβολή σε μεγάλο αριθμό αλλαγών φάσης.

Όσον αφορά το σχεδιασμό αποθήκευσης PCM, υπάρχουν δύο γνωστοί τύποι αποθήκευσης: ο τύπος ενσωμάτωσης σε κάψουλες και ο τύπος εξωτερικής διάταξης στον οποίο το PCM περιβάλλει την εξωτερική επιφάνεια της οδού του ψυκτικού μέσου. Buschle διερεύνησε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τύπων αποθήκευσης PCM. Ο τύπος εξωτερικής διάταξης παρατηρήθηκε να έχει δύο φορές ταχύτερο χρόνο απόκρισης της αλλαγής φάσης του PCM, και απαιτεί ένα χαμηλότερο πάχος τοιχώματος για αποθήκευση. Η πλάγια όψη των δύο διαφορετικών τύπων συσσωρευτών θερμότητας παρουσιάζονται στο σχήμα 3.12. Επίσης στην περίπτωση (β) δηλαδή στο τύπο ενσωμάτωσης σε κάψουλες, ο όγκος του αερίου απαιτεί περίπου το 10% του εσωτερικού όγκου της κάθε κάψουλας, που μειώνει την επιφάνεια επαφής μεταξύ του ψυκτικού μέσου και του PCM.



Σχήμα 3.12: Δύο διαφορετικοί τύποι αποθήκευσης του PCM (a) Τύπος θερμοσυσσωρευτή εξωτερικής διάταξης (b) Τύπος θερμοσυσσωρευτή ενσωμάτωσης σε κάψουλες [24].

Συνοψίζοντας η ιδέα ψύξης των αυτοκινήτων με χρήση ενός θερμοσυσσωρευτή που περιέχει ένα προηγμένο υλικό PCM ουσιαστικά είναι η αποθήκευση ενός μεγαλύτερου ποσού θερμότητας μέσα στο συσσωρευτή θερμότητας, που τελικά συμβάλλει στη μείωση του μεγέθους του συνολικού κυκλώματος ψύξης του κινητήρα με μείωση του μεγέθους του ψυγείου και ανεμιστήρα ψύξης που ευνοούν την μείωση της δύναμης της αντίστασης του αέρα, καθώς επίσης και του βάρους και του όγκου του θαλάμου. Επίσης η στρατηγική αυτή επιτρέπει μια μείωση 30% του μεγέθους του αποθέματος του ψυκτικού μέσου, που συνεπάγεται τη μείωση του χρόνου προθέρμανσης του ψυκτικού μέσου κατά τη διάρκεια μιας ψυχρής εκκίνησης, το οποίο με τη σειρά του θα συμβάλει στη μείωση των βλαβερών εκπομπών.

3.5.2 Θερμική άνεση [25 – 27]

Εκτός από την ψύξη κινητήρων τα υλικά αλλαγής φάσης στην αυτοκινητοβιομηχανία χρησιμοποιούνται και για θερμική άνεση στο εσωτερικό των οχημάτων. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, η θερμοκρασία μέσα στην καμπίνα των επιβατών του αυτοκινήτου μπορεί να αυξηθεί σημαντικά - για παράδειγμα, όταν το αυτοκίνητο είναι σταθμευμένο σε εξωτερικό χώρο. Προκειμένου να σταθεροποιηθεί η εσωτερική θερμοκρασία στη διάρκεια της οδήγησης του αυτοκινήτου, πολλά μοντέλα είναι εξοπλισμένα με συστήματα κλιματισμού. Ωστόσο, η παροχή επαρκούς ικανότητας ψύξης απαιτεί πολλή ενέργεια. Τα παραδοσιακά συστήματα κλιματισμού έχει αποδειχθεί ότι αντιπροσωπεύουν έως και 5% της χρήσης των καυσίμων ενός οχήματος κάθε χρόνο που όταν προστεθούν είναι περίπου 28 γαλόνια ετησίως, ένας σημαντικός αριθμός αν σκεφτεί κανείς την αύξηση των τιμών των καυσίμων καθώς και την τρέχουσα κίνηση προκειμένου να καταστούν τα οχήματα πιο φιλικά προς το περιβάλλον.

Προς την κατεύθυνση αυτή κινείται η τεχνολογία των υλικών αλλαγής φάσης η οποία σε διαφορετικές εφαρμογές στο εσωτερικό των αυτοκινήτων θα μπορούσε να προσφέρει εξοικονόμηση ενέργειας με αύξηση παράλληλα της θερμικής άνεσης του εσωτερικού του αυτοκινήτου. Ειδικότερα η τοποθέτηση ενός πολύ λεπτού στρώματος υλικού αλλαγής φάσης (PCM) μέσα σε μια θήκη στην οροφή του αυτοκινήτου στο οποίο η θερμική ενέργεια θα απορροφάται και θα απελευθερώνεται με την τήξη και στερεοποίηση του PCM θα έχει ως αποτέλεσμα, η θερμοκρασία στο εσωτερικό του αυτοκινήτου να διατηρείται στην κατάσταση άνεσης με ένα παθητικό σύστημα ρύθμισης της θερμοκρασίας και όχι με την κατανάλωση καυσίμου. Το ποσό του PCM που απαιτείται έχει υπολογιστεί να είναι περίπου 755g. Το σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας με PCM είναι απλό και έχει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί ως μια πρακτική λύση για την αποφυγή ανεπιθύμητης θέρμανσης της καμπίνας του αυτοκινήτου.

3.5.3 Καταλυτικός μετατροπέας [28,29]

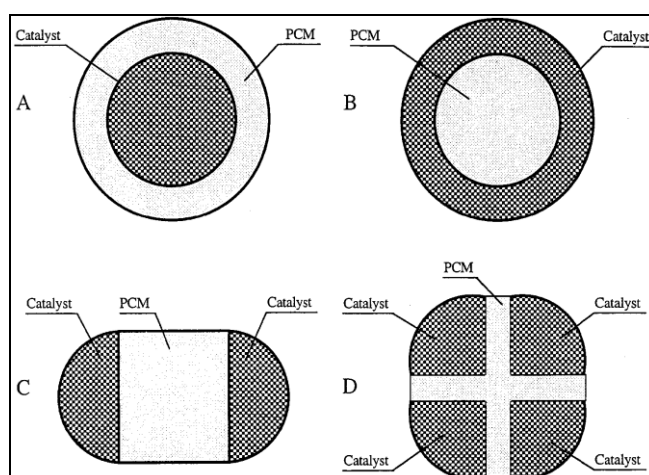
Τα μηχανοκίνητα οχήματα αποτελούν μια σημαντική πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Εκπομπές των οχημάτων συμβάλλουν μεταξύ $\frac{1}{4}$ και $\frac{1}{2}$ του συνόλου του ατμοσφαιρικού μονοξειδίου του άνθρακα (CO), των οξειδίων του αζώτου (NOx), καθώς και των ενώσεων των υδρογονανθράκων (HC). Ο αντίκτυπός τους είναι ακόμη μεγαλύτερος στις αστικές περιοχές. Για παράδειγμα στις Ηνωμένες Πολιτείες, αυτοκίνητα, φορτηγά και εκτός δρόμου οχήματα είναι υπεύθυνα για περίπου το 40-50% των εκπομπών HC ή VOC (πτητικών οργανικών ενώσεων), για το 50% των εκπομπών NOx και το 80-90% των εκπομπών CO. Η μεγαλύτερη συνεισφορά (>90%) εκπομπών HC από κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα (SI) κατά τη διάρκεια μιας τυποποιημένης δοκιμής βρέθηκε να συμβαίνει κατά τη διάρκεια του πρώτου λεπτού λειτουργίας. Δύο σημαντικοί παράγοντες είναι υπεύθυνοι για αυτό: (α) το γεγονός ότι ο καταλύτης δεν έχει ακόμη ζεσταθεί (β) η ανάγκη να εισαχθεί μια σημαντικά μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου από τη στοιχειομετρική αναλογία προκειμένου να εξασφαλιστεί ταχεία ατμοποίηση και εκκίνηση.

Ειδικότερα οι συσκευές καταλυτικών μετατροπέων (CC) εξουδετερώνουν τις εκπομπές CO, HC και μειώνουν τα NOx (που διαμορφώνονται σε υψηλές θερμοκρασίες καύσης και πιέσεις). Μετατρέπουν χημικά το 80 - 90% αυτών των επιβλαβών ουσιών σε ανθρακικό αέριο (CO₂), ατμό (H₂O) και άζωτο (N₂). Σημερινοί μετατροπέες εξαλείφουν έως και το 97% των εκπομπών CO και HC υπό ιδανικές συνθήκες. Το ενεργό μέρος του καταλύτη είναι ένας κεραμικός πυρήνας που είναι διάτρητος με μικρές τρύπες, που εξασφαλίζουν την έκθεση μιας πολύ μεγάλης περιοχής στα καυσαέρια. Ολόκληρη η επιφάνεια του είναι επικαλυμμένη με ένα λεπτό

στρώμα από πολύτιμα μέταλλα. Για να εξασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή απόδοση του μετατροπέα, ο λόγος καυσίμου / αέρα του μείγματος που παρέχεται στον κινητήρα με ακρίβεια ελέγχεται από το σύστημα ψεκασμού και έναν αισθητήρα Lambda (που τοποθετείται στο σωλήνα της εξάτμισης), ο οποίος ανιχνεύει την περιεκτικότητα σε οξυγόνο των καυσαερίων. Δυστυχώς, η αποδοτικότητα της μετατροπής, ωστόσο, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία λειτουργίας, ένας καταλύτης δεν είναι πλήρως αποτελεσματικός σε θερμοκρασίες κάτω από τους 250°C για το CO και 250 - 340°C για εκπομπές HC. Ως εκ τούτου, το σύστημα γίνεται αποτελεσματικό μετά από 1 με 2 λεπτά, όταν η θερμοκρασία λειτουργίας επιτυγχάνεται. Σε κρύα εκκίνηση, το μείγμα καυσίμων πρέπει να είναι πλουσιότερο. Εκτός από την αυξημένη κατανάλωση καυσίμων, η επιβλαβή επίδραση αυτών των πλούσιων λόγων καυσίμου / αέρα είναι ότι άκαυστα κατάλοιπα καυσίμου απορρίπτονται μέσω του συστήματος εξάτμισης πριν ο CC τεθεί σε λειτουργία.

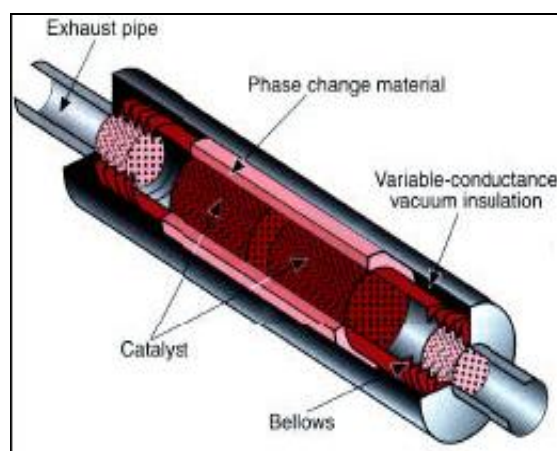
Μια ελκυστική λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η ενσωμάτωση του υλικού αλλαγής φάσης (PCM), στο καταλυτικό μετατροπέα, σε συνδυασμό με ένα κατάλληλο «jacket» μόνωσης. Σε σύγκριση με μια συμβατική αισθητή αποθήκευση θερμότητας, το PCM χρησιμοποιεί την λανθάνουσα θερμότητα τήξης/ στερεοποίησης. Το PCM έχει υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας, ενώ η ενέργεια μπορεί να απελευθερωθεί σε μια σχεδόν σταθερή θερμοκρασία. Η μέθοδος PCM είναι ιδιαίτερα ελκυστική για εφαρμογές, όπου το μέγεθος της αποθήκευσης είναι το μεγαλύτερο εμπόδιο και όταν η αποθηκευμένη ενέργεια πρέπει να αξιοποιηθεί σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο θερμοκρασίας. Με αυτή τη μέθοδο, κατά τη διάρκεια συνθηκών κανονικής λειτουργίας του κινητήρα, ορισμένη από τη θερμική ενέργεια των καυσαερίων θα αποθηκευόταν στο PCM, καθώς το υλικό λιώνει. Όταν ο κινητήρας δεν βρίσκεται σε λειτουργία, το PCM υφίστανται μερική στερεοποίηση, και η λανθάνουσα θερμότητα που απελευθερώνεται θα χρησιμοποιηθεί για τη διατήρηση της θερμοκρασίας του καταλύτη εντός των επιθυμητών ορίων θερμοκρασίας. Αυτό το σύστημα θα παρέχει τις κατάλληλες συνθήκες για τη μέγιστη απόδοση μετατροπής κατά την εκκίνηση του κινητήρα και προθέρμανση. Τα μοναδικά χαρακτηριστικά αυτής της μεθόδου είναι τα εξής: είναι απλή στη λειτουργία, και κανένα ενεργητικό μέσο ελέγχου δεν απαιτείται καθώς και καμία ειδική πηγή ενέργειας δεν απαιτείται για τη θέρμανση του μετατροπέα, δεδομένου ότι η ενέργεια των καυσαερίων από το κινητήρα αποθηκεύεται για μεταγενέστερη χρήση. Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι είναι αποτελεσματική μόνο μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα αφού ο κινητήρας έχει σβήσει, το χρονικό διάστημα ποικίλει ανάλογα με τις θερμικές προδιαγραφές του συστήματος.

Το σύστημα καταλύτη / PCM πρέπει να παρέχει, αφενός, τη μέγιστη δυνατή επιφάνεια επαφής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των υλικών του καταλύτη και του PCM (για να καταστεί δυνατός ο υψηλός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ τους) και, από την άλλη πλευρά, την ελάχιστη εξωτερική επιφάνεια (για μείωση των απωλειών θερμότητας στον περιβάλλοντα χώρο). Μερικές πιθανές απλές διαμορφώσεις για τη συναρμολόγηση καταλύτη / PCM παρουσιάζονται στο σχήμα 3.13. Η διαμόρφωση A αποτελείται από κοινό καταλύτη κυλινδρικού σχήματος, ένα jacket PCM και μια επένδυση μόνωσης (δεν εμφανίζεται). Σε αυτήν την απλή διαμόρφωση, η θερμότητα μπορεί να διαρρεύσει απ' ευθείας μέσω του στρώματος της μόνωσης. Για την περίπτωση κατά την οποία το PCM αποτελεί το εσωτερικό μέρος του συστήματος, ενώ ο καταλύτης βρίσκεται ανάμεσα στο PCM και τη μόνωση, λιγότερη θερμότητα είναι πιθανό να διαρρεύσει (διαμόρφωση B). Εάν, ως πρώτη προσέγγιση, θεωρηθεί ότι ο όγκος του PCM είναι ίσος με τον όγκο του καταλύτη, η περιοχή διεπαφής μεταξύ του PCM και του καταλύτη και η επιφάνεια της εξωτερικής επικάλυψης που πρέπει να μονωμένη είναι ίδιες και για τις δύο διαμορφώσεις του. Εάν η περιοχή διεπαφής μεταξύ του καταλύτη και του PCM (διαμόρφωση A) ορίζεται ως περιοχή αναφοράς, τότε ο λόγος της επιφάνειας διεπαφής (μεταξύ καταλύτη και PCM) ισούται με 1 για τις δύο μορφές του, και ο λόγος της εξωτερικής επιφάνειας (που πρέπει να είναι μονωμένη) ισούται με 1.414. Για τη διαμόρφωση C η αναλογία περιοχής είναι 0.564 και 1.564, και για τη διαμόρφωση D είναι 1,273 και 1,428 αντίστοιχα. Δεδομένου ότι ο λόγος μεταξύ της διεπαφής και της περιοχής της επιφάνειας είναι ο υψηλότερος για διαμόρφωση D, είναι αυτονόητο ότι αυτή είναι η ανώτερη διαμόρφωση.



Σχήμα 3.13: Πιθανές διαμορφώσεις της συναρμολόγησης καταλύτη και PCM [28].

Benson, Potter και Burch χρησιμοποίησαν θερμική αποθήκευση αλλαγής φάσης και μια μόνωση κενού για την ενίσχυση της θερμομόνωσης σε ένα πρωτότυπο καταλύτη μετατροπέα. Burch μελέτησε την επίδραση του επιπέδου της θερμομόνωσης στην απόδοση του συστήματος μεταβάλλοντας κατά συνεχή τρόπο την θερμική αγωγιμότητα της μόνωσης κενού, δηλαδή παρέχοντας τη χαμηλή αγωγιμότητα που απαιτείται για διατήρηση της θερμότητας μεταξύ των διαδρομών, αλλά παρέχοντας πολύ υψηλότερη αγωγιμότητα για την απόρριψη της θερμότητας από το μετατροπέα κατά τη λειτουργία του κινητήρα για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του καταλύτη. Μια δοκιμή εκπομπών πραγματοποιήθηκε σε ένα πρωτότυπο εγκατεστημένο σε ένα επιβατικό αυτοκίνητο. Burch κατέληξε στο συμπέρασμα ότι, αν και οι θερμοκρασίες εξαγωγής δεν ήταν αρκετά καυτές για να λιώσουν το PCM, η μόνωση κενού απέδωσε καλά, δίνοντας μια θερμοκρασία μετατροπέα των 146°C μετά από 23 ώρες συνεχούς έκθεσης στους 27°C και μια συνακόλουθη μείωση των εκπομπών CO και HC από 52 έως 29%, αντίστοιχα. Επίσης, παρατήρησαν ότι η μέγιστη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια μιας τυποποιημένης δοκιμής μετατροπέα ήταν 720°C. Ο καταλυτικός μετατροπέας τώρα που σχεδιάστηκε από ερευνητές του NREL (σχήμα 3.14) για την επίλυση του προβλήματος των εκπομπών της ψυχρής εκκίνησης συνδυάζει τρεις τεχνολογικές καινοτομίες: συμπαγή μόνωση κενού για να κρατήσει τη θερμότητα από το να διαφύγει, υλικό αλλαγής φάσης για την απορρόφηση, την αποθήκευση και απελευθέρωση θερμότητας ανάλογα με τις ανάγκες και μόνωση μεταβλητής αγωγιμότητας για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση με αυτόματη μετατροπή του συστήματος μόνωσης σε λειτουργία off όταν ο καταλυτικός μετατροπέας ζεσταθεί πάρα πολύ.



Σχήμα 3.14: NREL καταλυτικός μετατροπέας, που παρουσιάστηκε από Burch και τους συνεργάτες του, (1995) [29].

- Σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας της BMW M5 [30,31]

Bridgegate Ltd. ανέπτυξε και δοκίμασε ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας για τη BMW 5, σειρά μοντέλου οχημάτων, το οποίο παρείχε 30% μείωση των άκαυστων υδρογονανθράκων και CO κατά τη διάρκεια της περιόδου εκκίνησης του κινητήρα. Το μείγμα αλατιού $Mg(NO_3) \cdot H_2O$ και $LiNO_3$ με επιτυχία χρησιμοποιήθηκε ως PCM. Αναλυτικότερα το σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας συσσωρεύει και αποθηκεύει τη θερμότητα του κινητήρα - ακόμη και για αρκετές ημέρες σε εξαιρετικά χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες. Αφού ο κινητήρας ξεκινήσει, αυτή η συσσωρευμένη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αμέσως για απόψυξη του παρμπρίζ και των πλευρικών παραθύρων και για την αφαίρεση των συμπυκνωμένων υδρατμών από αυτά. Επιπλέον, ο χρόνος που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του εσωτερικού του οχήματος και για την αύξηση της θερμοκρασίας του κινητήρα είναι σημαντικά μειωμένος. Το σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας αποτελείται από ένα ταμιευτήρα συσσώρευσης που είναι εξαιρετικά καλά μονωμένος. Συνδέεται με σύστημα ψύξης του κινητήρα. Η αρχή στην οποία στηρίζεται είναι η χρήση της λανθάνουσας θερμότητας, που απελευθερώνεται κατά τη μετατροπή του περιβαλλοντικά συμβατού μείγματος αλατιού από την υγρή στη στερεά κατάσταση. Σε μια διαδικασία ανάλογη με τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης του πάγου, η θερμότητα που παράγεται από το ζεστό κινητήρα αποθηκεύεται με την υγροποίηση του μείγματος αλατιού. Ένα "κενό" σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας είναι έτοιμο για λειτουργία και πάλι μετά από περίπου 15 λεπτά οδήγησης. Το σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας ενισχύει έτσι την οδηγική ασφάλεια και άνεση, χωρίς την παραγωγή περιβαλλοντικών ρύπων. Ενεργητική λειτουργία δεν απαιτείται δεδομένου ότι το σύστημα ελέγχεται ηλεκτρονικά.

3.5.4 Μονάδες μπαταρίας ηλεκτρικών οχημάτων [32]

Η χρήση των υλικών αλλαγής φάσης (PCMs) για παθητική θερμική διαχείριση βρίσκει εφαρμογή στις μονάδες μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων (EV), μεταξύ πολλών άλλων. Η απόδοση, διάρκεια ζωής, ανθεκτικότητα και το κόστος των ηλεκτρικών οχημάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συσκευασίες μπαταρίας. Η θερμοκρασία της μπαταρίας είναι μια κρίσιμη παράμετρος για την απόδοσή της. Οι περισσότερες μπαταρίες μπορούν μόνο να φορτίζονται ή να αποφορτίζονται αποτελεσματικά και με ασφάλεια σε ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών. Οι υψηλές θερμοκρασίες πάνω από το καθορισμένο εύρος λειτουργίας μπορεί να μειώσουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής και ακόμη και να καταστρέψουν την μπαταρία. Οι θερμοκρασίες μπαταρίας κάτω από το καθορισμένο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας (ιδιαίτερα κάτω από τους 0°C) οδηγούν σε μείωση της τάσης και της

φόρτισης της μπαταρίας. Και στις δύο περιπτώσεις, η απόδοση και η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μειώνονται, με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους και τη μειωμένη αξιοπιστία των ηλεκτρικών οχημάτων. Επομένως, είναι σημαντικό να διατηρηθούν οι μονάδες μπαταρίας εντός καθορισμένου εύρους θερμοκρασίας. Προς τούτο απαιτείται ένα αποτελεσματικό σύστημα θερμικής διαχείρισης, που να διατηρεί τις μπαταρίες σε μια καθορισμένη περιοχή θερμοκρασίας, όταν τα οχήματα λειτουργούν τόσο σε ζεστά όσο και σε κρύα κλίματα. Οι περισσότερες μπαταρίες παράγουν ένα σημαντικό ποσό θερμότητας κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης, το οποίο πρέπει να διαχέεται με επαρκή ψύξη από το σύστημα θερμικής διαχείρισης. Επίσης, η θέρμανση είναι απαραίτητη όταν τα οχήματα λειτουργούν σε ψυχρά χειμερινά κλίματα. Το σύστημα θερμικής διαχείρισης θα πρέπει να είναι σε θέση να διατηρήσει μια ομοιόμορφη θερμοκρασία μεταξύ όλων των κελιών της μπαταρίας σε ολόκληρο το πακέτο μπαταρίας καθώς διαφορετικά μειώνεται η συνολική χωρητικότητα του πακέτου μπαταρίας, οι υψηλές επιδόσεις και η διάρκεια ζωής του όλου πακέτου.

Έτσι διαμορφώσεις PCM εξετάζονται με στόχο την παροχή (1) της επιθυμητής περιοχής θερμοκρασιών λειτουργίας για όλες τις μονάδες, (2) ελάχιστων διακυμάνσεων θερμοκρασίας μέσα σε μια μονάδα, και (3) ελάχιστων διακυμάνσεων της θερμοκρασίας μεταξύ των διαφόρων μονάδων. Το σύστημα θερμικής διαχείρισης πρέπει να είναι συμπαγές, ελαφρύ, εύκολα συσκευασμένο στο όχημα, αξιόπιστο και χαμηλού κόστους. Με την ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας ενέργειας και τη σταθερότητα ελεγχόμενης θερμοκρασίας, τα PCMs αποδεικνύονται κατάλληλα για τη θερμική διαχείριση σε EVs, ιδίως για τη μείωση των υψηλών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της διακοπτόμενης αποφόρτισης. Με την αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε PCMs μπορούν ακόμα να υπερνικηθούν οι απώλειες απόδοσης της μπαταρίας σε χαμηλές, κρύες θερμοκρασίες. Τα PCMs έχουν το πλεονέκτημα της διατήρησης καλύτερης θερμοκρασιακής ομοιομορφίας και του μειωμένου όγκου του συστήματος. Οι περισσότερες εμπορικά διαθέσιμες μπαταρίες Li-ion παρουσιάζουν μια καθαρή επίδραση ψύξης κατά τη διάρκεια της φόρτισης, και είναι ιδιαίτερα εξώθερμες κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης. Ως εκ τούτου, ένα σύστημα θερμικής διαχείρισης που βασίζεται στην μεταφορά θερμότητας με αλλαγή φάσης μπορεί να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό για αυτές τις μπαταρίες.

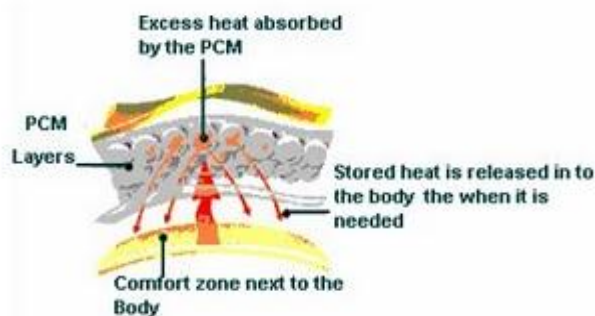
3.6 Κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα

Εκατομμύρια άνθρωποι σε όλο τον κόσμο εκτίθενται σε διάφορα θερμικά περιβάλλοντα, από τα οποία τα σώματά τους χρειάζονται προστασία. Οι απαιτήσεις επιδόσεων προστατευτικής ενδυμασίας ζητούν συχνά ισορροπία μεταξύ πολύ διαφορετικών ιδιοτήτων όπως θερμικής αντίστασης, υγρασκοπικότητας, μεταφοράς

νερού, διαπερατότητας υδατμών (WV), ελέγχου της δυναμικής θερμοκρασίας και υγρασίας στο μικροκλίμα ένδυση-δέρμα. Το ανθρώπινο σώμα τώρα παράγει θερμότητα μέσω του μεταβολισμού, η οποία ανάλογα με τη φυσική δραστηριότητα είναι 100W κατά την ανάπαυση, 1000W κατά την εργασία, 2000W για κορυφαίους αθλητές σε αγώνες. Από τη θερμότητα αυτή, που αποτελεί ένα παραπροϊόν των χημικών αντιδράσεων του μεταβολισμού, περίπου το 43% χρησιμοποιείται για την ολοκλήρωση της βιολογικής εργασίας. Το υπόλοιπο της ενέργειας χάνεται ως θερμότητα, που πρέπει να απελευθερώνεται συνεχώς, διατηρώντας τη θερμοκρασία του σώματος σε ένα εύρος κατάλληλο για το μεταβολισμό περίπου στους 37°C.

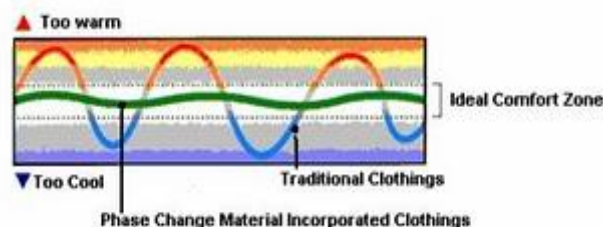
Η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του περιβάλλοντος γίνεται με θερμική αγωγιμότητα, συναγωγή, ακτινοβολία, και εξάτμιση (εφίδρωση). Εάν χάνουμε πάρα πολλή θερμότητα, η θερμοκρασία του σώματος πέφτει κάτω από τη βέλτιστη θερμοκρασία και εμείς κρυώνουμε. Εάν δεν χάνουμε αρκετή θερμότητα, εμείς υπερθερμαινόμαστε και αρχίζουμε να ιδρώνουμε για να αυξηθεί η απώλεια θερμότητας με εξάτμιση. Το αποδεκτό εύρος θερμοκρασίας για το ανθρώπινο σώμα είναι πολύ μικρό: π.χ. στους 42°C, μόνο 5°C πάνω από τη βέλτιστη θερμοκρασία υπάρχει κίνδυνος να πεθάνουμε. Ως εκ τούτου, η σταθεροποίηση της θερμοκρασίας από το PCM είναι πολύ ελπιδοφόρα καθώς ο φυσικός έλεγχος θερμοκρασίας με τη θερμοχωρητικότητα του σώματος δεν αρκεί πολλές φορές.

Η εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης (PCMs) σε προϊόντα κλωστοϋφαντουργίας (σχήμα 3.15) παρέχει παράλληλα με την παθητική επίδραση της θερμομόνωσης μια ενεργητική θερμομόνωση, η οποία ελέγχει τη ροή θερμότητας μέσα από τα ρούχα και προσαρμόζει τη ροή θερμότητας σε διαφορετικές οριακές συνθήκες. Η επίδραση της μόνωσης που επιτυγχάνεται από το PCM εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το χρόνο και λαμβάνει χώρα μόνο κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης (στο εύρος θερμοκρασιών της αλλαγής φάσης) και λήγει όταν η αλλαγή φάσης σε όλο το PCM ολοκληρωθεί.



Σχήμα 3.15: Περιγραφή της δράσης ενσωματωμένου PCM σε ρούχα [37].

Ένα κανονικό υλικό υφάσματος απορροφά περίπου ένα kJ/kgr θερμότητας, ενώ η θερμοκρασία του ανεβαίνει κατά ένα βαθμό Celsius. Ενώ ένα υλικό αλλαγής φάσης (PCM) θα απορροφήσει υψηλότερο ποσό θερμότητας, κατά την τήξη του, διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία του ίδιου και του γύρω περιβάλλοντός του. Επίσης τα κανονικά ενδύματα δεν εξισορροπούν τη θερμότητα που παράγεται και απελευθερώνεται στο περιβάλλον από το σώμα. Σε αντίθεση τα υφάσματα στα οποία PCMs έχουν ενσωματωθεί παρέχουν καλή θερμική ισορροπία λόγω της επίδρασης που έχει η ρύθμιση της θερμότητας (σχήμα 3.16). Ειδικότερα εάν η παραγωγή θερμότητας του σώματος υπερβαίνει την απελευθέρωση θερμότητας προς το περιβάλλον, το PCM μπορεί να απορροφήσει και να αποθηκεύσει αυτή την υπερβολική θερμότητα. Από την άλλη πλευρά, εάν η έκλυση θερμότητας υπερβαίνει την παραγωγή θερμότητας, η απώλεια θερμότητας μπορεί να αντισταθμιστεί από την αποθηκευμένη θερμότητα στο PCM.



Σχήμα 3.16: Η επίδραση της ρύθμισης θερμότητας των ειδών ένδυσης με PCM ενσωματωμένο έναντι των συμβατικών ενδυμάτων [37].

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την εφαρμογή του PCM. Κατ' αρχάς η ενσωμάτωση σε μακροκάψουλες, ένα παράδειγμα της οποίας είναι οι θήκες. Τέτοιες θήκες μπορούν να γεμίσουν με κάθε είδους PCM, δίνοντας έτσι μια ευελιξία στην επιλογή PCM. Μακροενσωμάτωση, με τυπικές διαστάσεις στην περιοχή αρκετών εκατοστών, προσφέρει ένα φθηνό τρόπο ενσωμάτωσης μεγάλων ποσοτήτων PCM. Το μειονέκτημα είναι, ωστόσο, ότι τα ρούχα πρέπει να είναι ειδικά σχεδιασμένα για να κρατήσουν τις μακροκάψουλες, το οποίο όμως δεν αποτελεί πρόβλημα όταν χρησιμοποιούνται μικροκάψουλες PCM με μια κατά προσέγγιση διάμετρο μεταξύ 1μm και 30μm. Αυτές μπορούν να ενσωματωθούν σε υφάσματα ήδη κατά την παραγωγή των κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων. Παρόλο που είναι πιο ακριβή μέθοδος, τα υφάσματα με μικροκάψουλες PCM μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή κάθε είδους ρούχων, και, συνεπώς, για μια πιο πολυποικίλη αγορά. Ο συνδυασμός των μικροκαψουλών PCM και του υφάσματος μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους: (i) μικροκάψουλες διαφόρων σχημάτων, στρογγυλές, τετράγωνες και τριγωνικές εντός των ινών στο στάδιο του πολυμερούς. Εγκλωβίζονται μόνιμα εντός της δομής των

ινών κατά την υγρή μέθοδο περιστροφής της διαδικασίας κατασκευής των ινών. (ii) μήτρα επικάλυψης πάνω σε υφάσματα κατά τη διάρκεια της τελικής επεξεργασίας. Ειδικότερα οι μικροκάψουλες PCM ενσωματώνονται σε μια ένωση επικάλυψης όπως ακρυλικό, πολυουρεθάνη, κλπ. και εφαρμόζονται στο ύφασμα και (iii) μικροκάψουλες PCM αναμειγνύονται σε αφρολέξ πολυουρεθάνης το οποίο εφαρμόζεται σε ένα ύφασμα με μια διαδικασία ελασματοποίησης. Αυτό μπορεί να γίνει ως ένα στρώμα ή ως κουκκίδες αφρολέξ. [33 – 37]

Ορισμένες εφαρμογές κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων με ενσωματωμένα υλικά αλλαγής φάσης παρουσιάζονται στη συνέχεια.

3.6.1 Διαστημικές στολές [36]

Η τεχνολογία για την ενσωμάτωση μικροκαψουλών PCM στην κλωστοϋφαντουργική δομή για τη βελτίωση της θερμικής επίδοσης αναπτύχθηκε στις αρχές του 1980 στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος της NASA. Η αρχική πρόθεσή τους ήταν να χρησιμοποιήσουν αυτά τα υφάσματα στις διαστημικές στολές των αστροναυτών για να παρέχουν βελτιωμένη θερμική προστασία κατά των ακραίων διακυμάνσεων της θερμοκρασίας στο διάστημα και συγκεκριμένα για την προστασία των αστροναυτών από το τσουχτερό κρύο κατά την εργασία στο διάστημα και τη δημιουργία ενός άνετου περιβάλλοντος.

3.6.2 Γιλέκα για διάφορες εφαρμογές [34]

Μια εφαρμογή όπου ενσωμάτωση σε μακροκάψουλες PCM εφαρμόζεται σε ρούχα είναι ένα γιλέκο ψύξης, που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Climator AB. Το γιλέκο ψύξης έχει αναπτυχθεί για να δροσίξει το σώμα των ανθρώπων, που εργάζονται σε θερμά περιβάλλοντα, ή κατά τη διάρκεια ακραίας σωματικής άσκησης. Φυσικά, είναι γενικά επίσης δυνατή η χρήση του PCM για έλεγχο της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, ιδιαίτερα σε κλειστούς χώρους, αλλά πολλές φορές, όπως σε μια ανοικτή έρημο, αυτό είναι αδύνατο. Σε μια τέτοια περίπτωση, είναι τεχνικά ευκολότερο και πιο αποτελεσματικό η χρήση PCM για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του σώματος άμεσα.

Το γιλέκο, που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.17, περιλαμβάνει χώρους για την αποθήκευση μικρών θηκών γεμάτες με PCM. Απορρόφηση θερμότητας από το PCM ξεκινά μόλις η θερμοκρασία ανέβει πάνω από τη θερμοκρασία τήξης του PCM, που είναι 28°C. Ανάλογα με την εφαρμογή, η διάρκεια της περιόδου της επίδρασης της ψύξης είναι μέχρι και 3 ώρες. Αυτό είναι εφικτό λόγω της μεγάλης ποσότητας PCM, που είναι περίπου 2,3 kg. Αν κατανεμηθεί ισομερώς σε όλη την επιφάνεια του γιλέκου, το πάχος του στρώματος του PCM θα είναι αρκετά mm.



Σχήμα 3.17: Γιλέκο ψύξης για να δροσίσει το σώμα των ανθρώπων που εργάζονται σε θερμά περιβάλλοντα ή κάτω από ακραία σωματική άσκηση από Climator AB [34].

Το γιλέκο ψύξης κυκλοφορεί στο εμπόριο και χρησιμοποιείται για πολλές διαφορετικές εφαρμογές όπως ψύξη ανθρώπων, που ασχολούνται με αθλήματα κατά τα διαλείμματα σε ένα διαγωνισμό το καλοκαίρι, ή για να δώσει τη δυνατότητα στους πυροσβέστες να εργάζονται περισσότερο και πιο κοντά σε μια πυρκαγιά. Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι προφανές ότι η σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του σώματος με ένα δροσερό γιλέκο είναι μια πολύ καλή λύση. Η ψύξη του περιβάλλοντος είναι αδύνατη. Μια διαφορετική εφαρμογή PCM είναι σε αλεξίσφαιρα γιλέκα, τα οποία προστατεύουν τα άτομα από πυροβολισμούς κ.λ.π. Τέτοιο γιλέκο παράγεται από την Outlast.

3.6.3 Ρούχα και εσώρουχα [34,38,39,41]

Η ιδέα χρήσης υλικών αλλαγής φάσης (PCMs) στη κλωστοϋφαντουργική βιομηχανία εφαρμόζεται σε πολλά είδη προϊόντων και εφαρμογών όπως ενδύματα, εσώρουχα, κάλτσες κ.ο.κ. Τα υλικά αλλαγής φάσης (PCMs), που ενσωματώνονται σε ρούχα, αλληλεπιδρούν με τη θερμοκρασία του δέρματος για να παρέχουν ένα είδος προστασίας έναντι διακυμάνσεων της θερμοκρασίας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής των PCMs σε μια πλεκτή μπλούζα και ένα μπουφάν του σκι δίνονται στο σχήμα 3.18β και γ αντίστοιχα.

Αξιοσημείωτη είναι η εφαρμογή των PCMs σε ειδικά σχεδιασμένα θερμικά εσώρουχα, που μπορεί να χρησιμοποιηθούν τόσο σε κρύες όσο και ζεστές εποχές. Αυτό το είδος των θερμικών εσωρούχων έχει ένα στρώμα βάσης που διατηρεί το χρήστη τόσο ζεστό όσο και δροσερό και που κατασκευάζεται από υλικά αλλαγής φάσης, συνήθως από παραφίνη. Η παραφίνη λιώνει απορροφώντας θερμότητα όταν η θερμοκρασία γίνεται υψηλότερη από τους 85°F και παγώνει απελευθερώνοντας θερμότητα σε θερμοκρασία κατώτερη αυτής. Τα θερμικά εσώρουχα διατηρούν την κανονική θερμοκρασία του σώματος, όταν η εξωτερική θερμοκρασία αλλάζει. Ως εκ τούτου, αυτό το εσώρουχο είναι ιδανικό για τους ανθρώπους που εργάζονται από ένα

δροσερό πρωινό έως ένα ζεστό απόγευμα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το λειτουργικό εσώρουχο παντελόني της BMW (σχήμα 3.18δ) με το υψηλής τεχνολογίας υλικό Schoeller®-PCM™. Το εσώρουχο αυτό λειτουργεί καλύτερα όπως έχει αποδειχθεί σε εξωτερικές θερμοκρασίες μεταξύ 5 και 15°C.

Προκειμένου τώρα τα πόδια να διατηρούνται δροσερά, στεγνά και άνετα καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας τα PCMs εφαρμόζονται και σε κάλτσες (σχήμα 3.18α). Χαρακτηριστική εφαρμογή σε κάλτσες είναι το σύστημα διπλής κάλτσας που αναπτύχθηκε από την ομάδα Hanesbrands R & D προκειμένου να μπορέσουν να αντέξουν τις βάνουσες συνθήκες στο Everest. Το σύστημα αυτό αποτελείται από μια καινοτόμο εσωτερική κάλτσα και ένα μονωτικό στρώμα κάλτσας. Κατασκευασμένη από Duofoold Clima υλικό αλλαγής φάσης, η εσωτερική κάλτσα χρησιμοποιεί νήματα με μικροκάψουλες γεμάτες με υγρό. Οι κάψουλες απορροφούν, αποθηκεύουν και επιστρέφουν τη θερμότητα στα πόδια με την αλλαγή από στερεό σε υγρό και στη συνέχεια πάλι πίσω ακολουθώντας την αλλαγή της θερμοκρασίας κατά την ανάβαση στο βουνό.

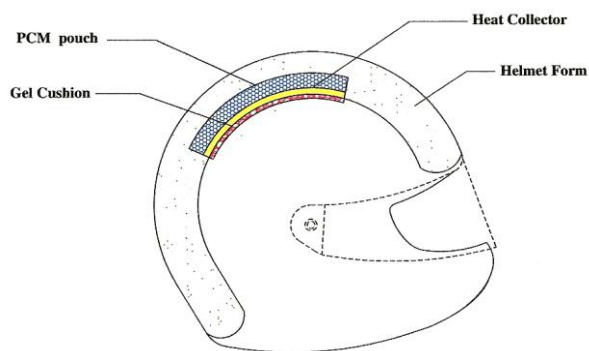


Σχήμα 3.18: (α) Κάλτσα με PCM από Outlast [40] (β) Πλεκτή μπλούζα με PCM από Outlast [40] (γ) Μπουφάν του σκι που παράγεται από Colmar χρησιμοποιώντας Schoeller ©-PCM™ [34] (δ) Λειτουργικό εσώρουχο παντελόني με PCM της BMW [41].

3.6.4 Αξεσουάρ ένδυσης (κράνος, γάντια) [42 – 44]

Τα κράνη μοτοσικλετιστών έχουν δύο κύρια προστατευτικά στοιχεία: ένα λεπτό, εξωτερικό περίβλημα από πλαστικό ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρόλιο (ABS), υαλοβάμβακα ή Kevlar και μια μαλακή, παχιά, εσωτερική επένδυση περίπου μιας ίντσας, που περιορίζει και ουσιαστικά εξαλείφει την ανταλλαγή θερμότητας με τον εξωτερικό τοίχο του πιο αποτελεσματικού τμήματος του σώματος. Αυτό δημιουργεί ένα δυσάρεστο και επικίνδυνα ζεστό περιβάλλον στο κεφάλι του χρήστη. Έτσι παρουσιάζεται επιτακτική η ανάγκη ενός συστήματος κράνους ψύξης χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα αλλά με τη χρήση ενός υλικού αλλαγής φάσης (PCM) για να απορροφήσει όλη τη θερμότητα, που παράγεται από το κεφάλι σε μια σχετικά σταθερή θερμοκρασία.

Τα βασικά συστατικά του κράνους ψύξης με PCM απεικονίζονται στο σχήμα 3.19. Το βασικό στοιχείο του συστήματος του ψυκτικού κράνους είναι η θήκη PCM και ένας ευέλικτος συλλέκτης θερμότητας από χαλκό, που παρέχει ένα καλό θερμικό δρόμο για την αγωγή της μεταφερόμενης θερμότητας από το κεφάλι του κομιστή στη θήκη PCM. Ο συλλέκτης θερμότητας στη συνέχεια συνδέεται με ένα μαξιλαράκι βινυλίου που είναι γεμάτο με ένα υδατικό διάλυμα (gel) και το οποίο παρέχει μια



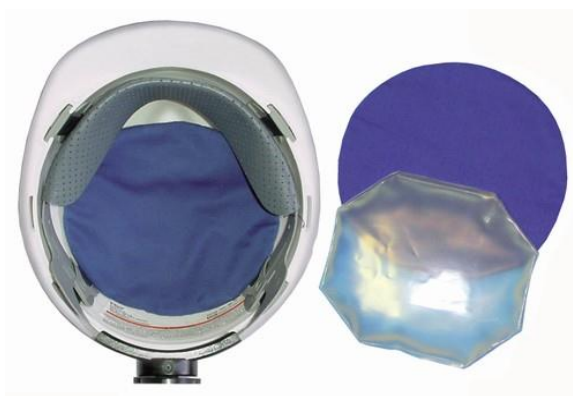
Σχήμα 3.19: Σχηματικό διάγραμμα ενός κράνους ψύξης με PCM [42].

εσωτερική άνεση για το κράνος. Η θερμοκρασία του δέρματος της κεφαλής δεν πρόκειται ποτέ να πάει κάτω από τη θερμοκρασία τήξης του PCM. Όταν η θερμοκρασία της κεφαλής είναι πάνω από 30°C (προβλεπόμενη τιμή που πρέπει να διατηρηθεί), το PCM αρχίζει να λιώνει, παρέχοντας μια επίδραση ψύξης στο κεφάλι. Όταν η θερμοκρασία του δέρματος είναι κάτω των 30°C, η θήκη με PCM προσφέρει ένα φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ένα από τα προβλήματα είναι ότι το χρονικό διάστημα που το PCM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για απορρόφηση της θερμότητας εξαρτάται από την ποσότητα της παραγόμενης θερμότητας από το χρήστη και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η περίοδος της ψύξης μπορεί να επιμηκυνθεί χρησιμοποιώντας ένα μεγαλύτερο ποσό του PCM αν και τότε δημιουργούνται προβλήματα πρόσθετου βάρους και όγκου του συστήματος ψύξης.

Εκτός από το κράνος μοτοσικλετών μια ακόμη εφαρμογή των PCMs είναι σε γάντια μοτοσικλετιστών. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το Kelvin H2O που είναι ένα νέο υψηλής ποιότητας γάντι όλων των σεζόν. Το γάντι Kelvin περιέχει εκτός των άλλων μια έξυπνη θερμική επένδυση με υλικό αλλαγής φάσης (PCM), που προσφέρει την απόλυτη προστασία ακόμα και στις πιο κρύες καιρικές συνθήκες. Τα κύτταρα Schoeller PCM αλλάζουν φάσεις σε θερμοκρασίες πάνω και κάτω από τη θερμοκρασία του δέρματος. Όταν η θερμοκρασία πέφτει, το ρευστό των κελιών αλλάζει σε στερεό και σταδιακά απελευθερώνεται ενέργεια, ενώ όταν η θερμοκρασία ανεβαίνει, αυτά αλλάζουν από στερεά σε υγρά και απορροφούν τη θερμότητα για να

κρυώσει το σώμα. Με την εφαρμογή αυτή του PCM, τα χέρια είναι σε θέση να παραμείνουν σε σταθερή θερμοκρασία, καθώς τα αφήνει άνετα, ζεστά και ξηρά.

Ψύξη ενός διαφορετικού είδους κράνους με PCM παρουσιάζεται στο σχήμα 3.20 όπου τα ένθετα που τοποθετούνται πρέπει πρώτα να βυθίζονται σε παγωμένο νερό ή να εισαχθούν στην κατάψυξη μέχρις ότου στερεοποιηθούν. Τα ένθετα μπορεί να ενεργοποιούνται εκ νέου, όταν αυτό απαιτείται. Η προσαρμογή τους γίνεται σχετικά εύκολα στην επένδυση του σκληρού καπέλου και το πιο σημαντικό είναι ότι μπορούν να διατηρήσουν μια άνεση της τάξης των 58°F (15°C).



Σχήμα 3.20: Ψύκτης κράνους αλλαγής φάσης HS3038 [43].

3.6.5 Υποδήματα [34,36]

Ένα άλλο σημείο όπου η ρύθμιση της θερμοκρασίας του ανθρώπινου σώματος είναι ζωτικής σημασίας εκτός από το κεφάλι είναι στα πόδια. Όταν η θερμοκρασία γίνει πολύ μεγάλη, αυξάνεται η εφίδρωση ενώ αντίστοιχα όταν γίνει πολύ χαμηλή αισθανόμαστε πολύ άβολα. Μπότες του σκι, μπότες ορειβασίας, μπότες οδηγών αυτοκινητιστικών αυτοκινήτων και παπούτσια του γκολφ είναι μερικά από τα προϊόντα, όπου PCM θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν. Στην περίπτωση για παράδειγμα της μπότας του σκι, το PCM απορροφά θερμότητα όταν τα πόδια παράγουν υπερβολική θερμότητα και στέλνουν την αποθηκευμένη θερμότητα πίσω στα κύρια σημεία όταν τα πόδια αρχίζουν και παγώνουν. Αυτό έχει σα συνέπεια τη δημιουργία ενός άνετου περιβάλλοντος για τα πόδια.

3.6.6 Αγωγή υφάσματα [33,36]

Σε ορισμένα ακραία ψυχρά περιβάλλοντα, προκειμένου τα ενδύματα να ανταποκριθούν στην πρόκληση της επιβίωσης, μπορεί να είναι τόσο παχιά που η κίνηση να γίνεται δύσκολη ή αδύνατη. Σε μια τέτοια περίπτωση, ενσωματωμένες μονάδες θέρμανσης στο ένδυμα χρησιμοποιούνται. Χαρακτηριστικά παραδείγματα ενδυμάτων με μονάδες θέρμανσης, είναι οι θερμαινόμενες στολές μοτοσικλετιστών, κοστούμια καταδύσεων βαθέων υδάτων, και ηλεκτρικά θερμαινόμενα γάντια. Επειδή

χρησιμοποιούνται μονάδες θέρμανσης, τα ενδύματα αυτά δεν έχουν την ογκώδη μόνωση, που συνήθως απαιτείται για να κρατηθεί το σώμα ζεστό. Τα τελευταία χρόνια, με τις σύγχρονες τεχνικές ινών που έχουν αναπτυχθεί, τα νέα ηλεκτρικά θερμαινόμενα υφάσματα που έχουν εμφανιστεί δεν βασίζονται σε καλώδια που τρέχουν μέσα τους. Έχουν χαμηλή ωμική αντίσταση και μπορεί να θερμανθούν από χαμηλής τάσης ηλεκτρική ενέργεια. Υπάρχουν πολύ λίγες εκθέσεις σχετικά με τη χρήση ενός συνδυασμού PCM και αγωγίμων υφασμάτων σε συστήματα ιματισμού.

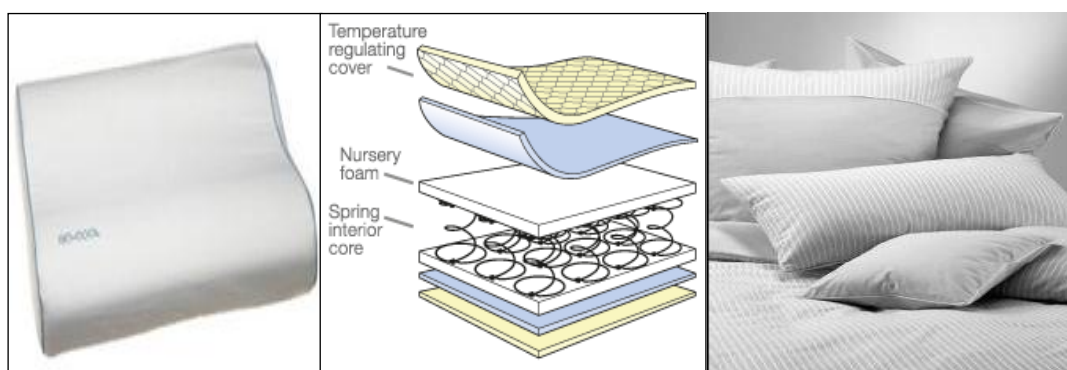
Οι επιπτώσεις των υλικών αλλαγής φάσης (PCM) στα ευφυή θερμικά προστατευτικά ρούχα αποτέλεσε αντικείμενο έρευνας από Wang. Κατά τη διαδικασία θέρμανσης, όταν η θερμοκρασία του στρώματος του PCM αυξάνεται πάνω από το σημείο τήξης του PCM (28°C), το PCM λιώνει και γίνεται υγρό, απορροφώντας και αποθηκεύοντας θερμική ενέργεια. Αφού όλο το PCM καθίσταται υγρό, η θερμοκρασία συνεχώς αυξάνεται. Όταν η θερμοκρασία του στρώματος του PCM φτάσει τους 29°C, τα αγωγή υφάσματα απενεργοποιούνται. Η θερμοκρασία του στρώματος του PCM στη συνέχεια μειώνεται μετά από ένα σύντομο χρόνο. Όταν η θερμοκρασία τώρα του PCM μειωθεί κάτω από τους 27°C, το υγρό PCM γίνεται στερεό και απελευθερώνει τη αποθηκευμένη θερμική ενέργεια, λειτουργώντας ως υλικό θερμικής ρύθμισης. Η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται από τη συναρμολόγηση ενδυμάτων (μη υφασμένο ύφασμα επικαλυμμένο με PCM και έχοντας αγωγή στρώμα) με PCM είναι περίπου 30,9% μικρότερη από εκείνη που καταναλώνεται από τη συναρμολόγηση ενδυμάτων χωρίς PCM. Ως εκ τούτου κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ένα αγωγή υφάσμα μπορεί να αυξήσει σημαντικά τις θερμοκρασίες των διαφόρων στρωμάτων της συναρμολόγησης και να κάνει την συναρμολόγηση θερμότερη. Στην διαδικασία ελέγχου της θερμοκρασίας, ένα PCM τώρα μπορεί να αυξήσει τη θερμοκρασία της συναρμολόγησης και την εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας.

3.6.7 Κλινοσκεπάσματα και αξεσουάρ [34,36,45,46]

Μια πολύ συνηθισμένη περίπτωση όπου η ρύθμιση της θερμοκρασίας του ανθρώπινου σώματος είναι κρίσιμη είναι κατά τη διάρκεια του ύπνου. Έρευνα έχει αποδείξει ότι ο ύπνος παίζει καθοριστικό ρόλο στην ικανότητα του ανθρώπινου σώματος να λειτουργεί υγιεινά. Συστηματική απώλεια ύπνου επηρεάζει τα πάντα, από τη διάθεση, τη μνήμη και τη συγκέντρωση στις φυσικές διεργασίες του ανθρώπινου σώματος. Πρόσφατες έρευνες δείχνουν ότι συνεχής ύπνος λιγότερο από 7 ώρες την ημέρα μπορεί να μειώσει σημαντικά τη διάρκεια ζωής ενός ατόμου. Μια ρύθμιση της θερμοκρασίας με την τοποθέτηση περισσότερων ρούχων, όταν κάνει κρύο, ή αφαίρεση ρούχων όταν αισθανόμαστε ζεστή, δεν είναι μια κατάλληλη λύση, επειδή για να γίνει αυτό είναι απαραίτητο να ξυπνήσουμε. Έτσι μια αυτόματη ρύθμιση της

θερμοκρασίας σε ένα άνετο επίπεδο καθίσταται αναγκαία, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση PCM. Ενσωματωμένες μικροκάψουλες σε παπλώματα, μαξιλάρια και στρώματα καλύπτουν τη διασφάλιση του ενεργητικού ελέγχου της θερμοκρασίας του κρεβατιού. Όταν αυξηθεί η θερμοκρασία του σώματος, η πρόσθετη θερμική ενέργεια απορροφάται και το σώμα κρυώνει. Όταν η θερμοκρασία του σώματος πέφτει, η αποθηκευμένη ενέργεια απελευθερώνεται και το σώμα διατηρείται έτσι ζεστό.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα αξεσουάρ IsoCool™ (σχήμα 3.21α), που χρησιμοποιούν ένα υλικό άνεσης Outlast σχεδιαζόμενο έτσι ώστε να προσαρμόζεται στις συνεχώς μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες του σώματος. Τα σφαιρίδια υλικών αλλαγής φάσης (PCM) ανιχνεύουν τη θερμοκρασία του σώματος και προσαρμόζονται για την αντιστάθμιση, εξασφαλίζοντας μια ρυθμιζόμενη και άνετη εμπειρία ύπνου. Όλα τα αξεσουάρ IsoCool™ χρησιμοποιούν την υψηλότερη δυνατή συγκέντρωση σφαιριδίων PCM για βέλτιστο αποτέλεσμα. Το σχήμα 3.21β παρουσιάζει ένα στρώμα εξαιρετικής ισορροπίας από τη Mamas & Papas που περιλαμβάνει ένα μοναδικό αφαιρούμενο κάλυμμα ρύθμισης θερμοκρασίας το οποίο συμβάλλει στη δημιουργία μια τέλει ισορροπίας μεταξύ ζέστης και ψύχρας. Ειδικότερα τα υλικά αλλαγής φάσης στο κάλυμμα απορροφούν την υπερβολική θερμότητα από το σώμα, απελευθερώνοντας τη προς τα πίσω, όταν η θερμοκρασία πέφτει. Τέλος το σχήμα 3.21γ δείχνει ένα παράδειγμα όπου PCM είναι ενσωματωμένο σε παπλώματα.



Σχήμα 3.21: (α) Αξεσουάρ IsoCool για ενίσχυση της ξεκούρασης [46] (β) Στρώμα εξαιρετικής ισορροπίας για άνετο ύπνο από Mamas & Papas [45] (γ) Παπλώματα που παράγονται από Brennet (εικόνα: Outlast) [34].

3.7 Ιατρικές εφαρμογές [36,47-50]

PCMs μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε ιατρικές εφαρμογές. Ειδικότερα υφάσματα με μικροκάψουλες PCM όπως περιγράφηκαν παραπάνω μπορούν να εφαρμοστούν σε χειρουργικά ενδύματα, σε υλικά κλινοσκεπασμάτων ασθενών, σε

επιδέσμους και γενικά σε προϊόντα για ρύθμιση των θερμοκρασιών των ασθενών σε μονάδες εντατικής θεραπείας. Μία ακόμη εφαρμογή για ιατρικούς σκοπούς είναι ένα στρώμα για τα τραπέζια των εγχειρήσεων, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποφευχθεί η μείωση της θερμοκρασίας του σώματος σε μεγάλης διάρκειας εγχειρήσεις, ή κατά τη διάρκεια εγχειρήσεων καμένων ανθρώπων. Το στρώμα θα θερμαίνεται ηλεκτρικά πριν από τη χρήση του (το PCM θα είναι με μια θερμοκρασία τήξης περίπου 37°C), και θα απελευθερώνει τη θερμότητα κατά την εγχείριση. Επίσης ζεστά ή κρύα μαξιλαράκια (σχήμα 3.22), ως μια άλλη ιατρική εφαρμογή χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση του τοπικού πόνου.



Σχήμα 3.22: (α) Ζεστό μαξιλαράκι για ιατρικούς σκοπούς, από Rubitherm® (β) Rubitherm® κρύο προϊόν για θεραπεία ψύξης [51].

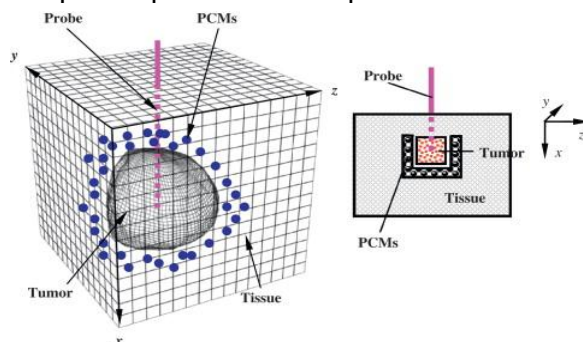
Έχει αποδειχθεί τώρα ότι περίπου 4 εκατομμύρια πρόωρα μωρά πεθαίνουν μέσα σε τέσσερις εβδομάδες και οι περισσότεροι από αυτούς τους θανάτους οφείλονται στο γεγονός ότι τα βρέφη δεν μπορούν να διατηρήσουν μια αρκετά υψηλή θερμοκρασία του σώματος από μόνα τους, και υποκλύπουν σε υποθερμία και στις αναπτυσσόμενες χώρες πολλά νοσοκομεία δεν διαθέτουν τα οικονομικά για θερμοκοιτίδες, ούτε μπορούν να παρέχουν την αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, που απαιτούν οι μηχανές. Έτσι ο μη κερδοσκοπικός όμιλος Embrace, αναπτύσσει μια αποτελεσματική και προσιτή εναλλακτική λύση, το θερμαντήρα βρέφους, μια συσκευή που χρησιμοποιεί ένα υλικό αλλαγής φάσης για να κρατήσει τα πρόωρα βρέφη σε κατάλληλη θερμοκρασία σώματος μέχρι και τέσσερις ώρες, χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα. Σε περίπτωση που το μωρό αρχίζει να παίρνει πάρα πολύ ζεστή, η θήκη θα απορροφήσει την επιπλέον θερμότητα, εάν το βρέφος αρχίζει να παίρνει πάρα πολύ κρύο, η θήκη του PCM θα απελευθερώσει τη θερμότητα. Όταν το κερί που συνήθως χρησιμοποιείται αρχίζει να κρυσταλλώνει ένας δείκτης στη θήκη θα δείξει ότι πρέπει ξαναζεσταθεί. Επίσης για την περίπτωση και των νεογνών που κινδυνεύουν να εμφανίσουν τραυματισμό στον εγκέφαλο λόγω έλλειψης οξυγόνου, η μείωση της θερμοκρασίας του σώματος τους θα μπορούσε να επιτευχθεί αντί με τις συμβατικές μεθόδους ψύξης με τη χρήση ενός στρώματος PCM έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί και

να παραταθεί η ρύθμιση της επίδρασης της θερμοκρασίας. Ο λόγος είναι ότι οι κοινές επιλογές ψύξης όπως κρύες πετσέτες, παγοκύστες και παγωμένα δωμάτια, συχνά στερούνται επαρκούς ελέγχου της θερμοκρασίας.

Μία από τις πιο σημαντικές ιατρικές εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης είναι η χρήση τους στο τομέα της καρδιαγγειακής χειρουργικής. Ειδικότερα ένα νέο θερμοευαίσθητο σύνθετο gel και κόλλας επιτρέπει στα αγγεία αίματος να επανασυνδεθούν χωρίς τρύπημα τους με βελόνα και κλωστή σε μια καρδιαγγειακή χειρουργική επέμβαση. Τα ράμματα μέχρι τώρα ήταν και είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για να επανασυνδεθούν κομμένα αιμοφόρα αγγεία, αλλά μπορούν να εισάγουν επιπλοκές, για παράδειγμα, όταν τα κύτταρα τραυματίζονται από το τρύπημα της βελόνας και φράζουν το αγγείο, το οποίο μπορεί εν τέλει να οδηγήσει σε θρόμβους αίματος. Gurtner αρχικά σκέφτηκε τη χρήση πάγου αλλά αυτό θα σήμαινε να καταστεί το αγγείο πολύ κρύο, το οποίο θα ήταν υπερβολικά χρονοβόρο και δύσκολο στο χειρουργικό τραπέζι και προσπάθησε να βρει ένα είδος βιοσυμβατού υλικού αλλαγής φάσης, που θα μπορούσε εύκολα να μετατραπεί από υγρό σε στερεό και πάλι πίσω. Με τη συμβολή τότε του Gerald Fuller βρέθηκε ένα θερμοαναστρέψιμο πολυμερές, Poloxamer 407, που είχε ήδη εγκριθεί από το FDA για ιατρική χρήση. Δουλεύοντας με υλικά, η ομάδα επιστημόνων του Stanford University Medical Center βρήκε τον τρόπο να τροποποιήσει το πολυμερές έτσι ώστε να γίνεται στερεό και ελαστικό όταν θερμαίνεται σε θερμοκρασία θερμότερη από αυτή του σώματος, και να διαλύεται στο κυκλοφορικό σύστημα στη θερμοκρασία σώματος. Αποδείχτηκε ότι η τεχνική του πολυμερούς ήταν πέντε φορές ταχύτερη από ό, τι η παραδοσιακή μέθοδος ραψίματος με το χέρι σύμφωνα με τους ερευνητές καθώς και ότι μπορεί να λειτουργήσει για εξαιρετικά λεπτά αιμοφόρα αγγεία, μόλις πλάτους 0,2 mm, το οποίο δεν θα μπορούσε να λειτουργήσει με μια βελόνα και κλωστή. Αυτή η νέα τεχνολογία έχει δυνατότητες για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και των αποτελεσμάτων στη χειρουργική θεραπεία των καρδιαγγειακών παθήσεων.

Εκτός από καρδιαγγειακή χειρουργική τα υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιούνται και στην κρυοχειρουργική. Ειδικότερα παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει γίνει στην κρυοχειρουργική για τη θεραπεία όγκων, η θερμική βλάβη στις παράλληλες δομές είναι ακόμα μια γνωστή επιπλοκή της. Μια νέα μέθοδος που προτάθηκε για να αποτραπεί η θερμική βλάβη του υγιή ιστού γύρω από τον καρκινικό ιστό είναι η χρήση μικροκαψουλών με μικρο/νανοσωματίδια αλλαγής φάσης. Κατά τη συγκεκριμένη μέθοδο τα υλικά αλλαγής φάσης (PCMs) με μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα ενσωματώνονται σε μικροκάψουλες από λιποσώματα και παραδίδονται στον υγιή ιστό από κύρια γραμμή, αρτηριακή ένεση,

υποδερμική ένεση ή άμεση έγχυση. Κατά τη διάρκεια της κρυοχειρουργικής, τα PCMs μπορούν να αποτρέψουν την θερμική βλάβη στους γύρω υγιείς ιστούς, μέσω (1) αποθήκευσης της ενέργειας σε σταθερή θερμοκρασία, όταν η θερμοκρασία του υγιή ιστού φτάνει τη θερμοκρασία μετάβασης φάσης του PCM, το οποίο επιβραδύνει τη μείωση της θερμοκρασίας στους υγιείς ιστούς, (2) πρόληψης της θερμότητας, που διαβιβάζεται από τον καρκινικό ιστό στον υγιή ιστό, λόγω της χαμηλής αγωγιμότητάς τους και (3) ενσωμάτωσης των PCMs στον υγιή ιστό, έτσι ώστε να μην μπορεί να επιταχυνθεί η μετάσταση των όγκων των κυττάρων.



Σχήμα 3.23: Σκίτσο της θερμικής προστασίας με μικροκάψουλες αλλαγής φάσης νανοσωματιδίων σε βιολογικό ιστό ενσωματωμένο με έναν όγκο κατά τη διάρκεια της κρυοχειρουργικής [50].

Αποτελέσματα σχετικής μελέτης έδειξαν επίσης ότι ένα PCM με σημείο κατάψυξης, που να προσεγγίζει τη θερμοκρασία του πυρήνα του ανθρώπου, υψηλή λανθάνουσα θερμότητα, και μικρό εύρος θερμοκρασίας κοντά στο σημείο αλλαγής φάσης μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της θερμικής προστασίας. Απαραίτητη προϋπόθεση βέβαια γι' αυτό είναι το PCM να ενσωματωθεί σε πέντε πλευρές γύρω από τον καρκινικό όγκο και στη βέλτιστη απόσταση των 5 mm καθώς και η πλευρά που είναι στραμμένη στην επιφάνεια του δέρματος να μπορεί να προστατευτεί με ζεστό επίθεμα. Ακόμα σχετικά με τους τρόπους παράδοσης στον υγιή ιστό βρέθηκε ότι για να έχουμε υψηλή συγκέντρωση PCMs στην περιοχή του υγιή ιστού, ο άμεσος ψεκασμός των PCMs προτείνεται, ενώ στην περίπτωση της ενέσιμης χρήσης νανοσωματιδίων / διαλυμάτων για το καρκινικό ιστό υπάρχει κίνδυνος μικροαγγειακής καταστροφής.

3.8 Συσκευασία για αποθήκευση και μεταφορά αγαθών

Η εφαρμογή των PCMs σε δοχεία μεταφοράς [52] έγινε μία από τις πρώτες πλήρως εμπορικές εφαρμογές PCM καθώς εξασφαλίζει τη μεταφορά αγαθών χωρίς να είναι απαραίτητη η σύνδεση με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και χωρίς την παραγωγή και του παραμικρού θορύβου. Πρέπει να τονιστεί ότι οι εφαρμογές σε δοχεία μεταφοράς είναι εφαρμογές, όπου η έμφαση δίνεται στο να διατηρηθεί η θερμοκρασία του προϊόντος πάνω ή κάτω από μια ορισμένη θερμοκρασία ή μέσα σε

ένα στενό εύρος τιμών θερμοκρασίας και όχι στην παροχή μεγαλύτερων ποσών θερμότητας ή ψύξης. Ως εκ τούτου, συνήθως κανένα εσωτερικό ρευστό μεταφοράς θερμότητας δε χρησιμοποιείται στο πλαίσιο του PCM και η θερμότητα που ανταλλάσσεται στην επιφάνεια είναι επαρκής.

Στην πραγματικότητα είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί η ίδια θερμοκρασία σε PCM, αντικείμενο, και ολόκληρο το εσωτερικό της μόνωσης, λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας στο εσωτερικό της μόνωσης. Το PCM, το αντικείμενο και το εσωτερικό της μόνωσης, όλα έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες. Για να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία του αντικειμένου όσο το δυνατόν πλησιέστερα στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, η πιο κατάλληλη θέση για το PCM είναι να τοποθετηθεί γύρω από την εσωτερική επιφάνεια της μόνωσης. Κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης του PCM, το PCM δημιουργεί ένα ισοθερμικό περίβλημα στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Το αντικείμενο που περιβάλλεται από το PCM είναι επομένως σε ισοθερμικό περιβάλλον, στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Οι ισόθερμες συνθήκες μεταξύ PCM και αντικειμένου σταματούν την απώλεια θερμότητας από το αντικείμενο και διατηρούν τη θερμοκρασία τους σταθερή στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Αυτό ισχύει μέχρι η αλλαγή φάσης να ολοκληρωθεί.

Ένα πολύ κοινό παράδειγμα στην περίπτωση που το αντικείμενο είναι ένα υγρό είναι η ψύξη ενός ποτού με ένα παγάκι όπου όμως λόγω της συγκριτικά μεγάλης ροής θερμότητας και των διαφόρων συντελεστών μεταφοράς θερμότητας στα όρια πάγου-ποτού, ποτού-γυαλιού, και γυαλιού-περιβάλλοντος, η θερμοκρασία του ποτού θα είναι μεταξύ της θερμοκρασίας τήξεως του πάγου και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Όταν μια μόνωση τώρα εφαρμοστεί γύρω από το γυαλί, η ροή θερμότητας θα μειωθεί που με τη σειρά της θα μειώσει την κλίση της θερμοκρασίας και έτσι η θερμοκρασία του ποτού θα είναι πιο κοντά στους 0°C. Όμως όταν πλάκες πάγου χρησιμοποιηθούν ως ένας είδος «δευτερεύουσας μόνωσης» ή «θερμικής θωράκισης», το υγρό κρυώνει στους 0°C και στη συνέχεια παραμένει εκεί έως ότου ο πάγος λιώσει.

Οι εφαρμογές PCMs σε δοχεία μεταφοράς καλύπτουν πολλά διαφορετικά πεδία, όπως μεταφορά ή αποθήκευση νωπών ή μαγειρευτών φαγητών, κρύα ή ζεστά ποτά, παράγωγα αίματος, φαρμακευτικά προϊόντα, βιοϊατρικά προϊόντα και πολλά άλλα. Στη συνέχεια θα δούμε κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα.

3.8.1 Πολλαπλού σκοπού κιβώτια μεταφοράς και δοχεία [51 – 54]

Η συσκευασία ελεγχόμενης θερμοκρασίας και μεταφορά, που αποτελεί ζωτικό μέρος της σύγχρονης κοινωνίας και χρησιμοποιείται όταν το περιεχόμενο μιας παράδοσης πρέπει να διατηρηθεί σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, ώστε να αποτραπεί η αλλοίωση και η σπατάλη, εγγυάται συνήθως ότι το μεταφερόμενο

στοιχείο ή στοιχεία θα παραμείνουν φρέσκα, ασφαλή και εντός της συμφωνημένης ζώνης θερμοκρασίας για 96 ώρες από τη στιγμή της αποστολής μέχρι την παράδοση. Η πιο γνωστή εφαρμογή των PCMs για μεταφορά ή διατήρηση υλικών σε μια σταθερή θερμοκρασία είναι τα κιβώτια με αφαιρούμενα τμήματα που περιέχουν PCM. Τα κιβώτια αυτά υπάρχουν σε διάφορα μεγέθη και μπορούν να φυλάσσουν τα περιεχόμενά τους στους +2°C έως +8°C (36°F έως 47°F) για τη ζώνη των παγωμένων προϊόντων. Ωστόσο, εάν ψυχρότερες θερμοκρασίες είναι απαραίτητες, συσκευασία ελεγχόμενης πιο χαμηλής θερμοκρασίας είναι διαθέσιμη, που μπορεί να κρατήσει τα στοιχεία σε σταθερή θερμοκρασία μεταξύ -62°C έως 0°C (-80°F έως 32°F). Τέλος, ή, εναλλακτικά, η πρόσφατα κοντά στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος 20 ~ 24°C (70 ~ 80°F), συσκευασία και μεταφορά αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα για πολλά πρόσφατα αναπτυσσόμενα προϊόντα.

Παραδοσιακά, περιεχόμενα χαμηλής θερμοκρασίας μεταφέρονται χρησιμοποιώντας υγρό πάγο ή ξηρό πάγο για παγωμένες και κατεψυγμένες εφαρμογές αντίστοιχα. Ο ξηρός πάγος όμως θεωρείται επικίνδυνος. Ως εκ τούτου, κάθε συσκευασία, που χρησιμοποιεί αυτή τη χημική ουσία, πρέπει να μεταφερθεί μέσω ενός συστήματος αποστολής ικανό να μεταφέρει επικίνδυνα υλικά. Ο ξηρός πάγος μπορεί να είναι επιβλαβής για το περιβάλλον, τα ζώα και τον άνθρωπο, έτσι ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται όταν ξηρός πάγος χρησιμοποιείται στα εμπορευματοκιβώτια μεταφοράς και γι' αυτό και έχει εγκαταλειφθεί η χρήση του. Ούτε όμως ο υγρός πάγος που λιώνει και παγώνει σταθερά στους 0°C (32°F) χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σήμερα, συνήθως χρησιμοποιούνται μείγματα δύο ή περισσότερων χημικών ουσιών που, όταν αναμειγνύονται σε μια συγκεκριμένη αναλογία, έχουν ένα σημείο κατάψυξης / τήξης πάνω ή κάτω από τη θερμοκρασία κατάψυξης του νερού 0°C (32°F) και προσφέρουν μια μονάδα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μεταξύ -114°C (173°F) και 164°C (327°F). Τα υλικά αυτά αλλαγής φάσης (PCM) γενικά ονομάζονται ευτηκτικά διαλύματα.

Τα ευτηκτικά διαλύματα υλικών αλλαγής φάσης (PCM), μπορούν είτε να παρέχονται ως διάλυμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να γεμίσει το δοχείο του πελάτη ή, εναλλακτικά, χρησιμοποιώντας τη τυπική γκάμα των μόνιμα σφραγισμένων μεταλλικών ή μη μεταλλικών κελιών, που γενικά ονομάζονται παγοκύστες ή ευτηκτικές πλάκες οι οποίες επιτρέπουν τη μεταφορά θερμότητας μέσω της φυσικής συναγωγής με το γύρω αέρα. Οι ευτηκτικές πλάκες μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν μέσω των κύκλων φόρτισης (κατάψυξης) και αποφόρτισης (τήξης), ξανά και ξανά για να ικανοποιηθούν η στατική παθητική ψύξη χωρίς καμία μηχανική υποστήριξη και οι εφαρμογές κρύας αποθήκευσης. Η ενέργεια που αποθηκεύεται από το υλικό αλλαγής

φάσης απελευθερώνεται για να κρατήσει τον περιβάλλοντα χώρο / προϊόν κάτω από μια επιθυμητή προκαθορισμένη θερμοκρασία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα πλακών PCM, που πρέπει να φυλάσσονται στο ψυγείο πριν τη χρήση και που διατηρούν μια χαμηλή θερμοκρασία μέσα στο δοχείο για ένα χρονικό διάστημα φαίνονται στο σχήμα 3.24α. Ορισμένες εταιρείες μόνο εμπορευματοποιούνται μαξιλαράκια PCM (σχήμα 3.24γ) τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να κρατήσουν τα προϊόντα ζεστά (το μαξιλάρι πρέπει να θερμαίνεται σε ένα φούρνο ή / και φούρνο μικροκυμάτων) ή κρύα (σχήμα 3.24β) (κλιματισμός γίνεται στο ψυγείο) κατά τη μεταφορά.



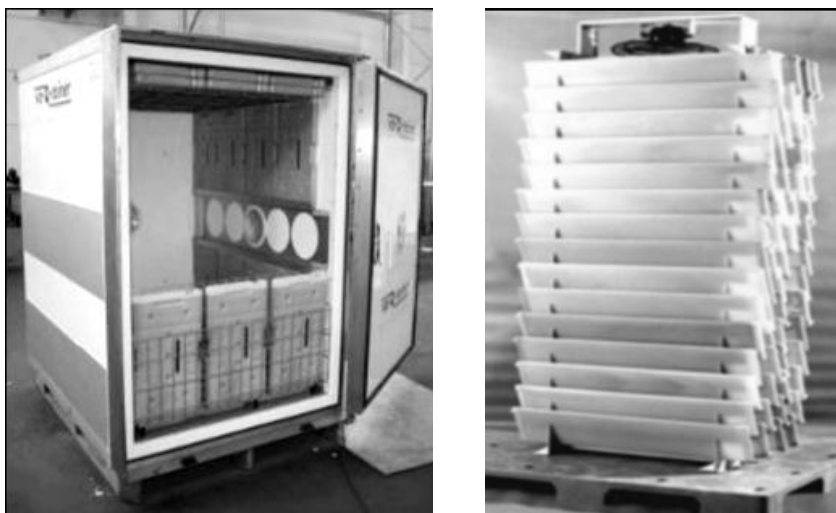
Σχήμα 3.24: (α) Σκληρό (β) Μαλακό δοχείο από Sofrigam [51] (γ) Exo-Gel υλικό αλλαγής φάσης από TCP/Reliable, Inc για τη διατήρηση μιας ζεστής θερμοκρασίας [54].

Το φάσμα των εφαρμογών για κιβώτια μεταφοράς πολλαπλού σκοπού με ελεγχόμενη θερμοκρασία είναι φυσικά πολύ μεγαλύτερο από ό, τι μόνο για τρόφιμα, ποτά, και ιατρικές εφαρμογές. Ως εκ τούτου, αρκετές εταιρείες έχουν αναπτύξει κιβώτια μεταφοράς, τα οποία δεν προσαρμόζονται σε μια ειδική εφαρμογή. Στο σχήμα 3.25α και β παρουσιάζεται ένα μονωμένο κουτί μεταφοράς με τέσσερις μονάδες PCM, που αναπτύχθηκε από την εταιρεία PCM Energy P. Ltd. Το κιβώτιο κρατήθηκε για 30 ημέρες στους 18°C με την πλήρωση του με κατάλληλο PCM και σύμφωνα με την εταιρεία διατίθεται σε διάφορα μεγέθη. Το σχήμα 3.25γ δείχνει ένα κουτί με μια πολύ αποτελεσματική σούπερ μόνωση κενού, που αναπτύχθηκε και διακινείται από την εταιρεία va-Q-tec AG. Η ειδική μόνωση έχει μια θερμική αγωγιμότητα περίπου $4 - 5 \cdot 10^{-3} \text{ W/mK}$, που είναι ένας συντελεστής 7 έως 8 φορές καλύτερος από τα συμβατικά μονωτικά υλικά. Αυτό μειώνει την απαραίτητη ισχύ ψύξης στην τάξη των 10 W, αλλά χωρίς να μειωθεί σημαντικά ο χώρος αποθήκευσης.



Σχήμα 3.25: Κουτιά μεταφοράς με PCM για διάφορους σκοπούς (α),(β) από την εταιρεία PCM Energy P. Ltd (γ) από τη va-Q-tec AG [52].

Η εταιρεία va-Q-tec AG ανέπτυξε επίσης ένα δοχείο μεταφοράς πολλαπλού σκοπού για τη μεταφορά εμπορευμάτων ευαίσθητα στη θερμοκρασία με van, φορτηγό, πλοίο ή αεροπλάνο. Το εμπορευματοκιβώτιο, που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.26α, συνδυάζει μια ιδιαίτερα αποτελεσματική σούπερ μόνωση κενού με PCM για τη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας και δεν χρειάζεται εσωτερική ή εξωτερική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με μετρήσεις που έχουν γίνει κατά τη διάρκεια μιας μεταφοράς, αποδείχτηκε ότι η θερμοκρασία μέσα στο δοχείο διατηρήθηκε για 4 ημέρες στους -18°C , ενώ η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ήταν περίπου 20°C . Ακόμα η εταιρεία ACME ανέπτυξε ένα σύστημα θερμικής διαχείρισης (σχήμα 3.26β) με το PCM να τοποθετείται μακριά από τους τοίχους και τη χρήση εξαναγκασμένης συναγωγής για τη μείωση των διαφορών θερμοκρασίας. Ειδικότερα κάθε εμπορευματοκιβώτιο που μπορεί να μεταφερθεί με τα συνήθη οχήματα και όχι με ακριβά φορτηγά ψυγεία είναι εξοπλισμένο με επαναφορτιζόμενα προφίλ PCM. Το σύστημα διαθέτει ανεμιστήρα στην κορυφή για την επιβολή συναγωγής. Τα προφίλ PCM περιοδικά φορτίζονται με μια κύρια μονάδα. Μόλις ολοκληρωθεί η φόρτιση, η επιθυμητή θερμοκρασία στο εσωτερικό του εμπορευματοκιβωτίου μπορεί να διατηρηθεί έως και 48 h. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα επιτρέπει επίσης, ψύξη, χωρίς λειτουργία του κινητήρα του φορτηγού.



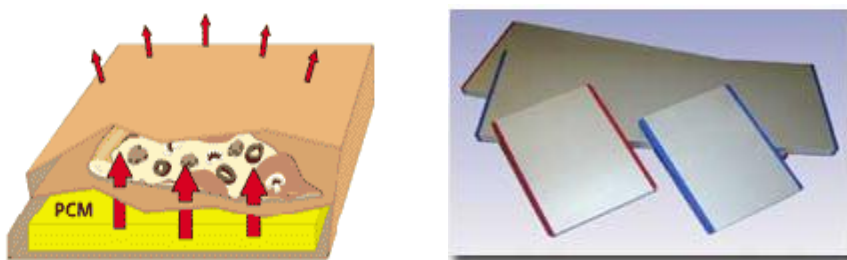
Σχήμα 3.26: (α) Δοχείο μεταφοράς, που μπορεί να διατηρήσει θερμοκρασία -18°C σε θερμοκρασία περιβάλλοντος γύρω στους 20°C για 4 ημέρες από va-Q-tec AG (β) Σύστημα θερμικής διαχείρισης που αναπτύχθηκε από ACME [52].

3.8.2 Δοχεία για τρόφιμα και ποτά [51,52]

Σε πολλές εφαρμογές τροφοδοσίας, μαγειρεμένα γεύματα παράγονται σε ένα σημείο και πρέπει να μεταφερθούν σε άλλο τόπο όπου και καταναλώνονται. Μερικά παραδείγματα είναι μεταφορές τυριών, σαλάτων, κατεψυγμένων επιδορπίων, ειδών

ζαχαροπλαστικής, ή ψαριών. Δοχεία PCMs θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να αποφευχθεί η διάσπαση της κρύας αλυσίδας κατά τη διάρκεια της μεταφοράς προμαγειρευμένων γευμάτων, φουά-γκρα, καπνιστού σολομού, παραγώγων του γάλακτος, παγωτού, και πολλών άλλων.

Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας εφαρμογής που έχει ήδη εμπορευματοποιηθεί είναι ο θερμαντήρας πίτσας (σχήμα 3.27α). Η χρήση μιας πλάκας ουσιαστικά με PCM με τη σωστή θερμοκρασία τήξης επιτρέπει τον πολλαπλασιασμό με τρία της χρονικής διάρκειας, που η πίτσα μπορεί να διατηρηθεί άνω των 65°C. Ένα δεύτερο προϊόν για να κρατήσει ζεστό το φαγητό εμφανίζεται στο σχήμα 3.27β. Είναι πλάκες κατασκευασμένες από προφίλ αλουμινίου και γεμάτες με κόκκους Rubitherm GR. Ένα άλλο παράδειγμα έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία va-Q-tec. Πρόκειται για ένα καροτσάκι που χρησιμοποιείται για τη διανομή φαγητού σε νοσοκομεία, σχολεία κ.λπ. (σχήμα 3.28α), το οποίο επιτρέπει την αποθήκευση κάτω των -10°C για 35 περίπου ώρες σε εξωτερικές θερμοκρασίες των 25°C. Άλλες εξελίξεις που παρουσιάστηκαν στο Annex 17 είναι ένα δοχείο (σχήμα 3.28β) για ζεστή μεταφορά τροφίμων σε ελεγχόμενη θερμοκρασία μεταξύ 70°C και 85°C, και ένα δοχείο (σχήμα 3.28γ) για παγωτά, που έχει την ικανότητα να διατηρεί μια θερμοκρασία κάτω των 8 °C.



Σχήμα 3.27: (α) Ιδέα εφαρμογών τροφοδοσίας: θερμαντήρας πίτσας (Merck, KGaA) [51] (β) Πλάκες θέρμανσης και ψύξης τροφίμων από Rubitherm Technologies GmbH [55].



Σχήμα 3.28: (α) Καροτσάκι για τα τρόφιμα από va-Q-tec [52] (β) Δοχείο μεταφοράς ζεστών τροφίμων στο τομέα της τροφοδοσίας (γ) Δοχείο μεταφοράς παγωτού [51].

Ό,τι λειτουργεί για το φαγητό μπορεί επίσης να εφαρμοστεί και για τα ποτά. Το «ισοθερμικό μπουκάλι», η γενική ιδέα του οποίου φαίνεται στο σχήμα 3.29α, είναι μια φιάλη διπλού τοιχώματος όπου το PCM γεμίζει το κενό μεταξύ αυτών των τοιχωμάτων. Το μπουκάλι (σχήμα 3.29β), που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Sofrigam / Γαλλία, μπορεί να κρατήσει περίπου 0,5 λίτρα ενός ποτού. Το μπουκάλι πρέπει να προψυχθεί, για παράδειγμα στο ψυγείο, για να στερεοποιηθεί το PCM. Στη συνέχεια, η φιάλη μπορεί να διατηρήσει το κρύο ρόφημα στους 13°C για 3 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C (Métivaud et al. 2005). Με τον ίδιο τρόπο με τον οποίο τα ποτά ψύχονται, είναι φυσικό επίσης, να μπορούν και να θερμαίνονται χρησιμοποιώντας το κατάλληλο PCM. Έτσι αυτή η ιδέα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε πολλά άλλα προϊόντα, όπως στην ισοθερμική διατήρηση φρέσκων ποτών (ισοθερμικό δοχείο για σαμπάνια, κάβα, κρασί, κλπ) και ζεστών ροφημάτων (σούπα, τσάι, καφές, κλπ). Μια άλλη ιδέα που έχει, επίσης, με επιτυχία εμπορευματοποιηθεί είναι ένα αυτοψυχόμενο βαρέλι ποτού, το CoolKeg, που χρησιμοποιεί την τεχνολογία ζεόλιθου (σχήμα 3.29γ), παρέχοντας τη δυνατότητα κρύας μπύρας οπουδήποτε χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα.



Σχήμα 3.29: (α) Γενική ιδέα ισοθερμικού μπουκαλιού [52] (β) Ισοθερμικό μπουκάλι νερού από την εταιρεία Sofrigam (γ) CoolKeg®, by Cool-System Bev. GmbH [51].

3.8.3 Ιατρικά προϊόντα [52,55,56]

Η αποθήκευση και η μεταφορά των ιατρικών προϊόντων είναι η πιο κατάλληλη εφαρμογή για PCM. Ο λόγος είναι ότι πολλά ιατρικά προϊόντα είναι αρκετά ακριβά και η ποιότητα τους συχνά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία αποθήκευσης και μεταφοράς. Ορισμένα προϊόντα πρέπει να μεταφέρονται μεταξύ 20°C και 24°C, άλλα μεταξύ 2°C και 6°C, και άλλα μεταξύ -30°C και -26°C. Εάν είναι δυνατόν, τα οχήματα μεταφοράς είναι κλιματιζόμενα στην επιθυμητή θερμοκρασία, αλλά η μεταφορά μεταξύ του νοσοκομείου και του οχήματος μεταφοράς και, στη

συνέχεια, μεταξύ του οχήματος και του τελικού προορισμού εξακολουθεί να αποτελεί πρόβλημα. Η συμβατική μέθοδος για να διατηρηθεί η θερμοκρασία εντός του επιτρεπόμενου εύρους θερμοκρασίας είναι η χρήση μάλλον πολύπλοκων και ακριβών συστημάτων ψύξης. Κάθε φορά που είτε παγώνει ή ζεσταίνεται το αίμα, θα πρέπει να απορρίπτεται. Ένα απλό και ανέξοδο σύστημα μεταφοράς αίματος με χρήση PCM που αναπτύχθηκε από την εταιρεία delta T είναι το 4°C TempShell (σχήμα 3.30α), που πρέπει απλά να προ-ψυχθεί στους 2 έως 4°C μέχρις ότου το ρευστό γίνει στερεό, το οποίο μπορεί εύκολα να φανεί μέσα από το διαφανές περίβλημα. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους, το delta T's 4°C TempShell δεν θα παγώσει το προϊόν.

Ακολουθώντας λοιπόν το λανσάρισμα του νέου προϊόντος της delta T πολλά από τα παραπάνω προβλήματα μπορούν πλέον να αποφευχθούν. Ένα σημαντικό στοιχείο του νέου συστήματος μεταφοράς αίματος είναι ο μοναδικός συσσωρευτής αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, που μπορεί να ενσωματώνει ένα RUBITHERM PCM (σχήμα 3.30β), ειδικά προσαρμοσμένο στις ανάγκες του συγκεκριμένου καταναλωτή. Οι συσσωρευτές ψύξης διαμορφώνονται για να σχηματίσουν ένα δοχείο σάντουιτς, που μπορεί επίσης να στοιβάζεται. Η σακούλα που περιέχει το αίμα τοποθετείται στη μέση των δύο προψυχθέντων συσσωρευτών, που στη συνέχεια στοιβάζονται σε ένα ειδικό δοχείο μεταφοράς. Αυτό εξασφαλίζει ότι το αίμα διατηρείται σε θερμοκρασία μεταξύ 2 και 10°C τουλάχιστον για 12 ώρες σε εξωτερική θερμοκρασία 35°C. Το σύστημα αυτό παρέχει τη δυνατότητα εφοδιασμού των σακουλών του αποθηκευμένου αίματος, καθεμιά από τις οποίες συσκευάζεται και ψύχεται ξεχωριστά εντός του δοχείου μεταφοράς, στο τμήμα επειγόντων περιστατικών. Αυτό σημαίνει ότι εάν το αίμα δεν απαιτείται μπορεί να επιστραφεί στην αποθήκη στην αρχική του κατάσταση. Προηγουμένως, ακόμα και αχρησιμοποίητο αίμα συχνά έπρεπε να απορριφθεί λόγω της ανεξέλεγκτης αύξησης της θερμοκρασίας π.χ κατά τη διάρκεια χειρουργείου.



Σχήμα 3.30: (α) 4°C TempShell της εταιρείας delta T [56] (β) Σύστημα μεταφοράς αίματος με αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας χρησιμοποιώντας ένα RUBITHERM PCM [55] (γ) Κουτί μεταφοράς από AB Aircontainer A.C [52].

Η σουηδική εταιρεία τώρα AB Aircontainer A.C., εξειδικευμένη στον τομέα των μεταφορών μέσω αεροπλάνων, δίνει δύο εντυπωσιακά παραδείγματα (Setterwall 2005). Το πρώτο παράδειγμα είναι η μεταφορά ενός ιατρικού προϊόντος από Σουηδία προς Μόντρεαλ / Καναδά με αεροπλάνο σε ένα κουτί μεταφοράς, όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 3.30γ. Το ιατρικό προϊόν έπρεπε να φυλάσσεται σε θερμοκρασία που να κυμαίνεται από +2°C έως +8°C και αποδείχτηκε ότι μετά από 105 ώρες έφθασε μόλις στους 5,6°C. Το δεύτερο παράδειγμα είναι η μεταφορά ενός άλλου φαρμάκου με αεροπλάνο από τη Σουηδία στο Μεξικό. Αυτό το προϊόν έπρεπε να διατηρηθεί στο επίπεδο ή κάτω των -18°C, και έφτασε στους -18°C μετά 56 ώρες.

Βιβλιογραφία 3^{ου} Κεφαλαίου

- [1] Pablo Arce Maldonado: Application of passive thermal energy storage in buildings using PCM and awnings
- [2] Χ. Τζιβανίδης: «Σημειώσεις του μαθήματος Θερμική Συμπεριφορά Κτιρίων» Εκδόσεις Ε.Μ.Π. Μάιος 2006
- [3] Atul Sharma, C.R. Chen, V.V.S. Murty, Anant Shukla: Solar cooker with latent heat storage systems: A review
- [4] M.J. Huang, P.C. Eames, B. Norton: Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials
- [5] Ming Jun Huang: The effect of using two PCMs on the thermal regulation performance of BIPV systems
- [6] Jasper Hendricks: The option of phase change materials as temperature regulation for building integrated photovoltaics
- [7] F.L. Tan, C.P. Tso: Cooling of mobile electronic devices using phase change materials
- [8] Esam M. Alawadhi and Cristina H. Amon: PCM Thermal Control Unit for Portable Electronic Devices: Experimental and Numerical Studies
- [9] F.L. Tan and S.C. Fok: Thermal Management of Mobile Phone using Phase Change Material
- [10] Norm Quesnel: A cleaner path to cool chips. Phase-change materials help heat sinks do their job, without thermal grease.
<http://machinedesign.com/article/a-cleaner-path-to-cool-chips-0620>
- [11] Thomas Ollila: Selection Criteria for Thermal Interface Materials
http://www.chomerics.com/tech/Therm_mgmt_Artcls/TIMarticle.PDF

- [12] Ravi Kandasamy, Xiang-Qi Wang, Arun S. Mujumdar: Application of phase change materials in thermal management of electronics
- [13] <http://www.cdrinfo.com/Sections/Reviews/Specific.aspx?ArticleId=21623>
- [14] <http://laptoping.com/thermaltake-ixoft-fanless-notebook-cooling-pad.html>
- [15] http://www.anglia.com/newsarchive/559.asp?article_id=1347
- [16] Richard Walters: Writing the Rulebook on Rewritables
http://www.materialsviews.com/details/news/1079289/Writing_the_Rulebook_on_Rewritables.html
- [17] Martin Bell: How DVDs and CDs store data. Reading and writing a Digital Versatile Disk or Compact Disk.
<http://martin-bell.suite101.com/how-dvds-and-cds-store-data-a99984>
- [18] <http://www.pantherproducts.co.uk/Articles/Storage/optical-media.html>
- [19] <http://www.tweak3d.net/articles/opticals/2.shtml>
- [20] A. Shanmuga Sundaram, R.V. Seeniraj, R. Velraj: An experimental investigation on passive cooling system comprising phase change material and two-phase closed thermosyphon for telecom shelters in tropical and desert regions
- [21] Abdel-Kader Darwiche, Samivullah Shaik: Air conditioning remote telecom enclosures.
http://findarticles.com/p/articles/mi_m5PRB/is_3_50/ai_n31945810/?tag=mantle_skin;content
- [22] Anthony P. Cosentino: Thermal Management of Telecommunications Batteries using Phase Change Materials (PCM) Jacket™
- [23] <http://teappcm.com/products/telecomshelters.htm>
- [24] Ki-bum Kim, Kyung-wook Choi, Young-jin Kim, Ki-hyung Lee, Kwan-soo Lee: Feasibility study on a novel cooling technique using a phase change material in an automotive engine
- [25] A. Jamekhorshid, S.M. Sadrameli: Application of Phase Change Materials (PCMs) in Maintaining Comfort Temperature inside an Automobile
- [26] Aravin Prince: Phase change materials: overview
<http://www.fibre2fashion.com/industry-article/9/884/phase-change-materials-overview3.asp>
- [27] http://delphi.com/news/pressReleases/pr_2011_04_13_001/
- [28] E Korin, R Reshef, D Tshernichovesky and E Sher: Reducing cold-start emission from internal combustion engines by means of a catalytic converter embedded in a phase-change material
- [29] Aristotel Popescu, Gheorghe Dumitrascu, Bogdan Horbaniuc: Thermal Energy Storage for Autovehicles: Source of Energy and Clean Environment

- [30] <http://bmwm5a.blogspot.com/2011/07/e39-m5-latent-heat-storage-system.html>
- [31] L.L. Vasiliev, V.S. Burak, A.G. Kulakov, D.A. Mishkinis, P.V. Bohan: Latent heat storage modules for preheating internal combustion engines: application to a bus petrol engine
- [32] X. Duan, G.F. Naterer: Heat transfer in phase change materials for thermal management of electric vehicle battery modules
- [33] S.X. Wang, Y. Li, J.Y. Hu, Hiromi Tokura, Q.W. Song: Effect of phase-change material on energy consumption of intelligent thermal-protective clothing
- [34] Harald Mehling and Luisa F. Cabeza: Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications, Chapter 8: Applications for the human body
- [35] <http://www.fibre2fashion.com/industry-article/9/884/phase-change-materials-overview2.asp>
- [36] S. Mondal: Phase change materials for smart textiles – An overview
- [37] <http://smartgarments.blogspot.com/2007/12/intelligence-in-textiles-next-step.html>
- [38] Kristy Annely: Men's Thermal Underwear
<http://ezinearticles.com/?Mens-Thermal-Underwear&id=410772>
- [39] <http://gearjunkie.com/everest-gear>
- [40] <http://www.outlast.com/index.php?id=70&L=0>
- [41] http://www.sierrabmwonline.com/index.php/bmw-riders-apparel-2011-bmw-functional-underwear-c-169_80
- [42] F.L. Tan, S.C. Fok: Cooling of helmet with phase change material
- [43] http://www.tuffrhino.com/Crown_Cooler_p/hs3038.htm
- [44] http://www.bykebitz.co.uk/acatalog/Revit_Kelvin_H2O_Glove.html
- [45] <http://www.mamasandpapas.com/cat/mattress-guide-sleepfresh/>
- [46] <http://fourpastfour.com/2010/06/07/isocool-accessories-enhance-rest/>
- [47] Halime Ö Paksoy: Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption Fundamentals, Case Studies and Design, Chapter 19: Luisa Cabeza and Harald Mehling, Temperature control with phase change materials
- [48] Ben Coxworth: Infant Warmer would keep premies safe and warm in developing nations
<http://www.gizmag.com/infant-warmer-for-babies-in-developing-nations/18332/>
- [49] Rebecca Boyle: New Phase-Changing Gel Method Repairs Severed Blood Vessels Better than Stitches
<http://www.popsci.com/science/article/2011-08/new-gel-glue-method-rejoins-cut-blood-vessels-better-stitches>

- [50] Yonggang Lv, Yang Zou, Li Yang: Feasibility study for thermal protection by microencapsulated phase change micro/nanoparticles during cryosurgery
- [51] Andreas Hauer, Harald Mehling, Peter Schossig, Motoi Yamaha, Luisa Cabeza, Viktoria Martin, Fredrik Setterwall: Advanced Thermal Energy Storage through Phase Change Materials and Chemical Reactions – Feasibility Studies and Demonstration projects, ftp://ftp.grenoble.cstb.fr/Public/MESSIB-CSTB/TASK%201/ANNEX-17-eces_FINAL%20REPORT.pdf
- [52] Harald Mehling and Luisa F. Cabeza: Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications, Chapter 7: Applications in transport and storage containers
- [53] Phase Change Material Used in Temperature Controlled Packaging & Transport <http://www.thefreelibrary.com/Phase+Change+Material+Used+in+Temperature+Controlled+Packaging+%26...-a01073963946>
- [54] <http://www.packagingnetwork.com/product.mvc/Exo-Gel-Phase-Change-Material-0001>
- [55] <http://www.rubitherm.com/english/index.htm>
- [56] http://www.deltat.de/english/products/cooling_elements/TempShells.htm

Κεφάλαιο 4^ο: Κτιριακές εφαρμογές των PCMs

4.1 Ιστορική αναδρομή [1]

Σκοπός της συγκεκριμένης παραγράφου είναι να δοθεί μια συνοπτική παρουσίαση των εξελίξεων στο τομέα της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με χρήση υλικών αλλαγής φάσης στα κτίρια, εντοπίζοντας παράλληλα τους βασικούς παράγοντες, που είναι υπεύθυνοι για την αρχική διερεύνηση και την έρευνα στο θέμα αυτό. Ακόμα αναφέρονται λεπτομέρειες ερευνητικών προγραμμάτων που έχουν αναληφθεί από κρατικά πανεπιστήμια και εθνικά εργαστήρια ανά τον κόσμο μαζί με σημαντικά ευρήματα όσον αφορά τα υλικά.

Η χρήση πάγου ως PCM ήταν ένα από τα πρώτα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν. Σπίτια από πάγο χτίστηκαν ενσωματώνοντας μεγάλα τμήματα πάγου κομμένα από κατεψυγμένα ποτάμια κατά τη χειμερινή περίοδο και τα οποία περιέχονταν σε μόνωση πριονιδιού για παροχή πάγου, που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κατά τις περιόδους της άνοιξης.

4.1.1 Πρώτες προσπάθειες

Πολλές προσπάθειες από την εποχή των σπιτιών από πάγο έχουν γίνει με την πρώτη να αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1920 μαζί με έναν αριθμό δειγμάτων τύπων σπιτιών κατασκευασμένα στα τέλη της δεκαετίας του 1940 και του 1970. Τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν θεωρήθηκαν επιτυχή αν και καμία ανάπτυξη δεν δημιουργήθηκε από τα πρώτα παραδείγματα, λόγω της έλλειψης χρηματοδότησης και εμπιστοσύνης. Στη συνέχεια παρατίθενται λεπτομερώς ορισμένα από τα πρώτα καινοτόμα συστήματα θερμικής αποθήκευσης με PCM.

4.1.1.1 Δρ. Maria Telkes

Από τη διεξαγωγή σημαντικής έρευνας για τα πιθανά υλικά και συστήματα για θερμική αποθήκευση με PCM, η Δρ Maria Telkes αναγνώρισε τις δυνατότητες των PCM για να απασχοληθούν στη θέρμανση κτιρίων. Το 1946, το προτεινόμενο δοκιμαστικό σπίτι, που ονομάζεται «The Dover House», ήταν να κατασκευαστεί σε ένα κτήμα στο Dover Mass, 5 μίλια από τη Βοστώνη των ΗΠΑ. Το σπίτι ήταν ενός ορόφου, πέντε δωματίων με εμβαδόν δαπέδου 135 m² εκ των οποίων δύο υπνοδωμάτια, μήκους 23m και βάθους ενός δωματίου. Η θερμική ακτινοβολία συλλεγόταν από 18 ηλιακούς συλλέκτες με την παραγόμενη θερμότητα από αυτά τα πάνελ να μεταβιβάζεται κατά μήκος ενός αγωγού μέσω ενός ανεμιστήρα σε τρία δοχεία αποθήκευσης θερμότητας που βρίσκονται εκατέρωθεν των δωματίων και τα οποία ήταν γεμάτα με άλας του Glauber.

Με ένα σύνολο 21 τόνων PCM, το σύστημα είχε τη δυνατότητα ικανότητας αποθήκευσης θερμότητας 4,7 εκατομμυρίων Btu (11MJ). Το άλας Glauber κρατώντας την ικανότητα να αποθηκεύει θερμικό φορτίο 12 ημερών θα παρείχε μια αισθητή αποθήκευση θερμότητας μεταξύ της θερμοκρασίας του χώρου και του σημείου τήξεώς του, που ισούται με 32°C. Το σπίτι ολοκληρώθηκε το 1948 με το κόστος να υπολογίζεται στα \$20.000 με τη συσκευή ηλιακής θέρμανσης στα \$3.000. Η περιοχή επιλέχθηκε από Telkes λόγω του γεγονότος ότι η ετήσια ηλιοφάνειά της είναι άνω του μέσου όρου της περιοχή εγγυώντας μ' αυτό τον τρόπο μέγιστη χρήση του ηλιακού συστήματος. Τα δύο πρώτα χρόνια αποδείχθηκε το σύστημα να είναι ιδιαίτερα επιτυχημένο, ακόμη και κατά τη διάρκεια περιόδων έως και επτά ημερών νεφελώδους καιρού. Το σύστημα λειτούργησε με επιτυχία, παρέχοντας ένα άνετο εσωτερικό περιβάλλον στους περίπου 21°C χωρίς να απαιτείται χρήση οποιουδήποτε δευτερογενούς εφεδρικού συστήματος θέρμανσης.

4.1.1.2 Δρ. Lawrence Gardshire

Ένα παρόμοιο κατοικημένο σπίτι αργότερα σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας παρόμοιες αρχές με τον σχεδιασμό της Δρ Maria Telkes. Το σπίτι που χτίστηκε από Δρ. Lawrence Gardshire στο Νέο Μεξικό ήταν ένα διώροφο με εμβαδόν δαπέδου 102 m² και με τους υαλοπίνακες του συλλέκτη να τοποθετούνται στη δομή της οροφής. Σε αντίθεση με το σχεδιασμό Telkes που περιλαμβάνει κάδους PCM τοποθετημένους στο επίπεδο του ισογείου, τα δοχεία αποθήκευσης εντοπίστηκαν δίπλα στους συλλέκτες μέσα στο χώρο της στέγης. Η μόνη διαφορά στη σύνθεση των δοχείων με PCM ήταν η προσθήκη του BOREX στο άλας Glauber, που ενεργεί ως παράγοντας πυρήνωσης προκειμένου να αντιμετωπιστεί έτσι ένα από τα βασικά προβλήματα με αυτή τη μορφή PCM που είναι η ικανότητά του να διαχωρίζει το άνυδρο θειικό νάτριο κατά την τήξη, με αποτέλεσμα τη μειωμένη θερμοχωρητικότητα μετά από μία σειρά κύκλων ψύξης-απόψυξης το οποίο αποτέλεσε και την αιτία της αποτυχίας του συστήματος Telkes.

4.1.1.3 Δρ J. W. Hodgins και Δρ T. W. Hoffman

Ένα μεταγενέστερο σχέδιο εκπονήθηκε από τους Δρ J. W. Hodgins και Δρ T. W. Hoffman στη Βασιλική Στρατιωτική Ακαδημία του Καναδά, για την κατασκευή ενός ακινήτου, χρησιμοποιώντας αποθήκευση θερμότητας με βάση την τεχνολογία PCM. Η Δρ Maria Telkes διορίστηκε για να σχεδιάσει τα δοχεία θερμικής αποθήκευσης με PCM λόγω της προηγούμενης εμπειρίας της στον τομέα PCM. Το σπίτι ολοκληρώθηκε το 1959, το οποίο περιλαμβάνει 111 m² επιφάνειας δαπέδου καταμεμημένα σε δύο ορόφους ενσωματώνοντας 12 τόνους πυρηνωποιημένου άλατος Glauber, στους οποίους περιέχεται πυριτικό νάτριο ως παράγοντας

πύκνωσης, και Chromate ως ανασχετικό διάβρωσης. Παρόμοια με το προηγούμενο σχέδιο το PCM περιέχεται σε δοχεία χάλυβα 100 mm x 600 mm μάκρους, κατακόρυφης κατασκευής.

4.1.2 Ερευνητική δραστηριότητα

Η αναγνώριση της ανάγκης για ένα δομημένο πρόγραμμα έρευνας από το πανεπιστήμιο της Πενσυλβάνια στο τομέα της θερμικής αποθήκευσης με αλλαγή φάσης για να ξεπεραστούν πολλά προβλήματα, που ανακαλύφθηκαν παλαιότερα, οδήγησε το 1971 στην ανάπτυξη του πρώτου ερευνητικού προγράμματος, που εκτελέστηκε από μια ομάδα από τρεις κορυφαίους επιστήμονες στον τομέα λανθάνουσας θερμότητας με χρηματοδότηση από το National Science Foundation των ΗΠΑ. Ο στόχος της έρευνας ήταν να ανακαλύψει έναν αριθμό οργανικών και ανόργανων PCM κατάλληλα για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης, σε συνδυασμό με λεπτομερή ανάλυση του κόστους PCM, οικονομική ανάλυση και ικανότητα αποθήκευσης. Η μελέτη βασίστηκε γύρω από τα ακόλουθα υλικά: ένυδρα άλατα, οργανικά εύτηκτα, ένυδροι κλειθρίτες, οργανικά-ανόργανα εύτηκτα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι $K_2HPO_4 \cdot 6H_2O$ (ανόργανο PCM) και ορισμένα κεριά παραφίνης (οργανικά PCM) ήταν ευνοϊκά για εφαρμογές κλιματισμού. Τα δύο πιο ελπιδοφόρα PCM για θέρμανση χώρου ήταν $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ και $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ (και τα δύο είναι οργανικά PCM).

Το έτος 1973 ήταν ένα σημαντικό ορόσημο για την ανάπτυξη της τεχνολογίας λανθάνουσας θερμότητας με PCM και της έρευνας εξαιτίας του Αραβο-ισραηλινού πολέμου και του επακόλουθου αραβικού πετρελαϊκού εμπάργκο, που κατέστησε πολύ σαφές ότι η μελλοντική παροχή καυσίμου μπορεί εύκολα να διαταραχθεί λόγω πολιτικών γεγονότων και εξάντλησης μιας σημαντικής πηγής καυσίμου. Αυτό ώθησε πολλές κυβερνητικές οργανώσεις στην έρευνα εναλλακτικών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με έμφαση στον τομέα της ηλιακής ενέργειας, στην ανάκτηση απωλειών θερμότητας και αποθήκευση θερμότητας. Έρευνα λοιπόν με σημαντική τώρα δαπάνη χρηματοδότησης σε γενικές γραμμές πραγματοποιήθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο, στις ΗΠΑ, τη Γερμανία και τη Γαλλία όπως θα δούμε και στη συνέχεια. που σε μεγάλο βαθμό επικεντρώθηκαν στην ηλιακή ενέργεια, λόγω της έλλειψης προόδου στον τομέα ως σύνολο.

4.1.2.1 ΗΠΑ

Ως αποτέλεσμα της ανάγκης για έρευνα, που μεγάλωσε σε συστήματα θερμικής αποθήκευσης, οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής πρωτοστάτησαν στο πρώτο μεγάλης κλίμακας ερευνητικό πρόγραμμα που χρηματοδοτήθηκε από National Science Federation. Dow Chemical (επιστημονική ομάδα που ηγείται στον τομέα

PCM εκείνη την περίοδο) βραβεύτηκε για την εκτέλεση έρευνας, που αποτελούταν από περίπου 20.000 δοκιμές πιθανών PCM. Λόγω του μεγέθους του ερευνητικού έργου επιπλέον σύμβουλοι επιστήμονες ενεπλάκησαν από τον Καναδά για να συμμετέχουν στη διαδικασία. Η έρευνα χρησιμοποίησε την προηγούμενη εξέλιξη του Πανεπιστημίου της Πενσυλβάνια για να δημιουργήσει μια βάση δεδομένων όλων των προηγούμενων πηγών λανθάνουσας θερμότητας PCM. Από τα αρχικά 20.000 PCM που δοκιμάστηκαν, μόνο το 1% επιλέχθηκε για περαιτέρω έρευνα, που θεωρήθηκαν ως εν δυνάμει υποψήφια. Τα υλικά που επιλέχθηκαν ήταν μια σειρά ένυδρων αλάτων ομοιόμορφης τήξης και κοινά οργανικά υλικά.

Κατά τη διάρκεια των ερευνητικών δραστηριοτήτων της Dow Chemical, Δρ Maria Telkes (Πανεπιστήμιο του Delaware) συνέχισε την έρευνα για τους τρόπους βελτίωσης της μακροβιότητας του άλατος Glauber. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση διαφόρων πηκτικών μέσων για πάχυνση του άλατος Glauber αύξησαν δραματικά τη διάρκεια ζωής των υλικών αν και η μείωση της ικανότητας αποθήκευσης θερμότητας εξακολουθούσε να υπάρχει μετά από περίπου 1000 κύκλους ψύξης-απόψυξης. Περαιτέρω έρευνα πραγματοποιήθηκε από τον Δρ S.B Marks από το Πανεπιστήμιο του Delaware που προσπάθησε με ανάμειξη του άλατος Glauber με είδος πηλού να ενεργεί ως πηκτικό μέσο και το οποίο τελικά οδήγησε σε αυξημένους κύκλους αποθήκευσης θερμότητας αλλά με μείωση ακόμα στην αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας. Ο Δρ S. B. Marks συνέχισε την έρευνά του χρησιμοποιώντας μια σειρά από άλλες μορφές πηκτικών μέσων όπως πολυμερές πολυκαρβοξυλικού οξέος που αύξησε την μακροβιότητα της ικανότητας αποθήκευσης θερμότητας.

Ο Δρ P. G. Rueffel, ενδιαφέρθηκε επίσης για χρήση του άλατος Glauber ως PCM και πραγματοποίησε μια σειρά δοκιμών χρησιμοποιώντας μήτρα τύρφης για να απορροφήσει το PCM. Τα αποτελέσματα βρήκαν ότι η τύρφη σχηματίζοντας ένα ινώδες δίκτυο, που απορροφά το PCM, δημιουργεί ένα ιδανικό πηκτικό μέσο με αποτέλεσμα τη μακροβιότητα της θερμικής αποθήκευσης. Άλλες εναλλακτικές λύσεις με βάση την παραπάνω έχουν ερευνηθεί από Boardman Energy Systems, ΗΠΑ, όπου μίγμα PCM δημιουργείται από άλας Glauber με κοινό τσιμέντο Portland παρέχοντας μια αναστολή των δύο υλικών κατά την έκχυση και σκλήρυνση. Τα αποτελέσματα δοκιμής έδειξαν ότι πάνω από 2000 κύκλοι δεν οδήγησαν σε καμιά μείωση της θερμικής αποθήκευσης. Το σύστημα αυτό είναι χημικά σταθερό (ασφαλές) και παρέχει μεγάλες δυνατότητες ως σύστημα θερμικής αποθήκευσης με PCM για κτιριακές εφαρμογές. Περαιτέρω ανάλυση των φτηνών ένυδρων αλάτων συνεχίστηκε από το Πανεπιστήμιο του Delaware, ΗΠΑ όπου ένα πειραματικό σπίτι πλήρους

μεγέθους κατασκευάστηκε, και στο οποίο το 1976 η ερευνητική ομάδα Dow Chemical με πρόσθετη χρηματοδότηση συνέχισε την έρευνα.

Κατά τη διάρκεια της αρχικής μελέτης της Dow Chemical για τον προσδιορισμό πιθανών PCM, το κερί παραφίνης που είναι μια οργανική ουσία, σχετικά φθηνά και μεγάλης προσφοράς βρέθηκε να είναι ένα πιθανό υλικό αποθήκευσης για την οικοδομική βιομηχανία. Δρ John Bailey και λοιποί συνεργάτες αποφάσισαν να ερευνήσουν αυτήν την περιοχή περαιτέρω επικεντρώνοντας σε θερμοσυσσωρευτές αλουμινίου κυψελωτού πλέγματος με ενσωματωμένη παραφίνη (n-eicosane), που έχει σημείο τήξης 36°C. Το 1974, περαιτέρω μελέτες πραγματοποιήθηκαν από Δρ T. R. Galloway. Η μελέτη βασίστηκε γύρω από τη χρησιμοποίηση κεριού παραφίνης PCM σε τρεις διαφορετικές εφαρμογές θέρμανσης: δεξαμενή PCM με πλαστικό πηνίο ανταλλαγής θερμότητας, δοχεία από χάλυβα γεμάτα με PCM που περιβάλλονται από νερό μέσα σε μια δεξαμενή και μεγάλοι δίσκοι με κερί ενσωματωμένο σε κάψουλες που περιβάλλονται από νερό σε μια δεξαμενή. Τα ερευνητικά ιδρύματα των ΗΠΑ έχουν κυρίως επικεντρωθεί σε οργανικά PCM με την έρευνα σε μη οργανικά PCM να είναι πιο διερευνημένη στο εσωτερικό της Ευρώπης.

4.1.2.2 Ευρώπη

Οι επιστήμονες στη Γερμανία ερευνώντας τη τεχνολογία θερμικής αποθήκευσης με PCMs παρείχαν λεπτομερείς χάρτες και πίνακες των PCM με φυσικές και θερμικές ιδιότητες, υλικών για κατασκευές και ιδιοτήτων μόνωσης. Η κύρια έρευνα έχει επικεντρωθεί γύρω από τα ένυδρα άλατα, παραφίνες και κλειθρίτες για εφαρμογές κάτω των 100°C. Ερευνητικές ομάδες στο Πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης έχουν πραγματοποιήσει σημαντικές έρευνες διάφορων οργανικών και υποψηφίων ένυδρων αλάτων σε δοχεία σωλήνων με πεπερηγία, που περιέχουν εναλλάκτες θερμότητας σε συνδυασμό με σωλήνες θερμότητας. Μια ιδιωτική εταιρεία στη Δυτική Γερμανία διεξήγαγε έρευνα για να εξετάσει τις διαφορετικές επιδόσεις διάφορων PCM στο BBC Solar House, που θερμαίνεται με μια αντλία θερμότητας χρησιμοποιώντας νερό αρχικά ως μέσο αποθήκευσης. Οι ερευνητές αποφάσισαν να αλλάξουν το μέσο αποθήκευσης στη συνέχεια με πάγο και μετά με παραφίνη (m.p. 18 έως 25°C) απ' όπου προέκυψε ότι η παραφίνη παρείχε τη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και επίσης αύξησε το COP της αντλίας θερμότητας από 2,6 σε 3,3 καθώς και απαιτούσε το μισό του απαιτούμενου όγκου του νερού παρέχοντας έτσι και μεγαλύτερη οικονομική αποδοτικότητα.

Ακόμα στη Σουηδία παρατηρείται σημαντική πρόοδος της τεχνολογίας αποθήκευσης με PCM, που λαμβάνει χώρα στην Energiteknik Studsvik AB με επικεφαλή τον Prof. H. Hedman. Η έρευνα συγκεντρώνεται γύρω από την εφαρμογή

των ένυδρων αλάτων, χρησιμοποιώντας αέρα ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας. Τα συστήματα ενσωματωμένων PCM σε μεταλλικές κάψουλες αποδείχθηκαν πιο αποτελεσματικά από τις δεξαμενές νερού και τα πετρώματα, που χρησιμοποιούνται σήμερα για παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης σε εγχώρια σπίτια στη Δανία. Ένα κοινό έργο κατασκευής τριών διαφορετικών συστημάτων θέρμανσης, που περιλαμβάνει τρεις μεγάλες μορφές σουηδικής κατασκευής, πραγματοποιήθηκε για την διερεύνηση της δυνατότητας ενσωμάτωσης PCM εντός των υπηρεσιών του κτιρίου. Το πρώτο με ένα τυπικό περιφερειακό σύστημα θέρμανσης ζεστού νερού, το δεύτερο χρησιμοποιώντας εξαναγκασμένη θέρμανση ζεστού αέρα και εκτός αιχμής ισχύ άλλαξε για να αποθηκεύσει ένα ενσωματωμένο PCM σε κάψουλες σε σφραγισμένους γραμμικούς σωλήνες πολυαιθυλενίου. Και το τρίτο, ένα παρόμοιο σύστημα με το δεύτερο, αλλά με ηλιακούς συλλέκτες ψύξης αέρα ως κύρια πηγή θερμότητας.

Για πολλά χρόνια, η Γαλλία επίσης έχει διεξάγει έρευνα σχετικά με την τεχνολογία θερμικής αποθήκευσης με PCM και μέσω της έρευνας στο CNRS, στη Νίκαια, έχει κατασκευάσει πολλά κτίρια, που χρησιμοποιούν την τεχνολογία εκεί. Το CNRS αναπτύσσει επίσης έρευνα σχετικά με κερί παραφίνης ως PCM, μέσω δοκιμών συστημάτων, που ενσωματώνουν μείγματα μετάλλων για να αυξήσουν τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας. Επιστήμονες από το Center Scientific et Technique du Batiment στο Παρίσι πατεντάρισαν συσκευές, που ενσωματώνουν PCM με σημεία τήξης από 15 έως 40°C για χρήση σε εφαρμογές κλιματισμού του αέρα. Εκτός από τη Γαλλία και το Ηνωμένο Βασίλειο με το βρετανικό Κέντρο Ερευνών, Garston, Watford έχει εδώ και πολλά χρόνια πραγματοποιήσει έρευνα για το θέμα της τεχνολογίας θερμικής αποθήκευσης με PCM. AKRBromley, EMMcKay και JP Wilkins αποτελούν την ομάδα μελέτης θερμικής αποθήκευσης και έχουν διεξάγει έρευνα σε εφαρμογές θέρμανσης με αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας και ιδιαίτερα με αποθήκευση σε πάγο. Μια μικρή ομάδα επιστημόνων τώρα στο Πανεπιστήμιο του Salford, πραγματοποίησε έρευνα για το ενυδατωμένο φωσφορικό νάτριο και εξαένυδρο χλωριούχο ασβέστιο και μαζί με το Πανεπιστήμιο του Cardiff, στην Ουαλία, ανέπτυξε την τεχνολογία PCM με παραφίνη ως μέσο αποθήκευσης.

4.1.2.3 Άπω ανατολή (Ιαπωνία)

Η Ιαπωνία εκτελεί ηγετικό ρόλο παράλληλα με τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής στην τεχνολογία θερμικής αποθήκευσης με PCM έχοντας ερευνητικές ομάδες μελέτης για πολλά χρόνια με ισχυρή κυβερνητική υποστήριξη. Τα υλικά που κρίθηκαν ως τα πλέον επιτυχημένα κατά τη διάρκεια έρευνας από Mitsubishi Electronic Corp. και Tokyo Electric Power Co. ήταν τα ένυδρα νιτρικά άλατα,

φωσφορικά άλατα, φθοριούχα άλατα και χλωριούχο ασβέστιο. Η έρευνα μέχρι τη δεκαετία του 1970 επικεντρωνόταν στα συστήματα θέρμανσης με αποθήκευση θερμότητας με PCM αν και πιο πρόσφατες εξελίξεις έχουν συγκεντρωθεί και σε εφαρμογές ψύξης. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, αρκετές νέες οργανώσεις, συμπεριλαμβανομένων Nirron Pillar Packing Co., πατεντάρισαν ένα εξαένυδρο βρωμιούχο ασβέστιο ως PCM μαζί με παράγοντες σχηματισμού πυρήνων. Άλλες όπως Kureha Chemical Industry Inventors χρησιμοποίησαν την έρευνα του άλατος Glauber ως PCM για θέρμανση και ψύξη, χρησιμοποιώντας γύψο και άλλα ελαφρού βάρους αδρανή υλικά για τη σταθεροποίηση του PCM. Σημαντική έρευνα και ανάπτυξη πραγματοποιήθηκε σε μια σειρά από εύτηκτα νιτρικά άλατα για εφαρμογές σε θερμοκρασία δωματίου. Yoneda και Takanashi ανέπτυξαν μια σειρά από μοντέλα, χρησιμοποιώντας ένα απλό εναλλάκτη θερμότητας για την παρακολούθηση του συστήματος PCM, και οι οποίοι κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το σύστημα ήταν πολύ αποτελεσματικό, αλλά προβλήματα εμφανίστηκαν όταν συνδέθηκε με ένα ηλιακό συλλέκτη που είχε ως αποτέλεσμα μια σημαντική μείωση της αποτελεσματικότητας.

4.2 Αρχές λειτουργίας των PCMs για θέρμανση/ψύξη σε κτίρια

4.2.1 Προϋποθέσεις ανθρώπινης άνεσης [2]

Η πρωταρχική λειτουργία των περισσότερων κτιρίων είναι να αποτελέσουν ένα καταφύγιο για την πρόληψη κατάψυξης ή υπερθέρμανσης του ανθρώπινου σώματος. Για να αποτραπεί κάτι τέτοιο θα πρέπει να υπάρχει κατάλληλη ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του σώματος και του γύρω περιβάλλοντος, που είναι συνδυασμός διαφόρων παραγόντων όπως της θερμοκρασίας του αέρα και των επιφανειών του δωματίου, της κίνησης του αέρα και της υγρασίας. Ο λόγος είναι ότι η συνολική μεταφορά θερμότητας προς ή από το ανθρώπινο σώμα καθορίζεται από το άθροισμα όλων των τρόπων μεταφοράς της θερμότητας: αγωγή, συναγωγή, ακτινοβολία, και εξάτμιση. Για παράδειγμα, με την άνοδο της θερμοκρασίας του αέρα (μεταφορά θερμότητας με συναγωγή), η θερμοκρασία των γύρω επιφανειών (μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία) πρέπει να μειωθεί για να διατηρηθεί η μεταφορά θερμότητας μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του περιβάλλοντος κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο για την ανθρώπινη άνεση. Όσον αφορά την τεχνολογία PCM, οι βασικές παράμετροι των απαιτήσεων ανθρώπινης άνεσης είναι η θερμοκρασία του αέρα και των γύρω επιφανειών, επειδή το PCM μπορεί να επηρεάσει μόνο αυτές τις παραμέτρους. Η σχετική υγρασία μπορεί να επηρεαστεί έμμεσα, επειδή είναι μια συνάρτηση της θερμοκρασίας του αέρα. Όλα τα άλλα όμως όπως η κίνηση του αέρα, το επίπεδο θορύβου, κλπ. είναι οριακές συνθήκες για ένα σύστημα.

4.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την εσωτερική θερμοκρασία του αέρα [2,3]

Ορισμένοι παράγοντες που επηρεάζουν την εσωτερική θερμοκρασία του αέρα του κτιρίου είναι οι κλιματικές συνθήκες (εξωτερική θερμοκρασία, ταχύτητα του ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία κλπ.) η κτιριακή δομή και οι θερμοφυσικές ιδιότητες του οικοδομικού υλικού (πάχος τοιχώματος, σχέση των επιφανειών παραθύρου και τοίχου, θερμική αγωγιμότητα και ειδική θερμότητα του υλικού του τοίχου κλπ.), η εσωτερική πηγή θερμότητας, που προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται από τους ανθρώπους και τις συσκευές (π.χ. φούρνο, τηλεόραση, υπολογιστής κλπ.), ο ρυθμός εναλλαγών του αέρα ανά ώρα (ACH) και οι βοηθητικές εγκαταστάσεις θέρμανσης / ψύξης, κλπ. Η διαφορά μεταξύ της εσωτερικής θερμοκρασίας και του εύρους άνεσης καθορίζει το φορτίο θέρμανσης και ψύξης, όταν δεν υπάρχει θέρμανση και ψύξη του χώρου. Επομένως, το φορτίο θέρμανσης και ψύξης θα μειώνεται με τη μείωση αυτής της διαφοράς θερμοκρασίας.

Για ένα δεδομένο κτίριο, που βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη περιοχή, οι παράμετροι δομής του κτιρίου, όπως το πάχος των τοιχωμάτων, η αναλογία της περιοχής παραθύρου προς τοίχου, το σχήμα του δωματίου κλπ., είναι γνωστές. Η εξωτερική θερμοκρασία t_{out} και ηλιακή ενέργεια $q_{r,out}$, αλλάζουν με τη διαφορετική ώρα και ημέρα κατά τη διάρκεια ολόκληρου του έτους. Στη συνέχεια, με μια ορισμένη εσωτερική πηγή θερμότητας, η φυσική θερμοκρασία δωματίου t_{in} (δηλαδή, η θερμοκρασία του δωματίου χωρίς καμία ενεργή ψύξη ή θέρμανση) εξαρτάται από τις θερμοφυσικές ιδιότητες του υλικού (δηλαδή, τη θερμική αγωγιμότητα, k , και το γινόμενο της πυκνότητας και της ειδικής θερμότητας, ρc_p). Προκειμένου λοιπόν να διατηρήσουμε την τιμή της t_{in} στην περιοχή της θερμικής άνεσης (π.χ., κατώτατο όριο t_L και ανώτατο όριο t_H , που μπορεί να είναι 18 και 28°C, αντίστοιχα) μπορούμε να καθορίσουμε για ένα δεδομένο ACH τις ζητούμενες τιμές των k και ρc_p .

Για τη μελέτη της επίδρασης των θερμοφυσικών ιδιοτήτων διαφορετικών υλικών στον εσωτερικό βαθμό θερμικής άνεσης έχουν οριστεί δύο παράμετροι, I_{win} και I_{sum} , που περιγράφονται από τις ακόλουθες σχέσεις. Οι δύο παράμετροι περιγράφουν το εσωτερικό επίπεδο δυσφορίας του κτιρίου το χειμώνα και το καλοκαίρι και ονομάζονται ολοκληρωμένο επίπεδο δυσφορίας λόγω εσωτερικής θερμοκρασίας το καλοκαίρι (I_{sum}) και ολοκληρωμένο επίπεδο δυσφορίας λόγω εσωτερικής θερμοκρασίας το χειμώνα (I_{win}), αντίστοιχα.

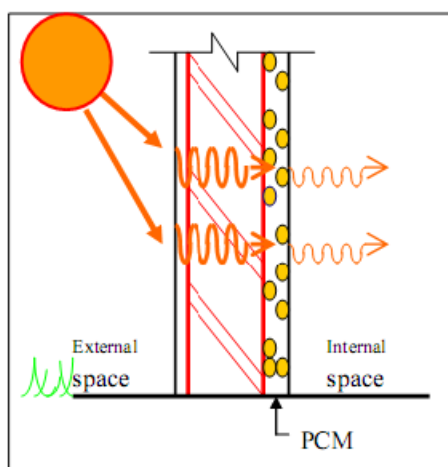
$$I_{sum} = \int_{year} (t_{in} - t_H) dt \text{ όταν } t_{in} > t_H \quad (4.1)$$

$$I_{win} = \int_{year} (t_L - t_{in}) dt \text{ όταν } t_{in} < t_L \quad (4.2)$$

Αν υπάρχουν ορισμένα δομικά υλικά, των οποίων οι τιμές των ρc_p και k μπορούν να κάνουν το δεδομένο δωμάτιο να πληροί την προϋπόθεση $I_{win} = I_{sum} = 0$, καλούμε αυτά τα υλικά, ιδανικά δομικά υλικά. Αυτό σημαίνει ότι η εσωτερική θερμοκρασία θα είναι μέσα στην περιοχή άνεσης όλο το χρόνο χωρίς βοηθητική θέρμανση ή ψύξη. Στην πραγματικότητα, είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί οποιοδήποτε συμβατικό υλικό όπως είναι για παράδειγμα το τσιμέντο, με μια τόσο υψηλή τιμή ρc_p ώστε να μπορεί να ικανοποιηθεί η παραπάνω συνθήκη. Τα PCMs όμως μπορούν να προσφέρουν υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με τη μορφή της λανθάνουσας θερμότητας στην στενή περιοχή θερμοκρασιών η οποία συνήθως συναντάται στα κτίρια και γι' αυτό το λόγο λαμβάνονται υπόψη για εφαρμογή.

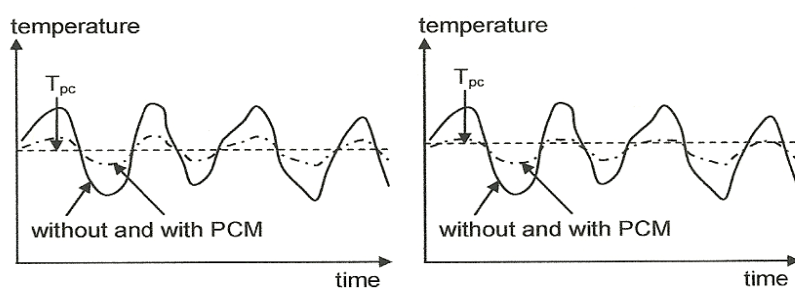
4.2.3 Δυνατότητα των PCMs για έλεγχο της θερμοκρασίας [2 – 5]

Ο κύριος σκοπός της χρήσης PCM είναι ότι μπορεί να αποθηκεύσει μια μεγάλη ποσότητα ενέργειας στο πλαίσιο της μετάβασης φάσης. Η θερμοκρασία του PCM είναι σχεδόν σταθερή κατά τη διάρκεια της διαδικασίας τήξης και στερεοποίησης. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα όταν υπερβολική θερμότητα από την ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει μια πρόσοψη κτιρίου (σχήμα 4.1) και μεταφέρει τη θερμότητα μέσω αγωγής στο εσωτερικό χώρο του κτιρίου. Τυπικές προσόψεις χωρίς την εγκατάσταση του PCM άγουν την ηλιακή ακτινοβολία και θερμαίνουν δραματικά τον εσωτερικό χώρο. Αντίθετα, προσόψεις κτιρίων όπου εγκαθίσταται PCM, που αλλάζει σταδιακά φάση, αποθηκεύουν ένα μεγάλο μέρος της θερμότητας στη διάρκεια της ημέρας και μόνο μια μικρή ποσότητα της θερμότητας άγεται στον εσωτερικό χώρο, όταν η διαδικασία μετάβασης ολοκληρωθεί αντί να άγουν όλη τη θερμότητα στον εσωτερικό χώρο. Ως αποτέλεσμα, το PCM μπορεί να εγγυηθεί μια πιο σταθερή εσωτερική θερμοκρασία, χωρίς δραματικές διακυμάνσεις, παρέχοντας έτσι θερμική άνεση στους κατοίκους.



Σχήμα 4.1: Μεταφορά θερμότητας σε μια πρόσοψη κτιρίου, όπου η ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει την πρόσοψη του κτιρίου και θερμότητα μεταφέρεται με αγωγή στο εσωτερικό χώρο του κτιρίου [5].

Το να κατανοήσουμε όμως τις δυνατότητες του PCM για έλεγχο της θερμοκρασίας είναι κάπως δύσκολο λόγω της πρόσθετης λανθάνουσας θερμότητας και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές περιπτώσεις ελέγχου της θερμοκρασίας ως παραδείγματα, που είναι οι εξής: (i) η θερμοκρασία να κυμαίνεται γύρω από τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης περισσότερο ή λιγότερο ομαλά όπως φαίνεται αριστερά στο σχήμα 4.2. Στην περίπτωση αυτή, το PCM με μια θερμοκρασία τήξης στη μέση θερμοκρασία ρυθμίζει, εξουδετερώνει γενικά τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και (ii) η θερμοκρασία να μην παρουσιάζει διακυμάνσεις ομοιόμορφα γύρω από τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, αλλά να είναι κάπως υψηλότερη ή χαμηλότερη. Κατά συνέπεια, το PCM επιβραδύνει την αύξηση ή πτώση της θερμοκρασίας πέρα από τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, που σημαίνει ότι κόβει τις κορυφές της θερμοκρασίας. Η περίπτωση αυτή φαίνεται δεξιά στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Αριστερά: ένα PCM με σημείο τήξης στη μέση θερμοκρασία ρυθμίζει διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Δεξιά: ένα PCM με μια υψηλότερη θερμοκρασία τήξης κόβει κορυφές της θερμοκρασίας [2].

Απαραίτητη προϋπόθεση βέβαια σε κάθε περίπτωση για την λειτουργία ενός τοίχου PCM είναι η θερμοκρασία αλλαγής φάσης του υλικού να βρίσκεται εντός του πρακτικού εύρους θερμοκρασίας λειτουργίας της αποθήκευσης σ' αντίθετη περίπτωση ο τοίχος μπορεί να καταστεί εντελώς άχρηστος καθώς η θερμοκρασία του PCM δεν μπορεί ποτέ να φτάσει το σημείο τήξης. Ειδικότερα αν η θερμοκρασία τήξης είναι πολύ υψηλή, η ποσότητα της θερμότητας της ηλιακής ακτινοβολίας, που θα αποθηκευθεί από το PCM, θα είναι πολύ χαμηλή στη διάρκεια της ημέρας, αν τώρα η θερμοκρασία τήξης είναι πολύ χαμηλή, είναι δύσκολο να διατηρήσει την εσωτερική θερμοκρασία του αέρα σε ένα άνετο επίπεδο κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η ακριβής τιμή της t_m πρέπει να επιλέγεται ανάλογα με διαφορετικές συνθήκες όπως κτίρια και κλίματα. Η ανάλυση του Ρεϊρρο για ένα τοίχο PCM μιας παθητικής ηλιακής κατοικίας αποδεικνύει ότι η βέλτιστη ημερήσια αποθήκευση θερμότητας γίνεται με μια θερμοκρασία τήξης των 1-3°C πάνω από τη μέση θερμοκρασία του δωματίου.

Επίσης, λόγω του σχετικά υψηλού κόστους υλικών, το πάχος του πάνελ δε θα πρέπει να υπερδιαστασιολογηθεί. Μια υπερδιαστασιολόγηση ενός PCM ενσωματωμένου σε ένα κτίριο και η δημιουργία ενός πολύ παχύ στρώματος θα έχει

σαν αποτέλεσμα να μην λιώνει και να μην στερεοποιείται εντελώς κατά τη διάρκεια των ημερήσιων διακυμάνσεων της θερμοκρασίας, επειδή όπως έχει αποδειχθεί απαιτείται ένα ορισμένο χρονικό διάστημα για να λιώσει ένα ποσό PCM με ένα δεδομένο πάχος στρώματος. Έτσι ένα μέρος του PCM θα χρησιμοποιείται μόνο σπάνια ή ποτέ. Χρησιμοποιώντας πολύ απλουστευμένες υποθέσεις, Ρεϊρρο παρουσίασε προσεγγιστικούς τύπους για τη βέλτιστη θερμοκρασία αλλαγής φάσης και το βέλτιστο πάχος του στρώματος PCM ενσωματωμένο σε τοίχο:

$$T_{m,opt} = \bar{T}_r + \frac{Q}{h \cdot t_{stor}} \quad (4.3)$$

$$\text{όπου } \bar{T}_r = \frac{t_d \cdot T_d + t_n \cdot T_n}{t_d + t_n} \quad (4.4)$$

$$D_{opt} = \frac{t_n \cdot h}{\rho \cdot \Delta H} (T_{m,opt} - T_n) \quad (4.5)$$

όπου $T_{m,opt}$ είναι το βέλτιστο σημείο αλλαγής φάσης του PCM ($^{\circ}\text{C}$), T_r είναι η μέση θερμοκρασία δωματίου ($^{\circ}\text{C}$), Q είναι η θερμότητα που απορροφάται ανά μονάδα εμβαδού επιφάνειας του δωματίου (J/m^2), h είναι ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας του τοίχου και του περιβάλλοντος χώρου ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), T_d είναι η θερμοκρασία δωματίου κατά τη διάρκεια της ημέρας ($^{\circ}\text{C}$), T_n , η θερμοκρασία του δωματίου κατά τη διάρκεια της νύχτας ($^{\circ}\text{C}$), t_d είναι ο χρόνος φόρτισης, ημέρα (εξ), t_n , ο χρόνος αποφόρτισης, νύχτα (εξ), t_{stor} είναι η ημερήσια αποθήκευση, κύκλος = $t_d + t_n$ (οι) (24 h), D_{opt} είναι το βέλτιστο πάχος της πλάκας PCM (m), ΔH είναι η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του PCM (J/kg).

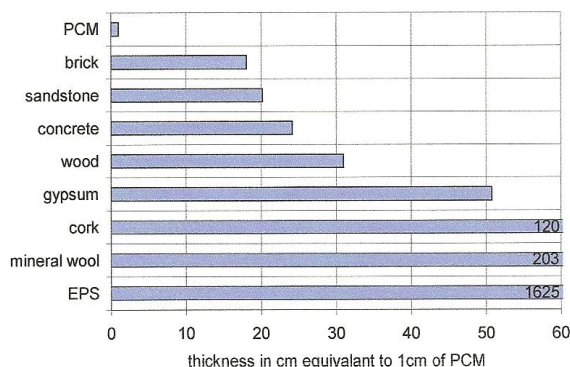
Ένα σημαντικό μειονέκτημα των οργανικών κυρίως PCMs που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη χρήση τους στα κτίρια είναι η ευφλεκτότητα. Μελέτες έχουν γίνει π.χ. από Salyer και Sircar που παρουσίασαν μια έκθεση σχετικά με την αντίδραση στη φωτιά και επεσήμαναν πιθανά πρόσθετα ως επιβραδυντικά της φωτιάς (οργανικές ενώσεις αλογόνου), που βελτιώνουν την απόκριση του υλικού στη φωτιά. Όσο αφορά τα ανόργανα PCMs όπως αναφέρθηκε από Zalba μειονέκτημα αποτελεί η φτωχή σταθερότητά τους που έχει δύο πτυχές: κακή σταθερότητα των ιδιοτήτων των υλικών κατά τη διάρκεια επαναλαμβανόμενων θερμικών κύκλων και διάβρωση μεταξύ του PCM και συσκευασιών γύρω του, το οποίο δεν ισχύει για τα οργανικά μίγματα PCM.

4.2.4 Σύγκριση PCM με τα συμβατικά οικοδομικά υλικά [2,6]

Η θερμική μάζα, με απλά λόγια, είναι η ικανότητα ενός υλικού να αποθηκεύει θερμότητα. Αυτή η ικανότητα εξαρτάται από την πυκνότητα, ειδική θερμοχωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Η θερμική μάζα λειτουργεί ως ρύθμιση έτσι ώστε οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό του κτιρίου να αυξάνονται και

να πέφτουν με βραδύτερο ρυθμό από ό, τι οι εξωτερικές θερμοκρασίες και οι μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες να είναι λιγότερο ακραίες. Σύμφωνα με στοιχεία οι ογκώδη τοίχοι από σκυρόδεμα, αμμόλιθο, ή τούβλο με ογκομετρική χωρητικότητα της τάξης του 1,34, 1,61 και 1,8 MJ/m³K είναι σε θέση να αποθηκεύουν περισσότερη θερμότητα από το ξύλο με 1,05 MJ/m³K. Μονωτικά υλικά όπως EPS μπορούν σχεδόν να αμεληθούν όσον αφορά την αποθήκευση θερμότητας. Κανένα όμως από τα παραπάνω δεν έχει τα αποτελέσματα του PCM όσο αφορά την ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας π.χ. αν πάρει κανείς το πλάτος της θερμοκρασίας άνεσης από 22°C έως 26°C, που είναι 4 K, το PCM μπορεί και αποθηκεύει περίπου 130 MJ/m³, έναν παράγοντα 18 φορές υψηλότερο από οποιοδήποτε συμβατικό υλικό.

Ένας πιο αποτελεσματικός τρόπος σύγκρισης παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα 4.3, το οποίο δείχνει το απαραίτητο πάχος στρώματος διαφόρων δομικών υλικών για την αποθήκευση τόσης θερμότητας όσης με ένα στρώμα PCM πάχους ενός εκατοστού. Οι τιμές και πάλι βασίζονται στο διάστημα θερμοκρασίας των 4 K. Για ένα ογκώδη τοίχο από τούβλο, πάχος περίπου 18 cm είναι απαραίτητο, για σκυρόδεμα το πάχος είναι 24 cm. Για ξύλο και γυψοσανίδες, όπως χρησιμοποιούνται για ελαφριά κτίρια, ένα πάχος τοιχώματος στην περιοχή των 30 έως 50 cm θα ήταν απαραίτητο. Ως εκ τούτου, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι με την προσθήκη ακόμα και μικρών ποσοτήτων PCM στη δομή του κτιρίου μπορεί σημαντικά να βελτιωθεί η θερμική μάζα του κτιρίου και ίσως μπορούν να κάνουν ένα ελαφρύ κτίριο να αποδίδει όπως ένα ογκώδες κτίριο όσον αφορά την θερμική άνεση.



Σχήμα 4.3: Απαραίτητο πάχος διαφόρων δομικών υλικών για αποθήκευση ίδιας ποσότητας θερμότητας με 1 cm παχύ στρώμα PCM. Μονωτικά υλικά είναι εκτός κλίμακας [2].

4.2.5 Παράγοντες αξιολόγησης ενός τοίχου με PCM

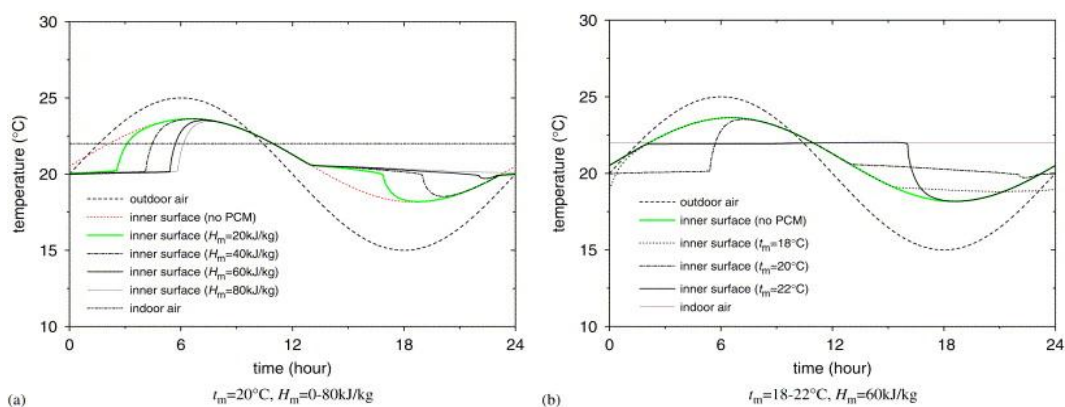
4.2.5.1 Παράγοντες «φ» και «f» [3,7]

Οι παράγοντες φ και f περιγράφουν την αλλαγή του μήκους κύματος και του πλάτους των κυμάτων θερμότητας, που παράγονται από την εξωτερική προς την εσωτερική επιφάνεια του τοίχου. Χρονική υστέρηση (ή φάση υστέρησης ή χρονική

μεταβολή ή χρονική καθυστέρηση) ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για ένα κύμα θερμότητας, με περίοδο P , να διαδοθεί μέσω ενός τοίχου από την εξωτερική στην εσωτερική επιφάνεια. Από την άλλη πλευρά, ο παράγοντας ελάττωσης f (ή φθίνουσα αναλογία ή αδιάστατο εύρος ή εξασθένηση θερμοκρασίας) ορίζεται ως η φθίνουσα σχέση του εύρους θερμοκρασίας του κατά τη διάρκεια της μεταβατικής διαδικασίας ενός κύματος, που διεισδύει μέσω ενός στερεού στοιχείου. Οι επιθυμητές τιμές της καθυστέρησης χρόνου και του παράγοντα ελάττωσης μπορεί να οδηγήσουν στο σχεδιασμό ενός πιο αποτελεσματικού κελύφους του κτιρίου στο οποίο η αποθηκευμένη θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας να απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν οι εξωτερικές θερμοκρασίες πέσουν σημαντικά.

Έτσι οι Asan και Sancaktar ερεύνησαν τις επιπτώσεις των θερμοφυσικών ιδιοτήτων κοινού τοίχου στη «χρονική καθυστέρηση» ϕ και στο «παράγοντα ελάττωσης» f . Τα συνδυασμένα αποτελέσματα της θερμοχωρητικότητας και της θερμικής αγωγιμότητας σε ϕ και f υπολογίστηκαν για διαφορετικά δομικά υλικά. Για υλικά τοίχων με σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες, η αλλαγή της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας είναι παρόμοια με της εξωτερικής θερμοκρασίας με γραμμικές ιδιότητες, λόγω του ότι η μεταφορά θερμότητας και οι οριακές συνθήκες είναι γραμμικές εξισώσεις.

Ενώ για τα PCMs, η αλλαγή της εσωτερικής θερμοκρασίας της επιφάνειας εμφανίζει μη γραμμικά χαρακτηριστικά. Το σχήμα 4.4 δείχνει τη θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας τοίχου με PCM με μια διαφορετική θερμότητα τήξης H_m και θερμοκρασία τήξεως t_m . Η εξωτερική θερμοκρασία θεωρείται ως μια ημιτονοειδή καμπύλη από 15 έως 25°C, και η εσωτερική θερμοκρασία διατηρείται στους 22°C. Το πάχος του τοίχου είναι 2cm, και η θερμική αγωγιμότητα είναι 0,2 W/(m°C). Μπορεί κανείς να διαπιστώσει από την εικόνα ότι οι H_m και t_m μπορούν να διατηρήσουν την



Σχήμα 4.4: Θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας τοίχου PCM με διαφορετικές θερμότητες και θερμοκρασίες τήξης [3].

εσωτερική θερμοκρασία της επιφάνειας σε κάποια επιθυμητή τιμή (σχεδόν κοντά στη θερμοκρασία τήξεως PCM) για κάποια χρονική περίοδο, η οποία ορίζεται ως «καθυστέρηση PCM». Σ' αυτό συνέβαλε το γεγονός ότι οι εξισώσεις μεταφοράς της θερμότητας είναι μη γραμμικές αφού η θερμική χωρητικότητα των PCMs αλλάζει με τη θερμοκρασία. Για ένα ορισμένο κτίριο και καθορισμένα κλίματα, η καθυστέρηση PCM επηρεάζεται από τις θερμοφυσικές ιδιότητες του τοίχου PCM. Αν η καθυστέρηση PCM με κατάλληλη θερμοκρασία τήξης διαρκεί ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα μπορεί έτσι να διατηρηθεί στην περιοχή άνεσης.

4.2.5.2 Παράγοντες «α», «b» και «Δt» [8]

Μπορεί να δει κανείς ότι ο παράγοντας ελάττωσης f και η χρονική καθυστέρηση φ δεν μπορούν να εφαρμοστούν για την αξιολόγηση της μη γραμμικής μεταφοράς θερμότητας του τοίχου με PCM. Για την ανάλυση και αξιολόγηση της θερμικής απόδοσης του τοίχου και δαπέδου PCM, δύο νέοι παράμετροι «α» και «b» διατυπώνονται.

Η λειτουργική εξωτερική θερμοκρασία μπορεί να υποτεθεί ότι προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$T'_{out} = T_{out} + q_{r,out}/h_{w,out} \quad (4.6)$$

Εάν η θερμοχωρητικότητα του τοίχου μπορεί να παραμεληθεί, ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, U' του εξωτερικού τοίχου μπορεί να εκφραστεί ως:

$$U' = \frac{1}{(1/h_{w,in}) + (L/k) + (1/h_{w,out})} \quad (4.7)$$

και η ροή θερμότητας της εσωτερικής επιφάνειας, q'_w μπορεί να εκφραστεί ως:

$$q'_w = (T'_{out} - T_{in})U' = \frac{(T'_{out} - T_{in})}{(1/h_{w,in}) + (L/k) + (1/h_{w,out})} \quad (4.8)$$

Εάν τώρα η θερμοχωρητικότητα δεν μπορεί να παραμεληθεί, U είναι ο ισοδύναμος συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, q_w είναι η ροή θερμότητας της εσωτερικής επιφάνειας, και ο τροποποιημένος παράγοντας ροής θερμότητας της επιφάνειας, α ορίζεται ως ο λόγος της q_w και q'_w (ή U και U'), όπως φαίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\alpha = \frac{q_w}{q'_w} = \frac{U}{U'} \quad (4.9)$$

Εάν $\alpha < 1$, αυτό σημαίνει ότι η θερμότητα τήξης του PCM μπορεί προφανώς να αυξήσει την θερμική αντίσταση των εξωτερικών τοίχων και να μειώσει την ενεργειακή κατανάλωση θέρμανσης ή ψύξης των κτιρίων.

Οι εσωτερικοί τοίχοι μπορούν να φορτίζονται με θερμότητα ($q_w < 0$) και να αποφορτίζονται τη θερμότητα ($q_w > 0$) για να μειωθεί η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Αν $q_w < 0$, όταν η εσωτερική θερμοκρασία T_{in} είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία άνεσης και $q_w > 0$ όταν T_{in} είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία άνεσης, οι εσωτερικοί τοίχοι μπορούν να αυξήσουν το βαθμό άνεσης ή να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας των κτιρίων. Ο λόγος της θερμικής αποθήκευσης «β» για τους εσωτερικούς τοίχους ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση, η οποία ισούται με το λόγο της θερμότητας φόρτισης (ή αποφόρτισης) προς τη συνολική θερμοχωρητικότητα ανά επιφάνεια τοίχου.

$$b = \frac{\int_0^T (q_w(\tau) - q_{in}) d\tau}{\rho H_m L} \quad (4.10)$$

Η περίοδος μετάβασης φάσης Δt είναι η περίοδος από την αρχή μέχρι το τέλος της διαδικασίας τήξης ή κατάψυξης του PCM. Αν το PCM μπορεί να μειώσει το ποσοστό κατανάλωσης ενέργειας του κτιρίου ή να αυξήσει τον εσωτερικό βαθμό άνεσης κατά τη διαδικασία της τήξης και της κατάψυξής του, μεγαλύτερη περίοδος μετάβασης φάσης Δt είναι ευεργετική για την εξοικονόμηση περισσότερης ενέργειας ή για τη λήψη ακόμα πιο άνετου εσωτερικού περιβάλλοντος.

Αποτελέσματα θεωρητικής ανάλυσης και αριθμητικής προσομοίωσης της θερμικής απόδοσης του τοίχου PCM επιβεβαίωσαν τις παραπάνω παρατηρήσεις και οδήγησαν και στα ακόλουθα συμπεράσματα όσο αφορά τους παράγοντες α , Δt και τη θερμική ροή εσωτερικής επιφάνειας q_w . Ειδικότερα για εξωτερικό τοίχο PCM, τα αποτελέσματα της εξοικονόμησης ενέργειας μπορούν να βελτιωθούν με την αύξηση του H_m ή τη μείωση του k . Η κατανομή της q_w με το χρόνο θα αλλάζει με την T_m , θα πρέπει όμως να είναι σε ένα ορισμένο εύρος ώστε να προκύπτει $\alpha < 1$ κατά τη διάρκεια όλης της διαδικασίας τήξης. Για τον εσωτερικό τώρα τοίχο με PCM, αν ο τοίχος PCM μπορεί να λιώσει και να παγώσει πλήρως κατά τη διάρκεια ενός κύκλου τήξης και κατάψυξης, τα αποτελέσματα εξοικονόμησης ενέργειας μπορούν να βελτιωθούν με την αύξηση της H_m για εσωτερικό τοίχο με PCM, και η κατανομή της q_w με το χρόνο θα αλλάζει με διαφορετικά k και T_m , τα οποία θα πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά σύμφωνα με τις πρακτικές συνθήκες. Εάν ο τοίχος PCM δεν μπορεί να λιώσει και να παγώσει πλήρως, η θερμότητα τήξης H_m δεν χρειάζεται να αυξηθεί. Σε περίπτωση που το πάχος του εσωτερικού τοίχου είναι αρκετά μικρό ώστε να ισχύει $s \ll k/h_{w,in}$, η T_m θα πρέπει να είναι λίγο υψηλότερη από το μέσο όρο της εσωτερικής θερμοκρασίας και η k θα έχει μικρή επίδραση κατά τη διάρκεια του εύρους $0.1-1.0 \text{ Wm}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

4.3 Εφαρμογές PCMs στην τοιχοποιία και λοιπά στοιχεία κτιρίου

Η εφαρμογή των PCMs σε κτίρια μπορεί να έχει δύο διαφορετικούς στόχους [9]. Πρώτον χρήση της φυσικής θερμότητας, που είναι η ηλιακή ενέργεια, για θέρμανση ή του κρύου στη διάρκεια της νύχτας για ψύξη. Δεύτερον η χρήση ανθρωπογενών πηγών θέρμανσης ή ψύξης. Σε κάθε περίπτωση η αποθήκευση θερμότητας είναι αναγκαία προκειμένου να ταυτίζονται η διαθεσιμότητα και η ζήτηση ως προς το χρόνο καθώς και σε ό,τι αφορά και την ισχύ. Τρεις ουσιαστικά είναι οι τρόποι χρήσης των PCMs σε κτίρια δηλαδή τοποθέτηση σε τοίχους κτιρίων, σε δομικά στοιχεία εκτός από τοίχους και σε μονάδες αποθήκευσης. Τα δύο πρώτα είναι παθητικά συστήματα, όπου η αποθηκευμένη ζέστη ή το κρύο αυτόματα απελευθερώνεται όταν η εσωτερική ή εξωτερική θερμοκρασία αυξάνεται ή μειώνεται πέρα από το σημείο τήξης. Το τρίτο είναι ενεργητικό σύστημα, όπου η αποθηκευμένη ζέστη ή κρύο είναι σε δοχείο θερμικά διαχωρισμένο από το κτίριο με μόνωση. Ως εκ τούτου, η ζέστη ή το κρύο χρησιμοποιείται μόνο κατόπιν ζήτησης και όχι αυτόματα. Διάφορες πιθανές εφαρμογές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με τη μορφή της λανθάνουσας θερμότητας (LHTES) που μελετήθηκαν για θέρμανση και ψύξη χώρου παρουσιάζονται στη συνέχεια.

4.3.1 Ενσωμάτωση των PCMs σε δομικά υλικά

Η εφαρμογή στις κτιριακές εγκαταστάσεις [10] μπορεί να γίνει είτε με χρήση των PCMs αυτούσια ως στρώμα υλικού μέσα στην τοιχοποιία είτε σαν συστατικό σύνθετου υλικού με κύριο συστατικό συνήθως το γύψο ή το τσιμέντο (π.χ. γυψοσανίδα με πρόσθετο υλικό το PCM). Αυτή η ενσωμάτωση εξασφαλίζει σε μεγάλο βαθμό τη συγκράτηση του υλικού ακόμα και μετά την πλήρη υγροποίησή του, καθώς και τη μη πρόσληψη υγρασίας από τον αέρα περιβάλλοντος. Σε πολλές περιπτώσεις ανάλογα με την κατηγορία του υλικού (λιπαρά οξέα, ένυδρα άλατα) είναι απαραίτητη η ενσωμάτωση του PCM σε προστατευτικό κάλυμμα πριν από την ενσωμάτωσή τους σε δομικό υλικό. Για την κατηγορία των παραφινών πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει τη συμβατότητά τους με το γύψο καθώς και με το τσιμέντο και γι' αυτό το λόγο έχουν χρησιμοποιηθεί δομικά υλικά εμποτισμένα με παραφίνες. Εκτός όμως από το γύψο και το τσιμέντο μια ακόμα εφαρμογή ενσωμάτωσης σε δομικά υλικά, την οποία και θα αναλύσουμε παρακάτω είναι η ενσωμάτωση PCM σε τούβλο.

4.3.1.1 Γυψοσανίδες εμποτισμένες με PCMs

Οι γυψοσανίδες χρησιμοποιούνται σε ευρεία κλίμακα στην κατασκευή ελαφρών κτιρίων [2,11]. Η ενσωμάτωση των PCMs σε γυψοσανίδες, επομένως, έχει μεγάλες δυνατότητες για αύξηση της θερμικής μάζας των εν λόγω κτιρίων. Πρώτες έρευνες ενσωμάτωσης PCM σε γυψοσανίδες χρονολογούνται περισσότερο από 20 χρόνια

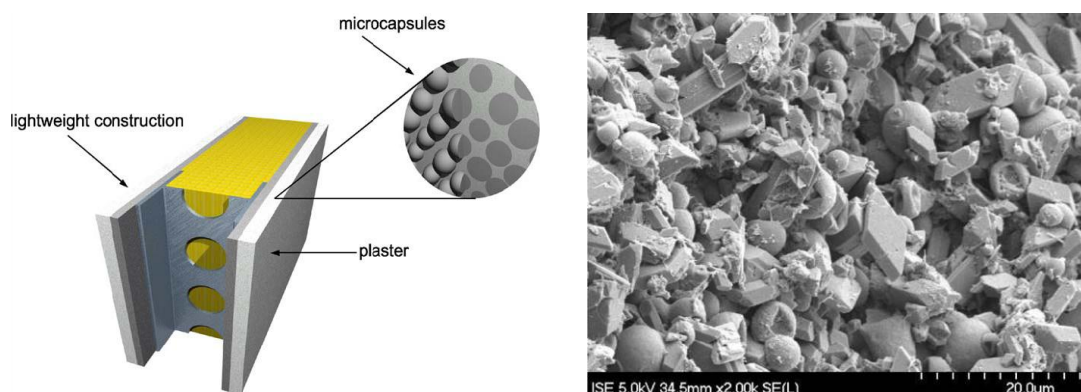
πριν, όπως για παράδειγμα περιγράφεται από Shapiro και τους συνεργάτες του, 1987. Οι έρευνες αυτές συνήθως χρησιμοποιούσαν εμποτισμό για ενσωμάτωση PCM. Μια διαφορετική προσέγγιση αποτελεί η ενσωμάτωση μικροκαψουλών παραφίνης σε γυψοσανίδες. Το τυποποιημένο μέγεθος γυψοσανίδων έχει διαστάσεις 2,00m x 1,25m x 15 mm και ένα βάρος της τάξης του 11,5 kg/m². Οι κατασκευαστικές τεχνικές, η θερμική απόδοση και η εφαρμογή των γυψοσανίδων που έχουν εμποτιστεί με PCMs εξετάζονται στα τμήματα που ακολουθούν.

Neeper [12,13] εξέτασε το θερμικό δυναμικό μιας γυψοσανίδας, που είναι εμποτισμένη με λιπαρά οξέα και κεριά παραφίνης ως PCMs και που υπόκεινται στην ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας του δωματίου αλλά δεν φωτίζεται άμεσα από τον ήλιο. Οι θερμοκρασίες τήξης αυτών των PCMs προσαρμόζονται με χρήση μίγματος συστατικών. Έχει εξετάσει τρεις παραμέτρους της γυψοσανίδας PCM, που μπορεί να επηρεάζουν την ενέργεια που μπορεί να απορροφηθεί και να απελευθερωθεί παθητικά στη διάρκεια ενός ημερήσιου κύκλου: (α) τη θερμοκρασία τήξης του PCM (β) το εύρος της θερμοκρασίας κατά το οποίο η τήξη εμφανίζεται και (γ) τη λανθάνουσα χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας της γυψοσανίδας. Η μέγιστη ημερήσια αποθήκευση ενέργειας εμφανίζεται όταν η θερμοκρασία τήξης του PCM ισούται με την μέση θερμοκρασία της γυψοσανίδας, έχοντας παράλληλα ένα στενό εύρος μετάβασης. Αν το ήμισυ του εύρους μετάβασης γίνει μεγαλύτερο από 1°C, η ημερήσια αποθηκευμένη ενέργεια μειώνεται σημαντικά, αλλά η βέλτιστη θερμοκρασία τήξης αλλάζει λίγο καθώς εξαρτάται κυρίως από τη μέση θερμοκρασία δωματίου, η οποία ποικίλλει από κτίριο σε κτίριο και από εποχή σε εποχή. Για γυψοσανίδα εγκατεστημένη στο κέλυφος του κτιρίου (εξωτερικός τοίχος), η βέλτιστη τιμή της εξαρτάται επίσης από την εξωτερική θερμοκρασία και τη θερμική αντίσταση του τοίχου.

Σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή, είναι πιθανό ότι η θερμοκρασία τήξης ως εκ τούτου θα διαφέρει κατά περισσότερο από 1°C από τη βέλτιστη τιμή μεγάλο μέρος του χρόνου. Επιπλέον, ορισμένα PCMs εμφανίζουν πλάτη μετάβασης των 2°C ή και περισσότερο. Μια τέτοια ευρεία μετάβαση θα παρείχε λιγότερη από τη βέλτιστη αποθήκευση, όμως θα ήταν σύμφωνη με την εφαρμογή του ίδιου PCM είτε σε εσωτερικά χωρίσματα ή στο κέλυφος του κτιρίου. Ως εκ τούτου, μια τιμή σχεδιασμού ημερήσιας αποθήκευσης πραγματικά εφικτή, σε ευρεία χρήση από ένα μόνο PCM μπορεί να περιορίζεται στο εύρος 300 - 400 kJ/m². Εγκατάσταση μιας γυψοσανίδας με λανθάνουσα χωρητικότητα περίπου 400 kJ/m² θα παράγει διανεμημένη θερμική αποθήκευση περίπου ισοδύναμη με εκείνη ενός κτιρίου με βαριά κατασκευή σε όλες τις εσωτερικές επιφάνειες, που μπορεί να είναι επαρκές τόσο για ηλιακή θέρμανση

όσο και για εκτός αιχμής ψύξη. Αν τώρα περισσότερο PCM περιλαμβάνεται δε θα λιώνει και δε θα στερεοποιείται σε ένα καθημερινό κύκλο.

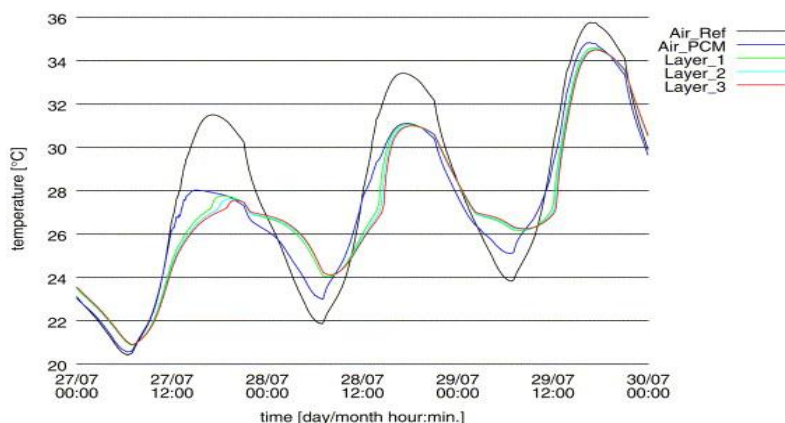
Μια νέα προσέγγιση ενσωμάτωσης PCM σε γυψοσανίδες μελετήθηκε από Schossig [14,15]. Ανέπτυξαν ένα σύστημα μικροενσωματωμένου σε κάψουλες PCM (σχήμα 4.5), επιτρέποντας την εύκολη εφαρμογή, καλή μετάδοση της θερμότητας και καμία ανάγκη για προστασία από την καταστροφή. Ειδικότερα η κατανομή των μικροκάψουλών PCM στον τοίχο προσφέρει μια πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας, έτσι ώστε ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας για τη φόρτιση και αποφόρτιση της αποθηκευμένης θερμότητας να αυξηθεί σημαντικά. Μια πειραματική διάταξη αποτελούμενη από δύο νέους πλήρους μεγέθους χώρους δοκιμής με μια ελαφριά κατασκευή στην πρόσοψη της εγκατάστασης και με επίστρωση των εσωτερικών τοίχων με γύψο PCM και γύψο αναφοράς χτίστηκε και δύο διαφορετικά PCM δοκιμάστηκαν, το καθένα για μια περίοδο ενός χρόνου. Το 2002 πραγματοποιήθηκε δοκιμή ενός γύψου με 40% βάρος PCM και πάχος 6mm ενώ το 2003 μελετήθηκε γύψος με 20% βάρος PCM και πάχος 15mm.



Σχήμα 4.5: Αριστερά: Σχηματική άποψη ενός ελαφρύ τοίχου [15]. Οι μικροκάψουλες PCM είναι ενσωματωμένες στο εσωτερικό του γύψου. Δεξιά: Εικόνα SEM των PCM μικροκάψουλών σε γύψο [15]. Οι μικροκάψουλες PCM με μέσο όρο διαμέτρου 8 mm, είναι ομοιογενώς κατανεμημένες μεταξύ των κρυστάλλων του γύψου.

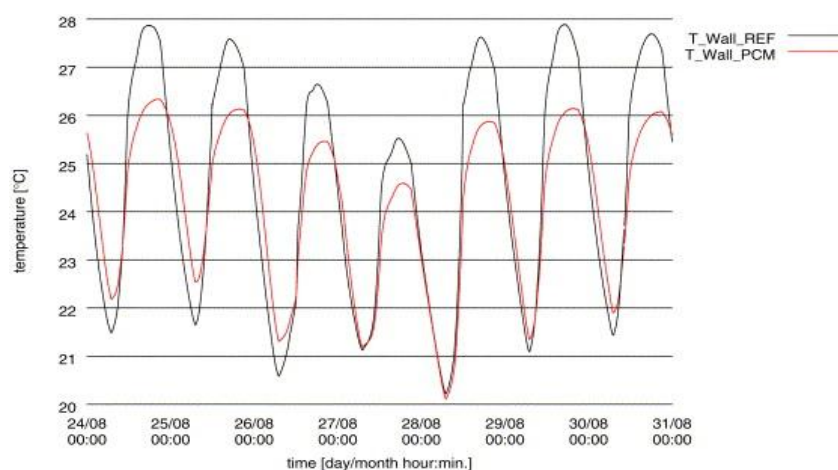
Σύμφωνα με τις μετρούμενες θερμοκρασίες τοιχώματος και αέρα που φαίνονται στο σχήμα 4.6 για τα 6 mm γύψου με PCM, για τρεις ημέρες με νυχτερινό αερισμό βλέπουμε ότι στο εύρος θερμοκρασίας τήξης του PCM (24-27°C), η θερμοκρασία στον χώρο δοκιμών με PCM αυξάνεται με βραδύτερο ρυθμό από ό, τι οι θερμοκρασίες στον χώρο δοκιμών αναφοράς. Μετά την επίτευξη των 27°C, η θερμοκρασία και στους δύο χώρους δοκιμών αυξάνεται παράλληλα, έτσι ώστε η διαφορά θερμοκρασίας των 4K να επιτευχθεί στη μέγιστη θερμοκρασία. Επιπλέον, η μέγιστη θερμοκρασία του τοίχου έφθασε μια ώρα αργότερα στο δωμάτιο με PCM.

Κατά τη διάρκεια της νύχτας ακόμα, οι θερμοκρασίες στο χώρο δοκιμών με PCM είναι υψηλότερες από ό, τι στο χώρο δοκιμών αναφοράς.



Σχήμα 4.6: Μετρημένα προφίλ θερμοκρασίας αέρα και τοίχου για τους δύο χώρους δοκιμών με νυχτερινό αερισμό, αλλά χωρίς σκίαση [15].

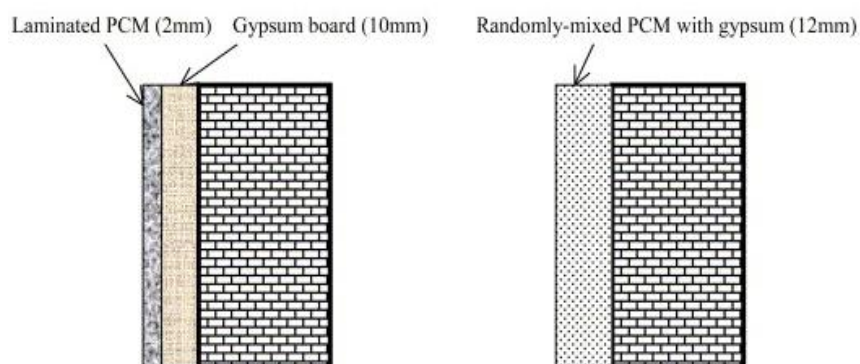
Προκειμένου τώρα να μην υπερφορτωθεί η χωρητικότητα αποθήκευσης όπως συμβαίνει την τελευταία μέρα (σχήμα 4.6), εγκαθιστούμε μια εξωτερικής σκίασης συσκευή (συμβατικά βενετσιάνικα στορ), η οποία πρέπει να ενεργοποιείται αυτόματα σε ζεστές ημέρες και προκύπτουν έτσι οι καμπύλες θερμοκρασίας του σχήματος 4.7, που δείχνουν τη θερμοκρασία στο χώρο δοκιμών με PCM να βρίσκεται περίπου 2K κάτω από την θερμοκρασία του χώρου αναφοράς στη μέγιστη θερμοκρασία. Με βάση το συσσωρευμένο τώρα αριθμό ωρών σε μια ορισμένη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια τριών εβδομάδων με σκίαση έχειδειχθεί ότι στο δωμάτιο αναφοράς, η θερμοκρασία είναι υψηλότερη από 28°C για περισσότερο από 50 ώρες, ενώ ο χώρος δοκιμών με PCM είναι θερμότερος από 28°C μόνο για περίπου 5 ώρες.



Σχήμα 4.7: Μετρημένα προφίλ θερμοκρασίας τοίχου στους δύο χώρους δοκιμών με νυχτερινό αερισμό και σκίαση για τη μείωση των ηλιακών κερδών [15]. Στο χώρο δοκιμών με το υλικό PCM, ο αριθμός των ωρών πέραν των 26°C μειώνονται σημαντικά.

Ανάλογα είναι τα αποτελέσματα για το γύψο των 15mm όπου και πάλι, ήταν δυνατή η μείωση των θερμοκρασιών στο δωμάτιο που ήταν εξοπλισμένο με PCM έως 4K καθώς και ο αριθμός των ωρών με θερμοκρασίες πάνω από 28°C. Επομένως και στις δύο περιπτώσεις επιτυγχάνεται αύξηση της θερμικής άνεσης. Ο κύριος περιορισμός του συστήματος είναι η αποφόρτιση του PCM τη νύχτα. Γενικά για να λειτουργούν σωστά, τα παθητικά συστήματα χρειάζονται ένα υψηλότερο ρυθμό αλλαγής αέρα το βράδυ. Για το σκοπό αυτό ένα ενεργό σύστημα ψύξης είναι υπό ανάπτυξη.

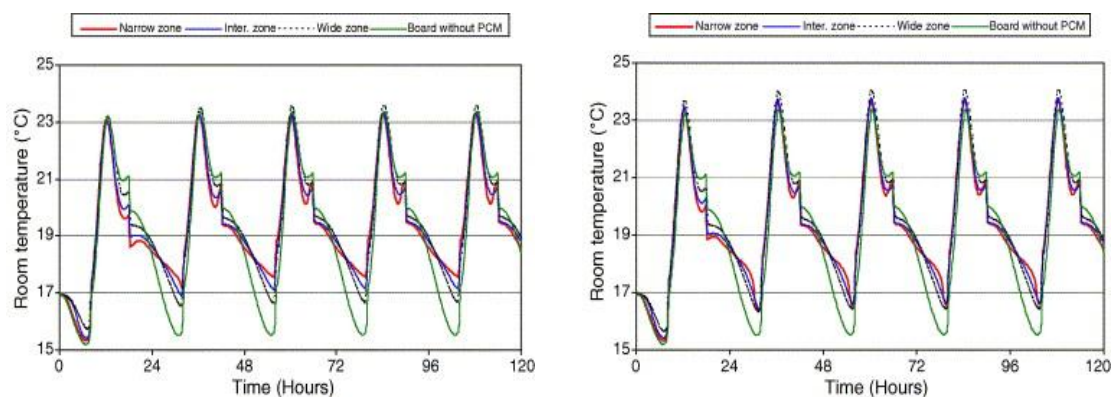
Darkwa και η ομάδα του [16,17] έχουν αξιολογήσει αναλυτικά και πειραματικά δύο συστήματα με ενσωματωμένο PCM που έχουν ως βάση τον γύψο και τα οποία είναι το σύστημα PCM τυχαία μικτού τύπου και επάλληλων στρωμάτων (σχήμα 4.8). Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί επομένως στην προσομοίωση της πρακτικής απόδοσης και των δύο παραπάνω συστημάτων PCM σε ένα παθητικά σχεδιασμένο μοντέλο δωματίου με διαστάσεις 3 m x 4 m x 2,5 m ύψος και με ένα παράθυρο νότιου προσανατολισμού διαστάσεων 1,5 m x 1 m. Οι τοίχοι είναι ελαφριάς κατασκευής με τις εσωτερικές επιφάνειες επενδεδυμένες με γυψοσανίδα PCM πάχους 12 mm. Και τα δύο δείγματα ξηρού τοίχου περιέχουν το ίδιο ποσό PCM (16,7% μάζας), αλλά το δείγμα με το στρώμα PCM αποτελείται από 2 mm και 10 mm ξεχωριστά στρώματα PCM και γύψου, αντίστοιχα, ενώ ο τυχαία-μικτός τύπος αποτελείται από ένα στρώμα PCM και γύψου αναμειγμένα μεταξύ τους.



Σχήμα 4.8: Αριστερά: Σύστημα PCM με επάλληλα στρώματα, Δεξιά: Τυχαία-μικτό σύστημα PCM [16].

Με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για 120 h (σχήμα 4.9) και με ανάλυση των χαμηλότερων και υψηλότερων θερμοκρασιών για κάθε κύκλο μπορεί να διαπιστώσει κανείς ότι η συνολική θερμική απόδοση του τύπου με στρώμα PCM ήταν πολύ καλύτερη από του τυχαία μικτού τύπου κατά τη διάρκεια των ωρών της νύχτας. Παρουσίασε, επίσης, ταχύτερη απόκριση για τη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του δωματίου κατά τις περιόδους αιχμής. Όσον αφορά την επίδραση του εύρους

αλλαγής φάσης ο στενός τύπος εμφανίζει την καλύτερη θερμική απόδοση για το τύπο με στρώμα PCM. Αντίθετα δεν υπήρχαν σημαντικές αλλαγές μεταξύ των εύρων αλλαγής φάσης για την γυψοσανίδα PCM τυχαίας ανάμειξης. Αυτό αποδίδεται στο πολυδιάστατο φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας, που υπάρχει στο τυχαία-μικτό σύστημα PCM. Γενικά λοιπόν αποδείχτηκε ότι η θερμική απόδοση του συστήματος με στρώμα PCM είναι περίπου 18% καλύτερη από του τυχαία-μικτού τύπου. Ωστόσο, αυτές οι μελέτες ήταν περιορισμένες σε στενές οριακές συνθήκες και υποθέσεις.



Σχήμα 4.9: Ζώνες αλλαγής φάσης σε σχέση με τη θερμοκρασία δωματίου, Αριστερά: δωμάτιο γυψοσανίδας με στρώμα PCM, Δεξιά: τυχαία μικτή γυψοσανίδα PCM [16].

Μια ακόμα μελέτη αξιολόγησης από Darkwa που προωθεί την ταχεία μεταφορά της λανθάνουσας θερμότητας, την αιχμηρή απόκριση στην εσωτερική θερμοκρασία, και ελαχιστοποιεί τον πολυδιάστατο τρόπο μεταφοράς θερμότητας πραγματοποιήθηκε. Στην περίπτωση του συστήματος επάλληλων στρωμάτων, η διαδικασία λανθάνουσας θερμότητας εμφανίστηκε σε σταθερή θερμοκρασία ενώ ο τυχαία μικτός τύπος εμφάνισε κάποιο βαθμό κλίσης της θερμοκρασίας. Αυτό σημαίνει ότι ο τύπος με επάλληλα στρώματα έχει καλύτερη απόκριση στην αποθήκευση και την ανάκτηση θερμότητας σε ελεγχόμενη περιοχή της θερμοκρασίας σε σχέση με το τυχαίο τύπο. Διακύμανση τώρα της θερμικής αγωγιμότητας δεν πέτυχε οποιαδήποτε σημαντική αλλαγή και στα δύο συστήματα.

Η αύξηση στο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του αέρα είχε όμως επίδραση, γεγονός που υποδηλώνει ότι η εξαναγκασμένη συναγωγή θα ήταν πιο αποτελεσματική από τη φυσική συναγωγή. Η κλίση θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης επίσης αυξάνεται με τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, αλλά ο βαθμός αύξησης ήταν πολύ μεγαλύτερος για το τυχαία μικτό σύστημα. Ακόμα η μείωση στη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμοκρασίας του δωματίου και τήξης του PCM παρήγαγε βραδύτερο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας, με το χρόνο για την αλλαγή φάσης να αυξάνεται εκθετικά. Η επίδραση μάζας των σωματιδίων PCM

οδήγησε σε αύξηση του χρόνου αλλαγής φάσης, με το βαθμό διακύμανσης της θερμοκρασίας της επιφάνειας να είναι ουσιαστικά ο ίδιος για τα δύο συστήματα.

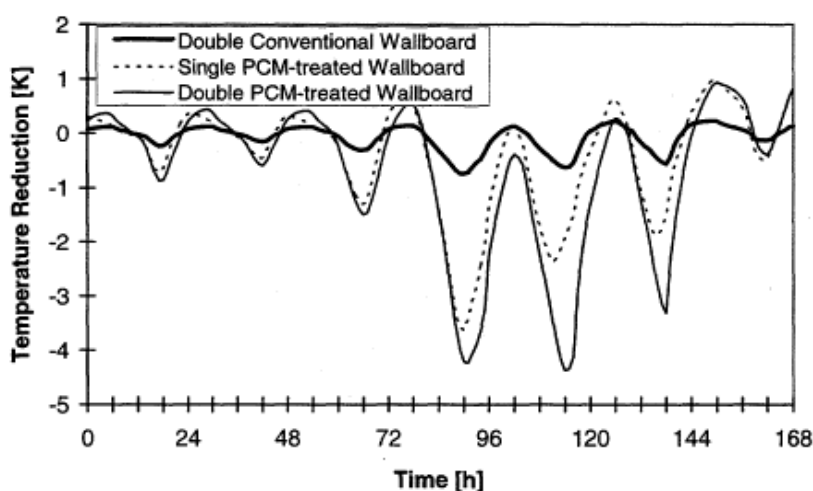
Σχετικά με την ενισχυμένη απόδοση ροής θερμότητας του συστήματος γυψοσανίδας με στρώμα PCM που εκτιμήθηκε με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της θερμοκρασίας αποδείχτηκε ότι αυξάνοντας το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από $5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ σε $15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ μια αξιοσημείωτη αύξηση 20% ~ 50% στην μέγιστη προσαύξηση της ροής θερμότητας λαμβάνεται. Ωστόσο, η επίδραση της διαφοράς θερμοκρασίας (δηλαδή μεταξύ θερμοκρασίας δωματίου και θερμοκρασίας τήξης PCM) και η επίδραση της μάζας πέτυχαν την ίδια μέγιστη αύξηση κατά ένα ποσοστό της τάξης του 20%. Ένα ακόμα πολύ σημαντικό συμπέρασμα που προέκυψε ήταν η επίτευξη μιας περίπου κατά 17% μείωσης του χρόνου στη διάρκεια ανάκτησης της θερμότητας.

Stetiu και **Feustel** [11] χρησιμοποίησαν ένα πρόγραμμα θερμικής προσομοίωσης κτιρίου με βάση την προσέγγιση των πεπερασμένων διαφορών για την αριθμητική αξιολόγηση της απόδοσης της LHS μιας γυψοσανίδας με PCM σε ένα κτιριακό περιβάλλον. Βρήκαν ότι η χρήση γυψοσανίδας με PCM σε συνδυασμό με μηχανικό νυκτερινό αερισμό στο κτίριο προσφέρει μια ευκαιρία για μείωση της διαστασιολόγησης του συστήματος σε κλίματα, όπου η εξωτερική θερμοκρασία του αέρα πέφτει κάτω από τους 18°C τη νύχτα. Στην περίπτωση ενός πρωτότυπου κτιρίου που βρίσκεται στην Καλιφόρνια, εκτιμάται ότι οι γυψοσανίδες με PCM θα μπορούσαν να μειώσουν το μέγιστο ψυκτικό φορτίο κατά 28%.

Feustel και Stetiu [11,18] διερεύνησαν επίσης την χρήση διπλών γυψοσανίδων με PCM για την περαιτέρω αύξηση της ικανότητας αποθήκευσης ενός κτιρίου έτσι ώστε οι θερμοκρασίες του δωματίου να μπορέσουν να κρατηθούν κοντά στα ανώτατα όρια θερμικής άνεσης χωρίς τη χρήση μηχανικής ψύξης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ενός κατοικήσιμου δωματίου με υψηλά εσωτερικά φορτία και με τα δεδομένα καιρού για Sunnyvale της Καλιφόρνιας, δείχνουν σημαντική μείωση της θερμοκρασίας του αέρα του δωματίου όταν η θερμότητα μπορεί να αποθηκευτεί σε τροποποιημένες γυψοσανίδες με PCM.

Ειδικότερα σε σύγκριση με μόνη συμβατική γυψοσανίδα, ο διπλασιασμός του πάχους της γυψοσανίδας παρέχει μόνο ελάχιστη μείωση των μέγιστων λειτουργικών θερμοκρασιών. Η μέγιστη μείωση τιμών είναι κάτω του 1K. Η χρήση τώρα της επεξεργασμένης γυψοσανίδας PCM παρέχει μια καλή μείωση της θερμοκρασίας για την πρώτη ημέρα του κύματος θερμότητας, αλλά ο κορεσμός της λανθάνουσας αποθήκευσης μειώνει τη δυνατότητα να υπάρξει περαιτέρω μείωση. Ο διπλασιασμός της επεξεργασμένης γυψοσανίδας PCM δείχνει μια σημαντική βελτίωση της

δυνατότητας μείωσης της θερμοκρασίας. Μετά από δύο ημέρες η μείωση της λειτουργικής θερμοκρασίας είναι περισσότερη από 4 K και η τρίτη όμως ημέρα του καύσωνα βλέπει ακόμα μείωση της θερμοκρασίας κατά 3,3 K. Ως λειτουργική θερμοκρασία ορίζεται η ομοιόμορφη θερμοκρασία ενός φανταστικού περιβλήματος με το οποίο ένα άτομο ανταλλάσσει την ίδια αισθητή θερμότητα με ακτινοβολία και συναγωγή, όπως σε πραγματικό περιβάλλον (ASHRAE, 1985). Έτσι ουσιαστικά είναι η αντιληπτή θερμοκρασία. Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι μεγαλύτερης διάρκειας κύκλοι μεταξύ φόρτισης και αποφόρτισης μπορεί να κατακτηθούν με υψηλότερη θερμική ικανότητα αποθήκευσης, η οποία μπορεί να παρέχεται από πολλαπλά στρώματα ή παχύτερα στρώματα επεξεργασμένης γυψοσανίδας.



Σχήμα 4.10: Ψύξη με αερισμό. Μείωση της θερμοκρασίας της λειτουργικής θερμοκρασίας για διπλές συμβατικές και μονές και διπλές επεξεργασμένες γυψοσανίδες PCM, σε σύγκριση με μονή συμβατική γυψοσανίδα [18].

Αν και οι προσομοιώσεις έχουν δείξει τα πιθανά οφέλη από τη χρήση PCM στους τοίχους, οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ψύξη του «φακέλου» ενός δωματίου με τη βοήθεια της κυκλοφορίας αέρα μέσω του δωματίου παρέχει έναν πολύ αναποτελεσματικό τρόπο μεταφοράς θερμότητας. Η κίνηση επίσης του αέρα κοντά στους τοίχους, που καθορίζει το ποσό της θερμότητας που μεταβιβάζεται, είναι σχετικά μικρή. Ιδιαίτερα σε περιόδους σχετικά υψηλών θερμοκρασιών του περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της νύχτας, θα ήταν επωφελές να εξαναγκάζεται η παροχή του αέρα κατά μήκος των επιφανειών του τοίχου για να διευκολυνθεί μια καλή ανταλλαγή θερμότητας. Η περιορισμένη ικανότητα απόρριψης της ψύξης με αερισμό κατά τη διάρκεια θερμών περιόδων ζητάει είτε αυξημένη ικανότητα αποθήκευσης ή μπορεί να προκαλέσει την αποτυχία της θερμικής αποθήκευσης.

Borreguero και η ομάδα του [14,19] ανέλυσαν τη σκοπιμότητα της ενσωμάτωσης μικροκαψουλών που περιέχουν PCM σε γυψοσανίδες για την αύξηση της ικανότητας αποθήκευσης ενέργειας του τοίχου. Οι μικροκάψουλες που περιέχουν

κερί παραφίνης Rubitherm RT27 και κέλυφος από πολυστερένιο συντίθενται με μια τεχνική πολυμερισμού με χρήση μηχανικής ανάδευσης. Μια τιμή του μεταβλητού λόγου μάζας πυρήνα / επικάλυψη της σύνθεσης της τάξης του 1,5 επέτρεψε την επίτευξη της μέγιστης χωρητικότητας αποθήκευσης ενέργειας σε σχέση με μια περιεκτικότητα της μικροκάψουλας σε παραφίνη κοντά στο 50%. Ειδικότερα η χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας των μικροκαψουλών που προέκυπτε αυξανόταν όταν η αναλογία του πυρήνα με το υλικό επικάλυψης αυξανόταν από 0,33 σε 1,5 και μειωνόταν όταν αυτή η παράμετρος κυμαινόταν από 1,5 έως 2,0, που δείχνει ότι το πολυμερές έτεινε να υποστεί πολυμερισμό μέσα στα σταγονίδια κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μικροενσωμάτωσης σχηματίζοντας σύνθετες εσωτερικές δομές. Η μέγιστη χωρητικότητα αποθήκευσης βελτιστοποιήθηκε θεωρώντας αυτό το λόγο μάζας του 1,5 για μια διάμετρο των σωματιδίων της τάξης των 500μm.

Η θερμική συμπεριφορά τριών γυψοσανίδων, μίας χωρίς PCM και των άλλων με προσμείξεις μικροκαψουλών που περιέχουν Rubitherm RT27 σε ποσοστά 4,7% και 7,5% κατά βάρος μελετήθηκε. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όσο υψηλότερη είναι η ποσότητα των μικροκαψουλών που περιέχουν PCM που ενσωματώνονται στην γυψοσανίδα, τόσο χαμηλότερη ή τόσο υψηλότερη είναι η εξωτερική θερμοκρασία του τοίχου για διαδικασία θέρμανσης και ψύξης αντίστοιχα. Εκτός αυτού, η ενσωμάτωση των μικροκαψουλών στον τοίχο αύξησε το χρόνο που απαιτείται για την επίτευξη της τελικής σταθερής κατάστασης, επαληθεύοντας ότι η ικανότητα μόνωσης του υλικού ενισχύεται από την αύξηση της περιεκτικότητας PCM στον τοίχο.

Μια ακόμα μελέτη συντάχθηκε από **Quanying** [14,20] για τη διερεύνηση των μειγμάτων υγρής παραφίνης και στεαρικού οξέος, μυριστικού οξέος, λαυρικού οξέος και παλμιτικού οξέος. Οι θερμικές ιδιότητες των διαφόρων μιγμάτων μελετήθηκαν πειραματικά με τη DSC. Ο λόγος γι' αυτό είναι ότι οι θερμοκρασίες αλλαγής φάσης των PCMs που χρησιμοποιούνται σε γυψοσανίδα πρέπει να είναι περίπου 20-30°C. Τα λιπαρά οξέα έχουν υψηλές θερμοκρασίες αλλαγής φάσης και είναι ακριβά. Η υγρή παραφίνη έχει χαμηλή θερμοκρασία αλλαγής φάσης και είναι φθηνή. Έτσι για να βρούμε PCMs με χαμηλή τιμή και κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης που να χρησιμοποιούνται σε γυψοσανίδα, ετοιμάσαμε διάφορα είδη από μείγματα υγρής παραφίνης και λιπαρών οξέων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι θερμοκρασίες αλλαγής φάσης και οι λανθάνουσες θερμότητες αλλαγής φάσης των μιγμάτων μειώνονται με την αύξηση της κατά μάζα περιεκτικότητας της υγρής παραφίνης.

Όσο αφορά τα επιμέρους μίγματα προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Μείγματα υγρής παραφίνης και παλμιτικού οξέος ή στεαρικού οξέος έχουν υψηλές θερμοκρασίες αλλαγής φάσης, έτσι δεν είναι κατάλληλα ως υλικά αποθήκευσης

ενέργειας για χρήση σε γυψοσανίδα. Οι θερμοκρασίες τώρα αλλαγής φάσης των μειγμάτων υγρής παραφίνης και μυριστικού οξέος είναι χαμηλότερες από 30°C, όταν οι περιεκτικότητες μάζας υγρής παραφίνης είναι υψηλότερες από 80%, αλλά οι λανθάνουσες θερμότητες αλλαγής φάσης είναι χαμηλές. Ενώ για τα μείγματα υγρής παραφίνης και λαυρικού οξέος είναι χαμηλότερες των 30°C, όταν οι περιεκτικότητες μάζας υγρής παραφίνης είναι υψηλότερες από 60%, με τις λανθάνουσες θερμότητες αλλαγής φάσης όμως να είναι υψηλές. Έτσι λοιπόν καταλήγουμε στο ότι τα μείγματα υγρής παραφίνης και λαυρικού οξέος είναι κατάλληλα υλικά αλλαγής φάσης για χρήση σε γυψοσανίδες καθώς για περιεκτικότητες μάζας υγρής παραφίνης της τάξης του 60-80%, οι θερμοκρασίες αλλαγής φάσης των μειγμάτων είναι 20,7 έως 28,6°C, και οι λανθάνουσες θερμότητες αλλαγής φάσης είναι 35-90J/g.

Παρά τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι γυψοσανίδες με PCMs όπως διαπιστώσαμε από τις παραπάνω μελέτες παρατηρούνται και κάποια μειονεκτήματα [11]. Ειδικότερα η σωστή θερμοκρασία αλλαγής φάσης για μία κλιματική περιοχή δεν θα είναι κατάλληλη για μια άλλη. Το να επιτευχθεί η σωστή θερμοκρασία γίνεται διπλά δύσκολο σε περιοχές που απαιτούν τόσο θέρμανση όσο και ψύξη. Άλλη μελέτη περιλαμβάνει την κάλυψη της επιφάνειας με πτητικές προσμείξεις (ανθοφορία), την αντοχή στη φωτιά, τη διάβρωση των μετάλλων, την οσμή και κάποια παραδοσιακά θέματα εφαρμογής, όπως είναι η δυνατότητα διατήρησης των χρωμάτων.

4.3.1.2 Μπλοκ σκυροδέματος εμποτισμένα με PCMs

Μια άλλη δυνατότητα εφαρμογής των PCMs στις κατασκευές κτιρίων είναι το ενισχυμένο σκυρόδεμα με PCM. Lee και η ομάδα του [11,12] έχουν μελετήσει και παρουσιάσει τα αποτελέσματα δοκιμών μακρο-κλίμακας, που συγκρίνουν την απόδοση της θερμικής αποθήκευσης των απλών μπλοκ τσιμέντου με εκείνα που είναι εμποτισμένα με δύο τύπους PCMs, BS και εμπορική παραφίνη. Δύο τύποι μπλοκ εξετάστηκαν και συγκρίθηκαν, το κοινό μπλοκ που είναι κατασκευασμένο από τσιμέντο Portland και το κυψελωτό μπλοκ που αποτελείται από τσιμέντο Portland συν διοξείδιο του πυριτίου. Ο εμποτισμός επιτεύχθηκε βυθίζοντας το θερμαινόμενο σκυρόδεμα σε μια μπανιέρα γεμάτη με λιωμένο PCM μέχρι η απαιτούμενη ποσότητα PCM να απορροφηθεί (3.9 έως 8.6%). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα μπλοκ τσιμέντου μπορούν να αποθηκεύουν τη λανθάνουσα και την αισθητή θερμότητα των ενσωματωμένων PCM καθώς επίσης και την αισθητή θερμότητα του σκυροδέματος. Αυτό επιτρέπει στη θέρμανση και ψύξη που παρέχεται από τις υπηρεσίες κοινής ωφέλειας να μετατοπίζεται από τις ώρες ζήτησης.

Shi [14] μελέτησαν πειραματικά τη χρήση του PCM (παραφίνη) στη μάζα σκυροδέματος για την αποφυγή θερμικών ρωγμών. Καθώς η λανθάνουσα θερμότητα του PCM απελευθερώνεται ή απορροφάται σε μια ορισμένη θερμοκρασία σε μια μάζα σκυροδέματος, το PCM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της έντασης της θερμοκρασίας και την πρόληψη των ρωγμών λόγω θερμοκρασίας. Η κατανομή της θερμοκρασίας δοκιμάστηκε στη μέση περιοχή μιας μάζας σκυροδέματος με PCM για τον έλεγχο της θερμοκρασίας. Η αντοχή σε θλίψη και η διαπερατότητα της μάζας σκυροδέματος με PCM δοκιμάστηκαν και η μικροσκοπική πορώδη δομή του PCM κονιάματος ερευνήθηκε επίσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος μειώνεται με την προσθήκη PCM, αλλά η αντι-διαπερατότητα του σκυροδέματος είναι ενισχυμένη. Το συνολικό πορώδες του PCM κονιάματος δεν άλλαξε πολύ σε σύγκριση με εκείνο των απλών κονιαμάτων, όμως η διάμετρος πόρων έγινε μεγαλύτερη. Η μέγιστη θερμοκρασία στη μάζα σκυροδέματος, επίσης, μειώθηκε με την προσθήκη PCM. Επιπλέον ο ρυθμός της διαδικασίας αύξησης της θερμοκρασίας και της διαδικασίας μείωσης της θερμοκρασίας μειώθηκε, έτσι, ο σχηματισμός ρωγμών λόγω θερμοκρασίας στη μάζα του σκυροδέματος θα μπορούσε να αποφευχθεί.

Hadjieva [11,21] έχουν εφαρμόσει την τεχνική εμποτισμού σκυροδέματος με πενταένυδρο θειικό άλας νατρίου ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ως PCM. Ο λόγος είναι η υψηλή θερμότητα τήξης του $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (περίπου 210 kJ/kg, 1,5 φορές μεγαλύτερη από της παραφίνης) και η καλή θερμική του αγωγιμότητα (περίπου 0,57 W/mK, δηλαδή περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη) που είναι ελκυστικές ιδιότητες αποθήκευσης ενός υλικού που πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε σκυρόδεμα PCM. Χρησιμοποίησαν πορώδες σκυρόδεμα και κατάφεραν να καλύψουν τους περισσότερους πορώδεις και τριχοειδείς χώρους του μπετόν έως και 60%. Αυτή η τιμή μειώνεται κατά 10% μετά από επαναλαμβανόμενους θερμικούς κύκλους των δειγμάτων.

Η ενθαλπία τήξης του νέου σύνθετου συστήματος PCM είναι περίπου 100 kJ/kg. Η θερμοχωρητικότητα του συστήματος σκυροδέματος PCM που διερευνάται παραμένει σε υψηλά επίπεδα. Το εύρος λειτουργίας θερμοκρασίας της μετάβασης φάσης είναι περίπου 10°C για ένα σύνθετο PCM λιωμένο μερικώς. Η μετάβαση φάσης ακολουθεί μια τυχαία κατανομή χρονικού διαστήματος λόγω επίδρασης της υπέρψυξης που εμφανίζεται όταν η στερεά φάση PCM λιώσει τελείως. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μεγάλη έκταση απορρόφησης του κυψελωτού πορώδους σκυροδέματος λειτουργεί ως μια καλή υποστηρικτική μήτρα μιας ανομοιόμορφης τήξης του $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ και βελτιώνει τη σταθερότητα της δομής του κατά τη διάρκεια των θερμικών κυκλικών καταπονήσεων. Τέτοιες μικροενσωματώσεις

μπορούν να αποδειχθούν πολύ αποτελεσματικές στον περιορισμό του PCM με έναν ανέξοδο τρόπο και, επίσης, στην εξάλειψη προβλημάτων που συνδέονται με τη χρήση ένυδρων αλάτων, όπως είναι η υπέρψυξη και ο διαχωρισμός φάσεων.

Hunger [14] εκτέλεσαν μια σειρά πειραμάτων χρησιμοποιώντας διαφορετικά ποσά PCM σε αυτοσυμπυκνούμενα μίγματα σκυροδέματος. Η μελέτη επικεντρώθηκε στην άμεση ανάμειξη των μικροκαψουλών PCM με σκυρόδεμα και στην επιρροή του στις ιδιότητες του υλικού. Διερευνήθηκαν οι ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος και οι ιδιότητες σκλήρυνσης. Οι ιδιότητες σκλήρυνσης περιλαμβάνουν δοκιμές αντοχής και μια αξιολόγηση των θερμικών ιδιοτήτων. Αποδείχθηκε ότι η αύξηση των ποσοτήτων PCM οδήγησε σε μείωση της θερμικής αγωγιμότητας και σε αύξηση της ικανότητας θερμότητας, που και τα δύο είχαν σαν αποτέλεσμα τη σημαντική βελτίωση της θερμικής απόδοσης του σκυροδέματος. Από την άλλη πλευρά μια σημαντική απώλεια στη αντοχή και μια μικρο-δομική ανάλυση έδειξαν ότι ένα μεγάλο μέρος των καψουλών καταστράφηκε κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανάμειξης και απελευθέρωσαν το κερί παραφίνης γεμίζοντας την περιβάλλουσα μήτρα, ωστόσο, η αντοχή σε θλίψη των δοκιμών μας ακόμα ικανοποιούσε τα αιτήματα των περισσότερων κατασκευαστικών εφαρμογών.

Hawes [11,22] παρουσίασαν τη θερμική συμπεριφορά των PCM (BS, δωδεκανόλη (DD), παραφίνη (PAR), δεκατετρανόλη (TD)) σε διάφορους τύπους μπλοκ τσιμέντου. Η παρουσίαση έχει καλύψει τις επιδράσεις της αλκαλικότητας του σκυροδέματος, της θερμοκρασίας, του χρόνου εμποτισμού και της αραίωσης του PCM κατά την απορρόφησή του στη διάρκεια της διαδικασίας εμποτισμού. Όσο αφορά την επίδραση της αλκαλικότητας από τα αποτελέσματα των προκαταρκτικών δοκιμών ήταν προφανές ότι τα σκυροδέματα με τις χαμηλότερες αλκαλικότητες ήταν πιο κατάλληλα για χρήση με BS, DD και TD λόγω της ευαισθησίας τους σε αλκαλική επίθεση. Ακόμα όλα τα σκυροδέματα σε αυτή την ομάδα κρίθηκαν κατάλληλα για χρήση με την παραφίνη δεδομένου ότι είναι αδρανή σε αλκαλικό περιβάλλον. Ένα άλλο PCM, πολυαιθυλενογλυκόλη (PEG), χρησιμοποιήθηκε επίσης στα πρώτα στάδια της εργασίας, αλλά αυτό αποδείχθηκε ότι επιδεινώνεται, όταν συνδυάζεται με το είδος του σκυροδέματος που χρησιμοποιείται και έτσι η χρήση της διακόπηκε προς το παρόν. Συνάγεται λοιπόν το συμπέρασμα ότι συμβατότητα σκυροδέματος-PCM θα μπορούσε να βελτιωθεί με την τροποποίηση του σκυροδέματος ώστε να γίνει λιγότερο επιθετικό με κάποια PCM του.

Εκτός από την επίδραση της αλκαλικότητας του σκυροδέματος, επίδραση έχει και η θερμοκρασία του PCM, αύξηση της οποίας θα αυξήσει τη περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε PCM μέχρι ενός σημείου το οποίο ποικίλλει ανάλογα με το

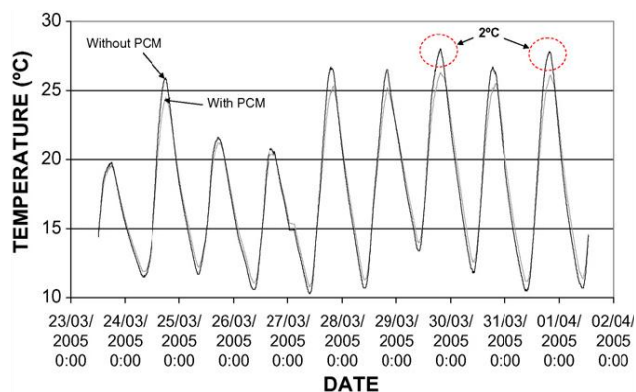
συνδυασμό του σκυροδέματος και PCM που χρησιμοποιείται, καθώς και με το αριθμό των βυθίσεων. Η βύθιση των δοκιμών σκυροδέματος σε PCM θα πρέπει, ιδανικά, να ολοκληρωθεί το δυνατόν συντομότερο, ιδίως αν είναι ένα στοιχείο μιας υψηλού όγκου διαδικασίας παραγωγής. Από την άλλη πλευρά, το ποσό του PCM που απορροφάται πρέπει να είναι επαρκές για την εφαρμογή. Για να καλύψει τις δύο από αυτές τις απαιτήσεις, είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί μια τεχνική βύθισης για κάθε συνδυασμό σκυροδέματος και PCM.

Σχετικά με την προσθήκη ενός αραιωτικού στο PCM ως μέσο μείωσης του ιξώδους στη θερμοκρασία της απορρόφησης και κατά συνέπεια αύξησης του ποσού του PCM που απορροφάται από το σκυρόδεμα δεν αποδειχθεί σε αυτό το στάδιο της έρευνας ότι τα διαλυτικά που χρησιμοποιούνται είναι ένα αποτελεσματικό μέσο για την αύξηση της απορρόφησης του PCM και, μάλιστα σε ορισμένες περιπτώσεις, είχαν το αντίθετο αποτέλεσμα από το επιθυμητό. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι ενώ το αραιωτικό μπορεί να αυξήσει την ποσότητα του υγρού που απορροφάται, μπορεί επίσης να μειώσει την καθαρή λανθάνουσα θερμότητα του διαλύματος. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή έδειξε ότι, στην περίπτωση των δωδεκανόλη και αιθανόλη, η αραιώση του υγρού παρουσίασε αύξηση της απορρόφησης ελαφρώς, όπως αναμενόταν, και ότι η αρχή αυτή μπορεί να βρει εφαρμογή, ενδεχομένως, σε ένα πιο παχύρρευστο PCM ή να χρησιμοποιηθεί για να επιτρέψει τη μείωση της θερμοκρασίας εμβάπτισης, υπό την προϋπόθεση ότι το καθαρό ιξώδες δεν μειώθηκε σε σημείο που να οδηγήσει σε υπερβολική παροχέτευση ή επακόλουθη διαρροή από το σκυρόδεμα συγκεκριμένου τύπου, που χρησιμοποιείται. Αραίωμα με λιπαρά οξέα υψηλής λανθάνουσας θερμότητας δεν δοκιμάστηκε λόγω της ευαισθησίας τους στην επίθεση από τα προϊόντα της ενυδάτωσης αν και αυτή η τεχνική θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε πιο ήπια υλικά όπως γύψος.

Ακόμα η αντίσταση ψύξης-τήξης του σκυροδέματος εξαρτάται από έναν αριθμό χαρακτηριστικών μεταξύ των οποίων είναι και η χαμηλή απορροφητικότητα σε υγρασία, μια σημαντική μείωση στην τιμή της οποίας θα βελτιώσει την αντοχή του εμποτισμένου σκυροδέματος. Ομοίως, εμποτισμός PCM μπορεί να παρέχει βελτιωμένη αντοχή σε επιθέσεις από άλλα υγρά, όπως παράγοντες αποπάγωσης, μεταξύ άλλων. Εξέτασαν τέλος τους μηχανισμούς απορρόφησης και καθιέρωσαν ένα μέσο για την ανάπτυξη και χρήση σταθερών απορρόφησης για PCM στο σκυρόδεμα προκειμένου να επιτύχουν διάχυση του επιθυμητού ποσού PCM και συνεπώς, την απαιτούμενη ικανότητα θερμικής αποθήκευσης. Τα αποτελέσματα της τροποποίησης του τσιμέντου και της βελτίωσης των τεχνικών ενσωμάτωσης PCM ήταν η αυξημένη θερμική αποθήκευση έως και περίπου 300%.

Castellón και **Cabeza** [14,23] καθόρισαν πειραματικά τα οφέλη ενός νέου σύνθετου υλικού που προέκυψε από την ανάμειξη Micronal PCM (από BASF), με σημείο τήξης από 26°C και ενθαλπία αλλαγής φάσης από 110 kJ/kg με σκυρόδεμα. Η μικροενσωμάτωση με εμποτισμό των υλικών αλλαγής φάσης σε νωπό σκυρόδεμα είναι πολύ αποτελεσματική, αλλά μπορεί να επηρεάσει την μηχανική αντοχή του σκυροδέματος καθώς και να οδηγήσει σε «αιμορραγία» κατά τη φάση της τήξης του PCM. Ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι να καταδείξει την δυνατότητα χρήσης μικροκαψουλών PCM σε σκυρόδεμα χωρίς να χάνετε κανένα από τα χαρακτηριστικά του αρχικού σκυροδέματος. Το έργο αυτό αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του σχεδίου MOPCON της ΕΕ με τους εταίρους από Ισπανία, Ολλανδία, Ελλάδα και Γαλλία. Η πειραματική διάταξη (σχήμα 4.11) αποτελείται από δύο πανομοιότυπου σχήματος καμπίνες σκυροδέματος, η μία με συμβατικό σκυρόδεμα, και η άλλη με τροποποιημένο σκυρόδεμα, το οποίο ονομάζεται Morcon σκυρόδεμα. Διαπιστώθηκε ότι το σκυρόδεμα Morcon φθάνει σε θλιπτική αντοχή πάνω από 25 MPa και αντοχή σε εφελκυσμό διαχωρισμού πάνω από 6 MPa (μετά από 28 ημέρες).

Οι καμπίνες είναι προφανώς ίδια χτισμένες με την ένωση έξι πάνελ σκυροδέματος, αλλά η μία από αυτές περιέχει περίπου 5% κατά βάρος υλικό αλλαγής φάσης αναμεμιγμένο με το σκυρόδεμα στα τρία πάνελ του νότιου, δυτικού τοίχου και της οροφής. Τα πάνελ αυτά χτίστηκαν στην Ελλάδα, μηχανικές και θερμικές δοκιμές για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των τοίχων εκτελέστηκαν στην Ολλανδία και την Ισπανία, και, τέλος, τοποθετήθηκαν στην περιοχή Puigverd de Lleida (Ισπανία). Η κατανομή των παράθυρων τώρα είναι η εξής: ένα παράθυρο στον ανατολικό και δυτικό τοίχο, τέσσερα παράθυρα στο νότιο τοίχο και η πόρτα στο βόρειο τοίχο. Θα πρέπει να τονιστεί ακόμα ότι οι καμπίνες δεν είναι μονωμένες, αφού η επίδραση του υλικού αλλαγής φάσης μόνο ήθελαν να δοκιμαστεί.



Σχήμα 4.11: Αριστερά: Αποψη των καμπίνων σκυροδέματος, Δεξιά: Θερμοκρασία του νότιου τοίχου στις δύο καμπίνες [23].

Τα αποτελέσματα (σχήμα 4.11: Δεξιά) που προέκυψαν δείχνουν μια πραγματική ευκαιρία στην εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια. Πρώτον, η καμπύνα χωρίς PCM έχει μια μέγιστη θερμοκρασία 1°C υψηλότερη από ότι με το υλικό αλλαγής φάσης, και ελάχιστη θερμοκρασία 2°C χαμηλότερη. Δεύτερον, η μέγιστη θερμοκρασία του τοιχώματος με το υλικό αλλαγής φάσης εμφανίζεται περίπου 2 ώρες αργότερα σε σχέση με χωρίς PCM, δηλαδή, η θερμική αδράνεια του τοίχου είναι υψηλότερη. Τρίτον, αυτή η θερμική αδράνεια εμφανίζεται και πάλι το απόγευμα, λόγω της κατάψυξης του PCM, αλλά και νωρίτερα το πρωί, λόγω της τήξης του υλικού αλλαγής φάσης. Η επίδραση της θερμικής αδράνειας είναι πολύ ενδιαφέρουσα σε εμπορικά κτίρια, όπως κτίρια γραφείων. Μια καθυστέρηση 2 ωρών στο κύμα καύσωνα θα σήμαινε μείωση της ηλεκτρικής κατανάλωσης λόγω κλιματισμού. Η έλλειψη μόνωσης τώρα έχει σαν αποτέλεσμα η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ημέρας και νύχτας να είναι υψηλή. Τα παραπάνω συμπεράσματα προέκυψαν από πείραμα κατά το οποίο τα παράθυρα παρέμειναν κλειστά.

Ένα δεύτερο πείραμα ήταν η μέτρηση όλων των ίδιων παραμέτρων με τα παράθυρα στο νότιο τοίχο των καμπίνων ανοιχτά. Και το τρίτο πείραμα ήταν η μέτρηση όλων των ίδιων παραμέτρων με ανοιχτά και κλειστά παράθυρα, για προσομοίωση της ελεύθερης ψύξης, όπου το εξωτερικό κρύο αποθηκεύεται κατά τη διάρκεια της νύχτας και απελευθερώνεται στους εσωτερικούς χώρους κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η θερμική αδράνεια που παρατηρήθηκε σε όλα τα πειράματα δείχνει ότι όλα τα PCM που περιλαμβάνονται στους τοίχους της καμπίνας παγώνουν και λιώνουν σε κάθε κύκλο. Αποτελέσματα επίσης έδειξαν ότι η νυχτερινή ψύξη είναι σημαντική την επίτευξη αυτού του πλήρους κύκλου κάθε μέρα.

Η αρχή της λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε πορώδες δομικό υλικό, αλλά η τρέχουσα έρευνα κατά κύριο λόγο επικεντρώνεται όπως είδαμε στις γυψοσανίδες και το σκυρόδεμα. Σε σύγκριση με τις γυψοσανίδες, τα συνολικά οφέλη των PCMs σε σκυρόδεμα [24] φαίνεται να είναι πιο αμφίβολα, λόγω ότι τα κτίρια από μπετόν είναι γενικά γνωστό ότι έχουν υψηλή θερμική μάζα. Ωστόσο, τα πιθανά κέρδη μπορούν εύκολα να φανούν από μια απλή σύγκριση:

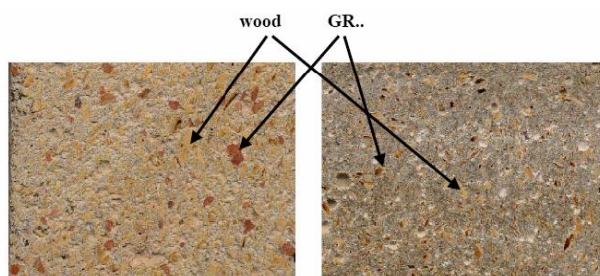
i. Οι γυψοσανίδες έχουν θερμοχωρητικότητα της τάξης των $840 \text{ J}/(\text{kgK})$, μια πυκνότητα $950 \text{ kg}/\text{m}^3$ και ένα τυπικό πάχος $12,5 \text{ mm}$, με αποτέλεσμα μια συνολική χωρητικότητα περίπου $10 \text{ kJ}/\text{m}^2\text{K}$. Η ενίσχυση των γυψοσανίδων με PCMs οδηγεί σε μια συνολική θερμοχωρητικότητα των 550 έως και $800 \text{ kJ}/\text{m}^2\text{K}$ στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης.

ii. Από την άλλη πλευρά, το σκυρόδεμα έχει θερμοχωρητικότητα των $1000 \text{ J}/(\text{kgK})$, πυκνότητα $2300 \text{ kg}/\text{m}^3$, με αποτέλεσμα συνολική ικανότητα των $552 \text{ kJ}/\text{m}^2\text{K}$, εάν εφαρμοσθεί σε μια πλάκα με ένα τυπικό πάχος των 24 cm , η οποία ισοδυναμεί με την ικανότητα θερμότητας, ενισχυμένης γυψοσανίδας PCM. Η ενίσχυση του σκυροδέματος με PCMs έχει σαν αποτέλεσμα μια συνολική θερμοχωρητικότητα περίπου των $8000 \text{ kJ}/\text{m}^2\text{K}$ στη θερμοκρασία μετάβασης, δηλαδή 10 φορές την τιμή που επιτυγχάνεται για γυψοσανίδες.

Η μικρή αυτή σύγκριση δείχνει ότι, αν και τα κτίρια από σκυρόδεμα διαθέτουν ακόμη μια σχετικά υψηλή θερμική μάζα, ενισχύοντας το σκυρόδεμα με PCMs μπορεί να σημαίνει σημαντική αύξηση της θερμικής ικανότητας του κτιρίου. Παρόλ' αυτά κάποιος πρέπει να ρωτήσει αν το αποτέλεσμα αξίζει το (επί του παρόντος) υψηλό κόστος των PCMs.

4.3.1.3 PCM ενσωματωμένο σε μείγμα ξύλου – ελαφρού βάρους σκυροδέματος [11]

Ξύλο και ελαφρού βάρους σκυρόδεμα είναι ένα μίγμα τσιμέντου, κομματιών ξύλου ή σκόνης από πριόνι που δεν πρέπει να υπερβαίνει το 15% κατά βάρος, και επίσης νερού και προσθέτων. Το μίγμα αυτό μπορεί να εφαρμοστεί στην κατασκευή εσωτερικής και εξωτερικής τοιχοποιίας κτιρίου. Η ενσωμάτωση στο μείγμα αυτό ξύλου-σκυροδέματος, δύο υλικών PCM Rubitherm GR40, 1-3mm και GR50, 0.2-0,6mm ερευνήθηκαν από το Mehling και τους συνεργάτες του.



Σχήμα 4.12: Δείγματα PCM-ξύλου-ελαφρύ-σκυροδέματος με διαφορετικές συγκεντρώσεις διάφορων PCM [14].

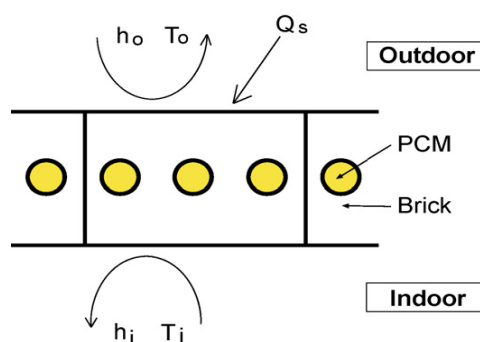
Αποδείχτηκε ότι τα PCMs μπορούν να συνδυαστούν με το μείγμα και ότι οι μηχανικές ιδιότητες δεν φαίνεται να αλλάζουν σημαντικά. Οι συγγραφείς ανέφεραν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Θερμική αγωγιμότητα: λ μεταξύ $0,15$ και $0,75 \text{ W}/\text{mK}$
- Ηχομόνωση
- Μηχανικές ιδιότητες: πυκνότητα μεταξύ 600 και $1700 \text{ kg}/\text{m}^3$
- Θερμοχωρητικότητα c_p μεταξύ $0,39$ έως $0,48 \text{ kJ}/\text{kgK}$ για $\rho = 1300 \text{ kg}/\text{m}^3$
- Πυκνότητα ίση με το 60-70% της τιμής του καθαρού σκυροδέματος ($0,67 \text{ kJ}/\text{kgK}$ για $\rho = 2400 \text{ kg}/\text{m}^3$).

Η ενσωμάτωση των PCM έχει δύο επιπλέον λόγους (1) να αυξήσει την ικανότητα θερμικής αποθήκευσης και (2) να γίνουν τα στοιχεία των τοίχων πιο ελαφριά και πιο λεπτά με βελτιωμένες θερμικές επιδόσεις.

4.3.1.4 Ενσωμάτωση PCM σε τούβλο

Alawadhi [25] μελέτησε αριθμητικά τη συμπεριφορά ενός σύνθετου PCM-τούβλου για ζεστά κλίματα. Ο στόχος του συστήματος τούβλου-PCM είναι να μειώσει τη ροή θερμότητας από τον εξωτερικό χώρο με απορρόφηση του κέρδους θερμότητας στο τούβλο προτού φθάσει στον εσωτερικό χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τη νύχτα, η αποθηκευμένη θερμότητα απελευθερώνεται στους εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Η γεωμετρική διαμόρφωση των οριζόντιων τούβλων (0,25m x 0,15m x 0,15m) του τοίχου που περιέχουν τρεις κυλίνδρους PCM σε οπές διαμέτρου 0,03 m, η καθεμία παρουσιάζεται στο σχήμα 4.13. Ερευνώνται τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις, τούβλα με ένα, δύο, και τρεις κυλίνδρους PCM, καθώς και ένα τούβλο χωρίς PCM. Η εξωτερική επιφάνεια του τοίχου υποβάλλεται σε ηλιακή ακτινοβολία που εξαρτάται από το χρόνο και συνθήκες ορίων εξαναγκασμένης συναγωγής, ενώ η εσωτερική επιφάνεια υποβάλλεται σε οριακή συνθήκη ελεύθερης συναγωγής ανεξάρτητη του χρόνου. Τρεις τύποι παραφίνης εξετάζονται ως PCM: n-octadecane, n-eicosane, και P116. Τα δεδομένα καιρού είναι για το μήνα Ιούνιο, όπου η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας φτάνει στο αποκορύφωμά της. Το πλάτος των τοίχων είναι μεγάλο σε σύγκριση με το πάχος τους, και ως εκ τούτου, η επίδραση των απολήξεων των τοίχων έχει αμελητέα επίδραση στην μεταφορά θερμότητας στον τοίχο.



Σχήμα 4.13: Σχηματική παράσταση του συστήματος τούβλο-PCM, και οι οριακές συνθήκες [25].

Παρατηρήθηκε από τις κατανομές της θερμοκρασίας του τούβλου, ότι η θερμοκρασία στο τούβλο χωρίς PCM είναι μεταξύ 25,7 και 55,6°C. Οι τρεις κύλινδροι PCM, που χρησιμοποιούνται, θεωρούνται εγκατεστημένοι στο κέντρο του τούβλου, $H_c = H/2$. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αποδείχθηκε ότι το P116 και n-octadecane είναι αναποτελεσματικά στη μείωση της ροής θερμότητας στον εσωτερικό χώρο. Ειδικότερα η ροή θερμότητας από P116 και n-octadecane είναι πολύ κοντά σ' αυτή

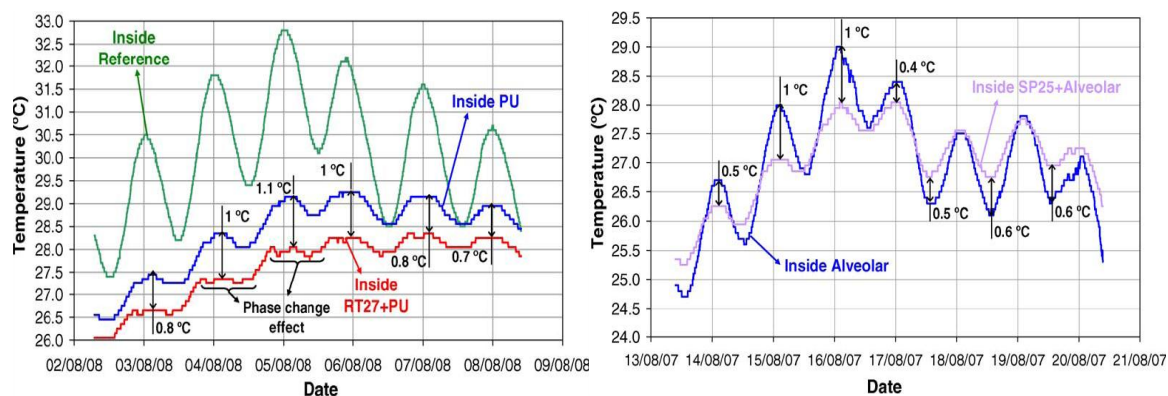
του τούβλου χωρίς PCM. Η χαμηλή θερμοκρασία τήξης της n-octadecane κοντά στο κατώτερο όριο της θερμοκρασίας λειτουργίας την έκανε να είναι σε υγρή φάση, όλο το χρόνο, ενώ η υψηλή θερμοκρασία τήξης του P117 κοντά στο ανώτατο όριο το έκανε να είναι σε στερεά φάση όλη την ώρα. Από την άλλη πλευρά, όταν η n-eicosane με μια θερμοκρασία τήξης στη μέση του εύρους λειτουργίας εισήχθη, ο ρυθμός μεταβολής της ροής θερμότητας μειώθηκε σημαντικά κατά την περίοδο από τις 10 π.μ. έως 5 μ.μ., με μέγιστη μείωση ροής θερμότητας κατά 24,2%. Η διαφορά μεταξύ των εξεταζόμενων περιπτώσεων είναι αμελητέα κατά τη διάρκεια της περιόδου επτά-δέκα π.μ., επειδή η θερμοκρασία του τούβλου είναι ακόμα κάτω από τη θερμοκρασία τήξης του PCM.

Αποδείχτηκε ότι έχοντας τρεις κυλίνδρους επιτυγχάνεται μέγιστη μείωση της μέγιστης ροής θερμότητας ίσης με 24,2% καθώς στην περίπτωση ενός μόνο κυλίνδρου η μέγιστη ροή θερμότητας μειώνεται κατά περίπου 11,5%, και δύο κυλίνδρων κατά 17,9%. Εκτός όμως από τον αριθμό των κυλίνδρων σε κάθε τούβλο μελετήθηκε και η θέση των κυλίνδρων PCM στο τούβλο με μετατόπιση τους από την κεντρική γραμμή σε μια θέση κοντά στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια, με $H_c=H/3$ και $H_c=2H/3$ αντίστοιχα. Αποδείχτηκε ότι η θερμική απόδοση της περίπτωσης της θέσης στη κεντρική γραμμή είναι καλύτερη από την περίπτωση εσωτερικής θέσης. Από την άλλη πλευρά, η περίπτωση της εξωτερικής θέσης του κυλίνδρου έχει μια αρχικά καλύτερη απόδοση από την κεντρική περίπτωση, μέχρι τις 2 μ.μ. Μετά από αυτό το χρόνο, η ροή θερμότητας αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς καθώς όντας πολύ κοντά στην εξωτερική επιφάνεια, το PCM υποβάλλεται σε υψηλότερη ροή θερμότητας από τη εξωτερική επιφάνεια από ό, τι οι άλλες περιπτώσεις, που οδηγεί σε ένα γρήγορο ρυθμό τήξης. Η ξαφνική αλλαγή στη ροή θερμότητας στις 2 μ.μ. δείχνει ότι το PCM είναι εντελώς λιωμένο. Συνεπώς συμπεραίνουμε ότι η θέση της κεντρικής γραμμής κυλίνδρων PCM δείχνει την καλύτερη επίδοση στο πλαίσιο της θερμικής αποτελεσματικότητας, αλλά και της διατήρησης της αντοχής των τούβλων καθώς πετυχαίνει συνολική μείωση ροής θερμότητας κατά 17,55% σ' αντίθεση με τη μείωση της ροής θερμότητας για τις εξωτερικές και εσωτερικές θέσεις κυλίνδρων PCM, που είναι 17,49% και 10,16%, αντίστοιχα.

Castell και οι συνεργάτες του [26] μελέτησαν την ενσωμάτωση PCM σε συμβατικό και κυβελιδικό τούβλο για μια Μεσογειακή κατασκευή υπό πραγματικές συνθήκες. Η πειραματική εγκατάσταση αποτελείται από πέντε διαφορετικές καμπίνες που τοποθετήθηκαν στην περιοχή Puigverd de Lleida, η οποία αντιπροσωπεύει ένα τυπικό ισπανικό ηπειρωτικό κλίμα, με κρύους χειμώνες και ζεστά και σχετικά ξηρά καλοκαίρια. Οι τρεις καμπίνες χρησιμοποιώντας διαφορετικές λύσεις μόνωσης

χτίστηκαν με κοινό τούβλο: καμπίνα αναφοράς, καμπίνα με πολυουρεθάνη, και καμπίνα PCM (RT-27 ως PCM και πολυουρεθάνη), αντίστοιχα και οι υπόλοιπες δύο διαφορετικές καμπίνες χτίστηκαν με κυψελιδικό τούβλο: καμπίνα αναφοράς (κυψελιδικό) και καμπίνα PCM (SP25 ως PCM + Κυψελιδικό).

Το πρώτο πείραμα με ελεύθερη διακύμανση της θερμοκρασίας, όπου κανένα σύστημα ψύξης δεν χρησιμοποιήθηκε έδειξε (σχήμα 4.14) χαμηλότερες υψηλές θερμοκρασίες (μέχρι 1°C) και πιο σταθερές συνθήκες μέσα στις καμπίνες με PCM. Η επίδραση PCM είναι σαφώς ορατή και στους δύο τύπους, αλλά ειδικά στη καμπίνα κυψελιδικών τούβλων, όπου η θερμική αντίσταση του τοίχου είναι χαμηλότερη. Όσο αφορά τις καμπίνες συμβατικών τούβλων η καμπίνα αναφοράς παρουσιάζει υψηλές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, λόγω της έλλειψης μόνωσης. Στην καμπίνα PU αυτές οι διακυμάνσεις μειώθηκαν σημαντικά, αλλά εξακολουθούν να υπάρχουν. Και στις δύο καμπίνες, τα PCMs (RT-27 και SP-25 A8) βρίσκονται στις περιοχές τήξης τους σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Ωστόσο, ορισμένα προβλήματα παρατηρήθηκαν με τη στερεοποίηση του PCM κατά τη διάρκεια της νύχτας, επειδή κανένα σύστημα αερισμού για το PCM δεν εγκαταστάθηκε.



Σχήμα 4.14: Αριστερά: Καμπίνες συμβατικού τούβλου. Θερμοκρασίες στο εσωτερικό της καμπίνας αναφοράς, της PU και της RT27 + PU [26]. Δεξιά: Καμπίνες κυψελιδικού τούβλου. Θερμοκρασίες στο εσωτερικό της κυψελιδικής καμπίνας και της SP25 + κυψελιδικό [26].

Στο δεύτερο πείραμα οι καμπίνες εξοπλίστηκαν με μια αντλία θερμότητας ως ένα σύστημα ψύξης για την προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών ενός σπιτιού. Η ενεργειακή κατανάλωση της αντλίας θερμότητας μετρήθηκε για τον προσδιορισμό της πραγματικής εξοικονόμησης ενέργειας που επιτυγχάνεται όταν οι καμπίνες παραμένουν εντός των ορίων άνεσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πειράματος ελεγχόμενης θερμοκρασίας στους 24°C, η κατανάλωση συσσωρευμένης ενέργειας της καμπίνας αναφοράς είναι υψηλότερη από αυτή όλων των άλλων καμπίνων. Η καμπίνα RT27 + PU είναι αυτή με τη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, ενώ η

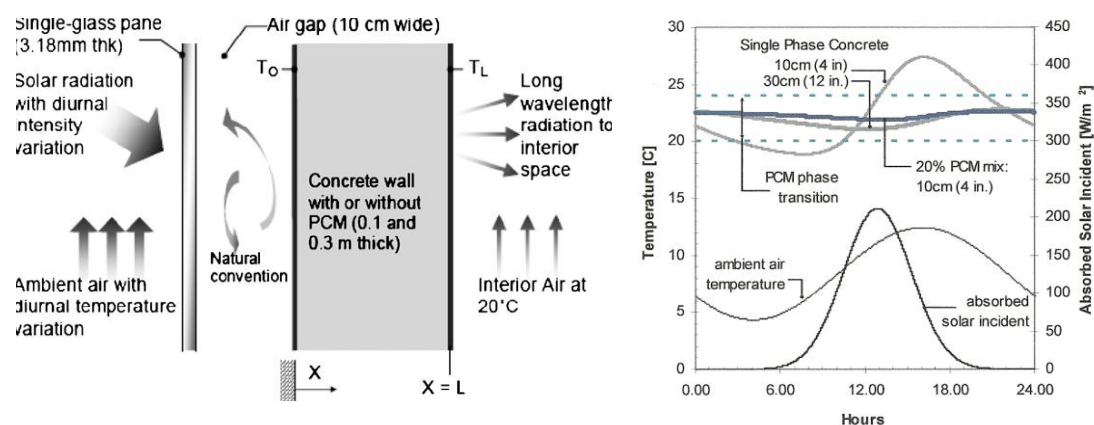
καμπίνα SP25 + κυψελιδικό είναι η δεύτερη, με κατανάλωση ακόμα λιγότερης ενέργειας από ό,τι η καμπίνα PU. Τέλος, η κυψελιδική καμπίνα είναι αυτή που καταναλώνει περισσότερη ενέργεια μετά από την καμπίνα αναφοράς. Αυτό που πρέπει να τονιστεί είναι ότι και οι δύο καμπίνες PCM μείωσαν την κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τις αντίστοιχες καμπίνες χωρίς PCM. Η καμπίνα RT27 + PU πέτυχε μείωση κατά 15% σε σύγκριση με την καμπίνα PU, ενώ η καμπίνα SP25 + κυψελιδικό έφθασε στο 17% της εξοικονόμησης ενέργειας σε σύγκριση με τη κυψελιδική. Η μείωση αυτή της ενεργειακής κατανάλωσης στις καμπίνες PCM που είχε σα συνέπεια να σώσει περίπου 1-1,5 kg/year/m² εκπομπών CO₂ μπορεί να συμβάλλει στην άμβλυνση των κλιματικών αλλαγών και της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

4.3.2 Τοίχος Trombe [9,27,28]

Ένας τοίχος Trombe είναι ένα πρωταρχικό παράδειγμα μιας έμμεσης προσέγγισης κέρδους. Αποτελείται από ένα παχύ τοίχο στη νότια πλευρά ενός σπιτιού. Ένα μονό ή διπλό στρώμα υαλοπίνακα από γυαλί ή πλαστικό τοποθετείται περίπου τέσσερις ίντσες μπροστά από την επιφάνεια του τοίχου. Ηλιακή θερμότητα συλλέγεται στο χώρο μεταξύ του τοίχου και του υαλοπίνακα. Η εξωτερική επιφάνεια του τοίχου είναι μαύρο χρώμα που απορροφά τη θερμότητα, η οποία στη συνέχεια αποθηκεύεται στη μάζα του τοίχου. Η θερμότητα αυτή έπειτα διανέμεται από το τοίχο Trombe στο σπίτι για μια περίοδο αρκετών ωρών. Όταν η εσωτερική θερμοκρασία πέφτει κάτω από αυτή της επιφάνειας του τοίχου, αρχίζει να ακτινοβολεί θερμότητα μέσα στο δωμάτιο. Η απώλεια θερμότητας από το τοίχο Trombe μπορεί να ελεγχθεί με μια μονωτική κουρτίνα, που να κλείνει το βράδυ στο χώρο μεταξύ του υαλοπίνακα και του τοίχου.

Παραδοσιακά οι τοίχοι Trombe βασίζονται στην αισθητή αποθήκευση θερμότητας, αλλά λόγω της δυνατότητας για μεγαλύτερη αποθήκευση θερμότητας ανά μονάδα μάζας, ο τοίχος Trombe με PCM αποτελεί μια ελκυστική ιδέα που αναμένει ακόμη επιτυχή υλοποίηση. Ένας τοίχος γεμάτος με PCM κατασκευάζεται στη νότια πλευρά του σπιτιού. Ο τοίχος θερμαίνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας από εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, τήκοντας το PCM. Τη νύχτα η θερμότητα απελευθερώνεται για να θερμανθεί το σπίτι. Για μια συγκεκριμένη ποσότητα αποθήκευσης θερμότητας, οι μονάδες αλλαγής φάσης απαιτούν λιγότερο χώρο από ό,τι οι τοίχοι νερού ή οι ογκώδη τοίχοι Trombe και είναι πολύ ελαφρύτερες σε βάρος και κατά συνέπεια, πολύ βολικές για χρήση σε εφαρμογές μετασκευής κτιρίων. Ένυδρα άλατα και υδρογονάνθρακες χρησιμοποιούνται συνήθως ως PCMs σε τοίχο Trombe.

Προκειμένου να δοθεί μια καλύτερη εικόνα για το πώς αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας με PCM μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση θερμικής απόδοσης ενός συνηθισμένου τοίχου Trombe για παθητική ηλιακή θέρμανση, ένας απλός υπολογισμός πραγματοποιήθηκε με τη χρήση τυπικών δεδομένων χειμερινού κλίματος από την τοποθεσία Raleigh-Durham στη Βόρεια Καρολίνα. Η ανάλυση αξιολόγησε τη μεταβατική θερμοκρασία ενός συνηθισμένου τοίχου Trombe από μπτετόν που έχει πάχος 30 cm (12 in) και 10 cm (4 in). Τα προκύπτοντα δεδομένα συγκρίθηκαν με εκείνα τοίχου της ίδιας διαμόρφωσης σχεδιασμού, αλλά που έχει 20% κατά βάρος PCM τύπου παραφίνης ομοιογενές αναμειγμένο με το υλικό του τοίχου. Η διαμόρφωση του μοντέλου του τοίχου Trombe απεικονίζεται στο σχήμα 4.15 (Αριστερά). Το PCM που εξετάζεται στο παρόν υπολογισμό είναι ένα μείγμα από n-octadecane (μια ουσία τύπου παραφίνης). Παρά το γεγονός ότι η ονομαστική θερμοκρασία τήξης της octadecane εκτιμάται στους 22-23°C, αυτή η θερμοκρασία μπορεί να είναι ελαφρώς προσαρμοσμένη με την ανάμειξη ομολόγων διαφορετικού μήκους ανθρακικής αλυσίδας. Στον υπολογισμό αυτό, η θερμοκρασία μετάβασης φάσης της παραφίνης έχει οριστεί να προκύψει μεταξύ 20 και 24°C (68 - 75,2°F). Η ειδική θερμοχωρητικότητα του PCM παραμένει σταθερή στα 2 kJ/kg·°C σε όλες τις θερμοκρασίες, εκτός από το εύρος θερμοκρασίας μετάβασης φάσης (20-24°C) όπου η θερμοχωρητικότητα του PCM μεταβάλλεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. (Κεφ.2.2.2). Η λανθάνουσα θερμότητα του PCM ισούται με 140 kJ/kg.



Σχήμα 4.15: Αριστερά: Διαμόρφωση του μοντέλου δοκιμής, Δεξιά: Θερμοκρασία επιφάνειας εσωτερικού τοίχου κατά τη διάρκεια μιας περιόδου 24 ωρών (Σημείωση: Ωρα 12.00 είναι η ώρα του μεσημεριού) [28].

Οι προκύπτουσες εσωτερικές επιφανειακές θερμοκρασίες παρουσιάζονται στο σχήμα 4.15 (Δεξιά) για τις δύο περιπτώσεις τοίχου μίας φάσης (πάχους 10cm και 30cm) και τοίχου εμπτισμένου με PCM (πάχους 10cm). Εξωτερική θερμοκρασία και εκτιμώμενη ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από την εξωτερική επιφάνεια του τοίχου επίσης παρουσιάζονται για σύγκριση, με τις δύο πιο κάτω καμπύλες του

σχήματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το προφίλ της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας για πάχος PCM 4 in, είναι σχεδόν πανομοιότυπο με εκείνο του μιας φάσης τοίχου πάχους 12 in. Η θερμοκρασία του τοίχου PCM 4 in παραμένει σχεδόν σταθερή καθ' όλη την ημέρα στους περίπου 22.3°C (72°F) με μόνο $\pm 0.35^\circ\text{C}$ ($\pm 0.62^\circ\text{F}$) διακύμανση. Από την άλλη πλευρά, ο τοίχος μιας φάσης από μπετόν του ίδιου πάχους παράγει μεγάλη ταλάντευση θερμοκρασίας περίπου 8.5°C (15.3°F) κατά την ίδια 24ωρη περίοδο. Μια σύγκριση με τα δεδομένα της θερμοκρασίας που λαμβάνονται για το τοίχο μιας φάσης 4 in δείχνει ότι ο τοίχος PCM μπορεί να μετατοπίσει ουσιαστικά το μεγαλύτερο μέρος του εισερχόμενου στη διάρκεια της ημέρας ηλιακού κέρδους θερμότητας σε μεταγενέστερο χρόνο τη νύχτα. Για την περίπτωση του τοίχου πάχους 4 in, η θερμοκρασία καθώς και η δυνατότητα θέρμανσης χώρου του τοίχου PCM παραμένει υψηλότερη από εκείνη του τοίχου μιας φάσης καθ' όλη τη νύχτα και το πρωί της επόμενης ημέρας για περίπου 12 ώρες. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση αυτή αποδεικνύουν ότι μια λεπτή ελαφριά δομή μπορεί να μετατραπεί σε μια θερμικά βαριά αποθήκευση κατάλληλη για παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης μέσω της χρήσης PCM. Το παράδειγμα που παρουσιάζεται σε αυτό τον υπολογισμό δείχνει ότι, με το κατάλληλο εύρος θερμοκρασίας τήξης, μίγμα με μόνο 20% κ.β. PCM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειωθεί το πάχος ενός συμβατικού τοίχου Trombe τρεις φορές χωρίς καμία υποβάθμιση της θερμικής απόδοσης για εφαρμογές θέρμανσης χώρων.

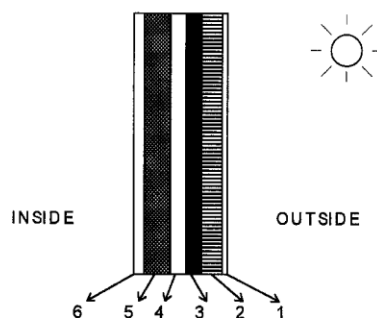
Castellon μελέτησε ένα τοίχο Trombe της παραπάνω διαμόρφωσης σε νότια πρόσοψη για να εξετάσει εάν η επίδραση του PCM μπορεί να χρησιμοποιηθεί όλο το χρόνο στις καιρικές συνθήκες της Μεσογείου για τη μείωση τόσο των απαιτήσεων ψύξης όσο και θέρμανσης. Farouk και Guceri μελέτησαν την χρησιμότητα των τοίχων με PCM εγκατεστημένων σε ένα κτίριο για νυχτερινή οικιακή θέρμανση με χρήση μίγματος άλατος Glauber και κεριού SUNOCO P-116. Παρατηρήθηκε ότι αν ο τοίχος PCM σχεδιαστεί σωστά, εξαλείφει μερικά από τα ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά της συμβατικής τοιχοποιίας με συγκρίσιμα αποτελέσματα. Swet, Ghoneim και Chandra χρησιμοποίησαν δεκαένυδρο θειικού νατρίου (σημείο τήξης 32°C) ως υλικό αλλαγής φάσης σε νότιου προσανατολισμού τοίχο Trombe. Ανέφεραν ότι τοίχος Trombe με PCM μικρότερου πάχους ήταν πιο επιθυμητός σε σύγκριση με ένα συνηθισμένο πέτρινο τοίχο για την παροχή αποτελεσματικής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES). Knowler χρησιμοποίησε κεριό παραφίνης CG με μεταλλικά πρόσθετα για την αύξηση της συνολική αγωγιμότητας και αποδοτικότητας σε τοίχο Trombe. Οι παραπάνω είναι μόνο μερικές από τις μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί για την ενσωμάτωση PCM σε τοίχο Trombe.

4.3.3 Ηλιακός τοίχος αποθήκευσης θερμότητας για αερισμό κτιρίου [2,11,29,30]

Στοιχεία τοίχου για εξωτερικούς τοίχους για τη θέρμανση ενός κτιρίου έχουν μελετηθεί για αρκετές δεκαετίες. Σε ένα συνηθισμένο τοίχο, η κλίση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του τοίχου είναι αποτέλεσμα της απώλειας θερμότητας από το εσωτερικό θερμαινόμενο στο κρύο εξωτερικό. Η ηλιακή εισερχόμενη θερμότητα από την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του τοίχου χάνεται εύκολα μέσω της ελεύθερης μεταφοράς θερμότητας ή εξαναγκασμένης συναγωγής στην περίπτωση ανέμου. Η απώλεια της θερμότητας μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας μια διαφανή μόνωση. Επιπλέον, η διαφανής μόνωση διαβιβάζει, εκπέμπει την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία στη συνέχεια απορροφάται στην επιφάνεια του τοίχου. Επειδή η διαφανής μόνωση μονώνει, η απώλεια της θερμότητας προς το εξωτερικό μειώνεται και μπορεί ακόμη και να οδηγήσει σε καθαρή αύξηση της θερμότητας στο εσωτερικό του κτιρίου. Στην περίπτωση αυτή, ο τοίχος στο εσωτερικό του κτιρίου λειτουργεί ως χαμηλής θερμοκρασίας θερμαντήρας. Για να είναι διαφανή και ταυτόχρονα μόνωση, μια διαφανή μόνωση αποτελείται από ένα διαφανές υλικό με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα (διαφανές υλικό μόνωσης = TIM) ή μια πολυστρωματική διάρθρωση με υψηλή αντίσταση μεταφοράς θερμότητας. Ο συνδυασμός της διαφανούς μόνωσης με συνήθεις τοίχους έχει όμως ένα μειονέκτημα: στο να εξασφαλίζει επαρκή ικανότητα αποθήκευσης, ο τοίχος δηλαδή πρέπει να έχει επαρκή θερμική μάζα με αποτέλεσμα έναν τοίχο σημαντικού πάχους. Στο σημείο αυτό το PCM μπορεί να προσφέρει μια μοναδική λύση: ένα λεπτό στρώμα από PCM μπορεί να αντικαταστήσει ένα παχύ τεράστιο τοίχο.

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω Stritih και Novak σχεδίασαν ένα «πειραματικό τοίχο», ο οποίος περιείχε μαύρο κερί παραφίνης ως PCM. Η αποθηκευμένη θερμότητα χρησιμοποιείται για τη θέρμανση και τον αερισμό του σπιτιού. Η αποτελεσματικότητα της απορρόφησης βρέθηκε να είναι 79%. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το πάνελ υπαγορεύει την ποσότητα της αποθηκευμένης θερμότητας ως αισθητής ή λανθάνουσας και ότι το σημείο τήξης του PCM έχει μια επίδραση στην θερμοκρασία του αέρα εξόδου. Η ανάλυση για την περίοδο θέρμανσης έδωσε το βέλτιστο πάχος των 50 mm και σημείο τήξης μερικούς βαθμούς πάνω από την θερμοκρασία του δωματίου. Ο τοίχος αυτός αποτελείται από έξι βασικές συνιστώσες, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.16. Βραχεία κύματα ηλιακής ακτινοβολίας περνούν μέσα από γυαλί με διαφανές μονωτικό υλικό (TIM) (1, 2), το οποίο αποτρέπει τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή και με θερμική ακτινοβολία. PCM (3) σε ένα διαφανές πλαστικό περίβλημα που κατασκευάζεται από πολυανθρακικό, απορροφά και αποθηκεύει ενέργεια επί το πλείστον ως λανθάνουσα

θερμότητα. Ο αέρας για τον αερισμό του σπιτιού θερμαίνεται στο κανάλι αέρα (4) και οδηγείται σε ένα δωμάτιο. Μόνωση (5) και γύψος (6) είναι τυποποιημένα στοιχεία.



Σχήμα 4.16: Στοιχεία ηλιακού τοίχου με PCM [29].

Τα πλεονεκτήματα του ηλιακού τοίχου σε σχέση με άλλα συστήματα είναι κατ' αρχάς η υψηλής απόδοσης μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε λανθάνουσα θερμότητα που οφείλεται στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας απευθείας από την παραφίνη που βρίσκεται μέσα σε διαφανές πλαστικό γυαλί το οποίο λειτουργεί την ίδια στιγμή και ως μονωτικό υλικό που αποτρέπει τις απώλειες με συναγωγή και ακτινοβολία στο περιβάλλοντα χώρο. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι και οι απώλειες θερμότητας με αγωγή από το δωμάτιο που μειώνονται στην επιφάνεια, όπου ο τοίχος τοποθετείται. Αρνητικό στοιχείο όμως αποτελεί το γεγονός ότι η παραφίνη παρουσιάζει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, το οποίο καθιστά επιτακτική την ανάγκη για χρήση διάφορων τεχνικών ενίσχυσης της μεταφοράς της θερμότητας. Μια συνήθης τεχνική είναι η χρήση πτερυγίων όπου όχι τόσο το πάχος των πτερυγίων όσο η μεταξύ τους απόσταση έχει μεγαλύτερη επιρροή στη μεταφορά θερμότητας όπως έχει αποδειχθεί.

4.3.4 Θερμικά ενισχυμένο πλαίσιο τοίχου με PCMs

Meng Zhang και η ομάδα του [31] παρουσίασαν την ανάπτυξη ενός τοίχου με ενισχυμένο θερμικά πλαίσιο, που μειώνει την αιχμή της ζήτησης κλιματισμού για οικιακή χρήση στα κτίρια. Το πλαίσιο αυτό του τοίχου περιλαμβάνει ένα εξαιρετικά κρυσταλλικό PCM με βάση την n-παραφίνη, μέσω μακροενσωμάτωσής του σε κάψουλες. Διαπιστώθηκε ότι η βέλτιστη ποσότητα της συγκέντρωσης PCM πρέπει να είναι μεταξύ 10 και 30%, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες και τα υλικά τοίχου. Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτό το PCM με σημεία τήξης και στερεοποίησης στην περιοχή των 20-30°C (68-86°F) είναι ότι βρίσκεται εντός του εύρους θερμοκρασίας της ανθρώπινης ζώνης άνεσης, σύμφωνα με ASHRAE STANDARD 55. Άλλοι λόγοι περιλαμβάνουν το ενδεχόμενο πλεονέκτημα της υψηλότερης θερμοκρασίας έναρξης της κρυσταλλοποίησης και χαμηλότερης θερμοκρασίας έναρξης της τήξης, δηλαδή το

PCM μπορεί να φορτίζεται σε υψηλότερη εσωτερική θερμοκρασία του αέρα το καλοκαίρι και σε χαμηλότερη το χειμώνα. Όταν το PCM λιώνει, απορροφά περίπου 122.7J/g θερμότητας. Ένας άλλος λόγος για την επιλογή αυτού του PCM ήταν η σταθερότητά του σε κυκλική φόρτιση και αποφόρτιση και κατά τη διάρκεια υπερθέρμανσης. Επειδή αυτό το PCM είναι σταθερό σε θερμοκρασίες μέχρι περίπου 250°C (482°F) και καθόλου χημικές αντιδράσεις δε συμβαίνουν κατά τη διάρκεια των διαδικασιών απορρόφησης και απελευθέρωσης θερμότητας, οι φυσικοχημικές ιδιότητές του δεν θα πρέπει να τροποποιούνται κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής του. Επίσης ελκυστική ήταν η χημικώς αδρανής φύση του σε σχεδόν όλα τα υλικά και ο οικολογικά ακίνδυνος χαρακτήρας του (π.χ. που δεν έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία των ζώων και των φυτών).

Το πλαίσιο τοίχου αλλαγής φάσης είναι καινοτόμο σε τουλάχιστον δύο άλλα σημεία: η μέθοδος περιορισμού του PCM και η χρήση της ιδέας σε επερχόμενες τεχνολογίες, όπως σε πανελοποιημένους τοίχους. Τα PCMs ως επί το πλείστον ενσωματώνονται μέσω εμποτισμού σε γυψοσανίδες που αν και κατέδειξε πολλά πλεονεκτήματα στην εξοικονόμηση ενέργειας, παρουσιάζει δύο κύρια προβλήματα, που περιόρισαν τις δυνατότητές εφαρμογής της: αντοχή των γυψοσανίδων εμποτισμένες με PCM και χαμηλή συμπεριφορά σε φωτιά. Στο PCFW, χρησιμοποιήθηκε μια μέθοδος συγκράτησης με μακροκάψουλα (MCM) αντί της μεθόδου εμποτισμού (IM). Η MCM είναι ασφαλέστερη και πιο σταθερή από την IM, διότι τα PCMs πρώτα ενσωματώνονται σε σωλήνες, που στη συνέχεια κατακλώνονται και στα δύο άκρα για να αποτραπεί η διαρροή. Οι κάψουλες συναρμολογήθηκαν στο πλαίσιο του τοίχου και συγκρατούνται με βραχίονες που συνδέονται με τις πλευρές των στηριγμάτων χωρίς τη διενέργεια οπών, που θα μπορούσαν να μειώσουν τις δομικές τους ιδιότητες. Η μέθοδος MCM προτιμήθηκε εφόσον εξάλειψε τη διαρροή PCM μετά τη τήξη, μείωσε την αναφλεξιμότητα του τοίχου, και το πρόβλημα της μεταβίβασης υγρασίας καθ' όλο το μήκος του φακέλου. Ενώ η IM μείωνε τη διαπερατότητα του τοίχου, δημιουργώντας έτσι προβλήματα εσωτερικής υγρασίας. Επιπλέον, επειδή οι σωλήνες δεν είναι ποτέ εντελώς γεμάτες με PCM, προβλήματα που συνδέονται με μεταβολές του όγκου του PCM κατά τη διαδικασία αλλαγής φάσης εξαλείφθηκαν. Η MCM εξάλειψε επίσης προβλήματα που σχετίζονται με την επαφή μεταξύ του PCM και των τελειωμάτων του τοίχου και μεταξύ PCM και ανθρώπων.

Αποτελέσματα των μοντέλων έδειξαν ότι η μόνωση τοίχου ήταν ο καθοριστικός παράγοντας για το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας από και προς το PCM, και όχι το υλικό του σωλήνα (π.χ. χαλκός, αλουμίνιο ή PVC). Επιπλέον, αποφασίστηκε ότι με την τοποθέτηση των σωλήνων σε επαφή με την εσωτερική πλευρά του εσωτερικού

του περιβλήματος, το ποσοστό της επαναφόρτισης των PCMs ήταν ανώτερο από ό, τι όταν οι αγωγοί τοποθετήθηκαν στο κέντρο της μόνωσης ή σε επαφή με το εξωτερικό στρώμα του περιβλήματος. Η προκαταρκτική μοντελοποίηση ανέφερε επίσης ότι η εσωτερική συναγωγή, το πάχος μόνωσης, η θερμοκρασία εσωτερικού αέρα, και εξωτερικού αέρα επηρέασαν το ρυθμό επαναφόρτισης. Μια σχηματική αναπαράσταση του πρωτοτύπου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.17. Το πρωτότυπο κατασκευάστηκε με σωλήνες χαλκού διαμέτρου 2.54cm και με επίπεδο μόνωσης 1.94m²K / W (R-11). Ο αριθμός των αγωγών εξαρτάται από τη συγκέντρωση του PCM που δοκιμάστηκε. Για παράδειγμα, όταν μια συγκέντρωση PCM της τάξης του 10% χρησιμοποιήθηκε, οι οριζόντιοι σωλήνες βρίσκονταν στα περίπου 30,5cm χώρια. Αυτή η απόσταση μειώθηκε στο μισό όταν συγκέντρωση 20% χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 4.17: Αριστερά: Σχηματική αναπαράσταση του πλαισίου αλλαγής φάσης του τοίχου, Δεξιά: Πλαίσιο ελαφρού μετάλλου "τύπου σκάλας" που κρατά τους σωλήνες PCM για PCFWs και λεπτομέρειες [32].

Στη συνέχεια, δύο σπίτια δοκιμής με ξύλινο πλαίσιο κατασκευάστηκαν και στη συνέχεια εξοπλήστηκαν με συστήματα θέρμανσης και ψύξης χώρου. Τα PCMs ήταν ενσωματωμένα σε σωλήνες χαλκού, οι οποίες αργότερα τοποθετήθηκαν ακριβώς πίσω από το εσωτερικό στρώμα του περιβλήματος. Συγκεντρώσεις PCM 10 και 20% δοκιμάστηκαν και αξιολογήθηκαν. Όσον αφορά την μετατόπιση του φορτίου, διαπιστώθηκε ότι η "μετατόπιση" κατανεμήθηκε κατά τη διάρκεια πολλών ωρών από τα μεσάνυχτα περίπου μέχρι περίπου τη 1pm. Τα ψυκτικό φορτίο μειώθηκε από 8,6% έως 10,8% για συγκεντρώσεις 10% και 20%, αντίστοιχα. Η σχετική υγρασία του αέρα στους εσωτερικούς χώρους δεν αυξήθηκε για το εκ των υστέρων εξοπλισμού σπίτι. Επιπλέον, η διάρκεια ζωής του ψυκτικού εξοπλισμού θα μπορούσε να παραταθεί καθώς λιγότεροι κύκλοι «on/off» θα απαιτούνταν. Κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής σεζόν η μέγιστη θερμική ροή μέσω των PCFWs ήταν σημαντικά χαμηλότερη από ό, τι για τον κανονικό τοίχο ανάλογα βέβαια και από τον προσανατολισμό του εκάστοτε τοίχου. Όταν όλες οι κατευθύνσεις εξετάστηκαν, διαπιστώθηκε ότι η μέγιστη θερμική

ροή μειώθηκε κατά 11, 21 και 13% για το νότιο, δυτικό και βόρειο τοίχο, αντίστοιχα, όταν η συγκέντρωση του PCM ήταν 10%. Για 20% PCM, η μέγιστη θερμική ροή μειώθηκε κατά 1, 12 και 15% για το νότιο, δυτικό και βόρειο τοίχο, αντίστοιχα. Ο δυτικός και βόρειος τοίχος πέτυχαν περισσότερη μείωση του ποσοστού θερμότητας σε σύγκριση με το νότιο τοίχο.

Ο τρόπος που το PCM βοήθησε το σπίτι να διατηρήσει τις θερμοκρασίες του εσωτερικού αέρα και των επιφανειών σε πιο σταθερές τιμές και να εξουδετερώσει την επίπτωση των διακυμάνσεων της εξωτερικής θερμοκρασίας του αέρα ήταν ο εξής: κατά τη διάρκεια της ημέρας, όταν η εξωτερική θερμοκρασία ήταν υψηλότερη από ό,τι στο εσωτερικό, το PCM απορροφούσε ένα μέρος της θερμότητας που μεταφερόταν από την εξωτερική επιφάνεια του τοίχου και το αποθήκευε. Κατά τη διάρκεια της νύχτας όταν η εξωτερική θερμοκρασία έπεφτε, το PCM απελευθέρωνε τη θερμότητα που αποθήκευε στη διάρκεια της ημέρας. Αυτή η θερμότητα μεταφερόταν καθ' όλο το μήκος του εσωτερικού περιβλήματος των γυψοσανίδων και προς την αντίθετη κατεύθυνση μέσα από τη μόνωση και το εξωτερικό πλαίσιο. Επειδή όμως η αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας ήταν χαμηλότερη προς την εσωτερική πλευρά, περισσότερη θερμότητα έρεε στον εσωτερικό χώρο.

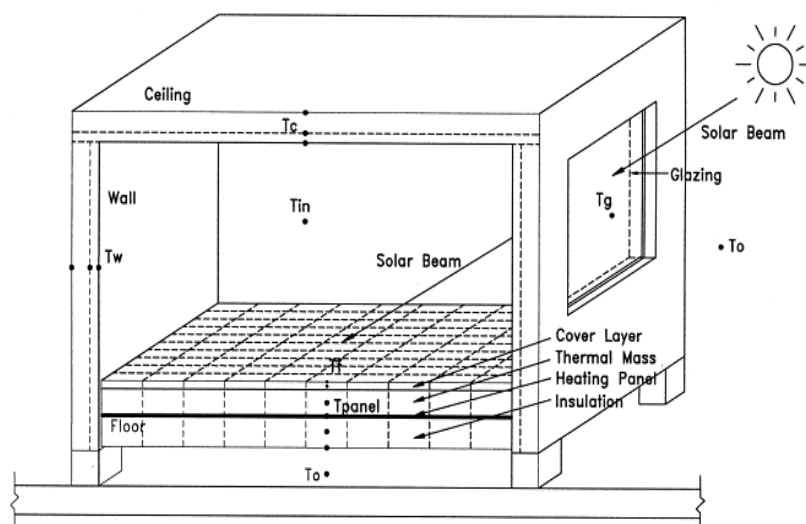
4.3.5 Υποδαπέδιο σύστημα θέρμανσης με αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας

Συστήματα θέρμανσης δαπέδου [33,34] γίνονται όλο και περισσότερο δημοφιλή λόγω του γεγονότος ότι μπορεί να παρέχουν ένα πιο άνετο εσωτερικό περιβάλλον από ό,τι τα συστήματα θέρμανσης με συναγωγή. Ειδικότερα η ακτινοβολούμενη θέρμανση έχει έναν αριθμό πλεονεκτημάτων σε σχέση με τα συστήματα θέρμανσης αέρα με συναγωγή. Εξοικονομεί χώρο διαβίωσης και εργασίας, δεδομένου ότι το σύστημα είναι ενσωματωμένο στο κέλυφος του κτιρίου. Η άνεση εξαρτάται από τη μέση ενεργό θερμοκρασία, η οποία είναι συνάρτηση του αέρα του περιβάλλοντος και των θερμοκρασιών των ακτινοβολούμενων επιφανειών. Η μεγάλη επιφάνεια του δαπέδου θέρμανσης οδηγεί στη μείωση των απωλειών διείσδυσης θερμότητας για την περίπτωση της ψύξης. Ακόμα οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ κεφαλής και ποδιών που επιτυγχάνονται με τα συστήματα αυτά είναι μικρές. Επειδή η θερμοκρασία του αέρα δεν είναι μεγαλύτερη από αυτή των τοίχων, καμιά συμπύκνωση δε λαμβάνει χώρα στους τοίχους και δεν υπάρχει ανάγκη ύγρανσης του αέρα το χειμώνα. Οι διαφορές στη θερμοκρασία του αέρα είναι ελάχιστες και η συναγωγή του αέρα φαίνεται να είναι αμελητέα και, ως εκ τούτου, η κίνηση της σκόνης μειώνεται. Έτσι, τα συστήματα ακτινοβολούμενου δαπέδου είναι καθαρότερα από τα αντίστοιχα συμβατικά.

Θερμική μάζα ενσωματωμένη σε ένα σύστημα θέρμανσης δαπέδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκτός αιχμής αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Έτσι, τα φορτία αιχμής μπορούν να μειωθούν και να μετακινηθούν σε νυχτερινές ώρες με χαμηλότερο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας. Ο συνδυασμός του ακτινοβολούμενου δαπέδου θέρμανσης και θερμικής αποθήκευσης παρέχει την δυνατότητα σημαντικής βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων, χωρίς συμβιβασμούς σχετικά με τη θερμική άνεση. Η μεγάλη θερμοχωρητικότητα ενός στρώματος υλικού θερμικής αποθήκευσης όπως σκυροδέματος ή *gyrcrete* (μίγμα γύψου-σκυροδέματος) συμβάλλει στην ομοιομορφία της θερμοκρασίας σε ολόκληρη την επιφάνεια δαπέδου. Μπορεί επίσης να αποτρέψει το δωμάτιο από την υπερθέρμανση σε περιόδους υψηλών ηλιακών κερδών. Εντούτοις, η μάζα αποθήκευσης προκαλεί υψηλούς χρόνους θερμικής καθυστέρησης. Η θερμική μάζα στο δάπεδο αποθηκεύει περισσότερη ηλιακή ενέργεια από ό, τι άλλα στοιχεία του περιβλήματος του κτιρίου. Όσο περισσότερη όμως είναι η θερμική μάζα, τόσο περισσότερο θα πάρει και για την αποθηκευμένη ακτινοβολούμενη ενέργεια να απελευθερωθεί στον αέρα του δωματίου. Συχνά πάνω από στρώμα θερμικής αποθήκευσης προστίθενται και διάφορα καλύμματα δαπέδου, όπως σκληρό ξύλο, τάπητας ή κεραμικά πλακάκια για να παράγουν ένα αισθητικό εσωτερικό περιβάλλον, το οποίο όμως οδηγεί σε μεταβολή της κατανομής της θερμοκρασίας και της διαδικασίας μεταφοράς θερμότητας, όπως θα διαπιστώσουμε και στη συνέχεια σε σχετική μελέτη.

Athienities και **Chen** [33] διερεύνησαν τη μεταβατική μεταφορά θερμότητας στα συστήματα υποδαπέδιας θέρμανσης. Η μελέτη τους επικεντρώθηκε στην επίδραση του στρώματος κάλυψης και της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην κατανομή θερμοκρασίας του δαπέδου και στην κατανάλωση ενέργειας. Πλήρους και μερικής κάλυψης τάπητες θεωρήθηκαν καθώς και στρώματα κάλυψης με σκληρό ξύλο πάνω από σκυρόδεμα ή *gyrcrete* θερμικής αποθήκευσης. Αποδείχτηκε ότι σε μια καθαρή μέρα η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο πάτωμα προκάλεσε μια διαφορά θερμοκρασίας έως και 8°C μεταξύ των φωτισμένων και σκιασμένων περιοχών. ASHRAE (1997) δείχνει ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας του δαπέδου πρέπει να είναι χαμηλότερη από 29°C για την ελαχιστοποίηση δυσφορίας στα πόδια. Ο συνδυασμός τώρα της δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας και της τοπικής κάλυψης με χαλί αυξάνει την ανομοιομορφία στην κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος της επιφάνειας του δαπέδου. Προσπίπτουσα δέσμη ηλιακής ακτινοβολίας σε μη ομοιόμορφα καλυμμένη επιφάνεια του δαπέδου π.χ. με ένα κεντρικής κάλυψης χαλί έδειξε ότι μπορεί να προκαλέσει μια τοπική αύξηση της θερμοκρασίας περίπου 15°C.

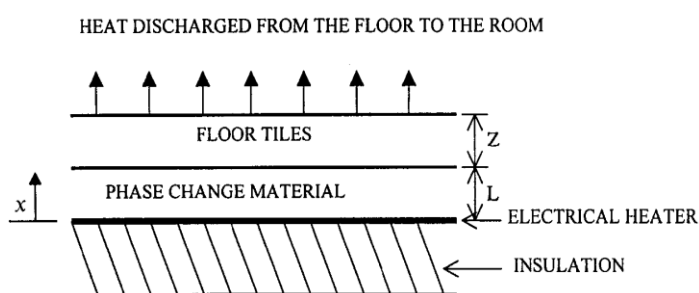
Η απορρόφηση τώρα της ηλιακής ενέργειας από τη θερμική μάζα ενός συστήματος θέρμανσης δαπέδου μπορεί να συμβάλει σε μια σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων μιας ημέρας με πυκνή συννεφιά και μια καθαρής ηλιόλουστης ημέρας, η εξοικονόμηση ενέργειας ποικίλλει από 32% έως 53%. Η χαμηλότερη εξοικονόμηση ενέργειας συμβαίνει στην περίπτωση που το δάπεδο είναι πλήρως καλυμμένο με ένα παχύ τάπητα. Ο τάπητας αποτρέπει την θερμική μάζα από την απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας και 50% περισσότερη ενέργεια θέρμανσης καταναλώνεται σε σύγκριση με άλλες περιπτώσεις. Τέλος λόγω της επίδρασης της θερμικής αδράνειας, όταν υπάρχουν υψηλά ηλιακά κέρδη κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η θερμοκρασία δωματίου μπορεί να μειωθεί σημαντικά μετά το ηλιοβασίλεμα κάτω από το καθορισμένο σημείο, επειδή ο συμβατικός έλεγχος PI δεν μπορεί να αλλάξει το σύστημα θέρμανσης με ένα προβλέψιμο τρόπο.



Σχήμα 4.18: Σχηματική αναπαράσταση του χώρου δοκιμών με σχεδιάγραμμα διακριτοποίησης [33].

Farid και **Chen** [35] έχουν αναπτύξει ένα υπολογιστικό μοντέλο για να προσομοιώσουν την υποδαπέδια θέρμανση με και χωρίς την ύπαρξη ενός στρώματος PCM. Βασικός όμως στόχος της μελέτης αυτής είναι η διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης ενός στρώματος κάποιου υλικού αλλαγής φάσης (PCM), που να τοποθετείται μεταξύ των ηλεκτρικών θερμαντήρων και των πλακακιών του δαπέδου του σπιτιού (σχήμα 4.19). Το άθροισμα του πάχους του στρώματος αλλαγής φάσης και των πλακακιών είναι μικρό (της τάξης των μερικών εκατοστών) σε σύγκριση με την επιφάνεια του δαπέδου θέρμανσης, η οποία είναι συνήθως μεγαλύτερη από 10 m^2 . Η κάτω όψη του θερμαντήρα πρέπει να μονώνεται σωστά σ' αντίθετη περίπτωση επιπλέον απώλειες θερμότητας πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η ισχύς του ηλεκτρικού

θερμαντήρα ρυθμίστηκε στα 250 W / m^2 , για 8 ώρες από τα μεσάνυχτα έως τις 8.00 π.μ. Αυτό παρέχει θερμότητα της τάξης των $7,2 \text{ MJ / m}^2$ την ημέρα, η οποία μπορεί να είναι αρκετή για να κρατήσει τη θερμοκρασία του δωματίου στους 20°C , στην οποία υποτέθηκε ότι παραμένει σταθερή. Το πάχος του PCM επιλέχθηκε για να παρέχει επαρκή αποθήκευση της θερμότητας για τις υπόλοιπες 16 ώρες της ημέρας κατά τις οποίες η ηλεκτρική θέρμανση αποσυνδέεται. Καθώς η θερμοκρασία του PCM θα αυξάνεται, θα λιώσει, με αποθήκευση του μεγαλύτερου μέρους της θερμότητας που παρέχεται από τον ηλεκτρικό θερμαντήρα ως λανθάνουσα θερμότητα τήξης. Το υπόλοιπο μέρος της θερμότητας θα άγεται μέσω του στερεού PCM και των πλακακιών και στη συνέχεια θα μεταφέρεται με συναγωγή στον αέρα του δωματίου.



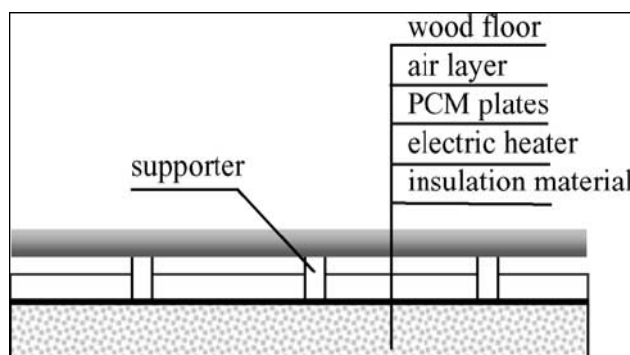
Σχήμα 4.19: Σχέδιο της υποδαπέδιας θέρμανσης που ενσωματώνει αποθήκευση θερμότητας [35].

Το αποτέλεσμα μιας τριήμερης προσομοίωσης για υποδαπέδια θέρμανση χωρίς αποθήκευση θερμότητας εκτός από της αισθητής θερμότητας στα πλακάκια έδειξε ότι το ποσοστό θέρμανσης στο δωμάτιο κυμαίνεται από 200 W / m^2 τις πρώτες ώρες το πρωί έως περίπου 20 W / m^2 , τα μεσάνυχτα, λίγο πριν από την έναρξη της θέρμανσης. Αυτή η μεγάλη απόκλιση του ρυθμού θέρμανσης δεν είναι αποδεκτή, ιδιαίτερα όταν το χαμηλότερο ποσοστό θέρμανσης εμφανίζεται τις βραδινές ώρες, όπου μέγιστη θέρμανση απαιτείται. Ακόμα και με τη χρήση μιας μη πρακτικής μεγαλύτερης θερμικής μάζας δαπέδου, η απόκλιση θα παρέμενε πάλη πολύ υψηλή. Η μεγάλη διακύμανση του ρυθμού θέρμανσης συνοδεύεται από μια μεγάλη διακύμανση της θερμοκρασίας δαπέδου, η οποία επίσης δεν είναι επιθυμητή.

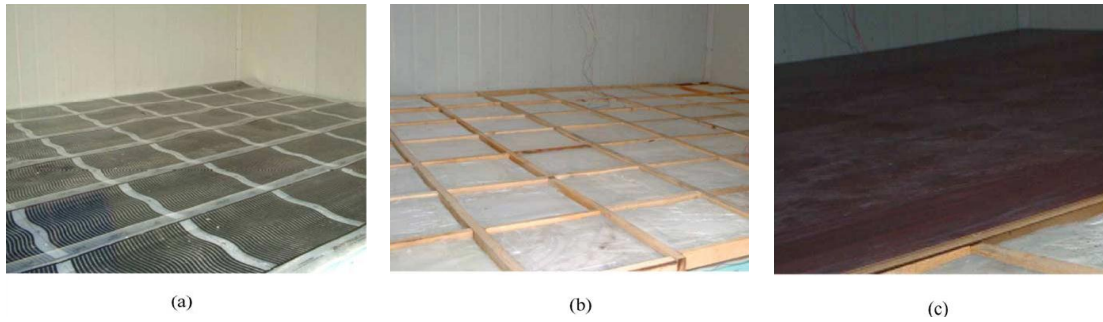
Με τη χρήση τώρα ενός στρώματος PCM (παραφίνης) πάχους 30mm με θερμοκρασία τήξης 40°C βρέθηκε το ποσοστό θέρμανσης να κυμαίνεται μεταξύ 70 και 100 W / m^2 για ολόκληρη την ημέρα και μάλιστα κατά την πιο σημαντική περίοδο θέρμανσης, μεταξύ 16 μ.μ. και μεσάνυχτα, το μέσο ποσοστό της θέρμανσης είναι περίπου 75 W / m^2 σε σύγκριση με το μόλις 30 W / m^2 για την υπόθεση χωρίς αποθήκευση θερμότητας. Ακόμα η θερμοκρασία του δαπέδου παραμένει σχεδόν σταθερή σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ 34 και 38°C και η θερμοκρασία του

θερμαντήρα υπάρχει περίπτωση να αυξηθεί μόνο έως τους 60°C, η οποία είναι πολύ κάτω από τη θερμοκρασία αποσύνθεσης του κεριού και τη θερμοκρασία ασφαλούς λειτουργίας οποιουδήποτε ηλεκτρικού θερμαντήρα. Πρέπει ακόμα να σημειωθεί ότι δεν είναι δυνατή η χρήση PCM με υψηλή θερμοκρασία τήξης σε υποδαπέδια θέρμανση εξαιτίας του περιορισμού που προκύπτει από τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία δαπέδου. Από την άλλη πλευρά, εάν ένα PCM με χαμηλή θερμοκρασία τήξης χρησιμοποιείται στην αποθήκευση θέρμανσης, τότε η περισσότερη από τη θερμότητα θα αποθηκευτεί ως αισθητή θερμότητα όπως αποδείχτηκε.

Lin και η ομάδα του [34] εκτέλεσαν πειραματική μελέτη ενός υποδαπέδιου ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης κτιρίου με σταθεροποιημένου σχήματος πλάκες PCM και ερεύνησαν τη θερμική του απόδοση. Το σταθεροποιημένου σχήματος PCM είναι ένα είδος σύνθετου υλικού του PCM και υποστηρικτικού υλικού, με το ποσοστό του PCM να είναι 70-85% κ.β. σε αυτήν την ένωση όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφ.2. Εφ' όσον η θερμοκρασία λειτουργίας είναι κάτω από το σημείο τήξης του υποστηρικτικού υλικού, το υλικό της ένωσης μπορεί να κρατήσει το σχήμα του, ακόμη και όταν το PCM αλλάζει από στερεό σε υγρό. Αυτό που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από 75% κ.β. παραφίνη ως διάσπαστο PCM και 25% κ.β. πολυαιθυλένιο ως υποστηρικτικό υλικό. Η θερμοκρασία μετάβασης φάσης της παραφίνης είναι 52°C και η θερμότητα τήξης της είναι περίπου 200 kJ/kg. Προκειμένου να διερευνηθεί η θερμική απόδοση του υποδαπέδιου ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης με πλάκες σταθεροποιημένου σχήματος PCM, ένα πειραματικό σπίτι με αυτό το σύστημα συστάθηκε στο Πανεπιστήμιο Tsinghua, στο Πεκίνο, Κίνα. Το υποδαπέδιο σύστημα θέρμανσης (σχήμα 4.20) περιλάμβανε μόνωση πολυστυρενίου πάχους 120 mm, ηλεκτρικές αντιστάσεις, PCM πάχους 15 mm, μερικούς ξύλινους υποστηρικτές, στρώμα αέρα πάχους 10 mm και ξύλινο δάπεδο πάχους 8 mm.



Σχήμα 4.20: Σχηματική απεικόνιση του ηλεκτρικού συστήματος υποδαπέδιας θέρμανσης με πλάκες σταθεροποιημένου σχήματος PCM [34].



Σχήμα 4.21: Φωτογραφίες της δομής του συστήματος (a) ηλεκτρικοί θερμαντήρες (b) πλάκες σταθεροποιημένου σχήματος PCM (c) ξύλινο δάπεδο [34].

Προέκυψε από τη μελέτη αυτή ότι το σύστημα αύξησε την εσωτερική θερμοκρασία, χωρίς να αυξήσει τη διαφορά θερμοκρασίας, δηλαδή χωρίς ηλεκτρική θέρμανση η μέση εσωτερική θερμοκρασία ήταν 20°C και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ημέρας και νύχτας ήταν 12°C και τη νύχτα με ηλεκτρική θέρμανση ο μέσος όρος εσωτερικής θερμοκρασίας ήταν 31°C και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ημέρας και νύχτας ακόμα διατηρούταν περίπου στους 12°C . Επίσης παρατηρήθηκε ότι η θερμοκρασία των πλακών PCM κρατήθηκε στη θερμοκρασία μετάβασης φάσης για μεγάλο χρονικό διάστημα αφού οι θερμαντήρες σταμάτησαν να λειτουργούν. Περισσότερο ακόμα από το ήμισυ της συνολικής ηλεκτρικής θερμικής ενέργειας και συγκεκριμένα το 54%, δηλαδή για το χώρο δοκιμής, 3,3 kWh ηλεκτρικής θερμικής ενέργειας μετατοπίζονταν από την περίοδο αιχμής σε εκτός αιχμής περίοδο κάθε ημέρα, το οποίο θα παρείχε σημαντικό οικονομικό όφελος με τα διαφορετικά τιμολόγια ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ ημέρας και νύχτας. Τέλος εμφανίστηκε μόνο μια μικρή εσωτερική διαφορά θερμοκρασίας κατά μήκος της κατακόρυφης κατεύθυνσης λόγω της ομοιόμορφης υποδαπέδιας θέρμανσης του εσωτερικού αέρα. Συνεπώς το σύστημα θέρμανσης ήταν άνετο και ενεργειακά αποδοτικό.

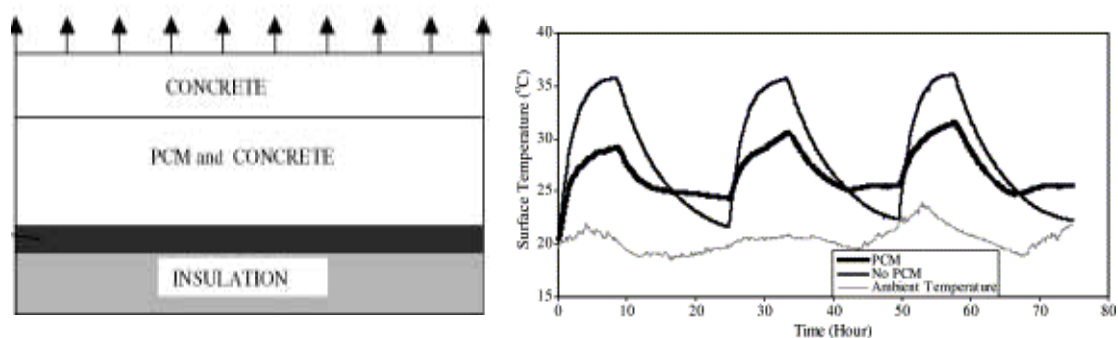
Έπειτα Xu και η ομάδα του [36] μελέτησαν την επίδραση διαφόρων παραγόντων όπως της θερμοκρασίας τήξης, της θερμότητας τήξης, της θερμικής αγωγιμότητας, του πάχους του στρώματος PCM κλπ. στη θερμική απόδοση ενός δωματίου με δάπεδο PCM σταθεροποιημένου σχήματος. Διαπιστώθηκε ότι για τη μείωση της διακύμανσης θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα, για μια συγκεκριμένη θέση ή κατάσταση καιρικών συνθηκών, η κατάλληλη θερμοκρασία τήξης του PCM είναι χονδρικά ίση με τη μέση εσωτερική θερμοκρασία αέρα μόνο των ηλιόλουστων ημερών του χειμώνα καθώς η ηλιακή ακτινοβολία μιας συννεφιασμένης ημέρας δεν μπορεί να απορροφηθεί ως λανθάνουσα θερμότητα και να αποθηκευθεί από τις πλάκες PCM. Όσον αφορά τη θερμική αγωγιμότητα του PCM αποδείχτηκε πως βελτίωσή της μπορεί να επιταχύνει την ταχύτητα απορρόφησης της ηλιακής ενέργειας

των πλακών σταθεροποιημένου σχήματος PCM, και έχει μια μικρή επίδραση στη μείωση της αιχμής της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα στη διάρκεια της ημέρας. Όταν η k_{PCM} είναι πάνω όμως από 0,5 W/(mK), καμία προφανή επίδραση δεν εμφανίζεται.

Ένας άλλος παράγοντας που εξετάστηκε είναι η θερμότητα τήξης για την οποία αποδείχτηκε ότι πρέπει να είναι υψηλότερη από 120 kJ/kg με την k_{PCM} να είναι υψηλότερη από 0,5 W/(mK) για την επίτευξη της μικρότερης διαφοράς (δT) μεταξύ της κορυφής και ναδίρ της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα καθώς μέχρι τα 120 kJ/kg η δT συνεχώς μειώνεται με την αύξηση της θερμότητας τήξης. Ο λόγος βάρους του PCM επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα καθώς αν είναι πολύ χαμηλός, η θερμότητα τήξης δεν είναι υψηλή ενώ εάν είναι πολύ υψηλός, η θερμική αγωγιμότητα δεν είναι αρκετά υψηλή, επειδή η παραφίνη είναι χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας. Στη συνέχεια μελετήθηκε το πάχος της πλάκας σταθεροποιημένου σχήματος PCM που χρησιμοποιείται κάτω από το δάπεδο και αποδείχτηκε πως δεν πρέπει να μεγαλύτερο από 20 mm καθώς και το κενό αέρα μεταξύ PCM και δαπέδου, που θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο καθώς προκαλεί μια πρόσθετη θερμική αντίσταση μειώνοντας την αποτελεσματικότητα της αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας του PCM και μεγαλώνοντας τη διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Ακόμα μετά από σύγκριση τριών κοινών επενδύσεων δαπέδου, ξύλο, πλακάκι ή μέταλλο προέκυψε ότι το δάπεδο πλακακιού ή μέταλλου είναι καλύτερο σε σύγκριση με το ξύλινο, γιατί είναι υψηλότερης θερμικής αγωγιμότητας.

Farid και **Kong** [37] έχουν κατασκευάσει δύο πλάκες σκυροδέματος, μία από αυτές περιέχει ενσωματωμένο σε κάψουλες PCM. Το PCM που χρησιμοποιήθηκε ήταν εξαένυδρο χλωριούχου ασβεστίου με κάποιο παράγοντα σχηματισμού πυρήνων και σταθεροποιητές για την ελαχιστοποίηση της υπόψυξης και του διαχωρισμού φάσης. Το PCM ήταν ενσωματωμένο σε πλαστικές σφαίρες με περίπου 10% κενό χώρο για να δεχθούν την αύξηση του όγκου του κατά τη διάρκεια της τήξης. Ακαμπτο πλαστικό χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των σφαιρών για πρόληψη οποιοδήποτε επιβλαβών πιέσεων, που μπορεί να προκληθούν στη δομή του σκυροδέματος. Και οι δύο πλάκες θερμαίνονταν για 8h με τη χρήση ζεστού νερού από υδατόλουτρο σταθερής θερμοκρασίας και επιτρεπόταν να αποφορτίσουν τη θερμότητά τους κατά τις επόμενες 16 ώρες. Σε ορισμένες από τις δοκιμές, αυτό επαναλήφθηκε σε μια περίοδο 3 ημερών. Ένας υψηλός ρυθμός ροής νερού χρησιμοποιήθηκε για να κρατήσει τη διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του νερού μικρότερη του 1,0°C. Η θερμότητα που παρέχεται από τους σωλήνες ζεστού νερού θεωρείται ότι ρέει μέσω του στρώματος PCM-σκυροδέματος και στη συνέχεια στο υπόλοιπο στρώμα σκυροδέματος με αγωγή και από την

επιφάνεια του σκυροδέματος στο δωμάτιο με φυσική συναγωγή, ακτινοβολία και εξαναγκασμένη συναγωγή λόγω της κυκλοφορίας του αέρα στο εργαστήριο. Το φυσικό μοντέλο παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



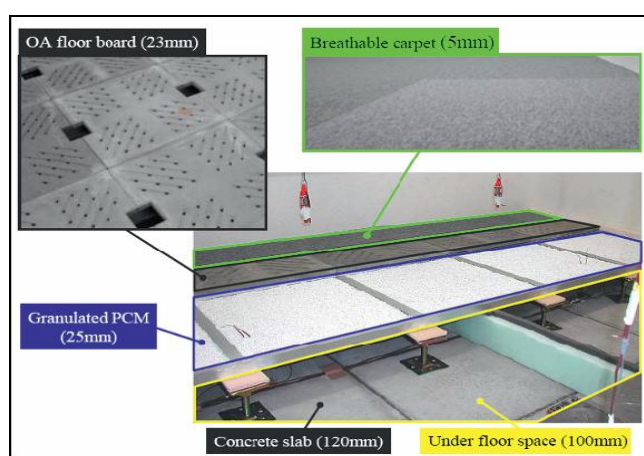
Σχήμα 4.22: Αριστερά: Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση, Δεξιά: Σύγκριση μεταξύ της απόδοσης του συστήματος υποδαπέδιας θέρμανσης με και χωρίς αποθήκευση αλλαγής φάσης [37].

Σύμφωνα με το σχήμα 4.22 (Δεξιά), που δείχνει την απόκριση και των δύο πλακών σε ένα 24hr κύκλο με 8 ώρες θέρμανσης ακολουθούμενης από 16 ώρες αποφόρτισης της θερμότητας σε μια περίοδο 3 ημερών, η διακύμανση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του δαπέδου μειώθηκε σημαντικά με τη χρήση του PCM στην πλάκα σκυροδέματος που ήταν σε θέση να διατηρήσει την επιφάνεια του δαπέδου κοντά στην επιθυμητή θερμοκρασία των 24°C για μεγάλες περιόδους. Για παράδειγμα, κατά την τρίτη ημέρα, η πλάκα σκυροδέματος παρουσιάζει διακυμάνσεις στη θερμοκρασία της επιφάνειάς της μεταξύ 22,5 και 36,5°C, ενώ η αντίστοιχη διακύμανση της πλάκας σκυροδέματος-PCM ήταν μόνο 25 - 31,5°C. Είναι δυνατόν τώρα να μειωθεί η θερμοκρασία της επιφάνειας περαιτέρω με τη χρήση PCM με ελαφρώς χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης ή με την αύξηση του πάχους του ανώτερου στρώματος σκυροδέματος. Η σταδιακή αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας της επιφάνειας της πλάκας σκυροδέματος- PCM κατά τη διάρκεια των 3 ημερών που παρατηρείται είναι πιθανόν να οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος καθώς και ιδιαίτερα κατά την τρίτη ημέρα, στην πιθανότητα υπερθέρμανσης, που μπορεί να έχει προκληθεί από την ελλιπή στερεοποίηση του PCM στο τέλος της δεύτερης μέρας.

Amir και οι συνεργάτες του [38] έχουν μελετήσει την απόδοση δύο πάνελ υποδαπέδιας θέρμανσης που περιέχουν νερό ή παραφίνη n-octadecane σε μια δομή σκυροδέματος. Στην πρώτη περίπτωση, εκτός αιχμής περιόδου ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται ως αισθητή θερμότητα στο νερό και σκυρόδεμα, ενώ στη δεύτερη περίπτωση κατά κύριο λόγο αποθηκεύεται ως λανθάνουσα θερμότητα στην παραφίνη. Ένα μεταβατικό μονοδιάστατο μοντέλο, επικυρωμένο αναλυτικά και πειραματικά έχει

χρησιμοποιηθεί για παραμετρικές μελέτες που οδήγησε στην επιλογή των διαστάσεων και των λειτουργικών χαρακτηριστικών κάθε πάνελ. Το ένα που περιέχει την παραφίνη είναι πιο συμπαγές από εκείνο με το νερό (134 mm πάχος σε σχέση με 152 mm), αποθηκεύει περισσότερη ενέργεια ($2880 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ έναντι $2415 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$) και παρέχει μεγαλύτερη άνεση δεδομένου ότι οι καθημερινές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας στην επιφάνειά του είναι λιγότερο σημαντικές ($1,3^\circ\text{C}$ έναντι $3,8^\circ\text{C}$).

Nagano και οι συνεργάτες του [39,40] παρουσίασαν σύστημα κλιματισμού αέρα δαπέδου με την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας σε κτίρια. Το μέγεθος του δαπέδου των πειραματικών κελιών ήταν $0,5 \text{ m}^2$. Η συσκευασμένη κλίνη του PCM (σχήμα 4.23) με τη μορφή κόκκων ήταν τοποθετημένη κάτω από τη σανίδα δαπέδου με πολλαπλές μικρές οπές. Η κλίνη συσκευασμένου PCM ήταν διαπερατή στον αέρα και κατάλληλη για χρήση σε συστήματα κλιματισμού, που εφοδιάζουν το δάπεδο. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η κυκλοφορία του κρύου αέρα μέσα από τον χώρο κάτω από το πάτωμα επέτρεπε η ψυχρή ενέργεια να φορτίσει την πλάκα σκυροδέματος, τη σανίδα δαπέδου OA και τη συσκευασμένη κλίνη PCM. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η αποθηκευμένη ενέργεια με τη σειρά της μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την αφαίρεση του ψυκτικού φορτίου σε ένα δωμάτιο.



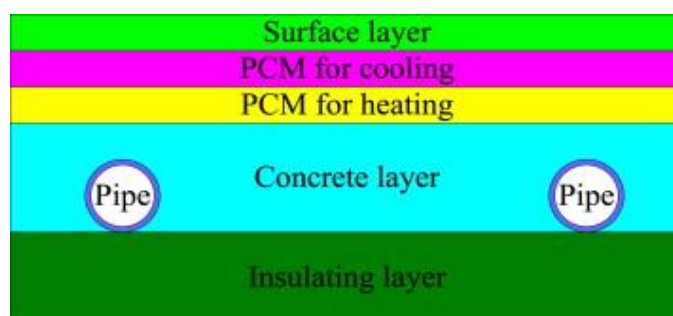
Σχήμα 4.23: Κατασκευή του δαπέδου του συστήματος κλιματισμού (εικόνα: Πανεπιστήμιο του Hokkaido) [2].

Τα πειράματα φόρτισης / αποφόρτισης για την προσομοίωση ενός συστήματος κλιματισμού γραφείου επί περίοδο 24-h έδειξαν ότι περίπου το 89% του καθημερινού ψυκτικού φορτίου θα μπορούσε να αποθηκευτεί κατά τη διάρκεια της νύχτας για το σύστημα που χρησιμοποιεί ένα πάχος 30 mm συσκευασμένης κλίνης κόκκων PCM. Ακόμα στο σύστημα αυτό, αποδείχθηκε ότι όταν η θερμοκρασία δωματίου είναι ρυθμισμένη στους 26°C , για να αφαιρεθεί η θερμότητα που σχετίζεται με το μέγιστο ημερήσιο θερμικό φορτίο (70 W/m^2) ο αέρας που διαχέεται από το δάπεδο πρέπει

να είναι περίπου στους 20°C. Από προηγούμενες έρευνες, η θερμοκρασία του αέρα που είχε περάσει μέσα από μια κλίνη συσκευασμένου PCM είχε δειχθεί ότι ήταν περίπου ίση με τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Αυτό σημαίνει θα ήταν σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί ένα PCM με μια θερμοκρασία αλλαγής φάσης περίπου 20°C.

Βρήκαμε λοιπόν ότι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένας συνδυασμός από δύο είδη βιομηχανικού κεριού παραφίνης, δεκαεξάνιο (C₁₆H₃₄) και δεκαοκτάνιο (C₁₈H₃₈), με αναλογία κατά βάρος τρία προς επτά. Αν και τα δύο αυτά κεριά παραφίνης έχουν λανθάνουσες θερμότητες 201 και 202 kJ/kg, αντίστοιχα, η λανθάνουσα θερμότητα του προκύπτοντος μίγματος είναι περίπου το 60% αυτών, που είναι 121 kJ/kg. Επίσης για να κατασκευαστούν οι κόκκοι που αναφέρονται παραπάνω, χρησιμοποιούνται πορώδεις γυάλινες χάντρες κατασκευασμένες από ανακυκλωμένο γυαλί ως βάση και με μέση διάμετρο 3 mm. Για να εμποτιστεί όμως το PCM στο εσωτερικό των πόρων στις χάντρες αφαιρείται πρώτα όλος ο αέρας, διαδικασία που διαρκεί αρκετές δεκάδες λεπτά και στη συνέχεια, οι επιφάνειες των σφαιριδίων καλύπτονται με τρεις επιστρώσεις ουρεθάνης, προκειμένου να αποτραπεί η διαρροή και εξάτμιση της απορροφούμενης παραφίνης. Στο μέλλον, η χρήση ενός κοκκώδη PCM με μεγαλύτερη ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, μπορεί να επιτρέψει όλη την ημέρα το φορτίο του κλιματιστικού να παρέχεται από τη νυχτερινή αποθήκευση.

Jin και η ομάδα του [41] πρότειναν ένα νέο υποδαπέδιο σύστημα θέρμανσης / ψύξης που αποτελείται από δύο στρώματα PCM μεταξύ του επιφανειακού στρώματος και του στρώματος από σκυρόδεμα. Ειδικότερα το δάπεδο (σχήμα 4.24) αποτελείται από ένα στρώμα επιφάνειας (ξύλο), στρώμα PCM για ψύξη, στρώμα PCM για θέρμανση, στρώμα σκυροδέματος, σωλήνα νερού και μονωτικό στρώμα. Τα δύο στρώματα PCM έχουν διαφορετική θερμοκρασία τήξης, και χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ενέργειας σε εκτός αιχμής περίοδο (23:00 - 08:00) όπου η αντλία θερμότητας ή ο ψύκτης λειτουργεί και την απελευθέρωσή της σε περίοδο αιχμής (08:00 - 23:00) κατά τη διάρκεια της θέρμανσης ή ψύξης.



Σχήμα 4.24: Σχηματική απεικόνιση του δαπέδου με διπλό στρώμα PCM [41].

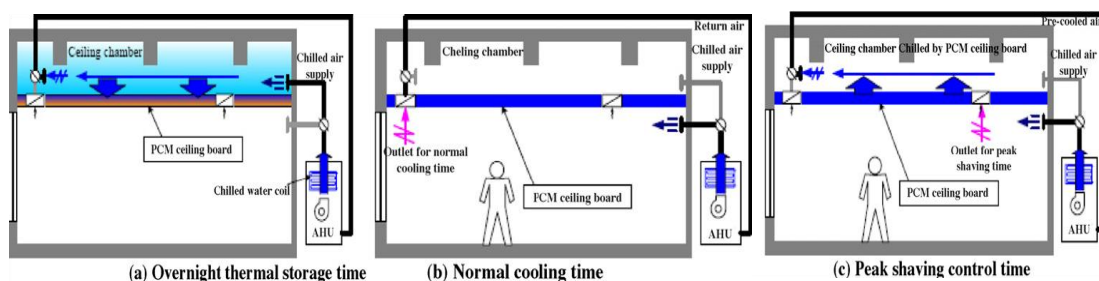
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι σε αυτό το σύστημα η βέλτιστη θερμοκρασία τήξης του PCM για θέρμανση και του PCM για ψύξη είναι 38°C και 18°C αντίστοιχα σε περίπτωση που οι θερμοκρασίες τήξης είναι πολύ υψηλές ή πολύ χαμηλές τότε οι διακυμάνσεις των ροών θερμότητας που προκύπτουν είναι σχεδόν οι ίδιες με τις διακυμάνσεις χωρίς PCM. Με βάση λοιπόν αυτές τις βέλτιστες θερμοκρασίες τήξης 38°C και 18°C προκύπτει ότι από 08.00 έως 17.00 η μέση θερμότητα και κρύο που απελευθερώνεται είναι περίπου 73,2 W/m² και 35,3 W/m² αντίστοιχα, ενώ η μέση θερμότητα και κρύο που αποδεδεσμεύεται χωρίς PCM είναι περίπου 54,6 W/m² και 30,5 W/m², αντίστοιχα. Εάν τώρα αλλάξουν οι θέσεις των δύο στρωμάτων PCM μεταξύ τους, διαπιστώνεται ότι οι βέλτιστες θερμοκρασίες τήξης των δύο στρωμάτων PCM θα αλλάξουν και συγκεκριμένα θα μειωθούν, θα γίνουν 33°C και 16°C, αντίστοιχα καθώς το στρώμα του PCM για ψύξη θα είναι πιο κοντά στην κρύα πηγή και το στρώμα του PCM για θέρμανση θα είναι πιο κοντά στην επιφάνεια του δαπέδου. Και σ' αυτή την περίπτωση όμως το σύστημα εξακολουθεί να έχει σχεδόν τις ίδιες αποδόσεις, αρκεί τα στρώματα PCM να έχουν τις βέλτιστες θερμοκρασίες τήξης και μπορεί να επιτευχθεί και πάλι μείωση της μέγιστης ροής θερμότητας και αύξηση της ελάχιστης τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη.

Όσο αφορά τη θερμότητα τήξης αποδείχτηκε ότι όσο μεγαλύτερη είναι τόσο πιο σταθερές είναι οι ροές θερμότητας της επιφάνειας δαπέδου. Ωστόσο, τα αποτελέσματα στην ψύξη είναι καλύτερα από τη θέρμανση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ενέργεια που αποθηκεύεται στα δύο στρώματα PCM είναι σχεδόν η ίδια κατά τη διάρκεια της θέρμανσης και ψύξης, ενώ η ροή θερμότητας της επιφάνειας του δαπέδου κατά τη θέρμανση είναι μεγαλύτερη από ότι κατά την ψύξη και έτσι η θερμότητα που αποθηκεύεται στο PCM απελευθερώνεται πιο γρήγορα από ό, τι το αποθηκευόμενο κρύο. Αποδείχθηκε για τη συγκεκριμένη μελέτη με τη θερμότητα τήξης του PCM να ισούται με 150 kJ/kg ότι το σύστημα ακόμα μπορεί να παρέχει ένα ποσό ενέργειας για θέρμανση ή ψύξη, που είναι 23,5 W/m² και 28,4 W/m², αφού η αντλία θερμότητας ή ο ψύκτης έχει απενεργοποιηθεί για 15 ώρες. Επίσης μετά από σύγκριση με το δάπεδο χωρίς PCM, βρέθηκε ότι η ενέργεια που απελευθερώνεται από το δάπεδο με PCM σε περίοδο αιχμής θα αυξηθεί κατά 41,1% και 37,9% κατά τη διάρκεια της θέρμανσης και της ψύξης, αντίστοιχα.

4.3.6 Οροφές

Kodo και **Ibamoto** [9,27,39] εξέτασαν τις επιπτώσεις ελέγχου εξομάλυνσης της κορυφής των συστημάτων κλιματισμού που χρησιμοποιούν PCM για σανίδες οροφής σε ένα κτίριο γραφείων. Σανίδα οροφής πετροβάμβακα με PCM (σανίδα οροφής PCM) ενισχύθηκε με την προσθήκη μικροκαψουλών PCM, με σημείο τήξης και λανθάνουσα

θερμότητα τήξης $24,5^{\circ}\text{C}$ και $174,4 \text{ kJ/kg}$, αντίστοιχα. Σε αυτό το σύστημα, μια σανίδα οροφής PCM χρησιμοποιείται αντί για σανίδα οροφής πετροβάμβακα. Το σχήμα 4.25 παρουσιάζει μια περίληψη του συστήματος. Κατά τη διάρκεια μιας νυχτερινής θερμικής αποθήκευσης, ο δροσερός αέρας από την AHU ρέει στο χώρο του θαλάμου οροφής και κρυώνει την σανίδα οροφής PCM, αποθηκεύοντας έτσι θερμική ενέργεια ψύξης (σχήμα 4.25α). Κατά το κανονικό χρόνο ψύξης, ο δροσερός αέρας από την AHU ρέει απευθείας στο δωμάτιο (σχήμα 4.25β). Κατά τη διάρκεια της ώρας εξομάλυνσης της αιχμής, όταν το θερμικό φορτίο παρουσιάζει μέγιστο, ο αέρας από το δωμάτιο επιστρέφει στην AHU μέσω του χώρου του θαλάμου οροφής. Ως αποτέλεσμα της διαδρομής μέσω της σανίδας οροφής PCM, η οποία προσφέρει ψύξη, ο ζεστός αέρας επιστρέφοντας από το δωμάτιο προψύχεται στο δρόμο της επιστροφής προς την AHU (σχήμα 4.25γ).

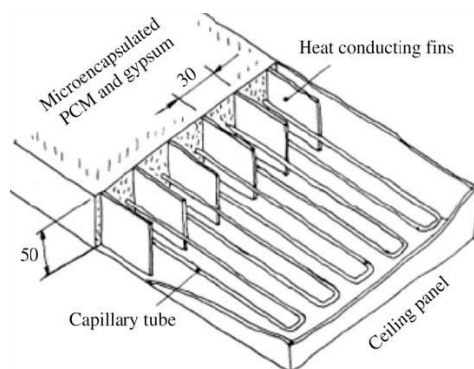


Σχήμα 4.25: Περιγραφή του συστήματος σανίδας οροφής [27].

Το μέγιστο θερμικό φορτίο και η χωρητικότητα της πηγής θερμότητας μπορεί κατά συνέπεια να μειωθεί. Ο κανονικός χρόνος ψύξης είναι από τις 7π.μ. έως τις 1μ.μ. Η ώρα εξομάλυνσης της αιχμής είναι από τη 1μ.μ. έως τη λήξη των ωρών της επιχείρησης. Στη μελέτη αυτή, ο χρόνος θερμικής αποθήκευσης είναι από τις 4π.μ. έως τις 7π.μ. Η μειωμένη χρήση της μέγιστης φόρτισης ηλεκτρικής ενέργειας, κατά τη διάρκεια της περιόδου εξομάλυνσης της αιχμής και η χρήση του φθηνότερου συντελεστή στη διάρκεια της νύχτας έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα από αριθμητικές προσομοιώσεις έδειξαν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του χώρου ήταν μόνο περίπου 2°C , σε σύγκριση με την αύξηση των 6°C στη θερμοκρασία του δωματίου, αν δεν χρησιμοποιούνταν PCM. Παράλληλα αποδείχτηκε πως το μέγιστο θερμικό φορτίο χρησιμοποιώντας την σανίδα οροφής PCM μειώθηκε κατά 9,4% σε σύγκριση με τη συμβατική σανίδα οροφής από πετροβάμβακα. Το συνολικό λειτουργικό κόστος βρέθηκε ότι ήταν 96,6% χαμηλότερο από αυτό της σανίδας οροφής με πετροβάμβακα, λόγω της χρήσης μειωμένης νυχτερινής φθηνής ηλεκτρικής ενέργειας.

Συνοψίζοντας λοιπόν αυτό το σύστημα θερμικής αποθήκευσης έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών συστημάτων θερμικής αποθήκευσης που χρησιμοποιούν πλάκες δαπέδου από σκυρόδεμα. Κατ' αρχάς περισσότερη αποτελεσματική θερμική αποθήκευση είναι αναμενόμενη, λόγω των υψηλής πυκνότητας δεξαμενών δροσερού αέρα στη σανίδα οροφής PCM, που σχηματίζει το δάπεδο του χώρου της οροφής. Ακόμα όλες οι σανίδες οροφής μπορεί να χρησιμοποιηθούν για θερμική αποθήκευση, δεδομένου ότι ο δροσερός αέρας μπορεί να ρεύσει μέσα από το θάλαμο οροφής χωρίς να διακόπτεται από δοκάρια καθώς και επειδή η θερμοκρασία της επιφάνειας της σανίδας οροφής διατηρείται στο σημείο τήξης του PCM για μεγάλο χρονικό διάστημα, το εσωτερικό θερμικό περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένου του πεδίου ακτινοβολίας, μπορεί να βελτιωθεί.

Markus Koschenz και **Beat Lehmann** [42] μελέτησαν ένα θερμικά ενεργοποιημένο πάνελ οροφής με αποθήκευση σε PCM, που φαίνεται στο σχήμα 4.26 και το οποίο προτάθηκε για εφαρμογή σε ελαφρού βάρους και μετασκευασμένα κτίρια. Στόχος ήταν να σχεδιαστεί ένα θερμικά ενεργοποιημένο πάνελ οροφής που να επιτρέπει τη χρήση των εναλλακτικών πηγών ενέργειας και που να επιτυγχάνει ικανότητα θερμικής αποθήκευσης περίπου ίση με τα θερμικά κέρδη στο εσωτερικό του χώρου κατά τη διάρκεια του καθημερινού κύκλου. Αντί τώρα να χρησιμοποιηθεί καθαρό PCM που θα απαιτούσε αυστηρές προδιαγραφές πυρασφάλειας για την αποτροπή διαφυγής της υγρής παραφίνης, μικροκάψουλες παραφίνης ενσωματώθηκαν σε μια σταθερή δομή και πιο συγκεκριμένα σε γύψο, ο οποίος με το νερό που περιέχει επιβραδύνει την εξάπλωση φλόγας σε περίπτωση πυρκαγιάς. Με βάση και το σχήμα ένας δίσκος φύλλων χάλυβα χρησιμεύει ως δοχείο για το σύνθετο PCM / γύψο, παρέχοντας παράλληλα το πάνελ με την απαιτούμενη μηχανική σταθερότητα. Ενεργητικός έλεγχος της θερμικής μάζας επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση ενός συστήματος τριχοειδών σωλήνων νερού στην ένωση γύψου. Εάν απαιτείται, η θερμική αγωγιμότητα στο σύνθετο μπορεί να βελτιωθεί με την εισαγωγή πτερυγίων αλουμινίου.



Σχήμα 4.26: Σχηματική αναπαράσταση ενός θερμικά ενεργοποιημένου πάνελ οροφής με PCM [42].

Το PCM στα πάνελ οροφής λιώνει κατά τη διάρκεια της ημέρας λόγω της έκθεσης στα θερμικά φορτία και παγώνει τη νύχτα, όταν ψύχεται με τη βοήθεια του ενσωματωμένου συστήματος αγωγών νερού. Η ενδιάμεση αποθήκευση της θερμικής ενέργειας στο PCM αποσβένει το εύρος της θερμοκρασίας μέσα στο κτίριο, ενώ επιτρέπει τη διαδικασία απόρριψης θερμότητας, που πρέπει να μην είναι ταυτόχρονη με θερμικό κέρδος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των πραγματικών συνθηκών αποδείχτηκε ότι ένα συνολικό πάχος πάνελ των 5 cm απαιτείται για την αποθήκευση συνολικού κέρδους θερμότητας των 320 Wh/m² day καθώς και ότι η ποσότητα του PCM στο γύψο πρέπει να είναι τουλάχιστον το 25% κατά βάρος. Επίσης για την αποφυγή μεγάλων θερμοκρασιακών διαφορών στο εσωτερικό του υλικού, τα πάνελ οροφής πρέπει να παρουσιάζουν καλή θερμική αγωγιμότητα καθ' όλη τη διατομή, μία μέση τιμή της οποίας με βάση την προσομοίωση υπολογίστηκε ότι ισούται με $\lambda = 1,2 \text{ W/mK}$, η οποία μπορεί να επιτευχθεί σύμφωνα με παραπάνω. Γενικά προέκυψε ότι το σύστημα οροφής με θερμικά ενεργοποιημένο πάνελ εξασφαλίζει ότι η θερμοκρασία του δωματίου παραμένει μέσα σε μια άνετη περιοχή, ακόμα και όταν οι εξωτερικές θερμοκρασίες είναι υψηλές. Η μέση θερμοκρασία οροφής δείχνει επίσης ότι το εύρος τήξης της παραφίνης είναι πλήρως αξιοποιημένο.

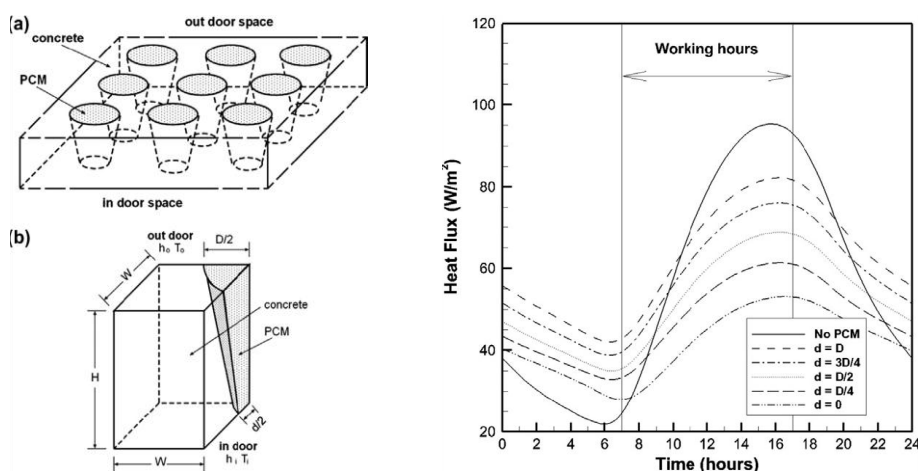
Ένα παρόμοιο σύστημα εξετάστηκε από **Pasupathy** και τους συνεργάτες του [43], που μελέτησαν αριθμητικά και πειραματικά ένα ανόργανο εύτηκτο PCM, που ενσωματώνεται σε μια οροφή. Το μίγμα PCM, ένυδρου άλατος ετοιμάζεται με την ανάμειξη ανόργανων αλάτων στην κατάλληλη αναλογία: 48% CaCl₂, 4,3% NaCl και 0,4% KCl με τη σωστή ποσότητα αποσταγμένου νερού της τάξης του 47,3%. Το μίγμα στη συνέχεια ανακινείται σωστά μέχρι την πλήρη διασπορά όλων των αλάτων στο αποσταγμένο νερό. Τα άλατα KCl και NaCl βοηθούν στην έναρξη της πυρήνωσης και αποτρέπουν ανομοιόμορφη τήξη και υπόψυξη. Η συνολική μάζα του μίγματος PCM που χρησιμοποιείται είναι 164 kg, το οποίο, στην υγρή του κατάσταση χύνεται στο πάνελ κατακλύζοντας τους σωλήνες του εναλλάκτη θερμότητας. Μια δεξαμενή νερού με χωρητικότητα 200lt διατηρείται στη πάνω γωνία του δωματίου PCM και το κρύο νερό από τη δεξαμενή επιτρέπεται να περάσει μέσα από τον εναλλάκτη θερμότητας, όπως και όταν απαιτείται. Το νερό αυτό χρησιμοποιείται για την ψύξη του PCM, όταν η πλήρη ψύξη του δεν είναι δυνατή τις νυχτερινές ώρες κατά τη διάρκεια καλοκαιριού. Εάν το PCM δεν παγώσει μέχρι τις αρχές του πρωινού της επόμενης ημέρας, μπορεί να μην είναι έτοιμο για τον επόμενο κύκλο λειτουργίας. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια αιχμής του καλοκαιριού την ημέρα όταν η θερμοκρασία

του PCM ξεκινά να αυξάνεται πάνω από τη θερμοκρασία τήξης, κρύο νερό πρέπει να διαβιβάζεται μέσω των σωλήνων για τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας.

Για καλύτερη μελέτη των πάνελ PCM κατασκευάστηκε πειραματική διάταξη που αποτελείται από δύο πανομοιότυπα δωμάτια δοκιμής, με το ένα να είναι χωρίς PCM στην οροφή και το άλλο να έχει πάνελ PCM ανάμεσα στην κάτω πλάκα σκυροδέματος και στην πλάκα του πάνω μέρους της οροφής. Παρατηρήθηκε ότι η θερμοκρασία της ανώτερης επιφάνειας της οροφής με PCM είναι ελαφρώς υψηλότερη από αυτής χωρίς PCM κατά τη διάρκεια όλων των μηνών. Αυτό οφείλεται στη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα του υγρού PCM, η οποία μειώνει τη μετάδοση θερμότητας προς το δωμάτιο, που με τη σειρά της αυξάνει τη θερμοκρασία της ανώτερης επιφάνειας της οροφής με PCM. Η θερμοκρασία της οροφής δωματίου χωρίς PCM είναι μέγιστη περίπου 1800 h ενώ με PCM, είναι μέγιστη περίπου 2000 h, το οποίο οφείλεται στη αργή απομάκρυνση της θερμότητας από το PCM. Ακόμα αποδείχτηκε ότι παρόλο που η εισαγωγή του PCM βοηθά στην επίτευξη μιας σταθερής θερμοκρασίας στην οροφή κατά τη διάρκεια των μηνών Δεκεμβρίου-Απριλίου, δε συμβαίνει το ίδιο για τους μήνες του Μαΐου-Νοεμβρίου. Για παράδειγμα ενώ η εισαγωγή του πάνελ PCM στην οροφή διατηρεί μια σταθερή θερμοκρασία των 27°C στην οροφή κατά τη διάρκεια ολόκληρης της μέρας το μήνα Ιανουάριο, κατά τη διάρκεια του μήνα του Ιουλίου η μέγιστη θερμοκρασία στην οροφή του δωματίου με PCM είναι περίπου 4°C υψηλότερη από την αντίστοιχη στο δωμάτιο χωρίς PCM.

Όσο αφορά το πάχος του υλικού μια τιμή των 2,5 cm είναι αρκετή για να κρατήσει τη θερμοκρασία οροφής σε ένα σταθερό επίπεδο κατά τους μήνες Δεκεμβρίου-Απριλίου. Ωστόσο, το πάχος δεν μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω για να ταιριάζει για τους καλοκαιρινούς μήνες, καθώς το PCM δεν είναι σε θέση να επιτύχει την αρχική του κατάσταση μετά τη νυχτερινή ψύξη. Γι' αυτό το λόγο νερό επιτρέπεται να περάσει μέσα από σωλήνες ενσωματωμένους στο πάνελ PCM για να αποσπάσει τη θερμότητα με ταχύτερο ρυθμό. Μια οριακή μείωση στη θερμοκρασία οροφής παρατηρείται. Ωστόσο, αυτό το αποτέλεσμα πρέπει να είναι αξιόλογο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Η ποσότητα του νερού που απαιτείται για την εξαγωγή της λανθάνουσας θερμότητας από μια μονάδα επιφάνειας υπολογίζεται γύρω στα 830 kg/m². Μια τέτοια μεγάλη ποσότητα κρύου νερού δεν να εύκολα διαθέσιμη κατά τη θερινή περίοδο. Ως εκ τούτου ένα παθητικό σύστημα με ένα ακόμα στρώμα PCM με διαφορετική θερμοκρασία αλλαγής φάσης από του πάνω από τον πυθμένα πάνελ PCM μελετάται με σκοπό τη μείωση της ταλάντευσης της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα για να ταιριάζει με όλες τις καιρικές συνθήκες.

Alawadhi και η ομάδα του [44] μελέτησαν τη θερμική αποτελεσματικότητα οροφής κτιρίου με υλικά αλλαγής φάσης (PCM), το μοντέλο της οποίας αποτελείται από μια πλάκα από σκυρόδεμα με κάθετες οπές κόλουρου κώνου γεμάτες με PCM (σχήμα 4.27). Το κωνικό σχήμα του PCM στη οροφή έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως ότι διατηρεί την φυσική αντοχή της οροφής, το PCM μπορεί να αντικατασταθεί εύκολα εάν χρειάζεται, και επιτρέπει στο PCM να επεκταθεί κατά τη διάρκεια της διαδικασίας τήξης χωρίς να επηρεάζεται η δομή της οροφής. Ωστόσο, το πλάτος της οροφής είναι μεγάλο σε σύγκριση με το πάχος της, και ως εκ τούτου, η επίδραση των άκρων της οροφής έχει αμελητέα επίδραση στη μεταφορά θερμότητας στην οροφή. Έτσι μόνο ένα μέρος της οροφής εξετάστηκε που αποτελείται από μπλοκ σκυροδέματος με διάσταση ($W \times W \times H$), και ένα τέταρτο όγκου του κόλουρου κώνου. Η άνω διάμετρος του κόλουρου κώνου είναι (D), ενώ η χαμηλότερη διάμετρος του είναι (d), και το ύψος είναι (H), το οποίο είναι το ίδιο με το πάχος της οροφής. Πέντε διαφορετικές γεωμετρίες κόλουρου κώνου ερευνώνται όπου για $d = 0$ προκύπτει ένας κώνος και για $d = D$ ένας κύλινδρος, ο όγκος του οποίου αποτελεί τον όγκο της γεωμετρίας βάσης και είναι κοινός και για τις πέντε γεωμετρίες. Ακόμα η επιφάνεια των οπών θα πρέπει να είναι τυλιγμένη με μεταλλικά φύλλα για την αποτροπή της διαρροής του υγρού PCM.



Σχήμα 4.27: Αριστερά: (a) Σχηματική απεικόνιση της οροφής με οπές γεμάτες με PCM και (b) ο υπολογιστικός τομέας και σημαντικές γεωμετρικές παράμετροι και οριακές συνθήκες [44]. Δεξιά: Ροή θερμότητας στην εσωτερική επιφάνεια για διάφορες γεωμετρίες του δοχείου PCM με n-Eicosane [44].

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από παραμετρική μελέτη που διενεργείται για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της γεωμετρίας κόλουρου κώνου, και του είδους του PCM που χρησιμοποιείται δείχνουν κατ' αρχάς ότι από τους τρεις τύπους παραφίνης που εξετάζονται ως PCM: n-octadecane, n-eicosane, και SUNTECH P116, μόνο όταν η n-eicosane με σημείο τήξης 37°C χρησιμοποιείται ως PCM, ο ρυθμός μεταβολής

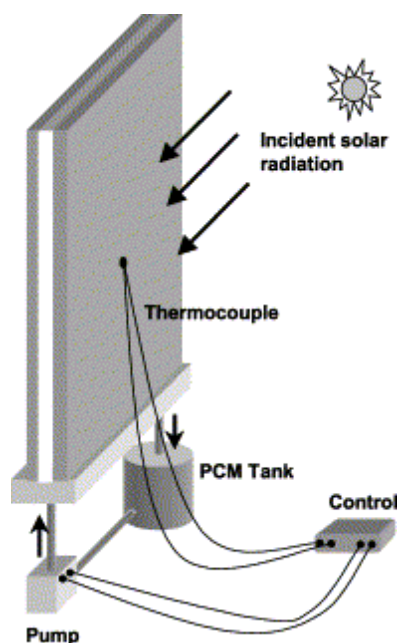
της ροής θερμότητας είναι σημαντικά μειωμένος κατά την περίοδο από τις 10 π.μ. έως 5 μ.μ., με μέγιστη μείωση της ροής θερμότητας κατά 15,78%. Προκύπτει ακόμα με βάση τα αποτελέσματα ότι η θερμική απόδοση του συστήματος οροφής- PCM ενισχύεται περισσότερο, με τη μέγιστη ροή θερμότητας που λαμβάνει χώρα στις 15:30 να μειώνεται σημαντικά καθώς η γεωμετρία του δοχείου PCM αλλάζει από έναν κύλινδρο σε έναν κώνο. Η κυλινδρική γεωμετρία του PCM δείχνει την ελάχιστη θερμική απόδοση, ενώ η κωνική γεωμετρία παρουσιάζει την καλύτερη θερμική απόδοση καθώς αποδείχτηκε ότι μπορεί να μειώσει την αιχμή της ροής θερμότητας κατά 35,36%. Αυτό συμβαίνει διότι καθώς η γεωμετρία του δοχείου PCM αλλάζει σε κώνο, η άνω διάμετρος του κολουρου κώνου αυξάνεται, εκθέτοντας περισσότερη από την εξωτερική επιφάνεια του PCM στην ηλιακή θερμότητα στην εξωτερική επιφάνεια της στέγης. Έτσι λοιπόν η συνολική ροή θερμότητας στο εσωτερικό χώρο βρέθηκε ότι μπορεί να μειωθεί κατά 39% όταν κωνικό δοχείο PCM εισάγεται και ως εκ τούτου, το ψυκτικό φορτίο ενέργειας μπορεί να μειωθεί κατά το ποσοστό αυτό, όταν PCM ενσωματώνεται στη οροφή κατά τη διάρκεια του τυπικού ωραρίου λειτουργίας.

4.3.7 Παράθυρα με PCMs

Από θερμικής απόψεως, τα παράθυρα [45] αποτελούν τον πιο αδύναμο κρίκο μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών περιβαλλόντων ενός δωματίου. Σε ψυχρά κλίματα, αυτά είναι υπεύθυνα για 10-25% της θερμότητας που χάνεται από το θερμαινόμενο περιβάλλον στην εξωτερική ατμόσφαιρα. Σε ζεστά κλίματα, η υπερβολική ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στο εσωτερικό περιβάλλον μέσα από τα παράθυρα οδηγεί σε αύξηση του ψυκτικού φορτίου του συστήματος ψύξης. Τα απλά γυάλινα παράθυρα είναι ευάλωτα σε προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που διεισδύει εύκολα μέσα από ένα απλό, καθαρό φύλλο από γυαλί, του οποίου η διαπερατότητα είναι της τάξης του 90%. Η ανάπτυξη νέων υλικών, νέων τεχνολογιών και νέων στρατηγικών για την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας οδήγησε σε ενίσχυση της έρευνας και ανάπτυξη πιο αποδοτικών παραθύρων. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ακόλουθη εφαρμογή.

Ismail και **Henriquez** [46] μελέτησαν το ενδεχόμενο να χρησιμοποιήσουν ένα παράθυρο με μια κινούμενη κουρτίνα PCM για να μειώσουν το ηλιακό κέρδος σε κτίρια. Το παράθυρο αποτελείται από διπλό υαλοπίνακα με ένα κενό μεταξύ των φύλλων γυαλιού και μία βαλβίδα αέρα στην επάνω γωνία. Οι πλευρές και το κάτω μέρος είναι σφραγισμένα με εξαίρεση δύο οπές στο κάτω μέρος, που συνδέονται με πλαστικό σωλήνα σε μια αντλία και δεξαμενή PCM. Η αντλία συνδέεται με τη σειρά της στη δεξαμενή που περιέχει το PCM, το οποίο βρίσκεται στην υγρή φάση. Η λειτουργία της αντλίας ελέγχεται από έναν αισθητήρα διαφοράς θερμοκρασίας. Όταν

η διαφορά θερμοκρασίας φτάνει μια προκαθορισμένη τιμή, η αντλία λειτουργεί και το υγρό PCM αντλείται από τη δεξαμενή για να καλύψει το κενό μεταξύ των υαλοπινάκων. Λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας στην εξωτερική επιφάνεια το PCM αρχίζει να παγώνει, σχηματίζοντας ένα στερεό στρώμα που αυξάνει σε πάχος με το χρόνο και ως εκ τούτου αποτρέπει τη θερμοκρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος από το να μειωθεί. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου όλο το PCM αλλάξει σε στερεό. Ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα παραθύρων θα εξασφαλίσει ότι η εξωτερική θερμοκρασία θα αρχίσει να αυξάνεται πριν από την πλήρη στερεοποίηση του PCM που περικλείεται.

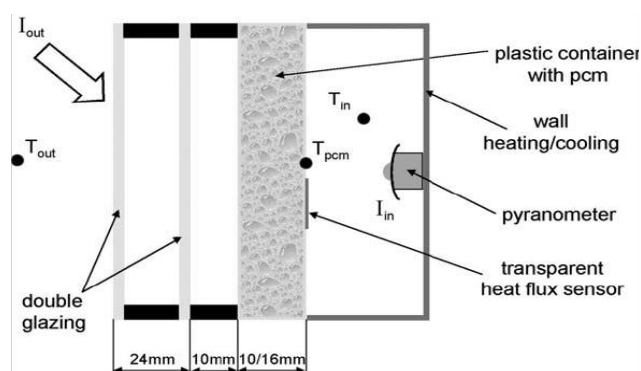


Σχήμα 4.28: Διάταξη της έννοιας του παραθύρου με κινητή κουρτίνα [46].

Προκειμένου στη συνέχεια να διερευνηθεί η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων και να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της νέας ιδέας, μια μεγάλη ποικιλία από εμπορικά διαθέσιμα δείγματα γυαλιού διαφορετικού πάχους και με το PCM να περικλείεται μεταξύ των φύλλων γυαλιού, εξετάστηκε οπτικά και θερμικά. Με βάση τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η πλήρωση με PCM οδηγεί στο φιλτράρισμα της θερμικής ακτινοβολίας και μειώνει το κέρδος θερμότητας ή τις απώλειες σε ποσοστό περίπου ίσο με 50%, επειδή η περισσότερη από τη μεταφερόμενη ενέργεια απορροφάται κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης του PCM. Σύγκριση τώρα του διπλού γυαλίνου παραθύρου με PCM με το ίδιο παράθυρο γεμάτο με αέρα έδειξε ότι τα πρώτα είναι θερμικά πιο αποτελεσματικά. Επίσης μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι η αύξηση του πάχους του στρώματος του PCM έχει οριακή επίδραση στην ενέργεια που μεταδίδεται από οπτικής άποψης, αλλά πολύ σημαντική θερμική

επίδραση όπως βρέθηκε πειραματικά. Ακόμα διαπιστώθηκε ότι και η αύξηση του πάχους του γυαλιού μειώνει την μεταφερόμενη ενέργεια. Τέλος πρόσθετα πειράματα και προσομοιώσεις έδειξαν ότι το έγχρωμο PCM είναι πιο αποτελεσματικό στη μείωση των ακτινοβολούμενων κερδών ενέργειας και ότι πιο συγκεκριμένα το πράσινο χρώμα είναι το πιο αποτελεσματικό από όλα.

Weinlader και η ομάδα του [47] διερεύνησαν τις ιδιότητες διπλού υαλοπίνακα σε συνδυασμό με PCM. Τα PCMs ενσωματώθηκαν σε διάφανη πλαστικά δοχεία που με τη σειρά τους τοποθετήθηκαν πίσω από ένα συμβατικό διπλό υαλοπίνακα με ένα κενό αέρος περίπου 10mm. Τα PCMs που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους συστήματα είναι εξαιρετικά διαφανή για το ορατό τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας ενώ το υπέρυθρο τμήμα απορροφάται εντός του PCM επιτυγχάνοντας έτσι τόσο τα πλεονεκτήματα ενός στοιχείου φυσικού φωτισμού όσο και μιας αποθήκης ενέργειας. Σε υγρή κατάσταση, τα PCMs είναι μη σκεδαζόμενα, καθαρά και διαφανή ομοιογενή υγρά. Αιτία σκέδασης είναι οι φυσαλίδες αέρα στην περίπτωση των ορίων των κρυστάλλων των ένυδρων αλάτων που οδηγούν σε μια αδιαφανή και περισσότερο ή λιγότερο ανομοιογενή εμφάνιση των στερεών PCMs. Σε υγρή κατάσταση, όλα τα υλικά έχουν εξίσου υψηλές τιμές διαπερατότητας περίπου 0,9 στο οπτικό φάσμα. Η διαπερατότητα μειώνεται για μεγαλύτερα μήκη κύματος, λόγω της απορρόφησης. Σε στερεά κατάσταση, η διαπερατότητα μειώνεται στο περίπου 0,5 στο οπτικό φάσμα. Αυτό είναι κυρίως λόγω των διαδικασιών σκέδασης στα υλικά. Σε γενικές γραμμές, η διαπερατότητα στο εύρος του οπτικού φάσματος είναι σχεδόν ανεξάρτητη από το μήκος κύματος. Αυτό αποφεύγει τυχόν αλλαγές στο χρώμα του μεταδιδόμενου φωτός, το οποίο είναι πολύ σημαντικό για τα συστήματα φυσικού φωτισμού.



Σχήμα 4.29: Πειραματική εγκατάσταση σε εξωτερική μονάδα δοκιμών [47].

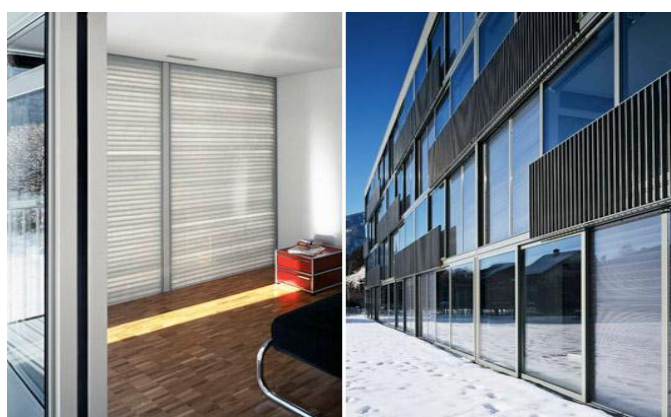
Πάνελ πρόσοψης με PCM βελτιώνουν τη θερμική άνεση σημαντικά το χειμώνα, ειδικά κατά το βράδυ. Σε αντίθεση με το διπλό υαλοπίνακα με υψηλά κέρδη θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας και υψηλές θερμικές απώλειες το βράδυ, όλα τα πάνελ πρόσοψης με PCM μετατοπίζουν μέρος από αυτά τα μέγιστα κέρδη το

βράδυ. Έτσι, το σύνολο των κερδών ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας μειώνεται περίπου στο ήμισυ, ενώ οι απώλειες θερμότητας είναι μειωμένες ή αντισταθμίζονται πλήρως το βράδυ. Η απόδοση συνεπώς του πάνελ πρόσοψης με PCM μπορεί να συνοψιστεί στο ότι παρουσιάζουν χαμηλότερα κέρδη ενέργειας την ημέρα και μικρότερες απώλειες θερμότητας τη νύχτα. Οι μέσες θερμοκρασίες στην επιφάνεια για το διπλό υαλοπίνακα μειώνονται στους σχεδόν 17°C τη νύχτα, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε αίσθηση του κρύου, τουλάχιστον στο άμεσο περιβάλλον του συστήματος ενώ με την προσθήκη ενός στρώματος PCM παρατηρείται μέση αύξηση θερμοκρασίας 2-3K, επίδραση που είναι μεγαλύτερη το βράδυ. Εάν τώρα αντί για μέσες τιμές, θεωρήσουμε τις θερμοκρασίες επιφάνειας σε ηλιόλουστες ημέρες, η διαφορά αυτή μπορεί να αυξηθεί σε περισσότερο από 10K το βράδυ, ανάλογα με τη θερμοκρασία τήξης του PCM. Η θερμική άνεση κατά συνέπεια θα βελτιωθεί σημαντικά.

Το καλοκαίρι, τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν χαμηλά κέρδη θερμότητας, που μειώνουν την αιχμή των ψυκτικών φορτίων κατά τη διάρκεια της ημέρας. Πρόσθετα κέρδη θερμότητας το βράδυ μπορούν να απαχθούν μακριά με το νυκτερινό αερισμό. Εάν ένα PCM με χαμηλή θερμοκρασία τήξης μέχρι 30°C χρησιμοποιείται, η θερμική άνεση το καλοκαίρι θα είναι επίσης βελτιωμένη κατά τη διάρκεια της ημέρας, σε σύγκριση με διπλό υαλοπίνακα, χωρίς ή με εσωτερική ηλιακή προστασία. Κατά τη διάρκεια όμως του απογεύματος και της νύχτας οι μέσες θερμοκρασίες στην επιφάνεια είναι αυξημένες για τα πάνελ πρόσοψης με PCM, με αποτέλεσμα την επιδείνωση της θερμικής άνεσης. Με βάση τα αποτελέσματα ακόμα προέκυψε ότι όλα τα PCMs χρησιμοποιούνται πολύ αναποτελεσματικά τις περισσότερες φορές καθώς ακόμη και τις ηλιόλουστες ημέρες, μόνο το 40-60% του υλικού γίνεται υγρό. Το υπόλοιπο παραμένει στην στερεά φάση και δεν χρησιμοποιείται για αποθήκευση ενέργειας. Ένα άλλο σημαντικό σημείο κλείνοντας, που πρέπει να ληφθεί υπόψη για ένα σύστημα φυσικού φωτισμού είναι η αρχιτεκτονική αποδοχή του καθώς πολλοί αρχιτέκτονες και σχεδιαστές δεν αποδέχονται τις οπτικές επιπτώσεις λόγω της ανομοιογενής εμφάνισης των στερεών PCMs.

Ο Ελβετός αρχιτέκτονας **Dietrich Schwarz** [2,48] εμπορευματοποίησε ένα σύστημα με τη δική του εταιρεία GlassX AG, χρησιμοποιώντας PCM από Dörken. GlassX, ένας νέος υψηλής τεχνολογίας υαλοπίνακας από την Ευρώπη με υλικά αλλαγής φάσης (PCM) για αποθήκευση θερμότητας, έχει μόλις εισαχθεί στη Βόρεια Αμερική και ο οποίος λειτουργεί ως εξής: μια εξωτερική μονάδα μονωμένου υαλοπίνακα (IGU) έχει ένα διακοπτόμενο πρισματικό φίλτρο μεταξύ των υαλοπινάκων που αντανakλά το υψηλότερης γωνίας φως του ήλιου πίσω, ενώ διαβιβάζει το χαμηλής γωνίας φως του ήλιου προσφέροντας έτσι ένα «παθητικό» μηχανισμό

ελέγχου της ηλιακής ακτινοβολίας για νότιου προσανατολισμού γυαλί. Με αυτό τον τρόπο κρατείται μακριά η περισσότερη από την υψηλή ηλιακή καλοκαιρινή ακτινοβολία, ενώ ταυτόχρονα επωφελούμαστε από τη χαμηλότερης γωνίας ηλιακή χειμερινή ακτινοβολία. Το φως του ήλιου που τα καταφέρνει μέσω αυτής της εξωτερικής IGU περνά σε μια εσωτερική IGU που είναι γεμάτη με σφραγισμένα πολυκαρβονικά κανάλια εντός των οποίων είναι ενσωματωμένο ένα διαφανές ένυδρο άλας PCM. Τα PCMs αποθηκεύουν πολλή θερμότητα καθώς αλλάζουν φάση από στερεό σε υγρό (τήξη) σε ένα στενό εύρος θερμοκρασιών και απελευθερώνουν εκείνη τη θερμότητα καθώς κρυσταλλώνουν. Το ένυδρο άλας που χρησιμοποιείται στο GlassX λιώνει και παγώνει σε εύρος θερμοκρασίας 79-86°F (26-30°C).



Σχήμα 4.30: GLASSX[®] κρύσταλλο εγκατεστημένο σε ένα κτίριο, στα αριστερά, όπως φαίνεται από το εσωτερικό, και στα δεξιά, όπως φαίνεται απ' έξω (εικόνα: GLASSX AG) [49].

Δύο ξεχωριστές επικαλύψεις χαμηλής εκπομπής και χαμηλής αγωγιμότητας αερίου, που γεμίζει εξωτερικά τους δύο σφραγισμένους χώρους γυαλιού βοηθούν στην ώθηση θερμότητας από το PCM προς τα μέσα, ενώ επιβραδύνεται η απώλεια θερμότητας προς τα έξω. Ο παράγοντας U είναι γύρω στο 0,48 W/m²K. Η διαπερατότητα άμεσης δέσμης φωτός (με την προϋπόθεση ότι το φως του ήλιου δεν είναι αποκλεισμένο από το στρώμα του πρίσματος) είναι έως και 45% όταν το PCM είναι υγρό και μέχρι 28%, όταν το PCM έχει κρυσταλλωθεί. Μαζί με το να κάνει μια εξαιρετικά καλή δουλειά στο να εμποδίζει την απώλεια θερμότητας, ο υαλοπίνακας αποθηκεύει θερμότητα σαν ένας τοίχος Trombe (ή τοίχος θερμικής αποθήκευσης) προσφέροντας χωρητικότητα αποθήκευσης θερμότητας της τάξης των 1185 Wh/m². Συνολικά, αυτή η συναρμολόγηση υαλοπίνακα έχει ελαφρώς πάνω από τρεις ίντσες πάχος (79mm) και ζυγίζει 95 kg/m². Μονάδες υαλοπινάκων είναι διαθέσιμες σε ένα μέγιστο ύψος των 280 cm και μέγιστο πλάτος 150 cm.

Βιβλιογραφία 4^{ου} Κεφαλαίου

- [1] http://freespace.virgin.net/m.eckert/carl_vener%27s_dissertation.htm
- [2] [Harald Mehling](#) and [Luisa F. Cabeza](#): Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications, Chapter 9: Applications for heating and cooling in buildings
- [3] Yinping Zhang, Guobing Zhou, Kunping Lin, Qunli Zhang, Hongfa Di: Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook
- [4] K. Peippo, P. Kauranen and P. D. Lund: A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating
- [5] Mohd Hafizal Mohd Isa, Xudong Zhao and Hiroshi Yoshino: Preliminary Study of Passive Cooling Strategy Using a Combination of PCM and Copper Foam to Increase Thermal Heat Storage in Building Facade
- [6] Minnie Fraser: Increasing thermal mass in lightweight dwellings using phase change materials – a literature review
- [7] K.J. Kontoleon, E.A. Eumorfopoulou: The influence of wall orientation and exterior surface solar absorptivity on time lag and decrement factor in the Greek region
- [8] Yinping Zhang, Kunping Lin, Yi Jiang, Guobing Zhou: Thermal storage and nonlinear heat-transfer characteristics of PCM wallboard
- [9] Vineet Veer Tyagi, D. Buddhi: PCM thermal storage in buildings: A state of art
- [10] Χ. Τζιβανίδης: «Σημειώσεις του μαθήματος Θερμική Συμπεριφορά Κτιρίων» Εκδόσεις Ε.Μ.Π. Μάιος 2006
- [11] A. Pasupathy, R. Velraj, R.V. Seeniraj: Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments
- [12] Amar M. Khudhair, Mohammed M. Farid: A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials
- [13] D. A. Neeper: Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage
- [14] Pablo Arce Maldonado: Application of passive thermal energy storage in buildings using PCM and awnings
- [15] P. Schossig, H.-M. Henning, S. Gschwander, T. Hausmann: Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials
- [16] K. Darkwa, P.W. O Callaghan: Simulation of phase change drywalls in a passive solar building
- [17] Jin-Soo Kim, Jo Darkwa: Enhanced performance of laminated PCM wallboard for thermal energy storage in buildings

- [18] Helmut E. Feustel and Corina Stetiu: Thermal Performance of Phase Change Wallboard for Residential Cooling Application
- [19] Ana M. Borreguero, Manuel Carmona, M. Luz Sanchez, José Luis Valverde, Juan F. Rodriguez: Improvement of the thermal behaviour of gypsum blocks by the incorporation of microcapsules containing PCMS obtained by suspension polymerization with an optimal core/coating mass ratio
- [20] Quanying Yan, Lin Zhang & Lisha Li: Preparation and thermal properties of some mixtures of fatty acids and liquid paraffin as PCMs used for energy-storing wallboard
- [21] M. Hadjieva, R. Stoykov, Tz Filipova: Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage
- [22] D.W. Hawes, D. Banu and D. Feldman: Latent heat storage in concrete. II
- [23] Luisa F. Cabeza, Cecilia Castello'n , Miquel Nogue's , Marc Medrano, Ron Leppers, Oihana Zubillaga: Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings
- [24] Ruben Baetens, Bjørn Petter Jelle, Arild Gustavsen: Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review
- [25] Esam M. Alawadhi: Thermal analysis of a building brick containing phase change material
- [26] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pe'rez , L.F. Cabeza: Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling
- [27] Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi: Review on thermal energy storage with phase change materials and applications
- [28] Chonlathis Eiamworawutthikul, John Strohhahn, Charles Harman: Investigation of Phase-Change Thermal Storage in Passive Solar Design for Light-Construction Building in the Southeastern Climate Region
- [29] U. Stritih and P. Novak: Solar Heat Storage Wall for Building Ventilation
- [30] Uroš Stritih: Heat transfer enhancement in latent heat thermal storage system for buildings
- [31] Meng Zhang, Mario A. Medina and Jennifer B. King: Development of a thermally enhanced frame wall with phase change materials for on-peak air conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings
- [32] Mario A. Medina, Ryan Stewart: Phase-change frame walls (PCFWs) for peak demand reduction, load shifting, energy conservation, and comfort
- [33] A. K. Athienitis and Y. Chen: The effect of solar radiation on dynamic thermal performance of floor heating systems

- [34] Kunping Lin, Yinping Zhang, Xu Xu , Hongfa Di, Rui Yang, Penghua Qin: Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates
- [35] M M Farid and X D Chen: Domestic electrical space heating with heat storage
- [36] Xu Xu, Yinping Zhang, Kunping Lin, Hongfa Di, Rui Yang: Modeling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings
- [37] M Farid and W J Kong: Underfloor heating with latent heat storage
- [38] M. Amir, M. Lacroix, N. Galanis: Thermal analysis of electric heating floor panels with daily heat storage
- [39] Na Zhu, Zhenjun Ma, Shengwei Wang: Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review
- [40] K. Nagano, S. Takeda, T. Mochida, K. Shimakura, T. Nakamura: Study of a floor supply air conditioning system using granular phase change material to augment building mass thermal storage—Heat response in small scale experiments
- [41] Xing Jin, Xiaosong Zhang: Thermal analysis of a double layer phase change material floor
- [42] Markus Koschenz, Beat Lehmann: Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings
- [43] A. Pasupathy, L. Athanasius, R. Velraj, R.V. Seeniraj: Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management
- [44] Esam M. Alawadhi, Hashem J. Alqallaf: Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: Numerical study
- [45] Kamal A.R. Ismail, Carlos T. Salinas, Jorge R. Henriquez: Comparison between PCM filled glass windows and absorbing gas filled windows
- [46] K.A.R. Ismail, J.R. Henriquez: Thermally effective windows with moving phase change material curtains
- [47] Helmut Weinläder , Andreas Beck, Jochen Fricke: PCM-façade-panel for daylighting and room heating
- [48] Alex Wilson: High-Tech Glazing With Phase-Change Material
<http://www.buildinggreen.com/live/index.cfm/2010/6/21/HighTech-Glazing-With-PhaseChange-Material>
- [49] <http://inhabitat.com/phase-change-glassx-windows-offer-amazing-performance/>

Κεφάλαιο 5^ο: Συστήματα θέρμανσης, ψύξης και συνδυασμός αυτών με PCMs

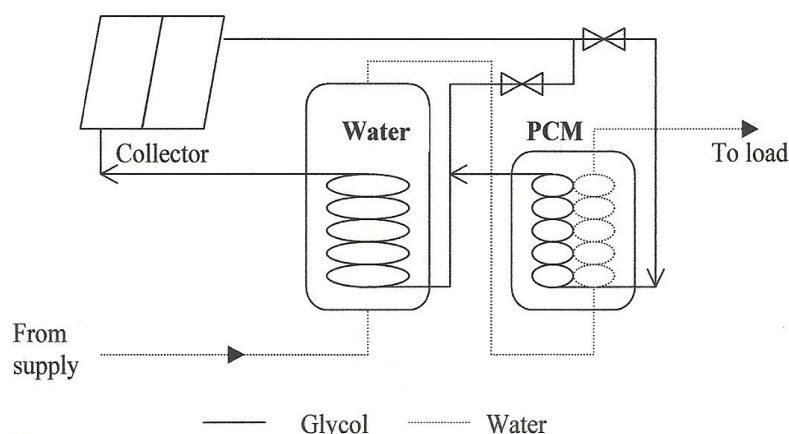
5.1 Συστήματα θέρμανσης με PCMs

5.1.1 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού [1 – 5]

Ένας από τους τομείς όπου η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται ευρέως είναι η θέρμανση νερού. Οι ηλιακοί θερμοσίφωνες γίνονται όλο και πιο δημοφιλείς, δεδομένου ότι είναι σχετικά φθηνοί και απλοί στην κατασκευή και τη συντήρηση. Είναι ένα βιώσιμο συμπλήρωμα ή εναλλακτική λύση στην ηλεκτρική ή με φυσικό αέριο παραγωγή ζεστού νερού. Έτσι αποφεύγονται οι επιβλαβείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, που συνδέονται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ζεστό νερό απαιτείται για κολύμβηση, σκοπούς κατανάλωσης και πλυσίματος, σε βιομηχανίες, σπίτια, και εμπορικούς οργανισμούς. Κατά τη διάρκεια 20 ετών, ένας ηλιακός θερμοσίφωνας μπορεί να αποφύγει πάνω από 50 τόνους εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Ανάλογα με το κλίμα και την απαίτηση, ένας σωστά σχεδιασμένος, εγκατεστημένος, και διατηρημένος ηλιακός θερμαντήρας νερού μπορεί να καλύψει από το ήμισυ έως σχεδόν το σύνολο της ζήτησης σε ζεστό νερό. Μπορεί να λειτουργήσει σε οποιοδήποτε κλίμα, η απόδοση ποικίλλει ανάλογα, εν μέρει, με το πόσο ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη στην τοποθεσία, αλλά και με το πόσο κρύο νερό έρχεται στο σύστημα.

Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει για την παραγωγή μιας μονάδας θερμικής αποθήκευσης PCM / νερού αν και οι περισσότερες είναι ακόμα σε πειραματικό, ερευνητικό στάδιο. Nagano (2003) παρουσίασε δύο δοχεία αποθήκευσης (σχήμα 5.1) όπου το PCM αποθηκεύεται σε ένα ξεχωριστό δοχείο από αυτό του νερού και μια σειρά από βαλβίδες και εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση και την εξαγωγή της θερμότητας. Η ηλιακή συνεισφορά χρησιμοποιείται ως προ-θερμαντήρας. Καμία βοηθητική θέρμανση δεν παρασχέθηκε σε αυτό το σύστημα (ένας μεγάλου μεγέθους συλλέκτης χρησιμοποιήθηκε). Βοηθητική θέρμανση θα έπρεπε να εφαρμόζεται για το PCM καθώς είναι προτιμότερο αυτό να είναι πλήρως φορτισμένο ανά πάσα στιγμή. Δεδομένου ότι εναλλάκτες θερμότητας πρέπει να χρησιμοποιούνται με αποθήκες PCM, απαιτούνται εξωτερικά βοηθητικά συστήματα θέρμανσης. Μια πιθανή λύση είναι να πλημμυρίσουν ένα δοχείο που περιέχει ενσωματωμένο σε κάψουλες υλικό PCM για να θερμανθεί το ρευστό. Φυσική συναγωγή του υγρού αυτού παρέχει την ανταλλαγή θερμότητας και αυτό το ρευστό κυκλοφορεί επίσης μέσω του ηλιακού συλλέκτη και της πραγματικής δεξαμενής νερού

με εναλλάκτη θερμότητας. Η υπερβολική θερμότητα προωθείται στην δεξαμενή νερού, καθώς αυτό είναι πιο αποτελεσματικό από την αποθήκευση της επιπλέον ενέργειας ως αισθητή θερμότητα στο PCM (εκτός και αν η θερμοκρασία του νερού δεν υπερβαίνει τη θερμοκρασία τήξης του PCM). Η κακή σχεδίαση των εναλλακτών θερμότητας μορφής πηνίου φαίνεται να έχει περιορίσει την πραγματική απόδοση αυτού του συστήματος αν και η μοντελοποίηση προέβλεψε αύξηση κατά 35% σε χωρητικότητα αποθήκευσης για αυτήν τη ρύθμιση.



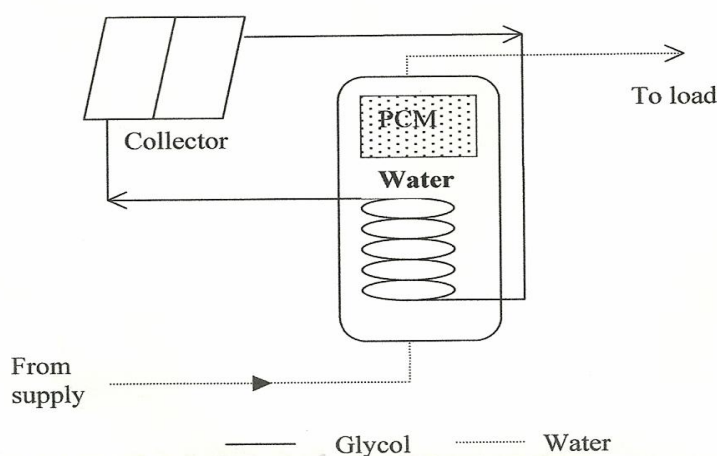
Σχήμα 5.1: Διαμόρφωση με ξεχωριστή δεξαμενή PCM [2].

Μια δεύτερη μέθοδος είναι η χρήση του PCM ως μια στιγμιαία θέρμανση κατά την παράδοση του νερού από την αποθήκη. Αυτό παρέχει το πλεονέκτημα μιας ενιαίας μονάδας, αν και ελαφρώς μεγαλύτερη από μία κανονική αποθήκη. Αυτή η διάταξη (σχήμα 5.2) έχει το πλεονέκτημα της βιομηχανικής χρήσης καθώς καμία τροποποίηση δεν απαιτείται για τις επικουρικές ρυθμίσεις θέρμανσης και μόνο μικρές τροποποιήσεις απαιτούνται για τη δεξαμενή την ίδια. Θερμική στρωμάτωση στο νερό διατηρείται καλά με αυτή τη μέθοδο (Mehling 2002). Αυτή η ρύθμιση είναι αποτελεσματική στη διατήρηση υψηλών θερμοκρασιών στην κορυφή του χώρου αποθήκευσης για παρατεταμένους περιόδους χωρίς βοηθητική θέρμανση.

Σε ένα ρυθμό άντλησης ζεστού νερού των 10L/min, και σε χαμηλή θερμοκρασία αποθήκευσης των 20°C, το PCM θα είναι υποχρεωμένο να παραδίδει 27kW θερμότητας. Στιγμιαία θέρμανση του νερού είναι πολύ έντονης ισχύος και αυτό είναι μια σημαντική πρόκληση για τα υλικά PCM με περιορισμένη θερμική αγωγιμότητα. Τα υλικά με ενισχυμένη αγωγιμότητα π.χ. με προσθήκη γραφίτη δείχνουν υποσχόμενα ($k > 25\text{W/mK}$) αν και ορισμένα μέσα για την υλοποίηση συνεπούς συμπεριφοράς κατάψυξης και μεγάλη επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας απαιτούνται. Ο χώρος που απαιτείται για αυτή τη μεταφορά θερμότητα μπορεί να εκμηδενίζει τα πλεονεκτήματα της συμπαγούς διαμόρφωσης και της εφικτής θερμικής διαστρωμάτωσης και

επομένως ένα από τα οφέλη της χρήσης PCM θα χανόταν. Mehling χρησιμοποίησε μια μικρή μονάδα, 6% του όγκου της δεξαμενής που περιέχει οξικό νάτριο εμποτισμένο με γραφίτη και απέδειξε αυξήσεις της ενεργειακής πυκνότητας στην περιοχή 20-45% και βελτίωσε τους τοπικούς χρόνους ανάκαμψης της θερμοκρασίας.

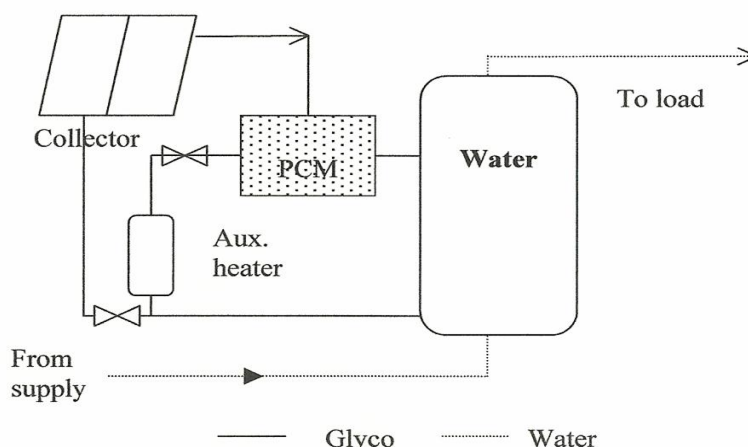
Η συμπεριφορά υπερψυχόμενου PCM έχει παρατηρηθεί στο εργαστήριο σύμφωνα με την οποία η υγρή φάση έχει διατηρηθεί σε θερμοκρασίες πολύ κάτω από το σημείο πήξης του υλικού (Sandnes 2003). Κατάψυξη μπορεί να προκληθεί με ελεγχόμενο τρόπο και μια πολύ μεγάλη απελευθέρωση ενέργειας στη συνέχεια. Η διαδικασία κατάψυξης γίνεται με πυρήνωση γύρω από ένα σπόρο κρυστάλλου. Για να γίνει χρήση της υπέρψυξης, λίγοι μόνο σπόροι κρυστάλλων του υλικού διατηρούνται κατά την τήξη, συχνά από τις υψηλές τοπικές πιέσεις που ανεβάζουν το τοπικό σημείο τήξης (Barett και Benson 1988). Όταν η απελευθέρωση της ενέργειας είναι επιθυμητή, η πυροδότηση ενός μηχανικού μηχανισμού απελευθερώνει τους διατηρημένους σπόρους κρυστάλλων εντός της τήξης και η κατάψυξη γίνεται γρήγορα. Η ρύθμιση αυτή θα επωφεληθεί από τη στρωματοποιημένη επάνω προς τα κάτω θέρμανση και από τον προηγμένο έλεγχο της στρατηγικής βοηθητικής θέρμανσης για την εξαγωγή καλύτερης απόδοσης από το PCM.



Σχήμα 5.2: Στιγμιαίος θερμαντήρας από το PCM [2].

Μια τρίτη πιθανή διαμόρφωση, που επίσης, δεν βρέθηκε στη βιβλιογραφία είναι η θέρμανση μετά τους ηλιακούς συλλέκτες (σχήμα 5.3). Με αυτόν τον τρόπο ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής θερμότητας ανακτάται δεδομένου ότι υψηλότεροι ρυθμοί ροής του συλλέκτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν και η μέση θερμοκρασία του συλλέκτη μπορεί να μειωθεί. Ηλιακά θερμαινόμενο νερό θερμαίνεται σε θερμοκρασία χρήσιμη από το PCM, έτσι ώστε η ροή επιστροφής να μην επηρεάζει αρνητικά την θερμική διαστρωμάτωση στην αποθήκη. Και πάλι, αυτή η ρύθμιση θα ωφεληθεί από

προηγμένο έλεγχο. Ειδικότερα, το PCM θα πρέπει να είναι πλήρως φορτισμένο από την ανατολή του ηλίου τις περισσότερες ημέρες, εκτός αν υπάρχει επαρκής ηλιοφάνεια που να επιτρέπει στο συλλέκτη να λειτουργεί σε μια κατάσταση σύμφωνα με την οποία μπορεί να προσφέρει χρήσιμη θερμότητα στην αποθήκη και χωρίς να αναστατώσει οποιαδήποτε θερμική διαστρωμάτωση, που μπορεί να υπάρχει στην αποθήκη. Η στρατηγική ελέγχου για αυτή τη ρύθμιση μπορεί να είναι κάπως περίπλοκη και απαιτεί μοντελοποίηση.



Σχήμα 5.3: Διαμόρφωση με θέρμανση μετά τον ηλιακό συλλέκτη [2].

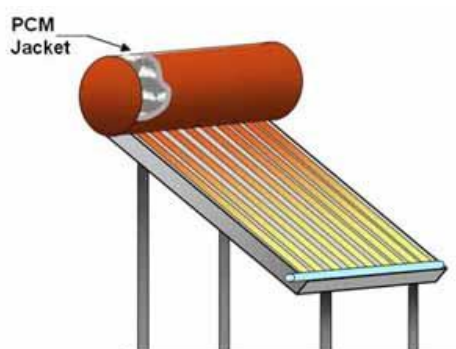
Και στις τρεις παραπάνω περιπτώσεις η φόρτιση (τήξη) του PCM εμφανίζεται αρχικά με αγωγή από το ρευστό θέρμανσης, μέσω του τοίχου του εναλλάκτη θερμότητας και στο στερεό PCM (Lamberg 2003). Η θερμοκρασία φόρτισης είναι συνήθως 10-15°C πάνω από τη θερμοκρασία τήξης του PCM. Η θερμική αγωγιμότητα των στερεών PCM είναι γενικά αρκετά χαμηλή και πολύ χαμηλότερη από του νερού και κάποια αισθητό κέρδος θερμότητας (αύξηση της θερμοκρασίας) συνοδεύει την αρχική φόρτιση του PCM. Μόλις το υγρό σχηματιστεί, η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα του PCM δημιουργεί ένα ρεύμα συναγωγής εντός του PCM και αυτό επιταχύνει τη μεταφορά θερμότητας και τη διαδικασία τήξης. Αυτή η φυσική συναγωγή συχνά επιβραδύνεται από το υψηλό ιξώδες του υλικού ή από τον προσανατολισμό του υλικού.

Η αποφόρτιση (κατάψυξη) τώρα του PCM είναι μια πολύ πιο περίπλοκη διαδικασία. Δεδομένου ότι η θερμότητα απορρίπτεται από το PCM στον εναλλάκτη θερμότητας, κρυστάλλωση συμβαίνει κοντά στην επιφάνεια του εναλλάκτη θερμότητας. Η χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα του στερεού PCM επιβραδύνει στη συνέχεια την περαιτέρω αποφόρτιση. Συνήθως, η αποφόρτιση της αποθήκης διαρκεί τρεις φορές όσο η διαδικασία φόρτισης. Έτσι, μια αρχική άνοδος ισχύος συχνά

παρατηρείται, η οποία συνοδεύεται από μια αισθητή απώλεια θερμότητας καθώς το PCM συνεχίζει να αποφορτίζεται.

Σε χώρες όπως η Αυστραλία, η Ελλάδα και το Ισραήλ, όπου υπάρχει πολύς διαθέσιμος ήλιος και υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, τα θερμοσιφωνικά συστήματα χρησιμοποιούνται συχνά. Σε ένα θερμοσιφωνικό σύστημα, η ροή στις σωληνώσεις μεταξύ του ηλιακού συλλέκτη και της δεξαμενής ωθείται από φυσική συναγωγή. Προκειμένου να επιτευχθεί φυσική κυκλοφορία κατά τη διάρκεια της ημέρας και να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος αντιστροφής της κυκλοφορίας τη νύχτα, η δεξαμενή πρέπει να βρίσκεται πάνω από το συλλέκτη. Καθώς το νερό θερμαίνεται στον συλλέκτη αυτό ανεβαίνει φυσικά στη δεξαμενή, ενώ πιο κρύο νερό στη δεξαμενή ρέει προς το κάτω μέρος του συλλέκτη, προκαλώντας έτσι κυκλοφορία σε όλο το σύστημα. Η αποθήκη θερμότητας σε αυτό το θερμοσιφωνικό σύστημα είναι μια οριζόντια δεξαμενή.

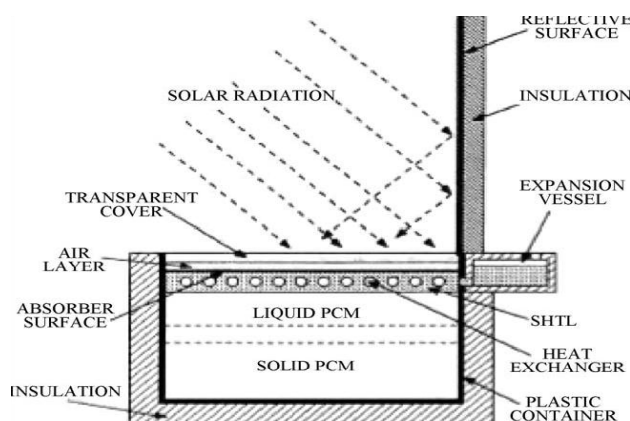
Μπορούμε να επιτύχουμε αύξηση της απόδοσης του ηλιακού θερμοσίφωνα αν «jacket» PCM (σχήμα 5.4) τυλιχτεί γύρω από τη συμβατική δεξαμενή ή χρησιμοποιηθούν μπάλες PCM μέσα στη δεξαμενή για αποθήκευση ενέργειας. Το PCM φορτίζεται την ημέρα με ηλιακή ενέργεια που είναι μια φυσική πηγή ενέργειας και το βράδυ / νύχτα, ή, γενικά ελλείψει της ηλιακής ενέργειας, η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διατήρηση της θερμοκρασίας του ζεστού νερού. Έχει αποδειχθεί ότι για μια δεξαμενή χωρητικότητας 100 L, η αποδοτικότητα μπορεί να αυξηθεί έως και 20% με χρήση 10 kg PCM καθώς και ότι η παραγόμενη απόδοση είναι πολύ μεγαλύτερη όταν χρησιμοποιούνται μπάλες PCM στο εσωτερικό της δεξαμενής.



Σχήμα 5.4: Ηλιακός θερμοσίφοντας με PCM [3].

Ένας άλλος τύπος αποθήκευσης ζεστού νερού που χρησιμοποιείται σε θερμά κλίματα είναι το ενοποιημένο σύστημα δεξαμενής-συλλέκτη (ICS) όπου η δεξαμενή και ο συλλέκτης συνδυάζονται σε μία μονάδα και η οποία θεωρείται ως μια πολλά

υποσχόμενη κατεύθυνση για την αύξηση της οικονομικής βιωσιμότητας των χαμηλής θερμοκρασίας ηλιακών συστημάτων για θέρμανση του νερού για κατοικίες, γεωργικές και βιομηχανικές εφαρμογές εξαιτίας του πλεονεκτήματος της απλότητας, τόσο στην ίδρυση όσο και στη λειτουργία που το διακρίνει. Ωστόσο όμως, λόγω της μεγάλης απώλειας θερμότητας τη νύχτα παρέχει ζεστό νερό μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας και νωρίς το απόγευμα. Επομένως μια λύση προκείμενου να βελτιωθεί σημαντικά η θερμική απόδοση ενός τέτοιου συστήματος αποτελεί η ενσωμάτωση μιας κατάλληλης διάταξης PCM. Ειδικότερα Boy και η ομάδα του (1987) πρότειναν ένα σύστημα ICS, που να βασίζεται σε ένα ένυδρο άλας ως υλικό αλλαγής φάσης (PCM) για την παροχή ζεστού νερού. Ωστόσο, στο σύστημα αυτό παρουσιάστηκε μια σημαντική αύξηση του κόστους εξαιτίας ενός ειδικού εναλλάκτη θερμότητας που απαιτήθηκε και έτσι προτάθηκε μια νέου τύπου μονάδα ενοποιημένου συλλέκτη που δεν απαιτεί εναλλάκτη θερμότητας με επιφάνεια νερού / PCM αλλά χρησιμοποιεί ένα εναλλάκτη θερμότητας νερού / οργανικού υγρού (λαδιού) άντ' αυτού, η σχηματική απεικόνιση του οποίου δίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Σχήμα 5.5: Σχηματική παρουσίαση του ενοποιημένου συστήματος ηλιακού συλλέκτη με αποθήκευση, που βασίζεται σε υλικό αλλαγής φάσης (ICS-PCM) [4].

Η διαδικασία φόρτισης που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της ημέρας βασίζεται στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, με την επιλεκτική επιφάνεια και τη μεταφορά θερμότητας στο PCM μέσω του SHTL (=στατικού υγρού μεταφοράς θερμότητας) στρώματος, κυρίως με αγωγή. Αυτή η διαδικασία προκαλεί το PCM να λιώσει. Η διαδικασία αποφόρτισης, η οποία βασίζεται στη μέθοδο πώσης των κρυστάλλων (FCM) πραγματοποιείται ως εξής. Καθώς η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια SHTL / PCM πέφτει κάτω από τη θερμοκρασία στερεοποίησης, στερεά είδη σχηματίζονται στο PCM. Εφόσον υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες σχεδιασμού και λειτουργίας, ο στερεός κρύσταλλος χωρίζεται από τη διεπιφάνεια SHTL / PCM και βυθίζεται στον πυθμένα του δοχείου υπό την επίδραση της βαρύτητας. Νέα είδη

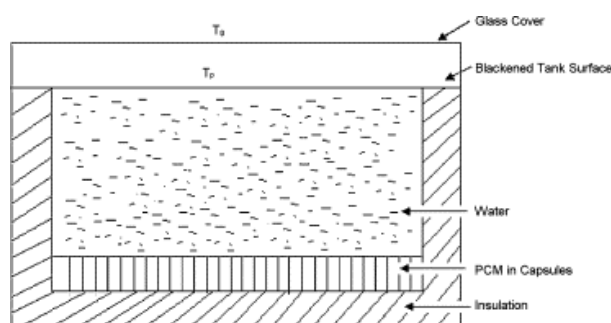
υγρών επομένως έρχονται σε επαφή με το περιβάλλον, και ο κύκλος επαναλαμβάνεται. Η άμεση επαφή μεταξύ του SHTL και των υγρών ένυδρων αλάτων διευκολύνει τη καλή θερμική επαφή. Η θερμότητα που εκλύεται μ' αυτόν τον τρόπο μεταφέρεται στο κρύο νερό που διέρχεται μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας πηνίου με ππερύγια, που βρίσκεται στο στρώμα SHTL.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθόδου ICSPCM είναι ότι: (α) το σύστημα δεν απαιτεί ένα ακριβό εναλλάκτη θερμότητας με επιφάνεια αλλαγής φάσης (β) ο εναλλάκτης θερμότητας νερού / λαδιού δεν έρχεται σε επαφή με το ένυδρο άλας και ως εκ τούτου αποτρέπονται προβλήματα διάβρωσης (γ) σε ψυχρούς χώρους δεν απαιτείται αντιψυκτική προστασία και (δ) το σύστημα είναι απλό, και δεν υπάρχουν ειδικές απαιτήσεις συντήρησης και λειτουργίας. Τα κύρια μειονεκτήματα του συστήματος είναι ότι: (α) η εφαρμογή αυτής της μεθόδου περιορίζεται σε εκείνα τα PCM's ένυδρα άλατα, που έχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ των στερεών και υγρών πυκνοτήτων τους και (β) η διαδικασία αποφόρτισης εξαρτάται από την κινητική της κρυστάλλωσης του επιλεγμένου PCM ένυδρου άλατος. Αυτά τα μειονεκτήματα περιορίζουν τις πιθανές εφαρμογές αυτής της μεθόδου σε ειδικές περιπτώσεις.

Μια συγκριτική μελέτη των ηλιακών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας που βασίζονται στην τεχνική λανθάνουσας θερμότητας και αισθητής θερμότητας έχει πραγματοποιηθεί για να διατηρηθεί το ηλιακά θερμαινόμενο ζεστό νερό για όλη τη διάρκεια της νύχτας από Chaurasia. Χρησιμοποίησε παραφίνη ως PCM για ηλιακή θέρμανση νερού. Γι 'αυτό το σκοπό, δύο πανομοιότυπες μονάδες αποθήκευσης χρησιμοποιήθηκαν, μία μονάδα περιείχε 17,5 kg παραφίνης (θερμοκρασία τήξης 54°C) ως υλικό αποθήκευσης συσκευασμένο σε εναλλάκτη θερμότητας κατασκευασμένο από σωλήνες αλουμινίου και μια άλλη μονάδα, που περιείχε απλά νερό ως υλικό αποθήκευσης σε μια γαλβανισμένη δεξαμενή. Και οι δύο μονάδες χωριστά φορτίζονται κατά τη διάρκεια της ημέρας με τη βοήθεια επίπεδων ηλιακών συλλεκτών με την ίδια περιοχή απορρόφησης. Η μελέτη αποκάλυψε ότι το σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας παράγει συγκριτικά περισσότερο ζεστό νερό την επόμενη μέρα το πρωί σε σύγκριση με το σύστημα αισθητής αποθήκευσης.

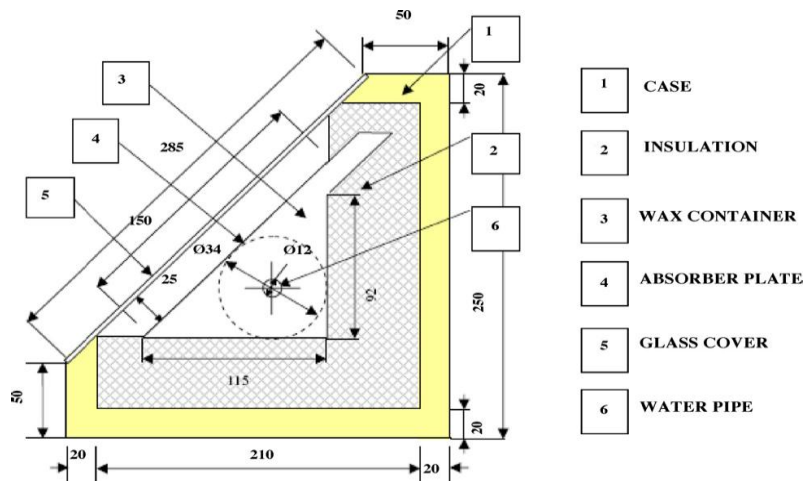
Prakash και οι συνεργάτες του (1985) ανέλυσαν ένα θερμαντήρα τύπου νερού με ενσωματωμένη αποθήκευση που περιείχε ένα στρώμα γεμάτο με PCM στο πυθμένα, ο σχεδιασμός του οποίου φαίνεται στο σχήμα 5.6. Κατά τη διάρκεια ωρών ηλιοφάνειας, το νερό θερμαίνεται μέχρι που με τη σειρά του μεταφέρει τη θερμότητα στο PCM κάτω από αυτό. Το PCM συλλέγει την ενέργεια με τη μορφή της λανθάνουσας θερμότητας και λιώνει. Κατά τη διάρκεια εκτός των ωρών ηλιοφάνειας, το ζεστό νερό αποσύρεται και αντικαθίσταται με κρύο νερό, το οποίο κερδίζει ενέργεια

από το PCM. Η ενέργεια αυτή απελευθερώνεται από το PCM κατά την αλλαγή της φάσης του από υγρό σε στερεό. Αυτός ο τύπος συστήματος μπορεί να μην είναι αποτελεσματικός λόγω της κακής μεταφοράς θερμότητας.



Σχήμα 5.6: Θερμαντήρας τύπου ενσωματωμένης αποθήκευσης με στρώμα PCM [1].

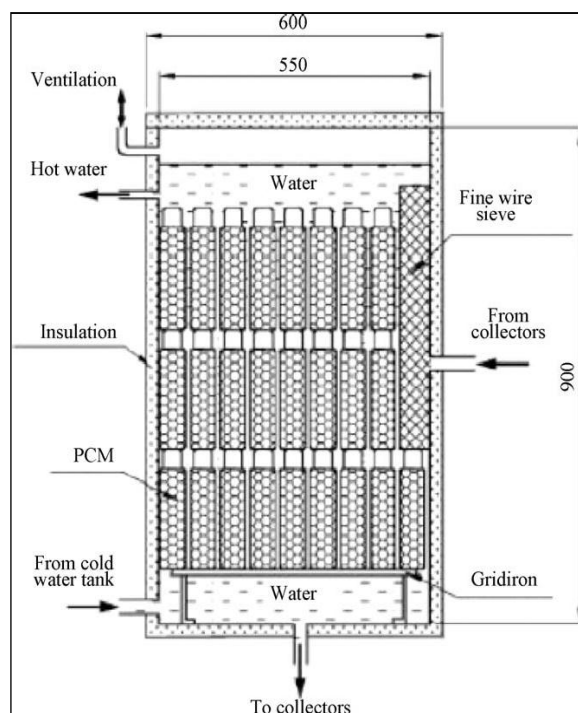
Mettawee και Assassa ερεύνησαν τη θερμική απόδοση ενός συμπαγούς ηλιακού συλλέκτη με υλικό αλλαγής φάσης (PCM) για αποθήκευση με τη μορφή της λανθάνουσας θερμότητας. Σε αυτό το συλλέκτη, η πλάκα απορρόφησης – δεξαμενή εκτελεί τη λειτουργία και των δύο απορροφώντας την ηλιακή ενέργεια και αποθηκεύοντας τη στο PCM. Η ηλιακή ενέργεια ειδικότερα αποθηκεύτηκε σε κερί παραφίνης, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως PCM, και απορρίφθηκε στο κρύο νερό που ρέει μέσα στους σωλήνες που βρίσκονταν τοποθετημένοι εντός του κεριού. Η ενεργός επιφάνεια του συλλέκτη θεωρήθηκε ίση με 1 m^2 και ο συνολικός όγκος του χωρίστηκε σε πέντε τομείς. Η πειραματική συσκευή (σχήμα 5.7) σχεδιάστηκε για να προσομοιώσει έναν από τους τομείς του συλλέκτη, με μια συσκευή-απορροφητήρα ενεργούς περιοχής $0,2 \text{ m}^2$. Εξωτερικά πειράματα πραγματοποιήθηκαν για να αποδειχθεί η εφαρμοσιμότητα χρησιμοποίησης ενός συμπαγούς ηλιακού συλλέκτη για θέρμανση του νερού. Οι θερμοκρασίες του PCM καταγράφηκαν κάθε στιγμή κατά τη διάρκεια των διαδικασιών φόρτισης και αποφόρτισης. Η ηλιακή ένταση σημειώθηκε κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης. Πειράματα έγιναν για διαφορετικούς ρυθμούς ροής του νερού από 8,3-21,7 kg/h. Μελετήθηκε έτσι η επίδραση του ρυθμού ροής του νερού στο κέρδος της ωφέλιμης θερμότητας. Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας υπολογίστηκαν για τη διαδικασία φόρτισης. Η διάδοση του μετώπου της τήξης και της κατάψυξης μελετήθηκε επίσης κατά τη διάρκεια των διαδικασιών φόρτισης και αποφόρτισης. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι κατά τη διαδικασία φόρτισης, ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αυξάνεται κατακόρυφα με την αύξηση του λιωμένου πάχους του στρώματος, καθώς ισχυροποιείται η φυσική συναγωγή. Κατά τη διαδικασία τώρα της αποφόρτισης το κέρδος της ωφέλιμης θερμότητας βρέθηκε να αυξάνει καθώς αυξάνει ο ρυθμός ροής της μάζας του νερού.



Σχήμα 5.7: Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής συσκευής σε εγκάρσια τομή [5].

Canbazoglu και η ομάδα του συνέκριναν ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού με PCMs με τα συμβατικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού (σχήμα 5.8). Φιάλες πολυαιθυλενίου γέμισαν με ένα PCM και τοποθετήθηκαν μέσα στη δεξαμενή, σε τρεις σειρές. Η συνολική μάζα του PCM που χρησιμοποιήθηκε στη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας ήταν περίπου 180kg. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η θερμοκρασία του νερού έχει μια σταθερή τιμή των 46°C κατά τη διάρκεια της νύχτας μέχρι την ανατολή του ηλίου, καθώς το ζεστό νερό δεν καταναλώνεται. Η διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών στο μέσο της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας και στην έξοδο του συλλέκτη της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας με το PCM είναι μεγαλύτερη, με μια κατά μέσο όρο τιμή περίπου 6°C, από ό, τι αυτή του συστήματος χωρίς PCM. Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας είναι σημαντική, καθώς παρουσιάζει την υψηλή απόδοση αποθήκευσης θερμότητας του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας με PCM. Ο χρόνος αποθήκευσης του ζεστού νερού, η μάζα του ζεστού νερού που παράγεται για χρήση, και το σύνολο της συσσωρευμένης θερμότητας στη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας που περιέχει ορισμένα ένυδρα άλατα ήταν περίπου 2.59-3,45 φορές μεγαλύτερο από αυτόν των συμβατικών συστημάτων ηλιακής ενέργειας με μια δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας που δεν περιλαμβάνει PCM. Η θερμική απόδοση των ένυδρων αλάτων ως PCMs όπως $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ και $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ εξετάστηκαν θεωρητικά. Το μέγεθος και το σχήμα του δοχείου έχει σημαντική επίδραση στη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η αναλογία της εκτιθέμενης επιφάνειας προς τον όγκο της, τόσο λιγότερος χρόνος θα απαιτηθεί για την ηλιοφάνεια να θερμάνει την αποθήκη νερού. Για παράδειγμα, για ένα ρηχό ορθογώνιο δοχείο με μεγάλη αναλογία εμβαδού επιφάνειας / όγκο, η προστίπτουσα ηλιοφάνεια έχει ένα μικρό βάθος νερού

για να ζεστάνει. Ωστόσο, μια αποθήκη με μια μεγάλη περιοχή εκτεθειμένης επιφάνειας θα χάσει επίσης σημαντικά ποσά θερμότητας με συναγωγή και μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία υπό φυσιολογικές συνθήκες και θα κρυώσει σημαντικά από τις απώλειες ακτινοβολίας στο νυχτερινό ουρανό.



Σχήμα 5.8: Διατομή της μονάδας αποθήκευσης που σχεδιάστηκε από Canbazoglu [1].

Βλέπουμε λοιπόν με βάση τα παραπάνω ότι καταβλήθηκαν μεγάλες προσπάθειες από ερευνητές για την ανάπτυξη αποδοτικών ηλιακών θερμοσιφώνων νερού και υπάρχουν και πολλές ακόμα που δεν έχουν αναφερθεί. Παρόλα αυτά τα περισσότερα από αυτά τα σχέδια ήταν κυρίως προκαταρκτικής φύσεως και κανένας εμπορικός σχεδιασμός και σύστημα δεν είναι διαθέσιμο προς το παρόν στη διεθνή αγορά. Διαπιστώσαμε όμως ότι μια μεγάλη ποικιλία PCMs και τεχνολογία διατίθεται για την ανάπτυξη και τη χρήση ηλιακών θερμοσιφώνων.

5.1.2 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα [5 - 9]

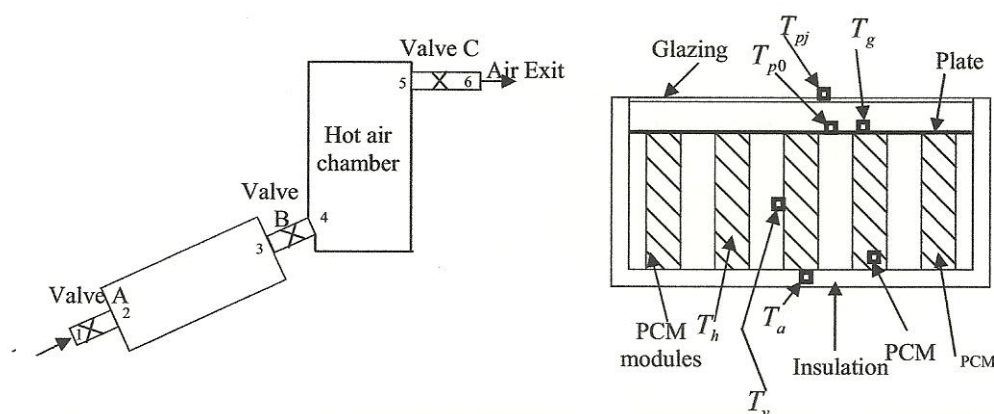
Οι περισσότεροι ερευνητές έχουν δώσει μεγαλύτερη προσοχή στην εξαναγκασμένη κυκλοφορία θερμαντήρων αέρα, που λειτουργούν υπό σχεδόν σταθερές συνθήκες. Αντίθετα, μόνο μερικές αναφορές θερμαντήρων αέρα φυσικής κυκλοφορίας έχουν εμφανιστεί στη βιβλιογραφία. Θερμαντήρες αέρα φυσικής κυκλοφορίας είναι σημαντικοί σε πολλές βιομηχανικές και γεωργικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της ξήρανσης των καλλιεργειών και φαρμακευτικών / αρωματικών φυτών, ξυλείας, φυσικών προϊόντων από καουτσούκ, τσαγιού και καφέ,

και ζωοτροφών. Θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την επώαση των αυγών των πουλερικών. Στην τελευταία περίπτωση, καθώς και στην ξήρανση των φαρμακευτικών / αρωματικών φυτών, η θερμοκρασία του θερμαινόμενου αέρα πρέπει να διατηρείται εντός καθορισμένων περιοχών. Περαιτέρω, ο ζεστός αέρας πρέπει να παρέχεται για μια συνεχή περίοδο αρκετών ημερών, συμπεριλαμβανομένων των εκτός ηλιοφάνεια περιόδων. Για αυτές τις ειδικές εφαρμογές, κάποια μορφή αποθήκευσης ενέργειας, ενδεχομένως σε συνδυασμό με μια βοηθητική πηγή θερμότητας, είναι απαραίτητη.

Έχει αποδειχθεί επίσης ότι οι θερμικές απώλειες αυξάνουν κατά τη διάρκεια αύξησης του μήκους της διαδικασίας έτσι στην περίπτωση μη ενοποιημένου συστήματος, όπου η αποθήκευση και η συλλογή γίνονται ξέχωρα, είναι ανάγκη να υπάρχει περισσότερη μόνωση και περισσότερος χώρος, γεγονός που συνεπάγεται περισσότερο κόστος για το σύστημα. Η συντήρηση επίσης για μη ενοποιημένο σύστημα είναι υψηλότερου κόστους από ότι για ένα ενοποιημένο, επειδή από την πλευρά τώρα του θερμαντήρα αέρα με υλικό αποθήκευσης, τα στάδια και τα συστατικά του συστήματος είναι περισσότερα για το πρώτο. Γι' αυτό λοιπόν το λόγο πολλοί ερευνητές μελέτησαν τον ηλιακό θερμαντήρα αέρα με ενσωματωμένο υλικό αποθήκευσης.

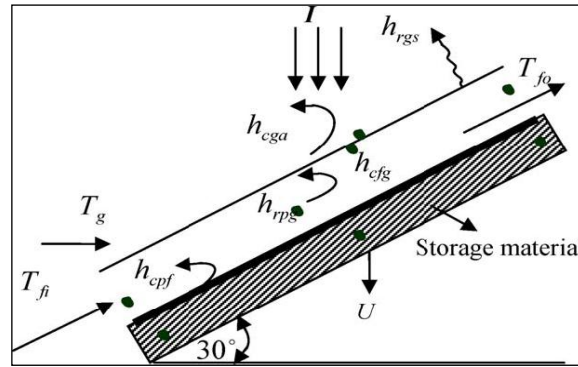
Ειδικότερα Enibe επιχείρησε επιτυχώς την αξιολόγηση της σχεδίασης, της ανάπτυξης και της απόδοσης ενός ηλιακού θερμαντήρα αέρα με φυσική συναγωγή και με χρήση υλικού αλλαγής φάσης για αποθήκευση της ενέργειας. Αποτελείται από μια επίπεδη πλάκα ηλιακού συλλέκτη ενοποιημένη με το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, και χρησιμοποιεί ένα τύπου παραφίνης PCM με γνωστές θερμοφυσικές ιδιότητες για αποθήκευση ενέργειας. Το PCM είναι διατεθειμένο σε μονάδες και κάθε μονάδα, η οποία κατασκευάζεται από λεπτά ορθογώνια τετράγωνα του υλικού αλλαγής φάσης, ενσωματώνεται από τα ορθογώνια τοιχώματα μιας δομής σαν κουτί που συμπεριφέρεται όπως τα λεπτά πτερύγια. Το διάστημα μεταξύ κάθε ζεύγους μονάδων χρησιμεύει ως θερμαντήρας του αέρα. Με φυσική συναγωγή, ατμοσφαιρικός αέρας μπαίνει στην είσοδο μέσω της βαλβίδας ελέγχου A, ενώ ο θερμός αέρας φεύγει μέσω της βαλβίδας B, ρέει στο θάλαμο ζεστού αέρα και αποφορτίζεται στο περιβάλλον μέσω της βαλβίδας C (σχήμα 5.9). Η συναρμολογούμενη μονάδα απορροφητική πλάκα / PCM στεγάζεται σε ένα κεκλιμένο μονωμένο κουτί προς τον ισημερινό σε γωνία, που κατά προσέγγιση ισούται με το τοπικό γεωγραφικό πλάτος.

Τα βράδια, ο ηλιακός συλλέκτης μπορεί να καλυφθεί με αδιαφανή οθόνη για να ελαχιστοποιηθεί ο νυχτερινός συντελεστής απώλειας θερμότητας. Η ημερήσια απόδοση του συστήματος σε συνθήκες μη ύπαρξης φορτίου δοκιμάστηκε κάτω από φυσικές περιβαλλοντικές συνθήκες, που περιλαμβάνουν διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στην περιοχή 19-41°C και καθημερινή παγκόσμια ακτινοβολία στην περιοχή 4,9 έως 19,9 MJ·m⁻². Το μέγιστο της θερμοκρασιακής αύξησης του θερμού αέρα ήταν περίπου 15K, ενώ η μέγιστη αθροιστική ωφέλιμη απόδοση ήταν περίπου 50%. Το σύστημα είναι κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί για ξήρανση καλλιεργειών με τη βοήθεια του ήλιου και ειδικότερα για αρωματικά βότανα, φαρμακευτικά φυτά και άλλες καλλιέργειες, τα οποία δεν απαιτούν άμεση έκθεση στο ηλιακό φως.



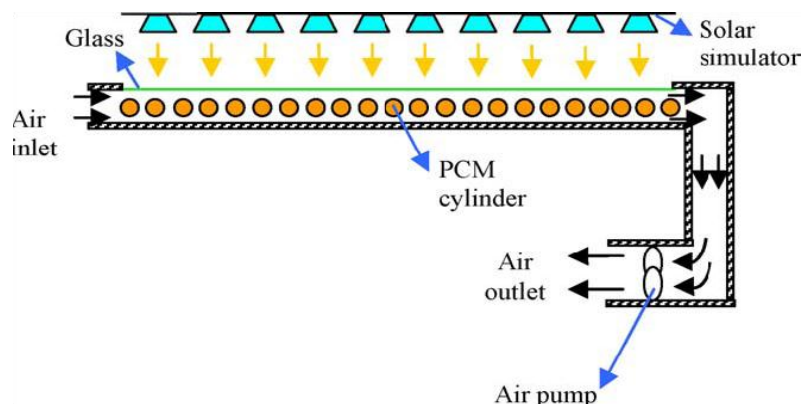
Σχήμα 5.9: Σχηματική άποψη ενός θερμαντήρα αέρα φυσικής κυκλοφορίας με προβολή εγκάρσιας τομής που δείχνει τις μονάδες PCM [7].

Aboul-Enein μελέτησε ένα κεκλιμένο ηλιακό θερμοσίφωνα αέρος με και χωρίς θερμική αποθήκευση για ξήρανση καλλιεργειών (σχήμα 5.10). Ο θερμαντήρας αέρα έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι σε θέση να εισάγει διάφορα υλικά αποθήκευσης κάτω από τη πλάκα απορρόφησης, προκειμένου να βελτιωθεί η διαδικασία ξήρανσης. Άμμος, γρανίτης και νερό έχουν χρησιμοποιηθεί ως υλικά αποθήκευσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μέση θερμοκρασία της ροής του αέρα είναι ανάλογη απευθείας με το μήκος συλλέκτη, και το πλάτος με όριο τις τυπικές τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού. Η θερμοκρασία εξόδου της ροής του αέρα είναι αντιστρόφως ανάλογη με το κενό χώρο και το ρυθμό ροής μάζας, η θερμική απόδοση του θερμαντήρα αέρα με αισθητή αποθήκευση είναι υψηλότερη από αυτήν όταν δεν υπάρχει αποθήκευση και το βέλτιστο πάχος του υλικού αποθήκευσης είναι περίπου 0,12 m. Μαθηματικό μοντέλο επιτεύχθηκε για τη θερμική απόδοση του θερμαντήρα του αέρα.



Σχήμα 5.10: Αποψη του θερμαντήρα αέρα με υλικό αποθήκευσης [7].

Alkilani πέτυχε εσωτερική πρόβλεψη για τη θερμοκρασία του αέρα εξόδου λόγω της διαδικασίας αποφόρτισης σε ένα ενοποιημένο ηλιακό θερμοσίφωνα αέρα με μια μονάδα PCM (σχήμα 5.11), για οκτώ διαφορετικές τιμές του ρυθμού ροής μάζας και έφτασε μέγιστη θερμοκρασία του αέρα εξόδου στους 42°C, με ρυθμό ροής μάζας 0,05 kg/s. Το PCM αποτελείται από κερί παραφίνης με κλάσμα μάζας 0,5% σκόνης αλουμινίου για την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας, ο χρόνος ψύξης για τη μονάδα PCM είχε προβλεφθεί για κάθε ρυθμό ροής της μάζας. Ο χρόνος ψύξης των κυλίνδρων PCM που σχετίζεται αντίστροφα με το ρυθμό ροής μάζας, παίρνει περισσότερο χρόνο περίπου (8 h) με ρυθμό ροής 0,05 kg/s.

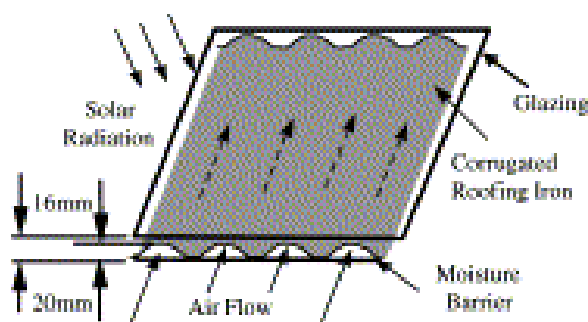


Σχήμα 5.11: Μονής – διαδρομής ηλιακός θερμοσίφωνας αέρα με ενοποιημένη μονάδα με PCM [7].

Saman και Belusko μοντελοποίησαν και διεξήγαγαν έρευνα στη χρήση κυματοειδούς οροφής από χάλυβα που λειτουργεί ως ακάλυπτος συλλέκτης. Μαζί με μια μονάδα θερμικής αποθήκευσης TSU με υλικό αλλαγής φάσης η απόδοση μιας οροφής με ενσωματωμένο ηλιακό σύστημα θέρμανσης (RISHS) ερευνήθηκε. Η χαμηλή απόδοση του RISHS με ακάλυπτο συλλέκτη οφείλεται στις απώλειες συναγωγής στον αέρα και τις απώλειες ακτινοβολίας από το συλλέκτη στον ουρανό, που αντιπροσωπεύουν το 60% της εισερχόμενης ακτινοβολίας, για μια απόδοση του συλλέκτη της τάξης του 30%. Ως εκ τούτου οι υαλοπίνακες θεωρούνται η μόνη

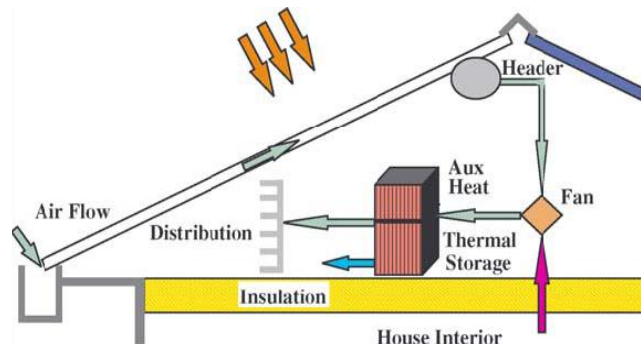
μέθοδος χαμηλού κόστους για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας του κόστους. Κατά συνέπεια, ένα μαθηματικό μοντέλο μιας γυάλινης οροφής με ενσωματωμένο συλλέκτη και ένα τροποποιημένο μοντέλο του RISHS αναπτύχθηκε.

Σε σύγκριση με κεραμίδια, οι κυματοειδείς στέγες από χάλυβα είναι με διαφορά το καλύτερο υλικό για απορροφητή σε ένα ακάλυπτο συλλέκτη λόγω της χαμηλότερης θερμικής μάζας και υψηλότερης αγωγιμότητας. Μαζί με το φράγμα υγρασίας, η ρύθμιση που προκύπτει μπορεί εύκολα να λειτουργήσει ως συλλέκτης. Ενσωμάτωση στην οροφή έχει σημαντικά πλεονεκτήματα με το κόστος κεφαλαίου του συλλέκτη ουσιαστικά να αποφεύγεται, με την αισθητική της οροφής να μην αλλάζει ριζικά και με την εγκατάσταση να μην συνεπάγεται σημαντική αύξηση του κόστους και της πολυπλοκότητας. Ο υαλοπίνακας που χρησιμοποιείται και ο οποίος συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωση της απόδοσης είναι ένα Πλαστικό προϊόν της GE, Lexan. Είναι ουσιαστικά ένας επίπεδος διπλός υαλοπίνακας και επισυνάπτεται στο επάνω μέρος του κυματοειδούς χάλυβα.



Σχήμα 5.12: Γυάλινη οροφή εννοποιημένη με ηλιακό συλλέκτη αέρα [8].

Έρευνα που διεξάγεται στο Πανεπιστήμιο της Νότιας Αυστραλίας έχει διερευνήσει την βιωσιμότητα μιας θερμικής μονάδας αποθήκευσης αλλαγής φάσης. Όπως φαίνεται στην σχήμα 5.13, το σύστημα χρησιμοποιεί την υπάρχουσα οροφή ως ένα ηλιακό συλλέκτη / απορροφητή και ενσωματώνει μια μονάδα θερμικής αποθήκευσης με PCM για την αποθήκευση θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας και την απελευθέρωση της για να θερμάνει το χώρο διαβίωσης κατά τη διάρκεια της νύχτας ή όταν δεν υπάρχει καμία ηλιοφάνεια. Η ενσωμάτωση μιας μονάδας αποθήκευσης ενέργειας στο σύστημα έχει ως στόχο να διασφαλίσει τη μέγιστη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, που απορροφάται από το σύστημα. Έτσι, μεγιστοποιεί την ηλιακή συνεισφορά για την εξυπηρέτηση του φορτίου θέρμανσης και ελαχιστοποιεί την ανάγκη για βοηθητική ενέργεια. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι ο συλλέκτης χρησιμοποιεί εξωτερικό αέρα, το οποίο σε αντίθεση με τη λήψη του αέρα από το εσωτερικό του δωματίου, μειώνει τον αριθμό των εξαρτημάτων.



Σχήμα 5.13: Σχηματική απεικόνιση οροφής ενοποιημένη με ηλιακό σύστημα θέρμανσης [8].

Από την ανάλυση του συστήματος προκύπτει ότι η επίδραση της αισθητής θερμότητας γίνεται αντιληπτή στην αρχική περίοδο τόσο της τήξης όσο και της κατάψυξης. Τα αποτελέσματα αντανακλώνται στην απότομη αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα εξόδου κατά την αρχική περίοδο της τήξης και απότομη μείωση κατά την αρχική περίοδο της ψύξης. Για σκοπούς θέρμανσης, αυτό σημαίνει ότι σημαντική θερμαντική επίδραση γίνεται αντιληπτή κατά τη διάρκεια της αρχικής περιόδου της παροχής αέρα στο χώρο. Αυτό είναι συμφέρον από την άποψη του σημείου της θερμικής άνεσης. Αποδείχθηκε ακόμα ότι μια υψηλότερη θερμοκρασία εισόδου του αέρα αυξάνει τους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας και μειώνει το χρόνο τήξης. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της ψύξης, χαμηλότερη θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής αυξάνει τα ποσοστά μεταφοράς θερμότητας και μειώνει το χρόνο ψύξης. Επίσης, ένας υψηλότερος ρυθμός της ροής του αέρα αυξάνει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και μειώνει το χρόνο της τήξης, αλλά αυξάνει την θερμοκρασία του αέρα εξόδου. Για ψύξη, ένας υψηλότερος ρυθμός ροής αέρα αυξάνει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και μειώνει το χρόνο ψύξης, αλλά μειώνει και την θερμοκρασία του αέρα εξόδου.

Επομένως καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως προκειμένου να επιτύχουμε μια καλύτερη θερμική απόδοση του ηλιακού θερμοσίφωνα αέρα, ένα υλικό αλλαγής φάσης με υψηλή λανθάνουσα θερμότητα και μια μεγάλη επιφάνεια για τη μεταφορά θερμότητας είναι απαραίτητα. Επίσης επιβεβαιώνεται η παρατήρηση ότι προτιμάται το ενοποιημένο σύστημα από τα σχέδια των ερευνητών καθώς όλα προσανατολίζονται στην ενοποίηση μεταξύ συλλογής της ηλιακής ενέργειας και θερμικής αποθήκευσης ώστε να μειωθούν οι απώλειες θερμότητας, ο όγκος και το κόστος του συστήματος.

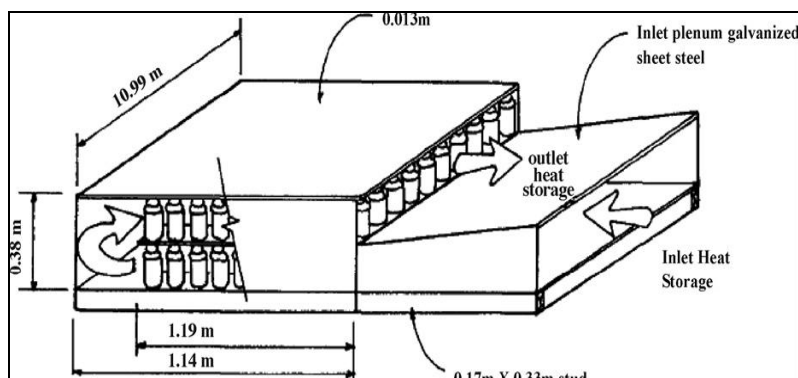
5.1.3 Ηλιακό θερμοκήπιο [5,7]

Συστήματα θερμοκηπίου για παραγωγή αρχικά εφαρμόστηκαν σε κρύες περιοχές σε βόρεια γεωγραφικά πλάτη προκειμένου να επεκταθεί η περίοδος παραγωγής φυτών, τα οποία συνήθως δεν αναπτύσσονται βέλτιστα. Ωστόσο, οι

τρέχουσες ελεγχόμενου περιβάλλοντος γεωργικές (CEA) βιομηχανίες μπορούν να λειτουργήσουν σε διάφορες κλιματικές περιοχές σε ολόκληρο τον κόσμο, συμπεριλαμβανομένων ημιάγονων και τροπικών περιοχών. Σε γενικές γραμμές το σύστημα του θερμοκηπίου μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μεγάλος ηλιακός θερμικός συλλέκτης. Οι ερευνητές έτσι βρήκαν μια εναλλακτική λύση και καθαρό τρόπο για την επίτευξη των αναγκών θέρμανσης αντί για συμβατική χρήση ορυκτών καυσίμων, που είναι η χρήση της φυσικής ηλιακής ενέργειας. Ειδικότερα σύστημα θερμοκηπίου με μονάδα αποθήκευσης χρησιμοποιείται για να αυξήσει την αποθήκευση θερμικής ενέργειας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της ημέρας και να μεταφέρει περίσσεια θερμότητας από το θερμοκήπιο στη θερμική μονάδα αποθήκευσης. Αυτή η θερμότητα ανακτάται τη νύχτα για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις θέρμανσης του θερμοκηπίου. Ένα από τα πιο σημαντικά υπάρχοντα συστήματα θέρμανσης θερμοκηπίου με μονάδα αποθήκευσης είναι αυτά που χρησιμοποιούν υλικά αλλαγής φάσης. Τα υλικά αλλαγής φάσης αρχίζουν να στερεοποιούνται όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος πέσει κάτω από τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης τους οπότε και απελευθερώνουν την αποθηκευμένη θερμότητα.

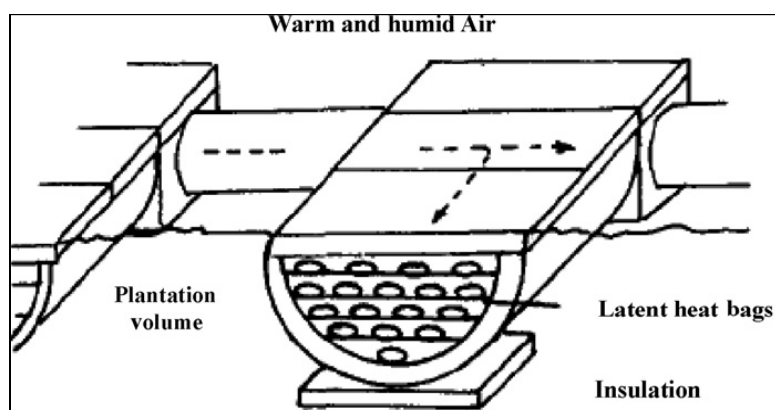
Το μέσο αποθήκευσης θερμότητας μπορεί να τοποθετηθεί έξω από το θερμοκήπιο ή μπορεί να τοποθετηθεί και σε οποιαδήποτε επιφάνεια που εκτίθεται επίσης στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ή μπορεί να τοποθετηθεί υπόγεια. Kern και Aldrich απασχολούν 1650kg $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ σε δοχεία αεροζόλ, καθένα από τα οποία ζυγίζει 0,74kg και τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για να διερευνηθούν οι δυνατότητες αποθήκευσης ενέργειας τόσο εντός όσο και εκτός ενός θερμοκηπίου επιφάνειας εδάφους 36 m^2 , που καλύπτεται με φύλλα Tedlar - επιχρισμένος υαλοβάμβακας. Δοχεία PCM τοποθετήθηκαν σε μια αποθήκη με 22,86 mm κενό και δύο αποθήκες με διαφορετικές ποσότητες PCM ακόμα χρησιμοποιήθηκαν, η μία μέσα και η άλλη εκτός του θερμοκηπίου. Η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας μέσα στο θερμοκήπιο (σχήμα 5.14) ενώ συλλέγει θερμό αέρα από την κορυφογραμμή του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της ημέρας, τη νύχτα η κατεύθυνση της ροής του αέρα αντιστρέφεται για την απελευθέρωση αυτής της ενέργειας. Η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας τώρα έξω από το θερμοκήπιο περιείχε 1.376,4 kg PCM και δύο ηλιακούς συλλέκτες αέρα με επιφάνεια 8.55 m^2 ο καθένας. Όπως το πρώτο σύστημα, έτσι και αυτό αντέστρεψε τη ροή του αέρα κατά τη διάρκεια της απόσυρσης της ενέργειας από την αποθήκη. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν ακόμα ότι, η ενέργεια που αποθηκεύτηκε από την εξωτερική μονάδα ήταν μεταξύ 105,5 και 158,25 MJ με κλάσμα ηλιακής ενέργειας από 38-43%. Αυτά ήταν τα αντίστοιχα, των 21,1 και 31,65 MJ, για την εσωτερική μονάδα με ένα αρκετά πολύ μικρότερο ηλιακό κλάσμα της

τάξης του 6-8%. Επιπλέον, υπολογίστηκε ότι με τη χρήση του PCM, η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα διατηρήθηκε 2 °C υψηλότερη από τις εξωτερικές συνθήκες.



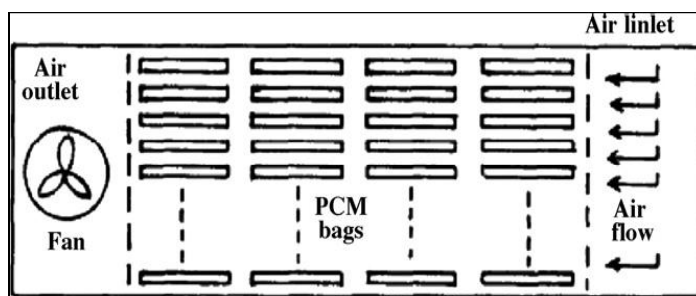
Σχήμα 5.14: Μονάδα αποθήκευσης ενέργειας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου [5].

CNRE-Γαλλία πραγματοποίησε μελέτη με σκοπό την παραγωγή τριαντάφυλλου σε ένα 500 m² θερμοκήπιο μονού τζαμιού χρησιμοποιώντας 13,5 τόνους CaCl₂ · 6H₂O (σημείο τήξης 28°C) ως υλικό θερμικής αποθήκευσης ενσωματωμένο σε σακούλες που τοποθετούνται σε πέντε συμπαγή ράφια (σχήμα 5.15) με το θερμό αέρα να περνά μέσα από τα ράφια. Η απόδοση του ηλιακού θαλάμου του θερμοκηπίου με PCM αποθήκευση που συγκρίθηκε με ένα παραδοσιακό θερμοκήπιο έδειξε ότι έσωσε αέριο προπανίου κατά 80% και 60% σε σύγκριση με το συμβατικό και το διπλό-καλυμμένο θερμοκήπιο, αντίστοιχα. Επίσης το υλικό αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας μπορεί να στοιβάζεται και σε σχάρες που τοποθετούνται σε θερμοκήπιο και που θα μπορούν άμεσα να θερμαίνονται από την ηλιακή ακτινοβολία. Σε αυτό το σύστημα ο ζεστός αέρας κυκλοφορούσε στο θερμοκήπιο μέσω της αποθήκευσης για να αυξήσει το ποσοστό φόρτισης / αποφόρτισης του PCM. Η αποθηκευμένη θερμότητα χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια εκτός ωρών ηλιοφάνειας για τη διατήρηση της επιθυμητής θερμοκρασίας του θερμοκηπίου. Na₂SO₄ · 10H₂O χρησιμοποιήθηκε ως υλικό αποθήκευσης PCM στο θερμοκήπιο.



Σχήμα 5.15: Υπόγεια σήραγγα με αποθήκευση PCM [7].

Nishina και Takakura χρησιμοποίησαν $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ με κάποια πρόσθετα για την πρόληψη του διαχωρισμού των φάσεων και της υποβάθμισης για θέρμανση ενός θερμοκηπίου σε Ιαπωνία, η γενική άποψη αυτής της πειραματικής διάταξης δίνεται στο σχήμα 5.16. Η εν λόγω μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι 40-60% του δυναμικού της λανθάνουσας θερμότητας του PCM πραγματοποιήθηκε, το οποίο έδειξε ότι σχεδόν το ήμισυ του PCM δεν χρησιμοποιήθηκε αποτελεσματικά κατά τη διάρκεια των διαδικασιών ανταλλαγής ενέργειας. Takakura και Nishina δοκίμασαν πολυαιθυλενογλυκόλη και $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ως PCMs για θέρμανση ενός θερμοκηπίου με εμβαδόν περιοχής ίσο με 7.2 m^2 . Συνέκριναν τα συμβατικά θερμοκήπια με θερμοκήπια αποθήκευσης τύπου PCM. Η απόδοση του θερμοκηπίου με αποθήκευση σε PCM ενσωματωμένο με ηλιακό συλλέκτη ήταν 59% και ήταν σε θέση να διατηρήσει μια θερμοκρασία της τάξης των 8°C στο εσωτερικό του θερμοκηπίου τη νύχτα, όταν η εξωτερική θερμοκρασία μειώθηκε στους $-0,6^\circ\text{C}$. Ένα σύστημα ελέγχου μικροϋπολογιστή έχει αναπτυχθεί με σκοπό τη θέσπιση πιο ακριβή και πιο εξελιγμένου ελέγχου για τα ηλιακά συστήματα θερμοκηπίου.



Σχήμα 5.16: Γενική άποψη συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με αλλαγή φάσης σε θερμοκήπιο [7].

5.2 Συστήματα ψύξης με PCMs

Το σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με τη μορφή ψύξης (CTES) ταξινομείται γενικά σε αισθητή αποθήκευση ψύξης και σε λανθάνουσα αποθήκευση ψύξης. Το λανθάνον CTES (LCTES) είναι ένα από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας. Σε αντίθεση με την μέθοδο αισθητής αποθήκευσης της ψύξης όπου το ποσό της ψύξης που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα δεδομένο όγκο περιορίζεται από τη θερμοχωρητικότητα του μέσου μ' αποτέλεσμα αυξημένο όγκο αποθήκευσης και συνεπώς αυξημένο κόστος, η μέθοδος λανθάνουσας αποθήκευσης της ψύξης παρέχει πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα αποθήκευσης, με μια μικρότερη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην αποθήκευση και απελευθέρωση της ενέργειας ψύξης.

Σημαντικό όφελος που προκύπτει με την τεχνολογία ψυχρής αποθήκευσης είναι η μετακίνηση των ηλεκτρικών φορτίων αιχμής βοηθώντας έτσι τις δημόσιες επιχειρήσεις ηλεκτρικού ρεύματος να μειώσουν τα φορτία αιχμής και να αυξήσουν το φορτίο κατά τη διάρκεια εκτός αιχμής περιόδων, το οποίο με τη σειρά του συμβάλλει στη βελτίωση του εξοπλισμού παραγωγής βασικού φορτίου και παράλληλα στη μείωση της εξάρτησης από μονάδες αιχμής που έχουν πολύ υψηλότερο κόστος λειτουργίας. Εκτός όμως από τις επιχειρήσεις ηλεκτρικού ρεύματος επωφελούνται και οι καταναλωτές με τους χαμηλότερους λογαριασμούς ηλεκτρικού ρεύματος καθώς το σύστημα ψυχρής ενέργειας επιτρέπει στους πελάτες να επωφεληθούν από τους χαμηλότερους συντελεστές της εκτός αιχμής ηλεκτρικής ενέργειας και τις μειωμένες επιβαρύνσεις τιμολόγησης σε περιόδους αιχμής της ζήτησης.

Ένα σύστημα αποθήκευσης ψύξης έχει τρία βασικά συστατικά: ένα ψύκτη, μια δεξαμενή αποθήκευσης και ένα μέσο για την παροχή παγωμένου νερού ή αέρα στο χρησιμοποιούμενο χώρο. Με λίγα λόγια δηλαδή περιλαμβάνει τον ίδιο ακριβώς εξοπλισμό με το συμβατικό σύστημα κλιματισμού και επιπλέον μια δεξαμενή αποθήκευσης. Παρόλα αυτά πλεονεκτεί σημαντικά έναντι των συμβατικών συστημάτων καθώς παρουσιάζει μειωμένη ικανότητα των εγκαταστάσεων ψύξης αφού δεν έχει πλέον να αντιμετωπίσει το φορτίο αιχμής και η λειτουργία της μονάδας του ψύκτη είναι στο 100% της ονομαστικής της ικανότητας το οποίο συνεπάγεται ότι η εγκατάσταση λειτουργεί στη βέλτιστη απόδοσή της. Επίσης η μετατόπιση του φορτίου της ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη στη διάρκεια της νύχτας όπου οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος είναι αισθητά πιο χαμηλές από εκείνες στη διάρκεια της ημέρας έχει σα συνέπεια μια βελτίωση στην απόδοση του ψύκτη και ειδικότερα του εξοπλισμού απόρριψης θερμότητας και δίνει τη δυνατότητα διατήρησης ενός σταθερού φορτίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο είναι αδύνατο στα συμβατικά συστήματα όπου η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι ουσιαστικά ανάλογη με το ψυκτικό φορτίο, το οποίο φτάνει συνήθως ένα μέγιστο κατά τις απογευματινές ώρες. Ένα από τα πιο σημαντικά όμως οφέλη που επιτυγχάνεται και πρέπει να τονιστεί είναι ότι με την εγκατάσταση της αποθήκευσης ψύξης μειώνονται οι εκπομπές επιβλαβών CFCs στην ατμόσφαιρα, που θα επιτρέψει τη μείωση τόσο του στρώματος του όζοντος όσο και του σχηματισμού του φαινομένου του θερμοκηπίου. Τέλος η μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας του αέρα στις μονάδες διαχείρισης αέρα επιτρέπει τη μείωση του όγκου του αέρα που κυκλοφορεί, το οποίο σημαίνει μικρότερες μονάδες διαχείρισης αέρα, μικρότερες σωληνώσεις, λιγότερος ηλεκτρικός εξοπλισμός κ.ο.κ.

Ένα σύστημα αισθητής αποθήκευσης ψύξης που χρησιμοποιείται σήμερα και είναι γενικά γνωστό ως «chilled water storage» ή αποθήκευση παγωμένου νερού

φέρει μια δεξαμενή, η οποία φορτίζεται με νερό στους $4\pm 6^{\circ}\text{C}$. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας αποφόρτισης, παγωμένο νερό παρέχεται από τον πυθμένα της δεξαμενής και επιστρέφεται στην κορυφή της δεξαμενής με χαμηλούς ρυθμούς ροής για μείωση της ανάμειξης των στρωμάτων, που αποτελεί και ένα από τα κύρια προβλήματα του συγκεκριμένου συστήματος. Καθώς σε περίπτωση που δεν απομονωθεί το κρύο νερό από την επιστροφή του ζεστού η ψυκτική ικανότητα θα χαθεί. Μια λύση αποτελεί η αποθήκευση παγωμένου νερού σε στρωματοποιημένες δεξαμενές που βασίζονται στην τάση του νερού να σχηματίζει οριζόντια στρώματα ή ζώνες θερμοκρασίας με βάση την πυκνότητά του και έτσι επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός μεταξύ ανώτερης και κατώτερης ζώνης. Επομένως το κύριο πρόβλημα του συστήματος αυτού που οδήγησε και στη χρήση των υλικών αλλαγής φάσης στην αποθήκευση ψύξης είναι ο όγκος αποθήκευσης. Οι απαιτήσεις όγκου είναι τεράστιες αν σκεφτεί κανείς ότι κάθε κυβικό μέτρο μπορεί μόνο να παρέχει 5,8 kWh ψύξης, εάν άνοδος της θερμοκρασίας των 5°C χρησιμοποιείται. [10-12]

5.2.1 Συστήματα αποθήκευσης με πάγο [10,12,13]

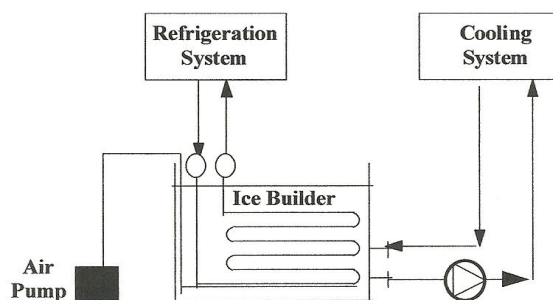
Το νερό χρησιμοποιείται ευρέως ως PCM για θερμική αποθήκευση ψύξης, λόγω των πλεονεκτημάτων που εμφανίζει, όπως υψηλή λανθάνουσα θερμότητα καταψύξεως, σταθερότητα, χαμηλό κόστος, χωρίς περιβαλλοντικές ανησυχίες ρύπανσης και συμβατότητα με το υλικό του εξοπλισμού ψύξης. Ωστόσο, υπάρχουν και μερικά μειονεκτήματα με τη χρήση του νερού ως PCM. Ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα είναι το φαινόμενο της υπόψυξης που λαμβάνει χώρα κατά τη διαδικασία ψύξης του νερού κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Η αρχή πίσω από τη θερμική αποθήκευση πάγου είναι βασικά πολύ απλή: εκτός αιχμής - ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της νυκτερινής περιόδου για να δημιουργήσει μια μεγάλη μάζα πάγου. Κατά τη διάρκεια της ημέρας αυτή η αποθήκη πάγου λιώνει με απορρόφηση θερμότητας. Η ψυκτική ικανότητα αυτού του συστήματος αποθήκευσης πάγου εξαρτάται από την θερμοκρασία τήξης και το ρυθμό με τον οποίο ο πάγος μπορεί να λιώσει για να ικανοποιήσει τη ζήτηση ψύξης. Οι βασικές συνιστώσες τώρα όλων των συστημάτων ψύξης είναι παρόμοιες με εκείνες των συμβατικών εγκαταστάσεων ψύξης: συμπιεστής, συμπυκνωτής, βαλβίδες διαστολής και εξατμιστής και το σύστημα IS μπορεί απλά να σε συνδυαστεί με τις συμβατικές εγκαταστάσεις κλιματισμού σταθερής θερμοκρασίας. Ο κύριος λόγος είναι ότι ενώ στα πλαίσια ενός συμβατικού συστήματος κλιματισμού με αγωγούς, ο αέρας παρέχεται συνήθως περίπου στους 13°C , σε σύστημα με αποθήκευση πάγου, είναι δυνατό να παρέχεται στους 6°C . Οι τεχνικές παραγωγής πάγου μπορεί να διαιρεθούν σε δύο βασικές κατηγορίες, που είναι τα «Δυναμικά» και «Στατικά» συστήματα.

5.2.1.1 Στατικά συστήματα

Τα στατικά συστήματα παραγωγής πάγου είναι ίσως η πιο παλιά τεχνική που χρησιμοποιείται. Κατ' αρχήν, ο σχηματισμός και η τήξη του πάγου λαμβάνει χώρα χωρίς οποιαδήποτε φυσική απομάκρυνση του πάγου. Ειδικότερα ένα στρώμα πάγου δημιουργείται στην επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας με συνέπεια την αύξηση της αντίστασης στη μεταφορά θερμότητας, η οποία με τη σειρά της προκαλεί την πτώση των θερμοκρασιών εξάτμισης και κατά συνέπεια τη μείωση του συντελεστή απόδοσης του ψύκτη (COP). Οι πιο κοινές τεχνικές που χρησιμοποιούνται και ανήκουν στην παραπάνω κατηγορία είναι οι εξής:

5.2.1.1.1 Ice on Coil

Ψυκτικό μέσο ή διάλυμα γλυκόλης νερού σε θερμοκρασία μεταξύ -4°C και -10°C κυκλοφορεί μέσα σε ένα ελικοειδή πηνίο, που είναι βυθισμένο σε μια μονωμένη δεξαμενή νερού, ώστε να σχηματιστεί πάγος πάνω του. Η δεξαμενή δόμησης του πάγου (σχήμα 5.17) αποτελείται από χαμηλής πίεσης αντλία αέρα για την ανάμιξη του συστήματος, προκειμένου να επιτευχθεί ομοιόμορφη κατανομή σχηματισμού και τήξης του πάγου. Το πάχος του πάγου μετρείται με έναν αισθητήρα για τον έλεγχο της λειτουργίας.

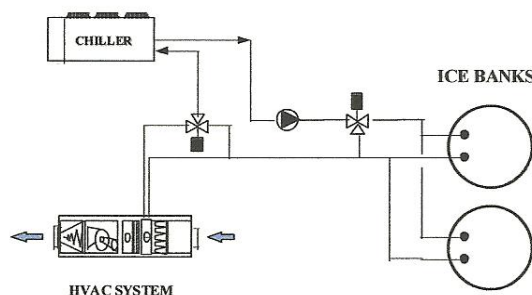


Σχήμα 5.17: Ιδέα δόμησης πάγου [13].

5.2.1.1.2 Ice Banks

Η τράπεζα πάγου (σχήμα 5.18) αποτελείται από ένα υπό πίεση σωλήνα εναλλάκτη θερμότητας από πολυαιθυλένιο στενά συσκευασμένο. Χαμηλής θερμοκρασίας διάλυμα γλυκόλης διανέμεται μέσω των σωλήνων, που παγώνει το νερό γύρω τους. Το νερό στη μονωμένη δεξαμενή είναι σχεδόν κατεψυγμένο στερεό στο τέλος του κύκλου φόρτισης. Ο έλεγχος του συστήματος μπορεί να παρασχεθεί από έναν αισθητήρα στάθμης του πάγου στη δεξαμενή. Το νερό του συστήματος κυκλοφορεί μέσα στη δεξαμενή και στις δύο τεχνικές, προκειμένου να ικανοποιήσει τη ζήτηση ψύξης. Ο κύκλος φόρτισης και αποφόρτισης μπορεί να ελεγχθεί με τα επίπεδα του νερού σε μια δεξαμενή αποθέματος που υπόκεινται σε αλλαγές επιπέδου λόγω

της διαστολής και συστολής του πάγου κατά τη διαδικασία της κατάψυξης και της τήξης αντίστοιχα, ή με διεργασία των θερμοκρασιών των υγρών.



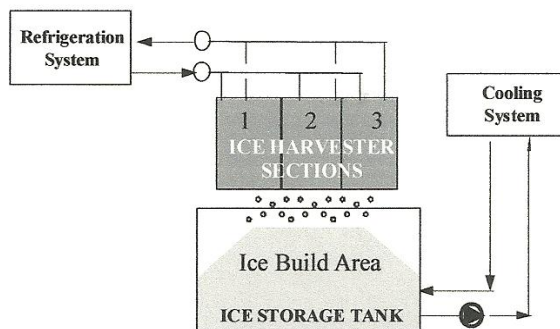
Σχήμα 5.18: Σύστημα τράπεζας πάγου με αποθήκευση σε ενσωματωμένο σε κάψουλες πάγο [13].

5.2.1.2 Δυναμικά συστήματα

Στα δυναμικά συστήματα παραγωγής πάγου, ο πάγος περιοδικά συλλέγεται από τη συσκευή κατάψυξης σε ένα δοχείο αποθήκευσης και η αποθηκευμένη ενέργεια ανακτάται με την κυκλοφορία του νερού μέσω του πάγου στο δοχείο για τον εφοδιασμό του συστήματος με παγωμένο νερό κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας. Υπάρχουν πολλά εμπορικά διαθέσιμα συστήματα στην αγορά και τα πιο κοινά συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι τα εξής:

5.2.1.2.1 Ice Harvester

Ο πάγος «χτίζεται» σε μια κάθετη επιφάνεια που είναι το τμήμα του εξατμιστή του συστήματος ψύξης. Νερό κυκλοφορεί από τη δεξαμενή αποθήκευσης, πάνω στις πλάκες μέχρι να σχηματιστεί ένα ορισμένο πάχος πάγου, κατά κανόνα στην περιοχή των 8-10 mm. Αυτή η διαδικασία ψύξης διαρκεί περίπου 20 λεπτά. Ο πάγος συλλέγεται ως εξής: μέσω παράκαμψης θερμού αερίου από το σημείο παράδοσης στις πλάκες του εξατμιστή για να ζεστάνει την επιφάνεια περίπου στους +5°C, με αποτέλεσμα το λιώσιμο και την πτώση του πάγου που έρχεται σε επαφή με τις πλάκες σε ένα φρεάτιο ή μια δεξαμενή πάγου, στην οποία το παγωμένο νερό από το σύστημα κυκλοφορεί.



Σχήμα 5.19: «Θερμική μηχανή» πάγου [13].

5.2.1.2.2 Slurry ice

Σε αυτό το σύστημα ένα διμερές διάλυμα ψύχεται κάτω από τη θερμοκρασία κατάψυξης του εντός «Falling Film», «scraper», εναλλακτών θερμότητας κενού ή υπέρψυξης. Το ψυκτικό μέσο που διανέμεται έξω από το σωλήνα υπερψύχει το διμερές διάλυμα σε εκατομμύρια λεπτά κρύσταλλα τα οποία στη συνέχεια διοχετεύονται σε μια δεξαμενή αποθήκευσης για μελλοντική χρήση, ή απ' ευθείας για να ικανοποιήσουν το επεξεργαζόμενο φορτίο. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ψύξης, θερμό διάλυμα κυκλοφορεί μέσω της δεξαμενής αποθήκευσης, όπου ψύχεται από το κρυσταλλωμένο διάλυμα και στη συνέχεια διοχετεύεται κατευθείαν για να ικανοποιήσει το κύκλωμα κλιματισμού του παγωμένου νερού. Τα χαρακτηριστικά χειρισμού του, καθώς και οι ικανότητες ψύξης του, μπορούν να συνδυαστούν για να ταιριάζουν σε κάθε εφαρμογή μέσω της προσαρμογής του ποσοστού συγκέντρωσης του πάγου. Σε συγκέντρωση πάγου $20 \pm 25\%$, υδαρής πάγος ρέει σαν συμβατικό παγωμένο νερό παρέχοντας ταυτόχρονα πέντε φορές την ικανότητα ψύξης. Σε συγκέντρωση πάγου $40 \pm 50\%$, καταδεικνύει χαρακτηριστικά παχύ υδαρούς, και σε ποσοστό $65 \pm 75\%$, ο υδαρής πάγος έχει τη συνεκτικότητα μαλακού παγωτού. Η τεχνολογία αυτή, αυτή τη στιγμή, βρίσκεται σε στάδιο ανάπτυξης.

5.2.2 Συστήματα αποθήκευσης με εύτηκτα άλατα [10,12]

Εύτηκτα άλατα είναι συνήθως ένα άλλο χρησιμοποιούμενο μέσο για την αποθήκευση ψύξης. Εύτηκτα άλατα είναι μείγματα ανόργανων αλάτων, νερού και παραγόντων πυρήνωσης και σταθεροποίησης. Όπως και στην αποθήκευση με πάγο, η ψυκτική ικανότητα ενός συστήματος εύτηκτων αλάτων εξαρτάται από την λανθάνουσα θερμότητα τήξης του αλατιού και την ποσότητα των κατεψυγμένων αλάτων. Το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο άλας λιώνει και παγώνει στους 8°C . Αυτό επιτρέπει στους συμβατικούς ψύκτες που παρέχουν θερμοκρασίες αποφόρτισης $4 \pm 6^{\circ}\text{C}$ να χρησιμοποιηθούν υπό συνθήκες παρόμοιες με ένα τυποποιημένο κλιματιστικό. Αυτά τα εύτηκτα άλατα δεν διαστέλλονται ούτε συστέλλονται σημαντικά κατά τη διάρκεια κατάψυξης ή τήξης, και επειδή είναι βαρύτερα από το νερό, δεν επιπλέουν μέσα σε μια δεξαμενή (σε αντίθεση με τα συστήματα σφαιρών πάγου) όταν τα ενσωματωμένα σε κάψουλες εύτηκτα άλατα περιβάλλονται με διάλυμα νερού ή γλυκόλης.

Από όλα τα παραπάνω συστήματα αρκετοί ερευνητές έχουν δείξει ενδιαφέρον για αποθήκευση ψύξης με ενσωματωμένο PCM σε κάψουλες. Τα κύρια πλεονεκτήματα της ενσωμάτωσης σε κάψουλες του υλικού αλλαγής φάσης είναι η παροχή μιας μεγάλης επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας και έλεγχο των αλλαγών στον όγκο των υλικών αποθήκευσης καθώς συμβαίνει η αλλαγή φάσης. Ορισμένα

αποτελέσματα που έχουν προκύψει από έρευνες είναι τα εξής: είναι δυνατή η αποθήκευση της ενέργειας της ψύξης πλήρως υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας όταν η θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού υγρού βρίσκεται κάτω από τη θερμοκρασία με πιθανότητα πυρήνωσης 100%. Επίσης αποδείχθηκε ότι η δεξαμενή αποθήκευσης είναι πιο αποτελεσματική στη χαμηλή θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού στην είσοδο και τη μεγάλη ταχύτητα ροής καθώς και ως προς τη θέση της δεξαμενής έχει δειχθεί ότι η βέλτιστη λειτουργία φόρτισης λαμβάνεται στην περίπτωση της κάθετης θέσης, όπου οι κινήσεις που οφείλονται σε φυσική συναγωγή είναι στην ίδια κατεύθυνση με την εξαναγκασμένη συναγωγή. Επομένως το ενσωματωμένο PCM σε σφαιρικές κάψουλες συσκευασμένες μέσα σε μια κάθετη κυλινδρική δεξαμενή είναι ιδιαίτερα ελκυστικό λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας της αποθήκευσης και της υψηλής απόδοσης της ογκομετρικής αποθήκευσης.

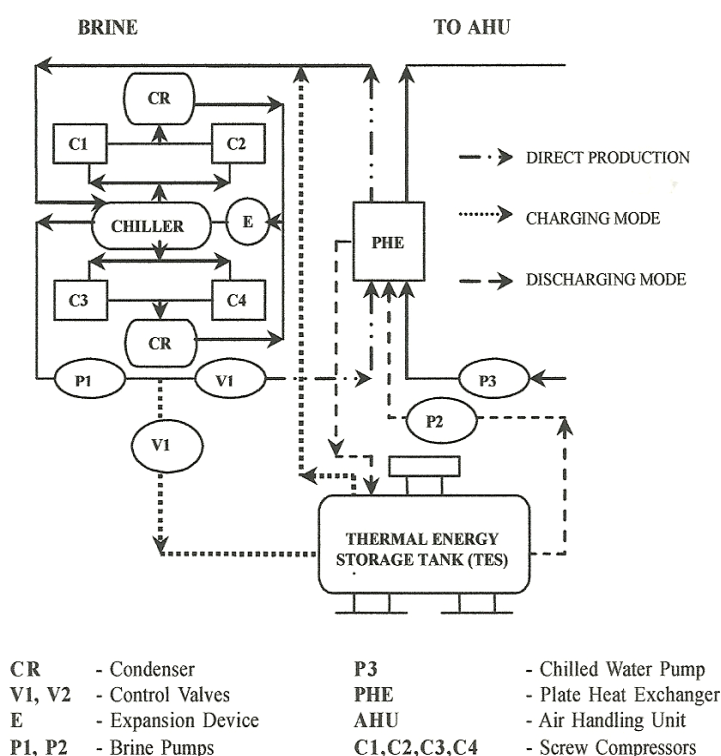
5.2.3 Εφαρμογές PCM σε συστήματα ψύξης κτιρίων

Η χρήση των υλικών αλλαγής φάσης, PCMs στα κτίρια μπορεί να παρέχει διαφορετικές λειτουργίες για διάφορες εφαρμογές [14]. Για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ελεύθερη ψύξη των κτιρίων και για τη μετατόπιση του φορτίου αιχμής του κτιρίου. Οι λειτουργίες αυτές μπορούν να επιτευχθούν παθητικά ή ενεργητικά. Εδώ, παθητικά σημαίνει ότι η χρήση των PCMs στη δομή των κτιρίων και η τήξη και κατάψυξη των PCMs πραγματοποιούνται χωρίς να χρησιμοποιείται μηχανολογικός εξοπλισμός. Ενώ ενεργητικά σημαίνει ότι η φόρτιση και αποφόρτιση της ενέργειας σε αποθήκες PCM επιτυγχάνονται με τη βοήθεια μηχανολογικού εξοπλισμού, με το οποίο μάλιστα θα ασχοληθούμε και στη συνέχεια.

5.2.3.1 Κλιματιστικά συστήματα

Velraj [15] παρουσίασε μια λεπτομερή μελέτη για ένα σύστημα ψύξης με αποθήκευση θερμικής ενέργειας βασισμένο σε PCM (CTES) ενσωματωμένο με το σύστημα κλιματισμού κτιρίου στο Tidel Park, Chennai, Ινδία. Το Tidel Park είναι ένα συγκρότημα γραφείων λογισμικού με 12 ορόφους και με μία περιοχή δαπέδου του κτιρίου περίπου 92.900 m^2 , το οποίο είναι το μεγαλύτερο στη νότια περιοχή της Ασίας και το τρίτο μεγαλύτερο στον κόσμο. Αυτή η μελέτη έχει γίνει πάνω στην υπάρχουσα μεγάλη αποθήκευση ψύξης με βάση PCM, η οποία είναι 24.000 TRH (302,4MJ), ενσωματωμένη με σύστημα ψυκτών 3000TR (10.500 kW). Η συνολική χωρητικότητα είναι χωρισμένη σε τέσσερις παράλληλες διαδρομές από τους ψύκτες Α, Β, Γ και Δ ο καθένας από τους οποίους περιλαμβάνει 750TR. Κάθε χωρητικότητα των 750TR που αντιστοιχεί σε ένα ψύκτη «τράπεζα» παρέχεται από 3 μονάδες των 250TR η καθεμιά. Μια τέτοια μονάδα 250TR φαίνεται στο σχήμα 5.20. Όλες οι «τράπεζες» ψυκτών της μονάδας κλιματισμού είναι συνδεδεμένες με τρεις πλακοειδείς

εναλλάκτες θερμότητας (PHE), με χωρητικότητα ο καθένας 2000TR. Η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος CTES είναι 24.000 TRH. Αυτή παρέχεται από τέσσερις δεξαμενές αποθήκευσης ενέργειας ψύξης, η καθεμιά με χωρητικότητα 6000TR. Από αυτές, μία δεξαμενή κρατιέται σε αναμονή και όλες οι δεξαμενές συνδέονται παράλληλα με τους τρεις εναλλάκτες θερμότητας. Ο πλακοειδής εναλλάκτης θερμότητας λαμβάνει κρύο ρευστό μεταφοράς θερμότητας (διάλυμα Άλμης) από τον ψύκτη / σύστημα CTES και μεταφέρει την ενέργεια στο νερό του ψύκτη, που με τη σειρά του τη μεταφέρει στον αέρα στη μονάδα χειρισμού του αέρα (AHU).



Σχήμα 5.20: Διάταξη του συστήματος κλιματισμού με χρήση αποθήκευσης θερμικής ενέργειας [15].

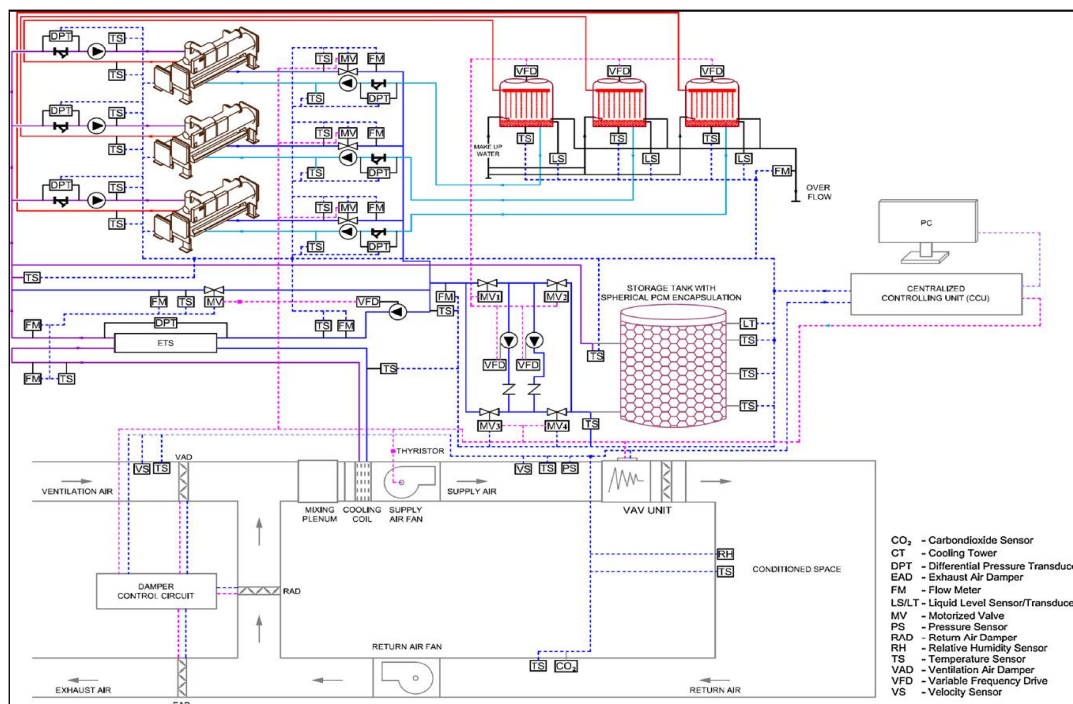
Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος αποθήκευσης ψύξης είναι ότι: (i) Η μέγιστη ζήτηση για ψυκτικό φορτίο μπορεί να μειωθεί. Στην προκειμένη περίπτωση, η χωρητικότητα 24.000 TRH του CTES μείωσε την απαίτηση εγκατάστασης του κεντρικού κλιματιστικού συστήματος για συμπίεση των αερόψυκτων ατμών από 6000 σε 3000TR. Αυτό μειώνει τη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας κατά περίπου 4000kVA. Ο διανομέας ισχύος (Tamilnadu Electricity Board, Ινδία) χρεώνει INR με 300/kVA/month και ως εκ τούτου υπάρχει εξοικονόμηση στη χρέωση της ζήτησης του INR 14,4 εκατομμύρια / έτος (4000x300x12 μήνες) λόγω αυτής της θερμικής αποθήκευσης της ψύξης. (ii) Η διαφορά στη τιμολογιακή πολιτική μεταξύ των ωρών αιχμής και εκτός αιχμής μπορεί να αξιοποιηθεί. (iii) Οι αποδόσεις

της εγκατάστασης ψυκτών είναι υψηλές, αν το σύστημα λειτουργεί κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών, όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι χαμηλή. Το σύστημα CTES μπορεί να φορτιστεί κατά τις νυχτερινές ώρες και η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να αποδοθεί κατά τη διάρκεια της ημέρας. (iv) Η εγκατάσταση ψυκτών μπορεί πάντοτε να λειτουργεί σε συνθήκες πλήρους φορτίου και επομένως η αποτελεσματικότητα του συστήματος να είναι υψηλή και (v) Η λειτουργία της ντιζελογεννήτριας μπορεί να αποφευχθεί για κάλυψη του φορτίου κλιματισμού κατά τη διάρκεια της έλλειψης ισχύος.

Parameshwaran και οι συνεργάτες του [16] ανέπτυξαν ένα νέο συνδυασμένο σύστημα κλιματισμού παγωμένου νερού με βάση τον όγκο μεταβλητού αέρα (VAV) και σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας TES που πειραματικά διερευνήθηκε για καλοκαιρινές και χειμερινές συνθήκες σχεδιασμού σύμφωνα με δύο τρόπους λειτουργίας των τεχνικών αερισμού, συγκεκριμένα, αερισμό ελεγχόμενης ζήτησης DCV και συνδυασμένος κύκλος DCV-EC αερισμού. Η συνδυασμένη επίδραση που παράγεται από το σύστημα TES και τις τεχνικές αερισμού με βάση τον VAV τόσο σε συνθήκες αιχμής όσο και σε συνθήκες μερικού φορτίου έκαναν το σύστημα VAV-TES να παρουσιάζει αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας, σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα A/C παγωμένου νερού με βάση το όγκο σταθερού αέρα CAV. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση και έλεγχο του συστήματος παγωμένου νερού A/C σε συνδυασμό με σύστημα TES για καλοκαιρινές και χειμερινές συνθήκες υπό τα συστήματα DCV και συνδυασμένο DCV-ECV είναι κατ' αρχάς ότι το σύστημα A/C VAV-TES διατήρησε πολλή ενέργεια κατά τη διάρκεια των λειτουργιών συνδυασμένου DCV-ECV, χωρίς να διακυβεύεται η θερμική άνεση και οι απαιτήσεις αερισμού. Η εφαρμογή της τεχνικής ECV έδωσε τη δυνατότητα στον αέρα του περιβάλλοντος να παραδοθεί στο κλιματιζόμενο χώρο για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις ψύξης και αερισμού σε συνθήκες μερικού φορτίου. Ο ρόλος του συστήματος TES που βασίζεται σε PCM ήταν σημαντικός από την άποψη των ικανοτήτων ψύξης που μοιράζονται με τη TES κατά τη διάρκεια των συνθηκών αιχμής που από κοινού συνέβαλαν στην επίτευξη μεγαλύτερης εξοικονόμησης ενέργειας.

Επίσης σύμφωνα με τα αποτελέσματα συνάγεται ότι, το σύστημα A/C VAV-TES που λειτούργησε χρησιμοποιώντας τις λειτουργίες DCV και DCV-ECV απέδωσε κατά 45% και 51% της κατά μέσον όρο συνδυασμένης δυνατότητας εξοικονόμησης ενέργειας σε συνθήκες μερικού φορτίου προς φορτίου αιχμής. Επιπλέον, μέσω της εφαρμογής των τεχνικών DCV και ECV, η ενέργεια που δαπανάται για την ψύξη και τον αερισμό μειώθηκε εκ τούτου, το σύστημα αυτό παρουσίασε ένα συνδυασμένο συντελεστή απόδοσης της τάξης του 3,9 και 4,3 το καλοκαίρι και το χειμώνα,

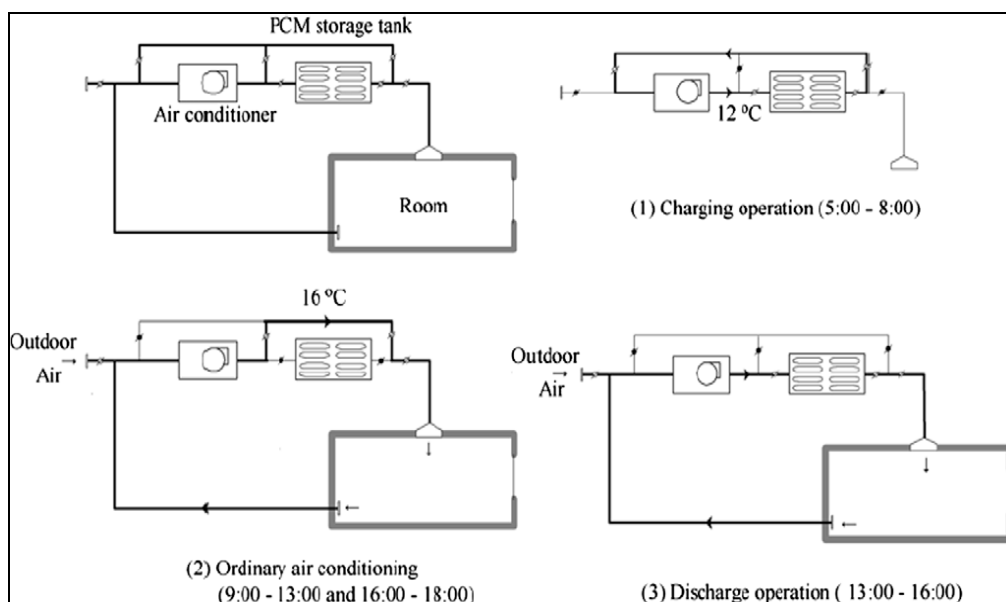
αντίστοιχα. Για διάφορα τώρα επίπεδα πληρότητας, τα αποτελέσματα δοκιμής εξήρασαν ότι το σύστημα ήταν σε θέση να αντιμετωπίσει τις απαιτήσεις αερισμού καλύτερα τις καλοκαιρινές και χειμερινές συνθήκες σχεδιασμού. Ενεργοποιώντας τον αποσβεστήρα αερισμού, αποσβεστήρα επιστροφής του αέρα και αποσβεστήρα εξαγωγής του αέρα σωστά τόσο στο πλαίσιο των λειτουργιών DCV όσο και συνδυασμένου DCV-ECV βοήθησε το σύστημα VAV-TES να παρέχει τον απαιτούμενο όγκο αερισμού στο κατειλημμένο χώρο με βάση τα επίπεδα των εκπομπών CO₂ που ανιχνεύονται στον κλιματιζόμενο χώρο. Αποδείχτηκε τέλος ότι μετά από σύγκριση της εξοικονόμησης ενέργειας του συστήματος A/C VAV-TES με εκείνη του συμβατικού συστήματος A/C με βάση το παγωμένο νερό, το πρώτο πέτυχε 28% και 47% του ανά ημέρα μέσου δυναμικού διατήρησης της ενέργειας υπό τις λειτουργίες DCV και συνδυασμένου DCV και ECV, αντίστοιχα. Ομοίως, το σύστημα VAV-TES απέδωσε μια συνολική εξοικονόμηση αιχμής ενέργειας ύψους 28%, 38% και 42%, αντίστοιχα, για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας.



Σχήμα 5.21: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος κλιματισμού VAV-TES [16].

Ένα σύστημα διανομής αέρα τώρα με PCMs σε αεραγωγούς προτάθηκε από Yamaha και Misaki [14] για εξομάλυνση των φορτίων αιχμής. Στη μελέτη τους, η αποθήκη PCM φορτίστηκε από τις 5:00 π.μ. - 8:00 π.μ.. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.22 (1), κατά τη λειτουργία φόρτισης, ο αέρας έρεε μέσα από το κλειστό κύκλωμα της δεξαμενής αποθήκευσης του PCM και του κλιματιστικού ταυτόχρονα. Όταν η

λειτουργία φόρτισης τελείωσε, η συνήθης λειτουργία κλιματισμού ξεκίνησε, στην οποία ο αέρας υποτέθηκε ότι παρέκαμψε την δεξαμενή αποθήκευσης PCM, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.22 (2). Η λειτουργία αποφόρτισης σημειώθηκε από τις 13:00 μ.μ. έως 16:00 μ.μ.. Σε αυτή τη κατάσταση λειτουργίας, ο αέρας έρεε μέσα από τη δεξαμενή PCM στο δωμάτιο, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.22 (3). Η μελέτη προσομοίωσης που βασίζεται σε ένα τμήμα ενός ορόφου ενός κτιρίου γραφείων στην Ιαπωνία έδειξε ότι η χρήση 400 kg PCM στο προτεινόμενο σύστημα για ένα δωμάτιο με επιφάνεια 73,8 m² θα μπορούσε να διατηρήσει μια σταθερή εσωτερική θερμοκρασία χωρίς τη χρήση οποιαδήποτε ψυχρής πηγής στη διάρκεια μιας ζεστής μέρας του καλοκαιριού. Θερμοκρασία τήξης κατάλληλη για το σύστημα αυτό ήταν περίπου η θερμοκρασία των 19°C, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση MT19.



Σχήμα 5.22: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος HVAC που προτείνεται από Yamaha και Misaki [14].

Εκτός από τις παραπάνω μελέτες έχουν συνταχθεί και πολλές ακόμα που αποδεικνύουν ότι η χρήση των PCMs σε κτίρια μπορεί να συμβάλει στη μετατόπιση σημαντικής ποσότητας των φορτίων των κτιρίων από τις περιόδους αιχμής σε περιόδους εκτός αιχμής. Ως εκ τούτου, σημαντικά οικονομικά οφέλη μπορούν να επιτευχθούν για τους τόπους όπου υιοθετείται ένα διαφορετικό σύστημα τιμολόγησης καθώς και μια μείωση των μεγεθών των συστημάτων HVAC είναι επίσης δυνατή.

5.2.3.2 Free cooling [15,17-20]

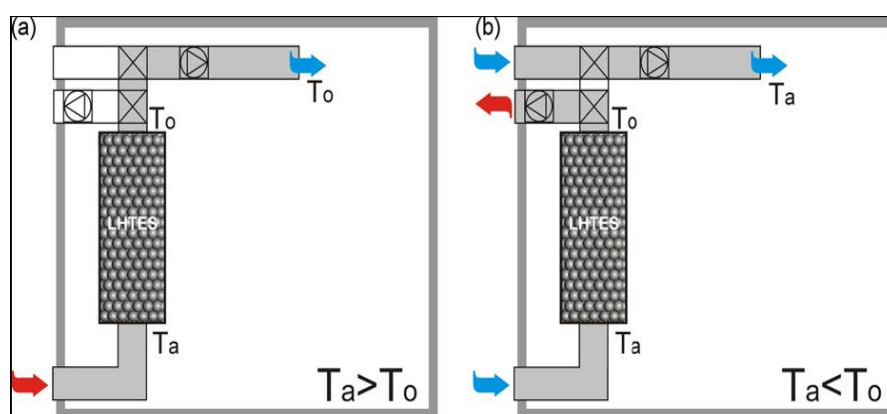
Σε κτιριακές εφαρμογές, υπάρχουν δύο προσεγγίσεις ελεύθερες ψύξης, δηλαδή, ελεύθερη ψύξη από την πλευρά του νερού και ελεύθερη ψύξη από την πλευρά του αέρα. Η από την πλευρά του νερού ελεύθερη ψύξη χρησιμοποιεί συχνά πύργους ψύξης για να κρυώσει με εξάτμιση το παγωμένο νερό απευθείας χωρίς να καταφεύγει

στη μηχανική ψύξη, ενώ η από την πλευρά του αέρα ελεύθερη ψύξη είναι η χρήση φρέσκου αέρα και / ή επανακυκλοφορούμενου αέρα εσωτερικών χώρων για να κρυώσει ένα κτίριο. Είναι κατανοητή η επιθυμία για αποθήκευση της εξωτερικής δροσιάς κατά τη διάρκεια συνθηκών χαμηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος τη νύχτα και προμήθειά της με μια χρονική καθυστέρηση για την ψύξη των χώρων κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ελεύθερη ψύξη δεν είναι πραγματικά ελεύθερη. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αντλίες νερού και ανεμιστήρες του πύργου ψύξης χρησιμοποιούνται στην από την πλευρά του νερού ελεύθερη ψύξη για την παροχή της ισχύος κυκλοφορίας και ανεμιστήρες αερισμού ή / και αγωγοί θερμότητας ή σωληνώσεις νερού (π.χ., τριχοειδείς σωλήνες) χρησιμοποιούνται στην από την πλευρά του αέρα για την παροχή ενισχυμένης μεταφοράς θερμότητας μεταξύ αέρα και αποθηκών PCM.

Η τεχνική ελεύθερης ψύξης με τη χρήση PCMs στα κτίρια μπορεί να παρέχει την καλύτερη εσωτερική θερμική άνεση και να συμβάλει στη μείωση της ανάγκης χρήσης κλιματισμού και των μεγεθών των συστημάτων κλιματισμού. Ωστόσο, η έννοια αυτή είναι εφικτή μόνο σε κλιματολογικές συνθήκες με σχετικά μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ ημέρας και νύχτας το καλοκαίρι. Αναφέρεται σε συγκεκριμένο χώρο και εξαρτάται από το κλίμα. Ελεύθερη ψύξη είναι κατάλληλη για το εσωτερικό και έρημες περιοχές. Το όφελος είναι λιγότερο σε παράκτια περιοχή, λόγω της μετρίασης της θερμοκρασίας, που γίνεται με το αεράκι της θάλασσας και του εδάφους. Ένα σύστημα ελεύθερης ψύξης απαιτεί αύξηση της μεταφοράς θερμότητας στην πλευρά του αέρα και PCM καθώς και μικρότερο χρόνο φόρτισης, το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με μεγαλύτερη περιοχή επιφάνειας ανά όγκο αποθήκευσης. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η επιλογή των PCMs παίζει σημαντικό ρόλο στην επιτυχή χρήση της τεχνικής ελεύθερης ψύξης σε κτίρια. Τα επιλεγμένα PCMs θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να εξασφαλίσουν ότι η θερμοκρασία του αέρα ψύξης είναι εντός των αποδεκτών επιπέδων άνεσης των χρηστών. Η ανθρώπινη ζώνη άνεσης το καλοκαίρι είναι μεταξύ 23°C και 27°C (ASHRAE, 2001). Για να επιτευχθεί τώρα επαρκής μεταφορά θερμότητας, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμοκρασίας του αέρα και της θερμοκρασίας τήξης του PCM θα πρέπει να είναι εντός του εύρους των 3-5°C. Αυτό σημαίνει ότι για ένα σύστημα ψύξης το καλοκαίρι, η θερμοκρασία τήξης του PCM θα πρέπει να είναι από 19°C έως 24°C.

Τα τελευταία χρόνια, αρκετά συστήματα ελεύθερης ψύξης έχουν παρουσιαστεί, στα οποία το LHTEs τοποθετείται σε διακοπτόμενη οροφή ή κάτω από το πάτωμα, ή ενσωματωμένο στο μηχανικό σύστημα αερισμού του κτιρίου ως ανεξάρτητη πλάκα ή σε αποθήκη συσκευασμένης κλίνης. Μια συνήθης εφαρμογή είναι η ελεύθερη ψύξη

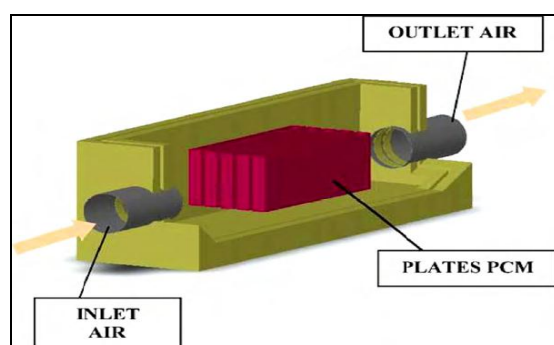
του κτιρίου να εκτελείται από ένα σύστημα μηχανικού αερισμού ενοποιημένο με LHTES και μια προηγμένη μονάδα ελέγχου, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.23. Η μονάδα ελέγχου ρυθμίζει τη λειτουργία του συστήματος αερισμού σύμφωνα με τη θερμοκρασία του αέρα στην είσοδο του LHTES (θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος, T_a) και στην έξοδο T_o . Στην περίπτωση όπου $T_a > T_o$ (κατ' αρχήν, κατά τη διάρκεια της ημέρας), το κτίριο αερίζεται μέσω του LHTES με την ταχύτητα ροής του αέρα να ορίζεται από τις απαιτήσεις IAQ. Όταν $T_a < T_o$ (ως επί το πλείστον κατά τη διάρκεια της νύχτας) το κτίριο αερίζεται άμεσα με τον αέρα του περιβάλλοντος. Στην ίδια στιγμή το LHTES συσσωρεύει την ψύχρα του αέρα περιβάλλοντος χρησιμοποιώντας ξεχωριστή κυκλοφορία του αέρα του περιβάλλοντος, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.23 (b). Για να επισπευσθεί η συσσώρευση ψύξης η ταχύτητα ροής αέρα μέσω του LHTES θα πρέπει να αυξηθεί. Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι η αποδοτικότητα του LHTES σημαντικά βελτιώνεται, εάν η ταχύτητα του αέρα αυξάνεται στο τριπλάσιο της τιμής της ημερήσιας ταχύτητας του αέρα.



Σχήμα 5.23: Διάρθρωση του συστήματος ελεύθερης ψύξης: (a) ροή του αέρα όταν $T_a > T_o$ (κατά την ημέρα) (b) ροή του αέρα όταν $T_a < T_o$ (κατά τη νύχτα) [18].

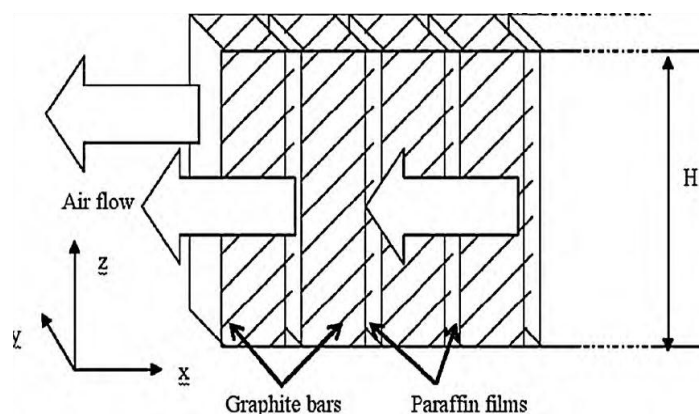
Πρώτη μελέτη σκοπιμότητας ενός συστήματος ελεύθερης ψύξης έγινε από Zalba. Στην εργασία αυτή, μια πειραματική εγκατάσταση επίπεδης πλάκας ενσωματωμένου σε κάψουλες PCM όπως φαίνεται στο σχήμα 5.24 χρησιμοποιήθηκε, για PCM με θερμοκρασία τήξης περίπου 20-25°C. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της επίπεδης πλάκας του ενσωματωμένου PCM είναι ότι (i) η διαδικασία τήξης και κατάψυξης του PCM σε μια επιφάνεια της πλάκας είναι συμμετρική, (ii) η μεταφορά θερμότητας στο PCM μπορεί να ελεγχθεί με το επιλεγμένο πάχος της ενσωμάτωσης και (iii) υψηλός λόγος εμβαδού προς όγκο αποθήκευσης επιτυγχάνεται. Οι θερμοκρασίες του αέρα κατά την τήξη (αποφόρτιση) του PCM που μελετήθηκαν ήταν 28 και 30°C. Οι θερμοκρασίες του αέρα που επιλέγονται κατά την ψύξη (φόρτιση) του PCM ήταν 16 και 18°C. Προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη μεταφορά θερμότητας, η ταχύτητα

ροής του αέρα επιλέχθηκε ώστε ο αριθμός Biot να είναι κοντά στη μονάδα. Η διαδικασία στερεοποίησης ήταν ταχύτερη (i) όταν το πάχος του ενσωμάτωσης ήταν χαμηλότερο (ii) η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του αέρα και της θερμοκρασίας τήξεως του PCM ήταν υψηλότερη και (iii) η ταχύτητα του αέρα ήταν υψηλότερη. Ο χρόνος στερεοποίησης είναι μικρότερος και ο χρόνος τήξης είναι περισσότερος λόγω της ελεύθερης συναγωγής στην υγρή φάση.



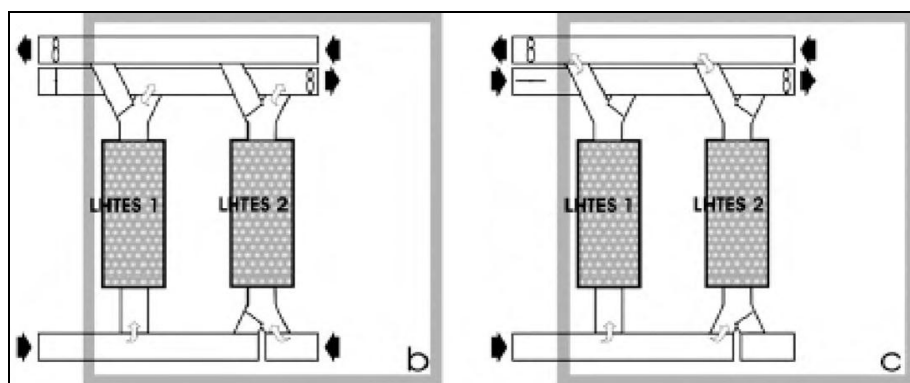
Σχήμα 5.24: Εναλλάκτης θερμότητας που δημιουργήθηκε από Belen Zalba [17].

Marin έκαναν βελτίωση στο πείραμα του Belen Zalba συμπεριλαμβάνοντας γραφίτη και δημιουργώντας ένα σύνθετο υλικό με παραφίνη ως PCM για ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας στο PCM. Λόγω της προσθήκης γραφίτη η θερμική αγωγιμότητα είναι αυξημένη στο PCM χωρίς μεγάλη μείωση της αποθήκευσης ενέργειας. Άλλα πλεονεκτήματα της προσθήκης γραφίτη είναι η μείωση της υπόψυξης των ένυδρων αλάτων και η μείωση της αλλαγής του όγκου στη παραφίνη. Αυτές οι πλάκες περιέχουν εναλλάξ το PCM και το σύνθετο με το PCM ενσωματωμένο στη μήτρα γραφίτη. Διαπιστώθηκε μια μεγάλη μείωση του χρόνου, περίπου στο μισό στην περίπτωση της χρήσης της μήτρας γραφίτη, σε σύγκριση με μόνο το PCM, που συνοδεύεται όμως και με μια μείωση της ενέργειας που αποθηκεύεται μεταξύ 12% και 20%, με βάση τον όγκο αποθήκευσης που καταλαμβάνεται από το γραφίτη.



Σχήμα 5.25: Διάταξη PCM-γραφίτη από Marin και της ομάδας της [17].

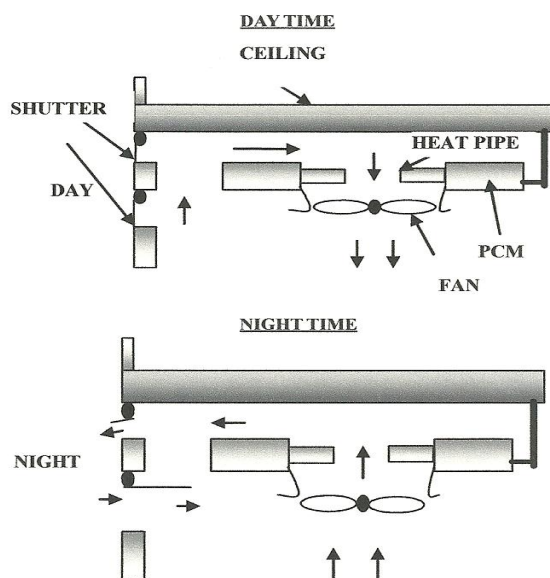
Arkar και Medved μελέτησαν την επίδραση των στοιχείων των θερμικών ιδιοτήτων του υλικού αλλαγής φάσης στο αποτέλεσμα του αριθμητικού μοντέλου που αναπτύχθηκε για ένα συσκευασμένο σύστημα αποθήκευσης τύπου «κρεβατιού» που χρησιμοποιήθηκε για ελεύθερη ψύξη. Ένα αριθμητικό μοντέλο συσκευασμένου κρεβατιού τροποποιήθηκε ώστε να ληφθεί υπόψη η μη ομοιομορφία του πορώδους του PCM και της ταχύτητας του υγρού, η οποία οφείλεται στο μικρό λόγο διαμέτρου σωλήνα προς σφαίρας. Στη μελέτη αυτή, το LHTES είναι γεμάτο με σφαίρες με ενσωματωμένα PCM. Ο λόγος από την άποψη της αποθήκευσης, L / D , ανέρχεται σε 1,5 με μια μικρή πτώση πίεσης και ως εκ τούτου ένα χαμηλό ηλεκτρικό ρεύμα των ανεμιστήρων. Δύο LHTESs χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το σύστημα (σχήμα 5.26), ένα που λειτουργεί με τον ατμοσφαιρικό αέρα και το άλλο με ανακυκλωμένο αέρα. Ειδικότερα φρέσκος αέρας περνά μέσα από το πρώτο LHTES και ψύχεται πριν τροφοδοτηθεί στα δωμάτια στην περίπτωση κατά την οποία η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από το LHTES είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Σε αντίθετη περίπτωση, ο καθαρός αέρας λαμβάνεται απευθείας από το περιβάλλον. Το δεύτερο LHTES δροσίζει το ανακυκλούμενο αέρα από το εσωτερικό. Η εκ νέου κυκλοφορία αρχίζει 1 ώρα πριν από το μεσημέρι και διαρκεί για τις επόμενες 12 ώρες, ή λιγότερο αν το PCM λιώνει πλήρως. Έτσι η συνολική απόδοση της ελεύθερης ψύξης χρησιμοποιώντας αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας ενσωματωμένη στο σύστημα ενός κτιρίου χαμηλής ενέργειας είναι αυξημένη.



Σχήμα 5.26: Κατάσταση λειτουργίας ελεύθερης ψύξης κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας όπως προτάθηκε από Arkar και Medved [17].

Το Πανεπιστήμιο του Nottingham προσπάθησε να αντικαταστήσει ένα πλήρες κλιματιστικό σύστημα με το νέο σύστημα το οποίο είναι ένα νυχτερινό σύστημα ψύξης, που είναι εύκολο να τοποθετηθεί και εκ των υστέρων. Η προτεινόμενη μονάδα (σχήμα 5.27) είναι μια οροφή από την οποία αναρτάται ένας ανεμιστήρας για την παροχή αέρα πάνω από τα εκτεθειμένα τελειώματα των σωλήνων θερμότητας. Το άλλο άκρο

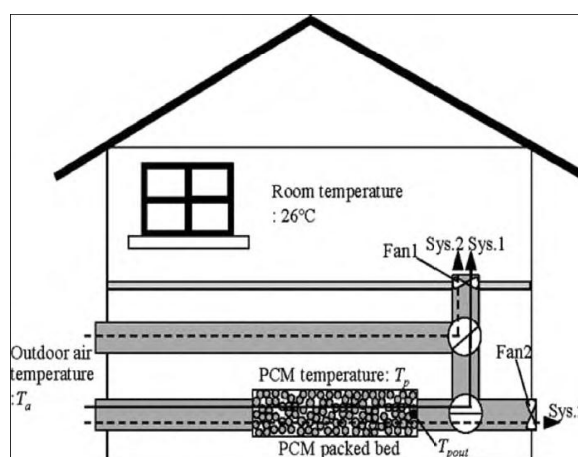
των σωλήνων θερμότητας είναι σε μία μονάδα αποθήκευσης PCM. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, ο ζεστός αέρας που παράγεται στο δωμάτιο ψύχεται από το PCM, δηλαδή θερμότητα μεταφέρεται στο PCM. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, ο ανεμιστήρας αντιστρέφεται και τα παραθυρόφυλλα ανοίγουν έτσι ώστε δροσερός αέρας από έξω να περνάει πάνω από τους σωλήνες θερμότητας και να αφαιρεί τη θερμότητα από το PCM. Ο κύκλος αυτός έπειτα επαναλαμβάνεται την επόμενη μέρα. Οι θερμοκρασίες τήξης και ψύξης του PCM είναι περίπου 22 και 20°C, αντίστοιχα. Πλήρης τήξη συμβαίνει σε μια περίοδο περίπου 8h, όταν η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του PCM και του αέρα είναι στους 2°C και σε μια περίοδο περίπου 3h όταν η ίδια διαφορά είναι γύρω στους 3,5°C. Οι ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας είναι 80 και 200 W /μονάδα, αντίστοιχα ή 800 και 2000W για ένα δωμάτιο με 10 μονάδες.



Σχήμα 5.27: Σχεδιασμός του συστήματος όπως προτάθηκε από το Πανεπιστήμιο του Nottingham [15].

Takeda ανέπτυξε ένα σύστημα αερισμού αξιοποιώντας την αποθήκευση θερμικής ενέργειας με χρήση κόκκων υλικού αλλαγής φάσης. Στο έργο αυτό ένα πειραματικό σύστημα αερισμού, που φαίνεται στο σχήμα 5.28, που διασφαλίζει την άμεση ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ αέρα αερισμού και κόκκων που περιέχουν υλικό αλλαγής φάσης (PCM) κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε. Θερμοκρασία εξόδου του αέρα μετριέται όταν η θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής ποικίλε περιοδικά για να εξομοιώσει τις αλλαγές της εξωτερικής θερμοκρασίας του αέρα του περιβάλλοντος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμοκρασία εξόδου του αέρα σταθεροποιήθηκε και παρέμεινε εντός του εύρους θερμοκρασιών αλλαγής φάσης. Συσκευασμένα σε κόκκους PCM διατηρούνται σε ένα ορθογώνιο αγωγό παράλληλης σωλήνωσης φτιαγμένο από θερμομονωτικές πλάκες πάχους 100 mm. Ο αγωγός έχει εγκατασταθεί

κάθετα και κόκκοι PCM συσκευάζονται στο κέντρο του αγωγού. Κόκκοι που φτιάχνονται από RUBITHERM GmbH χρησιμοποιούνται ως κόκκοι PCM στο πείραμα. Οι κόκκοι έχουν διάμετρο σωματιδίου από 1-3 mm και αποτελούνται από κεραμικά υλικά σε ποσοστό 65% και υδρογονάνθρακες παραφίνης σε ποσοστό 35% κ.β. Το συσκευασμένο κρεβάτι έχει υψηλή χωρητικότητα για τη σταθεροποίηση των ημερήσιων διακυμάνσεων της εξωτερικής θερμοκρασίας του αέρα.

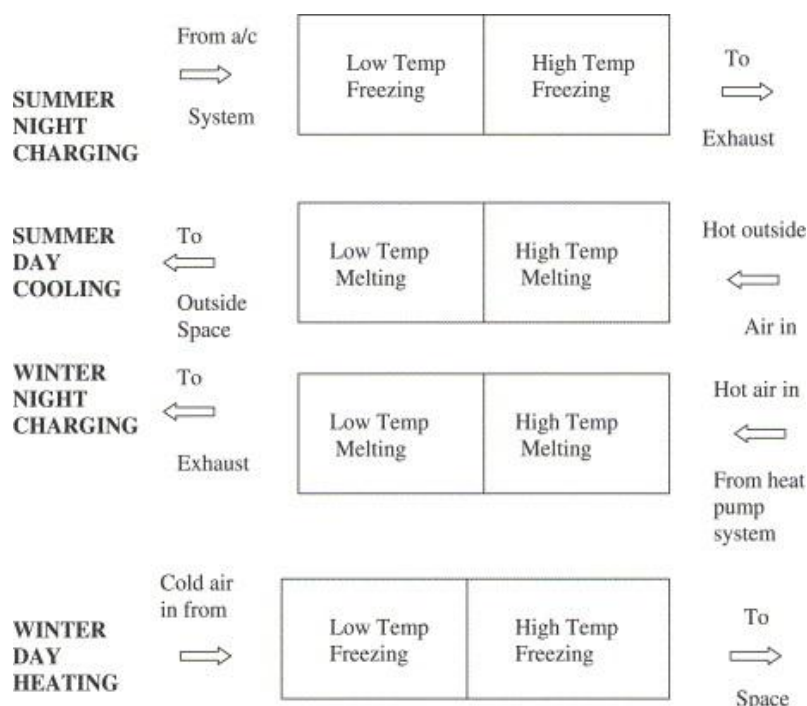


Σχήμα 5.28: Γενικής σύλληψης σύστημα που προτάθηκε από Takeda [17].

5.3 PCM ενσωματωμένο σε συνδυασμένο σύστημα ψύξης και θέρμανσης [15]

Το Κέντρο Ανανεώσιμης Ενέργειας (SEC) στο UniSA άρχισε τις εργασίες με PCMs στα μέσα της δεκαετίας του 1990 με την ανάπτυξη μιας μονάδας αποθήκευσης, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για τη θέρμανση όσο και για την ψύξη χώρων. Η διαδικασία της φόρτισης κατά τη διάρκεια της νύχτας και της χρησιμοποίησής της κατά τη διάρκεια της ημέρας σε περιόδους θέρμανσης και ψύξης για ένα σύστημα αποθήκευσης που αποτελείται από δύο διαφορετικά PCMs ενσωματωμένα σε ένα σύστημα ψυκτικών αντλιών θερμότητας αντίστροφου κύκλου που χρησιμοποιεί εκτός αιχμής ηλεκτρική ενέργεια είναι η ακόλουθη. Καθώς ο αέρας διοχετεύεται μέσω του συστήματος, υποβάλλεται σε μία διαδικασία δύο σταδίων θέρμανσης και ψύξης. Πηγαίνει πρώτα μέσω του ενός PCM και στη συνέχεια μέσω του δεύτερου, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.29. Το σημείο τήξης / ψύξης του πρώτου υλικού είναι κάτω από τη θερμοκρασία θερμικής άνεσης, ενώ το δεύτερο υλικό έχει σημείο τήξης / ψύξης πάνω από τη θερμοκρασία θερμικής άνεσης. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η ροή του αέρα ρυθμίζεται έτσι ώστε το σύστημα θέρμανσης να αποθηκεύει θερμότητα τη νύχτα (με την τήξη και των δύο υλικών), και να απελευθερώνει τη θερμότητα σε θερμοκρασία υψηλότερη από τις συνθήκες θερμικής άνεσης (μέσω της πήξης) κατά τη διάρκεια της ημέρας. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, η κατεύθυνση ροής του

αέρα αντιστρέφεται και το σύστημα αποθηκεύει ψυκτική ενέργεια τη νύχτα και απελευθερώνει το δροσερό αέρα κάτω από τη θερμοκρασία θερμικής άνεσης στη διάρκεια της ημέρας.



Σχήμα 5.29: Διαδικασίες νυχτερινής φόρτισης και ημερήσιας αξιοποίησης κατά τη διάρκεια των περιόδων τόσο θέρμανσης όσο και ψύξης [15].

Το ποσό της μείωσης της απαιτούμενης ικανότητας του κλιματιστικού και το ποσό των θερμικών και των ψυκτικών φορτίων που μεταφέρεται εκτός των ωρών αιχμής αναφέρθηκαν χρησιμοποιώντας μοντέλο του υπολογιστή για το αποθηκευτικό σύστημα. Επίσης αναφέρθηκε και η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας. Χρησιμοποιώντας ένα θερμικό σύστημα αποθήκευσης που περιέχει δύο διαφορετικά PCMs μπορεί κάποιος να μειώσει την απαιτούμενη ικανότητα και το αρχικό κόστος του κλιματιστικού για ένα κατοικήσιμο σπίτι. Επίσης, μπορεί να στρέψει ένα μέρος των θερμικών και ψυκτικών φορτίων εκτός των ωρών αιχμής, όπου το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλότερο. Οι υπολογισμοί για ένα τυπικό σπίτι στην Αδελαΐδα έδειξαν ότι ένα σύστημα αποθήκευσης που αποτελείται από 100 kg PCM 29°C και 80 kg από PCM 18°C μείωσε το ονομαστικό ποσοστό του απαιτούμενου κλιματιστικού στο 50% του συνολικού φορτίου. Επίσης, το ετήσιο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας μειώθηκε κατά 32%, λόγω της μετατόπισης του φορτίου σε περίοδο εκτός αιχμής. Η εταιρεία κοινής ωφέλειας θα μπορούσε να επωφεληθεί από την μετατόπιση του 52% και 41% των φορτίων κλιματισμού κατά τη διάρκεια των

ψυχρών και θερμών περιόδων με τις μειωμένες χωρητικότητες παραγωγής και μετάδοσης αν το προτεινόμενο σύστημα αποθήκευσης χρησιμοποιείται σε μεγάλη κλίμακα.

Βιβλιογραφία 5^{ου} Κεφαλαίου

[1] Anant Shukla, D. Buddhi, R.L. Sawhney: Solar water heaters with phase change material thermal energy storage medium: A review

[2] Søren Knudsen, Mike Dennis: Thermal Storage for Small Solar Heating Systems, State of the Art Report

<http://www.scribd.com/doc/34650181/water-based-Thermal-Storage>

[3] <http://www.thermalenergystorage.in/solarwaterheater.html>

[4] Y. RABIN, I. BAR-NIV, E. KORIN and B. MIKIC: Integrated solar collector storage system based on a salt-hydrate phase-change material

[5] Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi: Review on thermal energy storage with phase change materials and applications

[6] S.O. Enibe: Performance of a natural circulation solar air heating system with phase change material energy storage

[7] Mahmud M. Alkilani, K. Sopian, M.A. Alghoul, M. Sohif, M.H. Ruslan: Review of solar air collectors with thermal storage units

[8] M. Belusko, W. Saman, F. Bruno: Roof integrated solar heating system with glazed collector

[9] W. Saman, F. Bruno, E. Halawa: Thermal performance of PCM thermal storage unit for a roof integrated solar heating system

[10] M. Cheralathan, R. Velraj and S. Renganarayanan: Performance analysis on industrial refrigeration system integrated with encapsulated PCM-based cool thermal energy storage system

[11] S. L. Chen and J. S. Yue: Thermal performance of cool storage in packed capsules for air conditioning

[12] S. M. Hasnain: Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part II: cool thermal storage

[13] http://www.pcmproducts.net/files/design_manual.pdf

Plus-ICE™ Phase Change Materials (PCM) Thermal Energy Storage (TES) DESIGN GUIDE

[14] Na Zhu, Zhenjun Ma, Shengwei Wang: Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review

- [15] A. Pasupathy, R. Velraj, R.V. Seeniraj: Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments
- [16] R. Parameshwaran, S. Harikrishnan, S. Kalaiselvam: Energy efficient PCM-based variable air volume air conditioning system for modern buildings
- [17] V. Antony Aroul Raj, R. Velraj: Review on free cooling of buildings using phase change materials
- [18] Sašo Medved, Ciril Arkar: Correlation between the local climate and the free-cooling potential of latent heat storage
- [19] U. Stritih, V. Butala: Experimental investigation of energy saving in buildings with PCM cold storage
- [20] C. Arkar, B. Vidrih, S. Medved: Efficiency of free cooling using latent heat storage integrated into the ventilation system of a low energy building

II. Θεωρητική Προσομοίωση

Κεφάλαιο 6^ο: Περιγραφή της διάταξης, του τρόπου υπολογισμού διαφόρων μεγεθών και σύνταξη του μαθηματικού μοντέλου

6.1 Γενική περιγραφή της μελέτης

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η εξέταση της συμπεριφοράς στρώματος ενσωματωμένου σε κάψουλες PCM και της συμβολής του στη διατήρηση της θερμοκρασίας του δωματίου στα επιθυμητά επίπεδα άνεσης. Γίνεται ακόμα επισήμανση των πλεονεκτημάτων που υπάρχουν σε σχέση με το αν χρησιμοποιούνταν μπετόν αντί για PCM καθώς και καταβάλλεται προσπάθεια να βρεθεί PCM που να αξιοποιείται όσο το δυνατόν περισσότερο η ικανότητά του να αποθηκεύει θερμότητα αλλάζοντας φάση.

Θεωρούμε λοιπόν γι' αυτό το λόγο δωμάτιο στην περιοχή της Αθήνας με διαστάσεις μήκος x πλάτος x ύψος = (4m)x(3m)x(2,5m) και υαλοπίνακα απέναντι από τον εσωτερικό τοίχο νότιου προσανατολισμού του δωματίου με διαστάσεις πλάτος x ύψος = (1,5m)x(2m). Όσον αφορά τώρα τον τοίχο με την εσωτερική επιφάνεια νότιου προσανατολισμού είναι αυτός που περιέχει το στρώμα PCM. Ως πρώτο στρώμα του τοίχου έχει ληφθεί γυψοσανίδα πάχους 10mm, η οποία συμβάλλει στη συγκράτηση του στρώματος των καψουλών PCM. Αμέσως μετά το στρώμα του PCM έχει θεωρηθεί στρώμα μόνωσης πάχους 30mm, στη συνέχεια τούβλου 60mm και τέλος σοβά 10mm. Παρατηρούμε ότι το πάχος του στρώματος PCM δεν είναι εκ των προτέρων καθορισμένο αλλά θα πάρει διάφορες τιμές κατά τη διάρκεια της μελέτης αν και οι περισσότερες δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα και δίνονται αποκλειστικά για λόγους μελέτης καθώς το κόστος μεγαλώνει πολύ όσο αυξάνεται το πάχος.

Επομένως η διαστρωμάτωση του τοίχου νότιου προσανατολισμού του δωματίου διαμορφώνεται ως εξής:

- Γυψοσανίδα 10mm
- PCM ή Μπετόν μεταβλητού πάχους
- Μόνωση 30mm
- Τούβλο 60mm
- Σοβάς 10mm

6.2 Υπολογισμός προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας [1]

Όπως προαναφέρθηκε απέναντι από τον τοίχο με νότιο προσανατολισμό του δωματίου βρίσκεται υαλοπίνακας διαμέσου του οποίου περνά η ηλιακή ακτινοβολία. Η ακτινοβολία που τελικά προσπίπτει στον τοίχο ισούται με το 85% της υπολογισθείσας καθώς ένα ποσοστό της τάξης του 10% αποκόπτεται λόγω του υαλοπίνακα και περίπου ένα 5% απορροφάται απευθείας από τον αέρα στο εσωτερικό του δωματίου.

Ηλιακή ακτινοβολία υπάρχει μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας δηλαδή πριν την ανατολή του ήλιου και μετά τη δύση θα λαμβάνεται ίση με μηδέν. Έτσι λοιπόν κρίνεται αναγκαίος ο υπολογισμός της ώρας δύσης και ανατολής αντίστοιχα, ο οποίος θα πραγματοποιηθεί σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\text{ώρα δύσης} = 12 + N/2 \quad (6.1)$$

$$\text{ώρα ανατολής} = 12 - N/2 \quad (6.2)$$

όπου

- N είναι η διάρκεια της ημέρας σε hrs η οποία βρίσκεται με βάση την παρακάτω

$$\text{σχέση: } N = \frac{2}{15} \cdot \arccos(-\tan\varphi \cdot \tan\delta) \quad (6.3)$$

Το μέγεθος φ είναι το γεωγραφικό πλάτος, το οποίο ισούται με $37,97^\circ$ για την περιοχή της Αθήνας ενώ το δ είναι η ηλιακή απόκλιση, η οποία για την εκάστοτε μέρα του έτους υπολογίζεται με $n=1 \div 365$ από τον τύπο:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right) \quad (6.4)$$

Ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας θα γίνει μόνο για χειμερινούς μήνες καθώς η μελέτη μας αφορά θέρμανση χώρου. Ως χειμερινοί θεωρούνται οι μήνες μεταξύ του Νοεμβρίου και του Μαρτίου. Έτσι λοιπόν η εύρεση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου για κάθε ώρα μιας τυχαίας μέρας ενός μήνα θα γίνει με βάση την παρακάτω σχέση:

$$G_T = G_b \cdot R_b + G_d \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + (G_b + G_d) \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad (6.5)$$

όπου

- G_b, G_d είναι η στιγμιαία άμεση και διάχυτη αντίστοιχα ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου που υπολογίζονται για την περιοχή της Αθήνας από τους παρακάτω τύπους για κάθε ώρα $t=7 \div 18$ της ζητούμενης ημέρας του αντίστοιχου μήνα

$$G_b = M_t + A_t \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot D - P_t\right) \quad (6.6)$$

$$G_d = m_t + a_t \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot D - p_t\right) \quad (6.7)$$

Το μέγεθος D είναι ο αύξων αριθμός της ημέρας του έτους, για την οποία ζητείται να υπολογισθεί η ηλιακή ακτινοβολία δηλαδή $D=1 \div 365$ και οι συντελεστές M_t , m_t , A_t , a_t , P_t και p_t δίνονται για κάθε ώρα t στον ακόλουθο πίνακα

t [hrs]	M_t	A_t	P_t	m_t	a_t	p_t
07.00	0,007	0,046	86,18	0,048	0,111	81,23
08.00	0,057	0,068	87,31	0,134	0,127	82,45
09.00	0,119	0,104	87,94	0,208	0,133	83,94
10.00	0,191	0,129	88,31	0,261	0,129	85,6
11.00	0,258	0,153	89,35	0,283	0,117	86,05
12.00	0,319	-0,181	-88,88	0,271	0,095	82,71
13.00	0,342	-0,194	-89,18	0,243	0,081	81,95
14.00	0,325	0,183	87,21	0,21	0,083	87,23
15.00	0,269	0,166	86,22	0,176	0,087	89,53
16.00	0,183	0,147	82,1	0,141	-0,085	-88,19
17.00	0,078	0,131	79,85	0,104	-0,079	-88,97
18.00	-0,025	0,114	77,36	0,051	0,091	86,79

Πίνακας 6.1: Συντελεστές των σχέσεων (6.6) και (6.7) για κάθε ώρα $t=7 \div 18$

- β είναι η γωνία κλίσης του κεκλιμένου επιπέδου στο οποίο προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία ως προς το οριζόντιο επίπεδο, η οποία ισούται με 90° καθώς έχουμε κατακόρυφη επιφάνεια – τοίχο
- ρ είναι η ανακλαστικότητα του εδάφους με τιμή ίση με 0,2 για συνηθισμένο έδαφος
- R_b είναι ο λόγος της άμεσου ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεσο οριζοντίου επιπέδου

$$R_b = \frac{G_{bT}}{G_b} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad (6.8)$$

με

$$\cos\theta = \sin\delta \cdot \sin\varphi \cdot \cos\beta - \sin\delta \cdot \cos\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\beta \cdot \sin\omega \quad (6.9)$$

$$\cos\theta_z = \sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega \quad (6.10)$$

Ο παραπάνω όμως λόγος για κεκλιμένες επιφάνειες που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο με νότιο προσανατολισμό όπως ο τοίχος που μελετάμε απλοποιείται στην ακόλουθη μορφή

$$R_b = \frac{\sin\delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + \cos\delta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos\omega}{\sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega} \quad (6.11)$$

Το μέγεθος ω παριστά την ωριαία γωνία η οποία βρίσκεται από τη σχέση:
 $\omega = 0,25x(\text{min από το ηλιακό μεσημέρι})$ (6.12)

και η οποία λαμβάνεται $\omega > 0$ για μ.μ. και $\omega < 0$ για π.μ.. Τα υπόλοιπα μεγέθη τώρα έχουν προσδιοριστεί αναλυτικά προηγουμένως.

6.3 Ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα PCM

Οι παραδοχές που έχουν γίνει για τη διευκόλυνση της μελέτης του στρώματος PCM είναι οι ακόλουθες

- Αδιαβατικό όριο μεταξύ του στρώματος της μόνωσης και του PCM, το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι δεν υπάρχει συναλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον.
- Ομοιόμορφη και ενιαία θερμοκρασία του στρώματος του PCM κάθε χρονική στιγμή δηλαδή η θερμοκρασία του στρώματος του PCM δεν μεταβάλλεται κατά την κατεύθυνση του πάχους του στρώματος του PCM αλλά αποτελεί συνάρτηση μόνο του χρόνου t .
- Σταθερή θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του δωματίου γεγονός που μπορεί να επιτυγχάνεται και με τη βοήθεια ενεργητικών συστημάτων κλιματισμού.

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω η μεταβολή της θερμοκρασίας του στρώματος του PCM με το χρόνο εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στον τοίχο κατά τη διάρκεια της ημέρας, τη συναλλαγή θερμότητας με συναγωγή με τον αέρα στο εσωτερικό του δωματίου καθώς και από τη μάζα και τη θερμοχωρητικότητα του ίδιου του PCM.

Επομένως ο ισολογισμός ενέργειας στο στρώμα του PCM διαμορφώνεται ως φαίνεται ακολούθως

$$Q_{\text{απορροφούμενη}} = Q_{\text{ακτινοβολίας}} + Q_{\text{συναγωγής}} \Rightarrow$$

$$m \cdot c_p \cdot (T_{\text{PCM}} - T_{\text{PCM}}^{\circ}) = 3600 \cdot 85\% \cdot G_T \cdot A_g - 3600 \cdot U \cdot A_w \cdot (T_{\text{PCM}}^{\circ} - T_{\text{in}}) \quad (6.13)$$

όπου

- T_{PCM}° είναι η θερμοκρασία του στρώματος του PCM την προηγούμενη χρονική στιγμή έστω t από αυτήν που θέλουμε να υπολογίσουμε, η οποία μάλιστα

επειδή στην αρχή των επαναλήψεων δεν είναι γνωστή θα θεωρηθεί μια τυχαία τιμή για μια τυχαία ώρα της μέρας. Στη συνέχεια θα αποδειχθεί ότι η αρχική αυτή υποθεθείσα τιμή της θερμοκρασίας δεν επηρεάζει σε καμιά περίπτωση το τελικό αποτέλεσμα.

- T_{PCM} είναι η θερμοκρασία του PCM την επόμενη χρονική στιγμή $t+\Delta t$
- A_w είναι η επιφάνεια του τοίχου νότιου προσανατολισμού η οποία προκύπτει ίση με: $A_w = (\text{πλάτος τοίχου}) \times (\text{ύψος τοίχου}) = (3\text{m}) \times (2,5\text{m})$
- A_g είναι η επιφάνεια του υαλοπίνακα που βρίσκεται απέναντι από τον τοίχο και η οποία ισούται με: $A_g = (\text{πλάτος υαλοπίνακα}) \times (\text{ύψος υαλοπίνακα}) = (1,5\text{m}) \times (2\text{m})$
- T_{in} είναι η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του δωματίου
- U είναι η ειδική θερμική διαπερατότητα, η οποία μπορεί να βρεθεί με βάση

$$\text{την εξής σχέση: } \frac{1}{U} = \frac{1}{h_{in}} + \left(\frac{l}{k} \right)_{\text{γυψ}} \quad (6.14)$$

Ο όρος $\frac{1}{h_{in}}$ παριστά τη θερμική αντίσταση συναγωγής, με h_{in} να είναι ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ του τοίχου και του εσωτερικού του δωματίου ο οποίος σύμφωνα με την ASHRAE ισούται με $h_{in} = 8 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Όσον αφορά το δεύτερο όρο $\left(\frac{l}{k} \right)_{\text{γυψ}}$ αυτός παριστά τη θερμική αντίσταση αγωγής

διαμέσου της γυψοσανίδας που υπάρχει πριν το στρώμα του PCM και η οποία έχει πάχος $l=10\text{mm}$ και θερμική αγωγιμότητα $k = 0,16 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

- m είναι η μάζα του διατιθέμενου PCM, η οποία μπορεί να προσεγγισθεί με μεγάλη ακρίβεια από τον ακόλουθο τύπο:

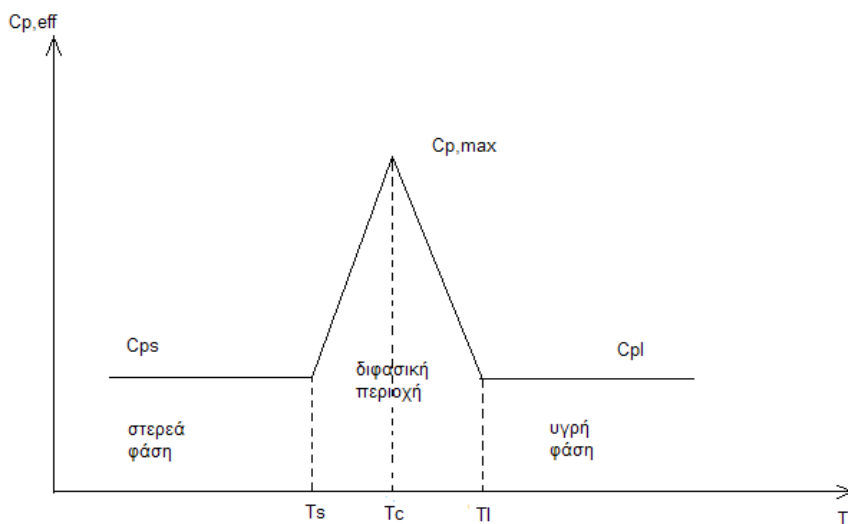
$$m = \rho \cdot V \quad (6.15)$$

Η πυκνότητα ρ του PCM διαφοροποιείται με την αλλαγή του υλικού αλλαγής φάσης αλλά θεωρούμε ότι παραμένει σταθερή και ανεξάρτητη της θερμοκρασίας, η μεταβολή της οποίας για ένα PCM πραγματοποιείται εντός στενών και προκαθορισμένων ορίων. Όσον αφορά τώρα τον όγκο του PCM, αυτός μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$V = (\text{πλάτος τοίχου}) \times (\text{ύψος τοίχου}) \times (\text{πάχος στρώματος PCM}) \quad (6.16)$$

- $c_{p,eff}$ είναι η ενεργός θερμοχωρητικότητα του PCM [2], η τιμή της οποίας εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία του PCM. Τα δεδομένα που απαιτούνται για την εύρεση της συνάρτησης c_p ως προς T είναι η θερμότητα αλλαγής φάσης H , οι θερμοκρασίες του PCM στα σημεία που τελειώνει η διφασική περιοχή T_s και T_l καθώς και οι θερμοχωρητικότητες στερεάς και

υγρής φάσης c_{ps} και c_{pl} αντίστοιχα. Έτσι λοιπόν η συνάρτηση $c_{p,eff}(T)$ τριγωνικής μορφής, που είναι η μορφή που κυρίως προτιμάται καθώς θεωρείται η πιο ακριβής παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα και περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις



Σχήμα 6.1: Καμπύλη της ενεργούς θερμοχωρητικότητας c_p συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM, T , [2].

Θέτουμε ως $T_c = \frac{T_s + T_l}{2}$, η οποία είναι η θερμοκρασία όπως φαίνεται και από το σχήμα με τη μέγιστη θερμοχωρητικότητα, $c_{p,max}$.

Για $T \leq T_s$

$$\triangleright c_{p,eff}(T) = c_{ps} \quad (6.17)$$

Για $T_s \leq T \leq T_c$

$$\triangleright c_{p,eff}(T) = 4 \cdot (H - b \cdot c_{ps}) \cdot (T - T_s) / b^2 + c_{ps} \quad (6.18)$$

με $b = T_l - T_s$ δηλαδή το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης του εκάστοτε PCM.

Για $T_c \leq T \leq T_l$

$$\triangleright c_{p,eff}(T) = 4 \cdot (b \cdot c_{pl} - H) \cdot \left(T - T_s - \frac{b}{2} \right) / b^2 + 2 \cdot H / b - c_{pl} \quad (6.19)$$

Για $T_l \leq T$

$$\triangleright c_{p,eff}(T) = c_{pl} \quad (6.20)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις λοιπόν θα διαμορφώνονται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του PCM, που θα επιλέγεται κάθε φορά.

Κεφάλαιο 7ο: Μελέτες της συμπεριφοράς του στρώματος PCM συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων

7.1 1^η Παραμετρική μελέτη ως προς το πάχος του στρώματος PCM στο 24hr

A. Σκοπός

Στη μελέτη αυτή αφού υπολογίσουμε την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο τοίχο νότιου προσανατολισμού για μια μέρα του Ιανουαρίου, που είναι ένας χαρακτηριστικός χειμερινός μήνας θα εξετάσουμε την επίδραση που έχει η αύξηση του πάχους του στρώματος PCM στη διακύμανση της θερμοκρασίας του κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου.

B. Επιλογή ημέρας

Η μελέτη αυτή θα πραγματοποιηθεί για τις 21 Ιανουαρίου, δηλαδή D=21 καθώς η 21^η ημέρα θεωρείται τυπική και επαρκώς αντιπροσωπευτική ημέρα για οποιοδήποτε μήνα.

C. Εύρεση ηλιακής ακτινοβολίας

Η άμεση G_b και διάχυτη G_d ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου υπολογίζονται για την 21^η Ιανουαρίου στην περιοχή της Αθήνας από τις σχέσεις (6.6) και (6.7) αντίστοιχα με D=21. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

t [hrs]	G_b [W/m^2]	G_d [W/m^2]
7	-34,84744835	-48,62633565
8	-5,406216843	22,13981351
9	23,10677958	89,25713882
10	71,73555978	144,1934025
11	115,511786	176,6724214
12	148,4794733	187,1217915
13	159,5752639	171,9935178
14	157,1809724	133,8738099
15	117,9372136	94,87812981
16	53,95164715	60,58386363
17	-34,45071007	29,61561708
18	-120,2248367	-32,18273581

Πίνακας 7.1: Άμεση G_b και διάχυτη G_d ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου για τις 21 Ιανουαρίου για κάθε ώρα $t=7 \div 18$.

Η ακτινοβολία G_T κεκλιμένου επιπέδου βρίσκεται με βάση τη σχέση (6.5), η οποία αναφέρεται ξανά και εδώ για λόγους πληρότητας. Όλα τα μεγέθη στη σχέση αυτή είτε είναι γνωστά είτε μπορούν να υπολογιστούν όπως έχει περιγραφεί αναλυτικά στην παράγραφο 6.2. Απαιτείται προσοχή όμως στο ότι ενώ οι τιμές των μεγεθών φ , ρ , β , δ και γ παραμένουν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, η ωριαία γωνία ω και συνεπώς ο λόγος R_b καθώς και η άμεση G_b και διάχυτη G_d ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου μεταβάλλονται με την ώρα t .

Ειδικότερα λοιπόν ισχύει

$$G_T = G_b \cdot R_b + G_d \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + (G_b + G_d) \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right)$$

όπου

- $\rho=0,2$ για συνηθισμένο έδαφος
- $\beta=90^\circ$ για κατακόρυφο τοίχο
- G_b, G_d από τον πίνακα 7.1 για κάθε ώρα $t=7 \div 18$
- R_b από τη σχέση (6.11) καθώς ο τοίχος μας είναι νότιου προσανατολισμού για κάθε ώρα $t=7 \div 18$, με
 - ω από τη σχέση (6.12) για κάθε ώρα $t=7 \div 18$
 - $\varphi=37,97^\circ$ για Αθήνα
 - $\delta=-20,14^\circ$ από σχέση (6.4) με $n=21$ (21^η Ιανουαρίου)

t [hrs]	ω [°]	R_b
7	-75	-20,75636845
8	-60	3,540833401
9	-45	2,182522983
10	-30	1,798227749
11	-15	1,648637931
12	0	1,607192372
13	15	1,648637931
14	30	1,798227749
15	45	2,182522983
16	60	3,540833401
17	75	-20,75636845
18	90	-1,281323943

Πίνακας 7.2: Η ωριαία γωνία ω και ο λόγος R_b για τις 21 Ιανουαρίου για κάθε ώρα $t=7 \div 18$.

Αντικαθιστώντας επομένως στη σχέση (6.5) προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα για την ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου G_T σε W/m^2 για κάθε ώρα $t=7 \div 18$ της 21^{ης} Ιανουαρίου.

t [hrs]	$G_T [W/m^2]$
7	690,645931
8	-6,39924675
9	106,296039
10	222,686472
11	307,991743
12	365,756099
13	382,23547
14	378,689569
15	326,121279
16	232,779277
17	729,395931
18	122,714837

Πίνακας 7.3: Ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου G_T για τις 21 Ιανουαρίου για κάθε ώρα $t=7 \div 18$.

Παρατηρούμε ότι κάποιες από τις τιμές που προκύπτουν από τους υπολογισμούς για την ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου G_T καθώς και για την άμεση G_b και τη διάχυτη G_d ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου δεν είναι λογικές και θα πρέπει να απορριφθούν αρχικά και εν συνεχεία να τεθούν ίσες με μηδέν. Ειδικότερα από τον πίνακα 7.3 που περιέχει τις τιμές της ακτινοβολίας G_T βλέπουμε ότι στις 07:00 παρουσιάζεται μια πολύ μεγάλη τιμή, η οποία δεν ευσταθεί αν σκεφτούμε ότι μπορεί ο ήλιος να μην έχει ακόμα ανατείλει καθώς βρισκόμαστε στο μέσο του χειμώνα και αργεί να ξημερώσει. Επίσης στις 08:00 η τιμή που προκύπτει για την G_T είναι αρνητική και ως εκ τούτου απορρίπτεται και θεωρείται ότι δεν υπάρχει ακόμα προσπίπτουσα ακτινοβολία στον τοίχο. Από τις 09:00 τώρα όπου έχουμε και τη μικρότερη αποδεκτή τιμή για την G_T η ακτινοβολία που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο – τοίχο αρχίζει να αυξάνει μέχρι τη 13:00 όπου παρουσιάζεται και η μέγιστη τιμή της ενώ στη συνέχεια ακολουθεί μια φθίνουσα πορεία έως τις 16:00. Μετά τις 16:00 οι άλλες δύο τιμές απορρίπτονται καθώς βλέπουμε ότι στις 17:00 εμφανίζεται

μια απότομη αύξηση που δεν δικαιολογείται με βάση το γεγονός ότι βρισκόμαστε κοντά στην ώρα δύσης.

Επομένως καταλήγουμε στο ότι προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στον τοίχο έχουμε από τις 09:00 έως και 16:00. Αξιοσημείωτο είναι ότι στις 08:00 και στις 17:00 ενώ δεν υπάρχει καθόλου άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου καθώς οι τιμές της αυτές τις ώρες προκύπτουν αρνητικές σύμφωνα με τον πίνακα 7.1, παρατηρούμε ότι υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία κοντά στην ώρα δύσης και ανατολής του ήλιου. Οι ώρες που δύει και ανατέλλει ο ήλιος με βάση τις οποίες μπορούν να επιβεβαιωθούν και τα παραπάνω συμπεράσματα μπορούν να υπολογιστούν επακριβώς από τις σχέσεις (6.1) και (6.2) αντίστοιχα και οι οποίες προκύπτουν ίσες με:

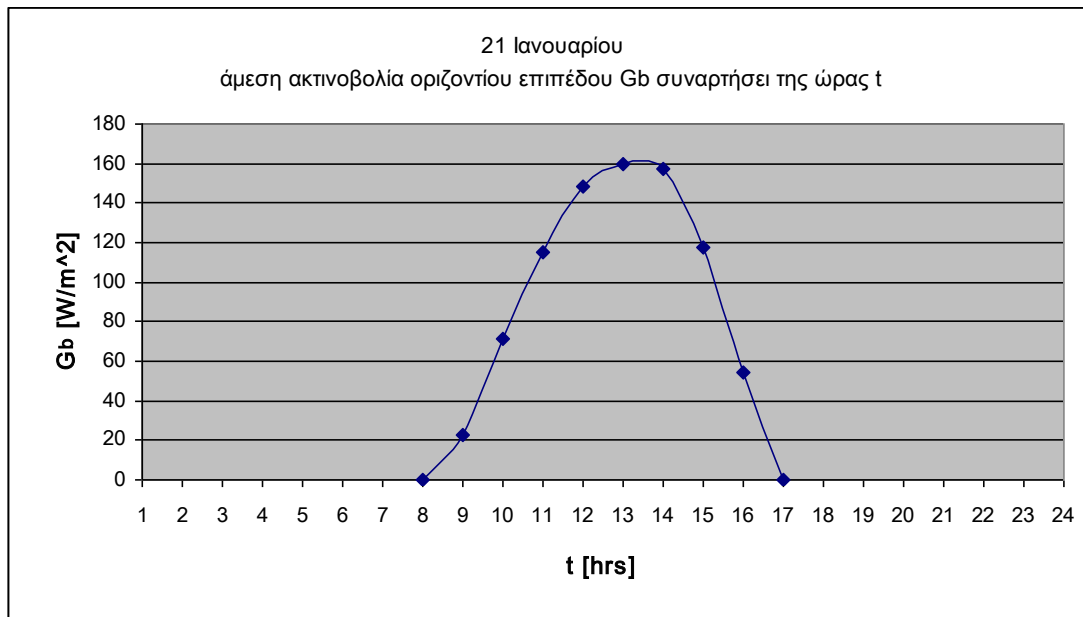
- ώρα δύσης = 16,89hrs ή 16hr53min24sec
- ώρα ανατολής = 7,11hrs ή 7hr6min36sec

Με βάση λοιπόν τις παραπάνω παρατηρήσεις ο πίνακας με τις τιμές των ακτινοβολιών G_b , G_d και G_T για κάθε ώρα $t=7 \div 18$ της 21^{ης} Ιανουαρίου διαμορφώνεται όπως φαίνεται παρακάτω.

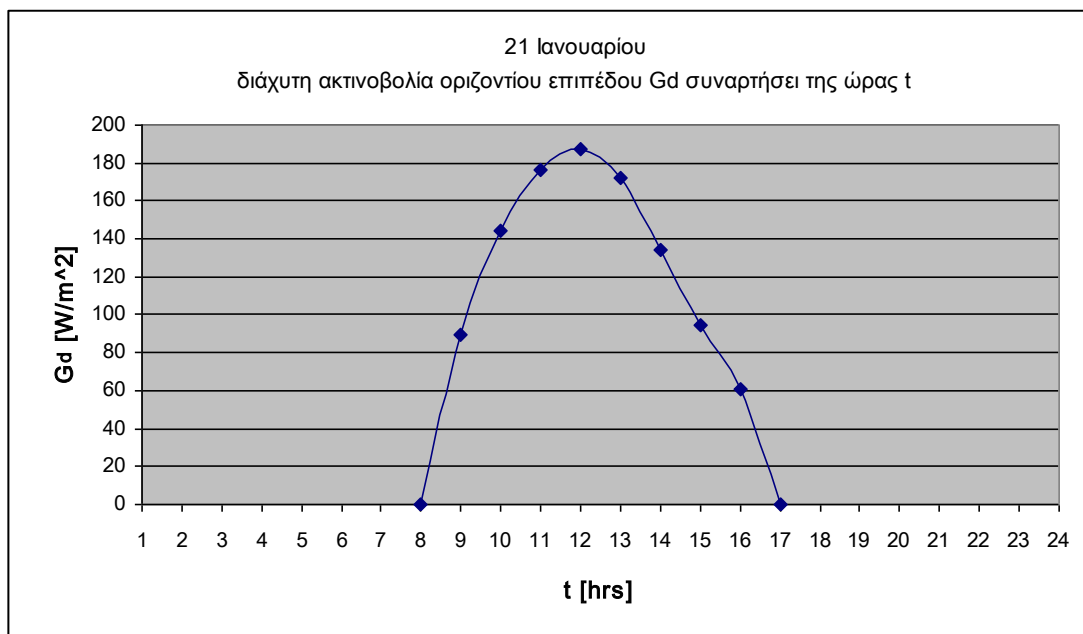
t [hrs]	G_b [W/m^2]	G_d [W/m^2]	G_T [W/m^2]
7	0	0	0
8	0	0	0
9	23,1067796	89,2571388	106,296039
10	71,7355598	144,193403	222,686472
11	115,511786	176,672421	307,991743
12	148,479473	187,121791	365,756099
13	159,575264	171,993518	382,23547
14	157,180972	133,87381	378,689569
15	117,937214	94,8781298	326,121279
16	53,9516472	60,5838636	232,779277
17	0	0	0
18	0	0	0

Πίνακας 7.4: Τελικές τιμές για τις ακτινοβολίες G_b , G_d και G_T για κάθε ώρα $t=7 \div 18$ της 21^{ης} Ιανουαρίου.

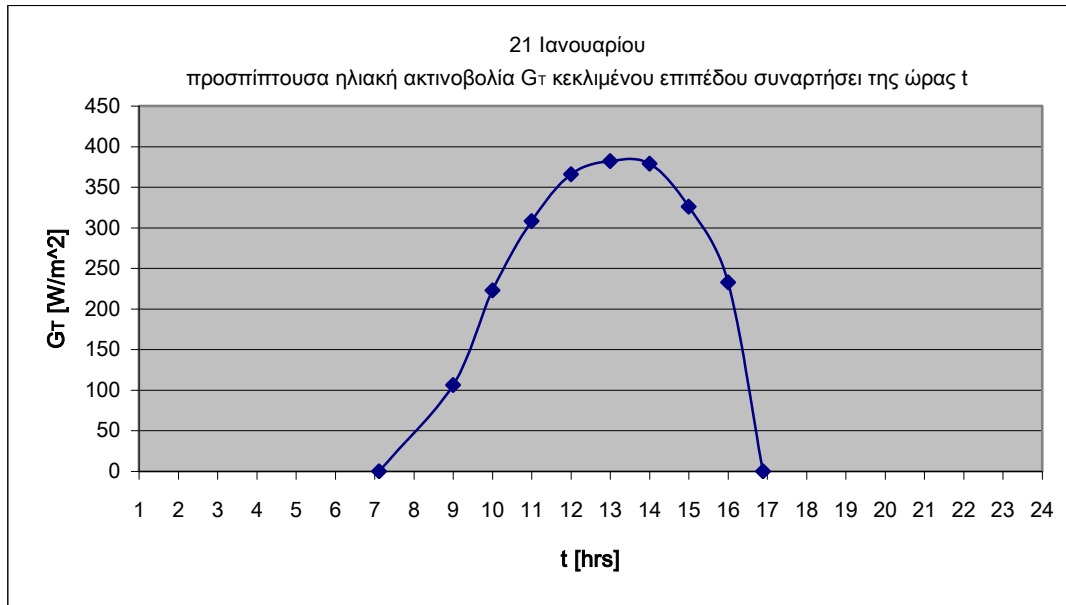
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ακτινοβολιών G_b , G_d και G_T συναρτήσει της ώρας της ημέρας, t της 21^{ης} Ιανουαρίου.



Σχήμα 7.1: Διάγραμμα G_b συναρτήσει της t της 21^{ης} Ιανουαρίου.



Σχήμα 7.2: Διάγραμμα G_d συναρτήσει της t της 21^{ης} Ιανουαρίου.



Σχήμα 7.3: Διάγραμμα G_T συναρτήσει της t της 21^{ης} Ιανουαρίου.

D. Επιλογή PCM

Ως PCM θεωρούμε ένα υποθετικό υλικό με τα εξής ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- $H = 132,1 \text{ kJ/kg}$
- Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης $15 - 26^\circ\text{C}$
- $\rho = 1019 \text{ kgr/m}^3$
- $c_{ps} = c_{pl} = 7000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
- $k = 0,8 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Αντικαθιστώντας στη συνέχεια στις σχέσεις (6.17) έως και (6.20) μπορούμε να προσδιορίσουμε πλήρως τη συνάρτηση της ενεργούς θερμοχωρητικότητας ως προς τη θερμοκρασία, $c_{p,\text{eff}}(T)$ και σχεδιάζοντας τη να επαληθεύσουμε τη τριγωνική μορφή της. Έτσι λοιπόν έχουμε

για $T \leq 15^\circ\text{C}$

$$\text{➤ } c_{p,\text{eff}}(T) = 7000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}, \text{ από τη σχέση (6.17)}$$

για $15^\circ\text{C} \leq T \leq 20,5 \left(= \frac{15 + 26}{2} \right)^\circ\text{C}$

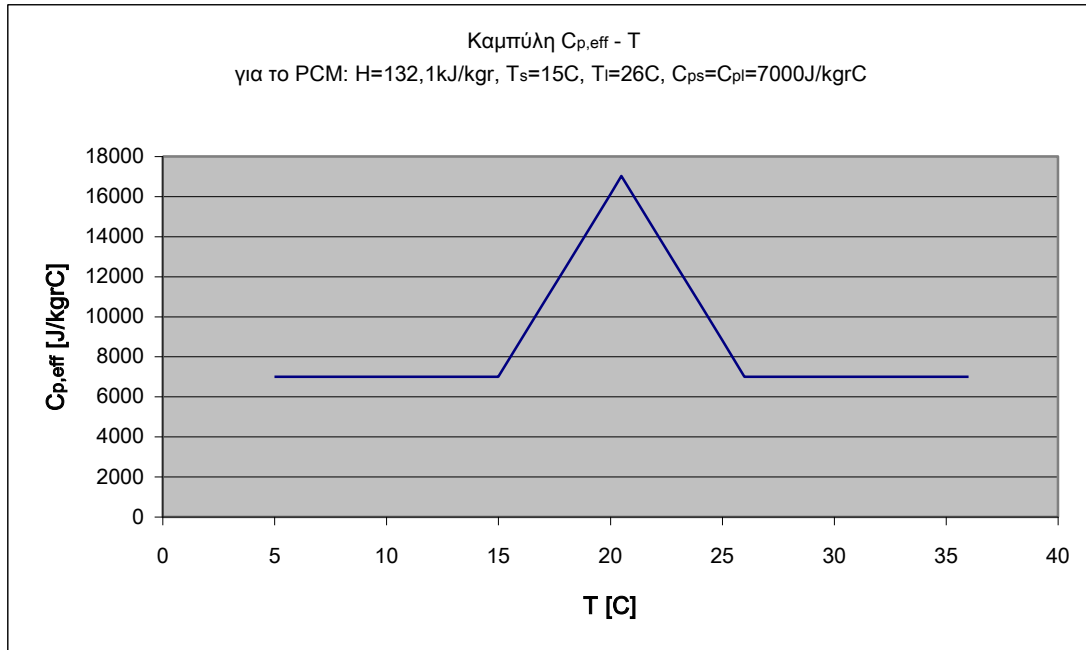
$$\text{➤ } c_{p,\text{eff}}(T) = 1821,49 \cdot (T - 15) + 7000, \text{ από σχέση (6.18) με } b = 11^\circ\text{C}$$

για $20,5^\circ\text{C} \leq T \leq 26^\circ\text{C}$

$$\text{➤ } c_{p,\text{eff}}(T) = -1821,48 \cdot (T - 20,5) + 17018,18, \text{ από τη σχέση (6.19)}$$

για $T \geq 26^\circ\text{C}$

➤ $c_{p,\text{eff}}(T) = 7000\text{J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$, από τη σχέση (6.20)



Σχήμα 7.4: Διάγραμμα της συνάρτησης $c_{p,\text{eff}}(T)$.

Το παραπάνω διάγραμμα επιβεβαιώνει την τριγωνική μορφή της καμπύλης της ενεργούς θερμοχωρητικότητας με τη θερμοκρασία επαληθεύοντας μ' αυτό τον τρόπο και τη μορφή των εξισώσεων (6.17), (6.18), (6.19) και (6.20).

Ε. Εφαρμογή του ισολογισμού ενέργειας στο στρώμα PCM με παράμετρο το πάχος

Επιλύοντας ως προς T_{PCM} τον ενεργειακό ισολογισμό όπως διατυπώθηκε στην παράγραφο 6.3 με τη σχέση (6.13) προκύπτει

$$T_{\text{PCM}} = T_{\text{PCM}}^{\circ} + \frac{1}{m \cdot c_p} \cdot \left[3600 \cdot 85\% \cdot G_T \cdot A_g - 3600 \cdot U \cdot A_w \cdot (T_{\text{PCM}}^{\circ} - T_{\text{in}}) \right]$$

όπου

- $U = 5,33\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ από τη σχέση (6.14)
- $T_{\text{in}} = 20^\circ\text{C}$ μια τυπική τιμή για τη θερμοκρασία του εσωτερικού του δωματίου τη χειμερινή περίοδο
- $A_w = 7,5\text{m}^2$
- $A_g = 3\text{m}^2$

Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές, οι οποίες δεν μεταβάλλονται καθ' όλη τη διαδικασία στην παραπάνω σχέση καταλήγουμε στην εξής:

$$T_{PCM} = T_{PCM}^{\circ} + \frac{1}{m \cdot c_p} \cdot \left[3600 \cdot 85\% \cdot G_T \cdot 3 - 3600 \cdot 5,33 \cdot 7,5 \cdot (T_{PCM}^{\circ} - 20) \right] \quad (7.1)$$

- m είναι η μάζα του PCM, η οποία για κάθε πάχος του διαμορφώνεται αναλόγως με βάση τη σχέση (6.15) καθώς παρόλο που η πυκνότητα δεν αλλάζει, μεταβάλλεται ο όγκος του PCM σύμφωνα με τη σχέση (6.16) όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα

πάχος στρώματος PCM (mm)	V (m ³)	m (kg)
5	0,0375	38,2125
20	0,15	152,85
50	0,375	382,125
70	0,525	534,975
90	0,675	687,825

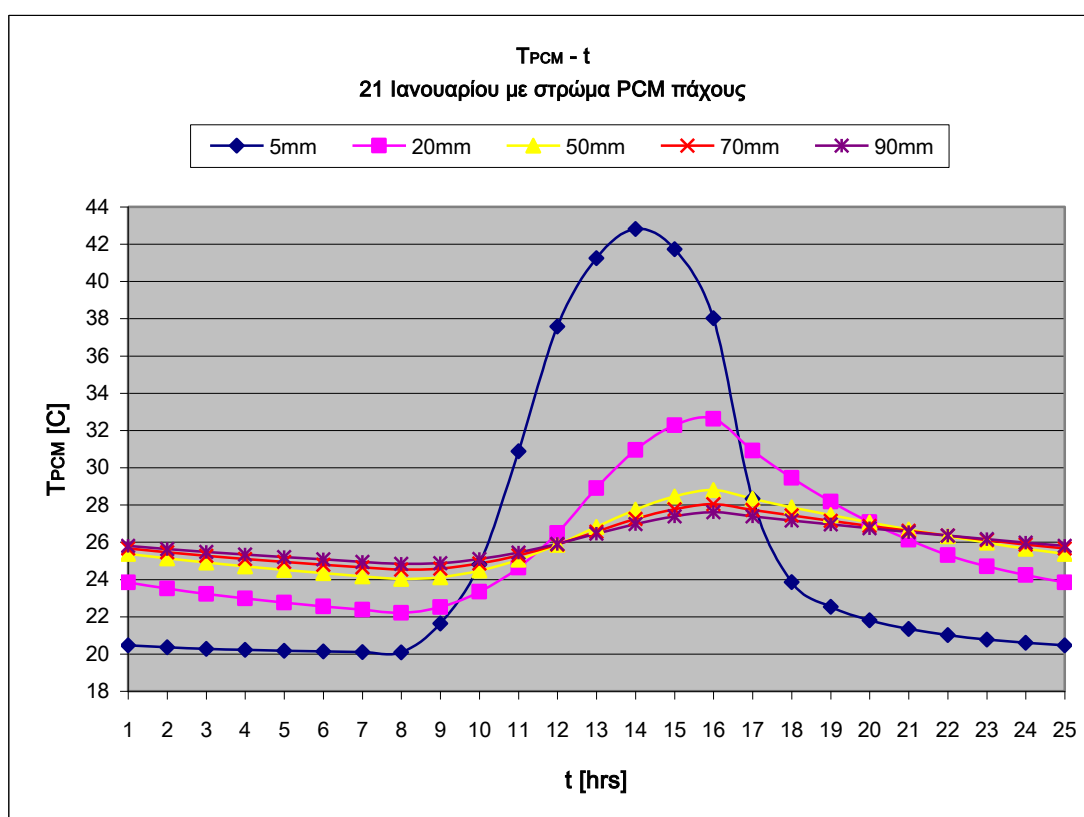
Πίνακας 7.5: Τιμές της μάζας του PCM συναρτήσει του πάχους.

- c_p είναι η ενεργός θερμοχωρητικότητα του PCM η οποία αλλάζει με την εκάστοτε θερμοκρασία του σύμφωνα με τις εξισώσεις όπως αυτές διαμορφώθηκαν στο τμήμα D της επιλογής του PCM
- G_T είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου από την οποία μόνο το 85% φθάνει στον τοίχο και η οποία αλλάζει για κάθε ώρα $t=7 \div 18$ σύμφωνα με τον πίνακα 7.4

Προκειμένου να δούμε πως μεταβάλλεται η θερμοκρασία του κάθε πάχους στρώματος PCM κατά τη διάρκεια της ημέρας θα πρέπει αρχικά για μια ώρα της 21^{ης} Ιανουαρίου έστω στις $t=06:00$ το πρωί να θεωρήσουμε μια θερμοκρασία π.χ. $T_{PCM}^{\circ} = 22^{\circ}\text{C}$ με βάση την οποία στη συνέχεια θα μπορέσουμε να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία T_{PCM} την επόμενη χρονική στιγμή, $t+\Delta t=07:00$ από τη σχέση (7.1), έχοντας βρει τώρα τη θερμοκρασία του PCM στις $t+\Delta t=07:00$ μπορούμε να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία του στις $t+2\Delta t=08:00$ κ.ο.κ.. Ως χρονικό βήμα Δt όπως φαίνεται και παραπάνω θεωρούμε το διάστημα της μιας ώρας καθώς σύμφωνα με τον πίνακα 7.4 η τιμή της προσπίπτουσας στο τοίχο ηλιακής ακτινοβολίας έχει υπολογιστεί και αλλάζει για κάθε ώρα. Έχοντας λοιπόν υπολογίσει τη θερμοκρασία του στρώματος PCM ενός ορισμένου πάχους για όλες τις ώρες του 24ώρου με κάθε

φορά ως είσοδο τη θερμοκρασία της προηγούμενης ώρας, θα πρέπει να επαναλάβουμε το 24ώρο της 21^{ης} Ιανουαρίου όπου όμως η θερμοκρασία του PCM στις $t=06:00$ θα βρεθεί πάλι με βάση τη σχέση (7.1) με είσοδο την T_{PCM} στις 05:00 το πρωί του προηγούμενου 24ώρου. Οι επαναλήψεις θα συνεχιστούν μέχρις ότου οι τιμές της θερμοκρασίας για κάθε ώρα της μέρας συγκλίνουν, το οποίο είναι απαραίτητο προκειμένου να εξασφαλιστεί ανεξαρτησία από την αρχική αυθαίρετη υποθεθείσα θερμοκρασία.

Εφαρμόζοντας τη διαδικασία αυτή για κάθε πάχος του στρώματος PCM παρουσιάζεται το ακόλουθο συγκεντρωτικό διάγραμμα που δείχνει τη διακύμανση της θερμοκρασίας του PCM κάθε πάχους συναρτήσει της ώρας t της ημέρας της 21^{ης} Ιανουαρίου.



Σχήμα 7.5: Διάγραμμα T_{PCM} συναρτήσει της ώρας t της 21^{ης} Ιανουαρίου με παράμετρο το πάχος του PCM.

Παρατηρώντας το σχήμα 7.5 καταλήγουμε στα ακόλουθα σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση του πάχους του στρώματος PCM στη διαμόρφωση της θερμοκρασίας του. Αρχικά βλέπουμε ότι όσο αυξάνεται το πάχος του PCM υπάρχει μια μείωση των μέγιστων θερμοκρασιών, η οποία όμως μείωση είναι όλο και μικρότερη όσο πιο πολύ αυξάνεται το πάχος του PCM. Για παράδειγμα η

μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας είναι γύρω στους 10°C όταν το πάχος του PCM αλλάζει από 5mm σε 20mm ενώ η μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας είναι περίπου 0,5°C όταν το πάχος αυξάνεται από τα 70mm στα 90mm. Εκτός όμως από μείωση των μέγιστων έχουμε παράλληλα και αύξηση των ελάχιστων θερμοκρασιών, το οποίο συνολικά σημαίνει ότι όσο αυξάνεται το πάχος του PCM μικραίνει το εύρος διακύμανσης της θερμοκρασίας του PCM. Ειδικότερα βλέπουμε ότι για πάχος PCM ίσο με 5mm το θερμοκρασιακό εύρος είναι περίπου 22°C ενώ για πάχος 20mm είναι γύρω στους 10°C. Η συμπεριφορά αυτή του PCM στην αύξηση του πάχους και συνεπώς της μάζας του μπορεί να εξηγηθεί από τη σχέση (7.1) όπου βλέπουμε ότι καθώς μεγαλώνει η μάζα m , μικραίνει το κλάσμα $\frac{1}{m \cdot c_p}$ και επομένως οι μεταβολές της θερμοκρασίας του PCM που πραγματοποιούνται κάθε φορά είναι πιο μικρές και γίνονται με μεγαλύτερη δυσκολία. Επίσης παρατηρείται μια μετατόπιση της μέγιστης θερμοκρασίας προς πιο απογευματινές ώρες δηλαδή ενώ για πάχος 5mm έχουμε μέγιστη T_{PCM} στις 14:00, για πάχος 20mm έχουμε στις 16:00.

Μια σημαντική παρατήρηση που πρέπει να τονισθεί είναι ότι τα πάχη των 50, 70 και 90mm είναι υπερβολικά μεγάλα για το στρώμα του PCM και μελετώνται μόνο για λόγους πληρότητας και έρευνας. Στην πραγματικότητα τέτοια πάχη αποφεύγονται καθώς πέρα από το κόστος που μεγαλώνει πάρα πολύ, τα οφέλη που προκύπτουν από την αύξηση του πάχους π.χ. από τα 70mm στα 90mm όπως φαίνεται και από το σχήμα 7.5 δε δικαιολογούν ένα τέτοιο έξοδο.

7.2 2^η Παραμετρική μελέτη του πάχους του στρώματος του μπετόν έναντι του αντίστοιχου του PCM στο 24hr

A. Σκοπός

Με τη μελέτη αυτή γίνεται μια προσπάθεια να αναδειχθούν ακόμα περισσότερο τα οφέλη που προκύπτουν με τη χρήση στρώματος PCM μέσα από τη σύγκρισή του με το συμβατικό μπετόν που χρησιμοποιείται στις κατασκευές κτιρίων. Έτσι λοιπόν για τη συγκεκριμένη μελέτη θα αντικαταστήσουμε το στρώμα PCM με στρώμα μπετόν με τη διαστρωμάτωση του υπόλοιπου τοίχου να παραμένει αμετάβλητη.

B. Επιλογή ημέρας

Η μέρα δεν αλλάζει, είναι η ίδια όπως και προηγουμένως, δηλαδή η 21^η Ιανουαρίου ώστε τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ PCM και μπετόν να μην επηρεαστούν από άλλους εξωγενείς παράγοντες.

C. Εύρεση ηλιακής ακτινοβολίας

Η άμεση G_b και διάχυτη G_d ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου που υπολογίζονται από τις σχέσεις (6.6) και (6.7) αντίστοιχα δεν αλλάζουν σε σχέση με την προηγούμενη παραμετρική μελέτη καθώς η ημέρα είναι η ίδια η 21^η Ιανουαρίου με $D=21$. Επίσης η ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου G_T που βρίσκεται σύμφωνα με τη σχέση (6.5) παραμένει αμετάβλητη καθώς δεν αλλάζει κανένα από τα μεγέθη που εμπεριέχονται σ' αυτή τη σχέση. Έτσι λοιπόν οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας όπως βρέθηκαν στην 1^η Παραμετρική μελέτη και οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 7.4 για κάθε ώρα t της ημέρας ισχύουν και σ' αυτή τη μελέτη.

D. Χαρακτηριστικά Μπετόν

Το μπετόν το οποίο θεωρείται ένα συμβατικό οικοδομικό υλικό με ευρεία χρήση στο τομέα των κτιριακών εφαρμογών έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά

- $\rho=2300 \text{ kg/m}^3$, η οποία είναι σταθερή με τη θερμοκρασία αλλά σχεδόν διπλάσια αυτής του PCM, γεγονός που σημαίνει ότι το μπετόν είναι ένα πιο πυκνό υλικό από το υλικό αλλαγής φάσης που έχει θεωρηθεί.
- $c_p = 880 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, η οποία θεωρείται σταθερή και ανεξάρτητη της εκάστοτε θερμοκρασίας του στρώματος του μπετόν αντίθετα με την περίπτωση του PCM όπου είχαμε άμεση εξάρτηση της θερμοχωρητικότητας από τη θερμοκρασία.

E. Εφαρμογή ισολογισμού ενέργειας στο στρώμα μπετόν με παράμετρο το πάχος

Οι παραδοχές που έγιναν στην παράγραφο 6.3 κατά τη διατύπωση του ενεργειακού ισολογισμού του PCM ισχύουν και εδώ αντίστοιχα για το στρώμα του μπετόν. Ειδικότερα θεωρείται ομοιόμορφη και σταθερή θερμοκρασία του εσωτερικού του δωματίου, ομοιόμορφη θερμοκρασία του στρώματος του μπετόν και αδιαβατικό όριο μεταξύ στρώματος μπετόν και μόνωσης. Ο ενεργειακός ισολογισμός για το στρώμα του μπετόν είναι ανάλογος μ' αυτόν του PCM όπως περιγράφεται από τη σχέση (6.13) η οποία τροποποιείται στην ακόλουθη μορφή

$$m \cdot c_p \cdot (T_{\text{ΜΠΕΤΟΝ}} - T_{\text{ΜΠΕΤΟΝ}}^{\circ}) = 3600 \cdot 85\% \cdot G_T \cdot A_g - 3600 \cdot U \cdot A_w \cdot (T_{\text{ΜΠΕΤΟΝ}}^{\circ} - T_{\text{in}}),$$

η οποία επιλυόμενη ως προς $T_{\text{ΜΠΕΤΟΝ}}$ μας δίνει

$$\Rightarrow T_{\text{ΜΠΕΤΟΝ}} = T_{\text{ΜΠΕΤΟΝ}}^{\circ} + \frac{1}{m \cdot c_p} \cdot [3600 \cdot 85\% \cdot G_T \cdot A_g - 3600 \cdot U \cdot A_w \cdot (T_{\text{ΜΠΕΤΟΝ}}^{\circ} - T_{\text{in}})]$$

$$\Rightarrow T_{\text{ΜΠΕΤΟΝ}} = T_{\text{ΜΠΕΤΟΝ}}^{\circ} + \frac{1}{m \cdot 880} \cdot [3600 \cdot 85\% \cdot G_T \cdot 3 - 3600 \cdot 5,33 \cdot 7,5 \cdot (T_{\text{ΜΠΕΤΟΝ}}^{\circ} - 20)] \quad (7.2)$$

Στην παραπάνω σχέση όπως βλέπουμε αντικαταστάθηκαν η θερμοχωρητικότητα c_p του μπετόν όπως δόθηκε στο τμήμα D καθώς και τα μεγέθη U , T_{in} , A_w και A_g οι τιμές

των οποίων δεν μεταβάλλονται ούτε με την ώρα t ούτε με την αλλαγή της μάζας του μπετόν και παραμένουν οι ίδιες με την 1^η Παραμετρική μελέτη. Για τα υπόλοιπα μεγέθη ισχύει:

- G_T είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου η οποία όπως εξηγήθηκε στο τμήμα C δεν αλλάζει και ισχύουν οι τιμές του πίνακα 7.4 για κάθε ώρα t της ημέρας
- m είναι η μάζα του μπετόν η οποία βρίσκεται από τη σχέση (6.15) κατ' αντιστοιχία με το PCM με ρ όμως την πυκνότητα του μπετόν όπως δόθηκε στο τμήμα D και με V τον όγκο του μπετόν που προκύπτει για κάθε πάχος από την παρακάτω σχέση:

$V = (\text{πλάτος τοίχου}) \times (\text{ύψος τοίχου}) \times (\text{πάχος στρώματος μπετόν})$, η οποία είναι η αντίστοιχη της σχέσης (6.16). Έτσι λοιπόν προκύπτει ο παρακάτω πίνακας ο οποίος μας δίνει τη μάζα του μπετόν για κάθε πάχος.

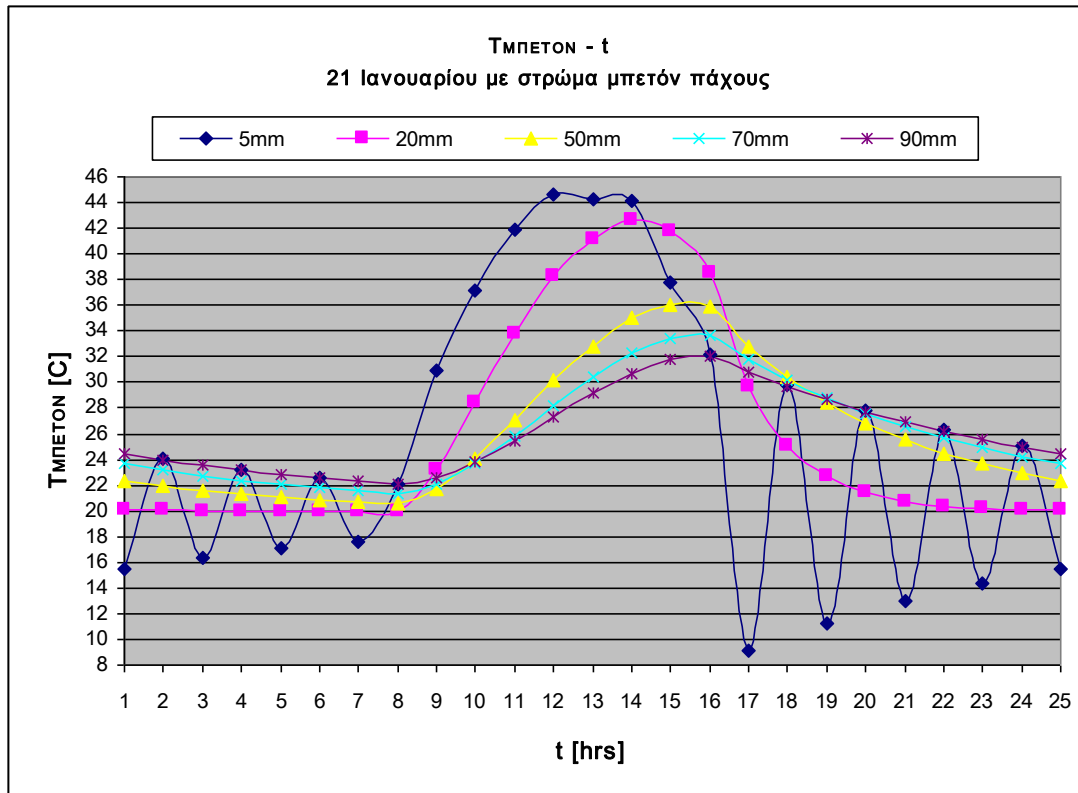
πάχος στρώματος μπετόν (mm)	V (m ³)	m (kg)
5	0,0375	86,25
20	0,15	345
50	0,375	862,5
70	0,525	1207,5
90	0,675	1552,5

Πίνακας 7.6: Τιμές της μάζας m του μπετόν συναρτήσει του πάχους.

Τα πάχη που έχουν επιλέγει για το στρώμα του μπετόν δεν αντιπροσωπεύουν όλα την πραγματικότητα ιδιαίτερα η τιμή των 5mm αλλά έχουν ληφθεί καθαρά για λόγους σύγκρισης με τα αντίστοιχα πάχη του στρώματος του PCM.

Για να βρεθεί και για την παρούσα μελέτη η διακύμανση της θερμοκρασίας του μπετόν θα ακολουθηθεί η ίδια διαδικασία όπως και στην περίπτωση του PCM της προηγούμενης μελέτης. Εν συντομία λοιπόν αρχικά θα υποθέσουμε μια θερμοκρασία για το μπετόν μια τυχαία ώρα της μέρας και μετά θα υπολογίσουμε τη θερμοκρασία την επόμενη ώρα από τη σχέση (7.2) κ.ο.κ. Έχοντας υπολογίσει τις θερμοκρασίες του μπετόν για όλες τις ώρες του 24ώρου θα επαναλάβουμε τη μέρα μέχρις ότου επιτευχθεί σύγκλιση.

Επομένως η διακύμανση της θερμοκρασίας του στρώματος του μπετόν με την ώρα t της 21^{ης} Ιανουαρίου για κάθε πάχος παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



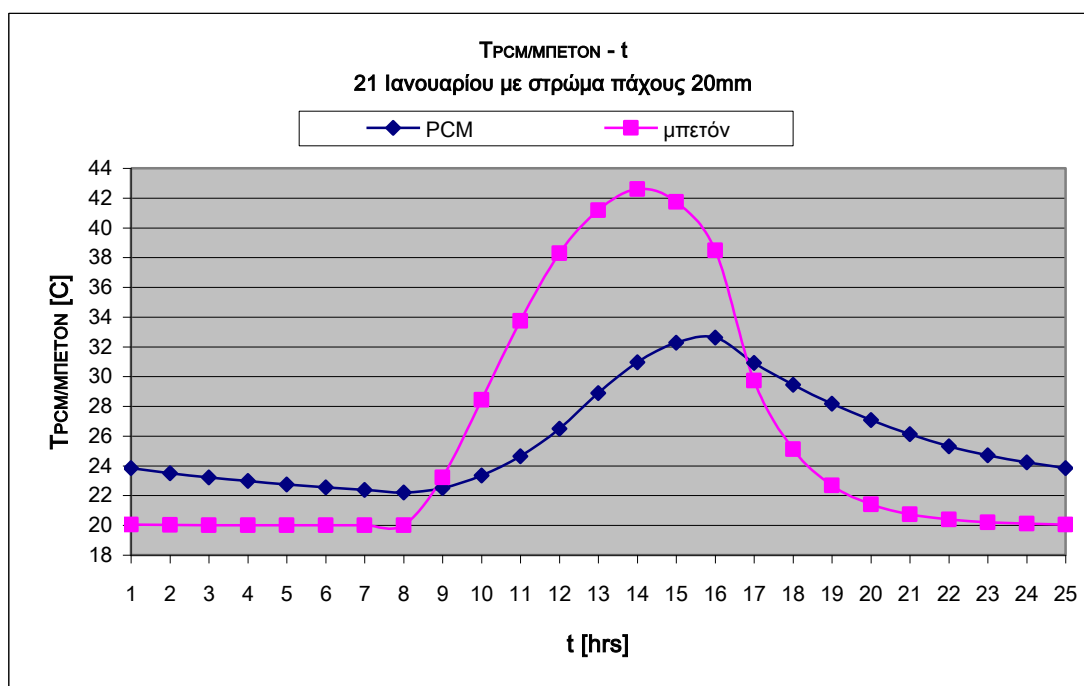
Σχήμα 7.6: Διάγραμμα $T_{\text{ΜΠΕΤΟΝ}}$ συναρτήσει της ώρας t της 21^{ης} Ιανουαρίου με παράμετρο το πάχος του μπετόν.

Αρχικά παρατηρώντας το διάγραμμα του σχήματος 7.6 βλέπουμε ότι το μπετόν πάχους 5mm κρίνεται ακατάλληλο για χρήση σε πραγματικές κτιριακές κατασκευές εξαιτίας της υπερβολικής διακύμανσης της θερμοκρασίας του με συνεχείς αυξομειώσεις καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου και με εύρος πολύ μεγαλύτερο του αντίστοιχου πάχους του PCM. Οι λόγοι για τους οποίους μελετάται εδώ είναι καθαρά θεωρητικοί.

Επίσης παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται το πάχος του στρώματος του μπετόν έχουμε μείωση των μέγιστων θερμοκρασιών πιο ομαλά όμως σε σχέση με το PCM, αύξηση των ελάχιστων και συνεπώς μείωση του εύρους διακύμανσης της θερμοκρασίας του μπετόν, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι με την αύξηση της μάζας του μπετόν, η σύμφωνα με τη σχέση (7.2) η μεταβολή της θερμοκρασίας του είναι πιο μικρή. Παράλληλα υπάρχει και μια μετατόπιση της μέγιστης θερμοκρασίας όπως συμβαίνει και στην περίπτωση του PCM προς πιο απογευματινές ώρες εξαιτίας του γεγονότος ότι στα μεγαλύτερα πάχη απαιτείται περισσότερη θερμότητα και συνεπώς μεγαλύτερος χρόνος μέχρι να φτάσει η θερμοκρασία τη μέγιστη τιμή της.

Για καλύτερη σύγκριση των στρωμάτων μπετόν και PCM κατασκευάζουμε το ακόλουθο διάγραμμα που απεικονίζει τη μεταβολή της θερμοκρασίας των στρωμάτων

PCM και μπετόν, πάχους 20mm το καθένα συναρτήσει της ώρας t της 21^{ης} Ιανουαρίου.

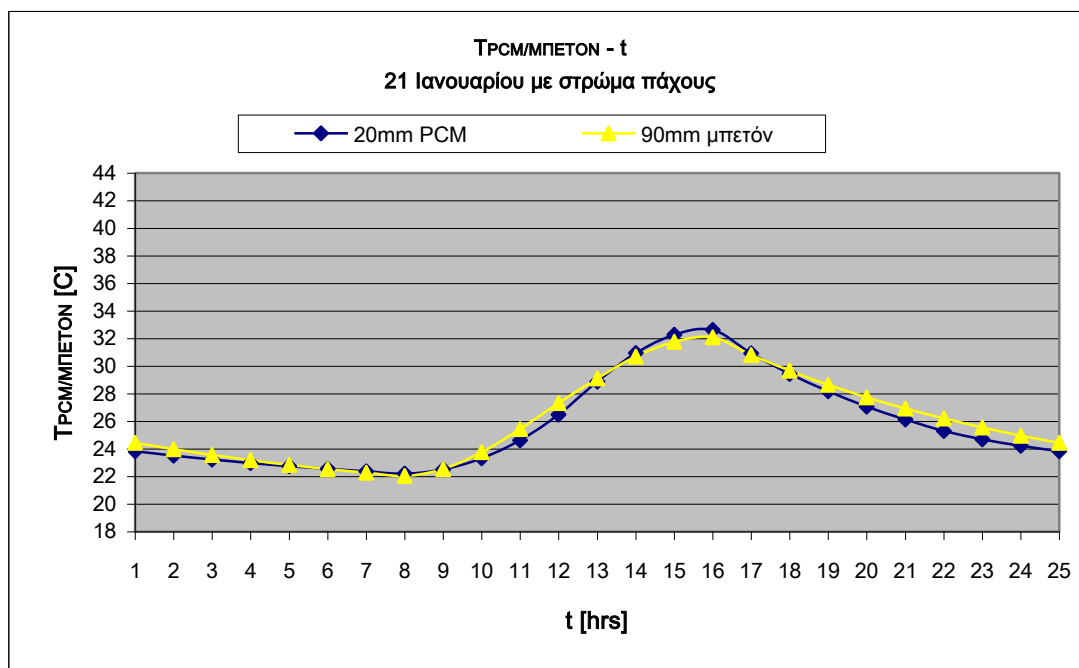


Σχήμα 7.7: Διάγραμμα T συναρτήσει της ώρας t της 21^{ης} Ιανουαρίου για στρώμα PCM και μπετόν πάχους 20mm το καθένα.

Συγκρίνοντας τις καμπύλες $T - t$ του PCM και του μπετόν αντίστοιχα του διαγράμματος του σχήματος 7.7 καταλήγουμε στο ότι παρόλο που τα δύο υλικά έχουν το ίδιο πάχος των 20mm παρουσιάζουν μια τελείως διαφορετική θερμοκρασιακή απόκριση. Ειδικότερα παρατηρούμε ότι στην περίπτωση του PCM τα μέγιστα της θερμοκρασίας που επιτυγχάνονται είναι πολύ μικρότερα σε σχέση μ' αυτά του μπετόν καθώς και οι ελάχιστες θερμοκρασίες του PCM είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του μπετόν. Με λίγα λόγια το εύρος διακύμανσης της θερμοκρασίας στην περίπτωση του PCM είναι κατά πολύ μικρότερο από αυτό του μπετόν, γεγονός το οποίο εξηγείται αν σκεφτεί κανείς ότι ένα μεγάλο μέρος της θερμότητας συναλλάσσεται αλλάζοντας τη φάση του υλικού και όχι μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία του. Ένα ακόμα σημείο που πρέπει να τονισθεί είναι η καθυστέρηση που υπάρχει στην εμφάνιση της μέγιστης θερμοκρασίας στην περίπτωση του PCM η οποία γίνεται στις 16:00 ενώ η εμφάνιση της μέγιστης θερμοκρασίας του μπετόν πραγματοποιείται στις 14:00.

Επομένως με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις μπορεί κανείς να κατανοήσει τα οφέλη που υπάρχουν από τη χρήση των υλικών αλλαγής φάσης σε σχέση με τα συμβατικά δομικά υλικά. Προκειμένου να επιτύχουμε θερμοκρασιακή απόκριση ίδια μ'

αυτή του στρώματος PCM πάχους 20mm χρειαζόμαστε αρκετά μεγαλύτερο πάχος του στρώματος του μπετόν, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται και με το ακόλουθο διάγραμμα του σχήματος 7.8, όπου βλέπουμε ότι η θερμοκρασιακή κατανομή του στρώματος μπετόν πάχους 90mm προσεγγίζει αρκετά ικανοποιητικά αυτή του στρώματος PCM πάχους 20mm.



Σχήμα 7.8: Διάγραμμα Τ συναρτήσει της ώρας t της 21^{ης} Ιανουαρίου για στρώμα PCM και μπετόν πάχους 20 και 90mm αντίστοιχα.

7.3 3^η Παραμετρική μελέτη ως προς το πάχος του στρώματος PCM στο 48hr

A. Σκοπός

Βασική επιδίωξη της μελέτης αυτής είναι η εξέταση της συμπεριφοράς και της θερμοκρασιακής απόκρισης του στρώματος PCM κατά τη διάρκεια ενός 48ώρου καθώς και έλεγχος της λειτουργίας του υλικού αλλαγής φάσης σε περιόδους συννεφιάς, μειωμένης ηλιοφάνειας.

B. Επιλογή ημέρας

Ο βασικός λόγος που ορίζουμε την ημέρα διεξαγωγής της μελέτης είναι για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στο αμέσως επόμενο βήμα. Επειδή όμως στη συγκεκριμένη μελέτη εξετάζουμε το PCM στη διάρκεια 48ώρου θεωρούμε την 21^η Ιανουαρίου ως το πρώτο 24ώρο και ως δεύτερο 24ώρο πάλι την ίδια μέρα αλλά με τη μισή ακτινοβολία.

C. Εύρεση ηλιακής ακτινοβολίας

Η άμεση G_b και διάχυτη G_d ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου υπολογίζονται για την 21^η Ιανουαρίου στην περιοχή της Αθήνας από τις σχέσεις (6.6) και (6.7) αντίστοιχα με $D=21$ και επομένως οι τιμές τους παραμένουν οι ίδιες μ' αυτές που προέκυψαν στο τμήμα C της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης. Το ίδιο ισχύει και για την ακτινοβολία G_T κεκλιμένου επιπέδου, η διαδικασία υπολογισμού της οποίας από τη σχέση (6.5) έχει περιγραφεί αναλυτικά στην πρώτη μελέτη καθώς και έχει επεξηγηθεί διεξοδικώς ποιες από τις τιμές που προκύπτουν γίνονται αποδεκτές. Όσον αφορά τώρα το 2^ο 24ώρο θεωρούμε ότι υπάρχει η μισή ακτινοβολία σε σχέση με το 1^ο 24ώρο όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα.

t [hrs]	G_T [W/m^2]	
	1 ^ο 24ώρο	2 ^ο 24ώρο
7	0	0
8	0	0
9	106,2960388	53,14801938
10	222,6864717	111,3432358
11	307,9917433	153,9958717
12	365,7560992	182,8780496
13	382,2354699	191,117735
14	378,6895694	189,3447847
15	326,1212786	163,0606393
16	232,7792771	116,3896386
17	0	0
18	0	0

Πίνακας 7.7: Τιμές της ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου G_T για κάθε ώρα $t=7 \div 18$ και των δύο 24ώρων.

D. Επιλογή PCM

Το υλικό αλλαγής φάσης που θα χρησιμοποιηθεί σ' αυτή τη μελέτη είναι το ίδιο με αυτό που δόθηκε στο τμήμα D της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης, για το οποίο έχουν παρουσιασθεί εκτενώς και τα χαρακτηριστικά του, με βάση τα οποία εν συνεχεία έχουν προσδιοριστεί από τις σχέσεις (6.17), (6.18), (6.19) και (6.20) οι εξισώσεις της ενεργούς θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Ε. Εφαρμογή του ισολογισμού ενέργειας στο στρώμα PCM με παράμετρο το πάχος

Έχοντας αντικαταστήσει στη σχέση (6.13), που είναι ο ενεργειακός ισολογισμός του στρώματος PCM τα μεγέθη U , T_{in} , A_w και A_g , οι τιμές των οποίων δεν μεταβάλλονται καθ' όλη την παρακάτω διαδικασία και παραμένουν ίδιες μ' αυτές που δόθηκαν στο τμήμα Ε της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης και στη συνέχεια επιλύοντας ως προς T_{PCM} προκύπτει η σχέση (7.1) όπως και στην πρώτη μελέτη.

$$T_{PCM} = T_{PCM}^{\circ} + \frac{1}{m \cdot c_p} \cdot \left[3600 \cdot 85\% \cdot G_T \cdot 3 - 3600 \cdot 5,33 \cdot 7,5 \cdot (T_{PCM}^{\circ} - 20) \right]$$

όπου

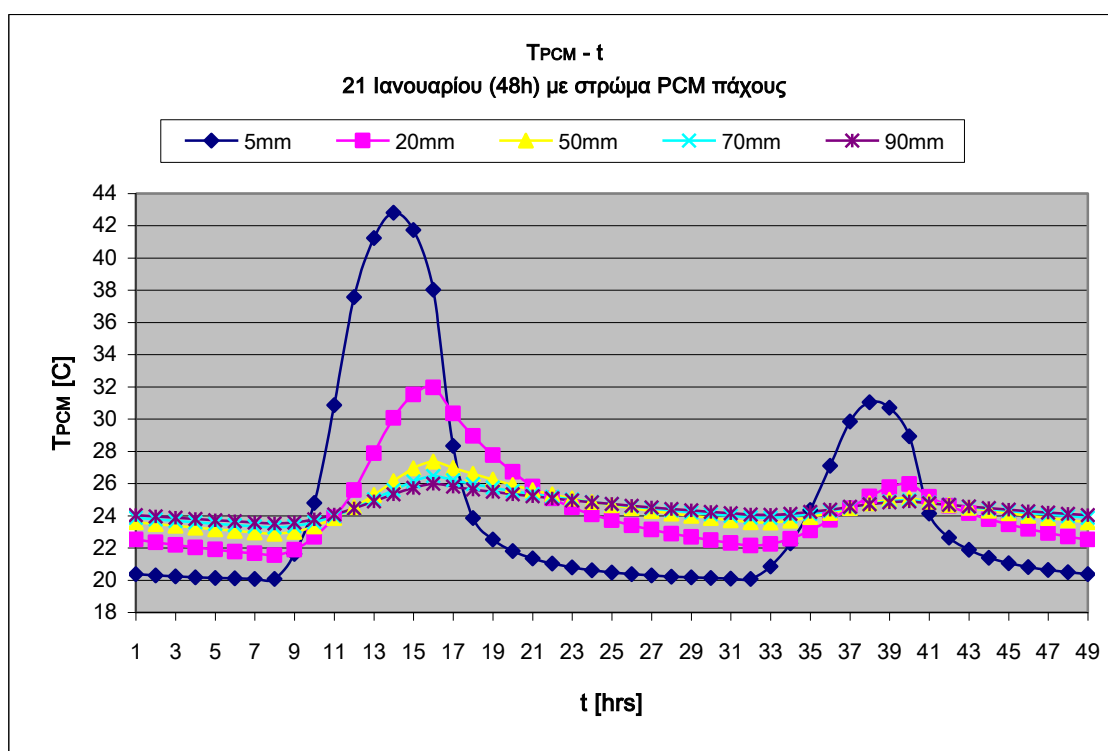
- m είναι η μάζα του PCM, η οποία δίνεται για κάθε πάχος του στρώματος του PCM στον πίνακα 7.5
- c_p είναι η ενεργός θερμοχωρητικότητα του PCM η μεταβολή της οποίας συναρτήσει της θερμοκρασίας δίνεται από τις εξισώσεις του τμήματος D της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης
- G_T είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου, η οποία δίνεται στον πίνακα 7.7 για κάθε ώρα $t=7 \div 18$ και των δύο 24ώρων που συνθέτουν το 48ώρο

Η διαδικασία που ακολουθείται προκειμένου να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τη διακύμανση της θερμοκρασίας του στρώματος PCM κάθε πάχους στην περίπτωση του 48ώρου είναι ανάλογη αυτής του 24ώρου. Ειδικότερα θα υποθέσουμε αρχικά μια θερμοκρασία για το στρώμα του PCM μια τυχαία ώρα και στη συνέχεια με βάση την παραπάνω σχέση θα υπολογίσουμε την θερμοκρασία του PCM την επόμενη ώρα. Αυτή η διαδικασία θα επαναληφθεί τόσες φορές μέχρι να υπολογισθούν οι θερμοκρασίες για όλες τις ώρες του 48ώρου και έπειτα θα επαναλάβουμε το 48ώρο έως ότου οι προκύπτουσες τιμές της θερμοκρασίας να συγκλίνουν.

Έτσι λοιπόν για κάθε πάχος του στρώματος PCM θα προκύψει μια κατανομή της θερμοκρασίας του συναρτήσει της ώρας $t=1 \div 49$ όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα του σχήματος 7.9. Παρατηρώντας το διάγραμμα βλέπουμε ότι τα μέγιστα του 2^{ου} 24ώρου είναι μικρότερα από τα αντίστοιχα μέγιστα του 1^{ου} 24ώρου για κάθε πάχος, γεγονός το οποίο οφείλεται στη μειωμένη ακτινοβολία που προσπίπτει στον τοίχο κατά το 2^ο 24ώρο. Η διαφορά αυτή των μέγιστων θερμοκρασιών μεταξύ του 1^{ου} και 2^{ου} 24ώρου μειώνεται όσο αυξάνει το πάχος του στρώματος του PCM. Για παράδειγμα όταν το πάχος του στρώματος PCM είναι 5mm η διαφορά της μέγιστης θερμοκρασίας μεταξύ του 1^{ου} και 2^{ου} 24ώρου είναι γύρω στους 12°C ενώ όταν το πάχος είναι 20mm η διαφορά αυτή είναι περίπου 6°C και

γενικά λοιπόν όπως αποδεικνύεται η μείωση αυτή συνεχίζεται όσο αυξάνει το πάχος, αλλά με πιο αργούς ρυθμούς.

Όσον αφορά τώρα τα συμπεράσματα που είχαν προκύψει για το 24ώρο βλέπουμε ότι επεκτείνονται και στην περίπτωση του 48ώρου. Ειδικότερα δηλαδή όσο αυξάνεται το πάχος του PCM έχουμε μείωση των μέγιστων θερμοκρασιών και αύξηση των ελάχιστων καθ' όλο το 48ώρο δηλαδή παρατηρείται μια μείωση του εύρους διακύμανσης της θερμοκρασίας καθώς και μια μετατόπιση της μέγιστης θερμοκρασίας προς το απόγευμα. Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι τα φαινόμενα που μόλις αναφέρθηκαν είναι εντονότερα στα μικρότερα πάχη το οποίο σημαίνει ότι τα οφέλη που επιτυγχάνονται αυξάνοντας το πάχος του στρώματος του PCM από τα 5mm στα 20mm είναι σαφώς περισσότερα από όταν αυξάνουμε π.χ. το πάχος από τα 50mm στα 70mm ή από τα 70mm στα 90mm, οι καμπύλες $T - t$ των οποίων μάλιστα σχεδόν ταυτίζονται.



Σχήμα 7.9: Διάγραμμα T_{PCM} συναρτήσει της ώρας $t=1 \div 49$ με παράμετρο το πάχος του PCM.

Με βάση λοιπόν τις παραπάνω παρατηρήσεις σε επόμενες μελέτες θα επικεντρωθούμε περισσότερο στα τρία μικρότερα πάχη του στρώματος PCM δηλαδή στα πάχη των 5, 20 και 50mm.

7.4 4^η Παραμετρική μελέτη ως προς την εσωτερική θερμοκρασία του αέρα του δωματίου

A. Σκοπός

Με την παρούσα μελέτη δίνεται η δυνατότητα να εξετάσουμε την επίδραση που έχει η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του δωματίου στη θερμοκρασιακή απόκριση και γενικά στη συμπεριφορά του στρώματος του PCM κατά τη διάρκεια μιας μέρας.

B. Επιλογή ημέρας

Η ημέρα διεξαγωγής της συγκεκριμένης μελέτης είναι η ίδια με αυτήν της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης δηλαδή αφορά την 2^η Ιανουαρίου.

C. Εύρεση ηλιακής ακτινοβολίας

Ο υπολογισμός όπως έχουμε ήδη αναφέρει της άμεσης G_b και διάχυτης G_d ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου για την Αθήνα γίνεται με τις σχέσεις (6.6) και (6.7) και αφού εξαρτάται μόνο από την επιλεγείσα ημέρα, η οποία δεν έχει αλλάξει τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι τα ίδια μ' αυτά της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης. Αναλογικά και η προσπίπτουσα ακτινοβολία G_T κεκλιμένου επιπέδου, η οποία προκύπτει από τη σχέση (6.5) είναι η ίδια μ' αυτή του τμήματος C της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης καθώς κανένα από τα μεγέθη που εμπεριέχονται στη σχέση αυτή δε μεταβλήθηκε. Έτσι λοιπόν οι τιμές της ακτινοβολίας G_T που θα χρησιμοποιηθούν στη μελέτη αυτή δίνονται στον πίνακα 7.4.

D. Επιλογή PCM

Ως υλικό αλλαγής φάσης θα χρησιμοποιηθεί το ίδιο υποθετικό υλικό μ' αυτό του τμήματος D της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης. Οι εξισώσεις τώρα της ενεργούς θερμοχωρητικότητας του υλικού αυτού συναρτήσει της θερμοκρασίας του όπως έχουν βρεθεί στην 1^η Παραμετρική μελέτη έχουν προκύψει με την αντικατάσταση των τιμών των χαρακτηριστικών του στις σχέσεις (6.17), (6.18), (6.19) και (6.20) και παραμένουν οι ίδιες και γι' αυτή τη μελέτη.

E. Εφαρμογή του ισολογισμού ενέργειας στο στρώμα PCM με παράμετρο την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου T_{in}

Ο ισολογισμός ενέργειας στη συγκεκριμένη μελέτη θα δοθεί και θα αναλυθεί μόνο για ένα πάχος του στρώματος του PCM και συγκεκριμένα για το πάχος των 5mm. Για τα άλλα δύο πάχη των 20 και 50mm, η διαδικασία είναι ακριβώς η ίδια και το μόνο που αλλάζει είναι στις ακόλουθες σχέσεις η μάζα του PCM. Έτσι λοιπόν για στρώμα PCM πάχους ίσο με 5mm, η μάζα του σύμφωνα με τον πίνακα 7.5 θα είναι $m=38,2125\text{kg}$. Επιλύοντας τώρα τη σχέση (6.13) ως προς T_{PCM} και αντικαθιστώντας

τα μεγέθη U , A_w και A_g , οι τιμές των οποίων έχουν δοθεί στο αντίστοιχο τμήμα Ε της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης και ισχύουν και σ' αυτή τη μελέτη καθώς και τη μάζα m προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση με βάση την οποία θα βρεθεί η θερμοκρασιακή απόκριση του στρώματος PCM πάχους 5mm για κάθε επιλεγείσα εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου.

$$T_{PCM} = T_{PCM}^{\circ} + \frac{1}{38,2125 \cdot c_p} \cdot \left[3600 \cdot 85\% \cdot G_T \cdot 3 - 3600 \cdot 5,33 \cdot 7,5 \cdot (T_{PCM}^{\circ} - T_{in}) \right] \quad (7.3)$$

όπου

- G_T είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου η οποία δίνεται όπως αναφέραμε και στο τμήμα C από τον πίνακα 7.4 για κάθε ώρα $t=7 \div 18$ της 21^{ης} Ιανουαρίου
- c_p είναι η ενεργός θερμοχωρητικότητα του PCM η οποία υπολογίζεται με βάση την εκάστοτε θερμοκρασία του PCM από τις σχέσεις στο τμήμα D της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης

Για $T_{in} = 23^{\circ}C$ η εξίσωση (7.3) διαμορφώνεται ως εξής:

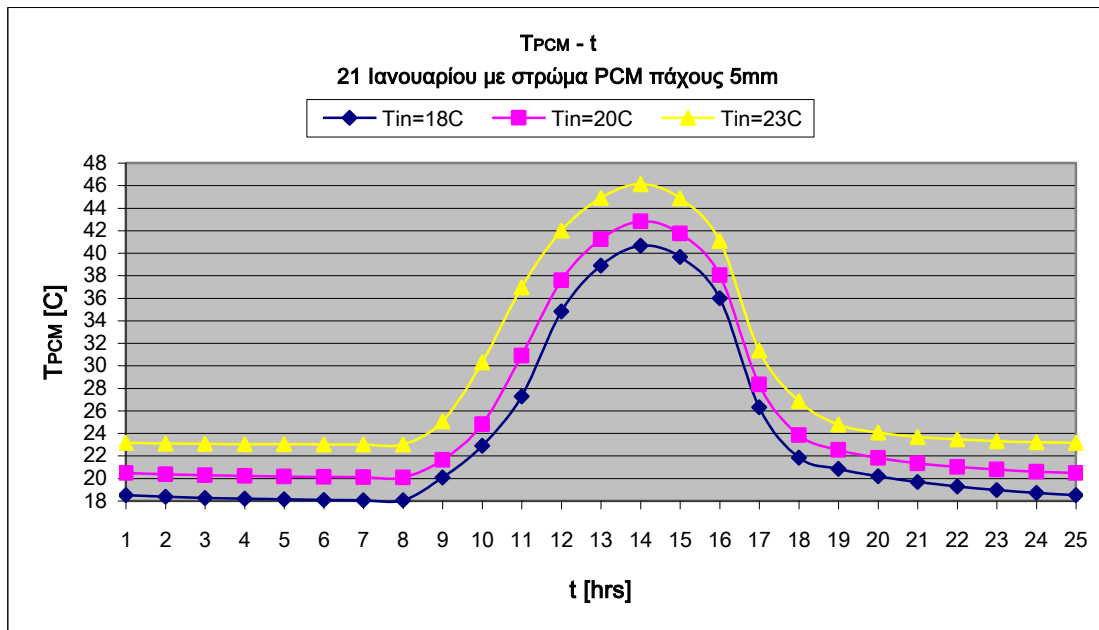
$$T_{PCM} = T_{PCM}^{\circ} + \frac{1}{38,2125 \cdot c_p} \cdot \left[3600 \cdot 85\% \cdot G_T \cdot 3 - 3600 \cdot 5,33 \cdot 7,5 \cdot (T_{PCM}^{\circ} - 23) \right] \quad (7.4)$$

Για $T_{in} = 18^{\circ}C$ η εξίσωση (7.3) διαμορφώνεται ως εξής:

$$T_{PCM} = T_{PCM}^{\circ} + \frac{1}{38,2125 \cdot c_p} \cdot \left[3600 \cdot 85\% \cdot G_T \cdot 3 - 3600 \cdot 5,33 \cdot 7,5 \cdot (T_{PCM}^{\circ} - 18) \right] \quad (7.5)$$

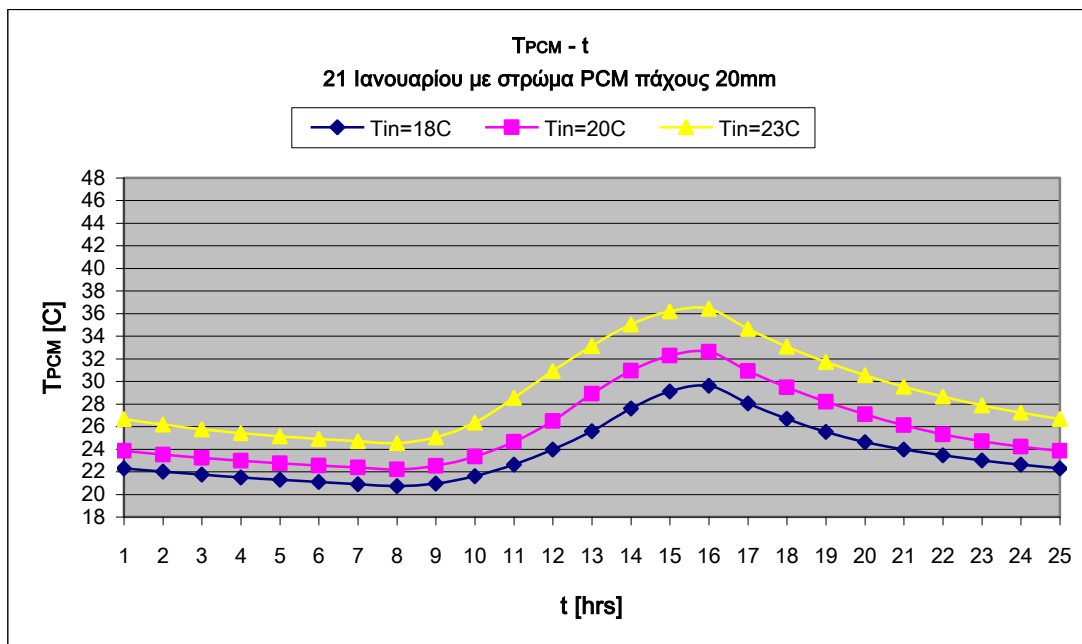
Μπορούμε να υπολογίσουμε τη θερμοκρασιακή απόκριση του PCM για κάθε μια από τις παραπάνω εσωτερικές θερμοκρασίες εφαρμόζοντας τις σχέσεις (7.4) και (7.5) αντίστοιχα για κάθε ώρα της 21^{ης} Ιανουαρίου με είσοδο κάθε φορά τη θερμοκρασία της προηγούμενης ώρας και επαναλαμβάνοντας στη συνέχεια το 24ώρο μέχρις ότου επιτευχθεί σύγκλιση των ευρισκόμενων τιμών. Επειδή όμως στην αρχή της διαδικασίας καμία θερμοκρασία δεν είναι γνωστή θα πρέπει για μια τυχαία ώρα της μέρας να θεωρηθεί μια τιμή ώστε να μπορέσει να εφαρμοστεί η παραπάνω μέθοδος όπως περιγράφεται αναλυτικά και στο τμήμα Ε της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης. Έτσι λοιπόν προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα του σχήματος 7.10 στο οποίο όμως εκτός από τις καμπύλες θερμοκρασίας - ώρας για το στρώμα PCM πάχους 5mm για $T_{in} = 18^{\circ}C$ και $T_{in} = 23^{\circ}C$ απεικονίζεται και η αντίστοιχη καμπύλη για $T_{in} = 20^{\circ}C$, η οποία προέκυψε κατά την 1^η Παραμετρική μελέτη και παρουσιάζεται και εδώ για λόγους σύγκρισης. Όσον αφορά τώρα τα πάχη στρώματος PCM των 20 και 50 mm

ακολουθώντας τη διαδικασία όπως αναλύθηκε προηγουμένως και χρησιμοποιώντας σχέσεις ανάλογες των (7.3), (7.4) και (7.5) όπου όμως $m=152,85$ και $382,125\text{kg}$ για το πάχος των 20 και 50mm αντίστοιχα προκύπτουν τα διαγράμματα των σχημάτων 7.11 και 7.12.



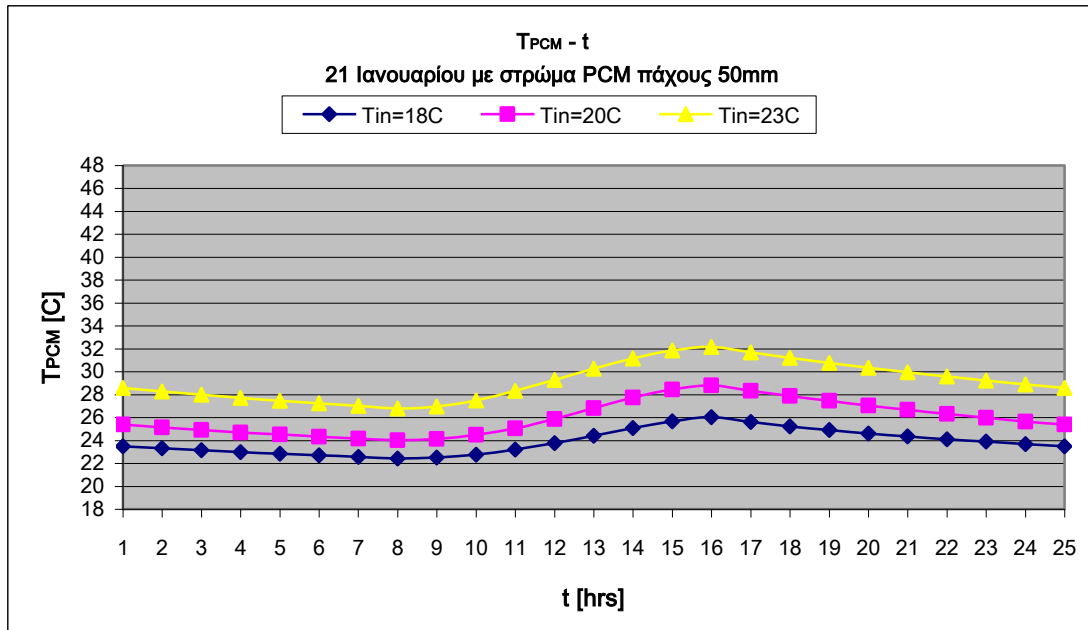
Σχήμα 7.10: Διάγραμμα T_{PCM} συναρτήσει της ώρας $t=1 \div 25$ με παράμετρο την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου

$T_{in} = 18, 20$ και 23°C για πάχος στρώματος PCM ίσο με 5mm.



Σχήμα 7.11: Διάγραμμα T_{PCM} συναρτήσει της ώρας $t=1 \div 25$ με παράμετρο την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου

$T_{in} = 18, 20$ και 23°C για πάχος στρώματος PCM ίσο με 20mm.



Σχήμα 7.12: Διάγραμμα T_{PCM} συναρτήσει της ώρας $t=1 \div 25$ με παράμετρο την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου $T_{in} = 18, 20$ και $23^\circ C$ για πάχος στρώματος PCM ίσο με 50mm.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν παρατηρώντας το διάγραμμα 7.10 είναι ότι καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του δωματίου, T_{in} η καμπύλη της θερμοκρασίας του στρώματος του PCM, T_{PCM} συναρτήσει της ώρας t μετατοπίζεται προς τα πάνω, το οποίο σημαίνει ότι η θερμοκρασία του PCM κάθε ώρα αυξάνει με την αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας και μάλιστα αναλογικά. Για παράδειγμα βλέπουμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του PCM στην περίπτωση που η T_{in} αυξάνεται από τους $20^\circ C$ στους $23^\circ C$ είναι μεγαλύτερη από όταν η T_{in} από $18^\circ C$ γίνεται $20^\circ C$. Αυτό συμβαίνει διότι καθώς αυξάνεται η εσωτερική θερμοκρασία T_{in} μικραίνει η διαφορά $T_{PCM}^\circ - T_{in}^\circ$, δηλαδή ουσιαστικά μικραίνει ο όρος της συναγωγής το οποίο συνεπάγεται με βάση τη σχέση (7.3) αύξηση της διαφοράς της θερμότητας λόγω ακτινοβολίας και λόγω συναγωγής, που υπάρχει μέσα στην παρένθεση και τελικά αύξηση της προκύπτουσας θερμοκρασίας του PCM.

Ένα ακόμα σημείο που πρέπει να αναφερθεί είναι ότι και στις τρεις καμπύλες του διαγράμματος 7.10 καμία από τις προκύπτουσες θερμοκρασίες του PCM δεν είναι μικρότερη της αντίστοιχης εσωτερικής θερμοκρασίας, το οποίο μπορεί να εξηγηθεί αν σκεφτεί κανείς ότι όταν η θερμοκρασία του PCM γίνεται μικρότερη της θερμοκρασίας του δωματίου, η οποία θεωρείται ότι παραμένει σταθερή τότε θερμότητα μεταφέρεται από το δωμάτιο στον τοίχο με συναγωγή, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του PCM την επόμενη ώρα. Το παραπάνω επαληθεύεται και από τη σχέση (7.3) με $T_{PCM}^\circ \leq T_{in}^\circ \Rightarrow T_{PCM}^\circ - T_{in}^\circ \leq 0$ δηλαδή ο όρος της

συναγωγής συνεισφέρει στην αύξηση της θερμοκρασίας του PCM. Τα συμπεράσματα αυτά αναλογικά ισχύουν όπως φαίνεται από τα σχήματα 7.11 και 7.12 και για τα πάχη των 20 και 50mm, το μόνο που αλλάζει είναι το εύρος διακύμανσης που μικραίνει όσο αυξάνεται το πάχος του στρώματος του PCM για κάθε εσωτερική θερμοκρασία. Η επίδραση όμως της μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας όταν το πάχος παραμένει σταθερό είναι όπως περιγράφηκε παραπάνω για το πάχος των 5mm.

7.5 5^η Παραμετρική μελέτη ως προς τα χαρακτηριστικά του PCM

A. Σκοπός

Μέσα από τη μελέτη αυτή θα εξετάσουμε την επίδραση των χαρακτηριστικών του υλικού αλλαγής φάσης στο ποσό της αποθηκευόμενης θερμότητας καθώς και στο ποσοστό εκμετάλλευσης της ικανότητας του υλικού αυτού να αποθηκεύει θερμότητα αλλάζοντας τη φάση του εντός ενός στενού προκαθορισμένου θερμοκρασιακού εύρους.

B. Επιλογή ημέρας

Η μέρα όπου πραγματοποιείται η συγκεκριμένη μελέτη είναι η 21^η Ιανουαρίου δηλαδή παραμένει η ίδια με όλες τις προηγούμενες μελέτες.

C. Εύρεση ηλιακής ακτινοβολίας

Εφόσον η ημέρα μελέτης δεν αλλάζει και η περιοχή τοποθεσίας του δωματίου παραμένει η Αθήνα η άμεση G_b και διάχυτη G_d ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου, που υπολογίζονται από τις σχέσεις (6.6) και (6.7) αντίστοιχα, προκύπτουν ίσες μ' αυτές της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης. Όσον αφορά τώρα την ακτινοβολία G_T κεκλιμένου επιπέδου με βάση τη σχέση (6.5) δεν υπάρχει καμία αλλαγή από τα αποτελέσματα του τμήματος C της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης όπως δίνονται στον πίνακα 7.4 καθώς η ανακλαστικότητα ρ έχει σταθερή τιμή 0,2 για συνηθισμένο έδαφος, ο λόγος R_b για κάθε ώρα $t=7 \div 18$ προκύπτει ο ίδιος αφού κανένα από τα μεγέθη ω (εξαρτάται μόνο από την ώρα t), ϕ (ισούται πάντα με $37,97^\circ$ για Αθήνα), δ (ισούται με $-20,14^\circ$ για $n=21$), γ (ισούται με 0° για νότιο προσανατολισμό) και β (ισούται με 90° για κατακόρυφη επιφάνεια) δεν έχει αλλάξει και οι τιμές των ακτινοβολιών G_b και G_d όπως εξηγήθηκε παραπάνω δεν παρουσιάζουν καμιά μεταβολή.

D. Επιλογή PCM

Στο τμήμα αυτό θα παρουσιασθούν τα χαρακτηριστικά των διαφόρων PCM, που θα εξετάσουμε στην παρούσα μελέτη καθώς και οι εξισώσεις της ενεργούς θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας για το καθένα. Για λόγους πληρότητας αλλά και σύγκρισης με τα νέα υλικά θα αναφερθεί και το PCM που

χρησιμοποιήθηκε στις προηγούμενες μελέτες, το οποίο θα λειτουργήσει και ως βάση καθώς τα νέα υλικά θα προκύψουν από το PCM αυτό όπως δόθηκε στο τμήμα D της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης με αλλαγή κάθε φορά ενός χαρακτηριστικού του.

D.1. Αρχικά όπως εξηγήθηκε και παραπάνω θα πρέπει να αναφερθεί πάλι το PCM που χρησιμοποιήθηκε στην 1^η Παραμετρική μελέτη, το οποίο έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- $H = 132,1 \text{ kJ/kg}$
- Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης $15 - 26^\circ\text{C}$
- $\rho = 1019 \text{ kg/m}^3$
- $c_{ps} = c_{pl} = 7000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
- $k = 0,8 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Οι εξισώσεις τώρα της $c_{p,\text{eff}}(T)$ που παρουσιάζονται στο τμήμα D της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης έχουν προκύψει όπως εξηγήθηκε με αντικατάσταση των χαρακτηριστικών του στις σχέσεις (6.17), (6.18), (6.19) και (6.20).

D.2. Στο τμήμα αυτό θα κατασκευασθούν δύο νέα PCM αλλάζοντας το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης σε σχέση με το αρχικό PCM.

D.2.1. Ένα νέο λοιπόν υποθετικό PCM για το οποίο θεωρούμε ένα θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης πιο στενό σε σχέση με αυτό του PCM του τμήματος D.1. θα παρουσιάζει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- $H = 132,1 \text{ kJ/kg}$
- Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης $18 - 24^\circ\text{C}$
- $\rho = 1019 \text{ kg/m}^3$
- $c_{ps} = c_{pl} = 7000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
- $k = 0,8 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Βλέπουμε ότι το μόνο που έχει αλλάξει είναι το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης. Αντικαθιστώντας έτσι λοιπόν τα χαρακτηριστικά αυτά στις σχέσεις (6.17), (6.18), (6.19) και (6.20) έχουμε

για $T \leq 18^\circ\text{C}$

$$\text{➤ } c_{p,\text{eff}}(T) = 7000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}, \text{ από τη σχέση (6.17)}$$

$$\text{για } 18^\circ\text{C} \leq T \leq 21 \left(= \frac{18 + 24}{2} \right)^\circ\text{C}$$

$$\text{➤ } c_{p,\text{eff}}(T) = 10011,11 \cdot (T - 18) + 7000, \text{ από τη σχέση (6.18) με } b = 6^\circ\text{C}$$

για $21^\circ\text{C} \leq T \leq 24^\circ\text{C}$

$$\text{➤ } c_{p,\text{eff}}(T) = -10011,11 \cdot (T - 21) + 37033,33, \text{ από τη σχέση (6.19)}$$

για $T \geq 24^\circ\text{C}$

➤ $c_{p,\text{eff}}(T) = 7000\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$, από τη σχέση (6.20)

D.2.2. Στη συνέχεια θα αυξήσουμε λίγο το θερμοκρασιακό εύρος σε σχέση με προηγουμένως καθώς και θα μετατοπίσουμε τα όρια του προς υψηλότερες θερμοκρασίες κυρίως λόγω των συμπερασμάτων που εξήχθησαν από την προηγούμενη μελέτη ότι δηλαδή οι θερμοκρασίες του PCM καθ' όλη τη διάρκεια της μέρας προκύπτουν πάντα μεγαλύτερες της επικρατούσας εσωτερικής θερμοκρασίας η οποία ισούται με 20°C για τη συγκεκριμένη μελέτη. Έτσι λοιπόν το νέο αυτό PCM θεωρούμε ότι έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- $H = 132,1\text{kJ/kg}$
- Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης $19 - 28^\circ\text{C}$
- $\rho = 1019\text{kg/m}^3$
- $c_{ps} = c_{pl} = 7000\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$
- $k = 0,8\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$

Με αντικατάσταση των χαρακτηριστικών αυτών στις εξισώσεις (6.17), (6.18), (6.19) και (6.20) προκύπτουν οι εξισώσεις ενεργούς θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας για το εν λόγω υλικό αλλαγής φάσης όπως φαίνονται στη συνέχεια.

για $T \leq 19^\circ\text{C}$

➤ $c_{p,\text{eff}}(T) = 7000\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$, από τη σχέση (6.17)

για $19^\circ\text{C} \leq T \leq 23,5 \left(= \frac{19 + 28}{2} \right)^\circ\text{C}$

➤ $c_{p,\text{eff}}(T) = 3412,346 \cdot (T - 19) + 7000$, από τη σχέση (6.18) με $b = 9^\circ\text{C}$

για $23,5^\circ\text{C} \leq T \leq 28^\circ\text{C}$

➤ $c_{p,\text{eff}}(T) = -3412,346 \cdot (T - 23,5) + 22355,56$, από σχέση (6.19)

για $T \geq 28^\circ\text{C}$

➤ $c_{p,\text{eff}}(T) = 7000\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$, από τη σχέση (6.20)

D.3. Εκτός όμως από το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης ένα άλλο χαρακτηριστικό, η επίδραση της μεταβολής του οποίου πρέπει να ελεγχθεί είναι η θερμοχωρητικότητα στερεάς και υγρής φάσης, c_{ps} και c_{pl} αντίστοιχα, για τις οποίες θεωρείται $c_{ps} = c_{pl}$. Μέχρι στιγμής η τιμή για τις δύο αυτές θερμοχωρητικότητες ήταν $7000\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$, μια ιδιαίτερος υψηλή τιμή και γι'

αυτό το λόγο θα επιλέξουμε για το εν λόγω PCM μια πιο μικρή τιμή. Άρα τα χαρακτηριστικά γι' αυτό το PCM θα διαμορφωθούν όπως φαίνεται παρακάτω

- $H = 132,1 \text{ kJ/kg}$
- Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης $15 - 26^\circ\text{C}$
- $\rho = 1019 \text{ kg/m}^3$
- $c_{ps} = c_{pl} = 4400 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
- $k = 0,8 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Όσον αφορά τώρα τις εξισώσεις της ενεργούς θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας για το PCM αυτό βρίσκονται όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, δηλαδή από τις σχέσεις (6.17), (6.18), (6.19) και (6.20) με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Έτσι λοιπόν έχουμε:

για $T \leq 15^\circ\text{C}$

➤ $c_{p,\text{eff}}(T) = 4400 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, από τη σχέση (6.17)

για $15^\circ\text{C} \leq T \leq 20,5 \left(= \frac{15 + 26}{2} \right)^\circ\text{C}$

➤ $c_{p,\text{eff}}(T) = 2766,94 \cdot (T - 15) + 4400$, από τη σχέση (6.18) με $b = 11^\circ\text{C}$

για $20,5^\circ\text{C} \leq T \leq 26^\circ\text{C}$

➤ $c_{p,\text{eff}}(T) = -2766,94 \cdot (T - 20,5) + 19618,18$, από τη σχέση (6.19)

για $T \geq 26^\circ\text{C}$

➤ $c_{p,\text{eff}}(T) = 4400 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, από τη σχέση (6.20)

D.4. Ένα ακόμη τελευταίο χαρακτηριστικό, η μελέτη της επίδρασης του οποίου παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι η θερμότητα αλλαγής φάσης, H . Επομένως το νέο υποθετικό PCM θα προκύψει με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- $H = 166,1 \text{ kJ/kg}$
- Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης $15 - 26^\circ\text{C}$
- $\rho = 1019 \text{ kg/m}^3$
- $c_{ps} = c_{pl} = 4400 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
- $k = 0,8 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Οι εξισώσεις $c_{p,\text{eff}}(T)$ για το συγκεκριμένο PCM, που βρίσκονται με αντικατάσταση των παραπάνω χαρακτηριστικών στις σχέσεις (6.17), (6.18), (6.19) και (6.20) παρατίθενται στη συνέχεια.

για $T \leq 15^\circ\text{C}$

➤ $c_{p,\text{eff}}(T) = 7000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, από τη σχέση (6.17)

$$\text{για } 15^{\circ}\text{C} \leq T \leq 20,5 \left(= \frac{15 + 26}{2} \right)^{\circ}\text{C}$$

$$\text{➤ } c_{p,\text{eff}}(T) = 2945,45 \cdot (T - 15) + 7000, \text{ από τη σχέση (6.18) με } b=11^{\circ}\text{C}$$

$$\text{για } 20,5^{\circ}\text{C} \leq T \leq 26^{\circ}\text{C}$$

$$\text{➤ } c_{p,\text{eff}}(T) = -2945,45 \cdot (T - 20,5) + 23200, \text{ από τη σχέση (6.19)}$$

$$\text{για } T \geq 26^{\circ}\text{C}$$

$$\text{➤ } c_{p,\text{eff}}(T) = 7000 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}, \text{ από τη σχέση (6.20)}$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι έχει πραγματοποιηθεί έλεγχος και ότι οι παραπάνω εξισώσεις της ενεργούς θερμοχωρητικότητας συναρτήσεως της θερμοκρασίας για κάθε PCM ικανοποιούν την τριγωνική μορφή της καμπύλης $c_{p,\text{eff}} - T$.

Ε. Εφαρμογή του ισολογισμού ενέργειας στο στρώμα PCM με παράμετρο τα χαρακτηριστικά του PCM

Ο κύριος λόγος που εφαρμόζεται ο ισολογισμός ενέργειας στη συγκεκριμένη μελέτη είναι για να υπολογίσουμε για κάθε ώρα t της 21^{ης} Ιανουαρίου τη θερμοκρασία T και την αντίστοιχη θερμοχωρητικότητα $c_{p,\text{eff}}$ του PCM και στη συνέχεια χαράσσοντας την καμπύλη $c_{p,\text{eff}} - T$ να ελέγξουμε κατά πόσον εκμεταλλευόμαστε την ιδιότητα του PCM να αποθηκεύει θερμότητα αλλάζοντας φάση. Αυτό μπορεί να γίνει αν για κάθε PCM σχεδιάσουμε μια καμπύλη αντίστοιχη του σχήματος 6.1, η οποία θα μας δείχνει το αν βρισκόμαστε μόνο στην διφασική περιοχή ή μπαίνουμε και στην περιοχή στερεάς ή υγρής φάσης. Το ιδανικό θα ήταν για ένα PCM να αποθηκεύει θερμότητα καλύπτοντας μόνο όλη τη διφασική περιοχή, γεγονός το οποίο θα σήμαινε πλήρους αξιοποίηση του υλικού αλλαγής φάσης.

Έτσι λοιπόν επιλύοντας ως προς T_{PCM} τον ισολογισμό ενέργειας για το στρώμα του PCM και αντικαθιστώντας τα μεγέθη U , T_{in} , A_w και A_g που παραμένουν σταθερά σ' όλη την παρακάτω διαδικασία και οι τιμές των οποίων είναι οι ίδιες μ' αυτές που δόθηκαν στο τμήμα Ε της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης προκύπτει και πάλι η σχέση (7.1):

$$T_{\text{PCM}} = T_{\text{PCM}}^{\circ} + \frac{1}{m \cdot c_p} \cdot \left[3600 \cdot 85\% \cdot G_T \cdot 3 - 3600 \cdot 5,33 \cdot 7,5 \cdot (T_{\text{PCM}}^{\circ} - 20) \right]$$

όπου

- m είναι η μάζα του PCM, η οποία δίνεται από τον πίνακα 7.5 ανάλογα με το πάχος του στρώματος του PCM. Οι τιμές του πίνακα αυτού ισχύουν για όλα τα PCM όπως παρουσιάζονται στο τμήμα D της παρούσας μελέτης καθώς παρατηρούμε ότι έχουν όλα την ίδια πυκνότητα ρ μ' αυτή του αρχικού PCM. Όσον αφορά τώρα τα πάχη που δίνονται στον πίνακα αυτόν θα αγνοήσουμε

τις τιμές των 70 και 90mm καθώς θεωρούνται ιδιαίτερα υψηλές και εξωπραγματικές για τα σημερινά δεδομένα και θα ασχοληθούμε με τα τρία μικρότερα πάχη των 5, 20 και 50mm όπως και σε προηγούμενη μελέτη

- c_p είναι η ενεργός θερμοχωρητικότητα του PCM που μελετάται κάθε φορά, οι εξισώσεις της οποίας συναρτήσει της θερμοκρασίας δίνονται στο τμήμα D της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης για το αρχικό PCM που χρησιμοποιήθηκε και ως βάση καθώς και στα τμήματα D.2.1., D.2.2., D.3. και D.4. για τα νέα PCM
- G_T είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου, οι τιμές της οποίας για κάθε ώρα $t=7 \div 18$ της 21^{ης} Ιανουαρίου δίνονται στον πίνακα 7.4

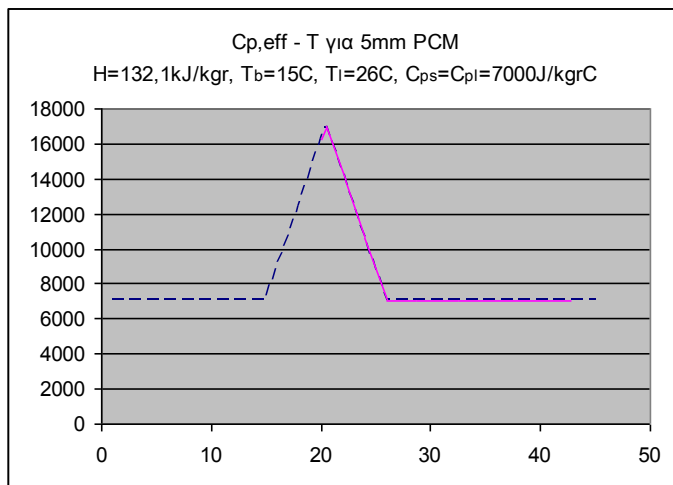
Στην παραπάνω όμως σχέση η θερμοκρασία την αρχική χρονική στιγμή, T_{PCM}° δεν είναι γνωστή, όπως και η θερμοχωρητικότητα του PCM, c_p η οποία είναι άμεση συνάρτηση της θερμοκρασίας T_{PCM}° . Επομένως θα πρέπει όπως έγινε και σε προηγούμενες μελέτες να υποθέσουμε μια θερμοκρασία για μια τυχαία ώρα της μέρας και έπειτα με βάση τη θερμοκρασία αυτή να υπολογίσουμε τη θερμοχωρητικότητα του PCM από σχετική εξίσωση. Γνωρίζοντας τώρα λοιπόν όλα τα μεγέθη της σχέσης (7.1) μπορούμε αντικαθιστώντας τα να βρούμε τη θερμοκρασία του PCM την επόμενη ώρα καθώς και τη θερμοχωρητικότητα που αντιστοιχεί σ' αυτή κ.ο.κ. Μ' αυτό τον τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία του PCM καθώς και τη θερμοχωρητικότητα που της αντιστοιχεί για όλες τις ώρες της 21^{ης} Ιανουαρίου και επαναλαμβάνοντας στη συνέχεια το 24ώρο μέχρις ότου συγκλίνει εξασφαλίζουμε και την ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων από την αρχική αυθαίρετη θερμοκρασία.

Η διαδικασία αυτή θα πρέπει να εφαρμοστεί για καθένα από τα τρία πάχη κάθε PCM. Κάθε φορά θα προκύπτει και ένα αντίστοιχο διάγραμμα που θα απεικονίζει με διακεκομμένη γραμμή την πλήρη καμπύλη $c_{p,eff} - T$ του PCM, που εξετάζεται καθώς και με ένα άλλο πιο έντονο χρώμα το τμήμα της καμπύλης που καλύπτει το εκάστοτε πάχος αυτού του PCM υπό την επίδραση των συνθηκών όπως αυτές καθορίστηκαν για τη συγκεκριμένη μελέτη. Επίσης σε κάθε τέτοιο διάγραμμα θα πραγματοποιείται και υπολογισμός της αποθηκευόμενης θερμότητας, η οποία ισούται με το εμβαδόν της περιοχής που περικλείεται από την καμπύλη έντονου χρώματος και από τον οριζόντιο άξονα. Η περιοχή αυτή ενώ εκ των προτέρων φαίνεται άγνωστης γεωμετρίας ουσιαστικά είναι σύνθεση τραπεζίων και ορθογωνίων τα εμβαδά των οποίων δίνονται από τους ακόλουθους τύπους:

$$E_{\text{ορθογωνίου}} = (\text{βάση}) \cdot (\text{ύψος})$$

$$E_{\text{τραπεζίου}} = (\text{Βάση} + \text{βάση}) \cdot \frac{\text{ύψος}}{2}$$

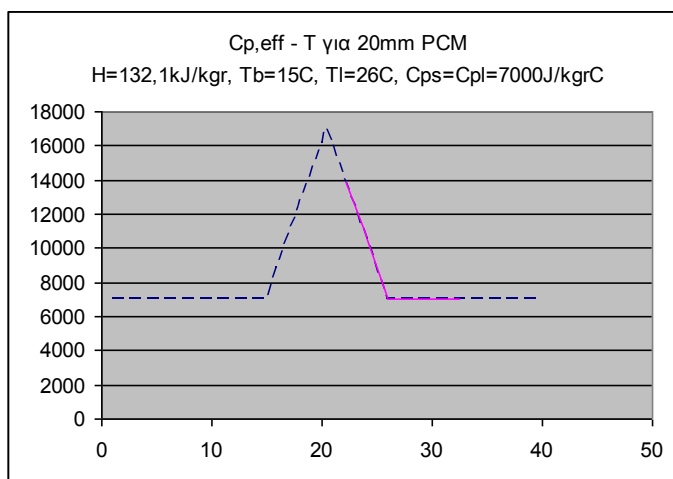
Για το PCM: $H = 132,1 \text{ kJ/kg}$, $T_b = 15^\circ \text{C}$, $T_l = 26^\circ \text{C}$, $c_{ps} = c_{pl} = 7000 \text{ J/kg}^\circ \text{C}$ του τμήματος D.1. έχουμε:



Σχήμα 7.13: Διάγραμμα $C_{p,eff} - T$ για πάχος 5mm PCM του τμήματος D.1.

αποθηκευμένη ενέργεια=

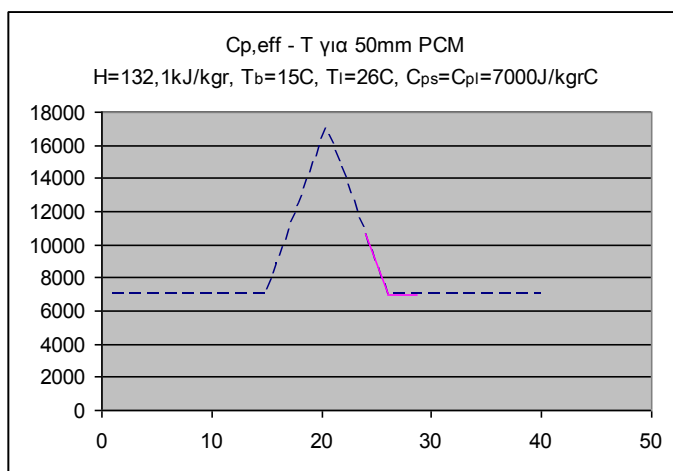
$$= (16246,93 + 17018,18) \cdot \frac{(20,5 - 20,08)}{2} + (17018,18 + 7000) \cdot \frac{(26 - 20,5)}{2} + 7000 \cdot (42,81 - 26) = 190,76 \text{ kJ / kgr}$$



Σχήμα 7.14: Διάγραμμα $C_{p,eff} - T$ για πάχος 20mm PCM του τμήματος D.1.

αποθηκευμένη ενέργεια=

$$= (13916,37 + 7000) \cdot \frac{(26 - 22,2)}{2} + 7000 \cdot (32,62 - 26) = 86,05 \text{ kJ / kgr}$$



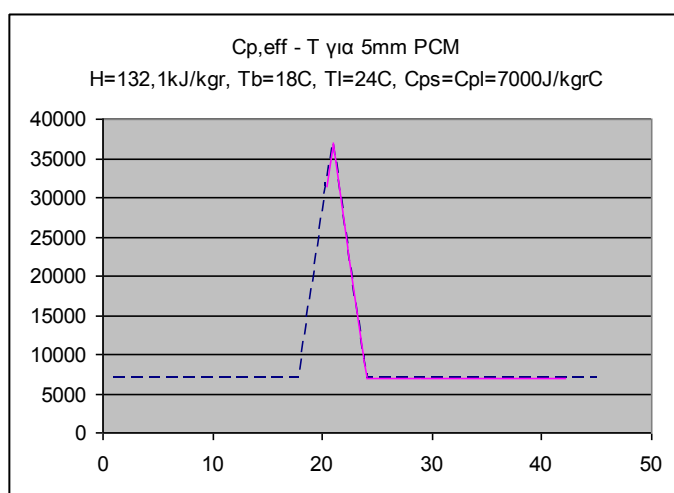
Σχήμα 7.15: Διάγραμμα $C_{p,eff} - T$ για πάχος 50mm PCM του τμήματος D.1.

αποθηκευμένη ενέργεια=

$$= (10609,89 + 7000) \cdot \frac{(26 - 24,02)}{2} + 7000 \cdot (28,8 - 26) = 37,02 \text{ kJ / kgr}$$

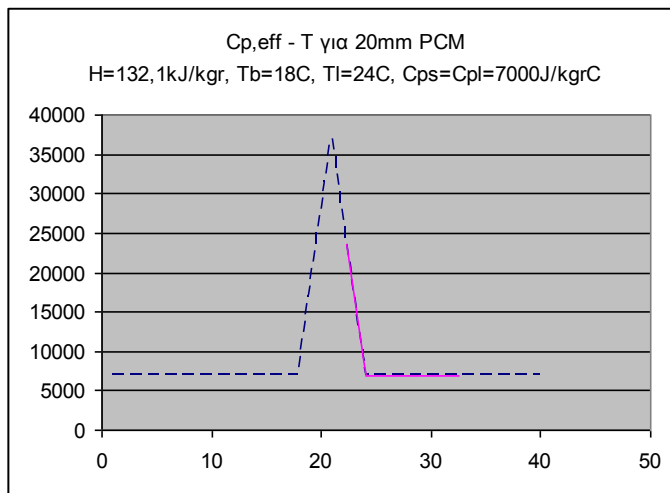
Παρατηρώντας τα διαγράμματα των σχημάτων 7.13, 7.14 και 7.15 καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται το πάχος του στρώματος PCM αξιοποιείται όλο και λιγότερο η ικανότητα του PCM να αποθηκεύει θερμότητα αλλάζοντας φάση. Για παράδειγμα βλέπουμε ότι όταν το PCM έχει πάχος 5mm παρόλο που υπάρχουν αρκετές τιμές θερμοκρασίας στην περιοχή της υγρής φάσης καλύπτεται και ένα μεγάλο μέρος της καμπύλης στη διφασική περιοχή περισσότερο από το μισό σ' αντίθεση με το πάχος των 50mm, όπου καλύπτεται ένα πολύ μικρό μέρος της καμπύλης στην περιοχή αλλαγής φάσης. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από τις τιμές που προκύπτουν για την αποθηκευόμενη θερμότητα, η οποία ακολουθεί μια συνεχώς φθίνουσα πορεία καθώς το πάχος αυξάνει και το οποίο οφείλεται κυρίως στη μικρή τιμή της θερμικής αγωγιμότητας k του PCM, η οποία δεν επιτρέπει στη θερμότητα να προχωρήσει στα μεγαλύτερα πάχη. Ακόμα πρέπει να σημειωθεί ότι και στα τρία διαγράμματα η καμπύλη $c_{p,eff} - T$ καλύπτει ένα μέρος της διφασικής περιοχής και επεκτείνεται έως και την περιοχή της υγρής φάσης, σε καμία περίπτωση όμως δεν προσεγγίζει την περιοχή στερεάς φάσης.

Για το PCM: $H = 132,1 \text{kJ/kg}$, $T_b = 18^\circ\text{C}$, $T_l = 24^\circ\text{C}$, $c_{ps} = c_{pl} = 7000 \text{J/kg}^\circ\text{C}$ του τμήματος D.2.1. έχουμε:



$$\begin{aligned}
 \text{αποθηκευμένη ενέργεια} &= \\
 &= \left(31443,1 + 37033,33 \right) \cdot \frac{(21 - 20,44)}{2} \\
 &+ \left(37033,33 + 7000 \right) \cdot \frac{(24 - 21)}{2} \\
 &+ 7000 \cdot (42,29 - 24) \\
 &= 213,22 \text{ kJ / kg}
 \end{aligned}$$

Σχήμα 7.16: Διάγραμμα $C_{p,eff} - T$ για πάχος 5mm PCM του τμήματος D.2.1.



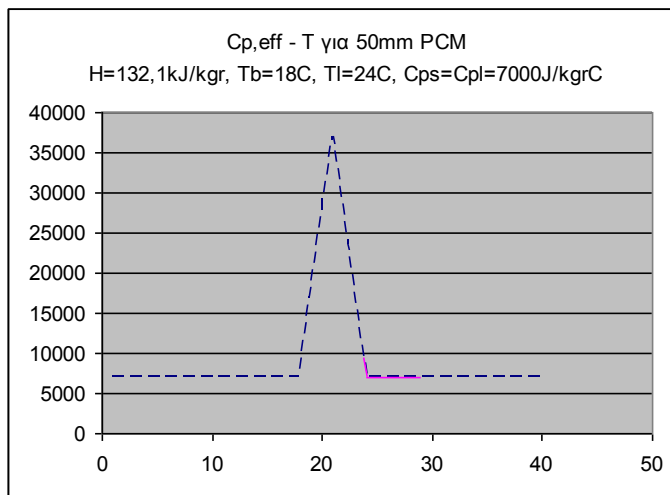
αποθηκευμένη ενέργεια=

$$= (23547,98 + 7000) \cdot \frac{(24 - 22,35)}{2}$$

$$+ 7000 \cdot (32,6 - 24)$$

$$= 85,42 \text{ kJ / kgr}$$

Σχήμα 7.17: Διάγραμμα $C_{p,eff}$ – T για πάχος 20mm PCM του τμήματος D.2.1.



αποθηκευμένη ενέργεια=

$$= (9477,09 + 7000) \cdot \frac{(24 - 23,75)}{2}$$

$$+ 7000 \cdot (29,06 - 24)$$

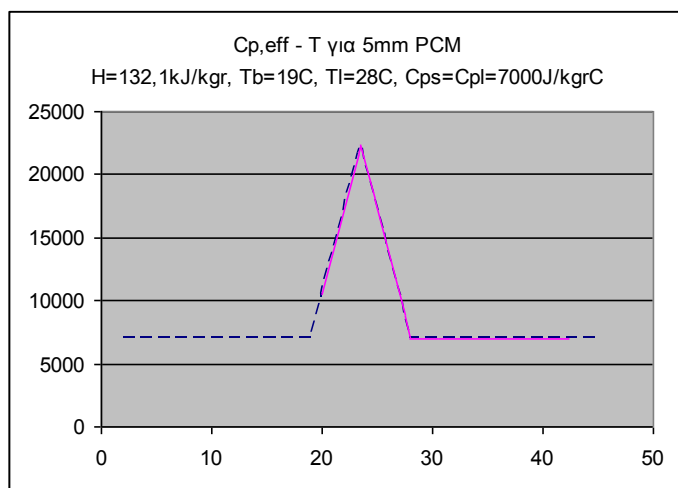
$$= 37,44 \text{ kJ / kgr}$$

Σχήμα 7.18: Διάγραμμα $C_{p,eff}$ – T για πάχος 50mm PCM του τμήματος D.2.1.

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα των σχημάτων 7.13 και 7.16 που αναφέρονται στο πάχος των 5mm και για τα δύο αυτά PCM παρατηρούμε ότι το PCM με το μειωμένο θερμοκρασιακό εύρος, $18 \div 24^\circ\text{C}$ παρουσιάζει μεγαλύτερη αποθηκευμένη θερμότητα παρόλο που πολλές ώρες του 24ώρου παρουσιάζει θερμοκρασίες στην περιοχή της υγρής φάσης. Η μεγαλύτερη αποθηκευμένη θερμότητα εξηγείται από το γεγονός ότι καλύπτεται μεγαλύτερο τμήμα της διακεκομμένης καμπύλης στη διφασική περιοχή καθώς και αν σκεφτεί κανείς ότι παρόλο που η διφασική περιοχή στενεύει, το εμβαδόν της θα πρέπει να παραμείνει το ίδιο με το αντίστοιχο του αρχικού PCM καθώς η θερμότητα αλλαγής φάσης, H δεν έχει αλλάξει τιμή, το οποίο συνεπάγεται ότι για κάθε θερμοκρασία κοντά μόνο όμως στην κορυφή του τριγώνου της διφασικής περιοχής θα έχουμε αρκετά μεγαλύτερη τιμή της ενεργούς θερμοχωρητικότητας. Η

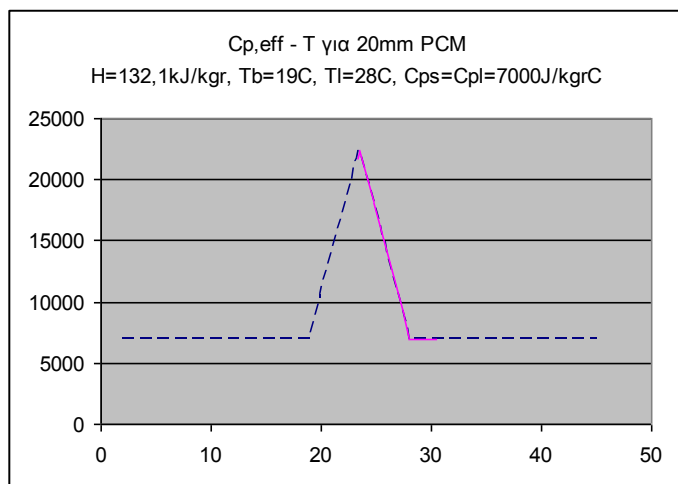
παρατήρηση αυτή ισχύει και για τα μεγαλύτερα πάχη των 20 και 50mm όμως σ' αυτές τις περιπτώσεις οι «απώλειες» που υπάρχουν από την αύξηση των σημείων στην περιοχή της υγρής φάσης καθώς και το γεγονός ότι τα περισσότερα σημεία της διφασικής περιοχής δε βρίσκονται πλησίον της κορυφής του τριγώνου, όπως συμβαίνει για το πάχος των 5mm οδηγεί σε κατά πάσα πιθανότητα μικρότερες ή λίγο μεγαλύτερες θερμοχωρητικότητες, το οποίο έχει σαν συνέπεια οι τιμές της αποθηκευόμενης θερμότητας για τα πάχη των 20 και 50mm του PCM με θερμοκρασιακό εύρος, $18 \div 24^\circ\text{C}$ να είναι παραπλήσιες των αντίστοιχων του PCM με θερμοκρασιακό εύρος, $15 \div 26^\circ\text{C}$.

Για το PCM: $H = 132,1\text{kJ/kg}$, $T_b = 19^\circ\text{C}$, $T_l = 28^\circ\text{C}$, $c_{ps} = c_{pl} = 7000\text{J/kg}^\circ\text{C}$ του τμήματος D.2.2. έχουμε:



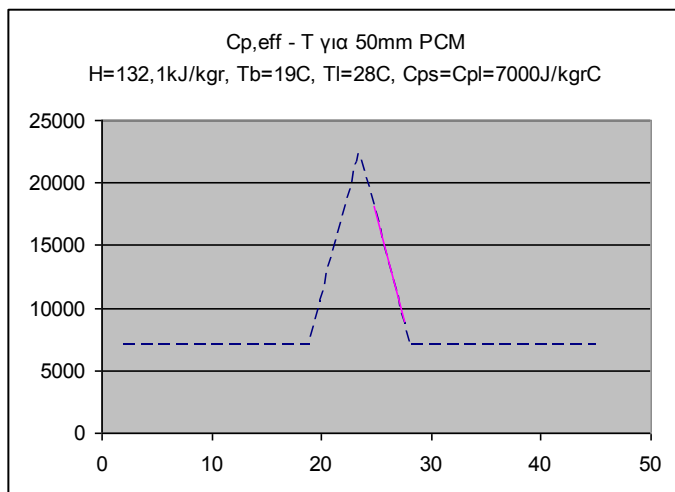
Σχήμα 7.19: Διάγραμμα $C_{p,eff} - T$ για πάχος 5mm PCM του τμήματος D.2.2.

$$\begin{aligned}
 \text{αποθηκευμένη ενέργεια} &= \\
 &= \left(10548,01 + 22355,56 \right) \cdot \frac{(23,5 - 20,04)}{2} \\
 &\quad + \left(22355,56 + 7000 \right) \cdot \frac{(28 - 23,5)}{2} \\
 &\quad + 7000 \cdot (42,46 - 28) \\
 &= 224,19 \text{ kJ / kg}
 \end{aligned}$$



Σχήμα 7.20: Διάγραμμα $C_{p,eff} - T$ για πάχος 20mm PCM του τμήματος D.2.2.

$$\begin{aligned}
 \text{αποθηκευμένη ενέργεια} &= \\
 &= \left(21669,55 + 22355,56 \right) \cdot \frac{(23,5 - 23,3)}{2} \\
 &\quad + \left(22355,56 + 7000 \right) \cdot \frac{(28 - 23,5)}{2} \\
 &\quad + 7000 \cdot (30,53 - 28) \\
 &= 88,22 \text{ kJ / kg}
 \end{aligned}$$



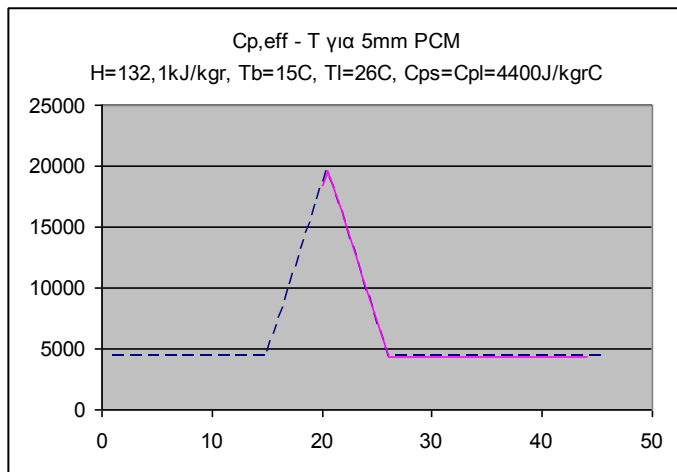
$$\begin{aligned} \text{αποθηκευμένη ενέργεια} &= \\ &= (18080,56 + 8752,46) \cdot \frac{(27,49 - 24,75)}{2} \\ &= 36,68 \text{ kJ / kgr} \end{aligned}$$

Σχήμα 7.21: Διάγραμμα $C_{p,eff} - T$ για πάχος 50mm PCM του τμήματος D.2.2.

Σκοπός αυτής της αλλαγής του θερμοκρασιακού εύρους είναι όλο και περισσότερες ώρες της μέρας να έχουμε θερμοκρασίες του PCM στη διφασική περιοχή, γεγονός το οποίο επιτεύχθηκε και για τα τρία πάχη του στρώματος PCM. Παρατηρούμε όμως ότι ενώ οι τιμές της αποθηκευμένης θερμότητας αυξάνουν για τα πάχη των 5 και 20mm σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές του PCM του τμήματος D.2.1 δε συμβαίνει το ίδιο για το πάχος των 50mm για το οποίο η αποθηκευμένη θερμότητα μειώθηκε ελαφρώς. Η σταθερότητα που σημειώνεται στην τιμή της αποθηκευόμενης θερμότητας όταν έχουμε στρώμα PCM πάχους 50mm με τις μέχρι τώρα μεταβολές της να μην ξεπερνούν το 1kJ/kgg φανερώνει την ακαμψία ενός τέτοιου πάχους PCM, το οποίο μην επιτρέποντας στη θερμότητα να προχωρήσει αποκτά χαρακτηριστικά μονωτικού υλικού. Όσον αφορά στη συνέχεια το πάχος των 5mm του εξεταζόμενου PCM η καμπύλη $c_{p,eff} - T$, η οποία φαίνεται στο σχήμα 7.19 προσεγγίζει την περιοχή στερεάς φάσης και επεκτείνεται ταυτόχρονα έως και την περιοχή της υγρής φάσης, γεγονός που εξηγεί και μια τέτοια αύξηση της αποθηκευμένης θερμότητας. Αναλογικά όπως βλέπουμε προκύπτει και για το πάχος των 20mm του PCM, η καμπύλη του οποίου καλύπτει μεγαλύτερο για την ακρίβεια περισσότερο από το μισό τμήμα της διακεκομμένης πλήρους καμπύλης στη διφασική περιοχή σε σχέση με το PCM του τμήματος D.2.1.

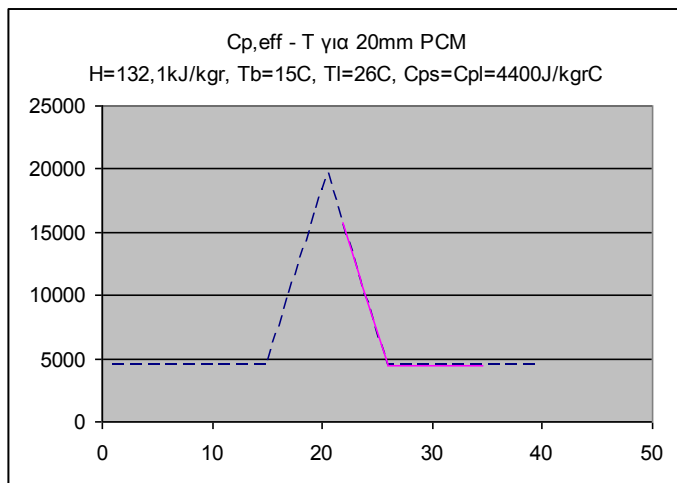
Γενικά λοιπόν βλέπουμε ότι μια μεταβολή στο θερμοκρασιακό εύρος, b δεν έχει καθορισμένα αποτελέσματα όπως φαίνεται και από τις σχέσεις (6.18) και (6.19), που μας δίνουν τη c_p του PCM συναρτήσει της T στη διφασική περιοχή και επηρεάζει διάφορους παράγοντες, η συσχέτιση των οποίων μπορεί να μεταβάλλει τις αρχικές εντυπώσεις. Το σίγουρο όμως είναι ότι τα μικρότερα πάχη πλεονεκτούν έναντι των μεγαλύτερων, που δεν μπορούν όπως αποδείχθηκε να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά.

Για το PCM: $H = 132,1 \text{ kJ/kg}$, $T_b = 15^\circ\text{C}$, $T_l = 26^\circ\text{C}$, $c_{ps} = c_{pl} = 4400 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ του τμήματος D.3. έχουμε:



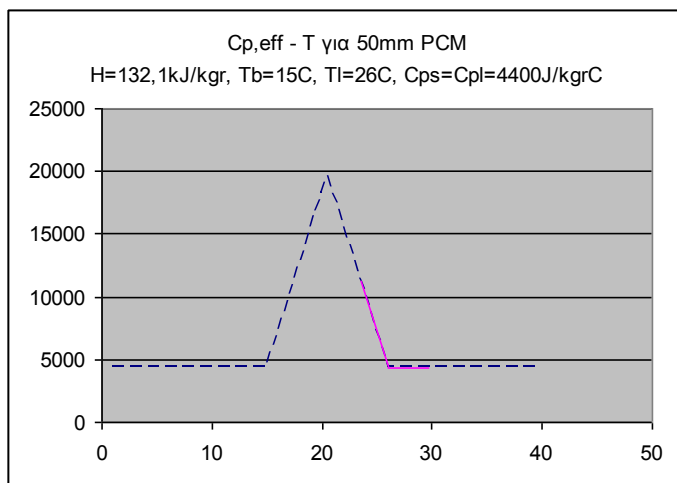
Σχήμα 7.22: Διάγραμμα $C_{p,eff} - T$ για πάχος 5mm PCM του τμήματος D.3.

$$\begin{aligned} \text{αποθηκευμένη ενέργεια} &= \\ &= \left(18429,57 + 19618,17 \right) \cdot \frac{(20,5 - 20,07)}{2} \\ &\quad + \left(19618,17 + 4400 \right) \cdot \frac{(26 - 20,5)}{2} \\ &\quad + 4400 \cdot (44,13 - 26) \\ &= 153,99 \text{ kJ / kg} \end{aligned}$$



Σχήμα 7.23: Διάγραμμα $C_{p,eff} - T$ για πάχος 20mm PCM του τμήματος D.3.

$$\begin{aligned} \text{αποθηκευμένη ενέργεια} &= \\ &= \left(15724,28 + 4400 \right) \cdot \frac{(26 - 21,91)}{2} \\ &\quad + 4400 \cdot (34,73 - 26) \\ &= 79,59 \text{ kJ / kg} \end{aligned}$$

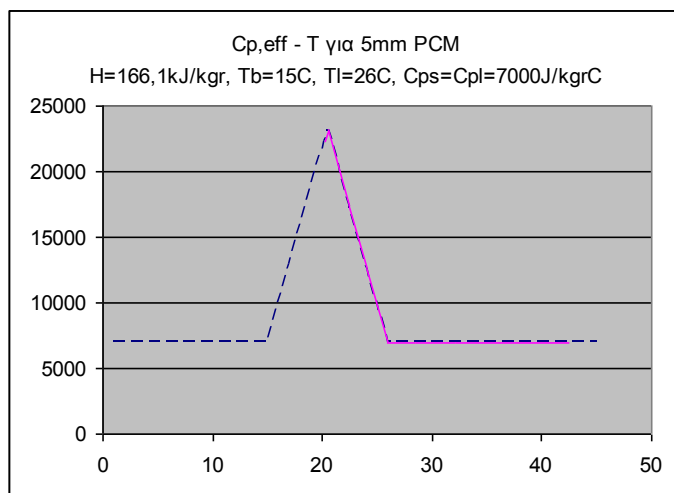


Σχήμα 7.24: Διάγραμμα $C_{p,eff} - T$ για πάχος 50mm PCM του τμήματος D.3.

$$\begin{aligned} \text{αποθηκευμένη ενέργεια} &= \\ &= \left(11201,36 + 4400 \right) \cdot \frac{(26 - 23,54)}{2} \\ &\quad + 4400 \cdot (29,73 - 26) \\ &= 35,6 \text{ kJ / kg} \end{aligned}$$

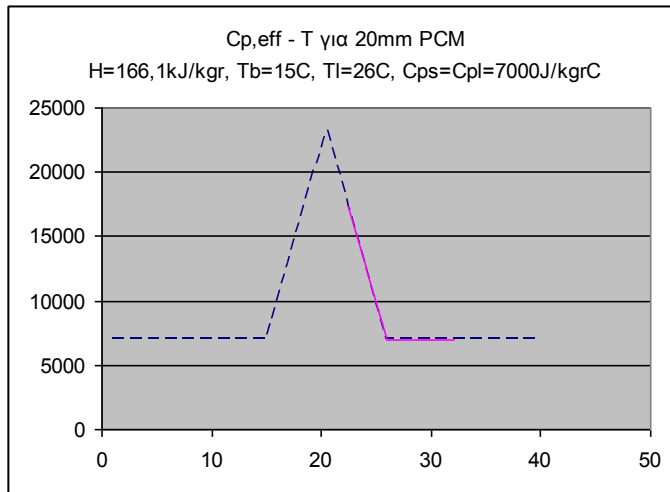
Μετά από παρατήρηση των διαγραμμάτων των σχημάτων 7.22, 7.23 και 7.24 και σύγκριση με τα αντίστοιχα διαγράμματα των σχημάτων 7.13, 7.14 και 7.15 δεν μπορούμε να βγάλουμε κάποιο συμπέρασμα για το ποιο από τα δύο PCM αξιοποιεί καλύτερα την ικανότητα του να αποθηκεύει θερμότητα αλλάζοντας φάση καθώς για παράδειγμα στα σχήματα 7.13 και 7.22, που αναφέρονται στο ίδιο πάχος των 5mm, κάθε PCM φαίνεται ότι καλύπτει το ίδιο ποσοστό της αντίστοιχης διακεκομμένης πλήρους καμπύλης $c_{p,eff} - T$ στη διφασική περιοχή. Βλέπουμε όμως ότι η αποθηκευμένη θερμότητα μειώνεται στο PCM όπου έχουμε μικρότερη θερμοχωρητικότητα στερεάς και υγρής φάσης και μάλιστα όσο πιο μικρό είναι το πάχος τόσο μεγαλύτερη είναι και η μείωση της αποθηκευόμενης θερμότητας. Η κύρια αιτία αυτής της μείωσης είναι η μειωμένη αποθήκευση αισθητής θερμότητας όταν το PCM βρίσκεται σε υγρή κατάσταση σε σχέση με το αρχικό PCM, 1kgρ μάζας του οποίου αποθήκευε 7000J με αύξηση της θερμοκρασίας του μόνο κατά 1°C ενώ τώρα το εν λόγω PCM αποθηκεύει 4400J δηλαδή αποθηκεύονται λιγότερα 2600J. Η διαφορά που υπάρχει στη συνέχεια στη θερμότητα που αποθηκεύεται με αλλαγή φάσης του υλικού δεν είναι αξιοσημείωτη γεγονός που εξηγείται αν σκεφτεί κανείς το πώς μεταβάλλεται το τρίγωνο που παριστά τη διφασική περιοχή, δηλαδή με το $c_{p,eff}$ κάποιων θερμοκρασιών να αυξάνεται και κάποιων άλλων να μειώνεται καθώς και αν λάβουμε υπόψη μας και την αρχική παρατήρηση ότι καλύπτεται περίπου ίδιο ποσοστό της διακεκομμένης πλήρους καμπύλης $c_{p,eff} - T$ στη διφασική περιοχή.

Για το PCM: $H = 166,1 \text{kJ/kgρ}$, $T_b = 15^\circ\text{C}$, $T_l = 26^\circ\text{C}$, $c_{ps} = c_{pl} = 7000 \text{J/kgρ}^\circ\text{C}$ του τμήματος D.4. έχουμε:



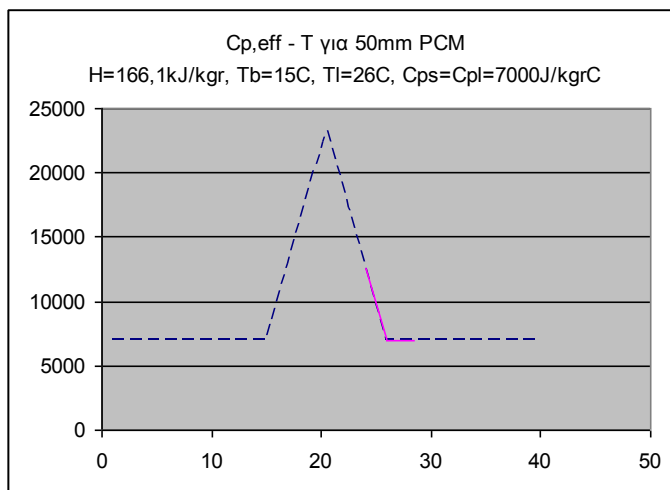
Σχήμα 7.25: Διάγραμμα $C_{p,eff} - T$ για πάχος 5mm PCM του τμήματος D.4.

$$\begin{aligned}
 \text{αποθηκευμένη ενέργεια} &= \\
 &= \left(22361,46 + 23199,98 \right) \cdot \frac{(20,5 - 20,22)}{2} \\
 &+ (23199,98 + 7000) \cdot \frac{(26 - 20,5)}{2} \\
 &+ 7000 \cdot (42,52 - 26) \\
 &= 205,2 \text{ kJ / kgρ}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 \text{αποθηκευμένη ενέργεια} &= \\
 &= \left(17311,19 + 7000\right) \cdot \frac{(26 - 22,5)}{2} \\
 &\quad + 7000 \cdot (32,29 - 26) \\
 &= 86,57 \text{ kJ / kgr}
 \end{aligned}$$

Σχήμα 7.26: Διάγραμμα $C_{p,eff} - T$ για πάχος 20mm PCM του τμήματος D.4.



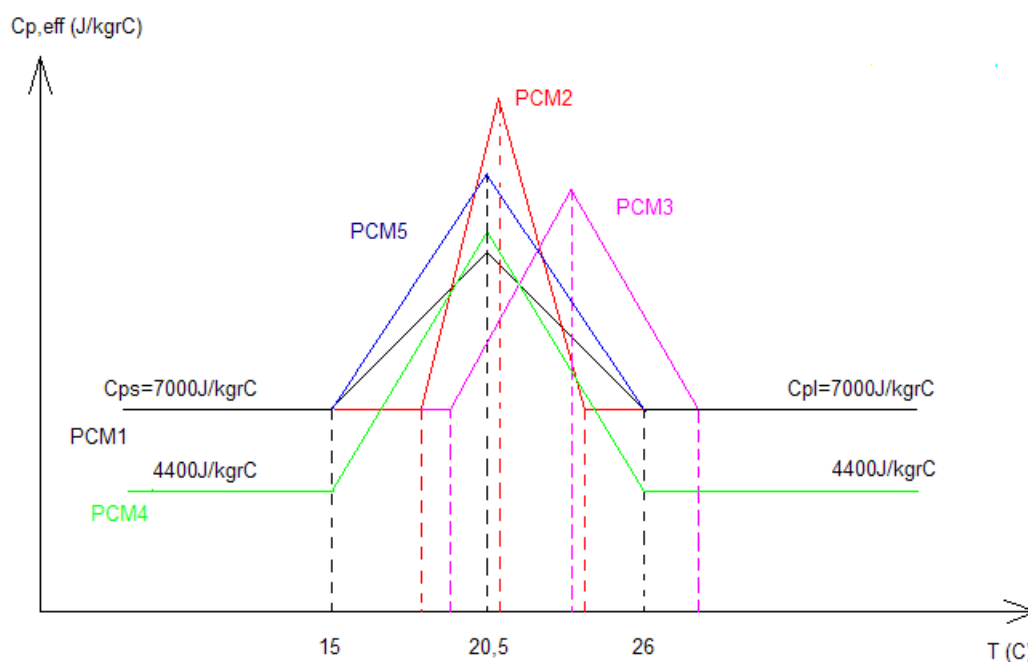
$$\begin{aligned}
 \text{αποθηκευμένη ενέργεια} &= \\
 &= \left(12577 + 7000\right) \cdot \frac{(26 - 24,11)}{2} \\
 &\quad + 7000 \cdot (28,6 - 26) \\
 &= 36,64 \text{ kJ / kgr}
 \end{aligned}$$

Σχήμα 7.27: Διάγραμμα $C_{p,eff} - T$ για πάχος 50mm PCM του τμήματος D.4.

Αν συγκρίνουμε το διάγραμμα του σχήματος 7.25 με το αντίστοιχο του σχήματος 7.13 παρατηρούμε ότι παρόλο που η καμπύλη $c_{p,eff} - T$ του εκάστοτε PCM καλύπτει σχεδόν ίδιο ποσοστό της διακεκομμένης πλήρους καμπύλης στη διφασική περιοχή η αποθηκευμένη θερμότητα είναι αισθητά μεγαλύτερη για το PCM με τη μεγαλύτερη θερμότητα αλλαγής φάσης. Αυτό συμβαίνει διότι αφού αυξάνει η H με θερμοκρασιακό εύρος και θερμοχωρητικότητες στερεάς και υγρής φάσης να μην αλλάζουν θα αυξηθεί και το εμβαδόν που περικλείεται από το σχηματιζόμενο τρίγωνο της διφασικής περιοχής, το οποίο για να συμβεί θα πρέπει να επεκταθεί προς μεγαλύτερες θερμοχωρητικότητες, δηλαδή κάθε θερμοκρασία της διφασικής περιοχής θα αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη ενεργό θερμοχωρητικότητα. Με άλλα λόγια λοιπόν κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°C στη διφασική περιοχή του διαγράμματος του σχήματος 7.25 έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη αποθηκευμένη θερμότητα από το διάγραμμα του σχήματος 7.13.

Η παρατήρηση αυτή ισχύει και για τα μεγαλύτερα πάχη των 20 και 50mm οι μεταβολές της αποθηκευμένης θερμότητας των οποίων όμως δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές καθώς όπως βλέπουμε και στα διαγράμματα των σχημάτων 7.26 και 7.27 αντίστοιχα τα περισσότερα σημεία της διφασικής περιοχής δεν βρίσκονται πλησίον της κορυφής του τριγώνου μ' αποτέλεσμα μικρότερη αύξηση της θερμοχωρητικότητας και επίσης λόγω του γεγονότος ότι έχουμε κάποιο μικρό περιορισμό του εύρους διακύμανσης της θερμοκρασίας σε σχέση με τα διαγράμματα των σχημάτων 7.14 και 7.15. Τέλος επιβεβαιώνεται έτσι για μια ακόμα φορά η μη αξιοποίηση PCM μεγάλου πάχους της τάξης των 50mm, η αποθηκευμένη θερμότητα του οποίου εδώ όχι μόνο δεν αυξήθηκε αλλά και μειώθηκε ελαφρώς.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα καθαρά ποιοτικό διάγραμμα ενεργούς θερμοχωρητικότητας – θερμοκρασίας που περιλαμβάνει και τις πέντε πλήρεις καμπύλες $c_{p,eff} - T$ των PCMs όπως δόθηκαν στο τμήμα D της παρούσας μελέτης προκειμένου να δούμε πως μεταβάλλεται η μορφή τους.



Σχήμα 7.28: Πλήρεις καμπύλες $c_{p,eff} - T$ για τα 5 PCM που εξετάστηκαν στην παρούσα μελέτη.

όπου

PCM1: $H = 132,1 \text{kJ/kg}$, $T_b = 15^\circ \text{C}$, $T_l = 26^\circ \text{C}$, $c_{ps} = c_{pl} = 7000 \text{J/kg}^\circ \text{C}$

PCM2: $H = 132,1 \text{kJ/kg}$, $T_b = 18^\circ \text{C}$, $T_l = 24^\circ \text{C}$, $c_{ps} = c_{pl} = 7000 \text{J/kg}^\circ \text{C}$

PCM3: $H = 132,1 \text{kJ/kg}$, $T_b = 19^\circ \text{C}$, $T_l = 28^\circ \text{C}$, $c_{ps} = c_{pl} = 7000 \text{J/kg}^\circ \text{C}$

PCM4: $H = 132,1 \text{kJ/kg}$, $T_b = 15^\circ \text{C}$, $T_l = 26^\circ \text{C}$, $c_{ps} = c_{pl} = 4400 \text{J/kg}^\circ \text{C}$

PCM5: $H = 166,1 \text{kJ/kg}$, $T_b = 15^\circ \text{C}$, $T_l = 26^\circ \text{C}$, $c_{ps} = c_{pl} = 7000 \text{J/kg}^\circ \text{C}$

7.6 6^η Παραμετρική μελέτη της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας

A. Σκοπός

Βασική επιδίωξη της παρούσας μελέτης είναι η εξέταση της θερμικής απόκρισης και γενικά της συμπεριφοράς του στρώματος του PCM κάτω από την επίδραση διαφόρων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας, που μπορεί να εμφανιστούν κατά τη χειμερινή περίοδο. Γι' αυτό το λόγο λοιπόν στη συγκεκριμένη μελέτη θα εξετάσουμε το PCM και κάποιους άλλους μήνες εκτός από το μήνα Ιανουάριο όπως το μήνα Νοέμβριο και το Μάρτιο.

B. Επιλογή ημέρας

Ως τυπική μέρα του Ιανουαρίου θεωρήσαμε την 21^η μέρα αντίστοιχα λοιπόν θα ισχύσει και για τους μήνες του Νοεμβρίου και του Μαρτίου ώστε να μπορέσουμε να συγκρίνουμε και τα τελικά αποτελέσματα. Επομένως η μελέτη αυτή θα πραγματοποιηθεί για την 21^η Νοεμβρίου και 21^η Μαρτίου.

C. Εύρεση ηλιακής ακτινοβολίας

Προκειμένου να μπορέσουμε να υπολογίσουμε την ακτινοβολία που προσπίπτει στον τοίχο με εσωτερική επιφάνεια νότιου προσανατολισμού του δωματίου θα πρέπει πρώτα να βρούμε την άμεση G_b και διάχυτη G_d ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου με βάση τις σχέσεις (6.6) και (6.7) αντίστοιχα, οι οποίες έχουν συνταχθεί αποκλειστικά για την περιοχή της Αθήνας. Αντικαθιστώντας λοιπόν στις σχέσεις αυτές το μέγεθος D που συμβολίζει τον αύξοντα αριθμό της ημέρας του έτους για την οποία θέλουμε να υπολογίσουμε την ακτινοβολία καθώς και τις τιμές για τις σταθερές των δύο αυτών σχέσεων που μεταβάλλονται με την ώρα όπως φαίνεται στον πίνακα 6.1 μπορούμε για κάθε ώρα $t=7 \div 18$ να υπολογίσουμε τις ακτινοβολίες G_b και G_d της 21^{ης} ημέρας του Νοεμβρίου και Μαρτίου.

Γνωρίζοντας λοιπόν τώρα τις ακτινοβολίες G_b και G_d για κάθε ώρα $t=7 \div 18$ της 21^{ης} Νοεμβρίου και Μαρτίου οι οποίες δίνονται σε παρακάτω πίνακα μπορούμε να υπολογίσουμε την προσπίπτουσα ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου G_T από τη σχέση (6.5) με $\rho=0,2$ για συνηθισμένο έδαφος, $\beta=90^\circ$ για κατακόρυφο τοίχο και R_b από τη σχέση (6.11) για κάθε ώρα $t=7 \div 18$ καθώς ο τοίχος που μελετάται είναι νότιου προσανατολισμού. Στη σχέση (6.11) η ωριαία γωνία ω βρίσκεται από τη σχέση (6.12) για κάθε ώρα $t=7 \div 18$, το γεωγραφικό πλάτος $\phi=37,97^\circ$ για Αθήνα και η ηλιακή απόκλιση δ υπολογίζεται από την σχέση (6.4) με βάση τον αύξοντα αριθμό της ημέρας του έτους. Οπότε η ηλιακή απόκλιση της 21^{ης} Νοεμβρίου σύμφωνα με τη σχέση (6.4) και με $n=325$ προκύπτει $\delta = -20,44^\circ$ ενώ της 21^{ης} Μαρτίου με $n=80$ η ηλιακή απόκλιση ισούται με $\delta = -0,4^\circ$.

Στη συνέχεια παρατίθεται πίνακας με τα αποτελέσματα για την άμεση G_b και διάχυτη G_d ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου καθώς και για την προσπίπτουσα ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου G_T και πίνακας με τις διορθωμένες τελικές τιμές των αποτελεσμάτων για τα τρία αυτά είδη ακτινοβολίας για κάθε μήνα. Επίσης παρουσιάζονται και διαγράμματα με τη μεταβολή των ακτινοβολιών G_b , G_d και G_T συναρτήσει της ώρας της ημέρας για κάθε μήνα.

Για τις 21 Μαρτίου λοιπόν έχουμε:

t [hrs]	G_b [W/m^2]	G_d [W/m^2]	G_T [W/m^2]
7	1,174228045	43,495254	27,18354088
8	47,05943823	126,1453085	118,1991558
9	102,6664747	196,3252935	209,8459819
10	169,917867	245,9586644	299,4166085
11	230,2600492	268,4456406	366,5160415
12	280,7011485	264,6942343	409,1575574
13	301,9437419	238,6960018	412,6257617
14	298,5641987	197,9813239	385,5906892
15	247,8616105	159,957592	318,2073829
16	174,804766	122,0152222	231,1220913
17	75,83743207	87,40523036	122,6074587
18	-21,9280951	38,51474356	49,01302991

Πίνακας 7.8: Άμεση G_b και διάχυτη G_d ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου καθώς και προσπίπτουσα ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου G_T για τις 21 Μαρτίου για κάθε ώρα $t=7 \div 18$.

Παρατηρώντας τον πίνακα 7.8 βλέπουμε ότι ηλιακή ακτινοβολία στις 21 Μαρτίου έχουμε τελικά από τις 07:00 έως και τις 17:00. Στις 18:00 τώρα παρόλο που η τιμή που προκύπτει για την ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου G_T ευσταθεί λογικά δηλαδή ακολουθεί τη φθίνουσα πορεία της ακτινοβολίας από τη 13:00, όπου παρουσιάζεται και η μέγιστη τιμή της, δεν μπορεί να γίνει αποδεκτή καθώς η άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου G_b προκύπτει αρνητική που σημαίνει ότι ο ήλιος έχει ήδη δύσει, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται και με τον υπολογισμό της ώρας δύσης και ανατολής από τις σχέσεις (6.1) και (6.2) αντίστοιχα και σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 6.2.

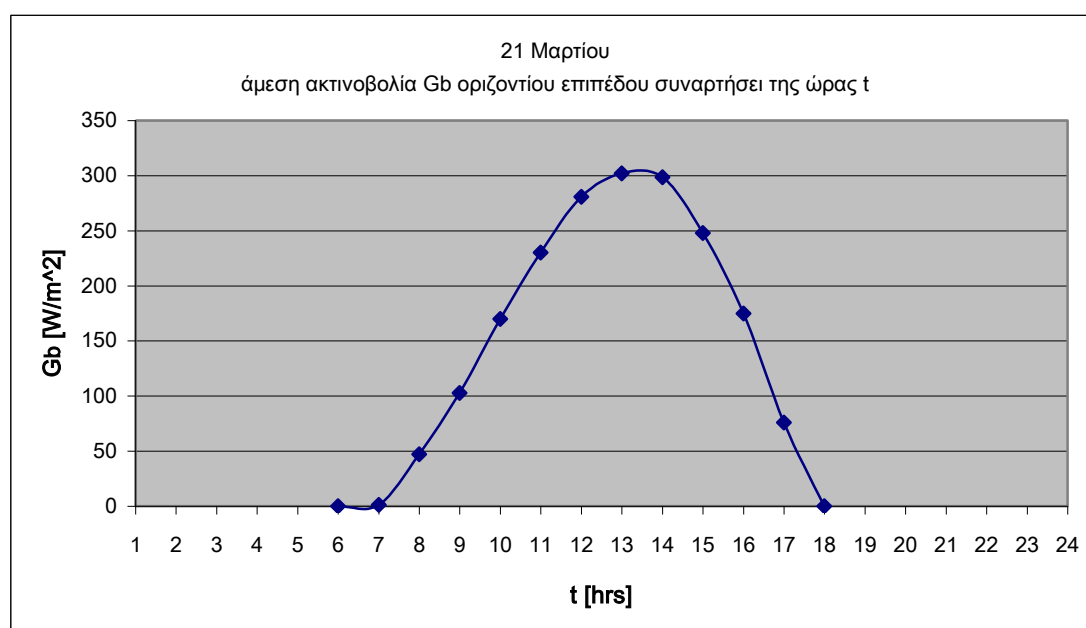
Επομένως λοιπόν έχουμε

- ώρα δύσης = 17,98hrs ή 17hr58min48sec
- ώρα ανατολής = 6,02hrs ή 6hr1min12sec

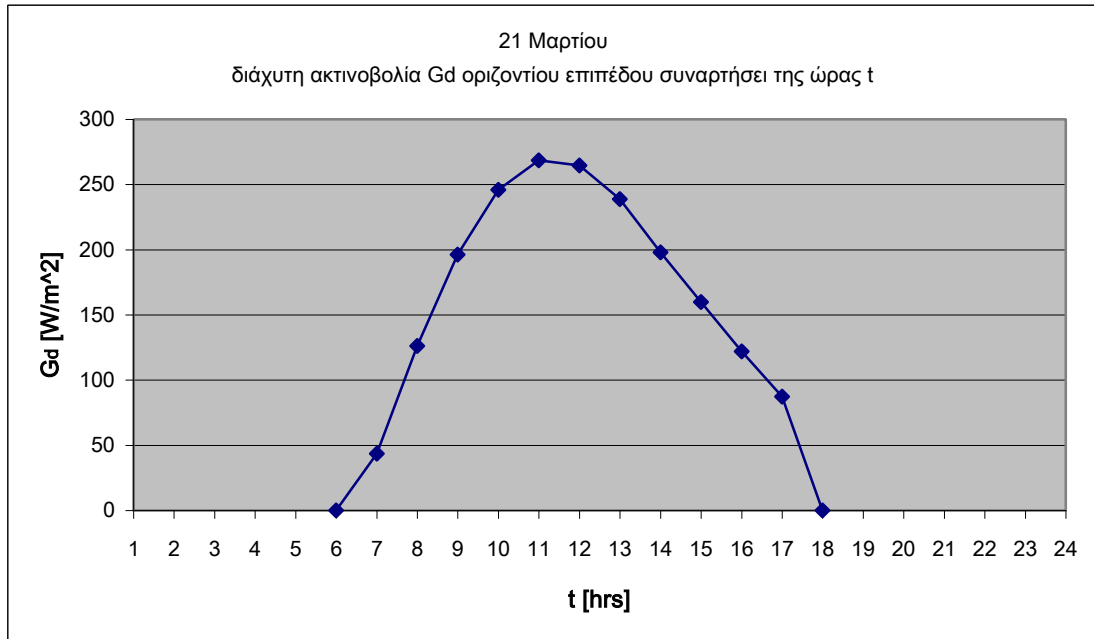
και τον ακόλουθο πίνακα με τις τελικές τιμές για τα τρία αυτά είδη ακτινοβολίας για κάθε ώρα $t=7 \div 18$ της 21^{ης} Μαρτίου.

t [hrs]	G_b [W/m^2]	G_d [W/m^2]	G_T [W/m^2]
7	1,174228045	43,495254	27,18354088
8	47,05943823	126,1453085	118,1991558
9	102,6664747	196,3252935	209,8459819
10	169,917867	245,9586644	299,4166085
11	230,2600492	268,4456406	366,5160415
12	280,7011485	264,6942343	409,1575574
13	301,9437419	238,6960018	412,6257617
14	298,5641987	197,9813239	385,5906892
15	247,8616105	159,957592	318,2073829
16	174,804766	122,0152222	231,1220913
17	75,83743207	87,40523036	122,6074587
18	0	0	0

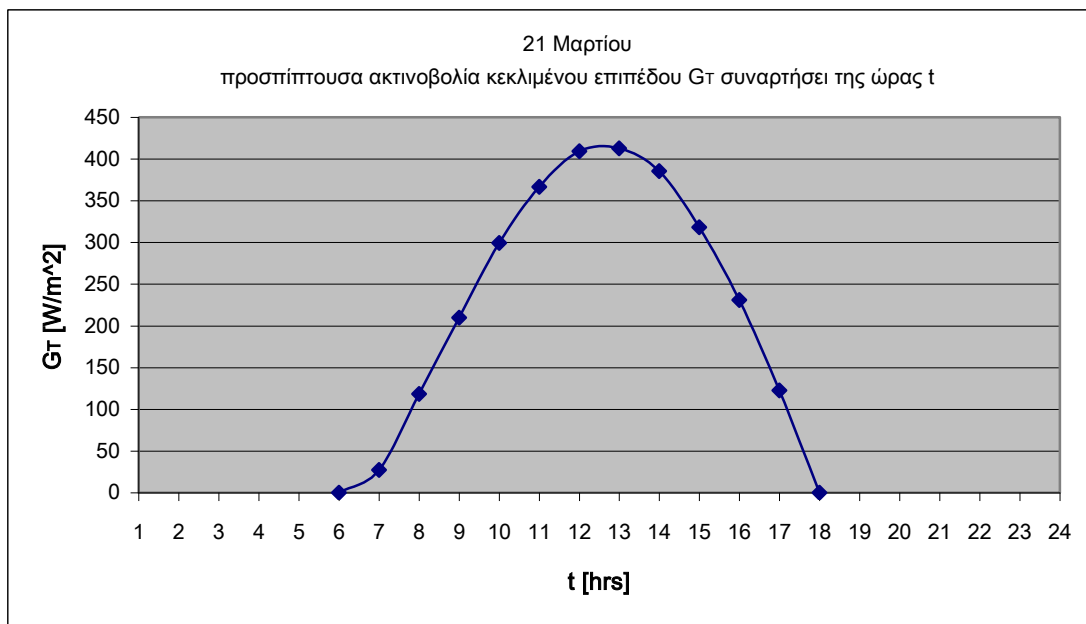
Πίνακας 7.9: Τελικές τιμές για τις ακτινοβολίες G_b , G_d και G_T για κάθε ώρα $t=7 \div 18$ της 21^{ης} Μαρτίου.



Σχήμα 7.29: Διάγραμμα G_b συναρτήσει της ώρας t της 21^{ης} Μαρτίου.



Σχήμα 7.30: Διάγραμμα G_d συναρτήσει της ώρας t της 21^{ης} Μαρτίου.



Σχήμα 7.31: Διάγραμμα G_T συναρτήσει της ώρας t της 21^{ης} Μαρτίου.

Για τις 21 Νοεμβρίου έχουμε:

t [hrs]	G_b [W/m^2]	G_d [W/m^2]	G_T [W/m^2]
7	-30,387648	-47,461347	513,070019
8	2,52330212	26,1830026	25,16837
9	36,3721209	96,9550827	142,606365
10	89,0176635	155,396653	264,438962
11	138,76473	187,750921	358,111622
12	181,514459	190,578141	427,678761
13	193,981162	173,863899	447,451811
14	178,20266	143,437089	428,786013
15	134,146905	108,371157	376,427903
16	57,7317291	77,1054093	262,669955
17	-36,238775	43,9118624	672,168532
18	-126,74397	-22,39392	136,289331

Πίνακας 7.10: Άμεση G_b και διάχυτη G_d ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου καθώς και προσπίπτουσα ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου G_T για τις 21 Νοεμβρίου για κάθε ώρα $t=7 \div 18$.

Με βάση τις τιμές που προκύπτουν για την ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου G_T βλέπουμε ότι δε συμβαδίζουν όλες με τη λογική που πρέπει να ακολουθείται δηλαδή εμφάνιση της ηλιακής ακτινοβολίας από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου με την ένταση της συνεχώς να αυξάνεται έως μια ώρα το μεσημέρι συνήθως όπως φαίνεται και από τον πίνακα 7.10 μέχρι τη 13:00 όπου παρουσιάζεται η μέγιστη τιμή της και στη συνέχεια να μειώνεται έως ότου δύσει ο ήλιος οπότε και μηδενίζεται. Οι ώρες δύσης και ανατολής του ήλιου υπολογίζονται όπως έχει ήδη αναφερθεί από τις σχέσεις (6.1) και (6.2) αντίστοιχα και προκύπτουν ίσες με:

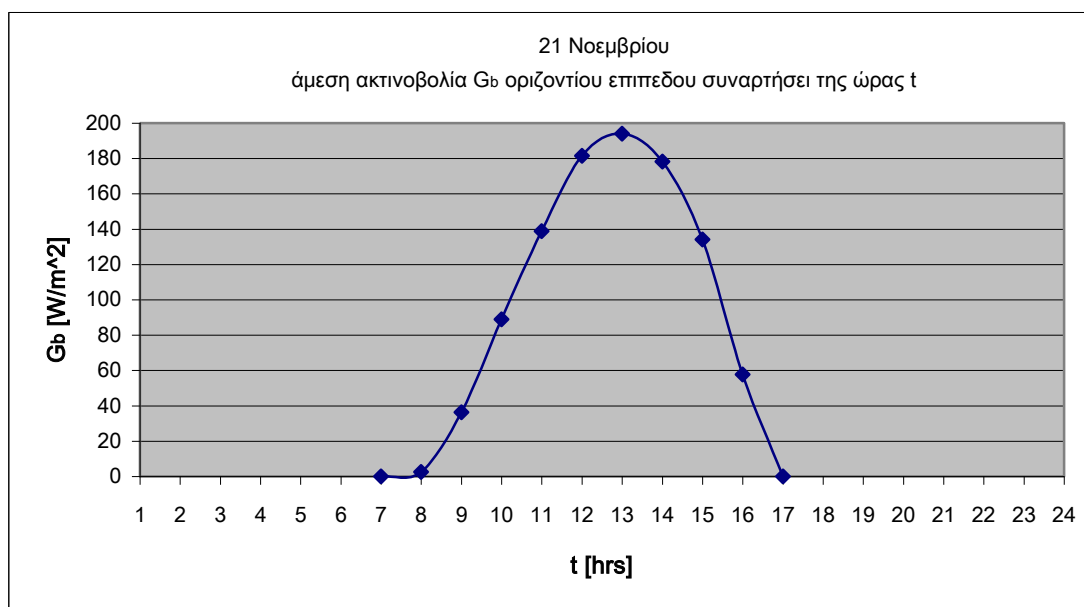
- ώρα δύσης = 16,87hrs ή 16hr52min12sec
- ώρα ανατολής = 7,13hrs ή 7hr7min48sec

Σύμφωνα λοιπόν με τις παραπάνω παρατηρήσεις η τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου, G_T στις 07:00 όπου ακόμα ο ήλιος δεν έχει ανατείλει δεν δικαιολογείται καθώς και οι τιμές της στις 17:00 και 18:00 όπου ο ήλιος έχει ήδη δύσει. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός τώρα ότι στις 17:00 που είναι μια ώρα κοντά στη στιγμή δύσης του ήλιου υπάρχει κάποιο ποσό διάχυτης ακτινοβολίας ενώ δεν υπάρχει καθόλου άμεση.

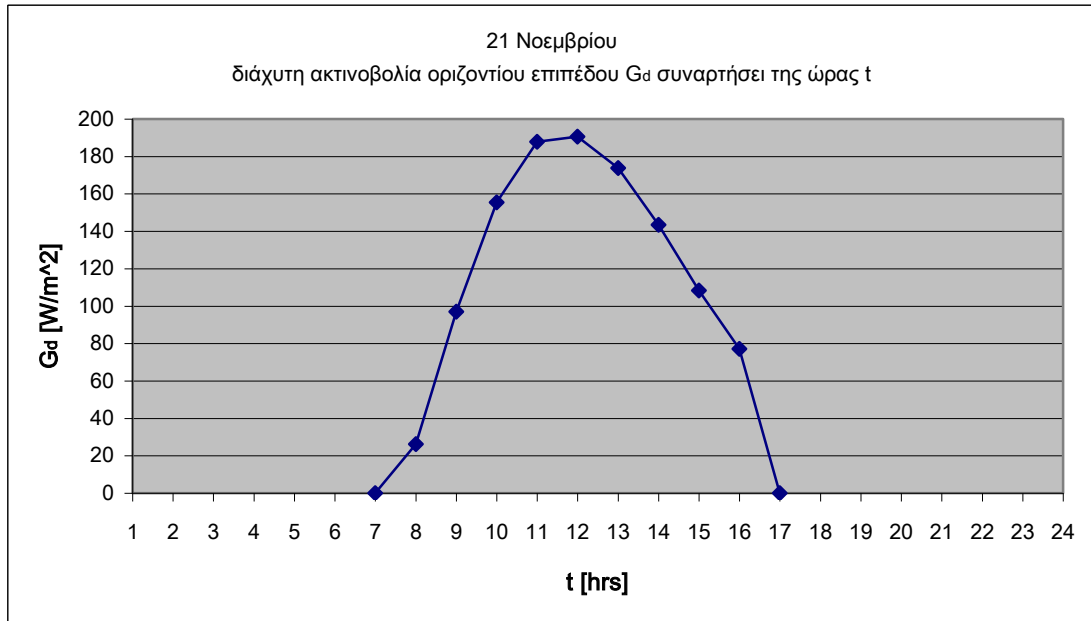
Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο πίνακας 7.11 διορθωμένος με τα τρία αυτά είδη ακτινοβολίας G_b , G_d και G_T για κάθε ώρα $t=7 \div 18$ της 21^{ης} Νοεμβρίου καθώς και τα σχετικά διαγράμματα των ακτινοβολιών G_b , G_d και G_T με την ώρα t .

t [hrs]	G_b [W/m ²]	G_d [W/m ²]	G_T [W/m ²]
7	0	0	0
8	2,52330212	26,1830026	25,16837
9	36,3721209	96,9550827	142,606365
10	89,0176635	155,396653	264,438962
11	138,76473	187,750921	358,111622
12	181,514459	190,578141	427,678761
13	193,981162	173,863899	447,451811
14	178,20266	143,437089	428,786013
15	134,146905	108,371157	376,427903
16	57,7317291	77,1054093	262,669955
17	0	0	0
18	0	0	0

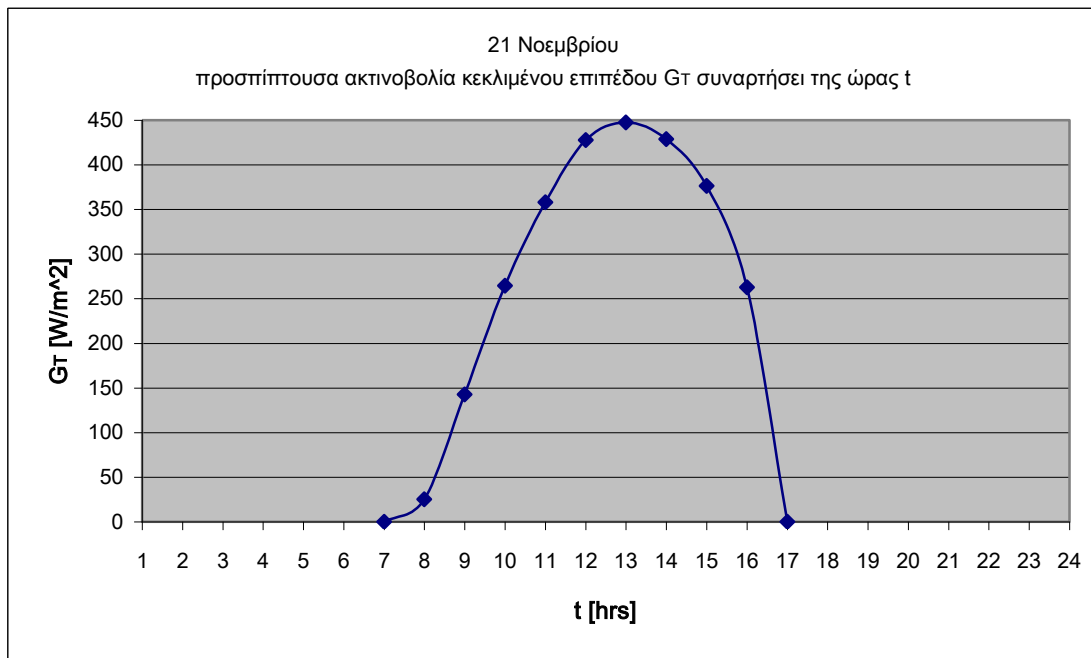
Πίνακας 7.11: Τελικές τιμές για τις ακτινοβολίες G_b , G_d και G_T για κάθε ώρα $t=7 \div 18$ της 21^{ης} Νοεμβρίου.



Σχήμα 7.32: Διάγραμμα G_b συναρτήσει της ώρας t της 21^{ης} Νοεμβρίου.



Σχήμα 7.33: Διάγραμμα G_d συναρτήσει της ώρας t της 21^{ης} Νοεμβρίου.



Σχήμα 7.34: Διάγραμμα G_T συναρτήσει της ώρας t της 21^{ης} Νοεμβρίου.

D. Επιλογή PCM

Το υλικό αλλαγής φάσης που θα χρησιμοποιηθεί για τη συγκεκριμένη παραμετρική μελέτη είναι το ίδιο μ' αυτό της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης στο αντίστοιχο τμήμα D όπου δίνονται και οι εξισώσεις της ενεργούς θερμοχωρητικότητάς του συναρτήσει της θερμοκρασίας. Οι εξισώσεις αυτές προέκυψαν μετά από αντικατάσταση των χαρακτηριστικών του στις σχέσεις (6.17), (6.18), (6.19) και (6.20).

E. Εφαρμογή του ισολογισμού ενέργειας στο στρώμα PCM με παράμετρο το μήνα

Η αλλαγή του μήνα επηρεάζει μόνο την ηλιακή ακτινοβολία, που προσπίπτει στον τοίχο. Θεωρούμε ότι οι τιμές των μεγεθών U , T_{in} , A_w και A_g που περιέχονται στον ενεργειακό ισολογισμό για το στρώμα του PCM παραμένουν ίδιες μ' αυτές που δόθηκαν στο τμήμα E της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης, δηλαδή $U=5,33 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, $T_{in}=20^\circ\text{C}$, $A_w=7,5 \text{ m}^2$ και $A_g=3 \text{ m}^2$. Ο ισολογισμός ενέργειας τώρα θα δοθεί μόνο για πάχος του στρώματος του PCM ίσο με 5mm το οποίο σύμφωνα με τον πίνακα 7.5 αντιστοιχεί σε μάζα PCM $m=38,2125 \text{ kg}$. Εξυπακούεται ότι η διαδικασία που θα εφαρμοστεί για το συγκεκριμένο πάχος είναι η ίδια και για τα άλλα δύο πάχη των 20 και 50mm.

Αντικαθιστώντας έτσι λοιπόν στη σχέση (6.13) τα μεγέθη που δε μεταβάλλουν τις τιμές τους καθ' όλη την παρακάτω επαναληπτική διαδικασία και εν συνεχεία επιλύοντας ως προς T_{PCM} προκύπτει η ακόλουθη σχέση η οποία θα μας βοηθήσει να υπολογίσουμε για κάθε ώρα t της μέρας που μελετάται κάθε φορά τη θερμοκρασία του στρώματος του PCM.

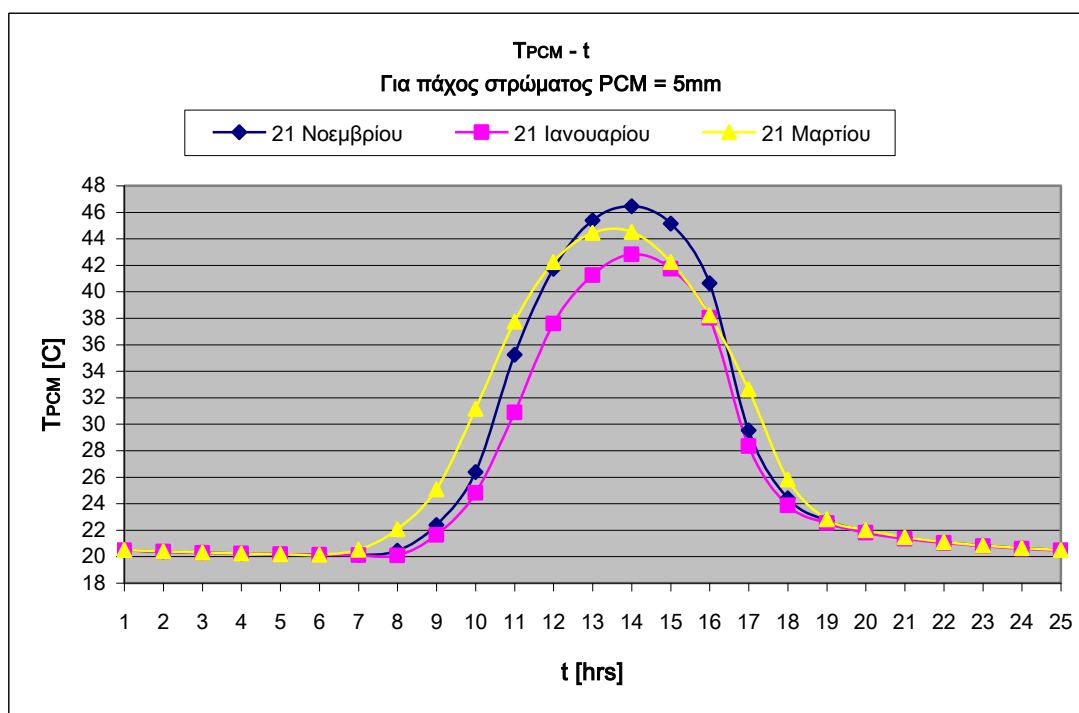
$$T_{PCM} = T_{PCM}^o + \frac{1}{38,2125 \cdot c_p} \cdot \left[3600 \cdot 85\% \cdot G_T \cdot 3 - 3600 \cdot 5,33 \cdot 7,5 \cdot (T_{PCM}^o - 20) \right] \quad (7.6)$$

όπου

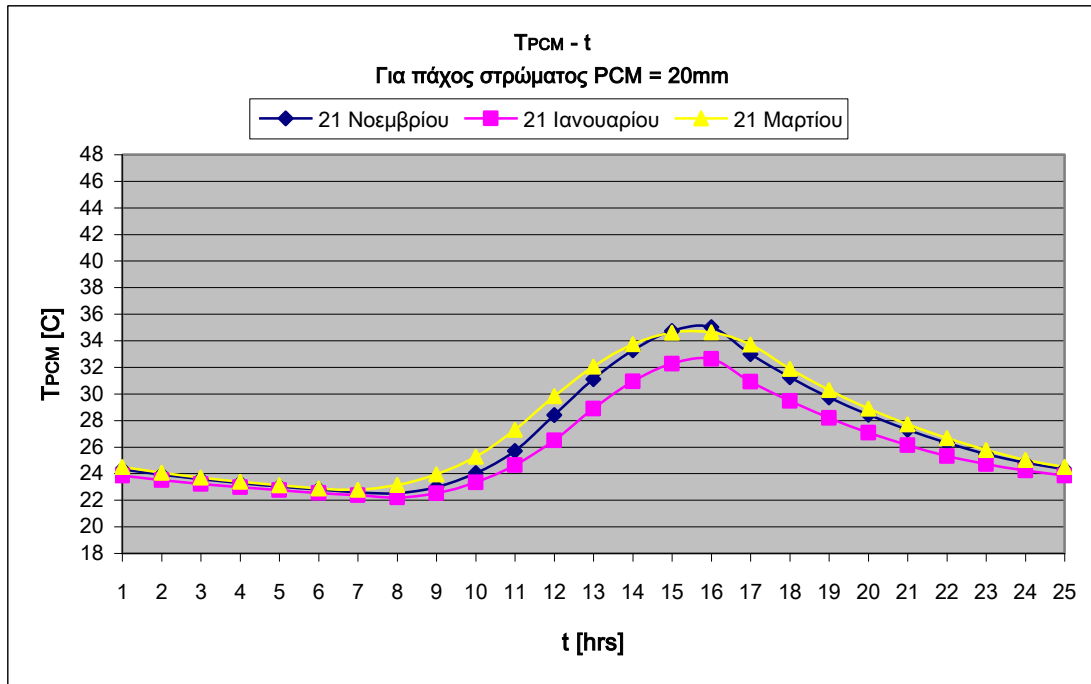
- c_p είναι η ενεργός θερμοχωρητικότητα του PCM η τιμή της οποίας μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία του PCM σύμφωνα με τις εξισώσεις που δίνονται στο τμήμα D της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης
- G_T είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου, η μεταβολή της οποίας με την ώρα t παρουσιάζεται στον πίνακα 7.9 αν η ημέρα διεξαγωγής της μελέτης είναι η 21^η Μαρτίου ή στον πίνακα 7.11 αν είναι η 21^η Νοεμβρίου

Η διαδικασία που θα εφαρμοστεί είναι ανάλογη μ' αυτή προηγούμενων μελετών και η οποία θα παρουσιασθεί εν συντομία και εδώ για λόγους πληρότητας. Ειδικότερα υποθέτουμε αρχικά για μια ώρα της ημέρας που μελετάται μια τυχαία θερμοκρασία

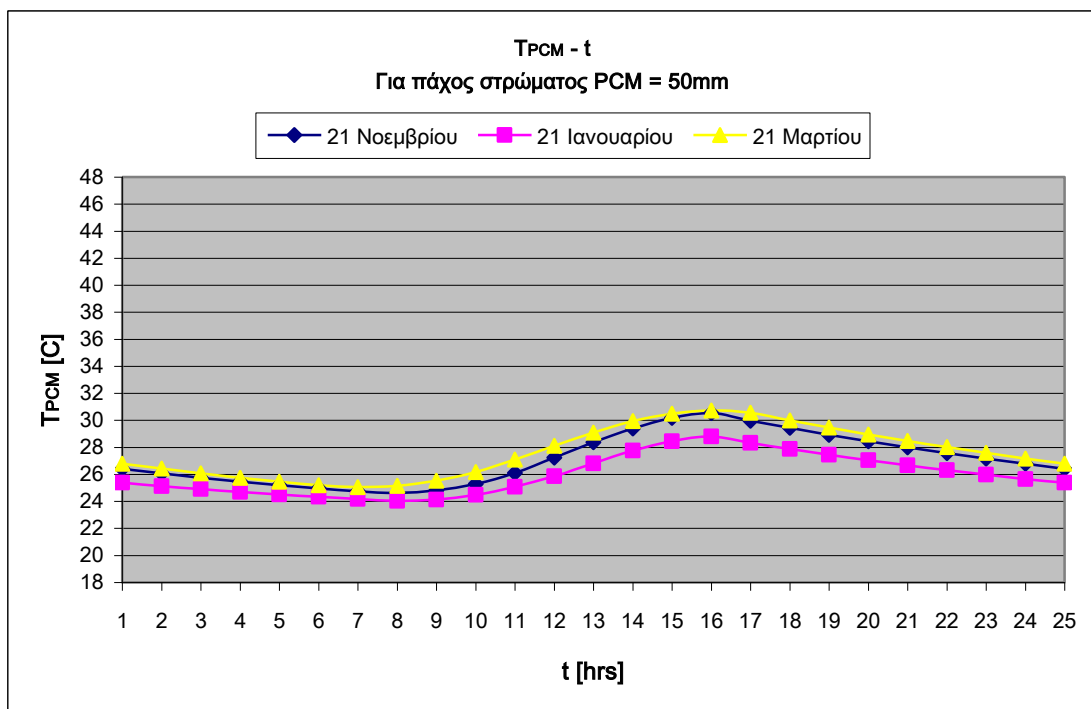
του στρώματος του PCM με βάση την οποία βρίσκουμε και τη θερμοχωρητικότητα του PCM και στη συνέχεια γνωρίζοντας και την ακτινοβολία G_T την ώρα αυτή αντικαθιστούμε στη σχέση (7.6) και υπολογίζουμε τη θερμοκρασία του PCM την επόμενη ώρα. Αυτό θα εφαρμοστεί τόσες φορές μέχρις ότου υπολογιστούν οι θερμοκρασίες όλων των ωρών του 24ώρου. Επειδή όμως η αρχική θερμοκρασία ήταν τελείως αυθαίρετη θα πρέπει να επαναλάβουμε το 24ώρο μέχρι να συγκλίνουν οι τιμές της θερμοκρασίας για κάθε ώρα. Η διαδικασία αυτή έχει ήδη πραγματοποιηθεί για την 21^η Ιανουαρίου στο τμήμα Ε της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης και θα εφαρμοστεί πάλι και μάλιστα δύο φορές σε αυτή τη μελέτη για την 21^η Μαρτίου και την 21^η Νοεμβρίου αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα για τη διακύμανση της θερμοκρασίας πάχους PCM ίσο με 5mm συναρτήσει της ώρας παρουσιάζονται στο διάγραμμα του σχήματος 7.35 και για τους τρεις μήνες. Ακόμα δίνονται και οι καμπύλες θερμοκρασίας PCM με την ώρα και για τους τρεις μήνες για πάχος στρώματος PCM 20 και 50mm στα σχήματα 7.36 και 7.37 αντίστοιχα που προέκυψαν με την ίδια διαδικασία και με μια σχέση ανάλογη της (7.6).



Σχήμα 7.35: Διάγραμμα T_{PCM} συναρτήσει της ώρας t της ημέρας με παράμετρο το μήνα για πάχος του στρώματος του PCM ίσο με 5mm.



Σχήμα 7.36: Διάγραμμα T_{PCM} συναρτήσει της ώρας t της ημέρας με παράμετρο το μήνα για πάχος του στρώματος του PCM ίσο με 20mm.



Σχήμα 7.37: Διάγραμμα T_{PCM} συναρτήσει της ώρας t της ημέρας με παράμετρο το μήνα για πάχος του στρώματος του PCM ίσο με 50mm.

Κατ' αρχάς παρατηρώντας το διάγραμμα του σχήματος 7.35 βλέπουμε ότι καμία τιμή της θερμοκρασίας του στρώματος του PCM για κανένα μήνα δεν προκύπτει μικρότερη από την επικρατούσα θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του δωματίου, η οποία ισούται με 20°C . Αυτό εξηγείται όπως έχει ήδη αναφερθεί λόγω της θερμότητας που συναλλάσσεται μεταξύ του τοίχου και του αέρα του δωματίου με συναγωγή. Επίσης συγκρίνοντας τις τρεις καμπύλες που απεικονίζονται στο διάγραμμα 7.35 διαπιστώνουμε ότι η καμπύλη για το μήνα Νοέμβριο παρουσιάζει το πιο υψηλό μέγιστο της θερμοκρασίας του PCM ενώ αντίθετα ο Ιανουάριος το πιο χαμηλό, γεγονός το οποίο οφείλεται στην υψηλότερη ηλιακή ακτινοβολία το Νοέμβριο σύμφωνα και με τον πίνακα 7.11 καθώς και ότι η καμπύλη διακύμανσης της θερμοκρασίας του PCM με την ώρα του Μαρτίου είναι πιο ομαλή σε σχέση με του Νοεμβρίου όπως ακριβώς συμβαίνει και με τη μεταβολή της ακτινοβολίας G_T με την ώρα t . Επομένως καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασιακή απόκριση του PCM είναι άμεσα εξαρτώμενη από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Οι παραπάνω παρατηρήσεις ισχύουν και για το πάχος των 20mm του στρώματος του PCM. Βλέπουμε όμως ότι καθώς το πάχος του PCM αυξάνεται οι διαφορές της θερμοκρασίας μεταξύ των μηνών μειώνονται και ειδικά μεταξύ Νοεμβρίου και Μαρτίου, οι καμπύλες των οποίων για πάχος στρώματος PCM ίσο με 50mm σχεδόν ταυτίζονται όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.37, με την καμπύλη του Μαρτίου μάλιστα να έχει λίγο υψηλότερο θερμοκρασιακό μέγιστο από του Νοεμβρίου σ' αντίθεση με προηγουμένως.

Βιβλιογραφία Θεωρητικής Προσομοίωσης

[1] Κίμων Α. Αντωνόπουλος: Θερμικά – Ηλιακά Συστήματα, Μέρος Πρώτο

[2] Eleftherios Dimitrios Kravvaritis, Kimon Antonopoulos, Christos Tzivanidis: Solar energy management using PCM passive systems in the Athens area buildings*

*το παρόν άρθρο είναι υπό έκδοση