



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**« Επίδραση περιεκτικότητας Υλικών Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ)
σε μίγμα δομικών στοιχείων εσωτερικών τοίχων με θερμική
επικοινωνία εκατέρωθεν »**



**«Effects of Phase Change Material (PCM) concentration in buildings
partitions with thermal exchange in both sides»**

ΕΚΠΟΝΗΣΗ: Ρόκα Χρυσ αφένια
ΕΠΙΒΛΕΨΗ: Κίμων Α. Αντωνόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ 2014

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Συγκεκριμένα τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Κ. Κίμωνα Αντωνόπουλο, καθηγητή Ε.Μ.Π., για την ανάθεση του θέματος, τις πληροφορίες που μου παρείχε σχετικά με το συγκεκριμένο θέμα, την εποπτεία της εργασίας, την καθοδήγησή και τον χρόνο που μου προσέφερε για την επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την συμπαράσταση της καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η ανάγκη χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των εναλλακτικών συστημάτων διαχείρισης της έχει γίνει επιτακτική. Η ραγδαία αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης προκαλεί την σταδιακή εξάντληση των συμβατικών καυσίμων και στην μόλυνση του περιβάλλοντος. Πολλοί ερευνητές έχουν οδηγηθεί στην αναζήτηση εναλλακτικών τεχνολογιών που θα καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες με ανανεώσιμους πόρους και χωρίς περιβαλλοντικές συνέπειες.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να παρουσιάσει μία τέτοια εναλλακτική τεχνολογία η οποία είναι η αποθήκευση θερμικής ενέργειας με χρήση των Υλικών Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ). Στα παρακάτω κεφάλαια παρουσιάζονται οι ανάγκες που οδήγησαν στα υλικά αλλαγής φάσης, η ταυτότητα των υλικών αυτών, η σημαντικότητα της αποθήκευσης ενέργειας, τα βήματα που έχουν γίνει μέχρι σήμερα προς αυτή την τεχνολογική καινοτομία και οι τομείς στους οποίους εκτείνεται.

Η αξιοπιστία της χρήσης των ΥΑΦ σε πρακτικές εφαρμογές είναι πολύ σημαντικό να αποδειχθεί. Για αυτόν τον λόγο πραγματοποιείται στο 2ο μέρος της εργασίας μία μελέτη σχετικά με τη χρήση PCM σε μία απλή, αλλά πολύ χρήσιμη εφαρμογή στον κτιριακό τομέα.

Ο στόχος της παρούσας μελέτης είναι να διαπιστωθεί η συμπεριφορά του PCM, όταν χρησιμοποιείται σε ανάμιξη με τον σοβά σε νότιο εσωτερικό τοίχο δωματίου απέναντι από υαλοπίνακα, για την παθητική ηλιακή θέρμανση του στην περιοχή της Αθήνας για τους χειμερινούς μήνες του έτους.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν συνοπτικά από τις παραμετρικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν, έδειξαν πολύ μεγάλη διαφορά στις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται για ένα 24ωρο όταν στην διαστρωμάτωση του σοβά προστίθεται έστω και μικρό ποσοστό PCM όπως 10%. Πολύ σημαντική διαπίστωση είναι επίσης ότι από το ποσοστό του PCM 40% έως και 100% οι διαφορές που παρατηρούνται στις τιμές της θερμοκρασίας είναι μηδαμινές και το εύρος των θερμοκρασιών μειώνεται στο ελάχιστο.

Επιπλέον διαπιστώνεται πως αν μία μέρα με ήλιο όπως αυτή που μελετήσαμε για το πρώτο 24ωρο ακολουθείται από μια νεφοσκεπή μέρα ή ακόμα και από μία μέρα με μηδενική ηλιακή ακτινοβολία το μίγμα PCM-σοβά παραμένει ένα αποδοτικό σύστημα που μπορεί να καλύψει όχι μόνο ένα αλλά και δύο δωμάτια. Τέλος εξετάζουμε περαιτέρω κάποιους παράγοντες όπως την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου και το πάχος της διαστρωμάτωσης του μίγματος προκειμένου να βελτιώσουμε την αποδοτικότητα του συστήματος.

Abstract

The need for renewable sources of energy has become imperative. The rapid increase in energy consumption causes the gradual depletion of fossil fuels and environmental pollution. Many researchers have to seek alternative technologies to meet the energy needs with renewable resources and without environmental consequences.

The aim of this project is to present such an alternative technology which is thermal energy storage using phase change materials (PCM). The following chapters present the needs which led to the phase change materials, the identity of them, the importance of energy storage, the steps taken so far to this technological innovation and the practical applications of phase change materials to buildings in order to save energy.

The reliability of the use of PCM in practical applications is very important to be proved. For this reason, we have made in the second part of this work, a study on the use of PCM in a simple but very useful application in the building sector.

The objective of this study is to be established the behavior of PCM when it is mixed with the plaster on the southern interior wall opposite of a glass paned for its passive heating in Athens area only for the winter months of the year

The conclusions summarized from the parametric studies performed showed great difference in the temperatures used for 24 hours when we add the stratification of plaster even a small percentage of PCM as 10% . A very important finding is that in the rate of 40% to 100 % of PCM the temperature range is reduced to a minimum.

Furthermore it is found that if one sunny day as we studied for the first 24 hours followed by an overcast day or even a day with no sunlight the mixture of PCM- plaster remains an efficient system that can cover not only one but two rooms . Finally, we examine further some factors such as the internal temperature of the room and the thickness of stratification of the mixture in order to improve system's efficiency .

Περιεχόμενα:

ΜΕΡΟΣ 1^ο : Θεωρητική Προσέγγιση των Υλικών Αλλαγής Φάσης	9
> Κεφάλαιο 1^ο : «Κτίριο, περιβάλλον και ηλιακή ενέργεια».....	9
1.1 Ενέργεια και περιβάλλον.....	9
1.2 Κτίριο, ενέργεια και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	12
1.2.1 Υφιστάμενη κατάσταση.....	13
1.2.2 Προτεραιότητες στον τομέα των κτιρίων.....	16
1.2.3 ΑΠΕ και θερμική αποθήκευση στα κτίρια.....	19
1.3 Συστήματα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας.....	25
1.3.1 Παθητικά ηλιακά συστήματα.....	26
1.3.1.1 Άμεσου κέρδους.....	27
1.3.1.2 Έμμεσου κέρδους.....	30
1.3.1.3 Απομονωμένου κέρδους.....	33
1.3.2 Ενεργητικά ηλιακά συστήματα.....	34
1.3.3 Φωτοβολταϊκά ηλιακά συστήματα.....	36
1.4 Μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας.....	37
1.4.1 Αποθήκευση μηχανικής ενέργειας.....	38
1.4.2 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας.....	39
1.4.3 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας.....	41
1.4.3.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας.....	41
1.4.3.2 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας.....	41
1.4.3.3 Αποθήκευση θερμοχημικής ενέργειας.....	43
Βιβλιογραφία 1 ^{ου} Κεφαλαίου.....	43
> Κεφάλαιο 2^ο : «Υλικά αλλαγής φάσης».....	44
Εισαγωγή.....	44
2.1 Θεωρία αλλαγής φάσης.....	45
2.2 Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης.....	47
2.2.1 Μέθοδος της ενθαλπίας.....	48
2.2.2 Μέθοδος της ενεργούς θερμοχωρητικότητας.....	48
2.3 Ταξινόμηση των υλικών αλλαγής φάσης.....	50
2.3.1 Στερεό σε υγρό και υγρό σε στερεό.....	50
2.3.1.1 Οργανικά υλικά αλλαγής φάσης.....	52
2.3.1.1.1 Παραφίνες.....	52
2.3.1.1.2 Λιπαρά Οξέα.....	54
2.3.1.1.3 Σάκχαρα – Αλκοόλες.....	55
2.3.1.2 Ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης.....	57
2.3.1.2.1 Ένυδρα άλατα.....	57
2.3.1.2.2 Άλας Glauber.....	59
2.3.1.3 Ευτηκτικά υλικά αλλαγής φάσης.....	59
2.3.1.4 Clathrates.....	60
2.3.2 Υλικά αλλαγής στερεάς φάσης.....	61
2.3.3 Αξιολόγηση κάθε κατηγορίας υλικού αλλαγής φάσης.....	62

2.4	Ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης.....	63
2.4.1	Θερμοδυναμικές ιδιότητες.....	63
2.4.2	Κινητικές ιδιότητες.....	64
2.4.3	Χημικές ιδιότητες.....	64
2.4.4	Οικονομικές ιδιότητες.....	64
2.5	Μέθοδοι μέτρησης ιδιοτήτων.....	64
2.5.1	Διαφορική θερμική ανάλυση DTA.....	65
2.5.2	Διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης.....	67
2.5.3	Μέθοδος T-history.....	70
2.6	Ανάλυση των κυριότερων προβλημάτων των υλικών αλλαγής φάσης και πιθανοί τρόποι αντιμετώπισης.....	72
2.6.1	Διαχωρισμός των φάσεων.....	72
2.6.2	Υπόψυξη ή Υπέρψυξη.....	75
2.6.3	Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα.....	76
2.6.4	Συμβατότητα με άλλα υλικά.....	76
2.7	Μέθοδοι ενσωμάτωσης των υλικών αλλαγής φάσης.....	77
2.7.1	Συσκευασία υλικών αλλαγής φάσης.....	77
2.7.1.1	Μικροενσωμάτωση.....	77
2.7.1.2	Μακροενσωμάτωση.....	79
2.7.2	Μαζική αποθήκευση.....	79
2.7.3	Άμεση ενσωμάτωση.....	80
2.7.4	Εμβάπτιση.....	80
2.7.5	Πολυστρωματικά σανίδια.....	80
	<u>Βιβλιογραφία 2^{ου} Κεφαλαίου.....</u>	<u>81</u>
➤	Κεφάλαιο 3^ο : «Εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης».....	84
	<u>Εισαγωγή.....</u>	<u>84</u>
3.1	Ηλιακά συστήματα θέρμανσης και ψύξης με PCM.....	85
3.1.1	Ηλιακά συστήματα θέρμανσης.....	85
3.1.1.1	Ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού με PCM.....	85
3.1.1.2	Ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα με PCM.....	89
3.1.1.3	Ηλιακό θερμοκήπιο.....	92
3.1.2	Συστήματα ψύξης με PCM.....	95
3.1.2.1	Free cooling.....	95
3.1.2.2	PCM σε συστήματα κλιματισμού.....	101
3.1.3	PCM σε συνδυασμένα συστήματα ψύξης και θέρμανσης.....	103
3.2	Ηλιακά μαγειρικά σκεύη.....	105
3.3	Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	109
3.4	Ηλεκτρονικά εξαρτήματα.....	110
3.4.1	Συσκευές.....	110
3.4.2	Τεχνολογία μνήμης.....	115
3.4.3	Τηλεπικοινωνίες.....	116
3.5	Οχήματα.....	119
3.5.1	Ψύξη κινητήρων.....	119
3.5.2	Θερμική άνεση.....	121

3.5.3	Καταλυτικός μετατροπέας.....	122
3.5.4	Μονάδες μπαταρίας ηλεκτρονικών οχημάτων.....	125
3.6	Κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα	126
3.6.1	Διαστημικές στολές.....	129
3.6.2	Γιλέκα.....	129
3.6.3	Ρούχα και εσώρουχα.....	130
3.6.4	Αξεσουάρ ένδυσης.....	131
3.6.5	Υποδήματα.....	133
3.6.6	Αγώγιμα υφάσματα.....	133
3.6.7	Κλινοσκεπάσματα και αξεσουάρ.....	134
3.7	Ιατρικές εφαρμογές.....	135
3.8	Συσκευασίες μεταφοράς και αποθήκευσης αγαθών.....	138
3.8.1	Κιβώτια και δοχεία πολλαπλών χρήσεων.....	139
3.8.2	Δοχεία για τρόφιμα και ποτά.....	142
3.8.3	Ιατρικά προϊόντα.....	144
	<u>Βιβλιογραφία 3^{ου} Κεφαλαίου.....</u>	145
>	Κεφάλαιο 4^ο: «Κτιριακές εφαρμογές των PCM».....	150
4.1	Ιστορική αναδρομή.....	150
4.1.1	Maria Telkers.....	150
4.1.2	Lawrence Gardshire.....	151
4.1.3	Hodgins and Hoffman.....	151
4.1.4	ΗΠΑ.....	152
4.1.5	Ευρώπη.....	153
4.1.6	Άπω Ανατολή.....	154
4.2	Αρχές λειτουργίας των PCM στα κτίρια.....	155
4.2.1	Προϋποθέσεις ανθρώπινης άνεσης.....	155
4.2.2	Παράγοντες που επηρεάζουν την εσωτερική θερμοκρασία του αέρα.....	155
4.2.3	Δυνατότητα των PCM για έλεγχο της θερμοκρασίας.....	156
4.2.4	Σύγκριση PCM με τα συμβατικά οικοδομικά υλικά.....	159
4.2.5	Παράγοντες αξιολόγησης ενός τοίχου με PCM.....	160
4.2.5.1	Παράγοντες “φ” και “Γ”.....	160
4.2.5.2	Παράγοντες “a” , “b” και “Δτ”.....	161
4.3	Τρόποι εφαρμογής των PCM στα κτίρια.....	163
4.3.1	Ηλιακός τοίχος αποθήκευσης θερμότητας για αερισμό κτιρίων.....	163
4.3.2	Τοίχος Trombe.....	165
4.3.3	Ξηρός τοίχος αλλαγής φάσης εμποτισμένος με PCM.....	166
4.3.3.1	Γυψοσανίδες με PCM.....	166
4.3.3.2	Μπλοκ τσιμέντου με PCM.....	170
4.3.3.2.1	Χρήση μικροκάψουλων PCM σε τοίχο τσιμέντου.....	172
4.3.3.2.2	Ενσωμάτωση PCM σε μείγμα ξύλου-ελαφρού βάρους τσιμέντο.....	173
4.3.4	Θερμικά ενισχυμένο πλαίσιο τοίχου με PCM.....	173
4.3.5	Ενσωμάτωση PCM σε κατασκευές με τούβλο.....	175
4.3.6	Θερμικά ενεργά παράθυρα με κινούμενες κουρτίνες με PCM.....	177

4.3.7 Σανίδες οροφής με PCM.....	178
4.3.7.1 Θερμικά ενεργοποιημένο πάνελ οροφής με PCM.....	181
4.3.8 Υποδαπέδια ηλεκτρική θέρμανση με PCM.....	182
4.3.8.1 Υποδαπέδια ηλεκτρική θέρμανση με τη χρήση σταθερής μορφής πλακών με PCM.....	185
<u>Βιβλιογραφία 4^ο Κεφαλαίου.....</u>	187

ΜΕΡΟΣ 2^ο : Θεωρητική προσομοίωση των Υλικών Αλλαγής Φάσης στον κτιριακό τομέα

> Κεφάλαιο 5^ο : « <u>Προσομοίωση και Τυπολόγιο</u> ».....	189
<u>Περιγραφή της προσομοίωσης και τυπολόγιο.....</u>	189
5.1 Παραμετρική μελέτη ως προς την περιεκτικότητα PCM στο μίγμα PCM-Σοβά για τους χειμερινούς μήνες (24ωρο).....	196
5.2 Παραμετρική μελέτη ως προς την περιεκτικότητα PCM στο μίγμα PCM-Σοβά για τους χειμερινούς μήνες (48ωρο).....	214
5.3 Παραμετρική μελέτη ως προς την περιεκτικότητα PCM στο μίγμα PCM-Σοβά για την συναλλαγή με δύο δωμάτια (24ωρο).....	235
5.4 Παραμετρική μελέτη ως προς την περιεκτικότητα PCM στο μίγμα PCM-Σοβά για την συναλλαγή με δύο δωμάτια (48ωρο).....	248
5.5 Παραμετρική μελέτη ως προς την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου(24ωρο).259	
5.6 Παραμετρική μελέτη ως προς το πάχος του στρώματος PCM-Σοβά (24ωρο).....	266
<u>Βιβλιογραφία 5^ο Κεφαλαίου.....</u>	273

ΜΕΡΟΣ 1^ο : Θεωρητική προσέγγιση των Υλικών Αλλαγής Φάσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

«Κτίριο, περιβάλλον και ηλιακή ενέργεια»

1.1 Ενέργεια και περιβάλλον [1,2,3]

Σχεδόν κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα εξαρτάται από την ενέργεια. Το επίπεδο ευημερίας που έχουμε σήμερα κατακτήθηκε χάρη στην άφθονη και φθηνή ενέργεια που απολαμβάνει σημαντικό τμήμα της ανθρωπότητας. Η ενέργεια μάς ζεσταίνει, μας δίνει φως, κινεί τα αυτοκίνητα, τα αεροπλάνα, τα εργοστάσια. Μεταβολές στην προσφορά της ενέργειας ή της τιμής της μπορεί να έχουν τεράστιες επιπτώσεις στην οικονομία και στην ποιότητα ζωής κάθε χώρας. Αυτό έγινε καθαρό με το σκληρότερο τρόπο στη δεκαετία του 70 με τις δύο ενεργειακές κρίσεις (όταν η ανθρωπότητα έμαθε με οδυνηρό τρόπο τη λέξη «ενέργεια»), αλλά και το καλοκαίρι του 2008 με την αλματώδη αύξηση της τιμής του πετρελαίου που άγγιξε τα 140 δολάρια το βαρέλι ενώ σήμερα αγγίζει τα 100 δολάρια . Συγχρόνως, η ενεργειακή κατανάλωση συνδέεται άμεσα με την οικολογική ισορροπία του πλανήτη μας.

Η παραγωγή ενέργειας σε όλα τα στάδιά της προκαλεί αναμφίβολα υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Η «όξινη βροχή», «το φαινόμενο του θερμοκηπίου» και η «τρύπα του όζοντος» μας απασχολούν όλους, το συζητάμε, ενώ τα θέματα αυτά «παίζονται» στα μαζικά μέσα ενημέρωσης. Οι παραπάνω βέβαια επιπτώσεις από τη χρήση της ενέργειας μπορούν να περιοριστούν με τη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη λήψη μέτρων για εξοικονόμηση ενέργειας.

Το πρόβλημα της ενέργειας, εκτός από τις συνιστώσες της τιμής της (ανάγκη για φθηνότερη ενέργεια και ενέργεια για όλους) και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (ανάγκη για ενέργεια με το μικρότερο περιβαλλοντικό κόστος), έχει και μια τρίτη, σημαντική επίσης, συνιστώσα: την εξαντλησιμότητα των συμβατικών καυσίμων, δηλαδή του γαιάνθρακα, του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, αλλά και των πυρηνικών καυσίμων.

Σήμερα, η αυξανόμενη παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας συντελεί στην **περιβαλλοντική μόλυνση** και στην **αύξηση των ρύπων** και του **φαινομένου του θερμοκηπίου**. Η αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης έχει προκύψει από την πληθυσμιακή αύξηση και οικονομική ανάπτυξη τα οποία τείνουν να αυξήσουν την ενεργειακή χρήση ανά άτομο. Συνεπώς, η αναπόφευκτη πληθυσμιακή αύξηση και η οικονομική ανάπτυξη που θα πραγματοποιηθεί σε πολλές χώρες στο άμεσο μέλλον, μπορεί να συντελέσουν σε σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Από τις αρχές του 1980 η σχέση μεταξύ της ενεργειακής χρήσης και περιβαλλοντικών επιπτώσεων έχει τραβήξει το παγκόσμιο ενδιαφέρον και ένας μεγάλος αριθμός διεθνών δράσεων έχει επικεντρωθεί προς αυτήν την κατεύθυνση.

Η ενέργεια είναι με πολλούς τρόπους το «καύσιμο» της οικονομίας . Χωρίς τις ενεργειακές πηγές , οι κοινωνίες μας δεν θα μπορούσαν να λειτουργήσουν και θα κατέρρεαν. Η επίδραση που έχει η διακοπή ρεύματος σε μία πόλη μόνο για ένα εικοσιτετράωρο δείχνει πόσο πολύ είμαστε **εξαρτημένοι** από την ενέργεια. Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές οι ανελκυστήρες παύουν να λειτουργούν , τα νοσοκομεία προσφέρουν μόνο την βασική φροντίδα και τα φώτα σβήνουν.

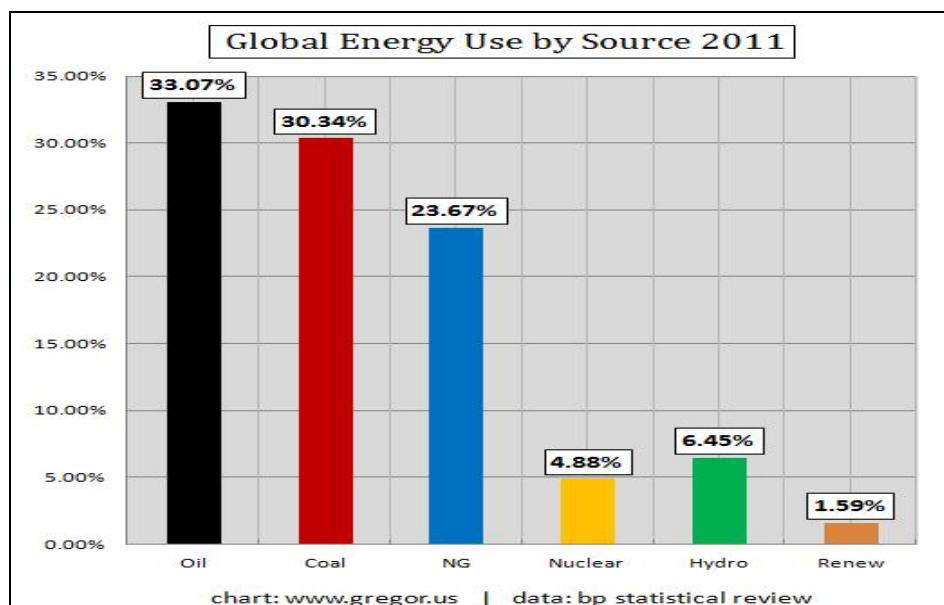
Ο μέσος όρος αύξησης του πληθυσμού ανά τον κόσμο είναι 2% . Καθώς ο πληθυσμός αυξάνεται η ανάγκη για όλο και περισσότερη ενέργεια είναι αναπόφευκτη. Ακόμη και η άνοδος του βιοτικού επιπέδου συμβαδίζει με την ανάγκη για περισσότερη ενέργεια. Σήμερα υπάρχει πολύ μεγάλη διαφορά ανάμεσα στους πληθυσμούς των χωρών όσον αφορά τον πλούτο και την χρήση ενέργειας. Οι πλούσιες βιομηχανοποιημένες χώρες που εκπροσωπούν το 25% του παγκόσμιου πληθυσμού , καταναλώνουν περίπου το 75% της συνολικής διαθέσιμης ενέργειας.

Ο πληθυσμός της γης αναμένεται να διπλασιαστεί στα μέσα του 21^{ου} αιώνα και η οικονομική ανάπτυξη σίγουρα θα συνεχίσει να μεγαλώνει. Η παγκόσμια ζήτηση για ενεργειακές υπηρεσίες αναμένεται να αυξηθεί κατά μία τάξη μεγέθους μέχρι το 2050 , ενώ η ενεργειακή ζήτηση αναμένεται να αυξηθεί 1,5-3 φορές. Ταυτόχρονα ο προβληματισμός για τις επιπτώσεις της ενέργειας στο περιβάλλον θα συνεχίσει να αυξάνεται εξαιτίας των παγκόσμιων κλιματολογικών αλλαγών.

Τα περιβαλλοντικά προβλήματα εκδηλώνονται με τη διαφαινόμενη κλιματική αλλαγή που έχει αναδειχθεί σε μείζον θέμα πολιτικής, επιστημονικής ,οικονομικής και αναπτυξιακής αντιπαράθεσης.

Αιτία της κλιματικής αλλαγής είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου που οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ανθρώπινη δραστηριότητα και ειδικότερα στις ανεξέλεγκτες εκπομπές αερίων από την παραγωγή, μεταφορά ,διανομή και χρήση της ενέργειας, καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό της προέρχεται από ορυκτά καύσιμα.

Για να ανασταλούν τα επιβλαβή περιβαλλοντικά φαινόμενα πρέπει να ληφθούν μέτρα. Επισημαίνεται, όμως, ότι κάθε μέτρο πρέπει να μην αναστέλλει την οικονομική ανάπτυξη, αλλά ούτε και τη συνεχή προσπάθεια για καλύτερες συνθήκες καθημερινής διαβίωσης για όλο και μεγαλύτερα τμήματα του πληθυσμού της Γης.



Σχήμα 1.1: Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανάλογα με την πηγή.

Σήμερα σε παγκόσμιο επίπεδο η ενέργεια παράγεται κατά κύριο λόγο, από την καύση των ορυκτών καυσίμων. Ωστόσο, το ενεργειακό μοντέλο που ξεκίνησε από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα και συνεχίζεται μέχρι σήμερα, δημιουργεί δύο σημαντικά προβλήματα:

- Επάρκειας εφοδιασμού. Οι παγκόσμιες απαιτήσεις για ενέργεια αυξάνουν συνεχώς ενώ τα ορυκτά καύσιμα εξαντλούνται με ταχείς ρυθμούς, χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα ανανέωσης τους.
- Περιβαλλοντικής επιβάρυνσης η χρήση των ορυκτών καυσίμων δημιουργεί καυσαέρια, οδηγώντας σε έναν φαύλο κύκλο όπου:
 - η ανάπτυξη απαιτεί ενέργεια
 - η ενέργεια δημιουργεί προβλήματα στο περιβάλλον
 - το περιβάλλον υποβαθμίζεται
 - δημιουργούνται προβλήματα που δυσκολεύουν τις συνθήκες διαβίωσης και αναστέλλουν την ανάπτυξη

Τα σοβαρά αυτά περιβαλλοντικά προβλήματα πρέπει να ληφθούν υπόψη αν η ανθρωπότητα θέλει να αναπτυχθεί στο μέλλον και να διατηρεί ταυτόχρονα ένα καθαρό περιβάλλον. Αν οι άνθρωποι και οι κοινωνίες συνεχίσουν να υποβαθμίζουν το περιβάλλον το μέλλον προβλέπεται δυσοίωνα.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή σε μια προσπάθεια αντιμετώπισης των προβλημάτων της ρύπανσης του περιβάλλοντος και της εξοικονόμησης ενέργειας, υιοθέτησε τον Ιανουάριο του 2008 το λεγόμενο <<κλιματικό-ενεργειακό πακέτο>>, το οποίο προνοεί τη μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 20%, αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην τελική ενεργειακή κατανάλωση κατά 20% και αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας κατά 20% έως το 2020. Σο Δεκέμβριο του 2008 μετά από μαραθώνιες διαβουλεύσεις που διήρκεσαν σχεδόν ένα χρόνο, συμφώνησαν στην υιοθέτηση του πακέτου ενέργειας και κλιματικών αλλαγών και της δέσμης αντισταθμιστικών μέτρων.

Για να βρούμε **λύση** στα περιβαλλοντικά προβλήματα που αντιμετωπίζουμε σήμερα χρειάζονται πράξεις και μακροχρόνιος σχεδιασμός. Η ενέργεια, το περιβάλλον και η συνεχή ανάπτυξη της τεχνολογίας συνδέονται μεταξύ τους. Μία κοινωνία για να διατηρήσει την ανάπτυξη της πρέπει να χρησιμοποιεί ενέργεια που δεν έχει επιπτώσεις στο περιβάλλον (παρ. καθόλου εκπομπές ή εκπομπές που δεν επηρεάζουν αρνητικά το περιβάλλον).

Οι **ανανεώσιμες πηγές ενέργειας** φαίνεται να παρουσιάζουν μία από τις πιο πλεονεκτικές λύσεις. Για τον λόγο αυτό γίνεται εμφανής η σχέση μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της διαρκούς ανάπτυξης.

Το ενδιαφέρον για την ευρύτερη αξιοποίηση των ΑΠΕ ,καθώς και για την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών που δεσμεύουν το δυναμικό τους παρουσιάστηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή χρήση του 1979 και παγιώθηκε την επόμενη δεκαετία, μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων.

Για πολλές χώρες, οι ΑΠΕ αποτελούν μία σημαντική εγχώρια πηγή ενέργειας, με μεγάλες δυνατότητες ανάπτυξης σε τοπικό και εθνικό επίπεδο. Συνεισφέρουν σημαντικά στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό και εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού.

Παράλληλα, συντελούν και στην προστασία του περιβάλλοντος, καθώς η αξιοποίηση τους δεν επιβαρύνει ,αφού δεν συνοδεύεται από παραγωγή ρύπων ή αερίων που ενισχύουν τον κίνδυνο για κλιματικές αλλαγές. Έχει πλέον διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο πρωταρχικός υπεύθυνος για τη ρύπανση του περιβάλλοντος, καθώς σχεδόν το 95% της ατμοσφαιρικής ρύπανσης οφείλεται στην παραγωγή, τον μετασχηματισμό και τη χρήση των συμβατικών καυσίμων.

1.2 Κτίριο, ενέργεια και περιβαλλοντικές επιπτώσεις [3,4]

Τις τελευταίες δεκαετίες, η συνολική κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα και, ειδικότερα, η κατανάλωση ενέργειας στον κτιριακό τομέα παρουσιάζουν έντονα αυξητική τάση. Αυτοί οι ρυθμοί δεν συμβαδίζουν με τους εθνικούς στόχους για τη μείωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας και των εκπεμπόμενων ρύπων.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι δυνατότητες **εξοικονόμησης ενέργειας** στον κτιριακό τομέα στη χώρα μας είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Μπορούν δε να αναδειχτούν και να αξιοποιηθούν σε μεγάλο βαθμό με την εφαρμογή κατάλληλων μέτρων. Συγκεκριμένα, η εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα κτίριο εξασφαλίζεται εν μέρει με τον **κατάλληλο σχεδιασμό του κτιρίου** και την εφαρμογή **ενεργειακά αποδοτικών δομικών στοιχείων και συστημάτων** και εν μέρει μέσω της **υψηλής αποδοτικότητας των εγκατεστημένων ενεργειακών συστημάτων**. Προϋπόθεση για τα παραπάνω αποτελεί η άριστη ποιότητα

του σχετικού εξοπλισμού και της εγκατάστασής του καθώς και των σχετικών τεχνικών μελετών που τον προδιαγράφουν.

Παράλληλα, τα κτίρια επιδρούν σημαντικά πάνω στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον το οποίο με τη σειρά του καθορίζει την ποιότητα των κτιρίων. Η ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος των κτιρίων αποτελεί ένα συμβιβασμό ανάμεσα στις σχεδιαστικές προτεραιότητες, την ενεργειακή κατανάλωση και την ποιότητα του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος. Καθώς τα κτίρια έχουν χρόνο ζωής που ξεπερνάει τις μερικές δεκάδες χρόνια, οι οποιεσδήποτε αποφάσεις λαμβάνονται κατά τον σχεδιασμό τους έχει μακροχρόνιες συνέπειες τόσο στο συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο όσο και στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον

Επιπλέον, η παραγωγή ενέργειας ευθύνεται για το 94% των ανθρωπογενών εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα με ένα σημαντικό μερίδιο τουλάχιστον 45% να αναλογεί στον κτιριακό τομέα (ΚΑΠΕ 2006β). Το CO₂ και άλλα αέρια απορροφούν και κατακρατούν μέρος της θερμότητας, που εκπέμπει η επιφάνεια της γης προς το διάστημα με τη μορφή της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η παγίδευση της ακτινοβολίας ονομάζεται φαινόμενο του θερμοκηπίου και συμβάλλει στην υπερθέρμανση της γης. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση στηρίζεται κατά κύριο λόγο στους θερμικούς και πυρηνικούς σταθμούς. Μικρότερη συμμετοχή στην παραγωγή έχουν οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια, σε επίπεδο Ε.Ε., επήλθαν ουσιαστικές αλλαγές στο θεσμικό πλαίσιο της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα σημαντικότερα σημεία των θεσμικών αλλαγών αφορούν:

(α) την επιτάχυνση της διαδικασίας εισαγωγής του ανταγωνισμού στις επιμέρους αγορές και τη δημιουργία μιας ενιαίας εσωτερικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας,

(β) τον καθορισμό κανόνων για τις διασυνοριακές ανταλλαγές ηλεκτρικής ενέργειας

(γ) την ανάπτυξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

1.2.1. Υφιστάμενη κατάσταση [5-8]

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση η κατανάλωση και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των κρατών μελών κινείται ανοδικά, όπως και η εγκατεστημένη δυναμικότητα παραγωγής. Η υψηλότερη κατά κεφαλή κατανάλωση παρατηρείται στις σκανδιναβικές χώρες, ενώ η χαμηλότερη στις μεσογειακές .

Έχει διαπιστωθεί ότι στην Ευρώπη το 90% του χρόνου μας περνάμε εντός των κτιρίων . Τα κτίρια των κατοικιών μαζί με αυτά του τριτογενή τομέα αποτελούν την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας στην Ευρώπη καθώς σύμφωνα με στοιχεία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση, ψύξη, φωτισμό, και ζεστό νερό χρήσης στον οικιακό και τριτογενή κτιριακό τομέα, αναλογεί στο **40%** της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης στην Ευρώπη, ενώ μόλις το 28% στην βιομηχανία και το 32%

στις μεταφορές. Η συμμετοχή του οικιακού και τριτογενή κτιριακού τομέα στην συνολική κατανάλωση αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά τα επόμενα χρόνια ενώ θεωρείται ότι θα συμβάλει το 2010 στις συνολικές εκπομπές αερίων στην ατμόσφαιρα κατά 18% CO₂, 10% CO, 6% SO₂ και 4% NO_x.

Έχει καταγραφεί ότι η θέρμανση των κτιρίων κατέχει σημαντικό μέρος των συνολικών ενεργειακών καταναλώσεων τους (69%), ακολουθούμενη από τη παραγωγή ζεστού νερού (15%), τις ηλεκτρικές συσκευές και το φωτισμό (11%). Συγκριτικά αναφέρουμε ότι σε χώρες όπου υπάρχουν δριμύεις χειμώνες μακράς διάρκειας (π.χ Φιλανδία, Δανία) η θέρμανση ανέρχεται σε 1,5 ΤΠΠ/κατοικία ενώ στην Ελλάδα το αντίστοιχο μέγεθος είναι 0,9 ΤΠΠ/κατοικία.

Η ανά χώρα διακύμανση της ενέργειας που καταναλώνουν τα κτίρια ποικίλλει από 20% για την Πορτογαλία έως και 45% για την Ιρλανδία, ενώ **στην Ελλάδα** κυμαίνεται περίπου στο 35%, με μέσο ρυθμό αύξησης 4% τη τελευταία δεκαετία. Έτσι, τα κτίρια των κατοικιών μαζί με αυτά του τριτογενή τομέα (σχολεία, εκπαιδευτικά ιδρύματα, νοσοκομεία, γυμναστήρια, κολυμβητήρια, εστιατόρια, ξενοδοχεία, καταστήματα και γραφεία), αποτελούν πλέον τον δεύτερο μεγαλύτερο καταναλωτή ενέργειας **στην Ελλάδα**, ενώ στην Ευρώπη βρίσκονται ήδη στην πρώτη θέση. Αντιστοιχεί περίπου ένας τόνος ισοδύναμου πετρελαίου (1ΤΠΠ = 11630 kWh) ανά έτος και ανά κάτοικο για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των κτιρίων στην Ευρώπη.

ΟΙΚΙΑΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι περίπου τα 2/3 της καταναλισκόμενης ενέργειας των κτιρίων αφορά τα νοικοκυριά ή αλλιώς τον οικιακό τομέα. Προκειμένου να γίνει πιο κατανοητή η σημασία του **οικιακού τομέα**, θεωρείται ιδιαίτερα χρήσιμο σε αυτό το σημείο να γίνει μια αποσαφήνιση της έννοιας του. Η έννοια αυτή - όπως χρησιμοποιείται στα πλαίσια αυτής της εργασίας - περιλαμβάνει όλες τις ενεργειακές καταναλώσεις που πραγματοποιούνται από τις διάφορες λειτουργίες των ατόμων που κατοικούν σε ένα συγκεκριμένο οίκημα. Αυτές οι λειτουργίες περιλαμβάνουν κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό, θέρμανση και ψύξη χώρων, θέρμανση νερού, μαγείρεμα, χρήση διαφόρων ηλεκτρικών συσκευών αλλά και οποιαδήποτε άλλη δραστηριότητα που μπορεί να αναπτυχθεί και απαιτεί κατανάλωση ενέργειας με σκοπό την εξυπηρέτηση των αναγκών και των απαιτήσεων των ατόμων που διαμένουν μέσα σε αυτή την οικία.

Όσον αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητα, φαίνεται ότι το ενεργειακό προφίλ του οικιακού τομέα αλλάζει καθοδηγούμενο από αντιτιθέμενες τάσεις. Οι θετικοί παράγοντες αλλαγής συμπεριλαμβάνουν την ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικότερων και περιβαλλοντικά πιο φιλικού εξοπλισμού. Σχετικά με αυτό ο Ball (1981) αναφέρει ότι το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που χρησιμοποιείται στον οικιακό τομέα είναι για θέρμανση χώρων και ζεστό νερό.

Επομένως, αξιώνει ότι: «η πιο σημαντική πρόοδος για την εξοικονόμηση ενέργειας στον οικιακό τομέα θα προέλθει από μέτρα που θα παρθούν για την αύξηση της θερμικής απόδοσης των νέων κατοικιών και της μείωσης των θερμικών απωλειών τα οποία θα

επιτευχθούν με την εφαρμογή κατάλληλων μέτρων μόνωσης. Αυτά τα μέτρα έχουν αποδειχθεί ότι παρουσιάζουν μεγάλη οικονομική αποδοτικότητα» .

Επικουρικά με τα στατιστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω έχει διαπιστωθεί ότι το 40% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο οφείλεται στον κτιριακό τομέα.

Η κατανάλωση αυτή, σε μορφή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα την οικονομική επιβάρυνση λόγω του υψηλού κόστους της ενέργειας και τη μεγάλη επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με ρύπους, κυρίως λόγω του διοξειδίου του άνθρακα CO₂, το οποίο ευθύνεται κατά κύριο λόγο για το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Η κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια, τόσο στα οικιακής χρήσης όσο και στα εμπορικά, παρουσιάζει αυξητική τάση λόγω της αυξανόμενης χρήσης κλιματιστικών συστημάτων και μικροσυσκευών για θερμική άνεση .Η χρήση των κλιματιστικών αποτελεί σημαντικό παράγοντα αύξησης του ηλεκτρικού φορτίου αιχμής στη χώρα, με τεράστιες οικονομικές συνέπειες και σημαντική επιβάρυνση του καταναλωτή.

Η εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια προϋποθέτει τον κατάλληλο σχεδιασμό του κτιρίου, τη χρήση ενεργειακά αποδοτικών δομικών στοιχείων και συστημάτων και τη σωστή συνεργασία αυτών, δηλαδή απαιτείται άριστη ποιότητα του σχετικού εξοπλισμού και της εγκατάστασής του καθώς και ύπαρξη των σχετικών τεχνικών μελετών που τον προδιαγράφουν.

1.2.2. Προτεραιότητες στον τομέα των κτιρίων [3,4]

Τα κτίρια αποτελούν ένα μεγάλο ενεργειακό καταναλωτή που, ταυτοχρόνως, διαθέτει υψηλό δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας. Με τη χρήση κατάλληλων τεχνικών και οικονομικά αποτελεσματικών τεχνολογιών είναι δυνατή η επίτευξη σημαντικής βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτιρίων με αντίστοιχα περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη.

Η φάση του σχεδιασμού ενός κτιρίου είναι κρίσιμη γιατί καθορίζει την ενεργειακή συμπεριφορά του. Ο ενεργειακός σχεδιασμός έχει σαν στόχο την ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας, με ταυτόχρονη διατήρηση των συνθηκών άνεσης ή ακόμη και με βελτίωση τους.

Ο σωστός σχεδιασμός ενός κτιρίου βελτιστοποιεί ορισμένους από τους παράγοντες που συμμετέχουν στο θερμικό ισοζύγιο. **Ως θερμικό ισοζύγιο αναφέρεται το σύνολο όλων των θερμικών ροών από και προς το κτίριο.**

Ο ενεργειακός σχεδιασμός στηρίζεται σε τέσσερις αρχές:

1. Εφαρμογή βιοκλιματικού σχεδιασμού κτιρίων και περιβάλλοντος χώρου.
2. Χρήση κατάλληλων συστημάτων χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας.
3. Ενεργειακή διαχείριση με κατάλληλο σύστημα BMS, που εξασφαλίζει τη διαρκή επιτήρηση και τον έλεγχο των ενεργειακών συστημάτων του κτιρίου. Το σύστημα αυτό αποτελεί μία μοναδική λύση για τη συντονισμένη και ορθολογική λειτουργία των σύγχρονων εγκαταστάσεων σε μεσαία και μεγάλα κτιριακά συγκροτήματα.
4. Αξιοποίηση των διαθέσιμων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) για τη μερική ή ολική κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου.

Από τον ενεργειακό σχεδιασμό προκύπτουν τα παρακάτω οφέλη:

- Εξοικονόμηση ενέργειας με άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους λειτουργίας (λιγότερα καύσιμα).
- Μείωση των ρύπων, που προκαλούνται από την καύση των συμβατικών καυσίμων.
- Εξασφάλιση θερμικής και οπτικής άνεσης.

Ιδιαίτερη σημασία για την ενεργειακή συμπεριφορά ενός κτιρίου έχει η χρήση τεχνικών βιοκλιματικού σχεδιασμού. Με τον όρο αυτό περιγράφεται ο σχεδιασμός, ο οποίος, λαμβάνοντας υπόψη το τοπικό κλίμα, επιδιώκει την επίτευξη των βέλτιστων συνθηκών εσωτερικής άνεσης, με την αξιοποίηση των διαθέσιμων φυσικών πηγών και την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Βασικές τεχνικές του βιοκλιματικού σχεδιασμού αποτελούν

- **η θερμική προστασία του κτιριακού κελύφους**
- **τα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης και δροσισμού** (συστημάτων ηλιοπροστασίας και φυσικού και υβριδικού αερισμού αναλόγως των συνθηκών και της εποχής) και
- **τα συστήματα φυσικού φωτισμού**

Η **θερμική προστασία** του κελύφους εξασφαλίζεται, κυρίως, με τη χρήση κατάλληλων δομικών και μονωτικών υλικών για την επαρκή θερμομόνωση του κτιρίου, την αποφυγή θερμογεφυρών, τη χρήση επιχρισμάτων και χρωματισμών ψυχρών βαφών μεγάλης ανακλαστικότητας για τις προσήλιες τους θερινούς μήνες εξωτερικές επιφάνειες τοίχων και ταρατσών, τη χρήση διπλών υαλοπινάκων και αεροστεγών κουφωμάτων για τον περιορισμό των σημαντικότερων απωλειών των ανοιγμάτων και τέλος την φύτευση των δωμαίων όπου αυτό είναι εφικτό.

Τα **παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης** αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια για την κάλυψη των θερμικών αναγκών των χώρων ενός κτιρίου. Για το σκοπό αυτό, το πλέον σημαντικό στοιχείο είναι ο προσανατολισμός των ανοιγμάτων. Για παράδειγμα, τα ανοίγματα με νότιο προσανατολισμό είναι αυτά που δέχονται την περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία το χειμώνα και συνιστώνται για χώρους με μεγαλύτερη ανάγκη για θέρμανση. Εκτός, όμως, από αυτό το σύστημα άμεσου κέρδους, υπάρχουν και συστήματα έμμεσου κέρδους, όπως οι ηλιακοί τοίχοι, οι ηλιακοί χώροι (θερμοκήπια) και τα ηλιακά αίθρια.

Με τα **παθητικά συστήματα δροσισμού** επιδιώκεται η μείωση των θερμικών φορτίων του κτιρίου κατά τους θερινούς μήνες και επιτυγχάνεται με κατάλληλη σκίαση των ανοιγμάτων, ανάλογα με τον προσανατολισμό τους. Μεγάλη συμβολή στο δροσισμό του κτιρίου έχει και ο φυσικός αερισμός του, που, εξαρτάται επίσης από τη θέση των ανοιγμάτων και ο οποίος μπορεί να ενισχύεται με τη χρήση μηχανικών μέσων όπως οι ανεμιστήρες οροφής (υβριδικά συστήματα) και να επιφέρει το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα με πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας. Η ελεύθερη ψύξη (free cooling) ή αλλιώς ο νυκτερινός δροσισμός, συνίσταται στην ανανέωση του αέρα με φυσικό ή τεχνητό τρόπο τις νυχτερινές ή πρωινές ώρες, κατά τις οποίες η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του χώρου, είναι ευρύτατα χρησιμοποιούμενη τεχνική εξοικονόμησης.

Η **ηλιακή ακτινοβολία** μπορεί να εξυπηρετήσει με φυσικό τρόπο και τις ανάγκες για φωτισμό. Η επάρκεια του φυσικού φωτισμού και η κατανομή του εξαρτώνται από τη γεωμετρία των ανοιγμάτων και του φωτιζόμενου χώρου, αλλά και από τα φωτομετρικά χαρακτηριστικά των αδιαφανών επιφανειών, όπως το χρώμα τους και των υαλοπινάκων (ανακλαστικότητα, φωτεινή διαπερατότητα).

Δεδομένου ότι ο κάτοικος των **αστικών κέντρων** βιώνει το 80% της ζωής του στο εσωτερικό των κτιρίων είναι προφανής η επίδραση της ποιότητας του εσωτερικού κλίματος τόσο στην υγεία και την άνεση όσο και την παραγωγικότητά του.

Η κατά τα τελευταία χρόνια δραματική υποβάθμιση του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος καθώς και η χρήση υλικών και συσκευών μη φιλικών προς αυτό έχουν συντελέσει στην εμφάνιση σημαντικών, ποιοτικά και ποσοτικά, περιβαλλοντικών και ενεργειακών προβλημάτων στα κτίρια.

Ειδικότερα, η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στα μεγάλα αστικά κέντρα έχει συντελέσει στην δραματική αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας για τον δροσισμό των κτιρίων κατά την καλοκαιρινή περίοδο .

Παράλληλα η αύξηση των επιπέδων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και οι υψηλές εκπομπές μέρους των συγχρόνων δομικών υλικών συντελούν στην αύξηση της συγκέντρωσης ρυπαντών στο εσωτερικό των κτιρίων με ιδιαίτερα σημαντικές συνέπειες τόσο στην υγεία όσο και την παραγωγικότητα των ενοίκων .

Εκτός από την εφαρμογή αυτών των τεχνικών, δυνατότητες εξοικονόμησης υπάρχουν και στα συστήματα που καταναλώνουν ενέργεια για να καλύψουν τις ανάγκες για θέρμανση και ψύξη.

Για τα **συστήματα κεντρικής θέρμανσης** ιδιαίτερη σημασία έχει η σωστή διαστασιολόγησή τους, η τακτική συντήρησή τους καθώς και η κατάλληλη μόνωση των μερών τους. Επίσης, η χρήση αυτοματισμών, όπως οι θερμοστατικοί διακόπτες και οι χρονοδιακόπτες, εξασφαλίζουν, με χαμηλό κόστος αγοράς, σημαντική μείωση στην κατανάλωση καυσίμου.

Αντίστοιχα, τα **συστήματα ψύξης** πρέπει να διαστασιολογούνται και να συντηρούνται σωστά. Εξάλλου, οι κλιματιστικές συσκευές, όπως και όλες σχεδόν οι οικιακές ηλεκτρικές συσκευές, φέρουν ειδική ενεργειακή σήμανση, που βοηθά στην επιλογή της πλέον κατάλληλης και ενεργειακά αποδοτικής.

Οι τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας με χρήση ανανεώσιμων πηγών είναι ευρύτατα διαδεδομένες. Στον **οικιακό τομέα**, τέτοιες εφαρμογές για θέρμανση ή προθέρμανση νερού είναι: οι ηλιακοί συλλέκτες οι οποίοι εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία και οι γεωθερμικές αντλίες οι οποίες εκμεταλλεύονται την σταθερά υψηλή θερμοκρασία εδαφών με γεωθερμικό δυναμικό. Οι τελευταίες μάλιστα, αρχίζουν και βρίσκουν όλο και μεγαλύτερη εφαρμογή στο τομέα της ψύξης, εκμεταλλευόμενες τη σταθερή θερμοκρασία κοινών εδαφών (ή υδάτων) στα οποία απορρίπτουν ποσά θερμότητας.

Τέλος, σημαντικές δυνατότητες εξοικονόμησης δίνουν εξειδικευμένες διατάξεις ανάκτησης απορριπτόμενης ενέργειας. Τέτοιες διατάξεις χρησιμοποιούνται στα σπίτια συχνότατα σε περιπτώσεις τζακιών και λεβήτων κεντρικής θέρμανσης με αυξημένη ενεργειακή απόδοση που ανακτούν σημαντικά ποσά θερμότητας από τα απορριπτόμενα καυσαέρια και τα αποδίδουν για τη θέρμανση νερού ή αέρα. Σε άλλες πάλι περιπτώσεις κεντρικών κλιματιστικών μονάδων όπου προστίθεται διάταξη διασταυρούμενης ροής ανακτούνται ή αποδίδονται από τις απορριπτόμενες ποσότητες αέρα, ποσά θερμότητας για προκλιματισμό, και σπανιότερα δε ανακτούνται από συμπυκνωτές ψυκτικών διατάξεων για προθέρμανση αέρα. Οι δυνατότητες υπάρχουν. Είναι στο χέρι μας να κερδίσουμε το στοίχημα, ξεκινώντας από το σπίτι μας.

Σήμερα στην Ελλάδα υπάρχουν πολλά προγράμματα τα οποία στοχεύουν στην κτιριακή εξοικονόμηση ενέργειας όπως:

- **Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων**
- **Πρόγραμμα Εξοικονόμηση κατ 'οίκον**
- **ΚΑΠΕ – Εξοικονόμηση στα κτίρια**
- **Πρόγραμμα "Εξοικονομώ II"**

Τα παραπάνω καθορίζουν το πλαίσιο εξέτασης και ανάλυσης του όλου ενεργειακού και περιβαλλοντικού προβλήματος των κτιρίων. Η ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων δεν θα πρέπει να αποσυνδέεται από τα προβλήματα περιβάλλοντος και θα πρέπει να μελετάται σαν μια ενότητα μαζί με το συγκεκριμένο εξωτερικό μικροκλίμα στον χώρο του κτιρίου καθώς και το διαμορφούμενο εσωτερικό περιβάλλον.

Η αλληλοσχετιζόμενη φύση των παραμέτρων που ορίζουν την απόδοση των κτιρίων απαιτεί την ανάπτυξη πρωτοβουλιών, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό - πρακτικό επίπεδο, ενταγμένων σε μια συντονισμένη και ολοκληρωμένη δράση .

1.2.3. ΑΠΕ και θερμική αποθήκευση στα κτίρια [9,11,20,28]

Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) έχουν οριστεί οι ενεργειακές πηγές, οι οποίες υπάρχουν εν αφθονία στο φυσικό περιβάλλον. Είναι η πρώτη μορφή ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος πριν στραφεί έντονα στη χρήση των ορυκτών καυσίμων.

Οι ΑΠΕ πρακτικά είναι ανεξάντλητες, η χρήση τους δεν ρυπαίνει το περιβάλλον ενώ η αξιοποίησή τους περιορίζεται μόνον από την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών που θα έχουν σαν σκοπό την δέσμευση του δυναμικού τους.

Το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών εμφανίσθηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1974 και παγιώθηκε μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων την τελευταία δεκαετία.

Για πολλές χώρες, οι ΑΠΕ αποτελούν μια εγχώρια πηγή ενέργειας με ευνοϊκές προοπτικές συνεισφοράς στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Παράλληλα, συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος, καθώς έχει πλέον διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο κλάδος που ευθύνεται κατά κύριο λόγο για τη ρύπανση του περιβάλλοντος.

Είναι χαρακτηριστικό ότι ο μόνος δυνατός τρόπος που διαφαίνεται για να μπορέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση να ανταποκριθεί στο φιλόδοξο στόχο που έθεσε το 1992 στη συνδιάσκεψη του Ρίο για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη, να περιορίσει δηλαδή, μέχρι το έτος 2000 τους ρύπους του διοξειδίου του άνθρακα στα επίπεδα του 1993, είναι να επιταχύνει την ανάπτυξη των ΑΠΕ.

Οι μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι:

- **ο ήλιος - ηλιακή ενέργεια**, με υποτομείς τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, τα παθητικά ηλιακά συστήματα και τη φωτοβολταϊκή μετατροπή,
- ο άνεμος - αιολική ενέργεια,
- οι υδατοπτώσεις - υδραυλική ενέργεια, με περιορισμό στα μικρά υδροηλεκτρικά, ισχύος κάτω των 10 MW,
- **η γεωθερμία - γεωθερμική ενέργεια**: υψηλής και χαμηλής ενθαλπίας,

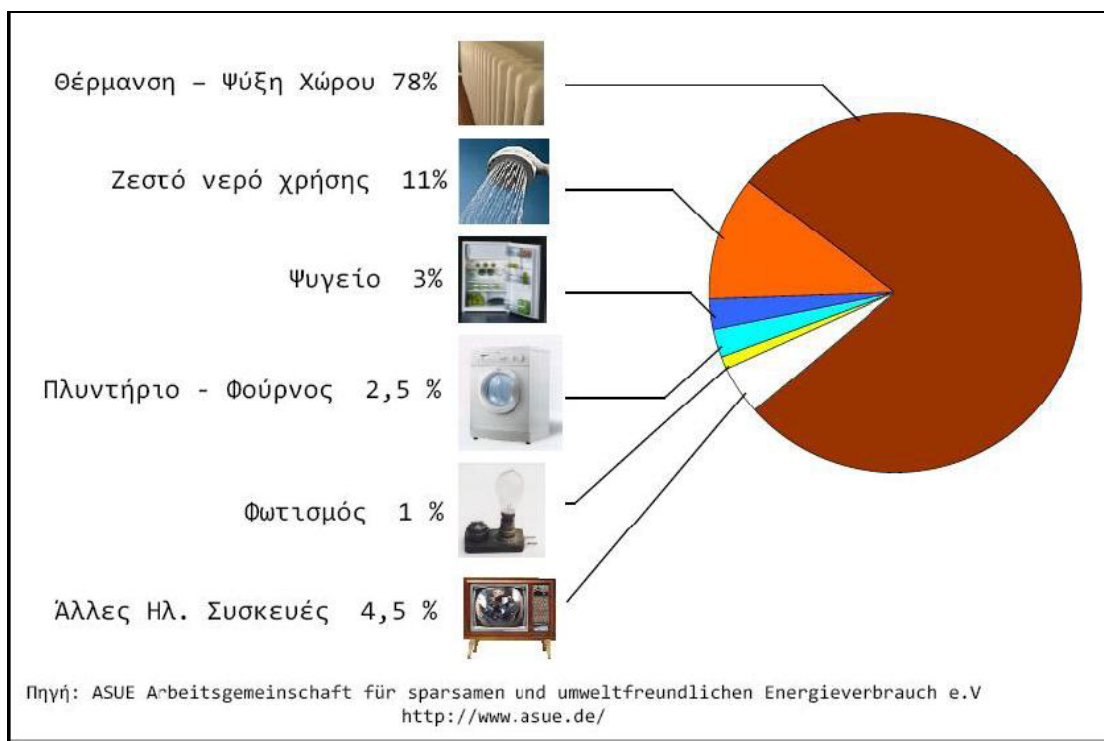
- **η βιομάζα:** θερμική ή χημική ενέργεια με την παραγωγή βιοκαυσίμων, τη χρήση υπολειμμάτων δασικών εκμεταλλεύσεων και την αξιοποίηση βιομηχανικών αγροτικών (φυτικών και ζωικών) και αστικών αποβλήτων,
- **οι θάλασσες:** ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκή ενέργεια και ενέργεια των ωκεανών από τη διαφορά θερμοκρασίας των νερών στην επιφάνεια και σε μεγάλο βάθος.

Ο **περιβαλλοντικός προβληματισμός** έχει κατακλύσει την κοινωνία και τις βιομηχανίες τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Μια προτεινόμενη λύση στο πρόβλημα της έλλειψης των ενεργειακών αποθεμάτων είναι **η χρήση τεχνολογιών θερμικής αποθήκευσης ενέργειας**. Η θερμική αποθήκευση ενέργειας μπορεί να συμβάλει δραματικά στην εκπλήρωση των αναγκών της κοινωνίας για πιο αποδοτική και καθαρότερη ενέργεια.

Για να καρπωθούν τα οφέλη οι μηχανικοί πρέπει να λάβουν υπόψη την αξιοπιστία, την πρακτικότητα καθώς και το κόστος αυτών των συστημάτων ξεχωριστά για κάθε εφαρμογή.

Η κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια μπορεί να διαιρεθεί στις εξής 4κατηγορίες :

1. Ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται για τις ηλεκτρικές συσκευές του σπιτιού.
2. Ενέργεια που χρησιμοποιείται για την θέρμανση του νερού .
3. Ενέργεια που χρησιμοποιείται για την θέρμανση του χώρου.
4. Ενέργεια που χρησιμοποιείται για την ψύξη του χώρου.



Σχήμα 1.2: Κατανομή μιας τυπικής κατανάλωσης ενέργειας ενός σπιτιού στη χώρα μας

συσκευή	κατανάλωση [W]	ώρες λειτουργίας/ ημέρα	κατανάλωση/ ημέρα [Wh]	κατανάλωση/ έτος [kWh]
ηλεκτρική κουζίνα	2500	1	2500	912,5
ηλεκτρικός θερμοσίφωνας [120lt]	4000	0,5	2000	730
στεγνωτήριο ρούχων	3000	0,5	1500	547,5
ηλεκτρικός απορροφητήρας	1000	1	1000	365
ηλεκτρικός φούρνος	1000	1	1000	365
πληντύριο πιάτων	1800	0,5	900	328,5
φωτισμός [2 W/τ.μ.]	220	4	880	321,2
σταθερός η/υ	400	2	800	292
σίδηρο ρούχων	1500	0,5	750	273,8
ηλεκτρική σκούπα	1200	0,5	600	219
τηλεόραση 37"	150	4	600	219
ψυγείο [450lt]	20	24	480	175,2
ραδιόφωνο	200	2	400	146
σεσουάρ	1500	0,25	375	136,9
καφετιέρα	1000	0,25	250	91,3
πληντύριο ρούχων	400	0,5	200	73
τηλεόραση 21"	80	2	160	58,4
ασύρματο τηλέφωνο	6	24	144	52,6
μίξερ	500	0,25	125	45,6
φορητός η/υ	50	2	100	36,5
τηλεόραση 21" [standby]	2	22	44	16,1
τηλεόραση 37" [standby]	2	20	40	14,6
κινητό τηλέφωνο [4*9w]	36	1	36	13,1
ραδιόφωνο [standby]	1	22	22	8
σύνολο			14.906,0	5.440,7

Σχ.1.3:Ετήσια κατανάλωση ενέργειας στο σπίτι

Από τα παραπάνω μόνο το ηλεκτρικό ρεύμα πρέπει να παρέχεται χωρίς διακοπές .Οι εφαρμογές που παρέχουν θέρμανση δεν χρειάζεται να τροφοδοτούνται άμεσα με ενέργεια αφού οι διακυμάνσεις επιτρέπονται και επομένως μπορούν να συμβιβαστούν με την μεταβαλλόμενη φύση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Επιπλέον, ένα πολύ μεγάλο ποσοστό του ενεργειακού προϋπολογισμού κάθε οικίας, το οποίο αγγίζει το 55,2%, προέρχεται από την θέρμανση-ψύξη του χώρου και την θέρμανση του νερού.Ιοθέντος του γεγονότος ότι η ενέργεια που καταναλώνεται από τις οικίες αντιστοιχεί στο 20% της ενέργειας που καταναλώνεται παγκοσμίως, η αποθήκευση θερμικής ενέργειας θα μπορούσε να καλύψει την κυμαινόμενη ζήτηση σε ποσοστό 10%.

Όπως κατανοούμε λοιπόν και από τα παραπάνω, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η αυξανόμενη ενεργειακή απόδοση διαδραματίζουν τον κυρίαρχο ρόλο των ενεργειακών

πολιτικών. Και οι δύο αυτοί παράγοντες είναι πολύ σημαντικοί για τον περιορισμό, όσο αυτό είναι δυνατόν, των κλιματικών αλλαγών του πλανήτη αλλά και προκειμένου να μειώσουμε την εξάρτησή μας από οποιαδήποτε μορφή καύσιμα ,γεγονός μείζονος σημασίας ειδικά για τις χώρες με ελάχιστα ή καθόλου ενεργειακά αποθέματα.

Η ζήτηση ενέργειας δεν είναι σταθερή , είτε **θερμική** είτε **ηλεκτρική**. Επιπλέον κάποιες μορφές ενέργειας όπως η ηλιακή ή η αιολική δεν έχουν σταθερή παραγωγή .Έχουν δηλαδή ασυνεχή διαθεσιμότητα η οποία κιόλας **δεν συμπίπτει πάντα με την ζήτηση** . **Ακόμα, πολλές φορές παράγεται περισσότερη ενέργεια από όση απαιτείται ή και το αντίθετο.**

Σε εφαρμογές όπου είτε η προσφορά είτε η ζήτηση μεταβάλλονται αρκετά , για την αξιόπιστη διαθεσιμότητα της ενέργειας χρειάζονται πολύ ογκώδη συστήματα μετατροπής ενέργειας ώστε να καλύπτουν τις ώρες αιχμής. Το αποτέλεσμα είναι, **υψηλού κόστους** και μερικώς μη αποδοτικές επενδύσεις , αφού τα συστήματα είναι τεράστια και τις περισσότερες φορές λειτουργούν στο ελάχιστο φορτίο.

Εναλλακτικά , το **κόστος των επενδύσεων** μπορεί να μειωθεί αν εφαρμοστούν τεχνικές διαχείρισης του φορτίου ώστε να αμβλυνθεί η ζήτηση ισχύος ή να χρησιμοποιηθούν συστήματα αποθήκευσης ενέργειας ώστε να μικρύνουν σε όγκο τα συστήματα παραγωγής ενέργειας.

Τα μικρά συστήματα λειτουργούν στο μέγιστο φορτίο ή κοντά στο μέγιστο φορτίο τους ανεξάρτητα από την στιγμιαία αλλαγή της ζήτησης ισχύος, αποθηκεύοντας την πλεονάζουσα ενέργεια που παράγουν κατά την χαμηλή ζήτηση και αποδεσμευόντάς την κατά τις ώρες αιχμής.

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στη χρήση της **ηλιακής ακτινοβολίας**. Η ηλιακή ενέργεια προέρχεται από τον ήλιο και αξιοποιείται μέσω τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται τη θερμική και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του ήλιου με χρήση μηχανικών μέσων για τη συλλογή, αποθήκευση και διανομή της.

Τα πλεονεκτήματά της είναι ότι είναι καθαρή πηγή ενέργειας, δωρεάν, άφθονη και ανανεώσιμη. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα στη χρήση της ηλιακής ενέργειας είναι όπως αναφέραμε η περιοδικότητά της, χαρακτηριστικό στοιχείο όλων σχεδόν των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Δηλαδή τις ώρες της ημέρας και ανάλογα με την εποχή του έτους η ηλιοφάνεια είναι διακοπτόμενη και επιπλέον περίπου οι μισές ώρες του έτους είναι νύχτα.

Αυτό σημαίνει αυτόματα ότι πολύ συχνά η διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας μπορεί να μην συμπίπτει με τη ζήτηση , οπότε μία μορφή αποθήκευσης της ηλιακής ενέργειας που θα δημιουργεί μία χρονική καθυστέρηση στην απόδοσή της θα ήταν ωφέλιμη και ενεργειακά και οικονομικά.

Συνεπώς , η μόνη λύση στο πρόβλημα αυτό φαίνεται να είναι η αποθήκευση της ενέργειας

Μια οικονομική και αποδοτική τεχνολογία που θα χρησιμοποιείται προκειμένου να αποθηκεύονται μεγάλα ποσά θέρμανσης ή ψύξης σε καθορισμένο όγκο, βρίσκεται υπό μελέτη εδώ και πολύ καιρό.

Οι τεχνικές της αποθήκευσης ενέργειας τα τελευταία χρόνια έχουν φτάσει στο σημείο να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην μοντέρνα τεχνολογία.

Συγκεκριμένα , η αποθήκευση ενέργειας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην επιτυχία οποιασδήποτε εγκατάστασης παραγωγής που προσπαθεί να καλύψει την ενεργειακή ζήτηση. Για παράδειγμα η ανάγκη αποθήκευσης στις εφαρμογές ηλιακής ενέργειας είναι επιτακτική , ειδικά όταν η διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας είναι στο κατώτατο σημείο , κυρίως τον χειμώνα.

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να συνεισφέρουν τα μέγιστα ώστε να ικανοποιηθεί αποτελεσματικά η ανάγκη της κοινωνίας για πιο αποδοτικά και , φιλικότερα προς το περιβάλλον συστήματα παραγωγής ή διαχείρισης ενέργειας που χρησιμοποιούνται στην θέρμανση και την ψύξη κτιρίων , στην αεροναυτική και σε πρακτικές εφαρμογές.

Η αποθήκευση από την πλευρά της ενεργειακής κατανάλωσης , σε κατοικίες και εμπορικά κτίρια έχει αρχίσει να γίνεται επιτακτική ανάγκη και αποδεικνύεται πολύ σημαντική στην μείωση των φορτίων αιχμής που επιβάλλονται από τα συμβατικά ηλεκτρικά συστήματα.

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συχνά οδηγούν σε σημαντικά οφέλη όπως:

- Μειωμένο κόστος ενέργειας
- Μειωμένη κατανάλωση ενέργειας
- Εσωτερικός αέρας καλύτερης ποιότητας
- Μειωμένα αρχικά έξοδα
- Μειωμένα έξοδα συντήρησης
- Μειωμένος όγκος εξοπλισμού
- Αποδοτικότερη και πιο αποτελεσματική χρήση του εξοπλισμού
- Διατήρηση των φυσικών καυσίμων (διευκολύνοντας και κάνοντας πιο αποδοτική την χρήση της ενέργειας ή την αντικατάσταση των καυσίμων)
- Μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (CO₂) καθώς και αερίων που επηρεάζουν αρνητικά το περιβάλλον (CFCs)

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας έχουν **τεράστιες προοπτικές** ,να αυξήσουν την **αποτελεσματικότητα** του εξοπλισμού μετατροπής ενέργειας καθώς και να διευκολύνουν την μεγάλης κλίμακας **αντικατάσταση** καυσίμων στην παγκόσμια οικονομία.

Η αποθήκευση ενέργειας είναι πολύπλευρη και για να γίνει σωστά ή χρήση της πρέπει να υπάρχει κατανόηση των ενεργειακών αποθεμάτων. Γενικά χρειάζεται ένας συντονισμένος αριθμός κινήσεων σε πολλαπλούς τομείς του ενεργειακού συστήματος για να κατανοηθεί πλήρως η δυναμική των οφελών της αποθήκευσης ενέργειας.

Τα κριτήρια απόδοσης για την αποθήκευση ενέργειας μπορούν να καθορίσουν σε ένα καινούργιο τεχνολογικά σύστημα όταν έχει χαρακτηριστικά που το κάνουν χρήσιμο και ελκυστικό και επομένως όταν αξίζει η περαιτέρω ανάπτυξη και έρευνα πάνω σε αυτό.

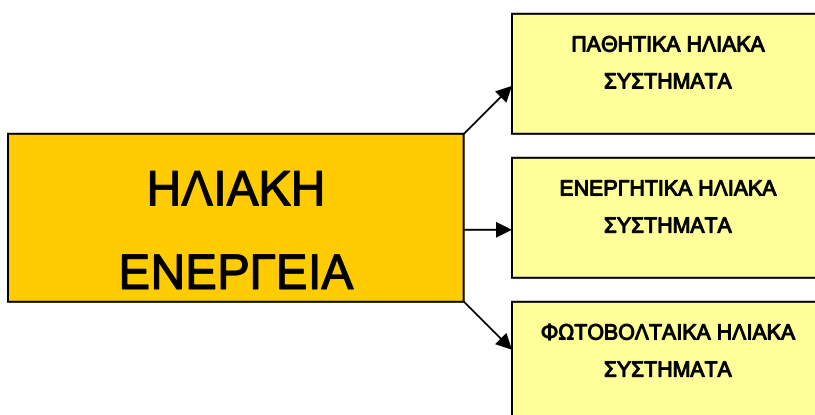
Η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας έχει τον κυρίαρχο ρόλο στην εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια, η οποία συνδέεται άμεσα με την αποθήκευση θερμότητας υπό λανθάνουσα μορφή στα κατασκευαστικά προϊόντα.

Εφαρμογές οι οποίες αποθηκεύουν θερμότητα κατά την διάρκεια της μέγιστης παραγωγής φορτίου και την αποδίδουν κατά την διάρκεια της περιορισμένης παραγωγής φορτίου αποτελούν τα **υλικά αλλαγής φάσης** με τα οποία θα ασχοληθούμε σε αυτή την μελέτη.

1.3 Συστήματα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας [10,11,12]

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, μπορεί να χωριστεί σε τρεις βασικές κατηγορίες εφαρμογών:

1. τα παθητικά ηλιακά συστήματα,
2. τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα,
3. τα φωτοβολταϊκά συστήματα όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 1.4: Συστήματα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας .

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.

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

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

1.3.1 Παθητικά ηλιακά συστήματα [3,11,13,14]

Παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης ονομάζουμε 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 λειτουργία των παθητικών συστημάτων για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας προϋποθέτει ένα σωστά ενεργειακά σχεδιασμένο κτίριο, σύμφωνα με τις αρχές βιοκλιματικού σχεδιασμού που ήδη αναφέρθηκαν.

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα επιτρέπουν σημαντική μείωση του ενεργειακού κόστους για τη θέρμανση των κτιρίων και βελτιώνουν τη θερμική άνεση των ενοίκων τους.

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. Αυτό σημαίνει ότι το κέλυφος πρέπει να επιτρέπει:

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

Η λειτουργία των παθητικών συστημάτων βασίζεται σε 3 μηχανισμούς:

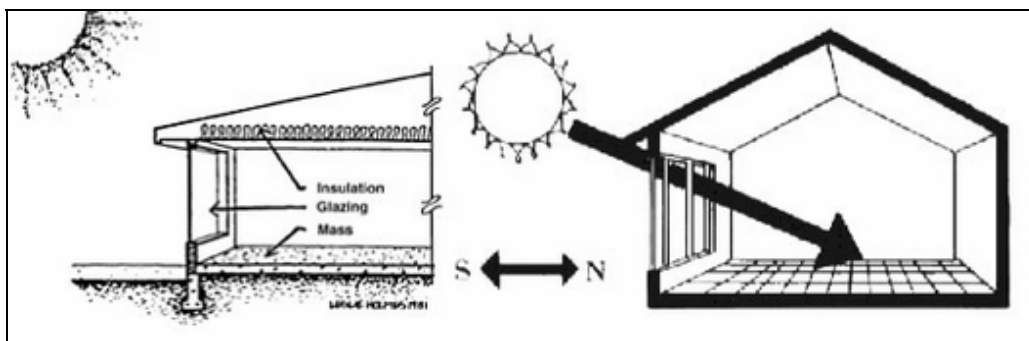
- Το φαινόμενο του θερμοκηπίου (συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας και διατήρησή της στο εσωτερικό του κτιρίου για θέρμανση των χώρων)
- Τη θερμική υστέρηση των υλικών (θερμοχωρητικότητα)
- Τις αρχές μετάδοσης θερμότητας (την ιδιότητα της θερμότητας να μεταφέρεται από το θερμό στο κρύο αντικείμενο)

Είδη παθητικών ηλιακών συστημάτων για θέρμανση:

- Άμεσου κέρδους
- Έμμεσου κέρδους
- Απομονωμένου κέρδους

1.3.1.1. Άμεσου κέρδους [11,15,16]

Στα συστήματα άμεσου κέρδους είναι το πιο απλό και συνηθέστερο παθητικό ηλιακό σύστημα και βασίζεται στην εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας για τη θέρμανση των κτιρίων μέσω της αξιοποίησης νότιων παραθύρων.



Σχήμα 1.5: Σύστημα άμεσου κέρδους

Στην περίπτωση αυτή το κτίριο λειτουργεί σαν συλλέκτης, αποθήκη και διανομέας της θερμότητας.

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 παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των κτιρίων άμεσου κέρδους είναι χαρακτηριστικά του κτιρίου τόσο εξωτερικά όσο και εσωτερικά :

- **Προσανατολισμός ηλιακών υαλοπινάκων.**

Τα ηλιακά τζάμια 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.

- **Μέγεθος 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.

- **Τύπος ηλιακών υαλοπινάκων**

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.

- **Ποιότητα και οι σχεδιασμός της διαθέσιμης μάζας**

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 έχειδειχθεί ότι θα πρέπει να είναι τουλάχιστον έξι φορές την περιοχή του ηλιακού υαλοπίνακα, ανεξαρτήτως του πάχους.

- **Συντελεστής απωλειών θερμότητας του κτιρίου**

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/ημέραΚ), και συγκεκριμένα 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.

- **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 με 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

- **Ηλιακή κάλυψη όλων των χώρων.**

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.

1.3.1.2. Έμμεσου κέρδους [3,11,15-19]

Τα 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).

Αυτά τα συστήματα απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο κέλυφος και ύστερα επιτρέπουν στη θερμότητα να διεισδύσει στους χώρους διαβίωσης.

Στα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων συστημάτων είναι οι ηλιακοί τοίχοι, τα ηλιακά θερμοκήπια και τα ηλιακά αίθρια τα οποία περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω:

- **Ηλιακοί τοίχοι**

- **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

Τοίχοι μη θερμοσιφωνικής ροής, χωρίς θυρίδες είτε συμπαγούς κατασκευής, είτε αποτελούμενοι από δοχεία νερού ή με υλικά αλλαγής φάσης όπως θα δούμε αναλυτικά και παρακάτω

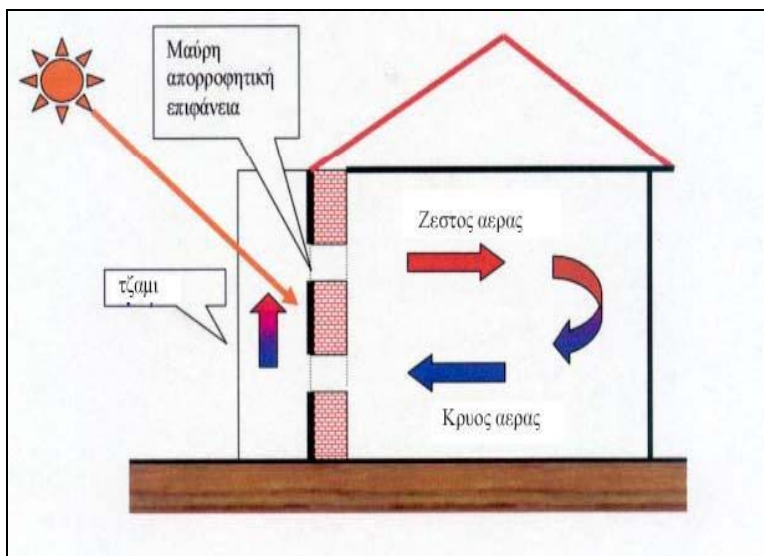
Τοίχοι μάζας θερμοσιφωνικής ροής

Τοίχοι Trombe – Michel, όπου μέρος της συλλεγόμενης θερμότητας στο διάκενο μεταξύ τοίχου και υαλοπίνακα μεταφέρεται μέσω θυρίδων στον εσωτερικό χώρο με φυσική κυκλοφορία του αέρα.

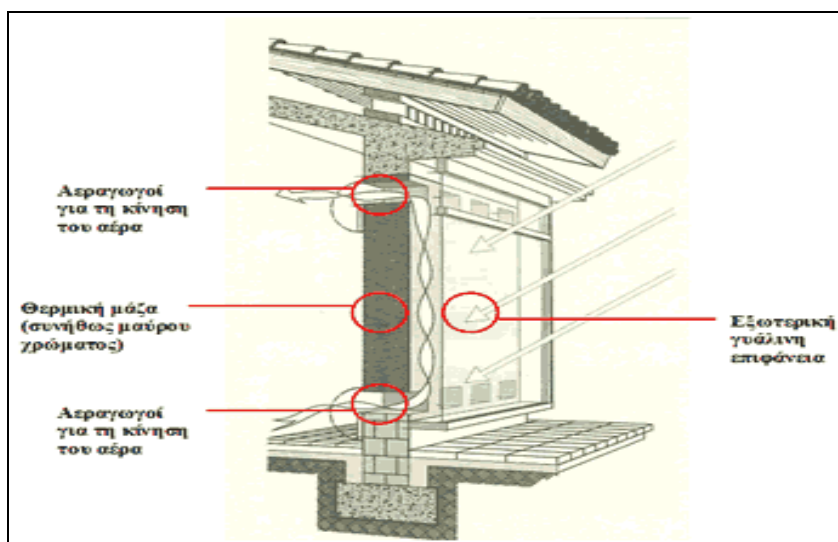
Οι θυρίδες του τοίχου βρίσκονται στο άνω και κάτω τμήμα του όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα, που μας δίνει μια οπτική απεικόνιση της λειτουργίας του τοίχου Trombe.

Κατά τη διάρκεια της ημέρας ο θερμός αέρας κινείται προς τα πάνω και εισέρχεται στο χώρο απ' την πάνω θυρίδα, ενώ ο ψυχρότερος αέρας από τον εσωτερικό χώρο περνάει από τη κάτω θυρίδα και αντικαθιστά το κενό που δημιουργήθηκε μεταξύ τοίχου και υαλοπίνακα.

Το καλοκαίρι βασική προϋπόθεση καλής λειτουργίας είναι ο τοίχος να σκιάζεται με σταθερό ή κινούμενο σκίαστρο και ο φεγγίτης στο πάνω μέρος του υαλοστασίου να ανοίγει για να εξασφαλιστεί η απομάκρυνση του θερμού αέρα.



Σχήμα 1.6: Απεικόνιση της μορφής ενός τυπικού συστήματος trombe τοίχου-υαλοπίνακα και της ανακυκλοφορίας αέρα που επιτυγχάνεται.



Σχήμα 1.7: Διάταξη τοίχου θερμικής αποθήκευσης.

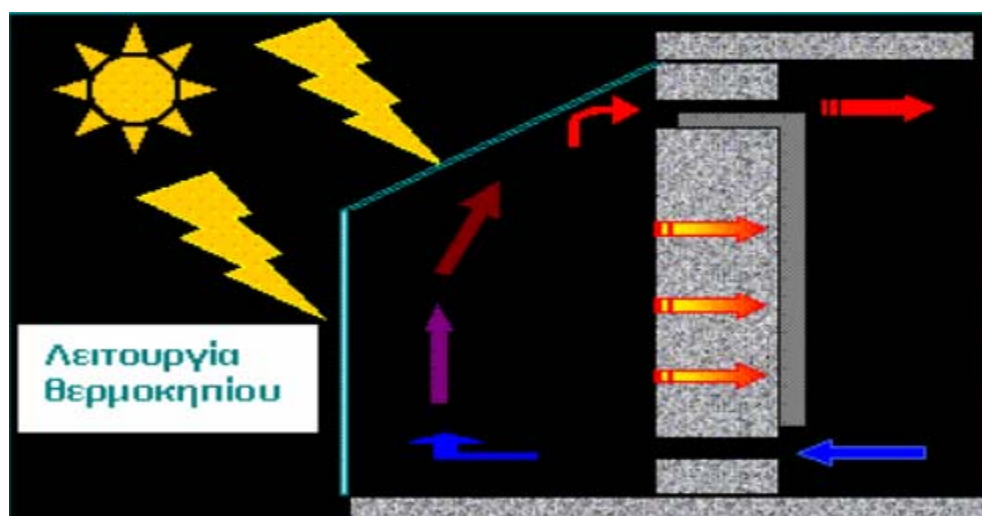
- **Ηλιακός χώρος - θερμοκήπιο.**

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. Το θερμοκήπιο ή σέρα ή ηλιακός χώρος είναι ένας κλειστός χώρος με νότιο προσανατολισμό προσαρτημένο σε τμήμα του κτιρίου.

Η απόδοση του βελτιώνεται αν προβλεφτούν θυρίδες στο πάνω και κάτω μέρος του τοίχου για τη κίνηση του αέρα. Το σύστημα λειτουργεί καλύτερα αν μεταξύ του θερμοκηπίου και του κτιρίου υπάρχει τοίχος θερμικής αποθήκευσης κατασκευασμένος από υλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας



Σχήμα 1.8: Θερμοκήπιο



Σχήμα 1.9: Λειτουργία Θερμοκηπίου

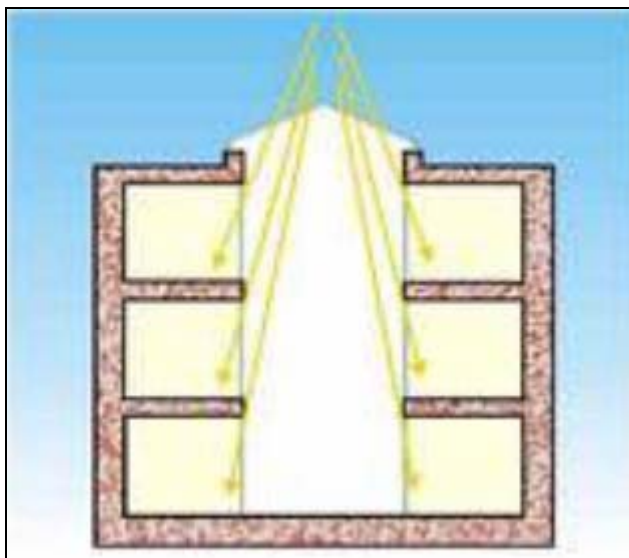
Συμβάλλει στη θερμική άνεση στους βασικούς χώρους καθώς απομονώνει τους κύριους χώρους από τις ακραίες καταστάσεις έκθεσης, μειώνοντας έτσι πιθανή θερμοκρασιακή διακύμανση και την αντηλιά ενώ παράλληλα αυξάνει τις δυνατότητες συλλογής θερμότητας μιας δεδομένης πρόσοψης, με το να επιτρέπει μια μεγαλύτερη περιοχή από υαλοπίνακες από ό,τι είναι δυνατόν και επιθυμητό με άμεσο κέρδος.

Το μέγεθος του εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής. Οι συνθήκες υπερθέρμανσης που δημιουργούνται το καλοκαίρι αντιμετωπίζονται με σκιασμό του θερμοκηπίου (εξωτερικά) και ανοίγματα στην οροφή για την απομάκρυνση του θερμού αέρα.

- **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.



Σχήμα 1.10: Ηλιακό αίθριο

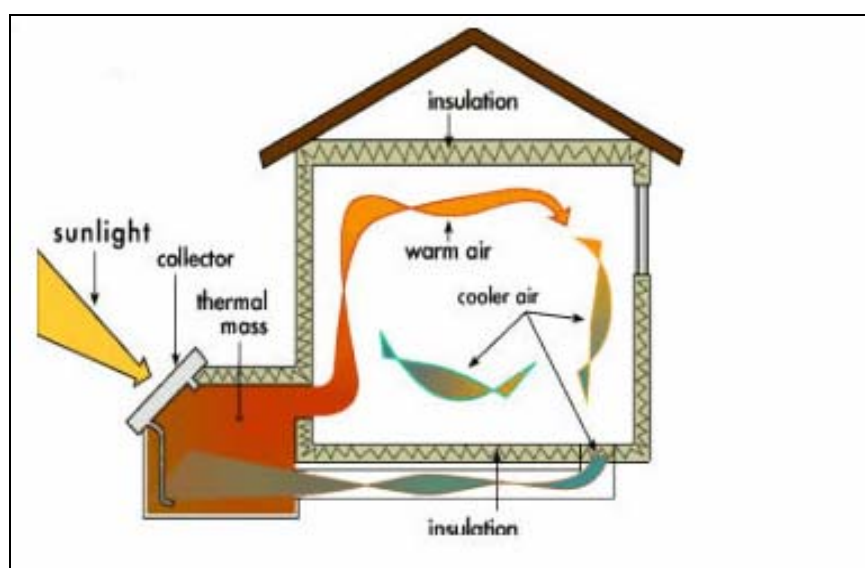
1.3.1.3. Απομονωμένου κέρδους [11,13,15]

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 πάνελ 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 1.11: Θερμοσιφωνικό πάνελ εκτός κτιριακού περιβλήματος .

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 θερμοσίφωνας, το σύστημα του Barra, η ηλιακή καμινάδα κ.ο.κ..

1.3.2 Ενεργητικά ηλιακά συστήματα [10,11,15,20]

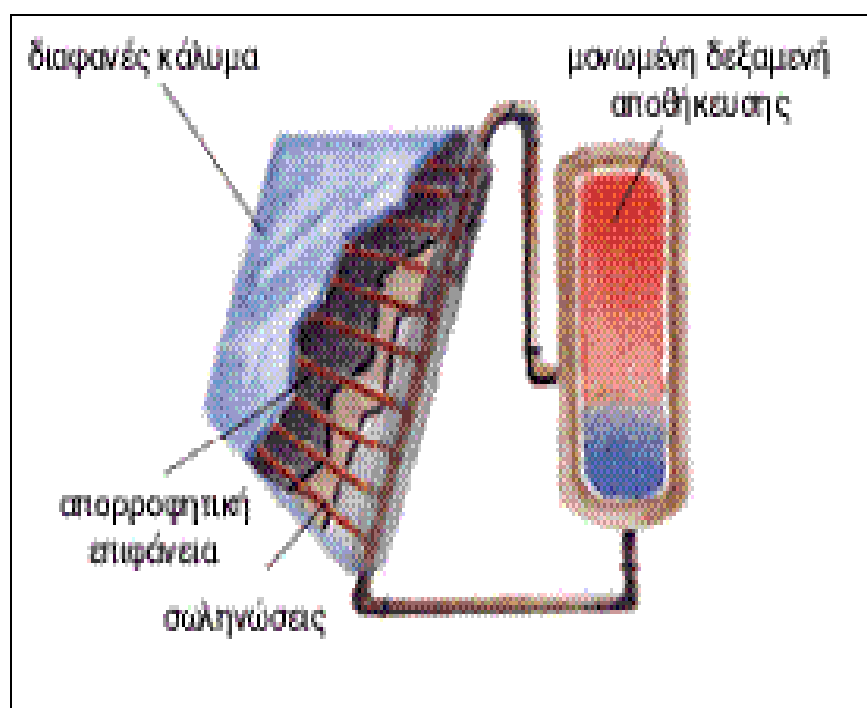
Ονομάζονται τα συστήματα που συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία, και στη συνέχεια τη μεταφέρουν με τη μορφή θερμότητας σε νερό, αέρα ή σε κάποιο άλλο ρευστό.

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 τιμήμα συλλογής (οι ηλιακοί συλλέκτες, η επιφάνεια απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας).
- Το τιμήμα 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 1.12: Τυπικό ενεργητικό σύστημα.

Τα ενεργητικά συστήματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το κύκλωμα κυκλοφορίας του θερμαινόμενου μέσου:

- **Ανοικτού κυκλώματος** όπου έχουμε απευθείας θέρμανση του νερού χρήσης δηλαδή το θερμαινόμενο μέσο είναι το ίδιο το νερό που θα χρησιμοποιήσουμε. 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).

- **Κλειστού κυκλώματος** όπου 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. 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 θερμοσίφοντας. 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.).

1.3.3 Φωτοβολταϊκά ηλιακά συστήματα [10,15,20,21]

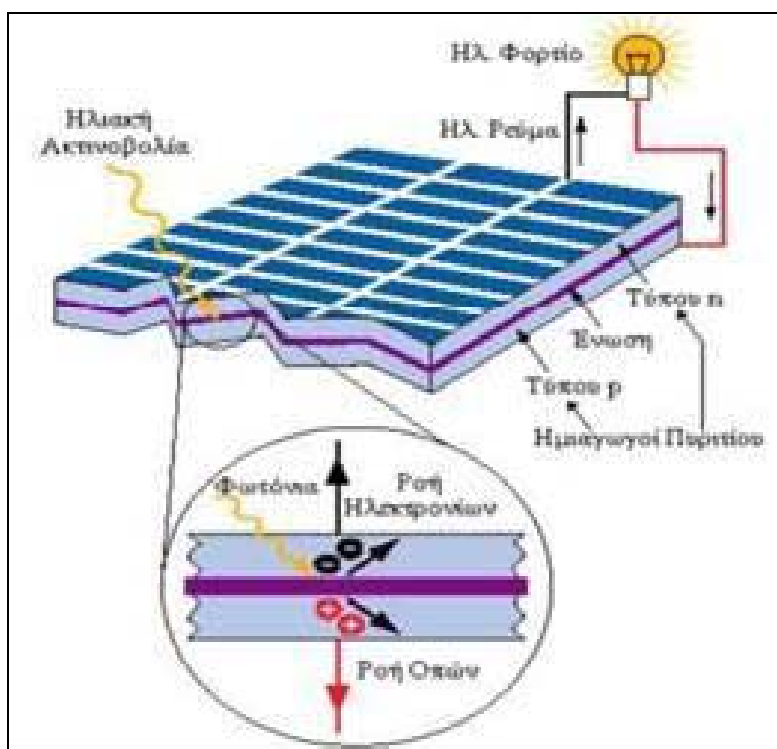
Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, αντλώντας ενέργεια από τον ήλιο.

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 1.13: Σχηματική απεικόνιση του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

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.

1.4 Μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας [22]

Το πρόβλημα ενέργειας όπως αναλύθηκε παραπάνω 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 ενέργεια
- την ηλεκτρική ενέργεια
- τη θερμική ενέργεια

1.4.1 Αποθήκευση μηχανικής ενέργειας [15,23-26]

Τα συστήματα αποθήκευσης μηχανικής ενέργειας περιλαμβάνουν:

- αποθήκευση ενέργειας με βαρύτητα (GPM),
- αποθήκευση ενέργειας με άντληση νερού (PHPS),
- αποθήκευση ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα (CAES)
- αποθήκευση ενέργειας με σφονδύλους (Flywheels)

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 κοιλάτες 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 το 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.

Η αποθήκευση ενέργειας με σφονδύλους (Flywheels)

γίνεται 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.

Η αποθήκευση ενέργειας με βαρύτητα (GPM)

χρησιμοποιεί ένα πολύ μεγάλο πιστόνι που σχηματίζει εναίωρημα σε έναν βαθύ άξονα γεμάτο με νερό και ολισθαίνοντα σφραγίσματα για την αποτροπή διαρροής γύρω από το έμβολο και μία σωλήνα επιστροφής συνδεδεμένη με μία τουρμπίνα αντλίας στο επίπεδο του εδάφους.

Το έμβολο αποτελείται από λωρίδες φτιαγμένες από μπετόν και σιδηρομετάλλευμα για υψηλή πυκνότητα και χαμηλό κόστος. Κατά την έναρξη της λειτουργίας, ο άξονας είναι γεμάτος με νερό αλλά κατόπιν σφραγίζεται και δεν απαιτείται επιπλέον νερό.

Καθώς το έμβολο πέφτει σπρώχνει το νερό προς τα κάτω στον άξονα αποθήκευσης μέχρι την σωλήνα περιστροφής διαμέσου του στροβίλου και περιστρέφει μια γεννήτρια / κινητήρα ηλεκτρικής ενέργειας.

Για να αποθηκεύσει ενέργεια η ισχύς του δικτύου κινεί την γεννήτρια αντίστροφα περιστρέφοντας την αντλία ώστε να σπρώξει το νερό προς τα κάτω στον σωλήνα περιστροφής και εντός του άξονα ,ανυψώνοντας το έμβολο.

Εκατοντάδες MW μπορούν να αποθηκευτούν ανά άξονα με υψηλή απόδοση, αφού οι τουρμπίνες αντλίας έχουν χαμηλές απώλειες και για την μέτρια ταχύτητα του εμβόλου οι τριβές είναι αμελητέες.

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.

1.4.2 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας [15,27]

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.

1.4.3 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας [15,24,28-30]

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 παραπάνω

1.4.3.1 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.

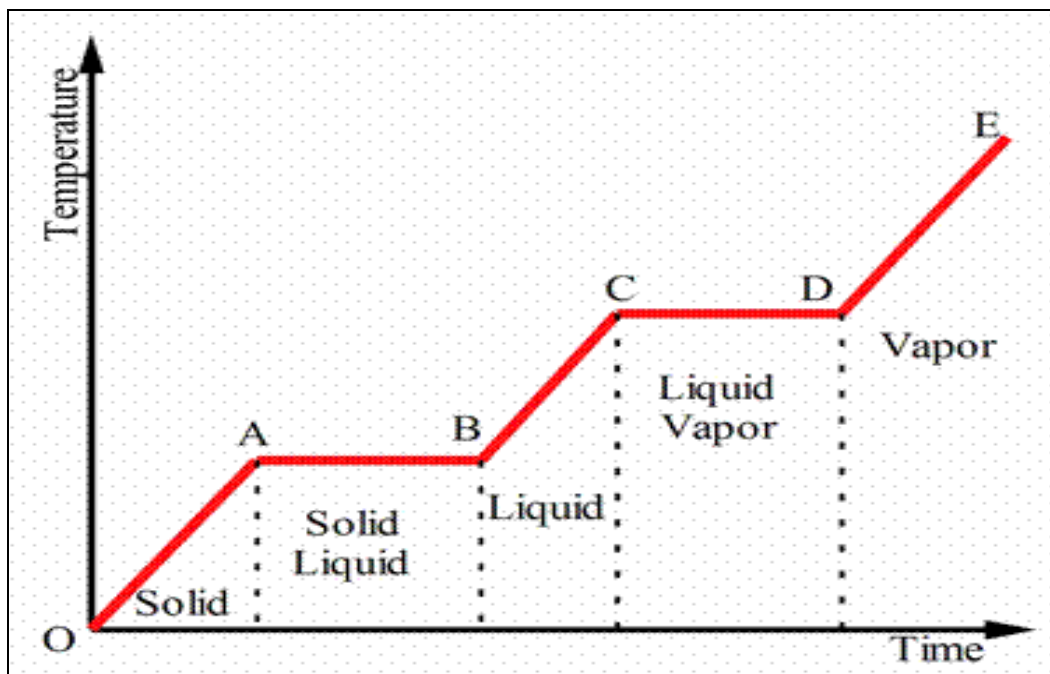
Το ποσό της θερμότητας που αποθηκεύεται εξαρτάται από την ειδική θερμότητα του μέσου, την αλλαγή της θερμοκρασίας και το ποσό του υλικού αποθήκευσης. Νερό φαίνεται να είναι το καλύτερο διαθέσιμο υγρό SHS, επειδή είναι φθινό και έχει υψηλή ειδική θερμότητα. Ωστόσο, πάνω από τους 100°C, χρησιμοποιούνται συνήθως έλαια, τετηγμένα άλατα, τήγματα, κλπ.

1.4.3.2 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).



Σχήμα 1.14: Διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου για την περίπτωση θέρμανσης μιας ουσίας

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.

1.4.3.3 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^ο Κεφαλαίου

1. http://www.energia.gr/category.asp?cat_id=14
2. http://europa.eu/legislation_summaries/energy/european_energy_policy/128188_e1.htm
3. <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=282&language=el-GR>
4. <http://www.scribd.com/doc/117906562/Santamouris-2005-Passive-Cooling-of-Buildings>
5. www.euro2day.gr/dm.../15112005energeia.doc (IOBE 2005)
6. http://www.adamsnet.gr/html/news/parousiasi_ELEM.pdf (Πέρδιος 2006)
7. http://www.cres.gr/kape/ependytes/04_bioheat_ependytes.pdf (ΚΑΠΕ 2002)
8. www.adamsnet.gr
9. www.energybuilding.gr
10. <http://www.cie.org.cy/sxoliko.html#main3>
11. http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politisbioclimatic_passive.htm
12. <http://www.eac.com.cy/GR/Pages/solarenergygr.aspx>
13. http://users.sch.gr/kpara/ape2009_10/sun_energy2.html
14. <http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-C124/54/418,1554/>
15. www.wikipedia.org
16. http://www.ktizontastomellon.gr/index.php/eksoikonomhsh-energeias/stratigikes_exoikonomisis/bioklimatikos_sxediasmos/
17. www.anelixi.org
18. www.metatherm.blogspot.com
19. www.evonymos.org
20. <http://www.allaboutenergy.gr/HliakiEnergeia.html>
21. www.alifragis.com
22. http://www.storiesproject.eu/docs/energystorage_greek.pdf
23. <http://www.beaconpower.com/products/about-flywheels.asp>
24. <http://www.csanyigroup.com/wind-power-storage>
25. <http://www.sealab.gr/download/attachments/6619619/tech+storage.pdf?version=1&modificationDate=1372681470000>
26. <http://gigaom.com/2011/01/19/a-new-energy-storage-option-gravity-power/>
27. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100200710800381X>
28. <http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP%20Tech%20Brief%20E17%20Thermal%20Energy%20Storage.pdf> (A Critical Review of Thermal Energy Storage)
29. <http://benthamscience.com/open/torej/articles/V004/42TOREJ.pdf> (A Critical Review of Thermochemical Energy Storage System)
30. http://lejpt.academicdirect.org/A14/115_133.htm

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Υλικά Αλλαγής Φάσης

Εισαγωγή [1,2]

Όλα τα υλικά που είναι γνωστά σήμερα, ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης που επικρατούν, μπορούν να βρίσκονται σε μία από τις τρεις γνωστές καταστάσεις, στερεή, υγρή, αέρια.

Αν χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο ταξινόμησης ο μηχανισμός αποθήκευσης ενέργειας μέσα στο υλικό, ο οποίος χαρακτηρίζει σε μεγάλο βαθμό τη γενικότερη θερμική συμπεριφορά του υλικού, δημιουργούνται δύο μεγάλες κατηγορίες:

- τα υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα σε μορφή αισθητής θερμότητας σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος χρήσης τους. Σε αυτή την κατηγορία χαρακτηριστικό μέγεθος για τη θερμική συμπεριφορά αποτελεί η θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ή όγκο.
- τα υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας σε ένα τμήμα του θερμοκρασιακού εύρους χρήσης τους, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα συναλλάσσουν θερμότητα με τη μορφή αισθητής θερμότητας.

Σε αυτή την κατηγορία χαρακτηριστικό μέγεθος για τη θερμική συμπεριφορά αποτελεί η λανθάνουσα θερμότητα που απαιτείται για τη μετάβαση από τη μία φάση στην άλλη.

Τα υλικά που αλλάζουν φάση στο εύρος των θερμοκρασιών της εφαρμογής που χρησιμοποιούνται, ονομάζονται **Υλικά Αλλαγής Φάσης (P.C.M. s, δηλ. Phase Change Materials)**. Τα P.C.M. είναι υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, χρησιμοποιώντας χημικούς δεσμούς για να αποθηκεύσουν και να απελευθερώσουν θερμότητα. Η αποθήκευση ή η απελευθέρωση της θερμότητας πραγματοποιείται όταν το υλικό μεταπίπτει από τη στερεή στην υγρή φάση και αντίστροφα.

Αυτός ο ορισμός εμπεριέχει όλα τα γνωστά και χρησιμοποιούμενα σήμερα υλικά. Το καινοτόμο χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης ομάδας υλικών όμως, είναι ότι δίνουν τη δυνατότητα στο μηχανικό-σχεδιαστή να εκμεταλλευτεί αυτή την φυσική ιδιότητά τους, ώστε να βελτιώσει τη θερμική συμπεριφορά πληθώρας συστημάτων και κατασκευών.

Στα πλαίσια του θερμοκρασιακού εύρους της ανθρώπινης θερμικής άνεσης (20-30°C), τα υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας είναι ιδιαίτερος αποδοτικά. Αποθηκεύουν περίπου 5 με 14 φορές περισσότερη ενέργεια κατ' όγκο απ' ότι τα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, όπως το νερό, η πέτρα, το τούβλο, και άλλα.

Ως υποψήφια PCM θεωρούνται συνήθως υλικά που αλλάζουν φάση μεταξύ στερεής και υγρής κατάστασης, αν και έχουν χρησιμοποιηθεί σε ερευνητικό επίπεδο και υλικά που μεταβαίνουν από τη μία φάση στην άλλη με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. Τα υλικά που μεταπίπτουν σε αέρια κατάσταση κατά την αλλαγή φάσης δεν ενδιαφέρουν, λόγω των πρακτικών δυσκολιών που εμφανίζει η μεγάλη αλλαγή της πυκνότητας αλλά και της ίδιας της φύσης των αερίων.

Όσον αφορά τώρα, στα στερεά-υγρά PCM, αυτά αρχικά συμπεριφέρονται όπως τα κλασσικά υλικά αποθήκευσης: η θερμοκρασία τους αυξάνει, όσο αυτά απορροφούν θερμότητα. Αντίθετα με τα κλασσικά (αισθητής θερμότητας) αποθηκευτικά υλικά, όταν τα PCM φτάσουν στο θερμοκρασιακό επίπεδο αλλαγής φάσης (σημείο τήξης), τότε απορροφούν μεγάλα ποσά ενέργειας χωρίς παράλληλη αύξηση της θερμοκρασίας τους.

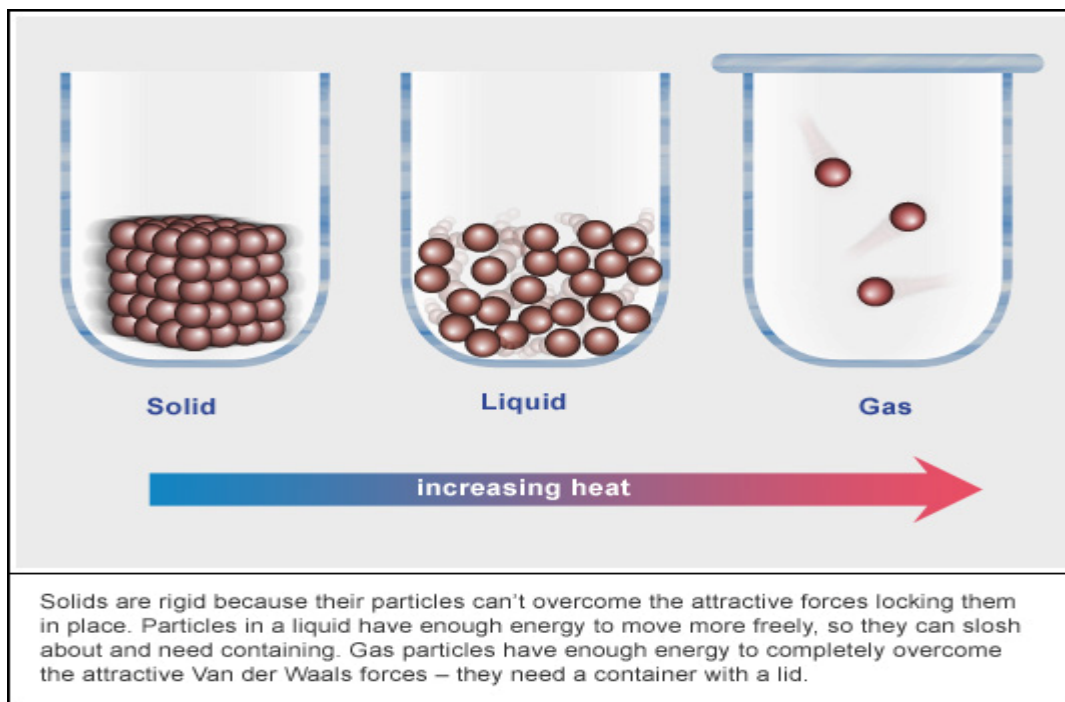
Αντίστοιχα, όταν η περιβάλλουσα το PCM θερμοκρασία ελαττωθεί, τότε αυτό στερεοποιείται ελευθερώνοντας το ποσό θερμότητας που είχε απορροφήσει κατά τη φάση της υγροποίησης. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι τα PCM απορροφούν και εκλύουν θερμότητα, διατηρώντας μία σχεδόν σταθερή θερμοκρασία.

Το ιδανικό PCM θα ήταν ένα υλικό που θα παρουσίαζε μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας, υψηλή θερμική αγωγιμότητα, θερμοκρασία τήξης σύμφωνη με το θερμοκρασιακό εύρος της εκάστοτε εφαρμογής, να τήκεται με την ελάχιστη εμφάνιση supercooling (υπέρψυξης), να είναι χημικά σταθερό, άφθονο, φθινό στην παραγωγή, όπως επίσης να μην είναι τοξικό, διαβρωτικό, ή εύφλεκτο. Τα υλικά που έχουν μελετηθεί τα τελευταία χρόνια είναι τα ένυδρα άλατα, οι παραφίνες, τα λιπαρά οξέα και εύτηκτα μίγματα οργανικών και μη οργανικών συστατικών και θα αναλυθούν παρακάτω.

2.1 Θεωρία αλλαγής φάσης [3,5-9]

Οι διάφορες ουσίες μπορούν να μεταπηδούν από τη μία φυσική κατάσταση στην άλλη. Αυτό μπορεί να γίνει με μεταβολή των συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας. 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 .

Στη **στερεά κατάσταση** τα δομικά σωματίδια (π.χ. μόρια) βρίσκονται σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους, είναι σχεδόν ακίνητα, οι δε ελκτικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους είναι ισχυρές. Έτσι το σχήμα και ο όγκος τους πρακτικά δεν αλλάζει, εφ' όσον οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας δε μεταβάλλονται.

Στην **υγρή κατάσταση** τα δομικά σωματίδια βρίσκονται, συγκριτικά με τη στερεά κατάσταση, σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Επίσης οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων είναι ασθενέστερες, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη κινητικότητα. Έτσι τα υγρά έχουν καθορισμένο όγκο, δεν έχουν όμως καθορισμένο σχήμα και παίρνουν κάθε φορά το σχήμα του δοχείου στο οποίο τοποθετούνται.

Τέλος, στην **αέρια κατάσταση**, τα δομικά σωματίδια κινούνται άτακτα προς όλες τις διευθύνσεις, καθώς οι δυνάμεις συνοχής είναι αμελητέες. Έτσι στα αέρια δεν έχουμε ούτε καθορισμένο σχήμα, ούτε όγκο. Μάλιστα εδώ προκύπτουν σημαντικές μεταβολές των όγκων, όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία ή και η πίεση.

Κατά τη διάρκεια αλλαγής φάσης, ενδιαφέρον παρουσιάζει η θερμική ενέργεια συναλλαγής. Οι αλλαγές φάσης γίνονται κατά κανόνα σε κανονική πίεση μίας ατμόσφαιρας, άρα οι αλλαγές φάσης οφείλονται στην αλλαγή της θερμοκρασίας, άρα και στην πρόσληψη ή την αποβολή θερμικής ενέργειας.

Γενικά η θερμική ενέργεια ενός σώματος αυξάνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του, οπότε και μεταπίπτει από τη στερεή στην υγρή κατάσταση και στη συνέχεια στην αέρια. Η θερμική ενέργεια ενός σώματος μειώνεται όταν ακολουθείται η αντίστροφη πορεία. Κατά την πρόσληψη ή την αποβολή θερμικής ενέργειας το σώμα μεταβάλλει την

θερμοκρασία του ή αλλάζει την κατάσταση του. Αν ένα σώμα αλλάζει κατάσταση τότε η θερμοκρασία του παραμένει σταθερή, ενώ η θερμική ενέργεια καταναλώνεται για την διάλυση ή τη δημιουργία των διαμοριακών δυνάμεων, οι οποίες έχουν άμεση σχέση με τη δομή ενός σώματος σε μικροσκοπικό επίπεδο.

Η ολική θερμότητα που απαιτείται για την αλλαγή φάσης ενός υλικού αναλύεται στην αισθητή και την λανθάνουσα θερμότητα οι οποίες αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 1.

2.2 Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης [10-12]

Η μετάδοση θερμότητας στην αποθήκευση με PCM είναι ένα περιοδικό μη-γραμμικό φαινόμενο με μία μεταβαλλόμενη διεπιφάνεια μεταξύ των φάσεων του στερεού και του υγρού, το οποίο γενικά αναφέρεται ως το πρόβλημα των κινούμενων ορίων. Η μεταβλητότητα των ορίων, μάλιστα, σε τέτοια προβλήματα καθορίζεται από τη λανθάνουσα θερμότητα η οποία απελευθερώνεται ή αποδίδεται στο όριο. Η μη-γραμμικότητα είναι η πηγή των προβλημάτων στα προβλήματα κινούμενων ορίων, εξαιτίας της οποίας η αναλυτική λύση τέτοιων προβλημάτων είναι γνωστή μόνο για πολύ λίγες περιπτώσεις, όπως για μία απλή γεωμετρία ή για πρόβλημα με απλές συνθήκες ορίων. Επομένως, πρέπει να χρησιμοποιηθούν αριθμητικές μέθοδοι, ώστε να επιτύχουν μία λύση του προβλήματος μετάδοσης θερμότητας που να είναι αρκετά ακριβής.

Τα προβλήματα αλλαγής φάσης συνήθως επιλύονται με πεπερασμένες διαφορές ή πεπερασμένα στοιχεία σύμφωνα με την αριθμητική προσέγγιση. Το φαινόμενο αλλαγής φάσης πρέπει να μοντελοποιηθεί ξεχωριστά εξαιτίας της μη-γραμμικής φύσης του προβλήματος. Έχει αναπτυχθεί μία μεγάλη γκάμα αριθμητικών μεθόδων για επίλυση των προβλημάτων με τα PCM. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι είναι η μέθοδος της ενθαλπίας και η μέθοδος της ενεργούς θερμοχωρητικότητας.

Αυτές οι μέθοδοι είναι ικανές να προσεγγίσουν PCM με ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών αλλαγής φάσης. Επίσης, ανήκουν στην κατηγορία των μεθόδων σταθερού τομέα (fixed-domain methods), οι οποίες αντιμετωπίζουν τη στερεή και την υγρή φάση ως ένα ενιαίο μέσο, ενώ η συνθήκη της διεπιφάνειας των φάσεων υποχωρεί σε μία καινούρια μορφή των εξισώσεων που περιέχουν τα αντίστοιχα μεγέθη για κάθε μία από τις δύο μεθόδους.

Πριν παρουσιαστούν συνοπτικά οι δύο αυτές μέθοδοι, αναφέρεται εδώ η γενική εξίσωση, γνωστή ως η συνθήκη του Stephan, η οποία περιγράφει την παραπάνω διαδικασία:

$$\lambda \rho \left(\frac{ds(t)}{dt} \right) = k_s \left(\frac{\delta T_s}{\delta t} \right) - k_l \left(\frac{\delta T_l}{\delta t} \right) \quad (2.2.1)$$

Όπου λ είναι η λανθάνουσα θερμότητα τήξης, είναι η πυκνότητα ρ (δεν διευκρινίζεται αν είναι στερεό ή υγρό), είναι η θέση της επιφάνειας $s(t)$, είναι η θερμική αγωγιμότητα k , είναι ο χρόνος t και είναι η θερμοκρασία T . Οι δείκτες s και l υποδεικνύουν τις φάσεις του στερεού και του υγρού αντίστοιχα.

Τα βασικά προβλήματα, λοιπόν, είναι ότι η θέση και η ταχύτητα των ορίων δεν είναι εκ των προτέρων γνωστά και αφού οι δύο φάσεις εμφανίζουν διαφορετικές φυσικές ιδιότητες, πρέπει να προσεχτούν πολύ οι μη-φυσικές ασυνέχειες οι οποίες μπορούν να προκύψουν.

2.2.1 Η μέθοδος της ενθαλπίας [10-12]

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.

Αναπτύσσοντας τη μέθοδο της ενθαλπίας, το πρόβλημα αλλαγής φάσης γίνεται πιο εύκολο, αφού η κύρια παραπάνω εξίσωση είναι η ίδια και για τις δύο περιπτώσεις, οι συνθήκες της διεπιφάνειας επιτυγχάνονται αυτόματα και δημιουργείται μία πολτώδης ζώνη ανάμεσα στις δύο φάσεις του στερεού και του υγρού. Με αυτή τη ζώνη αποφεύγονται κάποιες απότομες ασυνέχειες, οι οποίες θα μπορούσαν να προκαλέσουν αριθμητικές αστάθειες. Βέβαια, είναι εμφανές ότι το πάχος και η ποιότητα της διακριτοποίησης αυτής της ζώνης είναι καθοριστικής σημασίας για τη συμπεριφορά του μοντέλου. Η μέθοδος της ενθαλπίας μπορεί να αντιμετωπίσει και πολτώδη και ισοθερμικά προβλήματα, όμως η θερμοκρασία σε ένα συγκεκριμένο σημείο του πλέγματος μπορεί να ταλαντώνεται με το χρόνο.

Αυτή η μέθοδος έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε πολλές περιπτώσεις. Οι Hunter το 1989 και Amdjadi το 1990 επιβεβαίωσαν ότι η μέθοδος της ενθαλπίας είναι η πιο αρμόζουσα για τυπικές εφαρμογές, κάτω από τον περιορισμό ότι δεν υπάρχει καμμία μεταβολή στο αριθμητικό μοντέλο στην διεπιφάνεια.

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 [11,13,35]

Η ενεργός θερμοχωρητικότητα του PCM είναι επίσης δυνατόν να περιγράψει την μη ισοθερμική αλλαγή φάσης του υλικού. Η ενεργός θερμοχωρητικότητα του υλικού ($C_{p,eff}(T)$) 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.

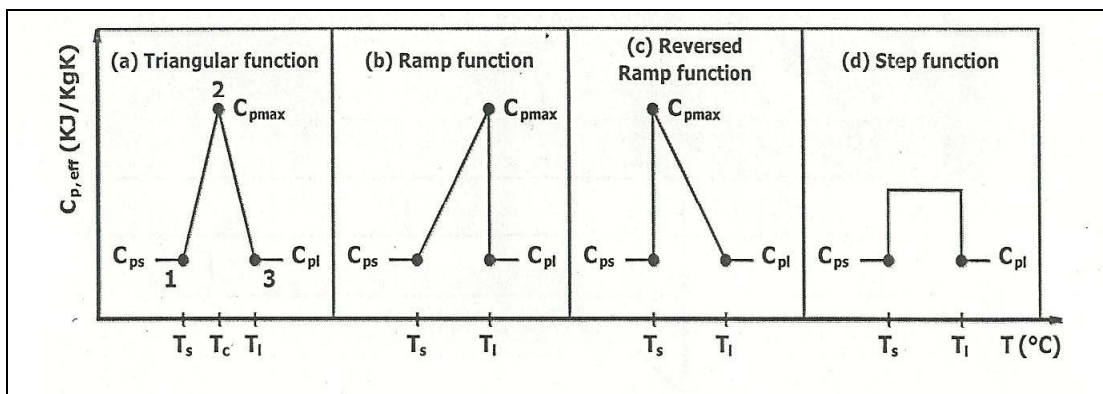
Επομένως το μοντέλο της ενεργούς θερμοχωρητικότητας είναι ο πιο απλός τρόπος προσομοίωσης της αλλαγής φάσης σε συνδυασμό με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών για περιπτώσεις όπως είναι η ανάλυση θερμικής συμπεριφοράς κτιρίων που περιέχουν PCM όπου η αλλαγή φάσης παρουσιάζει ενδιαφέρον μόνο ως ένα μακροσκοπικό φαινόμενο δηλαδή λεπτομέρειες όπως η κίνηση της διεπιφάνειας στερεού – υγρού ή 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 $C_{p,s}$ και $C_{p,l}$

Πρέπει εδώ να αναφερθεί ότι σε όλες τις προσεγγίσεις υπάρχει ένα ασυνεχές σημείο αναβαθμού στη συμπεριφορά της ενεργούς θερμοχωρητικότητας, το οποίο μπορεί να προκαλέσει αριθμητικές ταλαντώσεις, εξαιτίας της αδυναμίας που υπάρχει να αξιολογηθεί η μήτρα του μεγέθους της χωρητικότητας.

Στη θεωρητική προσομοίωση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιείται η μέθοδος της ενεργούς θερμοχωρητικότητας, ενώ επιλέγεται η τριγωνική συνάρτηση (triangular function) και αναφέρονται και όλες οι προκύπτουσες εξισώσεις οι οποίες και εφαρμόζονται.

Άλλες πιθανές προσεγγίσεις θα ήταν η συνάρτηση αναβαθμού (rump function), η αντίστροφη συνάρτηση αναβαθμού (reversed rump function) και η συνάρτηση βήματος (step function).



Σχήμα 2.2: Συναρτήσεις ενεργούς θερμοχωρητικότητας απλού γεωμετρικού σχήματος για PCM

2.3 Ταξινόμηση των υλικών αλλαγής φάσης [14]

Τα υλικά που αλλάζουν φάση στο εύρος των θερμοκρασιών της εφαρμογής που χρησιμοποιούνται ονομάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία PCMs (Phase Change Materials). Υπάρχουν τέσσερις δυνατότητες στις αλλαγές της φάσης: στερεά – αέρια, υγρή – αέρια, στερεά – στερεά και στερεά – υγρή.

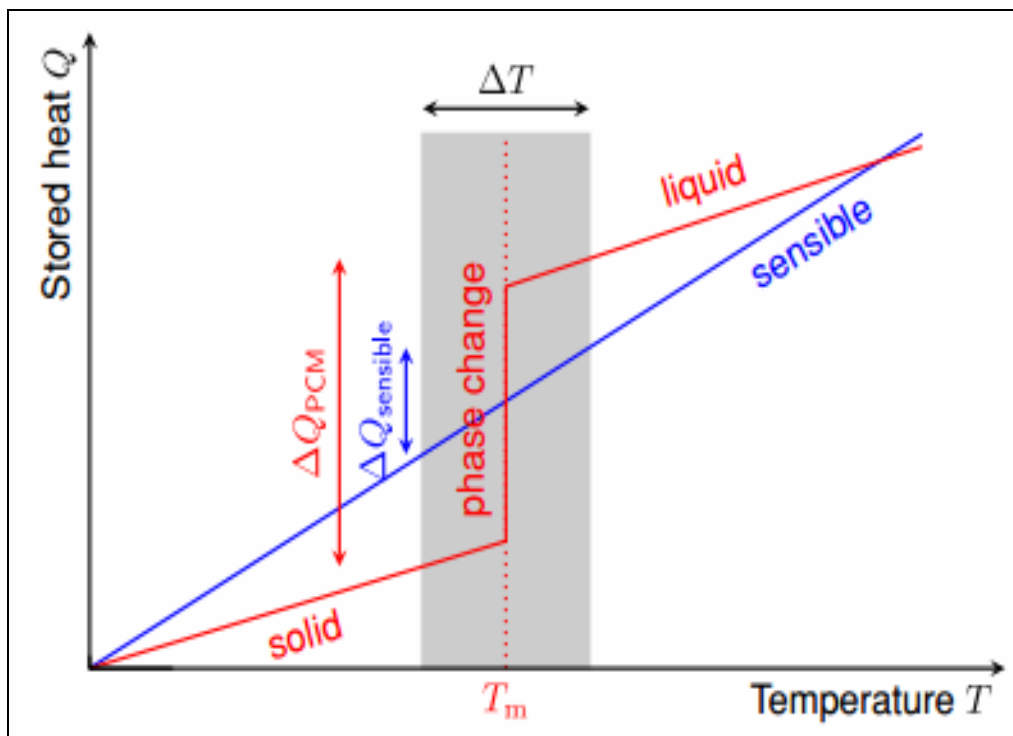
Αν χρησιμοποιήσουμε ως κριτήριο το μηχανισμό αποθήκευσης θερμότητας τα PCMs είναι υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας σε ένα τμήμα του θερμοκρασιακού εύρους χρήσης τους ενώ στο υπόλοιπο συναλλάσσουν θερμότητα με τη μορφή αισθητής θερμότητας.

2.3.1 Στερεό σε υγρό και υγρό σε στερεό [14,15]

Ως υποψήφια PCMs θεωρούνται συνήθως τα υλικά που αλλάζουν μεταξύ στερεάς και υγρής φάσης. 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.

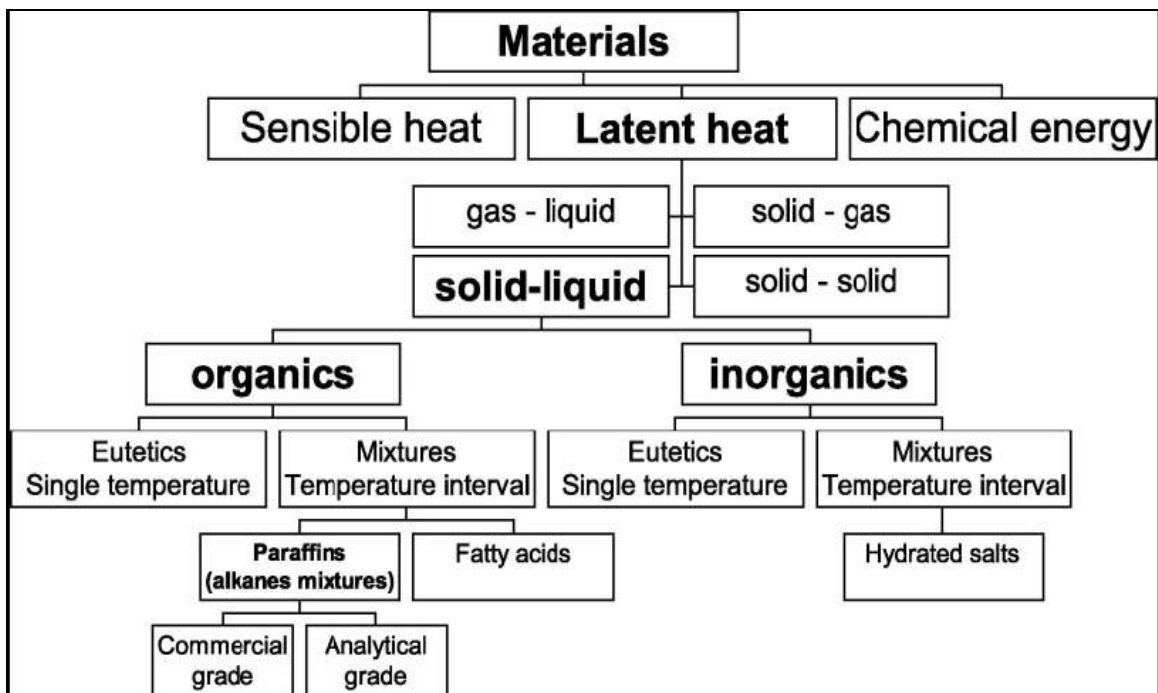
Αποθηκεύουν 5-14 φορές περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα όγκου από ό,τι υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, όπως το νερό σε υγρή μορφή και τα συμβατικά δομικά υλικά.



Σχήμα 2.3: Απεικόνιση αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας

Τα PCMs μπορούν να ομαδοποιηθούν 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 2.4.: Κατηγοριοποίηση των υλικών αλλαγής φάσης ως προς τη σύσταση.

2.3.1.1 Οργανικά υλικά αλλαγής φάσης [16]

Η κατηγορία των οργανικών υλικών 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 103 Kg/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 [16-19]

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 $n \geq 16$. Καθαρές παραφίνες περιέχουν μόνο αλκάνια. Τα πρώτα τέσσερα αλκάνια της σειράς (από το μεθάνιο CH_4 μέχρι το βουτάνιο C_4H_{10}) είναι αέρια σε θερμοκρασία δωματίου και ατμοσφαιρική πίεση. Οι ενώσεις μεταξύ C_5H_{12} και $C_{17}H_{36}$ 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.

Το μοριακό βάρος των υδρογονανθράκων σε κεριά παραφίνης είναι περίπου της τάξης του 280-560 (C_{20} - C_{40}), με κάθε επιμέρους κεριά 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. Οι 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 2-5 K 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 [16,20,21]

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 COOH -αντί για 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 οξυ 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 [16,22-24]

Μια σάκχαρο αλκοόλη (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 (εξου και η αλκοόλη).

Η γενική χημική δομή είναι:



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.

Η πολυαιθυλενογλυκόλη ή εν συντομία PEG είναι ένα πολυμερές με το γενικό τύπο $C_{2n} H_{4n+2} O_{n+1}$. 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 $-CH_2-CH_2-O-$. 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 πολυδιάσπαρτα.

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 οξείδωσης, η PEG μετατρέπεται από μια σκόνη ελεύθερης ροής σε ένα μαλακό κηρώδες στερεό.

2.3.1.2 Ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης

2.3.1.2.1 Ένυδρα άλατα [16,18,19,25,26]

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 διπολικό 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 $X(Y)_n \cdot nH_2O$

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 ανομοιομορφη 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)
- β) την προσθήκη μικρών ποσοτήτων παραγόντων πυρήνωσης που έχουν κρυσταλλική δομή παρόμοια με αυτή της μητρικής ουσίας
- 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 [27-29,32]

Το άλας του Glauber με χημικό τύπο $\text{Na}_2 \text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ή αλλιώς το θειικό δεκαένυδρο νάτριο με τυπική κατά βάρος σύσταση $44\%\text{NaSO}_4$ και $56\%\text{H}_2\text{O}$ είναι μάλλον το πιο ικανοποιητικό υλικό για χρήση σε παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης, όπως προκύπτει από τις εκτεταμένες μελέτες της M.Telkes , κυρίως λόγω των χαρακτηριστικών του.Το άλας αυτό έχει μία κατάλληλη θερμοκρασία τήξης περίπου στους $32,4 \text{ }^\circ\text{C}$ και μεγάλη θερμότητα τήξης που κυμαίνεται μεταξύ των $56-60\text{cal/gr}$, η οποία του δίνει μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα στο σημείο τήξης του και η θερμοκρασία τήξης του μπορεί να μειωθεί μέχρι και στους 4°C με την προσθήκη κατάλληλων ανόργανων αλάτων.Δεν χρειάζεται μεγάλη περιεκτικότητα σε άλας για να θερμάνει ορισμένο χώρο.

Το άλας μπορεί να αποθηκευτεί σε μαύρους σωλήνες, ενώ σειρές αυτών των σωλήνων μπορούν να διαταχθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να συλλέγουν την ενέργεια του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας.Είναι διαθέσιμο σε αμέτρητες ποσότητες ως ``χονδρικό υλικό``, στη μορφή του άνυδρου θειικού νατρίου σε αρκετά χαμηλό κόστος.Όταν προστίθεται ηκατάλληλα ποσότητα νερού και μεταβαίνει στο δεκαένυδρο θειικό νάτριο, τότε το κόστος μειώνεται ακόμα περισσότερο.

Αν και τα πλεονεκτήματά του είναι αρκετά, μελέτες έχουν αποδείξει ότι το άλας του Glauber τήκεται με ασυνέχεια, εμφανίζει μεγάλο πρόβλημα υπέρψυξης και πυρηνοποιεί το ανεπιθύμητο επταένυδρο.Η προσθήκη $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, δηλαδή η προσθήκη βόρακος μπορεί να επιλύσει τα δύο τελευταία προβλήματα.Ο βόραξ έχει δείξει ότι μπορεί να πυρηνοποιεί το άλας του Glauber επαναλαμβανόμενα για περισσότερους από 100 θερμικούς κύκλους με μία κρίσιμη υπέρψυξη των $7 \text{ }^\circ\text{C}$ και να πυρηνοποιεί το δεκαένυδρο αποκλειστικά, ώστε να μην σχηματίζεται το επταένυδρο. 2472.10

Τα προβλήματα που προκαλεί η ασυνεχής τήξη είναι πιο δύσκολο να επιλυθούν.Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται πέρα από το σημείο τήξης, διαχωρίζεται σε ένα διάλυμα και ένα στερεό, ενώ αφού η πυκνότητα του στερεού είναι μεγαλύτερη από την πυκνότητα του διαλύματος, εμφανίζεται το φαινόμενο διαχωρισμού των φάσεων.Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με προσθήκη κάποιας γέλης ή άλλων παραγόντων.

2.3.1.3 Ευτηκτικά υλικά αλλαγής φάσης [30,31]

Τα ευτηκτικά μείγματα υλικών αλλαγής φάσης αποτελούν συνδυασμό ανόργανων, οργανικών ή ακόμα και ενός οργανικού με ένα ανόργανο υλικό.Θεωρούνται και αντιμετωπίζονται ως ένυδρα άλατα, ενώ παρέχουν στους σχεδιαστές πολλές δυνατότητες για να επιτύχουν το επιθυμητό σημείο τήξης.Σο μειονέκτημα τους βέβαια είναι το αυξημένο κόστος παραγωγής σε σχέση με τα απλά ανόργανα ή οργανικά υλικά αλλαγής φάσης.

Στην βάση των βασικών κριτηρίων για την επιλογή των υλικών για θερμική αποθήκευση, όπως οι απαιτούμενες επιθυμητές θερμοδυναμικές, κινητικές και χημικές ιδιότητες, η συμπεριφορά σε σχέση με τα χαρακτηριστικά της τήξης και της στερεοποίησης, η

υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, η αναπαραγώγιμη συμπεριφορά τήξης και στερεοποίησης, η αρνητική τάση για υποβάθμιση ιδιοτήτων, η υπέρψυξη και η διαβρωτικότητα, η μη-τοξικότητα, η θερμική και χρωματική σταθερότητα, και μία προκαθορισμένη θερμοκρασία τήξης κοντά στο επιθυμητό εύρος για συγκεκριμένη εφαρμογή ψύξης, το ευτηκτικό μείγμα του καπρικού και λαυρικού οξέος (Capric Acid and Lauric Acid Eutectic Mixture) φαίνεται να είναι ένα δυναμικό μείγμα για PCM, μεταξύ όλων των άλλων υποψηφιοτήτων.

Μπορεί να εμποτιστεί ή να ενσωματωθεί άμεσα στα οικοδομικά υλικά σε κάποιο στάδιο της κατασκευής τους. Στην υγρή φάση, έχει επιφανειακή τάση της τάξεως του 0,02-0,30N/m. Αυτή είναι αρκετή ώστε να μπορεί να διατηρηθεί στο προβλεπόμενο υλικό κατασκευής. Παρουσιάζει μικρή αλλαγή όγκου κατά τη διάρκεια της τήξης και της στερεοποίησης, με μία διαστολή τήξης περίπου 100-200m³/kg.

Η ανάπτυξη του υλικού είναι σήμερα πρωταρχικής αξίας, ώστε να επιτύχει την συγκεκριμένη απαίτηση για να είναι ένα αποτελεσματικό μέσο αποθήκευσης. Εξαιτίας αυτού του στοιχείου, το κόστος μπορεί να θυσιαστεί στο ενδιαφέρον για μία καλύτερη συμπεριφορά του υλικού ως PCM.

2.3.1.4 Clathrates [16,33,34]

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 κατελιημμένες 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 κατάντι 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 [15,35]

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.

2.3.3 Αξιολόγηση κάθε κατηγορίας [14]

Προκειμένου να ολοκληρωθεί η παρουσίαση των διαφόρων κατηγοριών PCM, συγκεντρώνονται εδώ τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των δύο βασικών κατηγοριών, δηλαδή των ανόργανων και των οργανικών υλικών αλλαγής φάσης.

➤ Οργανικά υλικά:

Πλεονεκτήματα:

- Μη διαβρωτικότητα με τα περισσότερα υλικά
- Μικρός κίνδυνος ρύπανσης του νερού
- Μικρής τάξης ή καθόλου εμφάνιση του φαινομένου supercooling
- Φημική και θερμική σταθερότητα, χωρίς να παρουσιάζουν διαχωρισμό των φάσεων ή εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους
- Φαμηλό κόστος αγοράς σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες PCM
- Παραγωγή των υλικών σε διάφορες εμπορικές εφαρμογές (σκόνη, κόκκοι, πλάκες)
- Άριστη συμπεριφορά στην κυκλική καταπόνηση χωρίς καμμία υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους.

Μειονεκτήματα:

- Λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης χαμηλότερη από τα μη οργανικά
- Συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας χαμηλότερο από τα μη οργανικά
- Αναφλεξιμότητα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες
- Πυκνότητα χαμηλότερη από τα μη οργανικά υλικά

➤ Ανόργανα υλικά:

Πλεονεκτήματα:

- Μεγαλύτερη τιμή λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης σε σύγκριση με τα οργανικά
- Μη αναφλεξιμότητα
- Πυκνότητα υψηλότερη από τα οργανικά

Μειονεκτήματα:

- Διαβρωτικά (απαραίτητη αποθήκευση υλικών σε ενισχυμένη συσκευασία)
- Εμφάνιση supercooling
- Διαχωρισμό των φάσεων (μεταβλητή τιμή της διαλυτότητας με τη θερμοκρασία), δυνατή δημιουργία ιζήματος
- Αβέβαιη θερμική σταθερότητα σε κυκλική φόρτιση
- Αρκετά μεγαλύτερο κόστος αγοράς από τα οργανικά
- Υδροσκοπικά υλικά με αποτέλεσμα τον εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους σε βάθος χρόνου αν μείνουν εκτεθειμένα σε περιβάλλον με υγρασία

2.4. Ιδιότητες των Υλικών Αλλαγής Φάσης [36,37]

Ουσιαστικά εδώ αναλύονται διεξοδικά οι ιδιότητες ενός ιδανικού PCM ώστε να γίνει κατανοητός και ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η επιλογή του για κάθε εφαρμογή.

2.4.1. Θερμοδυναμικές ιδιότητες

- Θερμοκρασία τήξης μέσα στο επιθυμητό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας. Η διαδικασία επιλογής ενός PCM πρέπει να ξεκινάει ακριβώς από αυτό το σημείο. Δηλαδή θα πρέπει να μετράται το σημείο τήξης και να ελέγχεται ότι πράγματι βρίσκεται μέσα στο εύρος των θερμοκρασιών που προκαλούν θερμική άνεση.
- Υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα για να παρέχει πρόσθετο απόθεμα αισθητής θερμότητας.
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα στερεής και υγρής φάσης για να υπάρχει αποτελεσματική φόρτιση και αποφόρτιση του συστήματος. Η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας θεωρείται σταθερή σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής. Στα υλικά αλλαγής φάσης στο σύνολό τους δεν παρουσιάζουν μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, γι' αυτό και επιδιώκεται να υπάρχουν μεγάλες επιφάνειες μετάδοσης θερμότητας.
- Μικρή μεταβολή όγκου κατά την αλλαγή φάσης.
- Ομοιόμορφη τήξη του υλικού αλλαγής φάσης για σταθερή αποθηκευτική ικανότητα του υλικού σε κάθε κύκλο τήξης και πήξης.
- Μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας μετάβασης σε άλλη φάση. Είναι δείκτης αποδοτικότητας του υλικού αλλαγής φάσης.
- Υψηλή πυκνότητα. Και η πυκνότητα είναι δείκτης αποδοτικότητας του υλικού αλλαγής φάσης.
- Χαμηλή τάση ατμών, ώστε να υπάρχει μείωση των απαιτήσεων σταθερότητας του δοχείου που θα περιέχει το PCM.

2.4.2 Κινητικές ιδιότητες

- Υψηλός βαθμός πυρηνοποίησης για να αποφευχθεί υπέρψυξη της υγρής φάσης.
- Υψηλός βαθμός ανάπτυξης κρυστάλλων.

2.4.3 Χημικές ιδιότητες

- Εντελώς αναστρέψιμος κύκλος ψύξης-τήξης.
- Απουσία χημικής αποικοδόμησης μετά από μεγάλο αριθμό κύκλων τήξης-ψύξης, δηλαδή μακροπρόθεσμη χημική σταθερότητα.
- Απουσία διαβρωτικότητας στα υλικά κατασκευής.
- Μη τοξικά, μη εύφλεκτα και μη εκρηκτικά υλικά για λόγους ασφαλείας.

2.4.4 Οικονομικές ιδιότητες

- Άφθονα.
- Διαθέσιμα.
- Ανακυκλώσιμα, ώστε να είναι φιλικά προς το περιβάλλον.
- Οικονομικά προσεγγίσιμα. Στο χαμηλό κόστος και η υψηλή διαθεσιμότητα των υλικών αλλαγής φάσης είναι ένας πολύ σημαντικός άξονας ανάπτυξης και διάδοσης της εφαρμογής τους.

2.5 Μέθοδοι μέτρησης των ιδιοτήτων [9,14,38,39]

Ο υπολογισμός των ιδιοτήτων των PCMs 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.

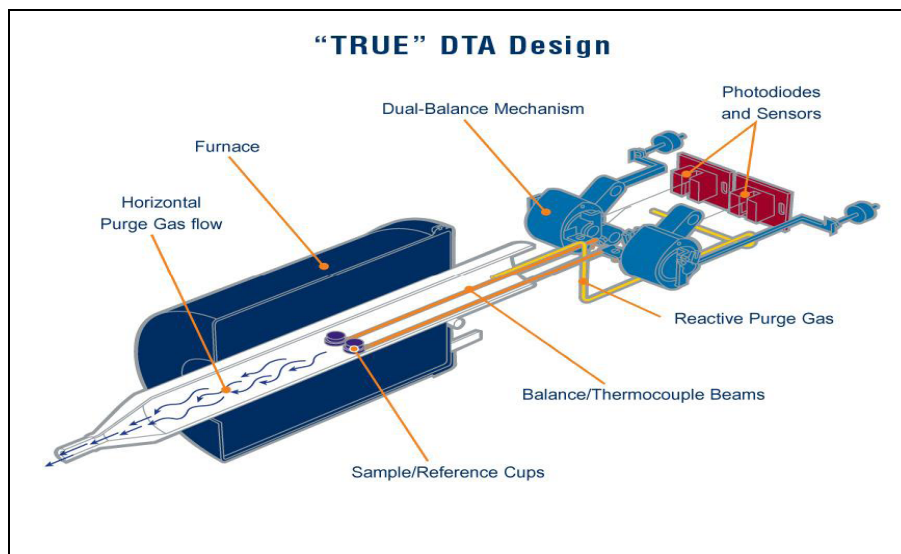
Στη συνέχεια θα δοθεί η αρχή λειτουργίας των συνηθέστερων μεθόδων καθώς και θα πραγματοποιηθεί περιγραφή των πειραματικών διατάξεών τους, που χρησιμοποιούνται για μέτρηση του σημείου τήξης, της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση και της λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης - στερεοποίησης.

2.5.1 Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA) [38,40]

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 συναρτήσει του χρόνου είτε συναρτήσει 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.



Σχήμα 2.5: Τυπική διάταξη της μεθόδου DTA

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

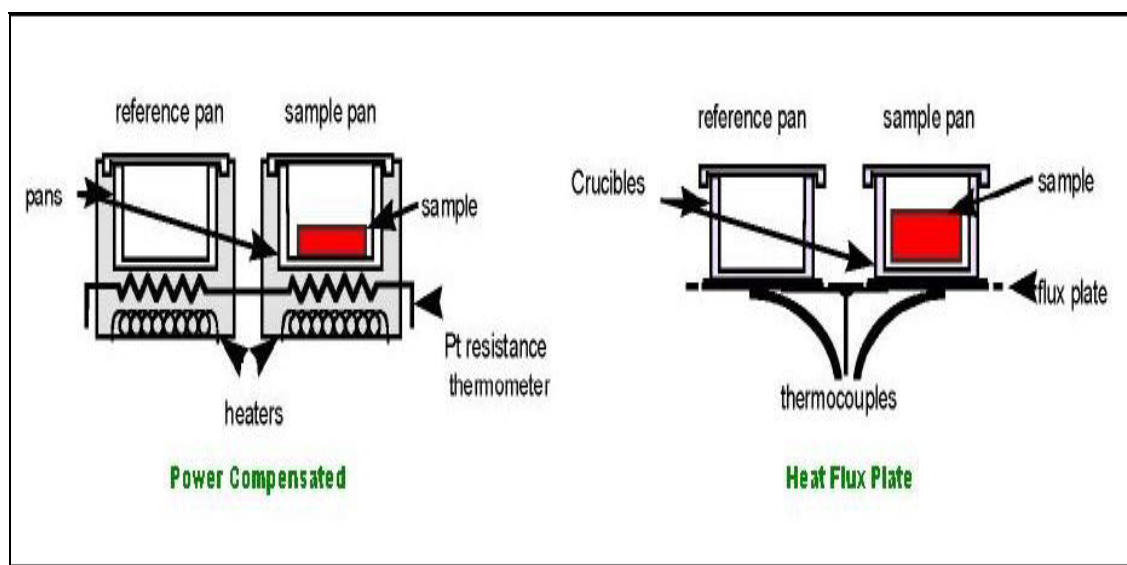
ένα αδρανές υλικό, όπως $23\text{Al}_2\text{O}_3$, ενώ το άλλο τοποθετείται σε ένα δείγμα του υλικού που μελετάται. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, θα υπάρξει μια σύντομη εκτροπή του βολτόμετρο αν το δείγμα υφίσταται μετάβαση φάσης. Αυτό συμβαίνει επειδή η είσοδος της θερμότητας θα αυξήσει τη θερμοκρασία της αδρανούς ουσίας, αλλά θα ενσωματωθεί ως λανθάνουσα θερμότητα στο υλικό με αλλαγή της φάσης του.

2.5.2 Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (DSC) [9,41,42]

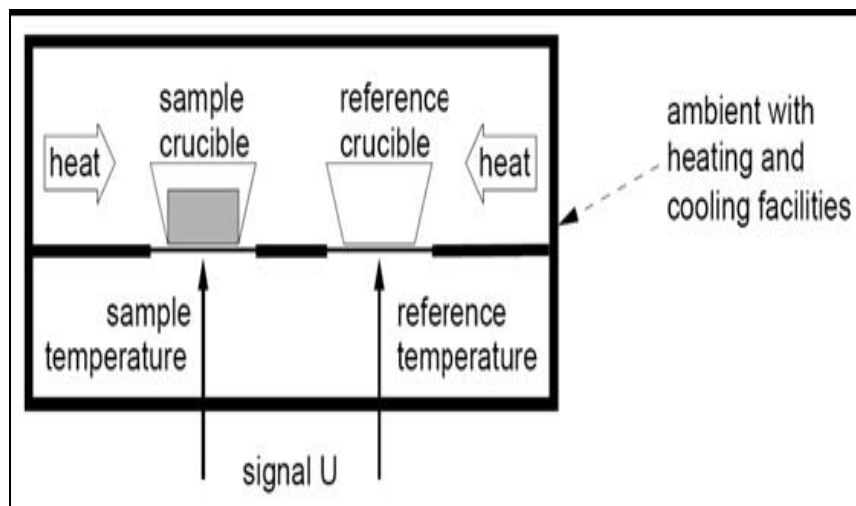
Διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης ή DSC είναι μια τεχνική θερμικής ανάλυσης κατά την οποία η διαφορά στο ποσό της θερμότητας που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας ενός δείγματος και ενός υλικού αναφοράς, μετρείται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Ειδικότερα μετρά την θερμοκρασία και τη ροή θερμότητας 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 2.6: Σχηματική απεικόνιση του εξοπλισμού για κάθε ρύθμιση της μεθόδου DSC



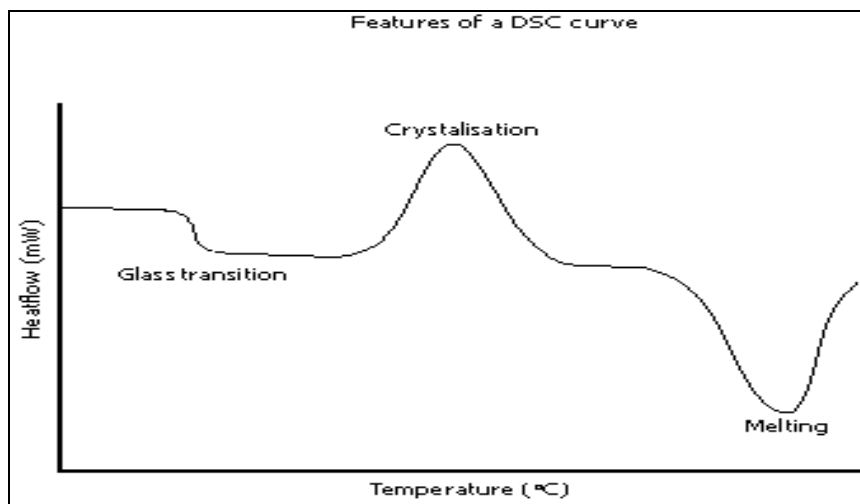
Σχήμα 2.7: Διάταξη του εξοπλισμού για τη μέθοδο DSC

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 2.8: Μια σχηματική αναπαράσταση της καμπύλης DSC η οποία παρουσιάζει τα σημεία εμφάνισης ορισμένων κοινών χαρακτηριστικών.

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

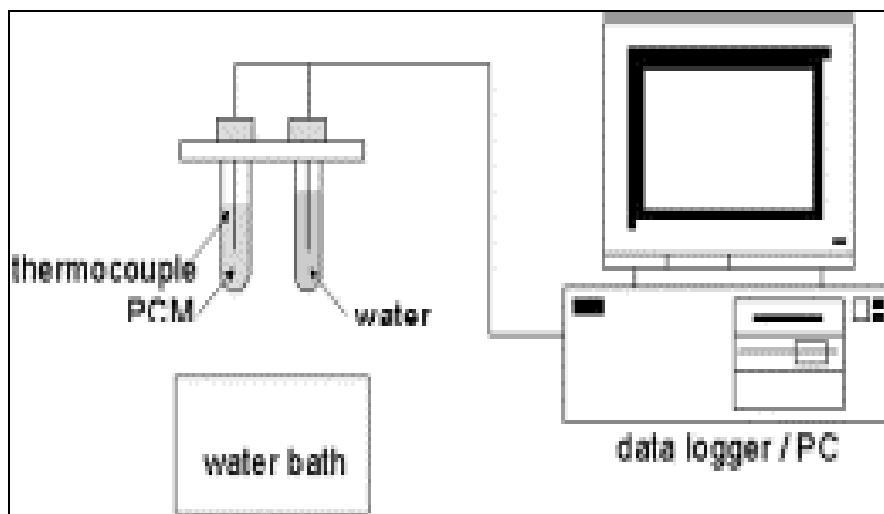
$$\Delta H = KA$$

όπου ΔH είναι η ενθαλία της μετάβασης, K είναι η θερμομετρική σταθερά, και A είναι η περιοχή κάτω από την καμπύλη. Η θερμομετρική 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, θερμοότητα τήξης και αντιδράσεις, ειδική θερμοότητα και θερμοχωρητικότητα κ.ο.κ. Ακόμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της οξείδωσης, καθώς και άλλων χημικών αντιδράσεων.

2.5.3 Μέθοδος T-history [9,43,44]

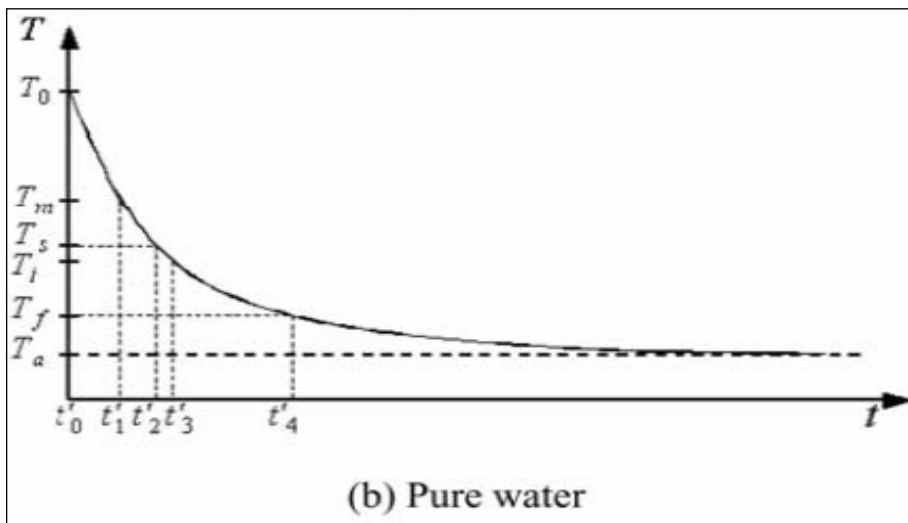
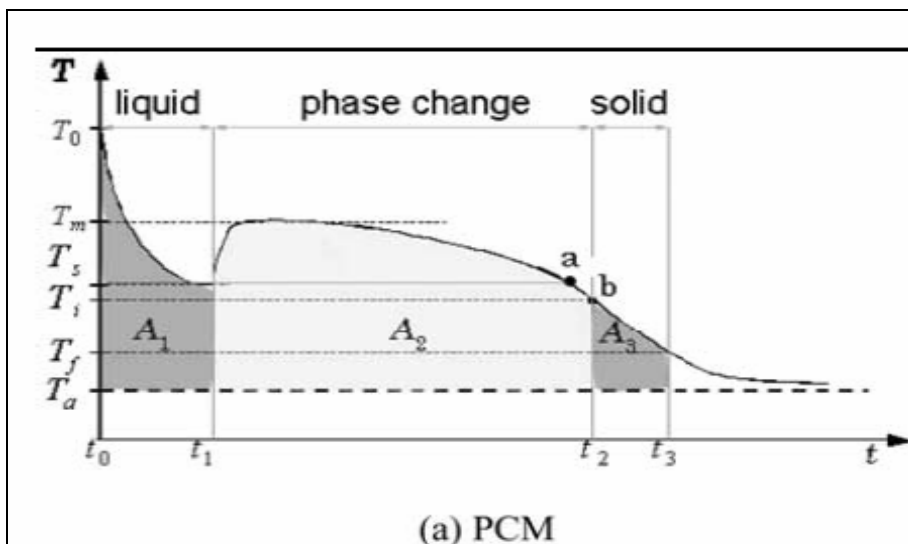
Η μέθοδος T-history βρίσκει τη λανθάνουσα θερμότητα του αντικειμένου με PCM, μέσα από τη σύγκριση του θερμοκρασιακού ιστορικού του PCM και του ιστορικού ενός υλικού αναφοράς, κάτω από σταθερές πειραματικές συνθήκες σύμφωνα με τη μέθοδο της συγκεντρωμένης χωρητικότητας (lumped capacitance method), η οποία ισχύει για αριθμό Biot < 0,1.



Σχήμα 2.9: Διάταξη μεθόδου T-history

Στη μέθοδο, δύο δοκιμαστικοί σωλήνες διατηρούνται σε μία θερμοκρασία υψηλότερη από το σημείο ψύξης σε ένα σταθερής θερμοκρασίας λουτρό. Ο ένας σωλήνας είναι γεμάτος με το PCM του οποίου μετρούνται οι ιδιότητες και ο άλλος με ένα υλικό αναφοράς (συνήθως καθαρό νερό) χωρίς PCM.

Κατόπιν, οι δύο δοκιμαστικοί σωλήνες απομακρύνονται γρήγορα από το λουτρό και μετρώνται οι θερμοκρασίες και των δύο δοκιμαστικών σωλήνων και του περιβάλλοντος ταυτόχρονα. Οι καμπύλες της μεθόδου T-history, οι οποίες είναι συναρτήσεις του χρόνου λαμβάνονται από το PCM και το υλικό αναφοράς, όπως φαίνεται από τα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 2.10: (α) Καμπύλη ψύξης υλικού με εμφάνιση supercooling, (β) Καμπύλη ψύξης νερού.

Η αρχική μέθοδος T-history, όπως προτάθηκε από τον Zhang και τους συνεργάτες του, παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Καταρχήν το σύστημα του πειράματος είναι αρκετά απλό και χρήσιμο για τη μέτρηση θερμικών ιδιοτήτων ανακατεμένων δειγμάτων, ενώ έχει μεγάλη ευελιξία ως προς το είδος των PCM που μπορεί να μετρήσει, αλλά και ως προς τις μετρούμενες ιδιότητες. Δεν απαιτείται διαδικασία δειγματοληψίας και τελικά η ακρίβεια των μετρήσεων είναι ικανοποιητική για τις μηχανικές εφαρμογές και επίσης η διαδικασία αλλαγής φάσης κάθε δείγματος PCM μπορεί να παρατηρηθεί με μεγάλη ευκρίνεια.

Με αυτή τη μέθοδο έχουν μετρηθεί σε διάφορα πειράματα οι θερμοφυσικές ιδιότητες και των παραφινών και των ένυδρων αλάτων και τα αποτελέσματα ήταν πολύ κοντά στα αντίστοιχα θεωρητικά που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Όμως, υπάρχουν

κάποια προβλήματα, όπως η χρήση ενός βαθμού υπέρψυξης ως το τέλος της περιόδου λανθάνουσας θερμότητας ή ο παραμερισμός της αισθητής θερμότητας κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά λάθη στον υπολογισμό της θερμότητας της τήξης.

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. 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 [16,45]

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.

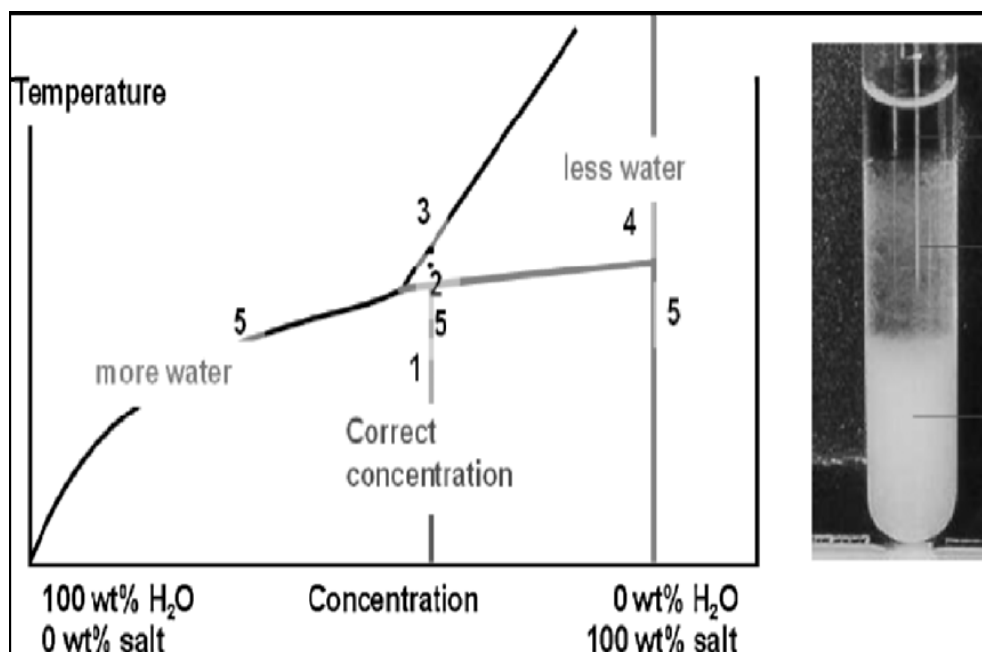
Ο διαχωρισμός των φάσεων επεξηγείται και στο ακόλουθο σχήμα με τη βοήθεια ενός ένυδρου άλατος ως παράδειγμα. Το ένυδρο άλας αποτελείται από δύο συνιστώσες, το αλάτι (π.χ. CaCl_2) και το νερό (π.χ. $6\text{H}_2\text{O}$).

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 2.11: Διαχωρισμός των φάσεων ενός ένυδρου 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)

Τρόποι αντιμετώπισης διαχωρισμού φάσεων

- 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, χρησιμοποιείται η ταχύτερη διαδικασία της ανάμιξης. 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. CaCl_2 από , μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα πιο αραιωμένο μείγμα με λιγότερο από 45% κ.β.. 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.

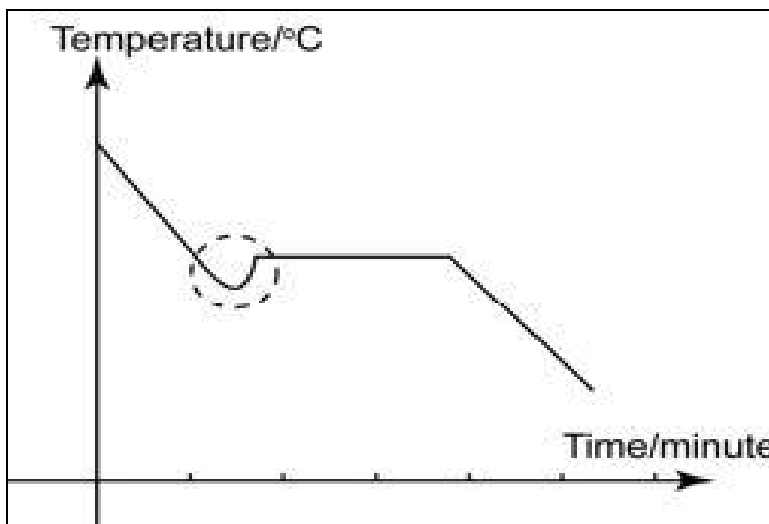
- Ένας δεύτερος τρόπος για να μειωθεί το πρόβλημα του διαχωρισμού φάσης στο επίπεδο υλικού είναι με τη χρήση διαδικασιών διάχυσης για ομογενοποίηση. Η διάχυση είναι όμως αποτελεσματική μόνο σε μικρές κλίμακες, επειδή η ταχύτητα των διαδικασιών διάχυσης πηγαίνει με το τετράγωνο της απόστασης. Ως εκ τούτου, 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) [16,14]

Πολλά PCM δεν στερεοποιούνται αμέσως μετά την ψύξη κάτω από την θερμοκρασία τήξης, αλλά ξεκινούν την αποκρυστάλλωση μόνο αφού προσεγγίζεται μία θερμοκρασία αρκετά κάτω από τη θερμοκρασία τήξης. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται υπέρψυξη. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι βαθμός της υπέρψυξης δεν είναι φυσική ιδιότητα του υλικού με σταθερή τιμή, αλλά μεταβάλλεται από διάφορες παραμέτρους, όπως ο όγκος του δείγματος, η καθαρότητα του υλικού, ο ρυθμός ψύξης και η επιφάνεια του δοχείου αποθήκευσης.



Σχήμα 2.12: Καμπύλη ψύξης υλικού με εμφάνιση supercooling

Κατά τη διάρκεια της παροχής θερμότητας, δεν υπάρχει διαφορά είτε ένα PCM εμφανίζει υπέρψυξη είτε όχι. Κατά τη διάρκεια, όμως, της ανάκτησης της θερμότητας, η λανθάνουσα θερμότητα δεν απελευθερώνεται αν η θερμοκρασία τήξης επιτυγχάνεται λόγω της υπέρψυξης. Η επίδραση της υπέρψυξης καθιστά αναγκαία τη μείωση της θερμοκρασίας αρκετά κάτω από τη θερμοκρασία τήξης, για να ξεκινήσει η αποκρυστάλλωση και για να απελευθερωθεί η λανθάνουσα θερμότητα που έχει αποθηκευτεί στο υλικό. Αν η πυρήνωση δεν πραγματοποιηθεί καθόλου, τότε η λανθάνουσα θερμότητα δεν απελευθερώνεται, ενώ το υλικό αλλαγής φάσης αποθηκεύει μόνο αισθητή θερμότητα.

Αν η θερμότητα η οποία απελευθερώνεται μετά τη στερεοποίηση είναι μεγαλύτερη από την αισθητή θερμότητα η οποία χάνεται εξαιτίας της υπέρψυξης, η θερμοκρασία αυξάνεται μέχρι τη θερμοκρασία τήξης και παραμένει εκεί σταθερή μέχρι να ολοκληρωθεί η αλλαγή φάσης. Αν η απώλεια της αισθητής θερμότητας εξαιτίας της υπέρψυξης είναι μεγαλύτερη από τη λανθάνουσα θερμότητα η οποία απελευθερώνεται μετά από την αποκρυστάλλωση, ή αν ο βαθμός απώλειας θερμότητας στο περιβάλλον είναι μεγαλύτερος από το βαθμό απελευθέρωσης θερμότητας κατά την αποκρυστάλλωση, τότε είναι πιθανό η θερμοκρασία να μην ξαναφτάσει ποτέ στη θερμοκρασία τήξης. □
 ε τεχνικές εφαρμογές των PCM, άρα, η υπέρψυξη μπορεί να αποτελέσει σημαντικό πρόβλημα και να προκαλέσει αναπάντεχες επιδράσεις.

Η πιο εύκολη προσέγγιση ώστε να αντιμετωπιστεί η υπέρψυξη είναι η προσθήκη συγκεκριμένων πρόσθετων υλικών, τα οποία ονομάζονται πυρηνοποιητές, στο PCM ώστε να επιτευχθεί ετερογενής πυρήνωση. Ετερογενής πυρήνωση, όπως γίνεται αντιληπτό από τον όρο, σημαίνει πυρήνωση η οποία δεν πραγματοποιείται από το PCM. Οι πυρηνοποιητές έχουν αναπτυχθεί για τα περισσότερα κοινώς χρησιμοποιούμενα PCM και μειώνουν την υπέρψυξη μερικούς βαθμούς Kelvin. Οι πυρηνοποιητές είναι υλικά με παρόμοια κρυσταλλική μορφή με το στερεό PCM, ώστε να επιτρέψουν στην στερεή φάση του PCM να αναπτυχθεί στην επιφάνειά τους, αλλά έχουν υψηλότερη θερμοκρασία τήξης, ώστε να αποφευχθεί η απενεργοποίηση όταν το PCM λιώνει. Το πρόβλημα αυτής της μεθόδου είναι ότι παρόμοια κρυσταλλική μορφή συνήθως σημαίνει και παρόμοια θερμοκρασία τήξης, οπότε τελικά οι περισσότεροι πυρηνοποιητές είναι σταθεροί μόνο για περίπου 10 με 20K πάνω από τη θερμοκρασία τήξης του PCM.

2.6.3 Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα [16,45]

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 [45,46]

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 οξείδωση 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.

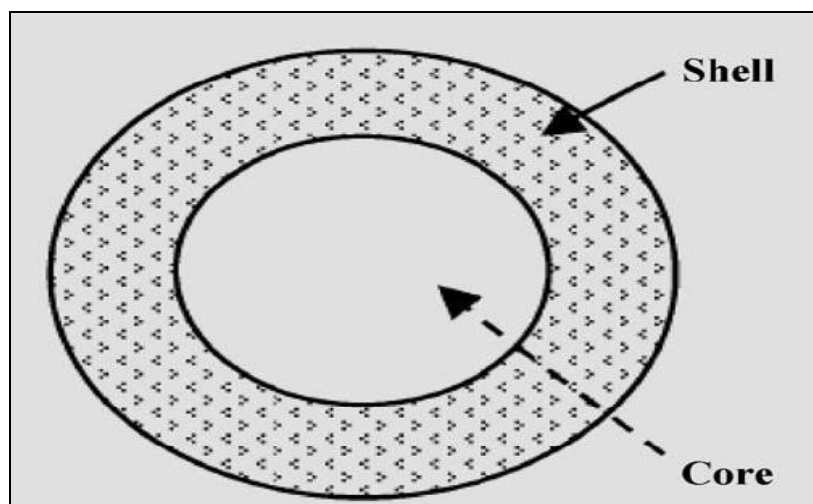
2.7 Τρόποι ενσωμάτωσης των PCM

2.7.1 Συσκευασία PCM

Η χρήση των PCM απαιτεί και τη χρησιμοποίηση κάποιου είδους συσκευασίας. Οι κύριοι λόγοι είναι για να αποφευχθεί η επαφή του PCM με το περιβάλλον, η οποία μπορεί να βλάψει το περιβάλλον ή να αλλάξει τη σύνθεση του PCM και επίσης για να διευκολυνθεί η μετάδοση της αποθηκευμένης θερμότητας, αφού η επιφάνεια της εκάστοτε συσκευασίας δρα ως επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας. Υπάρχουν διάφορα είδη συσκευασίας, τα οποία αναλύονται στη συνέχεια.

2.7.1.1. Μικροενσωμάτωση [16,17]

Μικροενσωμάτωση είναι η διαδικασία σύμφωνα με την οποία μεμονωμένα σωματίδια ή σταγονίδια του στερεού ή του υγρού υλικού του PCM (ο πυρήνας), περιβάλλονται ή επικαλύπτονται με μία συνεχή μεμβράνη πολυμερούς υλικού (το περίβλημα), ώστε να προκύψουν κάψουλες, οι οποίες στο μικρόμετρο κατατάσσονται στην τάξη των χλιοστών, οι οποίες είναι γνωστές ως μικροκάψουλες. Οι μικροκάψουλες μπορεί να έχουν σφαιρικό σχήμα, με ένα συνεχές τείχος που περιβάλλει τον πυρήνα, ενώ μπορεί να είναι και ασύμμετρες ή να έχουν μεταβλητό σχήμα.



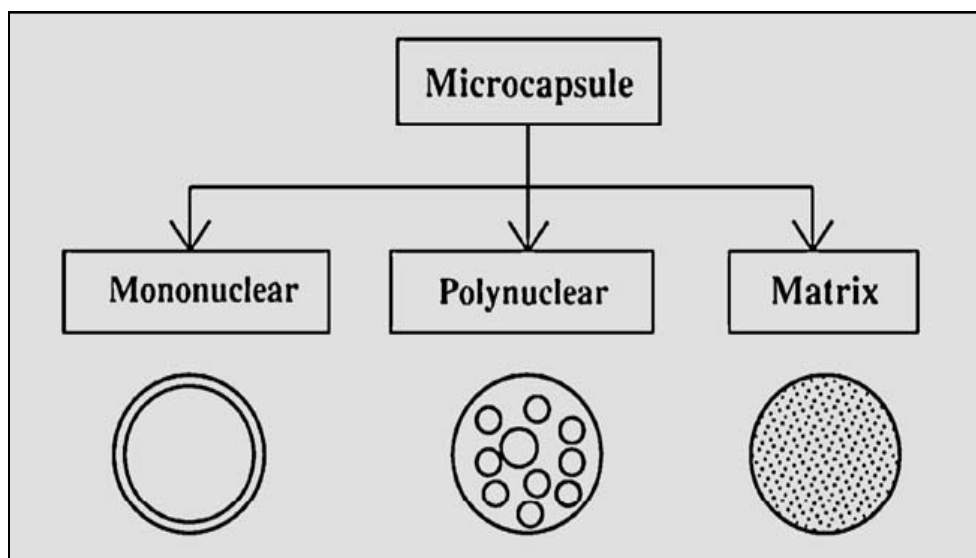
Σχήμα 2.13: Σχηματική απεικόνιση της μικροκάψουλας.

Και οι τρεις καταστάσεις της υλής, δηλαδή στερεή, υγρή και αέρια, μπορούν να γίνουν μικροκάψουλες. Αυτό επιτρέπει στις μικροκάψουλες να διαχειρίζονται ακόμα και τα υγρά υλικά ως στερεά. Επίσης, οι μικροκάψουλες ανέχονται αλλαγές φάσης, συμπεριλαμβανομένων και των ογκομετρικών αλλαγών στον πυρήνα τους. Οι

θερμοκρασίες αλλαγής φάσης μεταξύ -10°C και 80°C , είναι αυτές οι οποίες ταιριάζουν περισσότερο με τις μικροκάψουλες.

Πολλές φυσικές και χημικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την παραγωγή των μικροκαψουλών. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι φυσικές μέθοδοι είναι η επίπεδη επίστρωση, η επίστρωση με παροχή πεπιεσμένου αέρα, η φυγόκεντρος εξώθηση, η δονητική μέθοδος μέσω ακροφυσίου και η ξήρανση με ψεκασμό. Ενώ οι χημικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι ο διεπιφανειακός πολυμερισμός, ο επιτόπιος πολυμερισμός και ο πλεγματικός πολυμερισμός.

Η περιγραφή των μικροκαψουλών εξαρτάται κυρίως από το υλικό του πυρήνα και από τη διαδικασία εναπόθεσης του κελύφους. Οι μονοπύρηνες μικροκάψουλες έχουν το περίβλημα γύρω από τον πυρήνα, οι πολυπυρηνικές μικροκάψουλες έχουν πολλούς πυρήνες έγκλειστους στο εσωτερικό του κελύφους και υπάρχει και η πλεγματική ενσωμάτωση, στην οποία το υλικό του πυρήνα διανέμεται ομοιόμορφα μέσα στο υλικό του περιβλήματος.



Σχήμα 2.14: Τύποι των μικροκαψουλών.

Η βελτίωση της μετάδοσης θερμότητας με τη χρήση των μικροκαψουλών συμβαίνει λόγω της μεγάλης επιφάνειας σε αναλογία όγκου των μικροκαψουλών. Επίσης, βοηθούν τη συγκράτηση της υγρής φάσης του PCM, ώστε να μην υπάρχει κάποιου είδους διαρροή προς το περιβάλλον και επιπλέον βελτιώνουν τη θερμική σταθερότητα στη κυκλική φόρτιση του PCM, αφού ο διαχωρισμός των φάσεων περιορίζεται σε μικροσκοπική κλίμακα. Τέλος, είναι εφικτό να ενσωματωθούν τα μικροενσωματωμένα PCM σε κάψουλες, σε άλλα υλικά στη συνέχεια.

Το πιο σημαντικό μειονέκτημα της χρήσης μικροκαψουλών είναι ότι η πιθανότητα για υπέρψυξη αυξάνεται. Σήμερα οι μικροκάψουλες, σε εμπορικό επίπεδο, απευθύνονται μόνο σε PCM που είναι αδιάλυτα στο νερό. Ο λόγος είναι η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία της διαδικασίας. Εκτός από αυτό, η περίπτωση να χρησιμοποιηθούν

μικροκάψουλες για ένυδρα άλατα θέτει ένα ακόμη πρόβλημα. Η σύσφιξη στο υλικό του κελιού στα μικρά μόρια νερού, πρέπει να είναι αρκετή ώστε να αποτρέψει αλλαγή στη σύνθεση του ένυδρου άλατος.

2.7.1.2 Μακροενσωμάτωση [16,48]

Η μακροενσωμάτωση σημαίνει πλήρωση μίας μακροσκοπικής δεξαμενής με κάψουλες που περιέχουν PCM. Η χωρητικότητα της δεξαμενής μπορεί να ποικίλλει από μερικά ml μέχρι μερικά liters. Αυτές οι δεξαμενές είναι συνηθέστερα πλαστικές φιάλες (υψηλής πυκνότητας και χαμηλής πυκνότητας φιάλες πολυαιθυλενίου και φιάλες πολυπροπυλενίου), επιψευδαργυρωμένα μεταλλικά δοχεία και δοχεία μαλακού χάλυβα. Το σχήμα των μικροκαψουλών μπορεί να είναι από ορθογώνια πάνελ μέχρι σφαίρες, αλλά και σάκοι χωρίς ένα συγκεκριμένο σχήμα. Το κλειδί για τη χρήση αυτής της μεθόδου είναι να σχεδιαστεί η μακροκάψουλα σύμφωνα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

Οι μακροκάψουλες είναι πολύ διαδεδομένες επειδή τέτοιου είδους δοχεία και σάκοι είναι διαθέσιμα σε μεγάλη ποικιλία ήδη από άλλες εφαρμογές, οπότε η ενσωμάτωση των καψουλών PCM είναι σχετικά απλή, ενώ έχουν και το θετικό χαρακτηριστικό ότι μπορεί να γίνει χρήση PCM με διαφορετικό σημείο τήξης στην ίδια δεξαμενή. Σε αυτήν την περίπτωση, οι μακροκάψουλες χρησιμοποιούνται και αυτές για να συγκρατήσουν την υγρή φάση του PCM από κάποια διαρροή και για να αποφύγουν αλλαγή στη σύνθεση του PCM εξαιτίας της επαφής του με το περιβάλλον.

Άρα αποφεύγονται και οι μεγάλοι διαχωρισμοί των φάσεων στο PCM και επίσης προσφέρει μία αυτοφερόμενη κατασκευή στο PCM. Αν το δοχείο είναι αρκετά άκαμπτο, οι μακροκάψουλες μπορούν να προσθέσουν και μηχανική σταθερότητα στο σύστημα. Πρέπει να σημειωθεί ότι όταν χρησιμοποιούνται μεταλλικά δοχεία μαλακού χάλυβα, τότε αν τα εσωτερικά και τα εξωτερικά τελειώματα λάκας δεν έχουν εφαρμοστεί σωστά, η διάβρωση που μπορεί να συμβεί είναι σοβαρή και μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές συνέπειες.

2.7.2 Μαζική αποθήκευση [48,49]

Η μαζική αποθήκευση είναι δεξαμενές μετάδοσης θερμότητας για PCM, οι οποίες είναι παρόμοιες σε σχεδιασμό με τις δεξαμενές που ήδη υπάρχουν για ενεργειακή αποθήκευση, αλλά με κάποιες σημαντικές διαφοροποιήσεις.

Το πιο βασικό χαρακτηριστικό των συστημάτων μαζικής αποθήκευσης PCM είναι η ανάγκη για μία πιο εκτεταμένη μετάδοση θερμότητας από αυτήν που υπάρχει στις κοινές δεξαμενές που δεν προορίζονται για PCM. Ο λόγος για αυτήν την ανάγκη είναι ότι η πυκνότητα αποθήκευσης θερμότητας στο PCM είναι μεγαλύτερη από οποιοδήποτε άλλο μέσο αποθήκευσης. Η περιογή μετάδοσης θερμότητας σε σχέση με τις άλλες μεθόδους είναι μικρότερη, αλλά απαιτείται και εδώ μεγάλος ρυθμός αποθήκευσης ή απόδοσης της θερμότητας. Οι διαφορετικές προσεγγίσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι

περύγια εισόδου ή η χρήση μερών μεγάλης αγωγιμότητας, μεταλλικές κατασκευές, ίνες στο μέρος του PCM και άμεσης επαφής εναλλάκτες θερμότητας.

Ένα στοιχείο που πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν σχετικά με τη μαζική αποθήκευση είναι η πίεση του αέρα στη δεξαμενή αποθήκευσης, χωρίς την οποία το ένυδρο άλας θα απορροφούσε το περιεχόμενο νερό, καταλήγοντας έτσι σε μη ολοκληρωμένη απελευθέρωση θερμότητας με την αποκρυστάλλωση. Από την άλλη μεριά η μαζική αποθήκευση μπορεί να μειώσει πάρα πολύ το κόστος του συστήματος, αφού μειώνει πολύ τη δυσκολία συσκευασίας του PCM.

2.7.3 Άμεση ενσωμάτωση (50)

Η πιο απλή μέθοδος είναι η άμεση ενσωμάτωση του PCM σε συμβατικά δομικά υλικά, όπως ο γύψος, το σκυρόδεμα και άλλα πορώδη υλικά για να σχηματίσουν σύνθετα υλικά αλλαγής φάσης. Δηλαδή PCM υγρό ή σε πούδρα προστίθεται και ανακατεύεται με τα παραπάνω υλικά κατά τη φάση της παραγωγής. Ο όγκος ο οποίος καταλαμβάνεται από το PCM στους πόρους είναι αρκετά μικρός για να αποτρέψει την απομόνωση του στερεού φλοιού του PCM. Η κατασκευή του πορώδους υλικού μεταφέρει τη θερμότητα στους πόρους. Δυστυχώς, έχει παρατηρηθεί από διάφορες μελέτες σημαντική διαρροή και επίσης μία αλληλεπίδραση μεταξύ του PCM και του πορώδους υλικού σε διάφορες εφαρμογές. Αυτή η αλληλεπίδραση αν δεν προσεχτεί μπορεί να καταστρέψει τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού.

2.7.4 Εμβάπτιση [51,52]

Η εμβάπτιση ή απορρόφηση του PCM σημαίνει ενσωμάτωση αυτού σε ήδη έτοιμα συμβατικά δομικά υλικά με φυσική απορρόφηση. Δηλαδή το πορώδες οικοδομικό υλικό βυθίζεται σε ζεστό και λιωμένο PCM, το οποίο απορροφάται από τους πόρους μέσω της τριχοειδούς δράσης. Όταν το πορώδες υλικό απομακρυνθεί από το λιωμένο PCM και αφηθεί να κρυώσει, τότε το PCM έχει παραμείνει στους πόρους του. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι μπορεί να γίνει μετατροπή ήδη υπάρχοντων υλικών ή κατασκευαστικών πάνελ, ώστε να ενσωματώσουν την καινούρια τεχνολογία των PCM.

Το μειονέκτημα και αυτής και της προηγούμενης μεθόδου είναι ότι η ενσωματωμένη ποσότητα του PCM στα πορώδη υλικά είναι μικρή, γεγονός που οδηγεί σε χαμηλό επίπεδο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Αν χρησιμοποιηθεί η μέθοδος εμποτισμού κενού αέρος του PCM σε κοκκώδη πορώδη υλικά, τότε μπορούν να ενσωματωθούν μεγάλες ποσότητες PCM σε πορώδη χώρο. Αυτό καθιστά το κοκκώδες συνθετικό υψηλής ενεργειακής πυκνότητας μέσο. Τα κοκκώδη συνθετικά αλλαγής φάσης μπορούν να ενσωματωθούν σε διαφορετικά είδη κατασκευαστικών μερών, όπως στον τοίχο, στο δάπεδο και στην οροφή, ώστε να αυξήσουν την ικανότητά τους για θερμική αποθήκευση.

2.7.5 Πολυστρωματικά σανίδια από PCM [53]

Το PCM μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα ενιαίο στρώμα και να χρησιμοποιηθεί ως αυτόνομο στοιχείο, όπως για παράδειγμα εσωτερική επένδυση, στον εσωτερικό

``φάκελο`` του κτιρίου. Από τις διάφορες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν για τη συγκεκριμένη εφαρμογή προέκυψαν πολύ θετικά αποτελέσματα. Καταρχήν το πολυστρωματικό σύστημα πέτυχε να μειώσει το χρόνο της ανάκτησης της λανθάνουσας θερμότητας κατά 17%.Επίσης, το σύστημα αυτό αύξησε κατά 20-50% τη ροή θερμότητας και κατά 7-18% το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας.

Τα γενικά συμπεράσματα ήταν ότι η χρήση πολυστρωματικών σανιδιών έδειξαν ένα ισχυρό δυναμικό για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης στα κτίρια. Τα πιο σημαντικά είναι ότι η τοποθέτηση του PCM σε ένα τέτοιο σύστημα επιτυγχάνει πολύ καλύτερη αλλαγή φάσης που φτάνει μέχρι και το 55% σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα, οπότε πραγματοποιείται καλύτερη εκμετάλλευση του χρησιμοποιούμενου PCM.Βέβαια, υπάρχει ακόμα πολύς χώρος για έρευνα ώστε να βελτιστοποιηθούν τα παραπάνω ήδη θετικά αποτελέσματα.

Βιβλιογραφία 2^ο Κεφαλαίου

1. <https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP%20Tech%20Brief%20E17%20Thermal%20Energy%20Storage.pdf>(A Critical Review of Thermal Energy Storage)
2. http://www.researchgate.net/publication/223419163_A_review_on_phase_change_materials_integrated_in_building_walls(Frederic Kuznik, Damien David, Kevyn Johannes, Jean-Jacques Roux: A review on phase change materials integrated in building walls)
3. http://el.wikipedia.org/wiki/Κατάσταση_της_ύλης
4. <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/state.html>
5. <http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL111/482/3167,12766/>
6. <http://www.abc.net.au/science/articles/2010/03/16/2840402.htm>
7. <http://zonalandeducation.com/mstm/physics/mechanics/energy/heatAndTemperature/changesOfPhase/changeOfState.html>
8. http://el.wikipedia.org/wiki/Θερμότητα_ατμοπαραγωγής
9. http://www.phasechange.com/Research%20Library/Enthalpy_of_Phase_Change_Materials_as_a_Function_of_Temperature_Required_Accuracy_and_Suitable_Measurement_Methods.pdf
10. <http://lib.tkk.fi/Diss/2003/isbn9512266083/article1.pdf> Piia Lamberg, Reijo Lehtiniemi, Anna-Maria Henell, Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage
11. http://www.researchgate.net/publication/228755271_Two_solution_methods_of_heat_transfer_with_phase_change_within_whole_building_dynamic_simulation Dariusz Heim: Two solution methods of heat transfer with phase change within whole building dynamic simulation
12. http://econpapers.repec.org/article/eeerensus/v_3a15_3ay_3a2011_3ai_3a1_3ap_3a112-130.htm Yvan Dutil, Daniel R.Rousse, Nizar Ben Salah, Stephane Lassue, Laurent Zalewski, A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations
13. http://www.researchgate.net/publication/245055892_Solving_heat_transfer_problems_with_phase_change_via_smoothed_effective_heat_capacity_and_ele

- [ment-free Galerkin methods](#) Haitian Yang, Yiqian He, Solving heat transfer problems with phase change via smoothed effective heat capacity and element-free Galerkin methods
14. X. Τζιβανίδης: «Σημειώσεις του μαθήματος Θερμική Συμπεριφορά Κτιρίων» Εκδόσεις Ε.Μ.Π. Μάιος 2006
 15. Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications
 16. 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
 17. Syukri Himran, Aryadi Suwono, G. Ali Mansoori: Characterization of Alkanes and Paraffin Waxes for Application as Phase Change Energy Storage Medium
 18. A. Abhat: Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials
 19. K. K. Pillai and B. J. Brinkworth: The Storage of Low Grade Thermal Energy using Phase Change Materials
 20. http://en.wikipedia.org/wiki/Fatty_acid
 21. D. Feldman, M.M. Shapiro, D. Banu and C.J. Fuks: Fatty acids and their mixtures as Phase – Change Materials for Thermal Energy Storage
 22. http://en.wikipedia.org/wiki/Sugar_alcohol
 23. Seongok Han, Chongyoup Kim and Dongsook Kwon: Thermal / oxidative degradation and stabilization of polyethylene glycol
 24. http://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene_glycol
 25. 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
 26. Ganesh Balasubramanian, Mehdi Ghommem, Muhammad R. Hajj, William P. Wong, Jennifer A. Tomlin, Ishwar K. Puri: Modeling of thermochemical energy storage by salt hydrates
 27. H.P.Carg, J.Prakash, Solar energy:Fundamentals and Applications
 28. Maria Telkes, Thermal energy storage in salt hydrates
 29. Stephen Marks, An investigation of the thermal energy storage capacity of Glauber`s salt with respect to thermal cycling
 30. Takayuki Watanable, Maria Natalia R.Dimaano, Solar energy:new research, Thermal performance characterization of capric acid and lauric acid mixture for low temperature energy storage
 31. Lv Shilei, Zhu Neng, Feng Guohui, Eutectic mixtures of capric acid and lauric acid applied in building wallboards for heat energy storage
 32. http://en.wikipedia.org/wiki/Glauber's_salt
 33. Imen Chatti, Anthony Delahaye, Laurence Fournaison, Jean-Pierre Petitet: Benefits and drawbacks of clathrate hydrates: a review of their areas of interest
 34. <http://www.otyposnews.gr/archives/7396>

35. Eleftherios Dimitrios Kravvaritis, Kimon Antonopoulos, Christos Tzivanidis, Solar energy management using PCM passive systems in the Athens area buildings, (υπό δημοσίευση)
36. Vineet Veer Tyagi, D. Buddhi, PCM thermal storage in buildings: A state of art
37. Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications
38. H.K.D.H. Bhadeshia, “Thermal Analysis Techniques”, University of Cambridge, Materials Science & Metallurgy
39. 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
40. http://en.wikipedia.org/wiki/Differential_thermal_analysis
41. http://en.wikipedia.org/wiki/Differential_scanning_calorimetry
42. <http://www.npl.co.uk/science-technology/advanced-materials/measurement-techniques/thermal-analysis/differential-scanning-calorimetry>
43. 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
44. 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
45. 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»
46. Jean Paris, Michel Falardeau, Cécile Villeneuve: Thermal Storage by Latent Heat: A Viable Option for Energy Conservation in Buildings
47. V.V. Tyagi, S.C. Kaushik, S.K. Tyagi, T. Akiyama, Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review
48. A. Felix Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review
49. Justin Ning-Wei Chiu, Dr. Viktoria Martin, and Prof. Fredrik Setterwall, A review of thermal energy storage systems with salt hydrate PCM for comfort cooling
50. Frédéric Kuznik, Damien David, Kevyn Johannes, Jean-Jacques Roux, A review on phase change materials integrated in building walls
51. Dong Zhang, Jianming Zhou, Keru Wu, Zongjin Li, Granular phase change composites for thermal energy storage
52. 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
53. K.Darkwa, J.-S.Kim, Dynamics of energy storage in phase change drywall systems

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Γενικές εφαρμογές των PCMs

Εισαγωγή

Σήμερα μία από τις πιο μελετημένες μεθόδους εξοικονόμησης ενέργειας αποτελεί η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας (TES) και έχει αρχίσει να εφαρμόζεται σε διάφορους τομείς.

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 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.

3.1 Ηλιακά συστήματα για θέρμανση και ψύξη με PCM

Οι εφαρμογές ηλιακής ενέργειας απαιτούν μία επαρκή αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Ως εκ τούτου, η επιτυχία μίας τέτοιας εφαρμογής εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό, από τη μέθοδο θερμικής αποθήκευσης που θα επιλεγεί.

Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας είναι αυτή η μέθοδος που έχει αποκτήσει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Για να γίνει αντιληπτή η ποσότητα της λανθάνουσας θερμότητας, η οποία εμφανίζεται κατά την αλλαγή φάσης ενός υλικού, μπορεί να συγκριθεί η αισθητή θερμοχωρητικότητα του σκυροδέματος (1.0kJ/kg K) με τη λανθάνουσα θερμότητα ενός υλικού αλλαγής φάσης, όπως είναι το κερί παραφίνης (154kJ/kg). Είναι, λοιπόν, εμφανές ότι όποιο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας ενσωματώσει PCM, θα περιλαμβάνει πολύ μικρότερο όγκο από οποιοδήποτε άλλο σύστημα με ενσωματωμένο κάποιο υλικό που αποθηκεύει μόνο αισθητή θερμότητα.

Επομένως, επαρκή και αξιόπιστα συστήματα αποθήκευσης για θερμική ενέργεια είναι καθοριστικής σημασίας για τις περισσότερες εφαρμογές. Ένας τομέας, όπου η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται εκτενώς είναι η θέρμανση νερού. Για αυτή τη χρήση έχουν γίνει πολλές και ενδιαφέρουσες μελέτες.

3.1.1. Ηλιακά συστήματα θέρμανσης με PCM

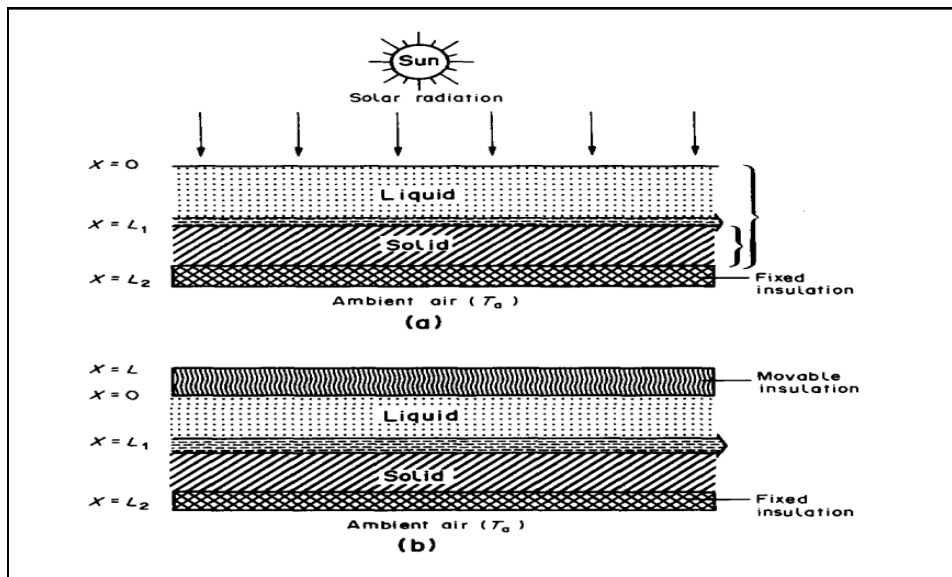
3.1.1.1 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού με PCM [1-5]

Ένας τομέας, όπου η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται εκτενώς είναι η θέρμανση νερού. Οι ηλιακοί θερμοσίφωνες αποκτούν μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς είναι σχετικά φθηνοί και είναι αρκετά εύκολη η κατασκευή και η συντήρησή τους. Είναι ένας βιώσιμος εξοπλισμός και μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά από τους ηλεκτρικούς θερμοσίφωνες. Αυτή η αντικατάσταση μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των βλαβερών εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, αφού έχει διαπιστωθεί ότι κατά τη διάρκεια 20 χρόνων, ένας ηλιακός θερμοσίφοντας μπορεί να αποτρέψει πενήντα τόνους εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Μπορεί να λειτουργήσει σε οποιοδήποτε κλίμα, ενώ αναλόγως με τις εξωτερικές συνθήκες και με την ακρίβεια του σχεδιασμού μπορεί να καλύψει από το μισό μέχρι το σύνολο της ζήτησης ζεστού νερού. Ακολουθεί η αναφορά κάποιων εφαρμογών στο πεδίο αυτό.

Ο Kumar σχεδίασε και αξιολόγησε τη συμπεριφορά μίας μονάδας αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας για να καλύψει τις ανάγκες ζεστού νερού το πρωί και το βράδυ, χρησιμοποιώντας έναν ηλιακό συλλέκτη σχήματος κιβωτίου. Το σύστημά του περιλάμβανε τρεις εναλλάκτες θερμότητας με πτερύγια. Ως PCM χρησιμοποιήθηκε το κερί παραφίνης με σημείο τήξης τους 54°C . Βρέθηκε ότι η μονάδα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας ήταν πολύ αποτελεσματική ώστε να παρέχει το ζεστό νερό στο επιθυμητό θερμοκρασιακό εύρος.

Ο Tiwari και οι συνεργάτες του, ανέλυσαν την αποθήκευση θερμότητας στο PCM ενός ηλιακού θερμοσίφωνα, ενσωματώνοντας στην μελέτη τους και την επίδραση της ροής

του νερού πάνω σε μία παράλληλη πλάκα, η οποία τοποθετείται στην διεπιφάνεια των φάσεων στερεού και υγρού. Προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες θερμότητας κατά τη διάρκεια της νύχτας από την εκτεθειμένη επιφάνεια, υπήρχε και μία πρόβλεψη για κάλυψη του συστήματος με μόνωση, η οποία μπορούσε να μετακινηθεί.

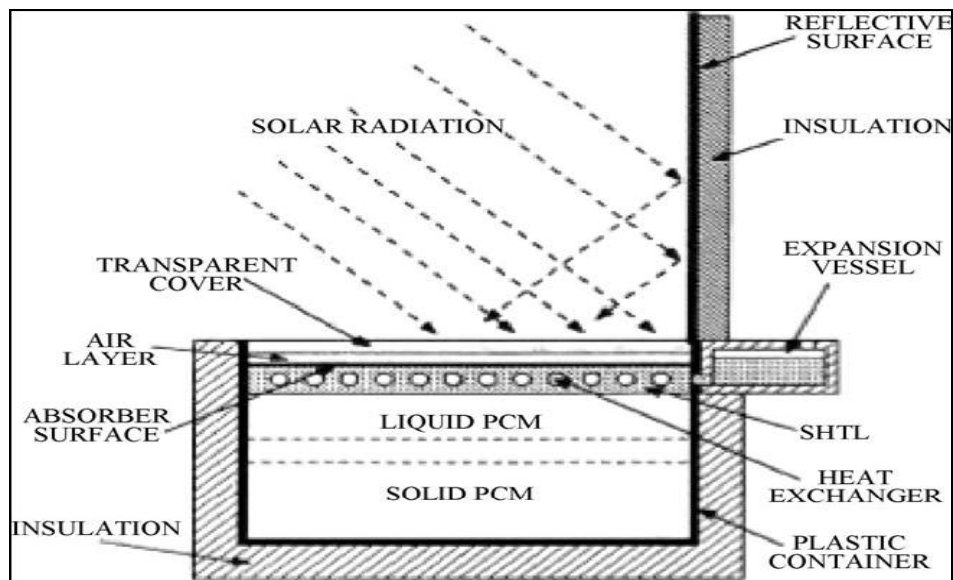


Σχήμα 3.1: Αποψη της διατομής του προτεινόμενου συστήματος του Tiwari (a) κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας, (b) κατά τη διάρκεια των ωρών χωρίς ηλιοφάνεια.

Συμπεράναν ότι, το ζεστό νερό μπορεί να διατηρηθεί σε όλη τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας σε μία θερμοκρασία περίπου $15-20^{\circ}\text{C}$ υψηλότερα από τη θερμοκρασία του αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος, ενώ οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του νερού μπορούν να μειωθούν με μία αύξηση της περιοχής τήξης του PCM.

Ο Rabin και η ομάδα του, παρουσίασαν έναν ηλιακό συλλέκτη με ενσωματωμένη αποθήκευση για παροχή ζεστού νερού, ο οποίος ενσωμάτωσε ένα ευθηκτικό μείγμα, βασισμένο σε ένα ένυδρο άλας, ως PCM. Η σχηματική απεικόνιση του συστήματος φαίνεται παρακάτω. Η διάταξη αποτελείται από ένα θερμικά μονωμένο πλαστικό δοχείο, το οποίο περιέχει ένα στρώμα από ένα υγρό μεταφοράς θερμότητας, χαμηλότερης πυκνότητας από το υγρό ένυδρο άλας στο οποίο επιπλέει. Επίσης, χρησιμοποιείται ένας εναλλάκτης θερμότητας με πτερύγια για να κρυώνει το νερό στη διαδικασία αποφόρτισης.

Τα αποτελέσματα ελέγχου αυτού του συστήματος ήταν ότι, για μία χειμερινή ημέρα, περίπου τα $2/3$ της συνολικής ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει πάνω στον ηλιακό συλλέκτη μπορούν να απορροφηθούν και να αποθηκευτούν στη θερμοκρασία των 28°C , χρησιμοποιώντας αυτό το ευθηκτικό μείγμα. Αυτό σημαίνει ότι για θερμοκρασίες της τάξεως των $15-30^{\circ}\text{C}$, μέσα στις οποίες περιλαμβάνεται το συγκεκριμένο ευθηκτικό μείγμα, η διάταξη μπορεί να είναι έως και $65-70\%$ αποτελεσματική.

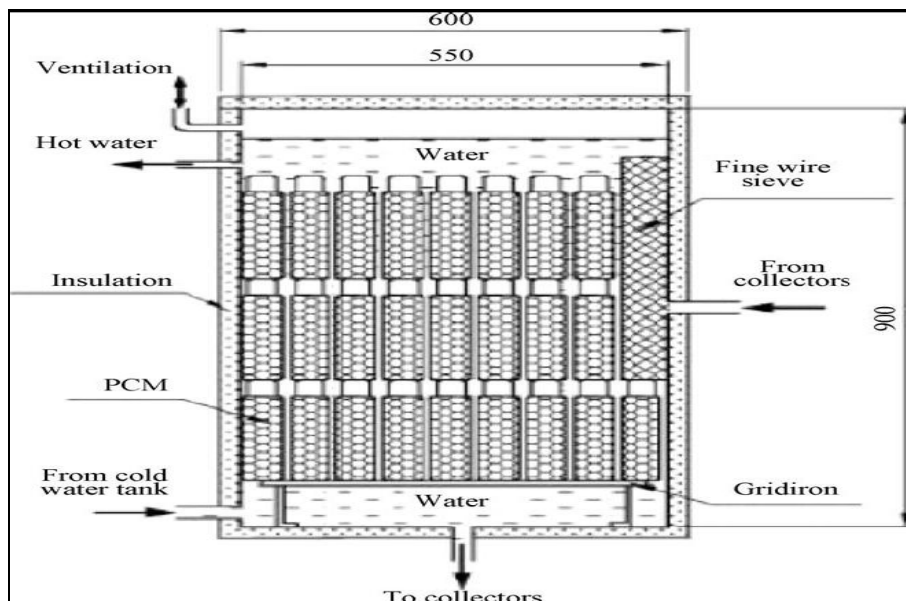


Σχήμα 3.2: Ηλιακός συλλέκτης με ενσωματωμένη αποθήκευση σχεδιασμένος από τον Rabin.

Ο Canbazoglu και η ομάδα του σύγκριναν ηλιακούς θερμοσίφωνες με PCM με συμβατικούς θερμοσίφωνες. Η συνολική μάζα του PCM που χρησιμοποιήθηκε στη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας ήταν περίπου 180kg, η οποία είχε ενσωματωθεί σε μπουκάλια πολυαιθυλενίου.

Διαπιστώθηκε ότι η θερμοκρασία του νερού στο μέσο της δεξαμενής αποθήκευσης είχε μία ομαλή μείωση κάθε μέρα μέχρι η θερμοκρασία του PCM, μετά από τις υψηλές τιμές κατά την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, να μειωθεί και τελικά να διατηρηθεί σε μία θερμοκρασία των 45°C, για μία περίοδο δέκα ωρών κατά τη διάρκεια της νύχτας και μέχρι την ανατολή του ήλιου, εξαιτίας της μη κατανάλωσης ζεστού νερού.

Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του μέσου της δεξαμενής αποθήκευσης και του σημείου εξόδου του συλλέκτη της δεξαμενής με το PCM, ήταν μεγαλύτερη κατά 60C από αυτήν της δεξαμενής χωρίς το PCM. Αυτή η διαφορά αποδεικνύει την υψηλή απόδοση σε αποθήκευση θερμότητας του συστήματος με το PCM. Όμως, έγινε κατανοητό ότι οι παθητικοί ηλιακοί θερμοσίφωνες συνδυασμένοι με το PCM μπορούν να λειτουργήσουν καλύτερα τη θερινή περίοδο, όπου η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μεγάλη και οι απώλειες θερμότητας του συστήματος μικρές.

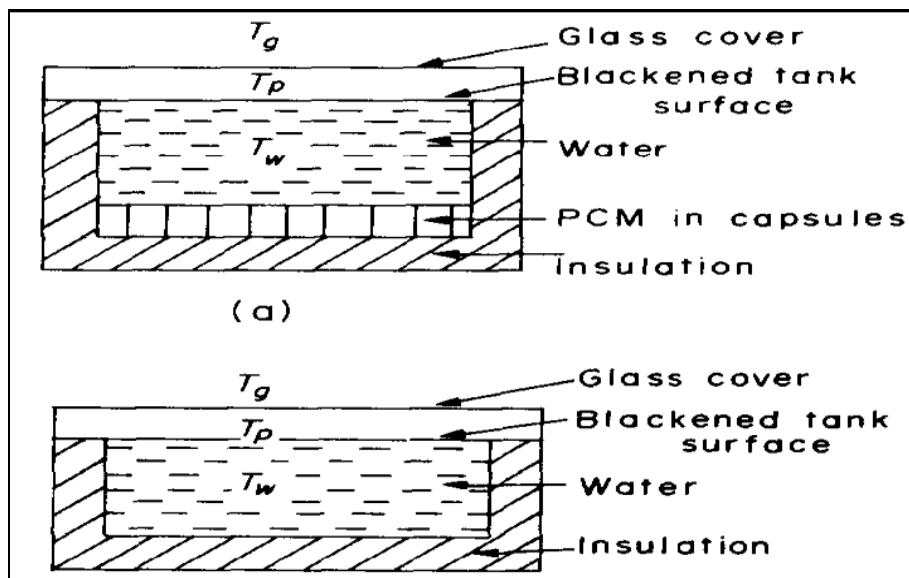


Σχήμα 3.3: Τομή της μονάδας αποθήκευσης, σχεδιασμένη από τον Canbazoglu.

Επίσης, ο χρόνος αποθήκευσης του ζεστού νερού, η ποσότητα προς χρήση του παραγόμενου ζεστού νερού και η συνολική ποσότητα που αποθηκεύεται στη δεξαμενή αποθήκευσης, ήταν περίπου 2,59-3,45 μεγαλύτερα στην περίπτωση του συστήματος με το PCM. Αυτά τα αποτελέσματα σημαίνουν ότι απαιτείται μικρότερος όγκος για τη δεξαμενή, λιγότερη ποσότητα μονωτικού υλικού, άρα και χαμηλότερο κόστος, όταν χρησιμοποιούνται PCM. Μάλιστα τα πιο κατάλληλα για αυτήν την εφαρμογή βρέθηκε ότι ήταν κάποια ένυδρα άλατα.

Ο Prakash και οι συνεργάτες του, ανέλυσαν έναν ηλιακό θερμοσίφωνα με ένα στρώμα PCM στο κάτω μέρος του, ώστε να πετύχουν και τη διατήρηση χαμηλής θερμοκρασίας του νερού στη δεξαμενή, αλλά ταυτόχρονα και μεγαλύτερη ποσότητα αποθηκευόμενης ενέργειας. Κατά τη διάρκεια των ωρών με ηλιοφάνεια, το νερό στη δεξαμενή θερμαίνεται και με τη σειρά του μεταφέρει θερμότητα στο PCM που βρίσκεται από κάτω του. Το PCM αποθηκεύει την ενέργεια στη μορφή λανθάνουσας θερμότητας και λιώνει. Κατά τη διάρκεια των ωρών χωρίς ηλιοφάνεια, το θερμό νερό αποσύρεται και αντικαθίσταται από κρύο νερό, το οποίο λαμβάνει θερμότητα από το PCM. Αυτή η ενέργεια απελευθερώνεται από το PCM, καθώς αλλάζει φάση από υγρό σε στερεό.

Ο έλεγχος της συγκεκριμένης διάταξης έγινε για δύο διαφορετικά βάθη τοποθέτησης του PCM και για σταθερή ή διακοπτόμενη ροή, ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες θερμού νερού ενός οικιακού κτιρίου στην Ινδία. Επίσης, πραγματοποιήθηκε σύγκριση του ηλιακού θερμοσίφωνα με το στρώμα PCM με ένα συμβατικό ηλιακό θερμοσίφωνα, όπως φαίνεται από το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.4: Απεικόνιση (α) ηλιακού θερμοσίφωνα με στρώμα PCM, (β) συμβατικού ηλιακού θερμοσίφωνα, όπως κατασκευάστηκαν από τον Prakash.

Το συμπέρασμα αυτών των ελέγχων ήταν, καταρχήν, ότι οι ηλιακοί θερμοσίφωνες με το στρώμα PCM είναι κυρίως κατάλληλοι για παροχή ζεστού νερού κατά τη διάρκεια των ωρών χωρίς ηλιοφάνεια. Η αποθήκευση θερμότητας σε έναν ηλιακό θερμοσίφωνα με PCM χωρίς την εφαρμογή νυχτερινής μόνωσης ήταν τόσο αποτελεσματική όσο η αποθήκευση θερμότητας σε συμβατικό ηλιακό θερμοσίφωνα με εφαρμογή νυχτερινής μόνωσης. Για την παροχή νερού κατά τη διάρκεια των ωρών της ημέρας (με ηλιοφάνεια) δεν ενδείκνυται η χρησιμοποίηση ηλιακού θερμοσίφωνα με στρώμα PCM, εξαιτίας της σχετικά χαμηλής μετάδοσης θερμότητας.

3.1.1.2. Ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα με PCM [6-9]

Μεγάλη προσοχή για διεξαγωγή μελετών και πειραμάτων έχει συγκεντρώσει και ο ηλιακός θερμοσίφωνας αέρα, για τον οποίο ακολουθούν οι κυριότερες εφαρμογές, από τις οποίες διαφαίνεται αν όντως υπάρχει προοπτική για πρακτική χρήση.

Ο Enibe ασχολήθηκε με το σχεδιασμό, την κατασκευή και την αξιολόγηση της επίδοσης ενός παθητικού ηλιακού θερμοσίφωνα αέρα. Το σύστημα που προτάθηκε περιλάμβανε έναν ηλιακό συλλέκτη με επίπεδη πλάκα απορρόφησης ενσωματωμένο με ένα σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, το οποίο χρησιμοποιεί παραφίνη ως PCM με γνωστές θερμοφυσικές ιδιότητες. Η συνολική μάζα PCM στον ηλιακό θερμοσίφωνα είναι 65kg. Ο ηλιακός θερμοσίφωνας είναι φυσικής συναγωγής, δηλαδή εισέρχεται με φυσική συναγωγή φρέσκος αέρας στο χώρο θέρμανσης, ενώ ταυτόχρονα ο θερμός αέρας μεταπίπτει στο χώρο του θερμού αέρα και από εκεί αποφορτίζεται στο περιβάλλον.

Τα πειράματα διεξήχθησαν για τη συμπεριφορά του συστήματος κατά τη διάρκεια της ημέρας, για 14 διαφορετικές ημέρες τον Μάιο και τον Ιούνιο στην περιοχή Nsukka, στη Νιγηρία. Οι έλεγχοι έγιναν κάτω από συνθήκες μηδενικού φορτίου και με φυσιολογικές

συνθήκες περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένων και των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας στο εύρος 19-41°C, αλλά και των διακυμάνσεων της ολικής ημερήσιας ακτινοβολίας στο εύρος 4,9-19,96 MJ/m².

Η μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας ήταν περίπου 15K, ενώ η αθροιστική ωφέλιμη αποδοτικότητα ήταν περίπου 50%. Στο σύστημα αυτό αποδείχθηκε κατάλληλο για χρήση ως ηλιακός χώρος για ξήρανση καλλιεργειών που δεν απαιτούν άμεση έκθεση στον ήλιο.



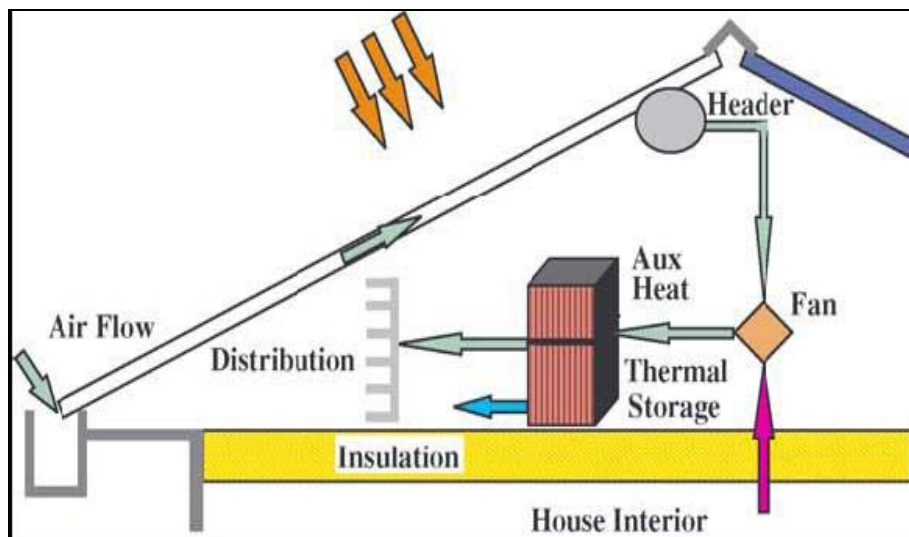
Σχήμα 3.5: Φωτογραφία ενός ηλιακού θερμοσίφωνα αέρα, όπου Α:συνδεσμολογία του συλλέκτη με την ενεργειακή αποθήκευση και τα υποσυστήματα θέρμανσης αέρα και Β:θερμαινόμενος χώρος.

Μία άλλη εφαρμογή είναι αυτή που πραγματοποιήθηκε από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Πανεπιστημίου της Νότιας Αυστραλίας, ώστε να σχεδιαστεί ένα ενσωματωμένο στη στέγη ηλιακό σύστημα θέρμανσης αέρα.

Ο κύριος στόχος ήταν να παρουσιαστεί ένα τεχνικά αξιόπιστο σύστημα με ενδιαφέρον και από οικονομική άποψη. Προς αυτήν την κατεύθυνση υιοθέτησαν δύο στρατηγικές. Η πρώτη ήταν η χρησιμοποίηση της υπάρχουσας κατασκευής στη στέγη ως ηλιακό συλλέκτη, ώστε να μειωθεί το αρχικό κόστος, ενώ η δεύτερη ήταν ακριβώς η χρήση μίας μονάδας λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας με PCM, η οποία θα αποθήκευε την επιπλέον ηλιακή ενέργεια για χρήση για τη θέρμανση του σπιτιού, όταν δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία, μειώνοντας έτσι την απαίτηση για βοηθητική πηγή θερμότητας.

Η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος, όπως αυτό που παρουσιάστηκε από τον Belusko και δίνεται παρακάτω, μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες. Κατά τη διάρκεια των ωρών με ηλιοφάνεια και όταν απαιτείται θερμότητα για το σπίτι, ο αέρας περνάει από το συλλέκτη και ακολούθως στο εσωτερικό του σπιτιού. Όταν δεν απαιτείται θερμότητα, τότε ο αέρας διοχετεύεται στη μονάδα θερμικής αποθήκευσης, προκαλώντας την τήξη του PCM, δηλαδή φορτίζοντάς το για μεταγενέστερη χρήση. Τις ώρες στις οποίες η ηλιοφάνεια δεν είναι διαθέσιμη, ο αέρας του δωματίου περνάει μέσα από τη μονάδα

αποθήκευσης, θερμαίνεται και διοχετεύεται ξανά στο χώρο. Όταν η μονάδα αποθήκευσης δεν είναι φορτισμένη, τότε μία βοηθητική πηγή θερμότητας χρησιμοποιείται για να θερμάνει το δωμάτιο.



Σχήμα 3.6: Ηλιακό σύστημα θέρμανσης αέρα ενσωματωμένο στη στέγη.

Τα αποτελέσματα τα οποία θα αναφερθούν αφορούν μία συγκεκριμένη εφαρμογή, η οποία πραγματοποιήθηκε στην Αδελαΐδα, στην Αυστραλία. Η θερμική μονάδα αποθήκευσης περιλάμβανε 45 επίπεδες πλάκες PCM, διατεταγμένες η μία πάνω στην άλλη. Το σύνολο αυτών των πλακών τοποθετήθηκε μέσα σε έναν ορθογώνιο αγωγό, μέσω του οποίου ο αέρας ρέει ώστε να προσθέσει ή να αφαιρέσει θερμότητα από το PCM. Το PCM που χρησιμοποιήθηκε είχε σημείο τήξης τους 29°C , ενώ η συνολική ποσότητα του PCM στο σύστημα ήταν 600kg.

Τα συμπεράσματα συμπεριλάμβαναν και την επίδραση της αισθητής θερμότητας στη θερμική συμπεριφορά του παραπάνω συστήματος. Διαπιστώθηκε ότι η επίδραση αυτή γίνεται αντιληπτή και στην περίοδο τήξης και στην περίοδο στερεοποίησης. Αυτό είναι εμφανές από την πολύ μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του αέρα στην αρχική περίοδο τήξης και από την πολύ μεγάλη μείωση αυτής στην αρχική περίοδο στερεοποίησης.

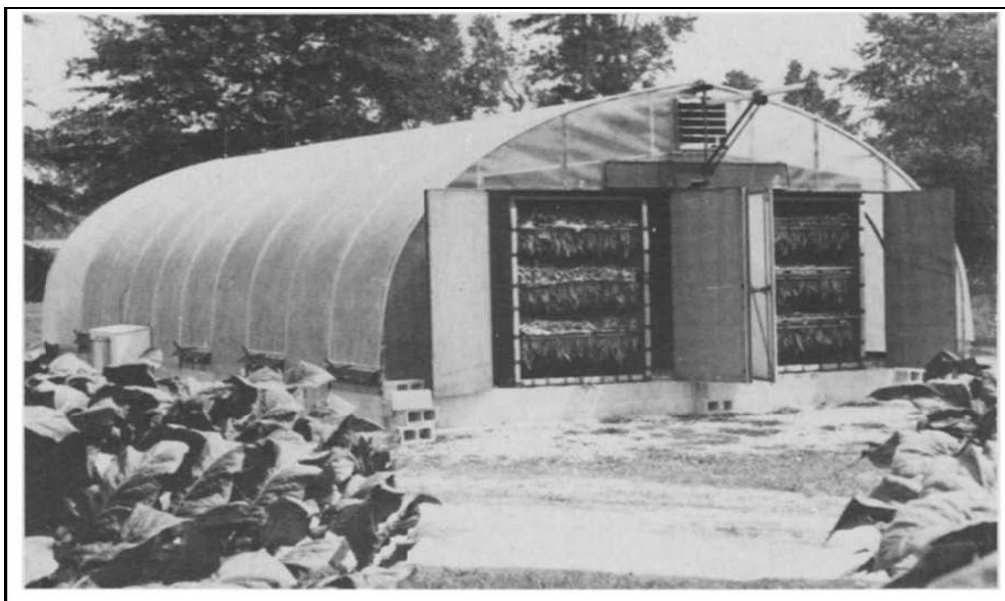
Για εφαρμογές θέρμανσης, αυτή η συμπεριφορά σημαίνει μία αυξημένη αίσθηση θερμικής άνεσης, λόγω της αυξημένης αίσθησης του θερμού αέρα κατά την είσοδό του στο χώρο. Επίσης, μία υψηλότερη θερμοκρασία εισόδου του αέρα αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας και μειώνει το χρόνο τήξης. Αντίστροφα, κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, μία χαμηλότερη θερμοκρασία εισόδου του αέρα αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας και μειώνει το χρόνο στερεοποίησης. Ομοίως, μία υψηλότερη ροή αέρα αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας, μειώνει το χρόνο τήξης και αυξάνει τη θερμοκρασία του αέρα εξόδου. Για τη στερεοποίηση, μία υψηλότερη ροή αέρα αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας, μειώνει το χρόνο στερεοποίησης, αλλά μειώνει και τη θερμοκρασία του αέρα εξόδου.

Όσον αφορά, τέλος, τον ηλιακό συλλέκτη μίας τέτοιας εφαρμογής έχουν γίνει δύο εφαρμογές. Η πρώτη από τους Saman και Belusko χρησιμοποίησε την κυματοειδή μεταλλική οροφή ώστε να λειτουργήσει ως ακάλυπτος από τζάμι ηλιακός συλλέκτης.

Αυτή η μελέτη απέδειξε ότι, αν και ένα τέτοιο σύστημα είναι οικονομικό, εξαιτίας της χαμηλής επίδοσης του συλλέκτη, ήταν αμφίβολο αν θα μπορούσε να προσφέρει σε σημαντικές ποσότητες εξοικονόμησης ενέργειας. Η δεύτερη εφαρμογή των ίδιων επιστημόνων ήταν με ηλιακό συλλέκτη, για τον οποίο χρησιμοποιήθηκε κάλυμμα από τζάμι. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι ένας τέτοιος συλλέκτης βελτίωσε πολύ την απόδοση του συστήματος και μάλιστα με πολύ μικρότερη χρήση συμβατικής ενέργειας από ότι μία αντλία θερμότητας ή ένας ηλεκτρικός θερμαντήρας.

3.1.1.3. Ηλιακά θερμοκήπια με PCM [10-14]

Τα ηλιακά θερμοκήπια προσφέρουν ένα προστατευόμενο περιβάλλον στις καλλιέργειες, αφού αντιμετωπίζονται με αυτόν τον τρόπο οι απρόβλεπτες κλιματικές συνθήκες. Σημαντική ποσότητα μεταφοράς ενέργειας λαμβάνει χώρα μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος του ηλιακού θερμοκηπίου. Επομένως, πρέπει αυτοί οι χώροι να θερμαίνονται, να ψύχονται και να αερίζονται σύμφωνα με τις εξωτερικές συνθήκες του περιβάλλοντος, έτσι ώστε να διατηρηθούν οι εσωτερικές κατάλληλες για την ανάπτυξη των φυτών και να αποτραπεί η καταστροφή των καλλιεργειών.



Σχήμα 3.7: Ηλιακό θερμοκήπιο με PCM.

Η χρήση των PCM στα θερμοκήπια για τη διαδικασία θέρμανσης, έχει αποδειχθεί ότι εμφανίζει πολλά πλεονεκτήματα. Μπορεί να είναι υψηλά τα αρχικά κόστη για την ενσωμάτωση των PCM στα θερμοκήπια, αλλά είναι χαμηλά τα κόστη λειτουργίας, είναι περιβαλλοντικά φιλικά και ασφαλή στη χρήση τους. Επίσης, τα PCM έχουν υψηλή

ενεργειακή πυκνότητα και παράγονται σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, στοιχεία τα οποία είναι πολύ ελκυστικά για εφαρμογές σε θερμοκήπια.

Η πρώτη εφαρμογή ήταν των Hung και Toksoy, οι οποίοι χρησιμοποίησαν εμπορικές κυλινδρικές ράβδους με υλικό αλλαγής φάσης, ως το κύριο μέσο αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας για ένα ηλιακό θερμοκήπιο. Τα πειράματα έγιναν σε ένα ηλιακό θερμοκήπιο παραγωγής τριαντάφυλλων στη Γαλλία. Η ηλιακή ενέργεια που ήταν διαθέσιμη στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, μεταφερόταν και αποθηκευόταν ανακυκλώνοντας τον αέρα μέσω ενός δικτύου υπογείων επίπεδων εναλλακτών θερμότητας, οι οποίοι ήταν γεμάτοι με PCM. Συγκρινόμενο αυτό το θερμοκήπιο με ένα συμβατικό χωρίς λανθάνουσα αποθήκευση θερμότητας, αποδείχθηκε ότι το ηλιακό θερμοκήπιο με PCM πέτυχε 80% εξοικονόμηση στις εκπομπές προπανίου σε σχέση με το συμβατικό.

Οι Benli και Durmus μελέτησαν τη θερμική συμπεριφορά μίας μονάδας αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Η μονάδα αποθήκευσης είναι ένα σύστημα από δέκα μέρη ηλιακών συλλεκτών, η οποία σχεδιάστηκε για θέρμανση ενός θερμοκηπίου και στην οποία ενσωματώθηκε PCM. Ως PCM χρησιμοποιήθηκε το $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ με θερμοκρασία τήξης του 29°C.



Σχήμα 3.8: Απεικονίσεις του πειραματικού εξοπλισμού ηλιακού θερμοκηπίου με PCM.

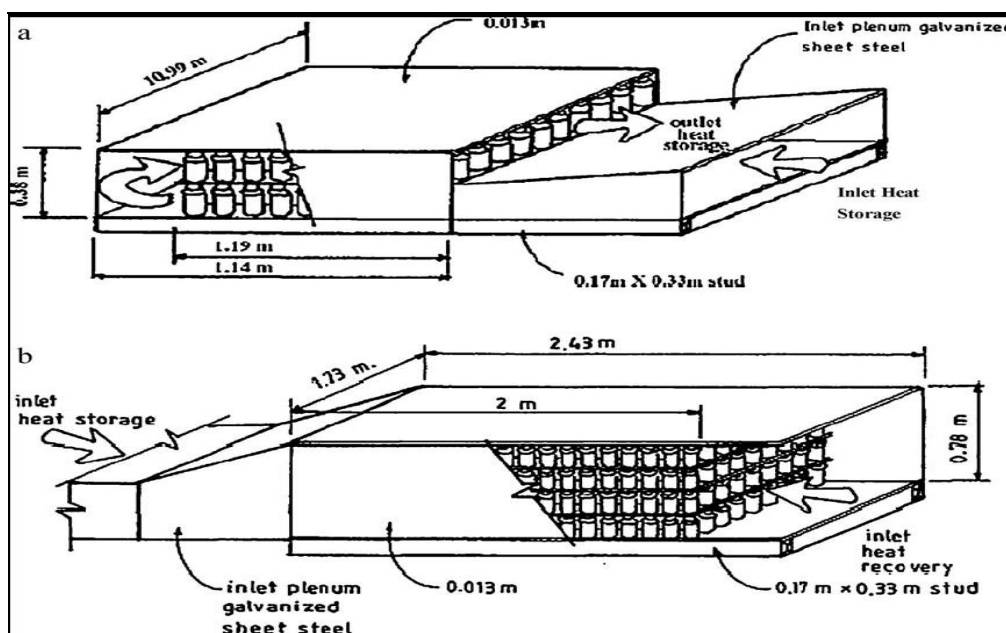
Ο θερμός αέρας που προέρχεται από τους ηλιακούς συλλέκτες, διέρχεται από το PCM, προκειμένου να το λιώσει και να φορτίσει τη μονάδα. Αυτή η λανθάνουσα θερμότητα χρησιμοποιείται για να θερμάνει τον ατμοσφαιρικό αέρα πριν αυτός εισαχθεί στο θερμοκήπιο.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ηλιακοί συλλέκτες σε συνδυασμό με το PCM προκάλεσαν μία διαφορά θερμοκρασίας περίπου 6-9°C μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού χώρου του θερμοκηπίου. Επίσης, το σύστημα λειτουργούσε πιο αποτελεσματικά σε μία ημέρα με υψηλές θερμοκρασίες της ηλιακής ακτινοβολίας, χωρίς

όμως αυτό να σημαίνει ότι δεν είχε καλή απόδοση για τις κρύες ημέρες και για τις νυχτερινές ώρες. Σε αυτές τις ημέρες το θερμικό αυτό σύστημα μπορούσε να καλύπτει το 18-23% της ημερήσιας ανάγκης για ενέργεια του θερμοκηπίου για 3-4 ώρες, σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα χωρίς το PCM.

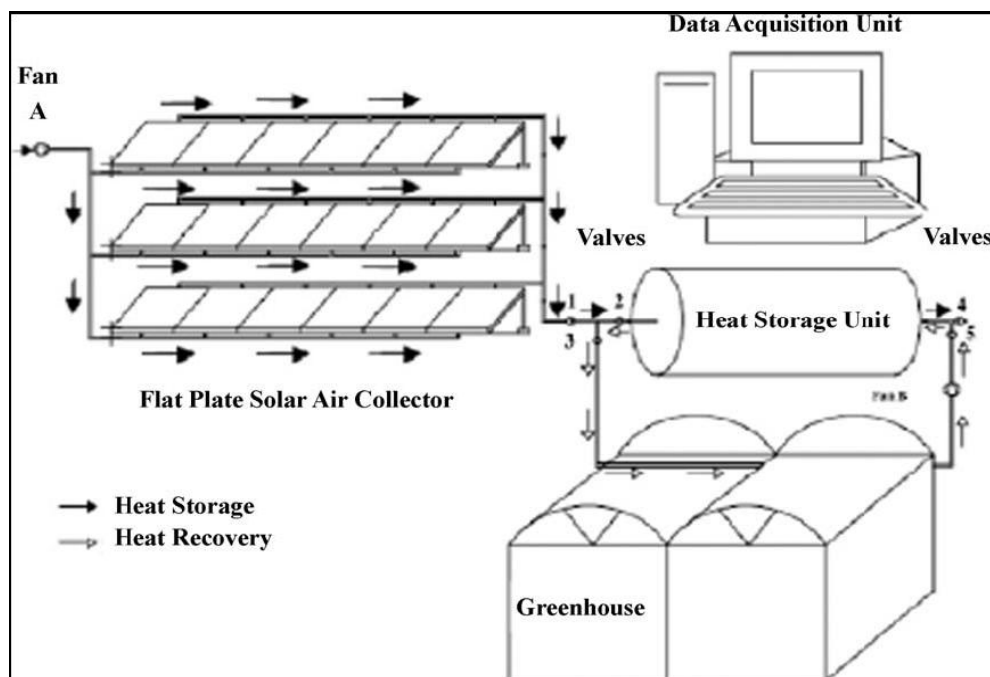
Οι Kern και Aldrich χρησιμοποίησαν το ίδιο PCM ($CaCl_2 \cdot 6H_2O$) σε ποσότητα 1650kg ενσωματωμένη σε δοχεία από αεροζόλ, προκειμένου να ελεγχθεί η ικανότητα ενεργειακής αποθήκευσης εσωτερικά και εξωτερικά ενός θερμοκηπίου επιφάνειας $36m^2$. Όσο η εσωτερική μονάδα ενεργειακής αποθήκευσης απορροφούσε την ενέργεια του θερμού αέρα από την κορυφή του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της ημέρας, η κατεύθυνση της ροής του αέρα λάμβανε αντίστροφη τροχιά για την απελευθέρωση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ομοίως, και η εξωτερική μονάδα αποθήκευσης θερμότητας, η οποία περιλάμβανε και δύο ηλιακούς συλλέκτες, άλλαζε τη κατεύθυνση της ροής του αέρα κατά τη διάρκεια της αφαίρεσης της αποθηκευμένης θερμότητας.

Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι η αποθηκευόμενη ενέργεια στην εξωτερική μονάδα ήταν μεταξύ των τιμών 105,5 και 158,25MJ, ενώ η αποθηκευόμενη ενέργεια στην εσωτερική μονάδα ήταν μεταξύ των τιμών 21,1 και 31,65MJ. Επίσης, υπολογίστηκε ότι η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα διατηρήθηκε $2^\circ C$ υψηλότερα από τις μέσες εξωτερικές συνθήκες, οι οποίες ήταν $8,5^\circ C$ για τον Δεκέμβριο και $6,5^\circ C$ για τον Ιανουάριο.



Σχήμα 3.9: Μονάδα θερμικής αποθήκευσης (α) εσωτερικά και (β) εξωτερικά του θερμοκηπίου.

Τέλος, ο Ozturk παρουσίασε ένα σύστημα εποχιακής αποθήκευσης ενέργειας, χρησιμοποιώντας κερί παραφίνης ως PCM, για τη θέρμανση ενός ηλιακού θερμοκηπίου επιφάνειας 180m². Το σύστημα περιλάμβανε πέντε ενότητες, δηλαδή επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες, μονάδα λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας ενσωματωμένη σε μία δεξαμενή, πειραματικό θερμοκήπιο, μονάδα μεταφοράς θερμότητας και μονάδα λήψης δεδομένων.



Σχήμα 3.10: Πειραματική διάταξη της εφαρμογής του Ozturk.

Οι αναλύσεις της ενέργειας και της εξέργειας που πραγματοποιήθηκαν ώστε να διαπιστωθεί η αποδοτικότητα του συστήματος, έδειξαν 40,4% ενεργειακή απόδοση και 4,2% εξεργειακή απόδοση.

3.1.2. Συστήματα ψύξης με PCM

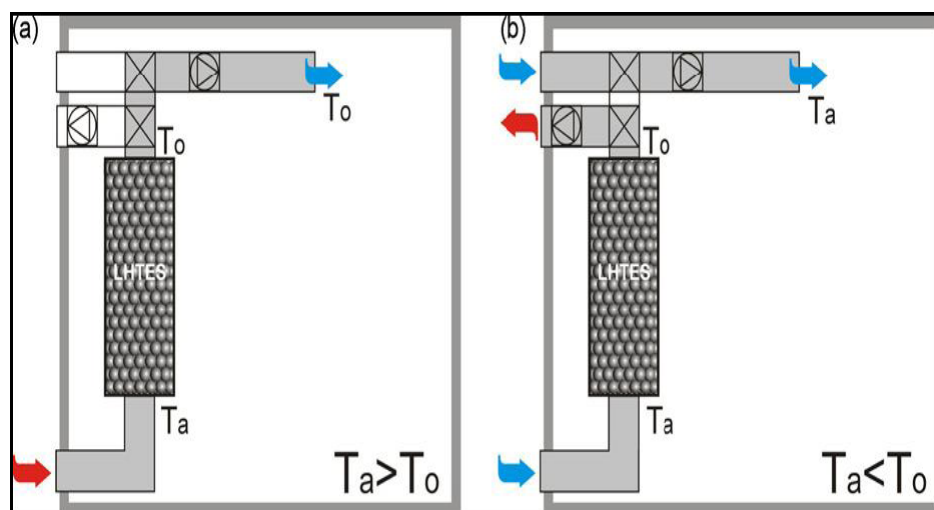
3.1.2.1. Free cooling [15-23]

Η μέθοδος της ελεύθερης ψύξης (free cooling) σε συνδυασμό με τα PCM μπορεί να προσφέρει μεγάλες δυνατότητες για εξοικονόμηση ενέργειας. Από τη βιβλιογραφία free cooling ονομάζεται αυτή η ποσότητα της ψύξης, η οποία μπορεί να αποκτηθεί από υπάρχοντα, πρόσθετα ή τροποποιημένα εξαρτήματα κατά τη διάρκεια στην οποία επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες ατμοσφαιρικού αέρα, και η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντισταθμίσει μερικώς ή ολικώς το μηχανικό φορτίο ψύξης.

Πρόκειται για μία εναλλακτική μέθοδο ψύξης και αερισμού του κτιρίου, η οποία συνδυάζει ενισχυμένη θερμική μάζα και νυχτερινό αερισμό. Η θερμική αδράνεια ενός κτιρίου προσαρμόζεται ενεργά από την ενσωμάτωση PCM στα δομικά στοιχεία του. Ο νυχτερινός ψυχρός αέρας χρησιμοποιείται για να ψύξει το εσωτερικό του κτιρίου και την

αποθήκη με το PCM. Ο εξωτερικός αυτός αέρας μπορεί να εισαχθεί στον εσωτερικό χώρο μέσω παραθύρων, ανεμιστήρων τοίχου ή συστήματος κεντρικής παροχής αέρα. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, θερμός εσωτερικός αέρας κυκλοφορεί στη μονάδα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Ο σκοπός της χρήσης προϊόντων PCM είναι η μείωση της ενέργειας που απαιτείται για τη ψύξη ενός κτιρίου, στο οποίο υπάρχει πλεονάζουσα παραγωγή θερμότητας.

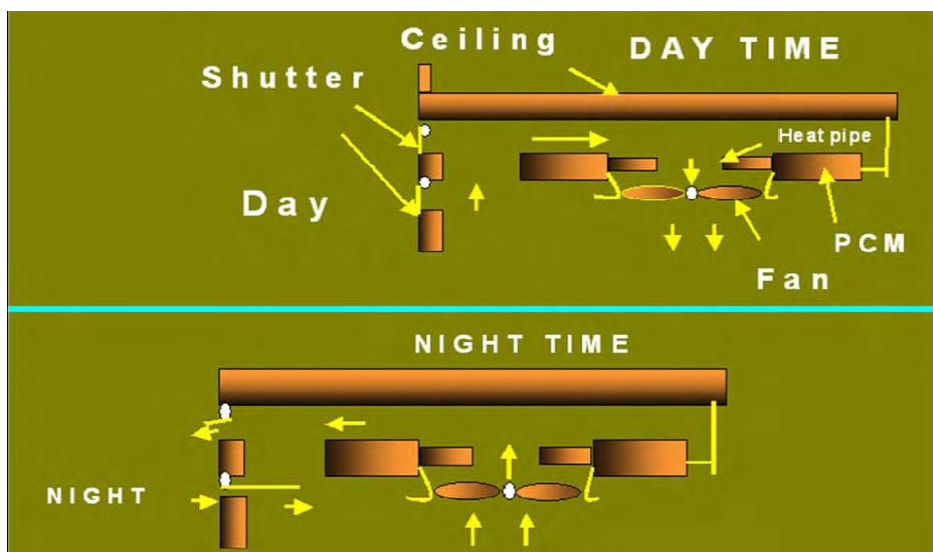


Σχήμα 3.11: Αρχή λειτουργίας συστήματος free cooling, (α) ημέρα, (β) νύχτα.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της τεχνικής του free cooling είναι η απόδοση ψύξης με πολύ μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και εξαιρετική διατήρηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα. Από τη στιγμή που η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της εσωτερικής θερμοκρασίας την ημέρα και της εξωτερικής θερμοκρασίας τη νύχτα είναι μικρή, η χρήση υλικών αλλαγής φάσης για τέτοια συστήματα είναι η πιο κατάλληλη. Τα συστήματα free cooling λειτουργούν καλύτερα σε χώρους στους οποίους το ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος είναι μεγαλύτερο από τους 15°C . Αν η θερμοκρασία τήξης του PCM είναι στο μέσο της διαφοράς των ακραίων θερμοκρασιών ενός χώρου, τότε ακριβώς η ίδια διαφορά είναι διαθέσιμη για τις διαδικασίες φόρτισης και αποφόρτισης.

Πρέπει να αναφερθεί ότι η τεχνική του free cooling δεν είναι πάντοτε δωρεάν. Σε μερικές περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται αντλίες νερού και ανεμιστήρες πύργων ψύξης, όταν ως μέσο λειτουργίας χρησιμοποιείται το νερό, ώστε να παρέχουν την απαραίτητη ένταση της κυκλοφορίας και επίσης χρησιμοποιούνται ανεμιστήρες αερισμού ή σωλήνες απαγωγής θερμότητας, όταν ως μέσο λειτουργίας χρησιμοποιείται ο αέρας, ώστε να παρέχουν ενισχυμένη μεταφορά θερμότητας μεταξύ του αέρα και των αποθηκών PCM.

Στη βιβλιογραφία η πρώτη εφαρμογή που αναφέρεται είναι αυτή του Turnpenney και των συνεργατών του. Οι επιστήμονες αυτοί μελέτησαν ένα πρωτοποριακό σύστημα νυχτερινού αερισμού με μονάδα λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας, η οποία χρησιμοποιεί αγωγούς θερμότητας ενσωματωμένους στο PCM.



Σχήμα 3.12: Το σύστημα που προτάθηκε από τον Turnpenny.

Ο αέρας από το δωμάτιο διέρχεται πάνω από τα εκτεθειμένα άκρα των αγωγών θερμότητας, χρησιμοποιώντας χαμηλής ισχύος ανεμιστήρες. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η θερμότητα μεταφέρεται στο PCM, προκαλώντας την τήξη του και μειώνοντας τη θερμοκρασία του δωματίου. Κατά τη διάρκεια της νύχτας και ενώ τα κλείστρα (παραθυρόφυλλα) είναι ανοιχτά, εξωτερικός ψυχρός αέρας διέρχεται πάνω από τους αγωγούς θερμότητας, ως εκ τούτου η θερμότητα εξάγεται από το ψυχόμενο τώρα PCM. Η καινοτομία σε αυτό το σύστημα είναι ότι οι αγωγοί θερμότητας είναι αντιστρεπτοί. Με αυτούς τους αγωγούς θερμότητας αποφεύγεται η ανάγκη για σύνθετες γεωμετρίες μεταφοράς θερμότητας στην επιφάνεια του PCM που είναι εκτεθειμένη στον αέρα. Η σχηματική διάταξη του συστήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Τα πειράματα που διεξήχθησαν κάτω από τρεις διαφορετικές ροές αέρα που αναμένονται σε ένα δωμάτιο, είχαν ως αποτέλεσμα ένα ρυθμό μεταφοράς θερμότητας από τον αέρα στο PCM της τάξεως των 40W σε ένα χρόνο τήξης 19 ωρών και ενώ η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα και του PCM ήταν περίπου 5°C.

Μία μεταγενέστερη βελτίωση του αρχικού συστήματος από τους ίδιους επιστήμονες χρησιμοποιούσε έναν ανεμιστήρα οροφής τοποθετημένο ακριβώς πάνω από τους αγωγούς θερμότητας. Τη νύχτα ψυχρός αέρας, ο οποίος εισέρχεται στο εσωτερικό από τους ανώτερους αεραγωγούς, διέρχεται πάνω από τους αγωγούς θερμότητας με τη βοήθεια του ανεμιστήρα οροφής, του οποίου η κατεύθυνση ήταν προς τα κάτω. Αμέσως μετά ο θερμός αέρας εξέρχεται από τον αεραγωγό εξόδου. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, οι αεραγωγοί παραμένουν κλειστοί και ο ανεμιστήρας οροφής, με την ίδια κατεύθυνση, ψύχει το δωμάτιο. Το αποτέλεσμα από το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας ήταν 200W, τιμή αρκετή για να καλύψει το θερινό φορτίο.

Το σύστημα ελεύθερης ψύξης που προτάθηκε από τους Arkar και Medved, περιλάμβανε μία μονάδα λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας, η οποία ενσωματώθηκε στο μηχανικό σύστημα αερισμού ενός κτιρίου. Το χαμηλής ενέργειας κτίριο στο οποίο ενσωματώθηκε αυτή η μονάδα παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα.



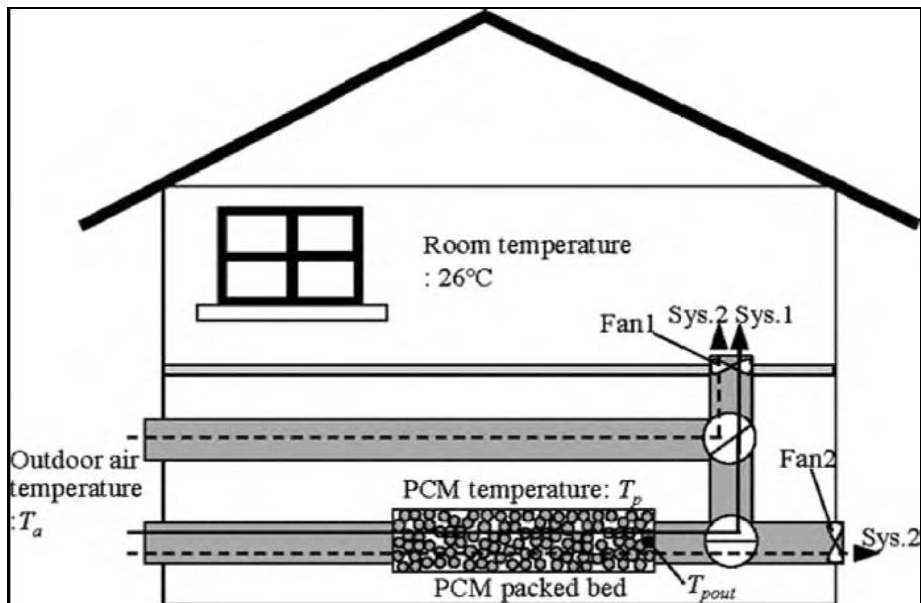
Σχήμα 3.13: Χαμηλής απαίτησης ενέργειας σπίτι με ενσωματωμένη μονάδα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας στη Σλοβενία.

Το συγκεκριμένο σπίτι έχει όλα τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ελαφρού βάρους κτιρίου, όπως καλή θερμική μόνωση, μηχανικό σύστημα αερισμού με ανάκτηση θερμότητας, στοιχεία για φυσική θέρμανση του κτιρίου στη νότια πλευρά και σκιάστρα. Προκειμένου να διατηρηθεί η απλότητα και η ευκολία στην προσαρμογή, χρησιμοποιήθηκε μία κυλινδρική μονάδα αποθήκευσης, η οποία περιλάμβανε σφαίρες με ενσωματωμένες μικροκάψουλες PCM.

Μία από τις μετρήσεις τους ήταν η σύγκριση της ελεύθερης ψύξης με το νυχτερινό αερισμό. Από αυτή τη σύγκριση, η υπεροχή της ελεύθερης ψύξης με το PCM ήταν εμφανής. Μόνο με διασταυρωμένο νυχτερινό αερισμό με πέντε εναλλαγές αέρα την ώρα, ήταν δυνατό να επιτευχθεί η ίδια ψύξη, άρα και η ίδια θερμική αίσθηση στο εσωτερικό του κτιρίου, με αυτήν που επιτυγχάνεται με την ελεύθερη ψύξη με τη μονάδα λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας. Επίσης, βρέθηκε ότι το σύστημα της ελεύθερης ψύξης με τη μονάδα λανθάνουσας αποθήκευσης με PCM, μπορεί να μειώσει το μέγεθος του συστήματος του μηχανικού αερισμού του κτιρίου.

Μία ενδιαφέρουσα εφαρμογή ήταν αυτή του Takeda και των συνεργατών του, οι οποίοι παρουσίασαν ένα βελτιωμένο σύστημα αερισμού, χρησιμοποιώντας αποθήκευση θερμικής ενέργειας με κόκκους υλικού αλλαγής φάσης. Το πειραματικό σύστημα που ελέγχθηκε, το οποίο δίνεται παρακάτω, εξασφάλιζε άμεση επαφή του εξαερισμού με τους κόκκους που περιείχαν υλικό αλλαγής φάσης. Οι συσκευασμένοι κόκκοι PCM ήταν ενσωματωμένοι σε έναν αγωγό σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου. Η ενσωμάτωση ``packed bed`` έχει υψηλό δυναμικό όσον αφορά τη σταθεροποίηση των διακυμάνσεων της εξωτερικής θερμοκρασίας του αέρα. Η θερμοκρασία εξόδου του αέρα ελεγχόταν όταν η θερμοκρασία εισόδου του αέρα είχε περιοδική μεταβολή, ώστε να γίνει προσομοίωση των αλλαγών της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα. Τα γενικά

αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμοκρασία εξόδου του αέρα σταθεροποιήθηκε και διατηρήθηκε μέσα στο θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης.

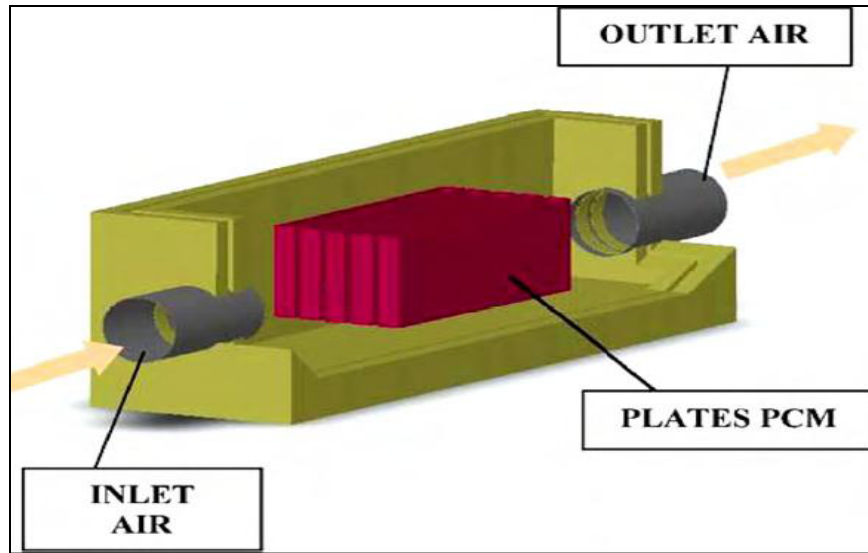


Σχήμα 3.14: Σύστημα free cooling, όπως προτάθηκε από τον Takeda.

Η δυναμική ενός τέτοιου συστήματος ώστε να μειωθεί το φορτίο εξαερισμού κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου ελέγχθηκε για οκτώ πόλεις της Ιαπωνίας, με υπολογιστική προσομοίωση. Το μεγαλύτερο όφελος βρέθηκε να είναι στο Κιότο με μείωση του φορτίου εξαερισμού κατά 62,8%. Σε άλλες πόλεις, όπως το Τόκιο, οι οποίες είχαν χαμηλότερες μέσες θερμοκρασίες, η μείωση ήταν της τάξεως του 42,8%.

Διαπιστώθηκε ότι το όφελος εξαρτάται περισσότερο από το εύρος στο οποίο κινούνται οι ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, παρά από τη μέση θερμοκρασία. Τέλος, μείωση υπήρχε και στο φορτίο ψύξης, το οποίο διαχωρίζεται σαφώς από το φορτίο εξαερισμού, με τη χρήση ενός τέτοιου συστήματος.

Ο Zalba ασχολήθηκε σε πολλές μελέτες του με τη σωστή εφαρμογή του free cooling. Στις μελέτες του Zalba επισημάνθηκαν και οι παράγοντες που κυρίως επιδρούν στην απόδοση ενός συστήματος free cooling. Αρχικά κατέληξε στο βέλτιστο σχήμα του δοχείου στο οποίο γίνεται η ενθυλάκωση των PCM, το οποίο είναι η ενσωμάτωση σε κάψουλες σε επίπεδη πλάκα. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μορφής είναι ότι είναι δυνατόν να επιτευχθεί μεγαλύτερη επιφάνεια ανά μονάδα όγκου του αποθηκευόμενου υλικού αλλαγής φάσης, με μικρό πάχος του PCM, ώστε να μειωθεί ο χρόνος στερεοποίησης. Επίσης, διαπίστωσε ότι αυτά τα δοχεία έχουν χαμηλότερο βάρος και όγκο, προκαλούν μικρότερη πτώση πίεσης του αέρα, ενώ παρέχουν και ευκολία στη κατασκευή της μονάδας αποθήκευσης.

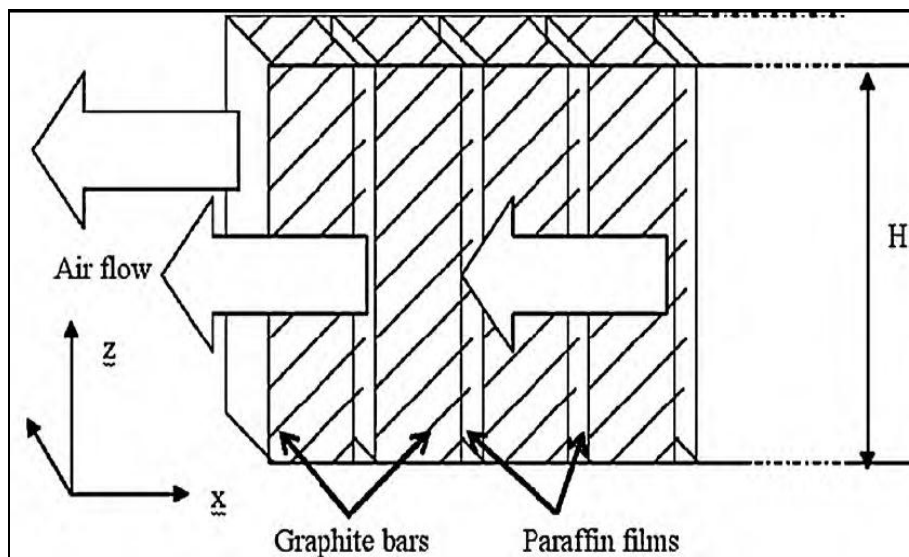


Σχήμα 3.15: Πειραματική διάταξη που χρησιμοποίησε ο Zalba.

Η παραπάνω πειραματική διάταξη που χρησιμοποίησε, τον βοήθησε να ορίσει και τους υπόλοιπους παράγοντες που επιδρούν στη διαδικασία του free cooling.

Διαπίστωσε, λοιπόν, ότι ο χρόνος στερεοποίησης του PCM είναι μικρότερος, στοιχείο που είναι επιθυμητό για την καλύτερη απόδοση του συστήματος, όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα και του σημείου τήξης του PCM είναι υψηλότερη και όταν ο ρυθμός κυκλοφορίας του αέρα είναι μεγαλύτερος. Τέλος, η ανάλυση για τη βιωσιμότητα ενός τέτοιου συστήματος free cooling έδειξε ότι δεν είναι μόνο τεχνικά απλό, αλλά και οικονομικά επωφελές για τα υπάρχοντα συστήματα ψύξης.

Η βελτίωση του παραπάνω συστήματος πραγματοποιήθηκε από τον Marin. Η προσπάθειά του επικεντρώθηκε κυρίως στην αντιμετώπιση της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας της παραφίνης, την οποία ήδη είχε χρησιμοποιήσει ο Zalba στην προηγούμενη εφαρμογή. Η τεχνική της χρήσης ενός συνθετικού από γραφίτη είχε τα πλεονεκτήματα ότι η ανισοτροπία του γραφίτη επιτρέπει να επικεντρώνεται η μεταφορά θερμότητας στο σημείο ενδιαφέροντος, δεν καταλαμβάνεται επιπλέον χώρος, άρα η ενεργειακή πυκνότητα του PCM παραμένει πολύ υψηλή, δεν υπάρχουν προβλήματα διάβρωσης και τέλος τέτοιου είδους συνθετικά είναι εμπορικά διαθέσιμα. Η απεικόνιση αυτών των σύνθετων πλακών δίνεται παρακάτω.



Σχήμα 3.16: Διάταξη του PCM και του γραφίτη, όπως προτάθηκε από τον Marin.

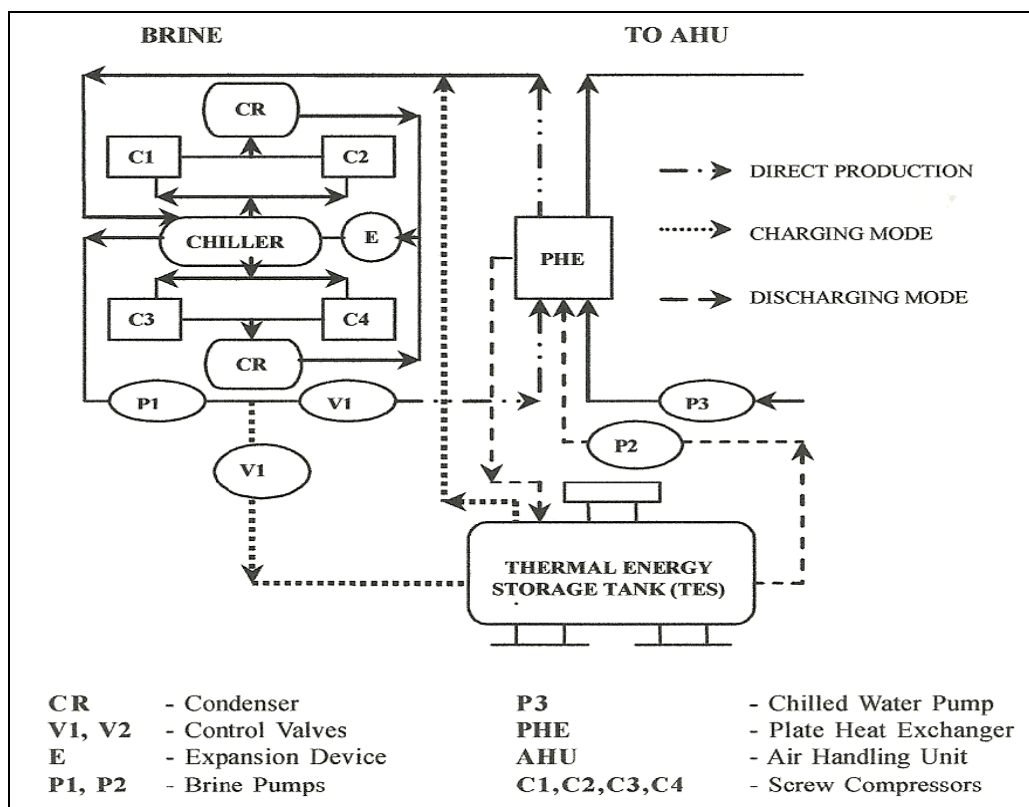
Πραγματοποιήθηκε πλήθος ελεγχών και της απλής διάταξης μόνο με την παραφίνη και της σύνθετης διάταξης με την παραφίνη και το γραφίτη. Είναι δεδομένο ότι η παραφίνη αποδείχτηκε επαρκής για την εξοικονόμηση ενέργειας για το θερμοκρασιακό εύρος που μελετήθηκε στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Αλλά η δεύτερη επιλογή με το συνδυασμό παραφίνης-γραφίτη είχε κάποια εμφανή πλεονεκτήματα.

Διαπιστώθηκε ότι για τον ίδιο χρόνο απόκρισης του PCM, το πάχος των PCM μπορούσε να είναι 70% μεγαλύτερο, στοιχείο που σημαίνει μειωμένο κόστος, ενώ η κατανάλωση ισχύος από τους ανεμιστήρες μειώθηκε κατά 50%. Όταν μελετήθηκε ίδιο πάχος πλακών, ο χρόνος απόκρισης μειώθηκε κατά 50% και μάλιστα με πολύ μικρή μείωση της αποθηκευόμενης ενέργειας (περίπου 12-20%).

3.1.2.2 PCM σε συστήματα κλιματισμού [9-15]

Έχει ήδη γίνει κατανοητή η δυναμική της χρήσης των PCM σε συστήματα θέρμανσης, αερισμού και κλιματισμού (Heating Ventilating Air-Conditioning systems). Μετά από την τεχνική της ελεύθερης ψύξης, γίνεται μία αναφορά για τη χρήση των PCM στα ήδη υπάρχοντα συστήματα κλιματισμού με κύριο σκοπό την μετατόπιση των αιχμών φορτίου. Εδώ, αναφέρονται οι γενικές εφαρμογές ενσωμάτωσης, αφού οι περισσότερες από αυτές που υπάρχουν στη βιβλιογραφία αφορούν ενσωμάτωση σε δομικά στοιχεία των κτιρίων, οπότε παρατίθενται σε επόμενο κεφάλαιο.

Ο Velraj και οι συνεργάτες του, παρουσίασαν μία ολοκληρωμένη μελέτη σχετικά με μία μονάδα αποθήκευσης ψυκτικής ενέργειας βασισμένη στα PCM (Cool Thermal Energy Storage-CTES), ενσωματωμένη σε ένα σύστημα κλιματισμού στο Tidel Park στην Ινδία. Το Tidel Park είναι ένα συγκρότημα γραφείων λογισμικού, το οποίο είναι το μεγαλύτερο στη νότια Ασία και το τρίτο μεγαλύτερο στον κόσμο.

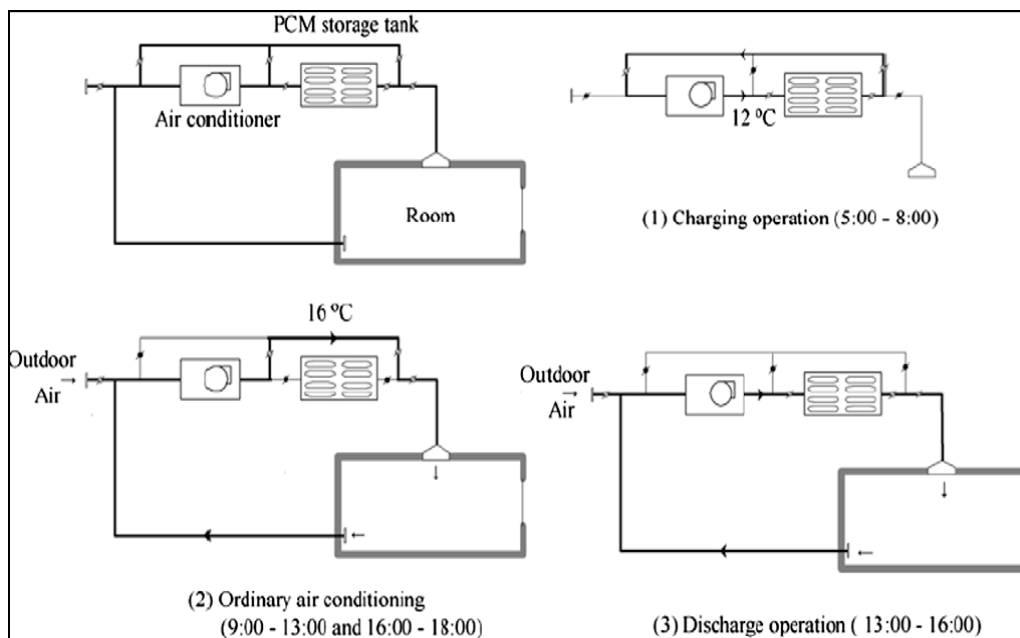


Σχήμα 3.17: Διάταξη του συστήματος κλιματισμού, όπως προτάθηκε από τον Velraj.

Αυτή η μελέτη πραγματοποιήθηκε στην υπάρχουσα αποθήκευση ψύξης βασισμένη στα PCM, η οποία είναι 302,4MJ-24000TRH, ενσωματωμένη σε ένα σύστημα ψυκτών 10500kW.H συνολική εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος CTES παρέχεται από τέσσερις δεξαμενές αποθήκευσης ψυκτικής ενέργειας, η κάθε μία χωρητικότητας 6000TRH, οι οποίες είναι συνδεδεμένες παράλληλα με τρεις επίπεδους εναλλάκτες θερμότητας. Ο επίπεδος εναλλάκτης δέχεται το υγρό που μεταφέρει ψυκτική ενέργεια από το συνδυασμό του συστήματος των ψυκτών-CTES και στη συνέχεια μεταφέρει αυτήν την ενέργεια στο ψυχόμενο νερό, το οποίο με τη σειρά του μεταφέρει την ενέργεια στον αέρα στη μονάδα χειρισμού αέρα (Air Handling Unit-AHU).

Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι καταρχήν ότι η αιχμή ζήτησης ψυκτικού φορτίου μπορεί να μειωθεί. Στην προκειμένη περίπτωση η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των 240000TRH μείωσε την απαίτηση εγκατάστασης αερόψυκτου συστήματος κλιματισμού συμπίεσης ατμών από τα 6000TR σε 3000TR. Αυτό σημαίνει μείωση στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας κατά 4000kVA, άρα και μείωση στο κόστος λειτουργίας της συγκεκριμένης μονάδας. Επίσης, μπορεί να αξιοποιηθεί η διαφορά στην κοστολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με την ώρα. Η απόδοση του συστήματος είναι υψηλή όταν λειτουργεί κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών, όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι χαμηλή. Το σύστημα CTES μπορεί να φορτιστεί κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών, ενώ η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να ανακτηθεί κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επιπλέον, είναι δυνατή η λειτουργία κάτω από συνθήκες πλήρους φορτίου, άρα η αποδοτικότητα μπορεί να είναι μέγιστη.

Ένα σύστημα παροχής αέρα με PCM σε αγωγούς αέρα προτάθηκε από τους Yamaha και Misaki για εξομάλυνση των αιχμών φορτίου.



Σχήμα 3.18: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος HVAC (heating ventilating air-conditioning), όπως προτάθηκε από τους Yamaha και Misaki.

Όπως φαίνεται και από το σχήμα που δίνεται παραπάνω, κατά τη διαδικασία της φόρτισης ο αέρας κυλούσε μέσα από το κλειστό δίκτυο της δεξαμενής με το PCM και του κλιματιστικού μηχανήματος ταυτόχρονα. Μετά τη διαδικασία της φόρτισης, ήταν σειρά της κυρίως κλιματιστικής λειτουργίας, κατά τη διάρκεια της οποίας ο αέρας θεωρήθηκε ότι παρακάμπτει τη δεξαμενή με το PCM. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αποφόρτισης, ο αέρας κυλούσε μέσα από τη δεξαμενή με το PCM προς το κλιματιζόμενο χώρο.

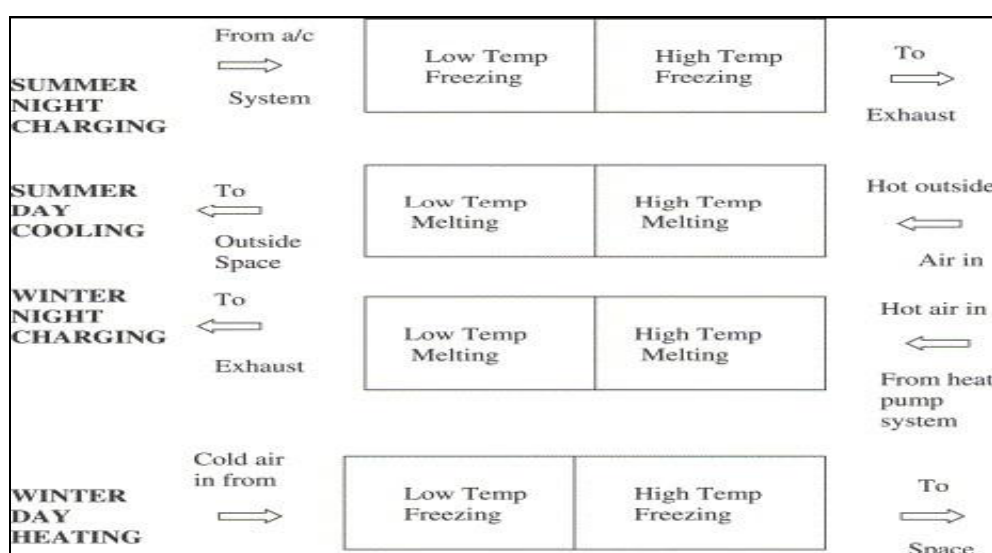
Η μελέτη προσομοίωσης, η οποία βασίστηκε σε έναν όροφο ενός κτιρίου γραφείων στην Ιαπωνία, απέδειξε ότι η χρήση 400kg PCM για μία επιφάνεια 73,8m², ήταν ικανή για να διατηρήσει σταθερή εσωτερική θερμοκρασία χωρίς τη χρήση καμίας άλλης βοηθητικής πηγής παροχής ψύξης σε μία ζεστή καλοκαιρινή ημέρα. Η κατάλληλη θερμοκρασία τήξης του συστήματος ήταν 19°C.

3.1.3. PCM σε συνδυασμένα συστήματα θέρμανσης και ψύξης [9]

Το Κέντρο Ανανεώσιμης Ενέργειας (ΚΑΕ) του Πανεπιστημίου της Νότιας Αυστραλίας πραγματοποίησε μία μελέτη με PCM στα μέσα του 1990, για την ανάπτυξη μίας μονάδας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για θέρμανση και για ψύξη. Το σύστημα για νυχτερινή φόρτιση και χρήση του φορτίου την ημέρα και στις δύο περιόδους της ανάγκης θέρμανσης και της ανάγκης ψύξης, περιλάμβανε δύο διαφορετικά PCM ενσωματωμένα σε ένα σύστημα αντλιών θερμότητας αντίστροφου ψυκτικού κύκλου, το οποίο χρησιμοποιούσε ισχύ εκτός των περιόδων αιχμής. Όταν ο αέρας κυκλοφορεί στο

σύστημα υφίσταται μία διαδικασία θέρμανσης ή ψύξης δύο σταδίων. Αρχικά διέρχεται μέσα από το ένα PCM και στη συνέχεια μέσα από το άλλο.

Το σημείο τήξης-στερεοποίησης του πρώτου PCM είναι κάτω από τη θερμοκρασία θερμικής άνεσης, ενώ το σημείο τήξης-στερεοποίησης του δεύτερου υλικού είναι πάνω από τη θερμοκρασία θερμικής άνεσης. Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η ροή του αέρα καθορίζεται ώστε το σύστημα να αποθηκεύει θερμότητα κατά τη διάρκεια της νύχτας (μέσα από τη διαδικασία τήξης και των δύο υλικών) και να απελευθερώνει τη θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας (μέσω της στερεοποίησης) σε μία θερμοκρασία πάνω από τις συνθήκες θερμικής άνεσης. Κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, η κατεύθυνση του αέρα αντιστρέφεται και το σύστημα αποθηκεύει ψυκτική ενέργεια κατά τη διάρκεια της νύχτας και απελευθερώνει αυτόν τον ψυχρό αέρα κατά τη διάρκεια της ημέρας σε μία θερμοκρασία κάτω από τις συνθήκες θερμικής άνεσης.



Σχήμα 3.19: Αναπαράσταση των διαδικασιών φόρτισης και αποφόρτισης στις περιόδους θέρμανσης και ψύξης.

Τα αποτελέσματα της χρήσης αυτού του συστήματος, με τα δύο διαφορετικά PCM, έδειξαν ότι μπορεί να επιτευχθεί μείωση της απαιτούμενης χωρητικότητας και του αρχικού κόστους του συστήματος κλιματισμού για ένα κατοικήσιμο σπίτι. Επίσης, αυτό το σύστημα μπορεί να μετατοπίσει μία ποσότητα των φορτίων θέρμανσης και ψύξης σε περιόδους εκτός των αιχμών των φορτίων, όπου το κόστος της ηλεκτρικής ισχύος είναι μειωμένο. Οι υπολογισμοί για ένα τυπικό σπίτι στην Αδελαΐδα, έδειξαν ότι το σύστημα αποθήκευσης που αποτελείται από 100kg ενός PCM με σημείο τήξης τους 29°C και από 80kg ενός PCM με σημείο τήξης τους 18°C, μείωσε το ονομαστικό βαθμό απαιτούμενου κλιματισμού έως και 50% του συνολικού φορτίου. Επίσης, το ετήσιο κόστος ηλεκτρισμού μειώθηκε για 32%, εξαιτίας της μετατόπισης των φορτίων σε περιόδους μειωμένου τιμολογίου.

3.2 Ηλιακά μαγειρικά σκεύη [26]

Η κατανάλωση ενέργειας στο μαγείρεμα στις αναπτυσσόμενες χώρες είναι ένα σημαντικό στοιχείο της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων εμπορικών και μη εμπορικών ενεργειακών πηγών.

Οι διάφοροι τύποι των ηλιακών σκευών που αναπτύχθηκαν για μαγείρεμα είναι

- (i) τύπου συγκέντρωσης
- (ii) τύπου κουτιού
- (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 αντηλίας.

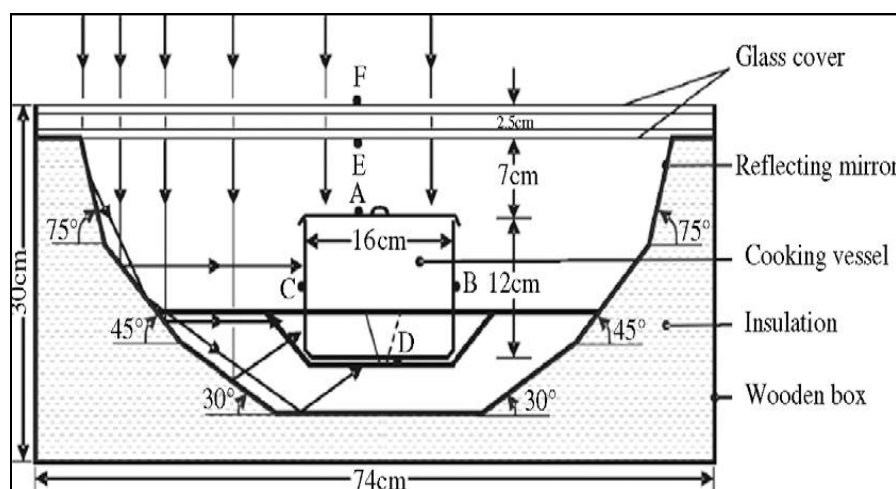
Ηλιακά μαγειρικά σκεύη χρησιμοποιούνται για το μαγείρεμα ρυζιού, λαχανικών, κρέατος, κέικ, κ.λ.π. Όμως, η χρήση αυτών των ηλιακών σκευών είναι περιορισμένη, διότι δεν έχουν καμία αποθήκευση, δηλαδή αυτά τα σκεύη δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μερικώς συννεφιασμένες ημέρες ή / και ημέρες ή αργά τις 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.

Ο Domanski διερεύνησε τη δυνατότητα του μαγειρέματος κατά τη διάρκεια ωρών μη ηλιοφάνειας, χρησιμοποιώντας PCM. Σχεδίασαν το δοχείο μαγειρέματος με αποθήκευση για ώρες χωρίς ηλιοφάνεια ώρες (σχήμα 3.20).

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.

Αναφέρετε 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.

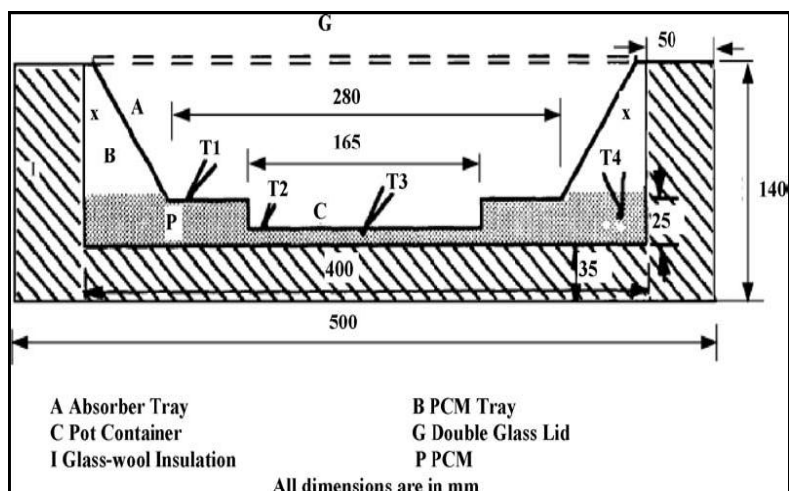


Σχήμα 3.20: Σχηματική απεικόνιση ηλιακού σκεύους από Domanski.

Οι 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 3.21 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 3.21 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 3.21: Σχηματικό διάγραμμα του κουτιού ενός ηλιακού σκεύους με αποθήκευση .

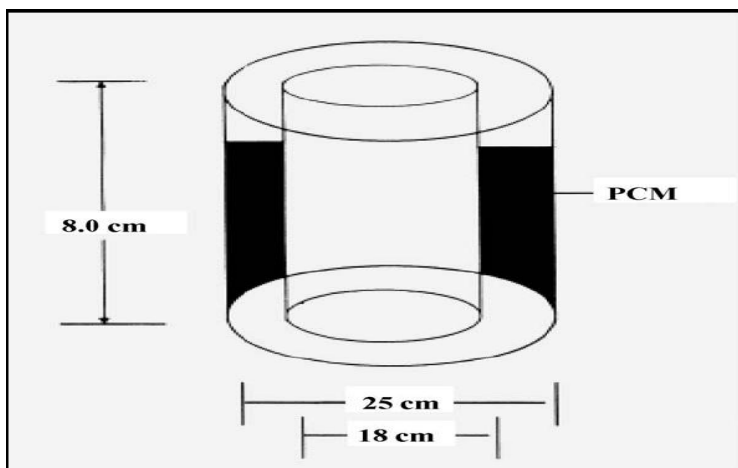
Πειράματα με ηλιακά σκεύη υποδεικνύουν ότι τα τρόφιμα μαγειρεύονται σε θερμοκρασίες μεταξύ 95 και 97°C. Κανένα κατάλληλο και υποσχόμενο PCM, με θερμοκρασία τήξης μεταξύ 95 και 105°C δεν είναι όμως διαθέσιμο στη βιβλιογραφία. Ως εκ τούτου, Sharma χρησιμοποίησε εμπορικά διαθέσιμο ακεταμίδιο (με το σημείο 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 3.22.

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 3.22: Σχηματικό διάγραμμα μονάδας αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας .

Πρόσφατα, ο 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 ερυθριτόλη.

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 [27-29]

Στα φωτοβολταϊκά πλαίσια τα οποία έχουν ενσωματωθεί σε κτίρια (Building Integrated Photovoltaic systems-BIPVs) είναι αναγνωρισμένα ως η καλύτερη εφαρμογή της φωτοβολταϊκής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό διότι εκτός από την παραγωγή ενέργειας, τα BIPVs μπορούν να αντικαταστήσουν κάποια από τα υλικά στέγασης και εσωτερικής επένδυσης, μειώνοντας έτσι το καθαρό κόστος των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα στα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι ότι οι αυξημένες θερμοκρασίες λειτουργίας, που συχνά εμφανίζονται, μειώνουν την ικανότητά τους για μετατροπή της ηλιακής ενέργειας. Το ποσοστό μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι μόνο 16%, ενώ η υπόλοιπη ηλιοφάνεια η οποία απορροφάται από ένα τέτοιο σύστημα μετατρέπεται σε θερμότητα. Έχει γίνει αρκετή έρευνα ως προς το πώς η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει την παραγωγή ενέργειας των κελιών του πλαισίου, αλλά ελάχιστη έρευνα για το πώς θα μπορούσε να ελέγχεται αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας.

Τα PCM, όπως είναι γνωστό, μπορούν να απορροφήσουν μεγάλα ποσά ενέργειας κατά τη διάρκεια αλλαγής φάσης, γι' αυτό και μελετώνται ως κατάλληλα για θερμική αποθήκευση. Έχει μελετηθεί, λοιπόν, από τον M.J.Huang και την ομάδα του το 2006, ένα σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί PCM για να απορροφήσει ενέργεια ως λανθάνουσα θερμότητα σε μία σταθερή θερμοκρασία αλλαγής φάσης και να ομαλοποιήσει την αύξηση της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Σε αυτές τις μελέτες χρησιμοποιήθηκαν PCMs που ήταν βασισμένα στο κερί παραφίνης, με διαφορετικά είδη αλλαγής φάσης (στερεού-υγρού και στερεού-στερεού) για να καθοριστούν οι βέλτιστες ιδιότητες της ομαλοποίησης της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Χρησιμοποιώντας το σύνθετο σύστημα PV/PCM με ένα απλό PCM RT25 η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού μπορούσε να φτάσει τους 38°C κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, η οποία ήταν 18°C λιγότερο από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς με τις ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος. Διαπιστώθηκε, όμως, ότι η θερμική αγωγιμότητα του PCM και η διαστολή του όγκου του κατά τη διάρκεια της τήξης, ήταν τα βασικά εμπόδια για αυτήν την εφαρμογή.

Επίσης, μία σειρά από μελέτες με ενσωματωμένα πτερύγια στο σύνθετο σύστημα PV/PCM έχουν γίνει πειραματικά. Αν και τα μεταλλικά πτερύγια μπορούν να βελτιώσουν τη μετάδοση θερμότητας στο PV/PCM σύστημα, η περίοδος θερμικής ομαλοποίησης μειώνεται καθώς ο όγκος του PCM αντικαθίσταται από τη μεταλλική μάζα του σύνθετου συστήματος. Επιπλέον, βρέθηκε ότι κατά τη διάρκεια της αποκρυστάλλωσης, η κοιλότητα αέρα η οποία σχηματίζεται μέσα στο PCM, θα μεγαλώσει τη θερμική αντίσταση όταν χρησιμοποιείται για θερμική ομαλοποίηση κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Οι επόμενες μελέτες, από τον Hasan και την ομάδα του το 2010, χρησιμοποίησαν άλλου είδους PCM, όπως ένα ευτηκτικό μείγμα καπρικού και λαυρικού οξέος ή ένα ευτηκτικό καπρικού και παλμιτικού οξέος και ένα εμπορικό μείγμα ένυδρου άλατος και παραφίνης.

Από αυτές τις μελέτες βρέθηκε ότι ειδικά τα ευτηκτικά μείγματα με τη μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα είχαν καλύτερη συμπεριφορά στη θερμική ομαλοποίηση σε σύγκριση με το κερί παραφίνης, για τα σύνθετα συστήματα PV/PCM και για εσωτερικές συνθήκες.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί και η προσπάθεια που έγινε από τον M.J.Huang για χρησιμοποίηση δύο PCM βασισμένα στην παραφίνη, με διαφορετικές θερμοκρασίες αλλαγής φάσης, ώστε να βελτιωθεί η ομαλοποίηση της θερμότητας στο σύστημα PV/PCM και να αυξηθεί η περίοδος της ομαλοποιημένης θερμοκρασίας στο σύστημα. Τα αποτελέσματα ήταν πολύ θετικά ως προς τα δύο αυτά στοιχεία, αλλά και ως προς την αύξηση του ποσοστού μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική και ως προς τη μείωση της διαστολής του όγκου του PCM, σε σχέση μάλιστα και με τις προηγούμενες εφαρμογές.



Σχήμα 3.23: Από αριστερά στέγη σκεπασμένη με λεπτές σανίδες, μεταλλική στέγη με υπέρυθρη-αντανακλαστική επίστρωση και μεταλλική στέγη με PV πάνελ με PCM.

3.4 Ηλεκτρονικά Εξαρτήματα

3.4.1 Συσκευές[30-36]

Η χρήση των PCM στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα έχει δύο διαφορετικούς σκοπούς. Ο πρώτος αφορά κυρίως την αντιμετώπιση της υπερθέρμανσης όλων των σύνθετων ηλεκτρικών συσκευών. Ο δεύτερος σκοπός είναι η χρήση αυτών των υλικών για δημιουργία πρωτοποριακών ηλεκτρονικών μνημών.

Οι φορητές ηλεκτρικές συσκευές, όπως οι φορητοί υπολογιστές, τα κινητά τηλέφωνα, οι προσωπικοί ψηφιακοί κατάλογοι (PDAs), τα mini-laptops και άλλα, έχουν γίνει πολύ δημοφιλή και τείνουν να γίνουν όλο και μικρότερα σε μέγεθος, αλλά εξοπλισμένα με πιο σύνθετα εξαρτήματα και χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα τα κινητά τηλέφωνα πια δεν έχουν μόνο τη δυνατότητα για φωνητικές κλήσεις και για αποστολή σύντομων

μηνυμάτων, αλλά μπορούν να χρησιμεύσουν για φωτογραφίες και βίντεο, για αναπαραγωγή μουσικής και για αναζήτηση στο διαδίκτυο. Αυτές οι προσθήκες στο κινητό τηλέφωνο, αλλά και σε όλες τις υπόλοιπες συσκευές έχουν οδηγήσει σε υψηλότερη κατανάλωση ισχύος και σε μεγαλύτερη ποσότητα παραγόμενης ενέργειας, ενώ οι μικρότερες διαστάσεις έχουν μειώσει την επιφάνεια μεταφοράς και απαγωγής θερμότητας.

Ο θερμικός έλεγχος των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων βασίζεται στο σωστό συνδυασμό των υλικών και των τεχνικών μεταφοράς θερμότητας, ώστε να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία των εξαρτημάτων σε ένα αποδεκτό επίπεδο. Για παράδειγμα, η αποτελεσματική ψύξη απαιτείται στους φορητούς υπολογιστές, ώστε να απομακρυνθεί η θερμότητα απαγωγής από αυτούς κατά την επαφή τους με το δέρμα του χρήστη. Η συμβατική εξαναγκασμένη συναγωγή είναι μία τεχνική ψύξης αρκετά γνωστή. Η εξαναγκασμένη συναγωγή, η οποία χρησιμοποιεί ανεμιστήρες, μπορεί να ενισχύσει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του θερμαινόμενου ηλεκτρονικού εξαρτήματος και του εξωτερικού αέρα. Όμως, αυτή η τεχνική δεν είναι κατάλληλη για τα καινούρια εξαρτήματα, κυρίως λόγω του κόστους, του μεγέθους, της κατανάλωσης ενέργειας, της αξιοπιστίας, του βάρους, του θορύβου και της αισθητικής.

Μία εναλλακτική μέθοδος ψύξης, η οποία είναι πολύ απλή, είναι η χρήση ενός οργανικού υλικού αλλαγής φάσης (το οποίο πραγματοποιεί αλλαγή φάσης στερεού σε υγρό και αντίστροφα). Η θερμότητα που απάγεται από τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα μπορεί να αποθηκευτεί αποτελεσματικά σε μία ψύκτρα PCM, ενώ το PCM αλλάζει φάση από στερεό σε υγρό. Η ψύκτρα PCM μπορεί να παραχθεί με μία απλή σύνθεση ενός PCM ενσωματωμένο σε μικροκάψουλες μέσα σε ένα λεπτό μέταλλο. Το λιωμένο PCM μπορεί να επαναστερεοποιηθεί απάγοντας τη θερμότητα στο περιβάλλοντα χώρο, όταν η ηλεκτρονική συσκευή είναι ανενεργή. Εφόσον η αλλαγή φάσης συμβαίνει σε μία ομοιόμορφη θερμοκρασία τήξης του PCM, η θερμοκρασία της συσκευής μπορεί να διατηρηθεί μέχρι την ολοκληρωμένη τήξη του PCM.

Η διαδικασία ψύξης με τη χρήση PCM μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις φάσεις. Στην 1η πρώτη φάση, η θερμότητα από την ηλεκτρονική συσκευή απορροφάται, ώστε σταδιακά να αυξήσει τη θερμοκρασία του στερεού PCM μέχρι το σημείο τήξης. Στην 2η φάση, το PCM ξεκινά να τήκεται σε μία σταθερή θερμοκρασία. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης θερμότητα απορροφάται χωρίς να επιφέρεται καμία μεταβολή στη θερμοκρασία, ενώ μπορεί να υπάρξει μία μικρή μεταβολή όγκου κατά τη διάρκεια της μεταβολής από τη στερεή στην υγρή φάση. Στην 3η φάση, το στερεό PCM έχει λιώσει εντελώς. Κατά συνέπεια, η θερμοκρασία του λιωμένου PCM θα αυξηθεί αν συνεχίσει η παροχή θερμότητας.

Με τη χρήση PCM, η θερμότητα μπορεί να αφαιρεθεί από τα ζεστά συστατικά και να χρησιμοποιηθεί για να λιώσει το υλικό. Αν και το PCM μπορεί να απορροφήσει μεγάλα ποσά ενέργειας κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, η αποτελεσματικότητά του μπορεί να περιοριστεί στην περίοδο αλλαγής φάσης από στερεό σε τελείως υγρό. Ως εκ τούτου, η διάρκεια λειτουργίας και ο παράγοντας χρήσης της ηλεκτρονικής συσκευής θα επηρεαστεί από αυτή τη τεχνική ψύξης.

Από διάφορες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στα κινητά τηλέφωνα, έχει προκύψει ότι η ενσωμάτωση ενός τέτοιου συστήματος με PCM, μπορεί να σταθεροποιήσει τη θερμοκρασία του κινητού τηλεφώνου για μία μεγαλύτερη περίοδο και να παρατείνει τη χρήση του. Χωρίς το PCM η θερμοκρασία του κινητού τηλεφώνου μπορούσε να ξεπεράσει τους 45oC, γεγονός που θα μπορούσε να προκαλέσει δυσφορία στο χρήστη.

Ένα υψηλότερο επίπεδο ισχύος μειώνει το χρόνο που δίνεται για τήξη του PCM και οδηγεί σε ένα υψηλότερο μέγιστο της θερμοκρασίας της συσκευής. Αυτός ο παράγοντας είναι σημαντικός, καθώς το επίπεδο ισχύος για τα μελλοντικά κινητά τηλέφωνα αναμένεται να αυξηθεί με τις πρόσθετες λειτουργίες. Γι' αυτό και εκτός από τη καινοτομία με το PCM, προτάθηκε να προστεθούν εσωτερικά πτερύγια στη ψύκτρα, αφού διαπιστώθηκε ότι βοηθούν στο να μειωθεί το μέγιστο της θερμοκρασίας της συσκευής. Βέβαια, τα ευρήματα των ερευνών έδειξαν ότι η επαναστεροποίηση του PCM παραμένει προβληματική και απαιτεί περαιτέρω έρευνα, αφού ο χρόνος που απαιτείται είναι μεγαλύτερος από το χρόνο που απαιτείται για την τήξη.



Σχήμα 3.24: Στο πρώτο τηλέφωνο από την Samsung με ηλιακές μπαταρίες και θήκη που περιέχει PCM.

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 3.25: iXoft - επίθεμα ψύξης για φορητό υπολογιστή χωρίς ανεμιστήρα που κατασκευάζεται από τη Thermaltake .

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, Leonī 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 3.26 Υλικά διεπαφής αλλαγής φάσης υψηλής απόδοσης από Loctite (αριστερή εικόνα) , υλικά αλλαγής φάσης που συνδυάζουν θερμική απόδοση όπως το γράσο και ευκολία χειρισμού και εγκατάστασης όπως το επίθεμα (μεσαία εικόνα) και PCMs που δένουν σε μικροεπεξεργαστές, κρυφά τσιπ, ηλεκτρονόμους, και ανορθωτές σε επιτραπέζιους και φορητούς υπολογιστές, τηλεπικοινωνίες, δίκτυα και βιομηχανικά εργαλεία (δεξιά εικόνα) .

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

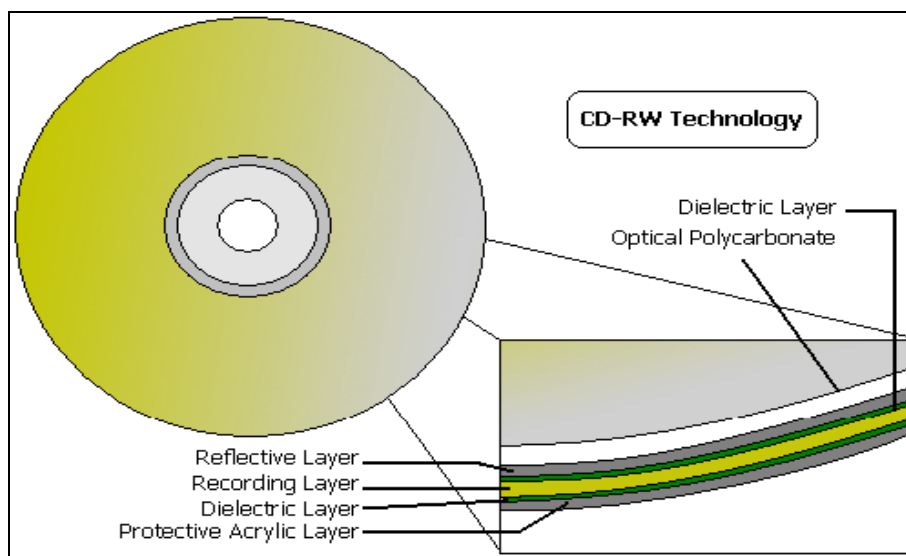
θερμική αγωγιμότητα τώρα είναι μια συνάρτηση του τύπου και του όγκου του υλικού πληρώσεως και κυμαίνεται από περίπου 0,5 έως 1,9 W/mK. Υψηλότερη αγωγιμότητα αυξάνει τη ροή θερμότητας.

3.4.2 Τεχνολογία μνήμης [39-41]

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 3.8) 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 3.27: Διάρθρωση των στρωμάτων στην τεχνολογία CD – RW

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 εγγράψιμο 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 [43-45]

Οι εξοπλισμοί του παγκόσμιου συστήματος κινητών επικοινωνιών ή τηλεπικοινωνιών, GSM ή UMTS, που τοποθετούνται σε ένα κανονικής βάσης καταφύγιο τηλεπικοινωνιών ή σε ηλεκτρονικό περίβλημα παράγουν 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 3.28: Εφεδρεία AC για καταφύγιο τηλεπικοινωνιών σε σωλήνες αλουμινίου (αριστερή εικόνα), εγκατεστημένο PCM σε καταφύγιο τηλεπικοινωνιών για εφεδρεία AC στους 29°C (δεξιά εικόνα)

Οι 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 3.29) 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 3.29: Jacket μπαταρίας για εξωτερικό καταφύγιο τηλεπικοινωνιών .

3.5 Οχήματα

3.5.1 Ψύξη κινητήρων [47]

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, έχειδειχθεί 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.

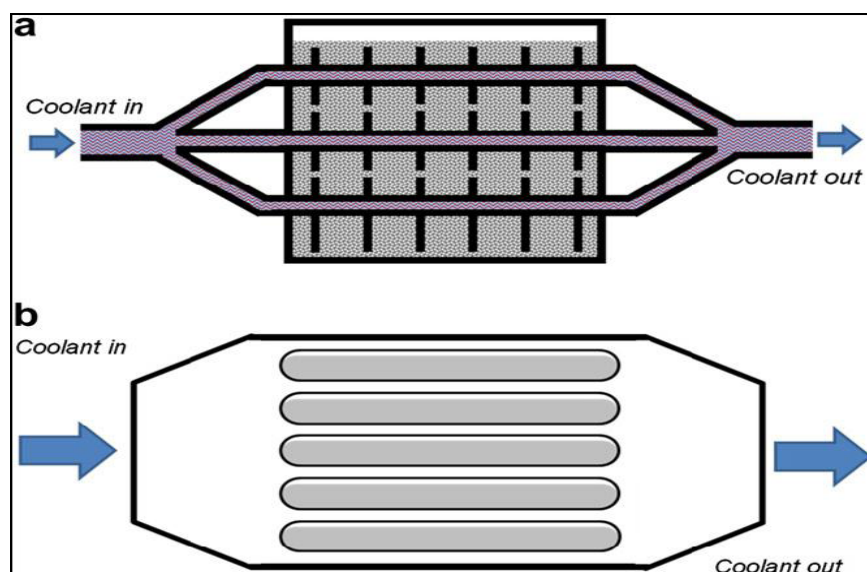
Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα χρήσης του PCM για ψύξη αυτοκινήτων είναι η εξάλειψη της μεγάλης απόκλισης της θερμοκρασίας του ψυκτικού υγρού κατά τη διάρκεια οδήγησης υπό διάφορες ταχύτητες του κινητήρα και συνθήκες φορτίου, μετριάζοντας τα φορτία αιχμής θερμότητας στο σύστημα ψύξης. Δεδομένου ότι η τυπική 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 PCMs 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 3.30. 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 3.30: Δύο διαφορετικοί τύποι αποθήκευσης του PCM (a) Τύπος θερμοσυσσωρευτή εξωτερικής διάταξης (b) Τύπος θερμοσυσσωρευτή ενσωμάτωσης σε κάψουλες .

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 [48-50]

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 [51,52]

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 μετατροπείς 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

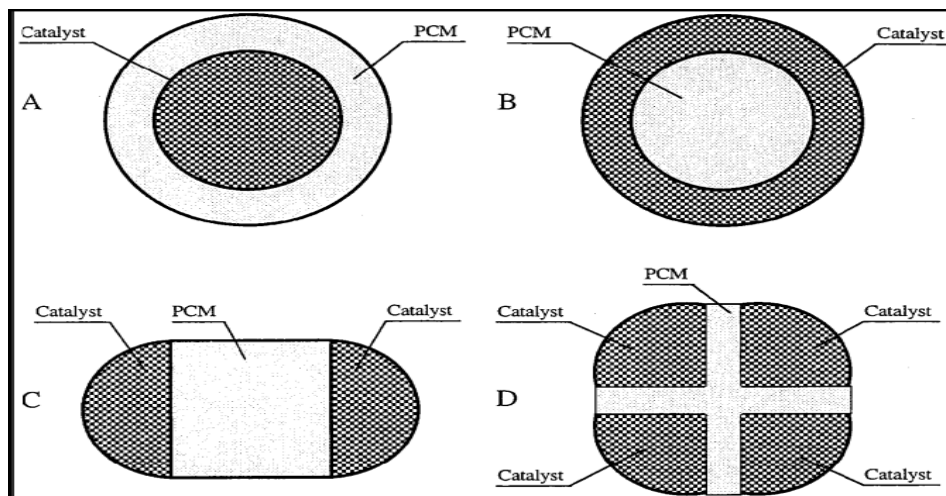
θερμοκρασία λειτουργίας, ένας καταλύτης δεν είναι πλήρως αποτελεσματικός σε θερμοκρασίες κάτω από τους 250°C για το CO και 250 - 340°C για εκπομπές HC. Ως εκ τούτου, το σύστημα γίνεται αποτελεσματικό μετά από 1 με 2 λεπτά, όταν η θερμοκρασία λειτουργίας επιτυγχάνεται. Σε κρύα εκκίνηση, το μείγμα καυσίμων 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 3.31. Η διαμόρφωση Α 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 Β). 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.

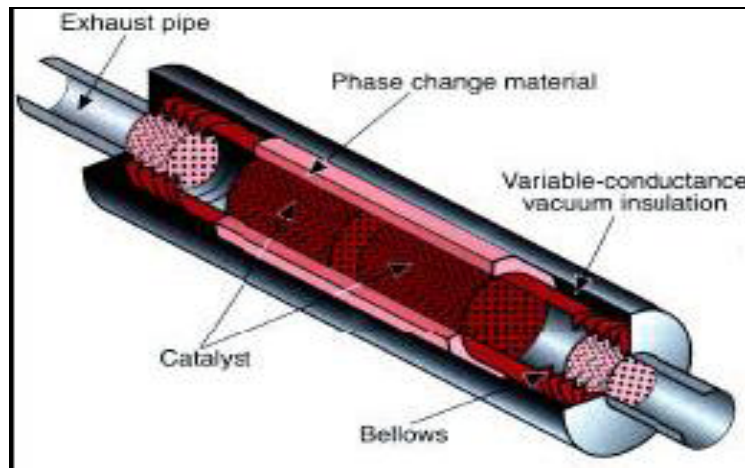


Σχήμα 3.31: Πιθανές διαμορφώσεις της συναρμολόγησης καταλύτη και PCM.

Οι 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 3.32) 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 3.32: NREL καταλυτικός μετατροπέας, που παρουσιάστηκε από τον Burch και τους συνεργάτες του, (1995) .

3.5.4 Μονάδες μπαταρίας ηλεκτρικών οχημάτων [55]

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.

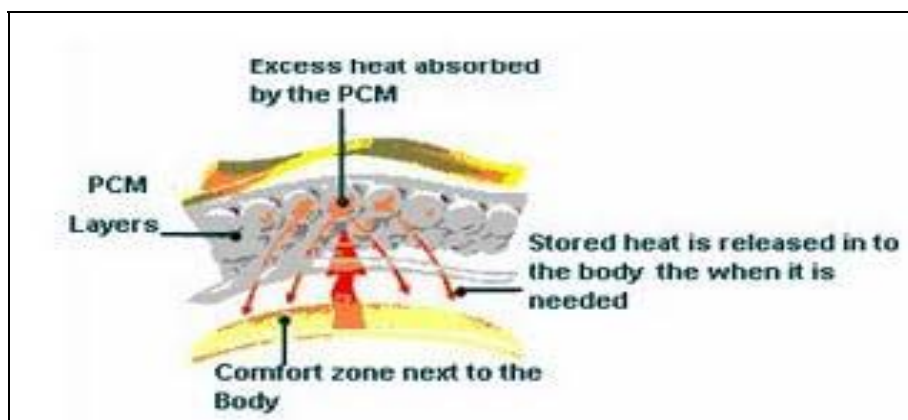
Με την ικανότητα αποθήκευσης λαθάνουσας ενέργειας και τη σταθερότητα ελεγχόμενης θερμοκρασίας, τα PCMs αποδεικνύονται κατάλληλα για τη θερμική διαχείριση σε EVs, ιδίως για τη μείωση των υψηλών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της διακοπτόμενης αποφόρτισης. Με την αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε PCMs μπορούν 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 [56-60]

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

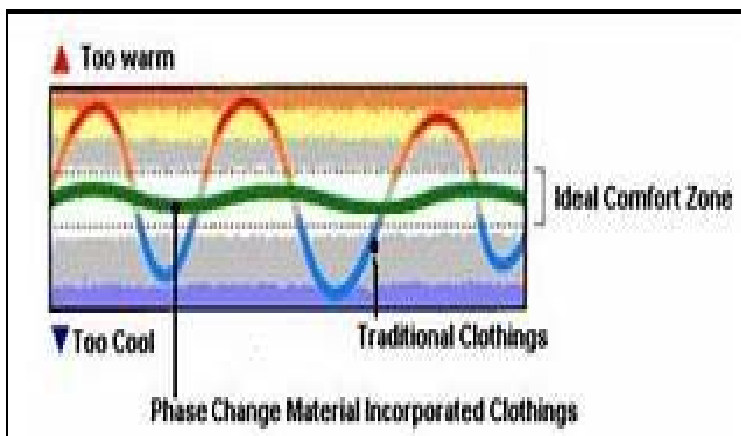
Η εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης (PCMs) σε προϊόντα κλωστοϋφαντουργίας (σχήμα 3.33) παρέχει παράλληλα με την παθητική επίδραση της θερμομόνωσης μια ενεργητική θερμομόνωση, η οποία ελέγχει τη ροή θερμότητας μέσα από τα ρούχα και προσαρμόζει τη ροή θερμότητας σε διαφορετικές οριακές συνθήκες. Η επίδραση 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 3.33: Περιγραφή της δράσης ενσωματωμένου PCM σε ρούχα.

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 3.34). 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 3.34: Η επίδραση της ρύθμισης θερμότητας των ειδών ένδυσης με PCM ενσωματωμένο έναντι των συμβατικών ενδυμάτων.

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 φθινό 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.

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

3.6.1 Διαστημικές στολές [59]

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 [57]

Μια εφαρμογή όπου ενσωμάτωση σε μακροκάπουλες PCM εφαρμόζεται σε ρούχα είναι ένα γιλέκο ψύξης, που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Climator AB. Το γιλέκο ψύξης έχει αναπτυχθεί για να δροσίζει 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 3.35 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 3.35: Γιλέκο ψύξης για να δροσίσει το σώμα των ανθρώπων που εργάζονται σε θερμά περιβάλλοντα ή κάτω από ακραία σωματική άσκηση από Climator AB .

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 [57,61,62,64]

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 3.36 β 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 οF 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 παντελόνι 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. TM

Προκειμένου τώρα τα πόδια να διατηρούνται δροσερά, στεγνά και άνετα καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας τα PCMs εφαρμόζονται και σε κάλτσες (σχήμα 3.36α). 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.



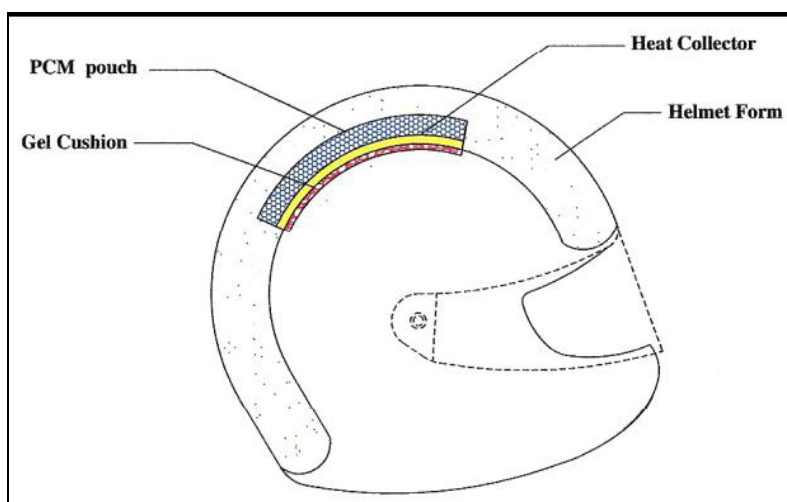
Σχήμα 3.36: (α) Κάλτσα με PCM από Outlast (β) Πλεκτή μπλούζα με PCM από Outlast (γ) Μπουφάν του σκι που παράγεται από Colmar χρησιμοποιώντας Schoeller®-PCM (δ) Λειτουργικό εσώρουχο παντελόνι με PCM της BMW .

3.6.4 Αξεσουάρ ένδυσης [65-67]

Τα κράνη μοτοσυκλετιστών 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 3.37. 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 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.



Σχήμα 3.37: Σχηματικό διάγραμμα ενός κράνους ψύξης με PCM .

Εκτός από το κράνος μοτοσυκλετών μια ακόμη εφαρμογή των PCMs είναι σε γάντια μοτοσυκλετιστών. 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 3.38 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 3.38: Ψύκτης κράνους αλλαγής φάσης HS3038.

3.6.5 Υποδήματα [57,59]

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 κρύα σημεία όταν τα πόδια αρχίζουν και παγώνουν. Αυτό έχει σα συνέπεια τη δημιουργία ενός άνετου περιβάλλοντος για τα πόδια.

3.6.6 Αγωγή υφάσματα [56,59]

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 μοτοσυκλετιστών, 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 αγωγίων 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 ύφασμα μπορεί να αυξήσει σημαντικά τις θερμοκρασίες των διαφόρων στρώματων 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.

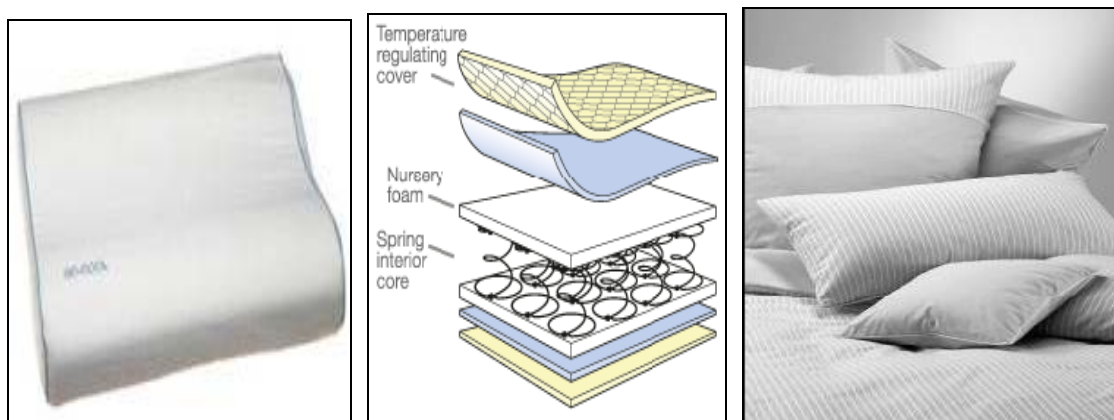
3.6.7 Κλινοσκεπάσματα και αξεσουάρ [57,59,68,69]

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 ζέστη, 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 μικροκάβουλες 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 3.39α), 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 3.39β 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 3.39γ δείχνει ένα παράδειγμα όπου PCM είναι ενσωματωμένο σε παπλώματα.



Σχήμα 3.39: (α) Αξεσουάρ IsoCool για ενίσχυση της ξεκούρασης (β) Στρώμα εξαιρετικής ισορροπίας για άνετο ύπνο από Mamas & Papas (γ) Παπλώματα που παράγονται από Brennet (εικόνα: Outlast)

3.7 Ιατρικές εφαρμογές [59,70,73]

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 3.40), ως μια άλλη ιατρική εφαρμογή χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση του τοπικού πόνου.



Σχήμα 3.40: (α) Ζεστό μαξιλαράκι για ιατρικούς σκοπούς, από Rubitherm® (β) Rubitherm® κρύο προϊόν για θεραπεία ψύξης

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 υποκύπτουν 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 κρυνώνει 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 κόλλα 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.

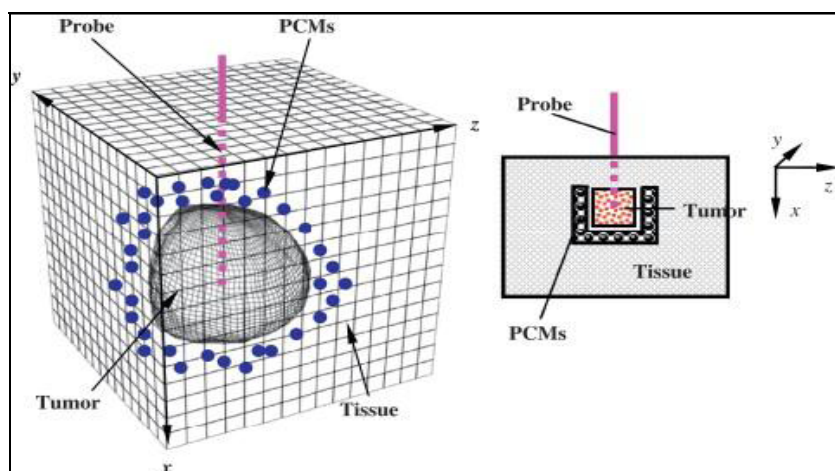
Με τη συμβολή τότε του Gerald Fuller βρέθηκε ένα θερμο-αναστρέψιμο πολυμερές, Poloxamer 407, που είχε ήδη εγκριθεί από το FDA για ιατρική χρήση. Δουλεύοντας με υλικά, η ομάδα επιστημόνων του Stanford University Medical Center βρήκε τον τρόπο να τροποποιήσει το πολυμερές έτσι ώστε να γίνεται στερεό και 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 μικροκάψουλών 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.
- (3) ενσωμάτωσης των PCMs στον υγιή ιστό, έτσι ώστε να μην μπορεί να επιταχυνθεί η μετάσταση των όγκων των κυττάρων.



Σχήμα 3.41: Σκίτσο της θερμικής προστασίας με μικροκάψουλες αλλαγής φάσης νανοσωματιδίων σε βιολογικό ιστό ενσωματωμένο με έναν όγκο κατά τη διάρκεια της κρυοχειρουργικής .

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 [75]

Η εφαρμογή των PCMs σε δοχεία μεταφοράς 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 αντικείμενου 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 περιβάλλον 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 αντικείμενου 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 κρυσταλλώνει 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 Κιβώτια και δοχεία πολλαπλών χρήσεων [74-77]

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 3.42α.

Ορισμένες εταιρείες μόνο εμπορευματοποιούνται μαξιλαράκια PCM (σχήμα 3.42γ) 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 3.42β) (κλιματισμός γίνεται στο ψυγείο) κατά τη μεταφορά.



Σχήμα 3.42: (α) Σκληρό (β) Μαλακό δοχείο από Sofrigam (γ) Exo-Gel υλικό αλλαγής φάσης από TCP/Reliable, Inc για τη διατήρηση μιας ζεστής θερμοκρασίας

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 3.43α 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 3.24γ 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 3.43: Κουτιά μεταφοράς με PCM για διάφορους σκοπούς (α),(β) από την εταιρεία PCM Energy P. Ltd (γ) από τη va-Q-tec AG .

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 3.44α, 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 3.44β) 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.

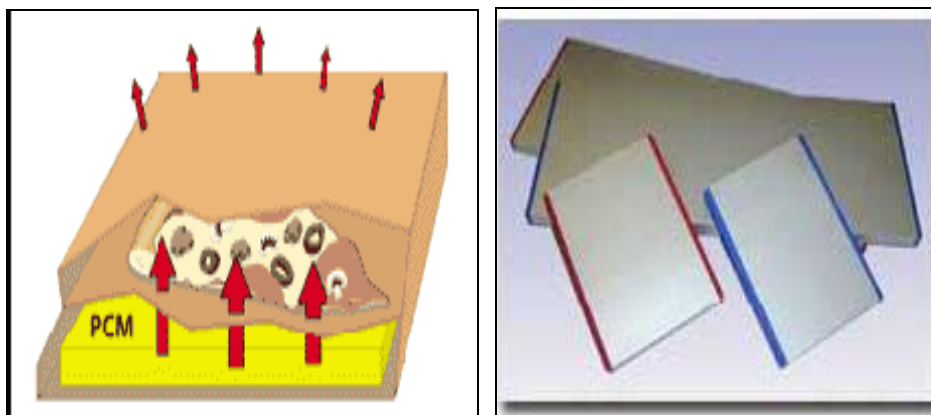


Σχήμα 3.44: (α) Δοχείο μεταφοράς, που μπορεί να διατηρήσει θερμοκρασία -18°C σε θερμοκρασία περιβάλλοντος γύρω στους 20°C για 4 ημέρες από va-Q-tec AG (β) Σύστημα θερμικής διαχείρισης που αναπτύχθηκε από ACME.

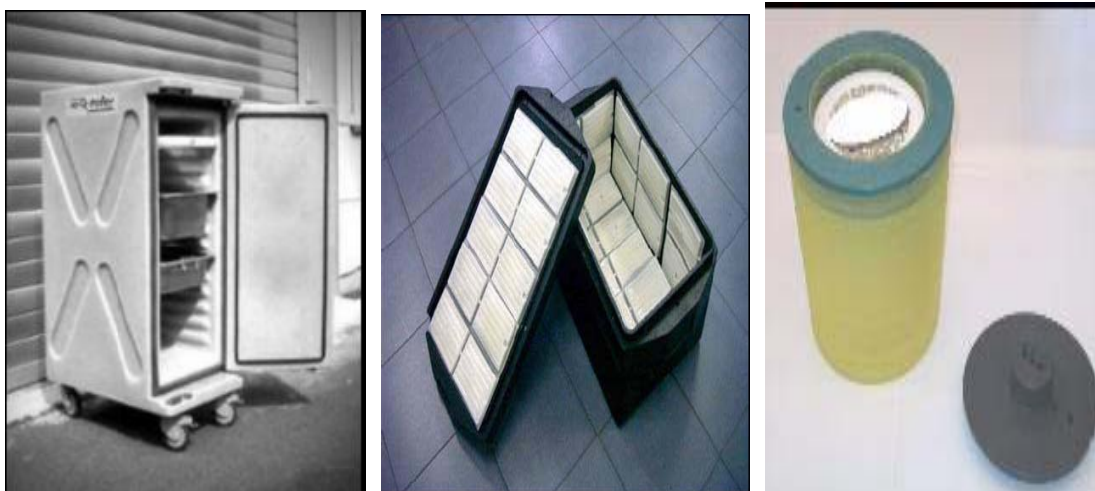
3.8.2 Δοχεία για τρόφιμα και ποτά [74,75]

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 3.45α). 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 3.45β. 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 3.46α), 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 3.46β) για ζεστή μεταφορά τροφίμων σε ελεγχόμενη θερμοκρασία μεταξύ 70°C και 85°C , και ένα δοχείο (σχήμα 3.46γ) για παγωτά, που έχει την ικανότητα να διατηρεί μια θερμοκρασία κάτω των 8°C .



Σχήμα 3.45: (α) Ιδέα εφαρμογών τροφοδοσίας: θερμαντήρας πίτσας (Merck, KGaA) (β) Πλάκες θέρμανσης και ψύξης τροφίμων από Rubitherm Technologies GmbH.



Σχήμα 3.46: (α) Καροτσάκι για τα τρόφιμα από va-Q-tec (β) Δοχείο μεταφοράς ζεστών τροφίμων στο τομέα της τροφοδοσίας (γ) Δοχείο μεταφοράς παγωτού

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 3.47α, είναι μια φιάλη διπλού τοιχώματος όπου το PCM γεμίζει το κενό μεταξύ αυτών των τοιχωμάτων.

Το μπουκάλι (σχήμα 3.47β), 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 3.47γ), παρέχοντας τη δυνατότητα κρύας μπύρας οπουδήποτε χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα.



Σχήμα 3.47: (α) Γενική ιδέα ισοθερμικού μπουκαλιού (β) Ισοθερμικό μπουκάλι νερού από την εταιρεία Sofrigam (γ) CoolKeg®, by Cool-System Bev. GmbH

3.8.3 Ιατρικά προϊόντα [75,78,79]

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 3.48α), 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 3.48β), 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 3.48: (α) 4°C TempShell της εταιρείας delta T (β) Σύστημα μεταφοράς αίματος με αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας χρησιμοποιώντας ένα RUBITHERM PCM (γ) Κουτί μεταφοράς από AB Aircontainer A.C

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 3.29γ. 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^ο Κεφαλαίου

1. Anant Shukla, D.Buddhi, R.L.Sawhney, Solar water heaters with phase change material thermal energy storage medium: A review
2. G.N.Tiwari, S.N.Rai, Sant Ram, Madan Singh, Performance prediction of PCM collection-cum-storage water heater:quasi-steady state solution
3. Y.Rabin, I.Bar-Niv, E.Korin, B.Mikic, Integrated solar collector storage system based on a salt-hydrate phase-change material
4. Suat Canbazoğlu, Abdulluttalip Şahinaslan, Ahmet Ekmekyapar, Ý.Gökhan Aksoy, Fatih Akarsu, Enhancement of solar thermal energy storage performance using sodium thiosulfate pentahydrate of a conventional solar water-heating system
5. J. Prakash, H.P.Garg, G.Datta, A solar water heater with a built-in latent heat storage
6. S.O.Enibe, Performance of a natural circulation solar air heating system with phase change material energy storage
7. W.Saman, F.Bruno, E.Halawa, Thermal performance of PCM thermal storage unit for a roof integrated solar heating system
8. M.Belusko, W.Saman, F.Bruno, Roof integrated solar heating system with glazed collector
9. A.Pasupathy, R.Velraj, R.V.Seeniraj, Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments
10. Atyah Najjar, Afif Hasan, Modeling of greenhouse with PCM energy storage
11. Atul Sharma, V.V.Tyagi, C.R.Chen, D.Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications
12. B.K.Huang, M.Toksoy, Design and analysis of greenhouse solar systems in agricultural production
13. Hüseyin Benli, Aydın Durmus, Performance analysis of a latent heat storage system with phase change material for new designed solar collectors in greenhouse heating
14. Mahmud M. Alkilani, K. Sopian, M.A. Alghoul, M. Sohif, M.H. Ruslan, Review of solar air collectors with thermal storage units

15. Na Zhu, Zhenjun Ma, Shengwei Wang, Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials:A review
16. Uros Stritih, Domen Resnik, Vincenc Butala, Energy conservation opportunities of PCM free cooling system
17. V.Antony Aroul Raj, R.Velraj, Review on free cooling of buildings using phase change materials
18. [Saso Medved, Ciril Arkar, Correlation between the local climate and the free-cooling potential of latent heat storage
19. J.R.Turnpenny, D.W.Etheridge, D.A.Reay, Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings.: Part I: testing and theoretical modelling
20. C.Arkak, S.Medved, Free cooling of a building using PCM heat storage integrated into the ventilation system
21. S.Takeda, K.Nagano, T.Mochida, K.Shimakura, Development of a ventilation system utilizing thermal energy storage for granules containing phase change material
22. Belen Zalba, Jose M.Marin, Luisa F.Cabeza, Harald Mehling, Free-cooling of buildings with phase change materials
23. Jose M.Marin, Belen Zalba, Luisa F.Cabeza, Harald Mehling, Improvement of a thermal energy storage using plates with paraffin-graphite composite
24. Pablo Arce Maldonado: Application of passive thermal energy storage in buildings using PCM and awnings
25. X. Τζιβανίδης: «Σημειώσεις του μαθήματος Θερμική Συμπεριφορά Κτιρίων» Εκδόσεις Ε.Μ.Π. Μάιος 2006
26. Atul Sharma, C.R. Chen, V.V.S. Murty, Anant Shukla: Solar cooker with latent heat storage systems: A review
27. M.J. Huang, P.C. Eames, B. Norton: Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials
28. Ming Jun Huang: The effect of using two PCMs on the thermal regulation performance of BIPV systems
29. Jasper Hendricks: The option of phase change materials as temperature regulation for building integrated photovoltaics
30. F.L. Tan, C.P. Tso: Cooling of mobile electronic devices using phase change materials
31. Esam M. Alawadhi and Cristina H. Amon: PCM Thermal Control Unit for Portable Electronic Devices: Experimental and Numerical Studies
32. F.L. Tan and S.C. Fok: Thermal Management of Mobile Phone using Phase Change Material
33. 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>
34. Thomas Ollila: Selection Criteria for Thermal Interface Materials http://www.chomerics.com/tech/Therm_mgmt_Artels/TIMarticle.PDF
35. Ravi Kandasamy, Xiang-Qi Wang, Arun S. Mujumdar: Application of phase change materials in thermal management of electronics
36. <http://www.cdrinfo.com/Sections/Reviews/Specific.aspx?ArticleId=21623>
37. <http://laptoping.com/thermaltake-ixoft-fanless-notebook-cooling-pad.html>
38. http://www.anglia.com/newsarchive/559.asp?article_id=1347

39. Richard Walters: Writing the Rulebook on Rewritables
http://www.materialsviews.com/details/news/1079289/Writing_the_Rulebook_on_Rewritables.html
40. 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>
41. <http://www.pantherproducts.co.uk/Articles/Storage/optical-media.html>
42. <http://www.tweak3d.net/articles/opticals/2.shtml>
43. 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
44. 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
45. Anthony P. Cosentino: Thermal Management of Telecommunications Batteries using Phase Change Materials (PCM) Jacket TM
46. <http://teappcm.com/products/telecomshelters.htm>
47. 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
48. A. Jamekhorshid, S.M. Sadrameli: Application of Phase Change Materials (PCMs) in Maintaining Comfort Temperature inside an Automobile
49. Aravin Prince: Phase change materials: overview
<http://www.fibre2fashion.com/industry-article/9/884/phase-change-materials-overview3.asp>
50. http://delphi.com/news/pressReleases/pr_2011_04_13_001/
51. 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
52. Aristotel Popescu, Gheorghe Dumitrascu, Bogdan Horbaniuc: Thermal Energy Storage for Autovehicles: Source of Energy and Clean Environment
53. <http://bmwm5a.blogspot.com/2011/07/e39-m5-latent-heat-storage-system.html>
54. 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
55. X. Duan, G.F. Naterer: Heat transfer in phase change materials for thermal management of electric vehicle battery modules
56. 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
57. 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
58. <http://www.fibre2fashion.com/industry-article/9/884/phase-change-materials-overview2.asp>
59. S. Mondal: Phase change materials for smart textiles – An overview
60. <http://smartgarments.blogspot.com/2007/12/intelligence-in-textiles-next-step.html>

61. Kristy Annely: Men's Thermal Underwear
<http://ezinearticles.com/?Mens-Thermal-Underwear&id=410772>
62. <http://gearjunkie.com/everest-gear>
63. <http://www.outlast.com/index.php?id=70&L=0>
64. http://www.sierrabmwonline.com/index.php/bmw-riders-apparel-2011-bmw-functional-underwear-c-169_80
65. F.L. Tan, S.C. Fok: Cooling of helmet with phase change material
66. http://www.tuffrhino.com/Crown_Cooler_p/hs3038.htm
67. http://www.bykebitz.co.uk/acatalog/Revit_Kelvin_H2O_Glove.html
68. <http://www.mamasandpapas.com/cat/mattress-guide-sleepfresh/>
69. <http://fourpastfour.com/2010/06/07/isocool-accessories-enhance-rest/>
70. 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
71. 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/>
72. 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>
73. Yonggang Lv, Yang Zou, Li Yang: Feasibility study for thermal protection by microencapsulated phase change micro/nanoparticles during cryosurgery
74. 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 –
75. 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
76. Phase Change Material Used in Temperature Controlled Packaging & Transport
<http://www.thefreelibrary.com/Phase+Change+Material+Used+in+Temperature+Controlled+Packaging+%26...-a01073963946>
77. <http://www.packagingnetwork.com/product.mvc/Exo-Gel-Phase-Change-Material-0001>
78. <http://www.rubitherm.com/english/index.htm>
79. http://www.deltat.de/english/products/cooling_elements/TempShells.htm

Κεφάλαιο 4

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 περιείχονταν σε μόνωση πριονιδιού για παροχή πάγου, που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κατά τις περιόδους της άνοιξης.

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. 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 135m^2 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

4.1.2 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 τον 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.

4.1.3 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 καταμετρημένα 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 μήκρους, κατακόρυφης κατασκευής.

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 K₂HPO₄ · 6H₂O (ανόργανο PCM) και ορισμένα κεριά παραφίνης (οργανικά PCM) ήταν ευνοϊκά για εφαρμογές κλιματισμού. Τα δύο πιο ελπιδοφόρα PCM για

θέρμανση χώρου ήταν $Zn(NO_3) \cdot 6H_2O$ και $Ca(NO_3) \cdot 4H_2O$ (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.

4.1.4 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 ερευνηθούν 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.

4.1.5 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 διαφόρων οργανικών και υποψηφίων ένυδρων αλάτων σε δοχεία σωλήνων με πτερύγια, που περιέχουν εναλλάκτες θερμότητας σε συνδυασμό με σωλήνες θερμότητας. Μια ιδιωτική εταιρεία στη Δυτική Γερμανία διεξήγαγε έρευνα για να εξετάσει τις διαφορετικές επιδόσεις διαφόρων 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.

4.1.6 Απο 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 Nippon 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 εύηχτα νιτρικά άλατα για εφαρμογές σε θερμοκρασία δωματίου. Yoneda και Takamashi 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 στα κτίρια

4.2.1 Προϋποθέσεις ανθρώπινης άνεσης [2]

Τα περισσότερα κτίρια έχουν σαν πρωταρχική λειτουργία 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.

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

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

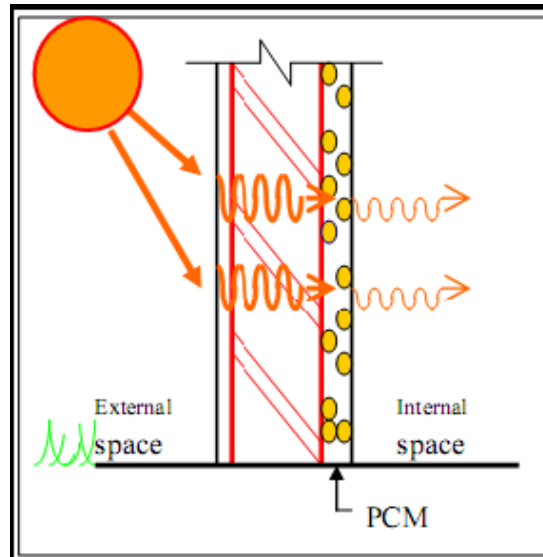
Αν υπάρχουν ορισμένα δομικά υλικά, των οποίων οι τιμές των ρc_p και k μπορούν να κάνουν το δεδομένο δωμάτιο να πληροί την προϋπόθεση $I_{win} = I_{sum} = 0$, καλούμε αυτά τα υλικά, ιδανικά δομικά υλικά. Αυτό σημαίνει ότι η εσωτερική θερμοκρασία θα είναι μέσα στην περιοχή άνεσης όλο το χρόνο χωρίς βοηθητική 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

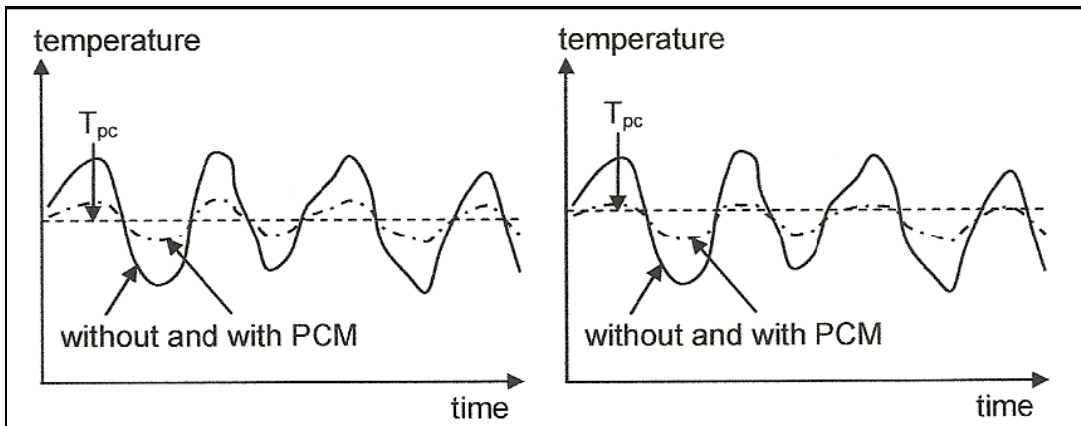
μόνο μια μικρή ποσότητα της θερμότητας άγεται στον εσωτερικό χώρο, όταν η διαδικασία μετάβασης ολοκληρωθεί αντί να άγουν όλη τη θερμότητα στον εσωτερικό χώρο. Ως αποτέλεσμα, το PCM μπορεί να εγγυηθεί μια πιο σταθερή εσωτερική θερμοκρασία, χωρίς δραματικές διακυμάνσεις, παρέχοντας έτσι θερμική άνεση στους 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.

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
- (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 παρακάτω 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 .

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 υπερδιαστασιοποιηθεί. Μια υπερδιαστασιοποίηση 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:

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

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.

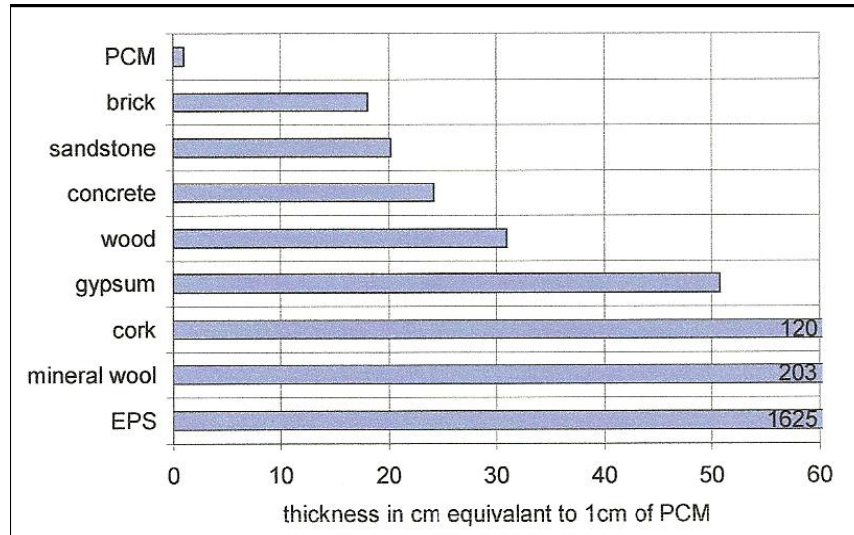
4.2.4 Σύγκριση PCM με τα συμβατικά οικοδομικά υλικά [2,6]

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 $\text{MJ}/\text{m}^3\text{K}$ είναι σε θέση να αποθηκεύουν περισσότερη θερμότητα από το ξύλο με 1,05 $\text{MJ}/\text{m}^3\text{K}$.

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/m^3 , 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 .

4.2.5 Παράγοντες αξιολόγησης ενός τοίχου με PCM

4.2.5.1 Παράγοντες «φ» και «f» [3,7]

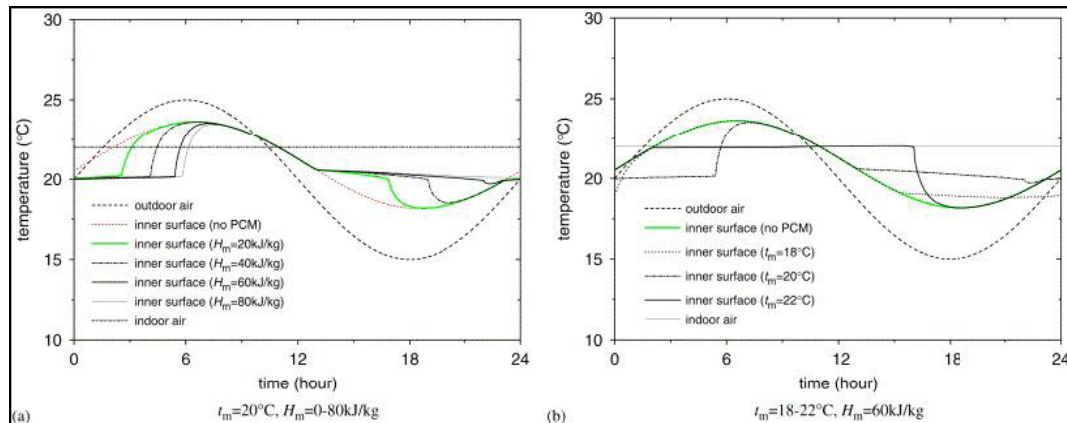
Οι παράγοντες ϕ και f περιγράφουν την αλλαγή του μήκους κύματος και του πλάτους των κυμάτων θερμότητας, που παράγονται από την εξωτερική προς την εσωτερική επιφάνεια του τοίχου. Χρονική υστέρηση (ή φάση υστέρησης ή χρονική μεταβολή ή χρονική καθυστέρηση) ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για ένα κύμα 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 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.



Σχήμα 4.4: Θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας τοίχου PCM με διαφορετικές θερμότητες και θερμοκρασίες τήξης

4.2.5.2 Παράγοντες «α», «β» και «Δτ» [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 «β» διατυπώνονται.

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

$$\Gamma'_{out} = T_{out} + q_{r,out} / h_{w,out} \quad (4.6)$$

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

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

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

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

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 φορτίζουν με θερμότητα ($q_w < 0$) και να αποφορτίζουν 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

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

Η περίοδο 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 κατάψυξης 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 τόρα 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 $Wm^{-1}oC^{-1}$.

4.3 Τρόποι εφαρμογής των PCM στα κτίρια

Η εφαρμογή των PCMs σε κτίρια μπορεί να έχει δύο διαφορετικούς στόχους. 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 που μελετήθηκαν για θέρμανση και ψύξη χώρου παρουσιάζονται στη συνέχεια.

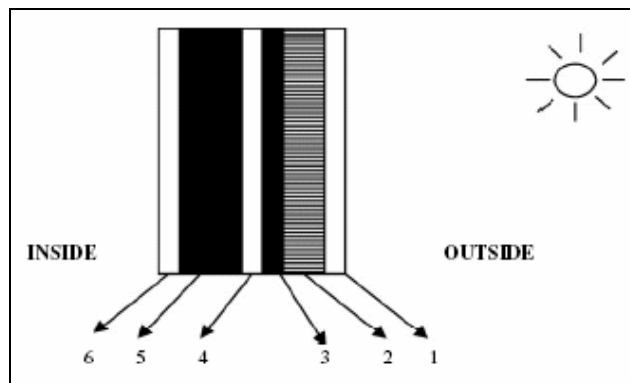
4.3.1 Ηλιακός τοίχος αποθήκευσης θερμότητας για αερισμό κτιρίων [9]

Ένας ηλιακός τοίχος με PCM δεν διαφέρει στον τρόπο λειτουργίας και στα βασικά πλεονεκτήματα. Είναι ικανός να απορροφήσει μία μεγάλη ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στους τοίχους ή στην οροφή ενός κτιρίου. Εξαιτίας της μεγάλης θερμικής μάζας των τοίχων με PCM, είναι ικανοί σχεδόν να μηδενίζουν την επίδραση των μεγάλων διακυμάνσεων της εξωτερικής θερμοκρασίας στην εσωτερική

θερμοκρασία του κτιρίου. Μπορούν να είναι πολύ αποτελεσματικοί στη μετατόπιση του ψυκτικού φορτίου σε περίοδο εκτός αιχμής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην περίπτωση του ηλιακού τοίχου με το PCM, η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στον τοίχο αποθηκεύεται στο PCM, το οποίο είναι ``θαμμένο`` στον τοίχο. Οι Stritih και Novak παρουσίασαν έναν πειραματικό ηλιακό τοίχο για τον αερισμό του κτιρίου, ο οποίος απορροφάει την ηλιακή ενέργεια σε μαύρο κερί παραφίνης με σημείο τήξης τους 25-30°C. Η αποτελεσματικότητα της απορρόφησης διαπιστώθηκε ότι έφτανε το 79%. Τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης έδειξαν ότι το πάνελ καθορίζει την ποσότητα της ενέργειας που αποθηκεύεται ως αισθητή ή λανθάνουσα θερμότητα και ότι το σημείο τήξης του PCM έχει μία επίδραση στη θερμοκρασία του αέρα που εξέρχεται και αερίζει τον εσωτερικό χώρο.

Ο ηλιακός τοίχος αποτελείται από έξι βασικά μέρη, όπως φαίνεται και από την απεικόνιση που ακολουθεί.



Σχήμα 4.5: Στοιχεία ενός ηλιακού τοίχου με PCM.

Η ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος διέρχεται από το γυαλί με το διαφανές μονωτικό υλικό (στρώματα 1 και 2), το οποίο εμποδίζει τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή και με θερμική ακτινοβολία. Το PCM, το οποίο είναι μέσα σε μία διαφανή πλαστική θήκη (στρώμα 3), απορροφάει και αποθηκεύει ενέργεια κυρίως ως λανθάνουσα θερμότητα. Ο αέρας για τον αερισμό του σπιτιού θερμαίνεται στο κανάλι αέρα (στρώμα 4) και οδηγείται στο δωμάτιο. Η μόνωση (στρώμα 5) και ο γύψος (στρώμα 6) είναι βασικά συστατικά κάθε τέτοιου τοίχου. Αυτή η δομή ενός τοίχου είναι παρόμοια με αυτή που εξετάζεται στη θεωρητική προσομοίωση της εργασίας.

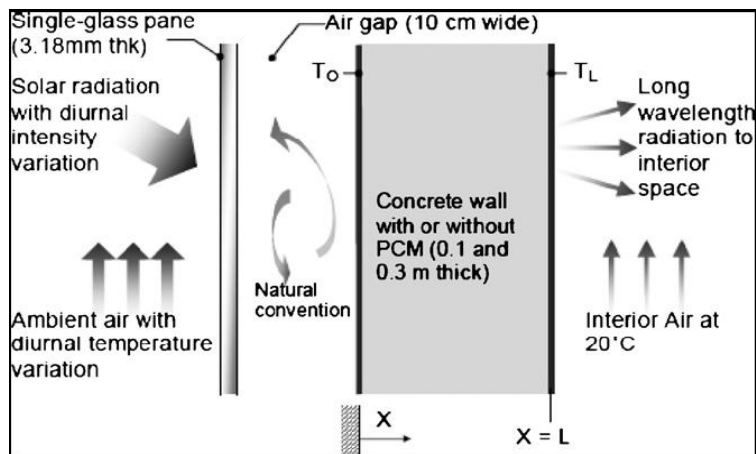
Ο ηλιακός τοίχος έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα άλλα συστήματα. Η υψηλής αποτελεσματικότητας μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε λανθάνουσα θερμότητα οφείλεται στην απευθείας απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην παραφίνη μέσα από διαφανές πλαστικό κάλυμμα, το οποίο είναι την ίδια στιγμή ένα μονωτικό υλικό που αποτρέπει τις απώλειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας προς τον περιβάλλοντα χώρο. Τέλος, οι απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής από το δωμάτιο μειώνονται και αυτές, στην επιφάνεια στην οποία τοποθετείται ένας τέτοιος τοίχος.

4.3.2 Τοίχος Trombe με PCM [10,11]

Τα PCM έχουν προταθεί προκειμένου να αντικαταστήσουν τη λιθοδομή σε έναν τοίχο Trombe, ο οποίος έχει ήδη αναφερθεί στα παθητικά συστήματα. Οι παραδοσιακοί τοίχοι Trombe βασίζονται στην αισθητή αποθήκευση ενέργειας, αλλά λόγω της επιθυμητής αυξημένης αποθήκευσης θερμότητας ανά μονάδα μάζας, ο τοίχος Trombe με PCM είναι μία περίπτωση με αρκετό ενδιαφέρον.

Ένας τοίχος Trombe γεμάτος με PCM κατασκευάζεται πίσω από το παράθυρο της νότιας πλευράς ενός σπιτιού. Ο τοίχος θερμαίνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας από την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, προκαλώντας την τήξη του PCM. Τη νύχτα η αποθηκευμένη θερμότητα απελευθερώνεται, ώστε να θερμανθεί το σπίτι. Για μία δοσμένη ποσότητα αποθήκευσης ενέργειας, οι μονάδες με PCM απαιτούν λιγότερο χώρο από τους τοίχους που είναι γεμάτοι με νερό ή από τους τοίχους της αυξημένης θερμικής μάζας, ενώ είναι και πιο ελαφροί σε βάρος. Επομένως, είναι αρκετά βολικοί τέτοιου είδους τοίχοι ως εκ των υστέρων εξοπλισμός σε διάφορες εφαρμογές ανακαίνισης των κτιρίων. Τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα PCM στους τοίχους Trombe είναι τα ένυδρα άλατα και οι υδρογονάνθρακες. Έχουν καταγραφεί στη βιβλιογραφία διάφορα πειραματικά και θεωρητικά τεστ, τα οποία έχουν σκοπό να αναλύσουν την αξιοπιστία των PCM στους τοίχους Trombe.

Μία γενική εφαρμογή προκειμένου να ελεγχθεί η δυναμική ενός τοίχου Trombe με PCM είναι αυτή που δίνεται σχηματικά παρακάτω. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε είχε σκοπό να εκτιμήσει τη μεταβολή της θερμοκρασίας ενός συμβατικού τοίχου από τσιμέντο με πάχος 30cm και 10cm. Σα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά που προέκυψαν από έναν όμοιο κατασκευαστικά τοίχο, ο οποίος όμως περιείχε 20% κατά βάρος ένα PCM που ανήκε στο είδος των παραφινών, το οποίο είχε ομοιογενώς αναμειχθεί με το τσιμέντο.



Σχήμα 4.6: Σχηματική αποτύπωση ενός τοίχου Trombe με PCM.

Οι Swet, Ghoneim και Sharma χρησιμοποίησαν στις μελέτες τους αντί για κερι παραφίνης, το δεκαένυδρο θειικό νάτριο (με σημείο τήξης τους 32°C) ως PCM για ενσωμάτωση σε νοτίου προσανατολισμού τοίχου Trombe. Σα αποτελέσματα των ερευνών τους έδειξαν ότι ένας τοίχος Trombe μικρού πάχους είναι πιο αποτελεσματικός από έναν συμβατικό τοίχο για την παροχή της επιθυμητής θερμικής αποθήκευσης. Μία άλλη επιτυχής εφαρμογή ήταν αυτή του Knowler, ο οποίος

προκειμένου να αυξήσει τη θερμική αγωγιμότητα και την αποτελεσματικότητα ενός τοίχου Trombe με PCM, χρησιμοποίησε το CG κερί παραφίνης με μεταλλικά πρόσθετα.

Οι Farouk και Guceri μελέτησαν τη χρησιμότητα των τοίχων Trombe με PCM σε ένα κτίριο για νυχτερινή θέρμανση του σπιτιού, στους οποίους το PCM ήταν ένα μείγμα από άλας του Glauber και από το κερί παραφίνης SUNOCO P-116. Σε αυτή τη μελέτη παρατηρήθηκε ότι αν ο τοίχος Trombe με PCM είναι σωστά κατασκευασμένος, μπορεί να μειώσει κάποια από τα ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά των παραδοσιακών τοίχων Trombe και μάλιστα με ανταγωνιστικά αποτελέσματα όσον αφορά την αποθήκευση και την απόδοση της ενέργειας.

4.3.3 Ξηρός τοίχος αλλαγής φάσης εμποτισμένος με PCM [9,12]

Ο τύπος του ξηρού τοίχου ή σανίδας τοίχου αλλαγής φάσης είναι υπαρκτός ως ένα δομικό υλικό για αποθήκευση θερμότητας. Στη διάρκεια των τελευταίων 20 χρόνων, διάφορα είδη χονδρικών PCM σε κάψουλες παράχθηκαν για εμπορική χρήση για ενεργητικές ή παθητικές ηλιακές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης και της εφαρμογής άμεσου κέρδους. Δυστυχώς, η επιφάνεια συναλλαγής των περισσοτέρων τέτοιων προϊόντων δεν επαρκούσε για να παρέχει τη θερμότητα στο κτίριο μετά τη τήξη του PCM εξαιτίας της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

Λόγω αυτών των προβλημάτων υπήρχε η ανάγκη να βρεθεί άλλος τρόπος ενσωμάτωσης των PCM στους κτιριακούς ``φακέλους``. Σε αυτήν την παράγραφο αναλύονται οι τεχνικές παραγωγής, η θερμική συμπεριφορά και οι εφαρμογές της γυψοσανίδας και των μπλοκ τσιμέντου που είναι εμποτισμένα με PCM, ως τρόποι ενσωμάτωσης. Υπάρχουν συγκεκριμένοι λόγοι για τους οποίους στη βιβλιογραφία έχουν επιλεγθεί κυρίως αυτά τα δύο δομικά στοιχεία για περαιτέρω μελέτη σχετικά με την ενσωμάτωση σε αυτά διαφόρων υλικών αλλαγής φάσης. Καταρχήν, είναι δεδομένο ότι χρησιμοποιούνται ευρέως σε ένα μεγάλο πλήθος κατασκευών, η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας είναι μεγάλη και το βάθος συναλλαγής θερμότητας είναι μικρό.

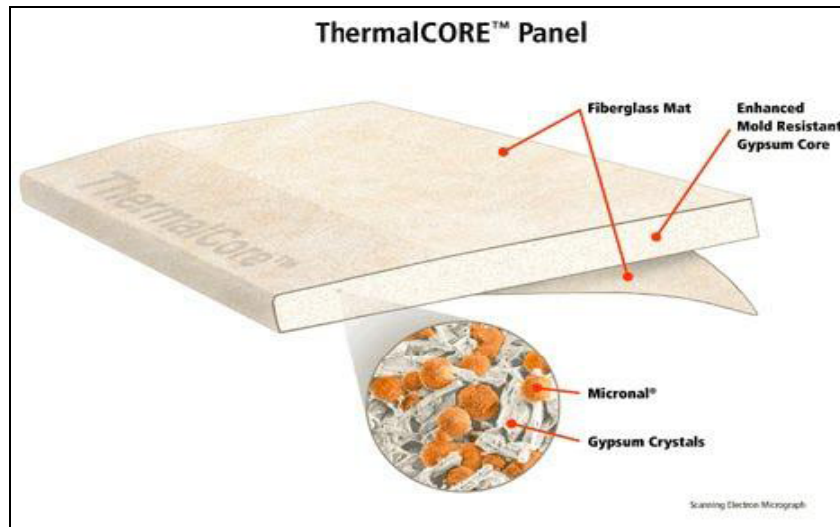
Επίσης, εξαιτίας της γεωμετρίας τους, της δομής τους και της θέσης στην οποία τοποθετούνται, είναι ικανά να λειτουργήσουν ως αποθήκες θερμότητας, ως αγωγοί και εναλλάκτες θερμότητας αλλά και ως δομικά στοιχεία. Τέλος, ένας άλλος λόγος της ευρείας εφαρμογής τους είναι το χαμηλό κόστος της ανάπτυξής τους και η ευκολία στον έλεγχο της λειτουργίας τους.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση της σανίδας αποθήκευσης ενέργειας, η θερμότητα εναλλάσσεται κυρίως στην πλευρά η οποία κοιτάζει το δωμάτιο. Στην περίπτωση του μπλοκ τσιμέντου η θερμότητα μπορεί να εναλλάσσεται είτε στην πλευρά που κοιτάζει το δωμάτιο, είτε στην εσωτερική πλευρά (στον πυρήνα), αλλά και στον συνδυασμό αυτών των δύο περιπτώσεων. Τα μπλοκ τσιμέντου εκτός από τοίχους μπορούν να εφαρμοστούν και στο δάπεδο ενός δωματίου.

4.3.3.1 Γυψοσανίδες με PCM [9,10,12]

Οι γυψοσανίδες που είναι εμποτισμένες με PCM μπορούν να τοποθετηθούν στη θέση των συμβατικών σανίδων τοίχου κατά τη διάρκεια της κατασκευής ή της ανακαίνισης

ενός κτιρίου. Μπορούν να παρέχουν θερμική αποθήκευση η οποία διανέμεται σε όλο το κτίριο, κάνοντας εφικτή τη παθητική ηλιακή σχεδίαση και τη ψύξη εκτός φορτίου αιχμής. Ακολουθούν κάποιες από τις πιο γνωστές εφαρμογές σχετικά με τις γυψοσανίδες.



Σχήμα 4.7: Γυψοσανίδα με PCM κατασκευασμένη από την Knauf.

Μία γυψοσανίδα αποθήκευσης ενέργειας κατασκευάστηκε σε εργαστηριακή κλίμακα, με άμεση ενσωμάτωση ποσοστού 21-22% εμπορικής σειράς στεατικού βουτυλίου (BS) στο στάδιο ανάμιξης της παραγωγής μίας συμβατικής γυψοσανίδας, ώστε να διαπιστωθεί η επίδραση του PCM στις ιδιότητες μίας γυψοσανίδας. Η ενσωμάτωση του BS διευκολύνθηκε από την ύπαρξη και τον τύπο μικρών ποσοτήτων παραγόντων διασποράς.

Οι φυσικομηχανικές ιδιότητες αυτής της εργαστηριακής γυψοσανίδας μπορούσαν να συγκριθούν αρκετά ανταγωνιστικά με τις ιδιότητες της κλασικής γυψοσανίδας. Η θερμοχωρητικότητα είχε δεκαπλασιαστεί σε ικανότητα αποθήκευσης και απελευθέρωσης της θερμότητας σε σχέση με τη γυψοσανίδα χωρίς PCM.

Ο Ρεϊρρο και οι συνεργάτες του μελέτησαν μία γυψοσανίδα εμποτισμένη με PCM ως ένα στοιχείο αποθήκευσης σε ένα ελαφρού βάρους παθητικό ηλιακό σπίτι 120m², με καλή μόνωση και μία μεγάλη επιφάνεια νότιων υαλοπινάκων στο Μάντισον. Το σπίτι μπορούσε να εξοικονομήσει μέχρι και 3GJ ή 15% του ετήσιου ενεργειακού κόστους. Επίσης, συμπέραναν ότι η βέλτιστη ημερήσια αποθήκευση θερμότητας συμβαίνει όταν το PCM έχει μία θερμοκρασία τήξης 1-3oC πάνω από τη μέση θερμοκρασία δωματίου.

Αντίστοιχα, η ημερήσια αποθήκευση βρέθηκε ότι μειώνεται όταν το PCM είχε θερμοκρασία αλλαγής φάσης που κυμαινόταν σε ένα εύρος θερμοκρασιών. Αυτό το συμπέρασμα επιβεβαιώνεται και από άλλες εφαρμογές, όπως αυτή του Neeper, ο οποίος χρησιμοποίησε λιπαρά οξέα και κεριά παραφίνης σε γυψοσανίδες, τις οποίες και εξέθεσε στην ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του δωματίου, αλλά όχι σε άμεση έκθεση στον ήλιο.

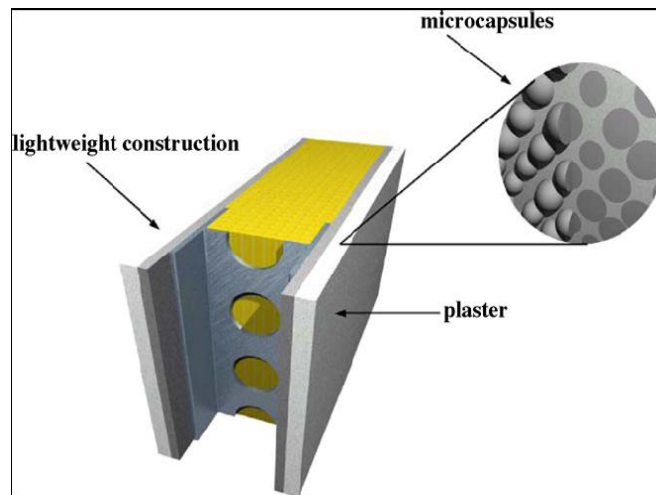
Οι Stetiu και Feustel χρησιμοποίησαν μία θερμική προσομοίωση κτιρίου βασισμένη σε μία προσέγγιση πεπερασμένων διαφορών, για να εκτιμήσουν αριθμητικά τη συμπεριφορά μίας γυψοσανίδας εμποτισμένης με PCM σε ένα κτίριο όσον αφορά την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας. Το αποτέλεσμα έδειξε ότι αυτή η γυψοσανίδα, σε συνδυασμό μάλιστα και με μηχανικό νυκτερινό αερισμό προσφέρει τη δυνατότητα για μεγάλη μείωση των διαστάσεων του συστήματος, ειδικά σε κλίματα στα οποία η εξωτερική θερμοκρασία πέφτει κάτω από τους 18°C κατά τη διάρκεια της νύχτας. Στην περίπτωση, μάλιστα, ενός πρωτότυπου κτιρίου στην Καλιφόρνια, εκτίμησαν ότι η εφαρμογή της γυψοσανίδας μπορούσε να μειώσει το μέγιστο φορτίο ψύξης κατά 28%.

Οι ίδιοι επιστήμονες μελέτησαν περαιτέρω τη χρήση μίας διπλής γυψοσανίδας με PCM, ώστε να αυξηθεί περισσότερο η ικανότητα αποθήκευσης του κτιρίου, για να είναι εφικτή η διατήρηση των θερμοκρασιών του δωματίου σε τιμές κοντά στο ανώτερο επίπεδο θερμικής άνεσης, ώστε να αποφευχθεί πιθανόν και η χρήση μηχανικής ψύξης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για ένα κατοικήσιμο χώρο με υψηλά εσωτερικά φορτία στην Καλιφόρνια, έδειξαν πολύ μεγάλη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα του δωματίου όταν η θερμική ενέργεια μπορούσε να αποθηκευτεί στις γυψοσανίδες με PCM.

Είναι βέβαια, απαραίτητο να αναφερθεί ότι η ψύξη του κτιριακού ``φακέλου`` μόνο με τη μεταφορά αέρα στο εσωτερικό του δωματίου, παρείχε ένα μη αποτελεσματικό τρόπο μεταφοράς θερμότητας. Ως εκ τούτου, οι επιστήμονες συμπεράναν ότι πιθανή εξαναγκασμένη παροχή αέρα κατά μήκος των επιφανειών των τοίχων, θα ήταν ωφέλιμη για τη βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας.

Οι κτιριακές ενεργειακές προσομοιώσεις βοηθούν στην εκτίμηση των εν δυνάμει εφαρμογών των PCM στη θερμική αποθήκευση στα κτίρια. Γι' αυτό το Ινστιτούτο Fraunhofer στη Γερμανία προσομοίωσε τη θερμική συμπεριφορά των δομικών συστατικών, ώστε να συγκρίνει τη δυναμική επίδοση διαφορετικών τύπων γυψοσανίδων που περιέχουν διαφορετικές ποσότητες PCM. Ανέλυσαν την επίδραση ως μία συνάρτηση του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης, την ποσότητα του PCM και τη κατασκευή και τη χρήση του κτιρίου. Χρησιμοποιώντας θερμογράφοι, απεικονίστηκε ποιοτικά η επίδραση των PCM στα οικοδομικά υλικά: τέσσερα δείγματα γυψοσανίδων με διαφορετικές ποσότητες PCM, τα οποία είχαν θερμανθεί σε φούρνο και μετά είχαν παρατηρηθεί κατά τη διάρκεια της ψύξης.

Η διακύμανση της θερμοκρασίας με το χρόνο έδειξε ξεκάθαρα την επίδραση των PCM. Όσο μεγαλύτερη ποσότητα PCM χρησιμοποιείται, τόσο μεγαλύτερη σε διάρκεια είναι η διαδικασία ψύξης. Ως εκ τούτου, σε ένα συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος, η θερμική μάζα ενός δομικού στοιχείου μπορεί να αυξηθεί σημαντικά εξαιτίας της διαδικασίας αλλαγής φάσης, τόσο ώστε η θερμική άνεση η οποία είναι συνήθως συνυφασμένη με μεγάλης μάζας και βαριά κτίρια, να μπορεί να προσεγγιστεί με ελαφριά υλικά κατασκευής, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.8: Κατασκευή ενός ελαφρού βάρους τοίχου.

Οι Kedl και Stoval χρησιμοποίησαν οκταδεκάνιο κερι παραφίνης εμποτισμένο σε γυψοσανίδα για παθητική ηλιακή εφαρμογή, ώστε να διαπιστωθεί ποίος τρόπος είναι πιο αποτελεσματικός για ενσωμάτωση των PCM στις γυψοσανίδες. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας έδειξαν ότι η διαδικασία της απορρόφησης ώστε να γεμίσει η γυψοσανίδα με κερι παραφίνης κλιμακώθηκε επιτυχώς από μικρά δείγματα σε πλήρους μεγέθους φύλλα. Το σημαντικότερο στοιχείο από αυτήν την προσπάθεια ήταν ότι η διαδικασία απορρόφησης έχει το δυναμικό να πετύχει υψηλότερη χωρητικότητα αποθήκευσης από το να γίνει απλή πρόσθεση σφαιριδίων γεμάτων με κερι παραφίνης στο στάδιο της κατασκευής της γυψοσανίδας.

Όσον αφορά τον τρόπο ενσωμάτωσης, μία άλλη εφαρμογή ήταν αυτή των Salyer και Sircar, οι οποίοι όρισαν έναν χαμηλού κόστους αλκυλικό υδρογονάνθρακα ως PCM και ανέπτυξαν μεθόδους ώστε να γίνεται η ενσωμάτωση του PCM σε γυψοσανίδες, ελαχιστοποιώντας τη διαρροή και τα προβλήματα διαστολής κατά τη τήξη και τη στερεοποίηση. Η πρώτη επιτυχής διαδικασία ενσωμάτωσης ήταν αυτή της εκ των υστέρων απορρόφησης του υγρού PCM από το πορώδες μέρος της ήδη κατασκευασμένης γυψοσανίδας. Η δεύτερη ήταν η ενσωμάτωση ενός πρόσθετου στο υγρό στάδιο κατασκευής της γυψοσανίδας.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί η μελέτη των Feldman και Hawes, οι οποίοι πραγματοποίησαν εκτενή μελέτη σχετικά με τη χρήση και τη σταθερότητα οργανικών συστατικών PCM σε γυψοσανίδες. Βρήκαν ότι ο γύψος συνεργάζεται αποτελεσματικά με ένα πλήθος υλικών, ενώ μερικά από αυτά που εξέτασαν ήταν το στεατικό βουτύλιο, το μείγμα καπρικού και λαυρικού οξέος και το παλμιτικό προπύλιο. Ο πίνακας που ακολουθεί δείχνει τα θερμικά χαρακτηριστικά κάποιων από τους πιο ενδιαφέροντες συνδυασμούς γύψου και PCM.

TABLE 3. Thermal characteristics of various gypsum-PCM combinations used

PCM		Average latent heat of impregnated gypsum (J/g)	
Nature	Melting point (°C)	Freezing point (°C)	
45–55% Capric-lauric acid plus fire retardant	17	21	28
Butyl stearate	18	21	30
Propyl palmitate	19	16	40
Dodecanol	20	21	47

Σχήμα 4.9: Θερμικά χαρακτηριστικά διαφόρων συνδυασμών γύψου-PCM.

Τα αποτελέσματα των τεστ των διαφόρων γυψοσανίδων με PCM ήταν αρκετά ικανοποιητικά. Οι καμπτικές δυνάμεις ήταν συγκρίσιμες με αυτές της συμβατικής γυψοσανίδας, η αντοχή μετά από κύκλους ψύξης-απόψυξης ήταν απολύτως ικανοποιητική, η αντίσταση σε ανάφλεξη ήταν άπογη, η συμβατότητα με τα χρώματα και τις ταπετσαρίες των γυψοσανίδων ήταν αρκετά καλή, η αντοχή σε υγρασία ήταν πιο καλή από αυτήν της συμβατικής γυψοσανίδας, η σταθερότητα των υλικών ήταν σε καλό επίπεδο, ενώ η αποθήκευση ενέργειας είχε σχεδόν δεκαπλασιαστεί. Το βάρος μίας τέτοιας γυψοσανίδας ήταν περίπου κατά 22% μεγαλύτερο από μία γυψοσανίδα χωρίς PCM, αλλά και αυτή η τιμή ήταν αποδεκτή από τα όρια βάρους της βιομηχανίας.

4.3.3.2 Μπλοκ τσιμέντου με PCM [9,10,12]

Ένα μπλοκ τσιμέντου με PCM μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε κατασκευή ενός κτιρίου, προσφέροντας μεγάλη θερμική αδράνεια χωρίς να περιλαμβάνει μεγάλη μάζα. Πολλές σημαντικές εφαρμογές έχουν πραγματοποιηθεί και για αυτήν την περίπτωση, μερικές από τις οποίες αναλύονται παρακάτω.

Ο Lee και οι συνεργάτες του μελέτησαν τα αποτελέσματα των τεστ μακροκλίμακας, στα οποία σύγκριναν τη συμπεριφορά σε θερμική αποθήκευση των συμβατικών μπλοκ τσιμέντου με αυτά στα οποία είχε γίνει ενσωμάτωση δύο ειδών PCM, του στεατικού βουτυλίου (BS) και της εμπορικής παραφίνης. Η ενσωμάτωση για να είναι επιτυχής έγινε με βύθιση των μπλοκ τσιμέντου, τα οποία είχαν ήδη θερμανθεί, σε μία δεξαμενή με το λιωμένο PCM, μέχρις ότου απορροφηθεί η απαιτούμενη ποσότητα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα μπλοκ τσιμέντου ήταν ικανά να αποθηκεύσουν τη λανθάνουσα και την αισθητή θερμότητα του ενσωματωμένου PCM, αλλά και την αισθητή θερμότητα του τσιμέντου.

Ο Hadjiena και οι συνεργάτες του ανέλυσαν την ικανότητα θερμικής αποθήκευσης και τη δομική σταθερότητα σε συνθήκες επαναλαμβανόμενων θερμικών κύκλων ενός σύνθετου συστήματος τσιμέντου με PCM, το οποίο περιλάμβανε πενταένυδρο θειικό νάτριο απορροφημένο από πορώδες τσιμέντο. Συμπέραναν ότι η μεγάλη επιφάνεια απορρόφησης του κυψελωτού πορώδους τσιμέντου λειτουργούσε ως ένα καλό υποστηρικτικό υλικό για το συγκεκριμένο PCM, το οποίο παρουσίαζε μη συνεχή

τήξη και βελτιώνει τη δομική του σταθερότητα κατά τη διάρκεια των θερμικών κύκλων, ενώ η θερμοχωρητικότητα του σύνθετου συστατικού παρέμενε υψηλή.

Οι μέθοδοι εγκλεισμού του PCM στους πυρήνες των μπλοκ τσιμέντου που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, παρουσιάστηκαν από τον Salyer και τους συνεργάτες του. Αυτές είναι ο εμποτισμός του PCM σε πορώδες υλικό, η απορρόφηση του PCM σε ειδικό πολύ λεπτό πυρίτιο και η διείσδυση του PCM σε πολυμερείς μεταφορείς. Οι συγγραφείς υποστήριξαν ότι τέτοιες μορφές PCM αν εισαχθούν στους πυρήνες των μπλοκ τσιμέντου μπορούν να οδηγήσουν σε πολύ μεγάλες ποσότητες αποθηκευόμενης θερμικής ενέργειας.

Πολύ σημαντική εφαρμογή θεωρείται και σε αυτήν την περίπτωση αυτή των Feldman και Hawes. Τα PCM τα οποία χρησιμοποίησαν ήταν το στεατικό βουτύλιο, δύο λιπαρά οξέα που ονομάζονται 1-dodecanol και 2-dodecanol και η παραφίνη. Αυτοί δοκίμασαν διάφορους συνδυασμούς τσιμέντου και PCM, οι θερμικές ιδιότητες των οποίων μπορούν να παρατηρηθούν από τον παρακάτω πίνακα.

Type of concrete	PCM			Average latent heat of impregnated concrete (J/g)	Age* (days)
	Nature	Melting point (°C)	Freezing point (°C)		
ABL	BS	15.2	19.3	5.7	692
REG	BS	15.4	20.4	5.5	391
PUM	BS	15.9	22.2	6.0	423
EXS	BS	14.9	18.3	5.5	475
ABL	DD	10.8	16.5	3.1	653
REG	DD	5.0	9.6	4.7	432
PUM	DD	14.9	12.0	12.7	377
REG	TD	26.2	32.0	5.7	406
PUM	TD	32.2	35.7	12.5	404
REG	PAR	52.4	60.2	11.9	428
ABL	PAR	53.2	60.6	18.9	421
PUM	PAR	52.9	60.8	22.7	407
OPC	PAR	51.7	60.4	7.6	407

Σχήμα 4.10: Θερμικά χαρακτηριστικά διαφόρων συνδυασμών τσιμέντου-PCM.

Οι δύο επιστήμονες διεξήγαγαν τεστ ελέγχου και σε αυτά τα μπλοκ τσιμέντου με PCM, συγκρίνοντάς τα με άλλα συμβατικά μπλοκ τσιμέντου. Τα αποτελέσματα σχετικά με τη θερμική αγωγιμότητα ήταν ότι μπορεί να ποικίλλει από -20% μέχρι 20% σε σχέση με τα συμβατικά μπλοκ τσιμέντου, ανάλογα με το συνδυασμό υλικών που χρησιμοποιούνται. Οι καμπτικές δυνάμεις των μπλοκ τσιμέντου με PCM ήταν συγκρίσιμες με τις άλλες, η αντοχή σε κύκλους ψύξης-απόψυξης ήταν σημαντικά βελτιωμένη σε σχέση με τα συμβατικά μπλοκ, η αντοχή σε ανάφλεξη ήταν ικανοποιητική, η απορρόφηση υγρασίας ήταν πολύ μειωμένη και η σταθερότητα των υλικών ήταν πολύ καλή. Η ικανότητα ενεργειακής αποθήκευσης του τσιμέντου με το PCM ήταν περίπου 200-230% πάνω από αυτήν των συμβατικών μπλοκ κατά τη διάρκεια μίας αλλαγής φάσης της τάξεως των 6°C.

4.3.3.2.1 Χρήση μικροκαψουλών PCM σε τοίχο από τσιμέντο για εξοικονόμηση ενέργειας [14]

Ο κύριος σκοπός αυτής της εφαρμογής είναι να αναδείξει την πιθανότητα χρήσης μικροκαψουλών PCM στο τσιμέντο, χωρίς να αλλοιώνονται τα αρχικά χαρακτηριστικά του, επιτυγχάνοντας μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας από την ψυκτική ισχύ.



Σχήμα 4.11: Θάλαμοι με τοίχους από τσιμέντο και PCM.

Η πειραματική διάταξη περιλάμβανε δύο όμοιου σχήματος θαλάμους με τσιμέντο, από τους οποίους ο ένας ήταν κατασκευασμένος από συμβατικό τσιμέντο και ο άλλος από τροποποιημένο τσιμέντο, το οποίο ονομάζεται τσιμέντο Morcon. Το υλικό αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα εμπορικό PCM σε μικροκάψουλες, το οποίο ονομάζεται Micronal PCM, με σημείο τήξης τους 26°C και ενθαλπία αλλαγής φάσης 110kJ/kg . Μετά από την ανάμειξη και την ενσωμάτωση αυτού του PCM με το τσιμέντο, βρέθηκε ότι το τσιμέντο Morcon μπορεί να επιτύχει αντοχή σε θλίψη πάνω από 25MPa και αντοχή σε πίεση πάνω από 6MPa (μετά από 28 ημέρες), στοιχεία που δείχνουν τη μεγάλη δυναμική αυτού του υλικού για χρήση του σε κατασκευαστικές εφαρμογές. Τα πάνελ με το τσιμέντο κατασκευάστηκαν στην Ελλάδα, ενώ οι θάλαμοι τελικά τοποθετήθηκαν στην περιοχή Puigverd de Lleida στην Ισπανία.

Οι θάλαμοι ήταν όμοιοι, όπως προέκυψαν από την ένωση έξι πάνελ από τσιμέντο, αλλά ο ένας από τους θαλάμους περιείχε σε περιεκτικότητα 5% κατά βάρος υλικό αλλαγής φάσης αναμειγμένο με το τσιμέντο σε τρία από τα πάνελ (νότιος και δυτικός τοίχος και στην οροφή). Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν χρησιμοποιήθηκε καθόλου μόνωση για τους θαλάμους, αφού έπρεπε να ελεγχθεί η επίδραση μόνο του υλικού αλλαγής φάσης.

Σα αποτελέσματα από τους θαλάμους λήφθηκαν από τις 23 Μαρτίου μέχρι τις 1 Απριλίου 2005. Ο θάλαμος χωρίς PCM παρουσίαζε μέγιστη θερμοκρασία 1°C υψηλότερη από αυτήν του θαλάμου με PCM και επίσης ελάχιστη θερμοκρασία 2°C χαμηλότερη.

Επιπλέον, η μέγιστη θερμοκρασία στον τοίχο του θαλάμου με το υλικό αλλαγής φάσης εμφανιζόταν δύο ώρες μετά από ότι στον τοίχο χωρίς PCM, στοιχείο που δείχνει ότι η θερμική αδράνεια του τοίχου είναι υψηλότερη στην περίπτωση της χρήσης PCM. Αυτή η θερμική αδράνεια εμφανίζεται ξανά το απόγευμα εξαιτίας της στερεοποίησης του PCM, αλλά και νωρίτερα το πρωί εξαιτίας της τήξης του PCM. Η επίδραση της θερμικής αδράνειας είναι πολύ ενδιαφέρουσα σε εμπορικά κτίρια, καθώς μία καθυστέρηση της τάξεως των δύο ωρών στο κύμα θερμότητας θα μπορούσε να σημαίνει μία μείωση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, εξαιτίας της μειωμένης απαίτησης κλιματιστικής ισχύος.

Άρα η παραπάνω εφαρμογή είχε ως αποτέλεσμα βελτιωμένη θερμική αδράνεια και χαμηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το PCM που ενσωματώνεται στους θαλάμους τήκεται και στερεοποιείται σε κάθε θερμικό κύκλο. Επίσης, έγινε εμφανές ότι πιθανή νυχτερινή ψύξη μπορεί να εξασφαλίσει έναν τέτοιο ολοκληρωμένο θερμικό κύκλο.

4.3.3.2.2 Ενσωμάτωση PCM σε μείγμα ξύλου-ελαφρού βάρους τσιμέντο.[9]

Αναφέρεται εδώ ως υποκατηγορία η ενσωμάτωση των PCM αντί σε καθαρό μπλοκ τσιμέντου, σε μείγμα ξύλου και ελαφρού βάρους τσιμέντο. Αυτό το μείγμα αποτελείται στην πραγματικότητα από τσιμέντο, πριονίδια ξύλου σε κατά βάρος περιεκτικότητα που δεν πρέπει να ξεπερνάει το 15%, νερό και πρόσθετα συστατικά. Μπορεί να εφαρμοστεί, γενικά, για την κατασκευή εξωτερικών και εσωτερικών τοίχων ενός κτιρίου.

Σε αυτού του είδους την ενσωμάτωση εργάστηκε ο Mehling και οι συνεργάτες του. Χρησιμοποίησαν δύο PCM, τα οποία ήταν το Rubitherm GR40, 1-3mm και GR50, 0,2-0,6mm. Σα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μείγμα αυτό μπορεί εύκολα να συνδυαστεί με τα PCM και μάλιστα χωρίς μεγάλη μεταβολή στις μηχανικές ιδιότητες του. Τα περαιτέρω θετικά αποτελέσματα αναφέρθηκαν συνοπτικά από τους ερευνητές. Η θερμική αγωγιμότητα ήταν αρκετά καλή, δηλαδή μεταξύ 0,15 και 0,75W/mK και η ηχητική μόνωση αυξημένη. Οι μηχανικές ιδιότητες ήταν σε καλό επίπεδο, δηλαδή πυκνότητα μεταξύ 600 και 1700kg/m³, αλλά και η θερμοχωρητικότητα, η οποία για πυκνότητα στην τιμή των 1300kg/m³, έφτανε στην τιμή των 0,39-0,48kJ/kg.

Όπως και σε όλες τις προηγούμενες εφαρμογές, η ενσωμάτωση των PCM ήταν κυρίως ωφέλιμη διότι οδήγησε σε αυξημένη ικανότητα θερμικής αποθήκευσης και καλύτερη θερμική συμπεριφορά και μάλιστα με αρκετά μειωμένα το βάρος και το πάχος των στοιχείων των τοίχων.

4.3.4 Θερμικά ενισχυμένο πλαίσιο τοίχου με PCM [15]

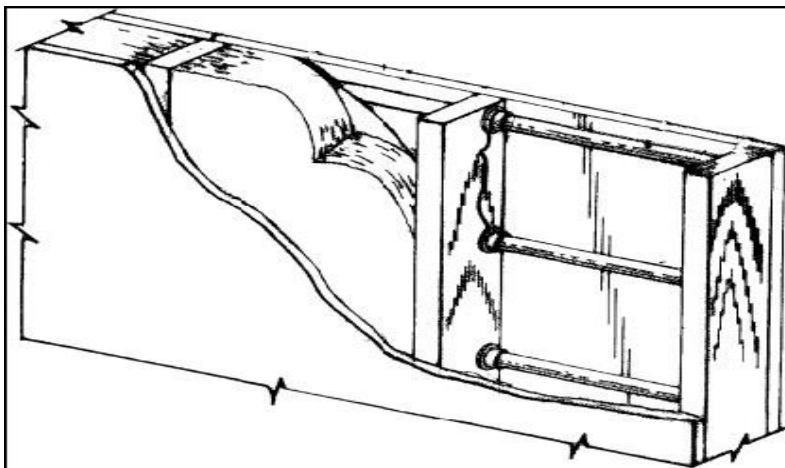
O Meng Zhang και οι συνεργάτες του παρουσίασαν ένα θερμικά ενισχυμένο πλαίσιο τοίχου με PCM, το οποίο μειώνει το μέγιστο της ζήτησης ψυκτικής ισχύος στα σπίτια. Οι επιστήμονες χρησιμοποίησαν ως PCM υψηλής ποιότητας κρυσταλλική παραφίνη με σημεία τήξης και στερεοποίησης στο θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 20-30°C, δηλαδή μέσα στο εύρος ανθρώπινης θερμικής άνεσης, όπως αυτό ορίζεται από την ASHRAE. Άλλοι λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή αυτού του PCM ήταν τα πλεονεκτήματα της υψηλής θερμοκρασίας έναρξης της αποκρυστάλλωσης και της

χαμηλής θερμοκρασίας έναρξης της τήξης. Εξαιτίας αυτού του στοιχείου, το PCM μπορούσε να φορτίζεται σε υψηλότερη εσωτερική θερμοκρασία του αέρα κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου και σε χαμηλότερη εσωτερική θερμοκρασία του αέρα κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου. Άλλα πλεονεκτήματα αυτού του PCM ήταν η σταθερότητά του μετά από επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης, αλλά και κατά τη διάρκεια τυχόν υπερθέρμανσης, η χημική του αδράνεια με όλα τα υπόλοιπα υλικά του τοίχου και η οικολογική του συμπεριφορά.

Στο θερμικά ενισχυμένο πλαίσιο τοίχου (Phase Change Frame Wall-PCFW) χρησιμοποιήθηκε μία μέθοδος εγκλεισμού του PCM με μακροκάψουλες, αντί για τη μέθοδο εμποτισμού (Imbibing Method-IM). Αυτή η μέθοδος είναι πιο ασφαλής και σταθερή, γιατί το PCM πρώτα ενσωματώνεται σε κάψουλες σε σωλήνες, οι οποίοι στη συνέχεια κλείνουν στα δύο τελειώματα για να αποφευχθεί η διαρροή.

Επιπλέον πλεονεκτήματα που προέκυψαν με αυτή τη μέθοδο, ήταν η μείωση της αναφλεξιμότητας του τοίχου και της μεταφοράς υγρασίας κατά μήκος του ``φακέλου`` του κτιρίου, αλλά και η μείωση των προβλημάτων που προκαλούσε η μεταβολή του όγκου του PCM κατά τη διαδικασία αλλαγής φάσης, αφού οι σωλήνες δεν ήταν ποτέ εντελώς γεμάτοι με PCM. Σα τεστ ελέγχου αυτής της εφαρμογής έδειξαν ότι η πιο σημαντική παράμετρος για το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας από και προς το PCM, ήταν η μόνωση του τοίχου και όχι το υλικό του σωλήνα.

Επίσης, διαπιστώθηκε ότι τοποθετώντας τους σωλήνες σε επαφή με την εσωτερική πλευρά του εσωτερικού καλύμματος, ο ρυθμός αποφόρτισης του PCM ήταν πολύ μεγαλύτερος από ότι με την τοποθέτηση των σωλήνων στη μέση της μόνωσης ή σε επαφή με το εξωτερικό κάλυμμα. Τέλος, αποδείχθηκε ότι η εσωτερική συναγωγή, το πάχος της μόνωσης και η εσωτερική και η εξωτερική θερμοκρασία του αέρα, επηρέαζαν εξίσου το ρυθμό της αποφόρτισης. Μετά από όλες αυτές τις παρατηρήσεις κατασκευάστηκε το πλαίσιο, το οποίο παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.12: Σχηματική απεικόνιση του PCFW

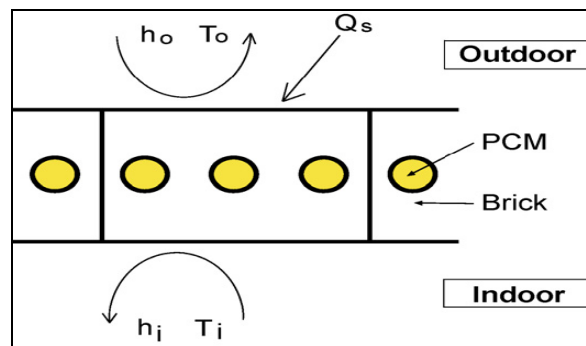
Στην παραπάνω απεικόνιση φαίνονται πάνω αριστερά η μόνωση και κάτω αριστερά η εξωτερική πλευρά. Επίσης, φαίνονται τα ενσωματωμένα σε κάψουλες PCM, που βρίσκονται μέσα στους σωλήνες, καθώς και οι βραχίονες που συγκρατούν τους σωλήνες.

Οι επιτόπιες δοκιμές του PCFW έδειξαν ότι μπορεί να μειώσει την αιχμή της ροής θερμότητας στον τοίχο κατά 38%. Για κτιριακές εφαρμογές αυτό αυτόματα σημαίνει μειωμένη ζήτηση για ψύξη από τους τοίχους και την οροφή, αφού ένα μέρος του θερμικού φορτίου μετατοπίζεται σε άλλες στιγμές της ημέρας, ενώ η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η θερμότητα από τα διάφορα στοιχεία του εξοπλισμού ενός σπιτιού αποθηκεύεται στο PCFW, ενώ αργότερα μπορεί να απελευθερωθεί πάλι στο θερμαινόμενο χώρο, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τους κύκλους λειτουργίας που απαιτούνται από τον εξοπλισμό, γεγονός που οδηγεί με τη σειρά του σε καλύτερη αποδοτικότητα και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

4.3.5 Ενσωμάτωση PCM σε κατασκευές με τούβλο [16,17]

Αν και έχει πραγματοποιηθεί αρκετή έρευνα σχετικά με την ενσωμάτωση των PCM σε διάφορα οικοδομικά υλικά, σχεδόν καθόλου δεν έχει απασχολήσει η ενσωμάτωση των PCM σε διάφορες τεχνικές κατασκευής που χρησιμοποιούν τούβλο, οι οποίες ευρέως εφαρμόζονται στις Μεσογειακές χώρες.

Η πρώτη σημαντικότερη μελέτη για την εν λόγω ενσωμάτωση πραγματοποιήθηκε από τον Esam M. Alawadhi, με σκοπό την εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος σε θερμά κλίματα για ψύξη. Αυτός ανέλυσε θερμικά ένα μοντέλο δύο διαστάσεων ενός κοινού πλίνθινου τοίχου (τούβλο), ο οποίος περιέχει κυλινδρικές τρύπες, οι οποίες γεμίζουν με PCM. Ο σκοπός αυτού του συνδυασμού τούβλου-PCM είναι να μειώσει τη ροή θερμότητας από το εξωτερικό περιβάλλον, απορροφώντας το θερμικό κέρδος στο τούβλο, πριν αυτό φτάσει στον εσωτερικό χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η αποθηκευμένη θερμότητα απελευθερώνεται στους εσωτερικούς και στους εξωτερικούς χώρους. Η σχηματική απεικόνιση του συστήματος που μελέτησε, δίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.13: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος τούβλου-PCM και των οριακών συνθηκών.

Ο Esam M. Alawadhi χρησιμοποίησε τρία διαφορετικά PCM για τη μελέτη του: ν-δεκαοκτάνιο (n-octadecane), ν-εικοσαίνη (n-eicosane) και P116. Διεξήγαγε πλήθος μελετών για να διαπιστώσει την επίδραση διαφόρων παραμέτρων, όπως για παράδειγμα του είδους του PCM, της ποσότητάς του και της θέσης που αυτό πρέπει να τοποθετείται στο τούβλο. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι πράγματι το θερμικό κέρδος μειώνεται όταν το PCM ενσωματώνεται στο τούβλο, ενώ η αύξηση της ποσότητας του PCM έχει θετική επίδραση στα τελικά αποτελέσματα. Η n-eicosane είχε τη καλύτερη απόδοση μεταξύ των τριών PCM, ενώ ως βέλτιστη θέση

τοποθέτησης των κυλίνδρων με PCM από την άποψη της θερμικής αποτελεσματικότητας, αλλά και της ικανότητας να υποστηριχθεί η αντοχή του τούβλου, κρίθηκε η κεντρική γραμμή. Η ροή θερμότητας στον εσωτερικό χώρο μπορεί να μειωθεί κατά 17,55% με την τοποθέτηση των κυλίνδρων με PCM στην κεντρική γραμμή.

Η δεύτερη σημαντική εφαρμογή σε αυτό το πεδίο ήρθε από τον A.Castell και τους συνεργάτες του, οι οποίοι εφάρμοσαν αυτή την τεχνική σε μία τυπική Μεσογειακή κατασκευή, όπως έκαναν για την περίπτωση της ενσωμάτωσης σε τούβλο, η οποία ήδη αναλύθηκε παραπάνω. Σε αυτή τη μελέτη ελέγχθηκαν διάφορα PCM, για εφαρμογές ψύξης, τα οποία είχαν ενσωματωθεί σε μακροκάψουλες, σε συνδυασμό με Μεσογειακές κατασκευές. Χτίστηκαν θάλαμοι, στους οποίους τοποθετήθηκαν οι κάψουλες με PCM σε συμβατικό και σε κυψελιδικό τούβλο.

Προκειμένου να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα για την εξοικονόμηση ενέργειας και για τη μείωση των εκπομπών CO₂, χρησιμοποιήθηκε και μία αντλία θερμότητας, η οποία τοποθετήθηκε μέσα στους θαλάμους. Οι εξεταζόμενοι θάλαμοι χτίστηκαν στην περιοχή Puigverd de Lleida, η οποία αντιπροσωπεύει το τυπικό κλίμα της Ισπανίας, με αρκετά κρύους χειμώνες και ζεστά και υγρά καλοκαίρια. Οι σημαντικές ταλαντώσεις της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας, ήταν κατάλληλες για τη λειτουργία του PCM, αφού το υλικό μπορούσε να λιώνει ολοκληρωμένα την ημέρα και να στερεοποιείται τη νύχτα.

Κατασκευάστηκαν τρεις θάλαμοι με συμβατικό τούβλο και δύο θάλαμοι με κυψελιδικό τούβλο. Οι θάλαμοι με το συμβατικό τούβλο ήταν ένας θάλαμος αναφοράς χωρίς μόνωση, ένα θάλαμος με μονωτικό υλικό και ένας θάλαμος με μονωτικό υλικό και PCM. Ως μονωτικό υλικό χρησιμοποιήθηκε η πολουρεθάνη και ως PCM η παραφίνη RT27. Οι θάλαμοι με το κυψελωτό τούβλο ήταν ένας θάλαμος αναφοράς και ένας θάλαμος με PCM, για τον οποίο χρησιμοποιήθηκε το ένυδρο άλας SP-25 A8.

Το πρώτο πείραμα πραγματοποιήθηκε κάτω από ελεύθερα κυμαινόμενες συνθήκες. Τα αποτελέσματα έδειξαν χαμηλότερα μέγιστα της θερμοκρασίας (μέχρι και 1oC) και πιο σταθερές συνθήκες στους θαλάμους με τα PCM, αφού εξομαλύνονται οι ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Η επίδραση του PCM ήταν εμφανής και στις δύο κατασκευαστικές λύσεις, αλλά ειδικά στην περίπτωση του κυψελωτού τούβλου, αφού η θερμική αντίσταση του τοίχου είναι χαμηλότερη στην περίπτωση αυτή. Επιπλέον, και στους δύο θαλάμους τα PCM ήταν μέσα στα θερμοκρασιακά όρια της τήξης τους σχεδόν σε όλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Παρουσιάστηκαν, βέβαια, κάποια προβλήματα με τη στερεοποίηση των PCM κατά τη διάρκεια της νύχτας, ως εκ τούτου έγινε εμφανής η ανάγκη για χρήση κάποιου είδους ψύξης (φυσικής ή μηχανικής), ώστε να βελτιωθεί η απόδοση των PCM κάτω από ελεύθερα κυμαινόμενες συνθήκες.



Σχήμα 4.14: Θάλαμος από τούβλο με RT27 και πολυουρεθάνη

Αξίζει να γίνει και μία αναφορά στο δεύτερο πείραμα, όπου χρησιμοποιήθηκε μία αντλία θερμότητας, ώστε να καθορίζει και να ελέγχει την εσωτερική θερμοκρασία των θαλάμων. Διαπιστώθηκε ότι η κατανάλωση ενέργειας στους θαλάμους με PCM ήταν μειωμένη κατά 15% σε σχέση με τους θαλάμους χωρίς PCM. Αυτό το γεγονός αναδεικνύει την πολύ μεγάλη δυναμική που έχουν τα PCM για χρήση στους ``φακέλους`` των κτιρίων, με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας και τη θερμική άνεση.

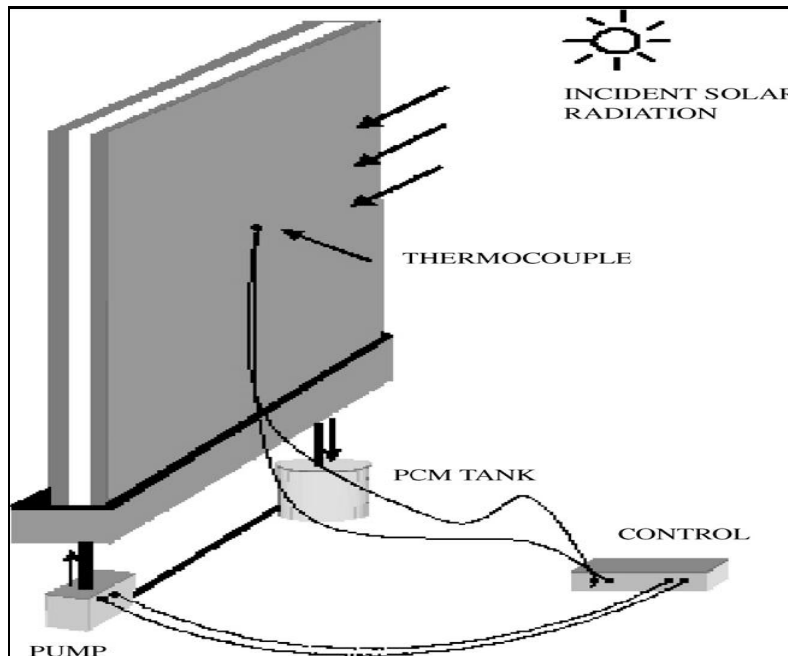
Επιπρόσθετα, περίπου 1-1,5kg/year/m² εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αποφεύχθηκαν, λόγω της εξοικονόμησης ενέργειας. Αυτή η μείωση των εκπομπών, η οποία είναι αποτέλεσμα της σωστής χρήσης της ενέργειας, μπορεί να μετριάσει την κλιματική αλλαγή και την υπερθέρμανση του πλανήτη.

4.3.6 Θερμικά ενεργά παράθυρα με κινούμενες κουρτίνες με PCM[18]

Η πρωτότυπη αυτή ιδέα προτάθηκε από τους Ismail και Henriquez, για εφαρμογές θέρμανσης. Το σύστημα αποτελείται από ένα παράθυρο και μία κουρτίνα PCM, η οποία μπορεί να κινείται. Το παράθυρο περιέχει διπλά τζάμια, ανάμεσα στα οποία υπάρχει ένα κενό, ενώ στην πάνω άκρη βρίσκεται ένας εξαεριστήρας. Οι πλευρές και το κάτω μέρος είναι σφραγισμένα, εκτός από δύο τρύπες στο κάτω μέρος, οι οποίες επικοινωνούν μέσω πλαστικού σωλήνα με μία αντλία και με τη δεξαμενή με το PCM. Η αντλία, με τη σειρά της, επικοινωνεί με τη δεξαμενή του PCM, το οποίο είναι στην υγρή φάση. Η λειτουργία της αντλίας ελέγχεται από έναν αισθητήρα διαφοράς θερμοκρασίας. Όταν η διαφορά θερμοκρασίας φτάσει σε μία προκαθορισμένη τιμή, τότε η αντλία ξεκινά να λειτουργεί και το PCM αντλείται ώστε να γεμίσει το κενό μεταξύ των φύλλων του παραθύρου.

Εξαιτίας της χαμηλότερης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας, το PCM ξεκινά να παγώνει, σχηματίζοντας ένα στερεό στρώμα, το οποίο αυξάνεται σε πάχος με το χρόνο, αποτρέποντας έτσι τη μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου όλη η ποσότητα του PCM να αλλάξει φάση και να πάει στη στερεή κατάσταση. Αν η σχεδίαση του παραπάνω συστήματος είναι

σωστή, τότε έχει προβλεφθεί ότι η εκ νέου αύξηση της εξωτερικής θερμοκρασίας θα ξεκινήσει πριν να ολοκληρωθεί η στερεοποίηση του PCM.



Σχήμα 4.14: Απεικόνιση των παραθύρων με PCM.

Μετά από διεξοδικές αναλύσεις όσον αφορά τις διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν ένα τέτοιο σύστημα, το τελικό συμπέρασμα είναι ότι πρόκειται για μία πρόταση αρκετά βιώσιμη και θερμικά αποτελεσματική. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι το γέμισμα με PCM μπορεί να οδηγήσει στο φιλτράρισμα της ηλιακής ακτινοβολίας και να μειώσει τα θερμικά κέρδη και τις απώλειες, αφού η περισσότερη ενέργεια που μεταφέρεται, απορροφάται από το PCM κατά τη διάρκεια αλλαγής φάσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το παράθυρο με το διπλό τζάμι που γεμίζει το κενό με PCM είναι περισσότερο θερμικά αποδοτικό από ότι το ίδιο παράθυρο που γεμίζει το κενό με αέρα. Τα πειράματα, τέλος, απέδειξαν ότι το έγχρωμο PCM έχει καλύτερη απόδοση, ενώ ειδικά το πράσινο χρώμα έχει τη βέλτιστη.

4.3.7 Σανίδες οροφής με PCM [10,11,19,21]

Οι σανίδες οροφής είναι ένα σημαντικό δομικό στοιχείο της στέγης, αφού χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση και τη ψύξη των κτιρίων. Έχουν πραγματοποιηθεί και σε αυτό το πεδίο πολλές εφαρμογές, οι οποίες αφορούν εξίσου και ενεργητικά και παθητικά συστήματα.

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τον Pasupathy, περιλάμβανε δύο όμοιους κατασκευαστικά δειγματικούς χώρους, προκειμένου να ελεγχθεί η επίδραση ενός πάνελ με PCM ενσωματωμένο στη στέγη, για τον θερμικό έλεγχο ενός κατοικήσιμου σπιτιού. Ο ένας από τους δύο χώρους κατασκευάστηκε χωρίς PCM στη στέγη, για να γίνει σύγκριση της θερμικής συμπεριφοράς αυτού του δωματίου, με το δωμάτιο που περιείχε το πάνελ με ένα ανόργανο ευτηκτικό PCM, με θερμοκρασία τήξης στο εύρος 26-28οC.

Πραγματοποιήθηκε ένα πλήθος προσομοιώσεων λειτουργίας αυτού του συστήματος, για τις μέσες εξωτερικές συνθήκες και για πολλούς άλλους παράγοντες που προκαλούν ενδιαφέρον. Για τη διάρκεια μάλιστα της θερινής περιόδου, όπου το PCM δεν καταφέρνει να πραγματοποιήσει πάλι αλλαγή φάσης και να στερεοποιηθεί κατά τη διάρκεια της νύχτας, μελετήθηκε η περίπτωση ανάκτησης της θερμότητας από το πάνελ PCM και από την οροφή, με παροχή νερού διαμέσου της πλάκας με το PCM, για την οποία χρησιμοποιήθηκε μία δεξαμενή νερού χωρητικότητας 200 λίτρων.

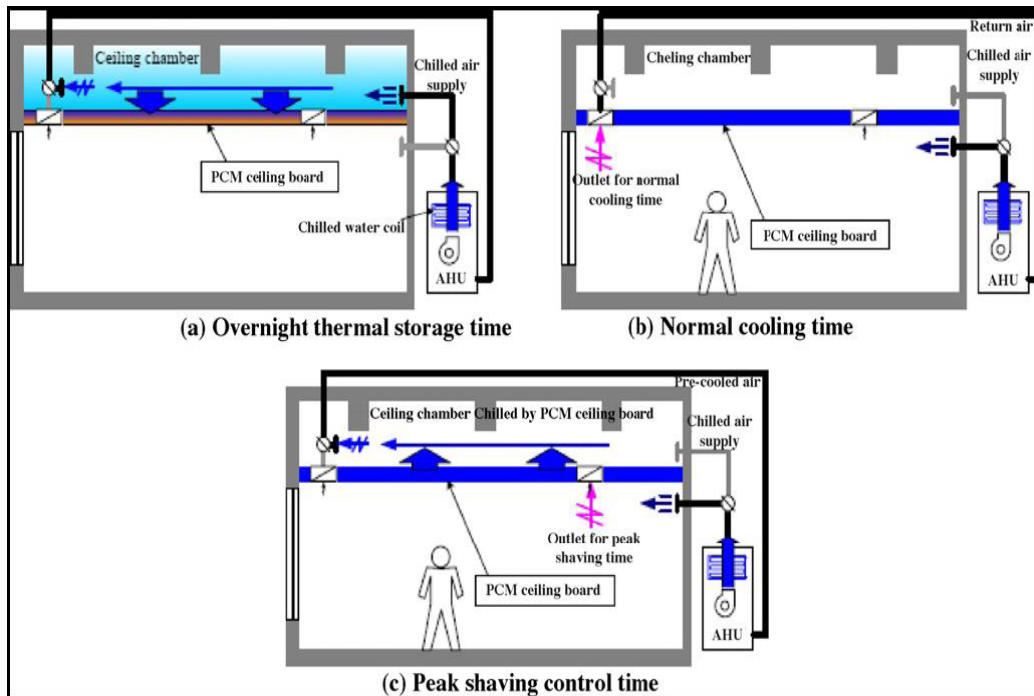
Ο έλεγχος της διακύμανσης της θερμοκρασίας στη στέγη, είχε διαφορετικά αποτελέσματα σχετικά με τη αξιοπιστία του PCM για τους διαφορετικούς μήνες.

Η χρήση του πάνελ με το PCM στο ένα δωμάτιο είχε ως αποτέλεσμα τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας στην οροφή, περίπου στους 27°C, για όλη τη διάρκεια της ημέρας, για τους μήνες μεταξύ του Δεκεμβρίου και Απριλίου. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια των μηνών μεταξύ Μαΐου και Νοεμβρίου, το δωμάτιο με το πάνελ με PCM, παρουσίαζε μέγιστο θερμοκρασίας περίπου 4°C πάνω από το μέγιστο θερμοκρασίας του δωματίου χωρίς το PCM, δηλαδή είχε αρνητική επίδραση στη θερμική συμπεριφορά του χώρου.

Μάλιστα, η εναλλακτική λύση της χρήσης δεξαμενής κρύου νερού για αυτούς τους μήνες, αποδείχτηκε μη ωφέλιμη, καθώς η ποσότητα του απαιτούμενου νερού ανά μονάδα επιφάνειας, δεν ήταν εύκολα διαθέσιμη κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου.

Οι Kodo και Ibamoto χρησιμοποίησαν PCM σε σανίδες οροφής σε ένα κτίριο γραφείων για την εξομάλυνση των αιχμών φορτίου των συστημάτων κλιματισμού. Το σημείο τήξης και η θερμότητα τήξης του PCM σε μικροκάψουλες, που χρησιμοποιήθηκε για να ενισχύσει μία απλή σανίδα οροφής από πετροβάμβακα, ήταν αντίστοιχα 24,5°C και 174,4kJ/kg. Η λειτουργία του συστήματος δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Κατά τη διάρκεια της νυχτερινής θερμικής αποθήκευσης, ο ψυχρός αέρας από τη μονάδα χειρισμού αέρα (Air-Handling Unit, AHU) περνούσε μέσα από το χώρο του θαλάμου οροφής για να αποθηκεύσει τη ψύξη στη σανίδα με το PCM.

Η αποθήκευση της ψυκτικής ενέργειας γινόταν με τη χρήση μειωμένου τιμολογίου για την ηλεκτρική ενέργεια. Κατά τη διάρκεια της κανονικής περιόδου ψύξης, ο ψυχρός αέρας από τη μονάδα χειρισμού φυσούσε απευθείας στο εσωτερικό του δωματίου. Κατά τη διάρκεια της αιχμής του θερμικού φορτίου, ο αέρας από το δωμάτιο γυρνούσε στη μονάδα χειρισμού αέρα μέσα από το χώρο της οροφής. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδρομής ήταν ο θερμός αέρας του δωματίου να προ-ψύχεται περνώντας πάνω από τη ψυχρή σανίδα. Επομένως, το μέγιστο θερμικό φορτίο και η απαίτηση θερμικής ικανότητας της πηγής μπορούσαν να μειωθούν.



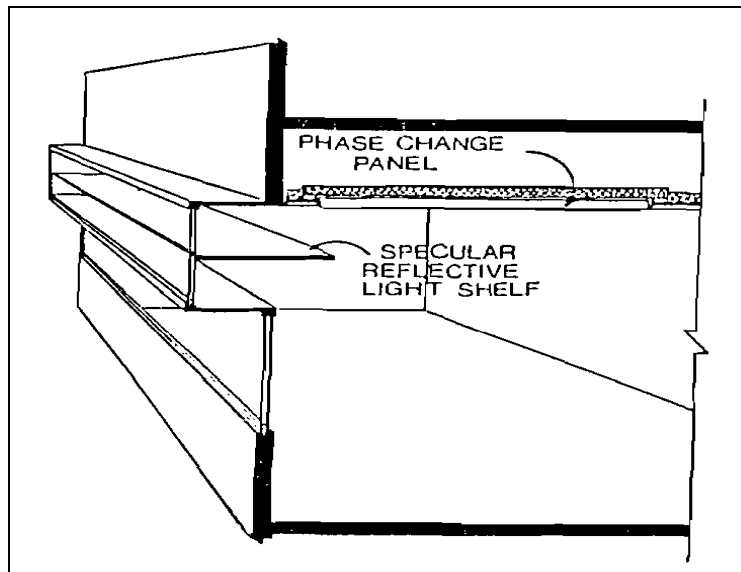
Σχήμα 4.15: Απεικόνιση των διαφορετικών περιόδων λειτουργίας του συστήματος με τις σανίδες οροφής

Σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα, η χρήση σανίδων οροφής κατέδειξε πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα. Το πρώτο από αυτά ήταν η επίτευξη πιο αποτελεσματικής θερμικής αποθήκευσης, καθώς υψηλής πυκνότητας ψυχρός αέρας ρέει πάνω στη σανίδα με το PCM, η οποία αποτελεί το κάτω μέρος του χώρου της οροφής. Επιπλέον, όλη η σανίδα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση, καθώς ο ψυχρός αέρας ρέει μέσω του χώρου της οροφής χωρίς να διακόπτεται από ακτίνες. Τέλος, αφού η θερμοκρασία της επιφάνειας της σανίδας μπορεί να διατηρηθεί κοντά στο σημείο τήξης του PCM, τότε το εσωτερικό θερμικό περιβάλλον μπορεί να βελτιωθεί.

Στα αριθμητικά αποτελέσματα των μετρήσεων βρέθηκε, καταρχήν, ότι η θερμοχωρητικότητα της εν λόγω σανίδας ήταν 663kJ/m^2 , δηλαδή 4,9 φορές περισσότερη από αυτήν της απλής σανίδας από πετροβάμβακα. Επιπλέον, η αύξηση της θερμοκρασίας δωματίου ήταν 2°C συγκρινόμενη με την αύξηση των 6°C , στην περίπτωση της μη ύπαρξης του PCM. Επίσης, το μέγιστο του θερμικού φορτίου της σανίδας με το PCM ήταν το 85,2% του μεγίστου της σανίδας από πετροβάμβακα. Η μείωση αυτή του θερμικού φορτίου είχε ως αποτέλεσμα και τη μείωση της απαίτησης ισχύος και ικανότητας από τη μονάδα AHU.

Το αποτέλεσμα αυτής της μείωσης, ήταν να μειωθεί και το κόστος λειτουργίας της μονάδας κατά 91,6% σε σχέση με αυτό της μονάδας που χρησιμοποιούσε απλές σανίδες από πετροβάμβακα. Άρα αποδείχτηκε από όλες τις παραμέτρους η αξιοπιστία της χρήσης ενισχυμένων με PCM σανίδων πετροβάμβακα για την εξομάλυνση των αιχμών του φορτίου κλιματισμού.

Ένα παθητικό σύστημα θέρμανσης χώρου για ένα κτίριο γραφείων, το οποίο ενσωματώνει PCM σε σανίδες οροφής αναπτύχθηκε από τους Gutherz και Schiler. Η σχηματική απεικόνιση του εν λόγω συστήματος δίνεται παρακάτω.



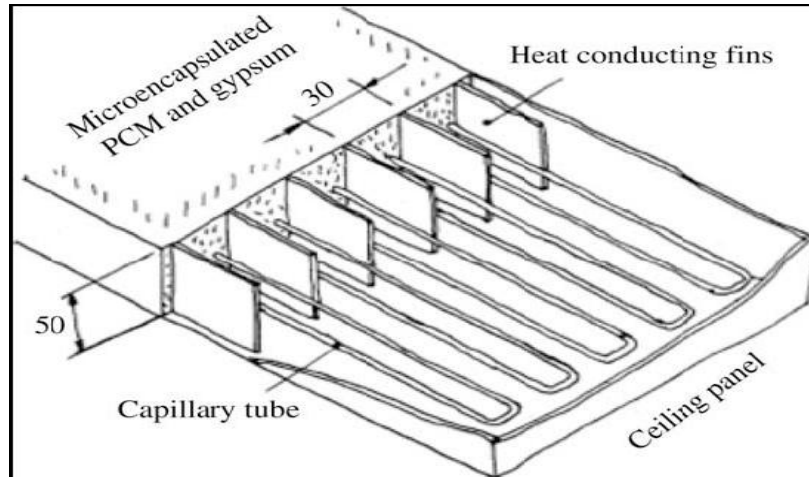
Σχήμα 4.16: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος των Gutherz και Schiler

Η προσπίπτουσα άμεση ηλιακή ακτινοβολία από ένα νότιο κατοπτρικής ανάκλασης φωτός ράφι, κατευθύνεται σε ένα μαύρο πάνελ από υλικό αλλαγής φάσης, το οποίο είναι τοποθετημένο στην οροφή. Οι συνδυασμένες ικανότητες του συγκεκριμένου πάνελ για αισθητή και λανθάνουσα αποθήκευση θερμότητας, δίνει μία μονάδα αποθήκευσης ενέργειας αυξημένης πυκνότητας. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου ήταν ότι επέτρεπε σε μία μεγάλη επιφάνεια να είναι αφιερωμένη στη θερμική αποθήκευση, χωρίς μάλιστα την ανάγκη μεγάλων όγκων αποθηκευτικού μέσου, στοιχείο που θα ήταν απαραίτητο στην περίπτωση αισθητής αποθήκευσης θερμότητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση ενός τέτοιου συστήματος έχει τη δυναμική να ανακτήσει μέχρι και 17-36% των απωλειών θερμότητας από τα αρχικά κέρδη.

4.3.7.1 Θερμικά ενεργοποιημένο πάνελ οροφής με PCM [9,22]

Αυτή η ενεργητική εφαρμογή σχετικά με τα πάνελ οροφής αναφέρεται ξεχωριστά λόγω της σπουδαιότητάς της. Σκοπός αυτής της εφαρμογής, η οποία πραγματοποιήθηκε από τους Markus Koschenz και Beat Lehmann, ήταν να χρησιμοποιηθεί ένα τέτοιο σύστημα σε ελαφρού βάρους κτίρια ή ως επιπλέον εξοπλισμός σε ήδη υπάρχοντα, ώστε να χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για τη θέρμανση ή τη ψύξη βιομηχανικών και εμπορικών κτιρίων. Η προτεραιότητα των επιστημόνων ήταν να δημιουργηθεί ένα σύστημα, το οποίο να διαθέτει μία ικανότητα θερμικής αποθήκευσης ίση με τα ημερήσια θερμικά κέρδη του κτιρίου, ενώ να απασχολεί και όσο το δυνατόν λιγότερο χώρο.

Η διάρθρωση ενός τέτοιου συστήματος ακολουθεί την παρακάτω δομή. Ένα φύλλο χάλυβα λειτουργεί ως δοχείο μεταφοράς για το σύνθετο μείγμα PCM-γύψος, ενώ επίσης βοηθάει για τη μηχανική σταθερότητα των πάνελ. Πάνω στο δίσκο από χάλυβα χύνεται ένα μείγμα από μικροκάψουλες με PCM και γύψο. Ενεργός έλεγχος της θερμικής μάζας επιτυγχάνεται από την ενσωμάτωση ενός τριχοειδούς συστήματος σωλήνων νερού στο σύνθετο του γύψου. Αν απαιτείται, η θερμική αγωγιμότητα στο μείγμα μπορεί να βελτιωθεί από την εισαγωγή πτερυγίων αλουμινίου. Η ενσωμάτωση στην οροφή ή και στους τοίχους ενός τέτοιου πάνελ είναι άμεση.



Σχήμα 4.17: Θερμικά ενεργοποιημένο πάνελ οροφής

Η λειτουργία είναι όμοια με τα υπόλοιπα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Το PCM στο πάνελ τήκεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, εξαιτίας της έκθεσής του στα θερμικά φορτία, ενώ στερεοποιείται κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν δηλαδή ψύχεται από το ενσωματωμένο σύστημα σωλήνων νερού. Η προσωρινή αποθήκευση θερμικής ενέργειας στο PCM αποσβένει το εύρος της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου, ενώ επιτρέπει η διαδικασία απόρριψης θερμότητας να μην είναι ταυτόχρονη με το θερμικό κέρδος. Η χρήση, μάλιστα, του γύψου κρατάει και το PCM σε μία αρκετά σταθερή δομή, με το απαραίτητο νερό που περικλείεται μέσα στο γύψο να βοηθάει και στην προστασία κατά της πυρκαγιάς, η οποία μπορεί να προκληθεί εξαιτίας της διαρροής της υγρής παραφίνης.

4.3.8 Υποδαπέδια ηλεκτρική θέρμανση με PCM[24-26]

Ο Athienitis και οι συνεργάτες του μελέτησαν την παροδική μεταφορά θερμότητας σε επιδαπέδια συστήματα θέρμανσης. Η μελέτη αυτή επικεντρώθηκε στην επίδραση του καλύμματος και της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στη θερμοκρασία του πατώματος και στην κατανάλωση ενέργειας. Λήφθηκε υπ' όψιν η τοποθέτηση τάπητα, ο οποίος κάλυπτε το σύνολο του πατώματος ή μέρος αυτού, καθώς και η χρήση καλυμμάτων από σκληρό ξύλο για το τσιμέντο ή για το μείγμα γύψου-τσιμέντου, τα οποία ήταν τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για θερμική αποθήκευση.

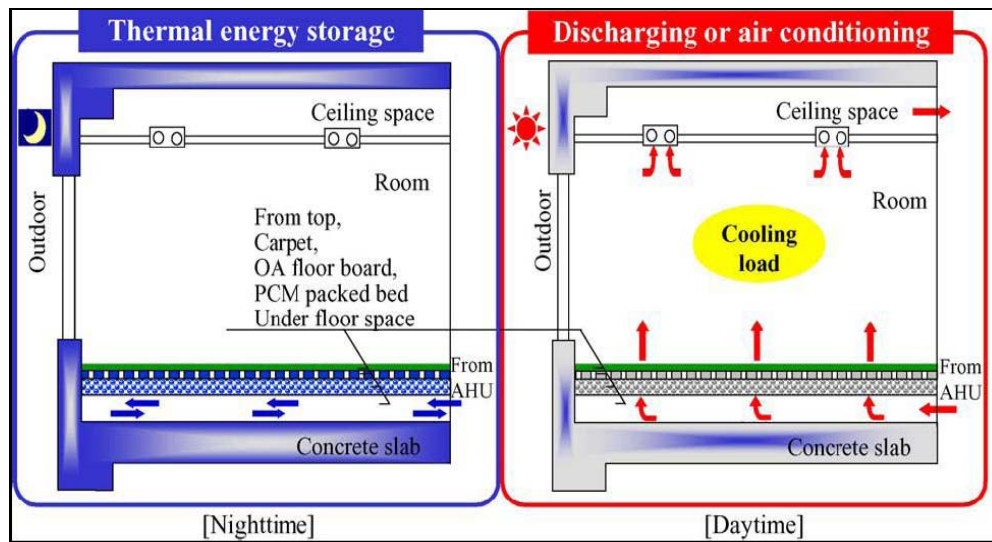
Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει, σε μία αίθρια ημέρα, τοπική τιμή θερμοκρασίας επιφάνειας πατώματος σε μία φωτισμένη περιοχή έως και 80C παραπάνω από ότι σε μία σκιασμένη περιοχή. Οι μερικοί τάπητες μπορούν να αυξήσουν περαιτέρω αυτή τη διαφορά έως και 150C, όταν απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία που αποθηκεύεται στη θερμική μάζα του πατώματος, βρέθηκε ότι μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση σε ποσοστό μέχρι και 30%.

Από αυτήν την εφαρμογή γίνεται εμφανής η δυναμική της χρήσης θερμικής μάζας στο σύστημα θέρμανσης του πατώματος ενός χώρου, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκτός περιόδου αιχμής αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Κατά αυτόν τον τρόπο, οι αιχμές του φορτίου μπορούν να μειωθούν και να μετατοπιστούν

στη νυχτερινή περίοδο, όπου το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μικρότερο. Όσον αφορά, όμως, τον τρόπο εφαρμογής μίας τέτοιας μεθόδου, υλικά με μεγάλη πυκνότητα σαν το τσιμέντο μπορούν να προκαλέσουν τις μεγάλες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας που ήδη αναφέρθηκαν.

Όμως, η χρήση των PCM μπορεί να προσφέρει μεγάλη αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας στο στενό εύρος θερμοκρασίας που συνήθως συναντάται στα κτίρια, βελτιώνοντας έτσι και τη θερμική άνεση. Γι' αυτό παρακάτω αναφέρονται εφαρμογές υποδαπέδιων συστημάτων με PCM.

Μία σχηματική απεικόνιση του συστήματος που προτάθηκε από τον Nagano δίνεται στο παρακάτω σχήμα. Σε αυτό το σύστημα, η λανθάνουσα θερμότητα αποθηκεύεται στο υλικό αλλαγής φάσης, το οποίο ενσωματώνεται άμεσα σε σανίδες δαπέδου ΟΑ σε μορφή κόκκων, οι οποίοι έχουν διάμετρο μερικά χιλιοστά. Αυτή η κλίνη με το PCM είναι διαπερατή από τον αέρα, οπότε είναι κατάλληλη για χρήση σε συστήματα παροχής κλιματιστικής ισχύος στο δάπεδο. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η κυκλοφορία του ψυχρού αέρα στον υποδαπέδιο χώρο, επιτρέπει στη ψυκτική ενέργεια να φορτίσει το σύστημα της πλάκας τσιμέντου, των σανίδων δαπέδου ΟΑ και της κλίνης με PCM, ώστε κατά τη διάρκεια της ημέρας να χρησιμοποιηθεί αυτό το σύστημα για να μεταφέρει αυτό το ψυκτικό φορτίο στο δωμάτιο.

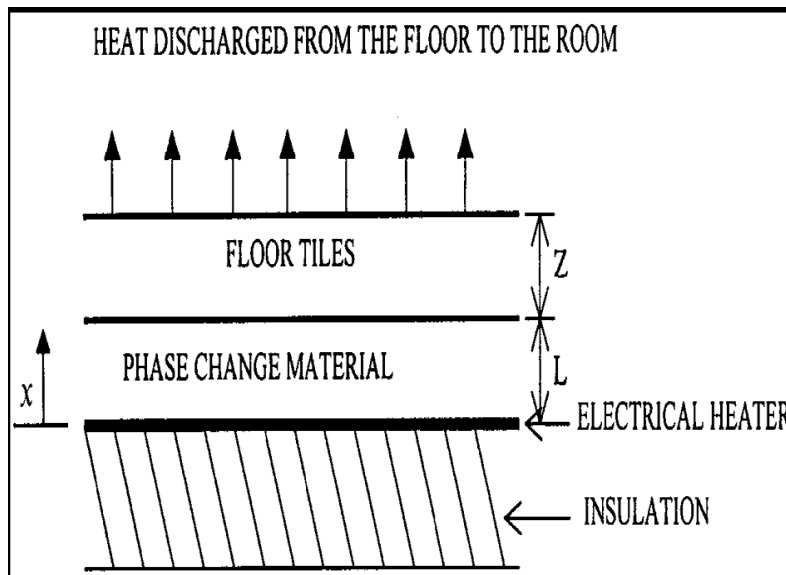


Σχήμα 4.18: Υποδαπέδιο σύστημα που προτάθηκε από τον Nagano

Τα αποτελέσματα των τεστ της θερμικής συμπεριφοράς έδειξαν ότι η επίδραση της σταθεροποίησης της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του χρόνου που συμβαίνει η αλλαγή φάσης, είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου στον οποίο παραμένει σταθερή η θερμοκρασία του δωματίου, κατά ένα παράγοντα περίπου 1,5-2,1, όταν χρησιμοποιήθηκε η κλίνη με το PCM. Επίσης, μετρήθηκε ότι κάτω από συνθήκες παροχής αέρα μέσα στο δωμάτιο κατά τη διάρκεια της νύχτας, η συνολική αποθηκευόμενη θερμότητα μέχρι το τέλος της νυχτερινής περιόδου, ήταν 1,79MJ/m². Σε αυτήν την περίπτωση η λειτουργία των συστημάτων κλιματισμού κατά τη διάρκεια της ημέρας περιορίστηκε σε 3 ώρες, δεδομένο που σημαίνει ένα βαθμό μετατόπισης των αιχμών τη νύχτα της τάξεως του 89%.

Οι Farid και Chen μελέτησαν αριθμητικά τη δυναμική ενός υποδαπέδιου ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης με ένα στρώμα PCM. Βρέθηκε ότι ένα στρώμα πάχους 30mm PCM, το οποίο έχει σημείο τήξης περίπου στους 40°C είναι αρκετό για να παρέχει θερμική αποθήκευση για μία ημέρα κάτω από τις συνθήκες περιβάλλοντος του πειράματος. Ο ηλεκτρικός θερμαντήρας που χρησιμοποιείται λειτουργεί μόνο για 8 ώρες κατά τη διάρκεια της εκτός των αιχμών λειτουργίας περιόδου, ενώ η θερμότητα που αποθηκεύεται στο υλικό αλλαγής φάσης είναι αρκετή για να παρέχει ομοιόμορφη θέρμανση σε όλη τη διάρκεια της ημέρας, οπότε η θερμική αποθήκευση μπορεί να πραγματοποιείται αποκλειστικά στην περίοδο εκτός των αιχμών λειτουργίας.

Η λειτουργία αυτή είχε ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση περίπου 7,2MJ/m² ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας από το φορτίο αιχμής σε φορτίο εκτός αιχμής. Ο Farid με τον Kong κατασκεύασαν δύο πλάκες από τσιμέντο, από τις οποίες η μία περιείχε PCM, ώστε να τις χρησιμοποιήσουν για να ελέγξουν το παραπάνω σύστημα. Αντίθετα με την πλάκα με το απλό τσιμέντο, η ενισχυμένη πλάκα με το PCM εμφάνισε μικρότερη θερμοκρασιακή διακύμανση στην επιφάνεια και διατήρησε μία αποδεκτή επιφανειακή θερμοκρασία σε όλη τη διάρκεια της ημέρας, αν και η διαδικασία θέρμανσης πραγματοποιήθηκε μόνο για 8 ώρες.



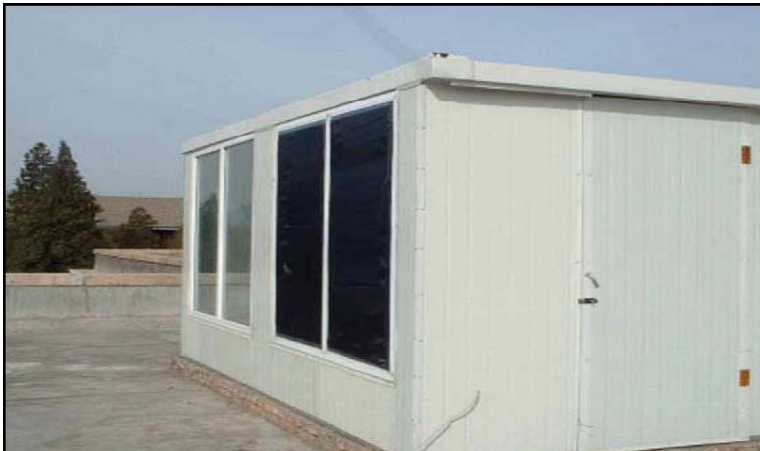
Σχήμα 4.19: Σχηματική απεικόνιση του υποδαπέδιου ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης με χρήση στρώματος PCM από τους Farid και Chen

Άλλη εφαρμογή ήρθε από τον Amir και τους συνεργάτες του, οι οποίοι εξέτασαν τη θερμική συμπεριφορά δύο ηλεκτρικά θερμαινόμενων πάνελ δαπέδου, τα οποία περιείχαν νερό και παραφίνη (ν-δεκαοκτάνιο) αντίστοιχα. Τα πάνελ χρησιμοποιήθηκαν σε μία κατασκευή από τσιμέντο, η οποία αποθήκευε ηλεκτρική ενέργεια στη μορφή θερμικής ενέργειας στη διάρκεια της περιόδου εκτός των αιχμών λειτουργίας και την απελευθέρωνε στις ώρες αιχμής. Διαπιστώθηκε ότι το πάνελ με την παραφίνη, το οποίο ήταν περισσότερο συμπαγές από αυτό με το νερό (134mm πάχος σε σχέση με τα 152mm του δεύτερου), αποθήκευε περισσότερη ενέργεια (2880 έναντι 2415kJ/m²) και επίσης παρείχε μεγαλύτερη θερμική άνεση, καθώς οι ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας ήταν λιγότερο σημαντικές σε αυτήν την περίπτωση (1,3 έναντι 3,8°C).

4.3.8.1. Υποδαπέδια ηλεκτρική θέρμανση με τη χρήση ``σταθερής μορφής`` πλακών με PCM

Επιλέγεται να αναφερθεί αυτή η εφαρμογή, των Lin,Xu και των συνεργατών τους, ξεχωριστά διότι προβάλλει ένα καινούριο είδος υποδαπέδιου ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης με χρήση των ``σταθερής μορφής`` (shape-stabilized) πλακών με PCM, για τα οποία έχει ήδη γίνει αναφορά στο 2^ο Κεφάλαιο. Η ιδιότητα αυτών των σύνθετων υλικών να μπορούν να διατηρούν σταθερό το σχήμα τους όσο η θερμοκρασία λειτουργίας είναι κάτω από το σημείο τήξης του υποστηρικτικού υλικού, ακόμα και αν το PCM μεταβαίνει από τη μία φάση στην άλλη, τα καθιστά κατάλληλα για χρήση σε θερμική αποθήκευση στα κτίρια και μάλιστα χωρίς ανάγκη για ενσωμάτωση σε κάψουλες.

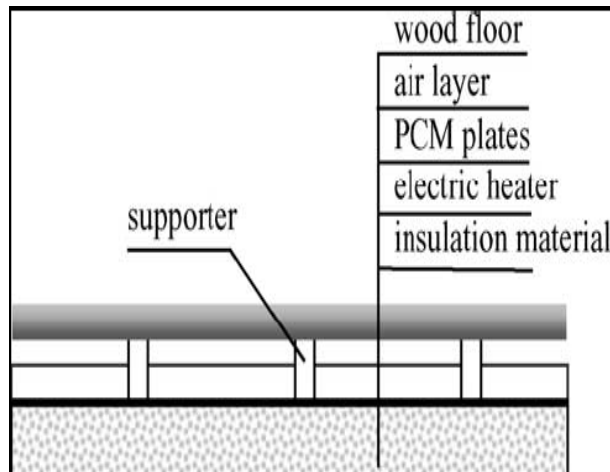
Το είδος ``σταθερής μορφής`` πλακών PCM που αναπτύχθηκε από τους επιστήμονες, περιείχε 75% κατά βάρος παραφίνη ως διάσπαρτο υλικό και 25% κατά βάρος πολυαιθυλένιο ως υποστηρικτικό υλικό. Προκειμένου να ελεγχθεί η λειτουργία αυτών των πλακών, κατασκευάστηκε ένα πειραματικό σπίτι στο Πανεπιστήμιο της Tsinghua, στο Πεκίνο, στην Κίνα, απεικόνιση του οποίου παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.20: Απεικόνιση του πειραματικού σπιτιού με shape-stabilized πλάκες με PCM.

Το σπίτι αυτό ήταν εξοπλισμένο με υποδαπέδιο ηλεκτρικό σύστημα συμπεριλαμβανομένων των shape-stabilized πλακών PCM. Το δάπεδο, το οποίο είναι και αυτό που ενδιαφέρει τη συγκεκριμένη εφαρμογή, περιλάμβανε μόνωση από πολυστυρένιο πάχους 120mm, ηλεκτρικούς θερμαντήρες, PCM σε πάχος 15mm, μερικούς ξύλινους υποστηρικτές, ένα στρώμα αέρα 10mm και ένα ξύλινο δάπεδο 8mm.

Οι παρακάτω εικόνες δείχνουν τη δομή του συστήματος θέρμανσης και εικόνες ξεχωριστά των θερμαντήρων, των πλακών με PCM και των ξύλινων δαπέδων που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή.



Σχήμα 4.21: Απεικόνιση του ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης με τις shape-stabilized πλάκες με PCM.



Σχήμα 4.22: Ηλεκτρικοί θερμαντήρες, shape-stabilized PCM πλάκες, ξύλινα δάπεδα

Η περίοδος που απαιτείται θέρμανση στο Πεκίνο είναι από 15 Νοεμβρίου μέχρι 15 Μαρτίου. Η μέση θερμοκρασία σε αυτές τις ημέρες είναι περίπου $-1,30^{\circ}\text{C}$. Όμως, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν την περίοδο του Απριλίου, οπότε η μέση θερμοκρασία ήταν $13,60^{\circ}\text{C}$. Ως εκ τούτου, οι μετρούμενες εσωτερικές θερμοκρασίες ήταν υψηλές, εξαιτίας της υψηλής εξωτερικής θερμοκρασίας τον Απρίλιο, ενώ η ταλάντωση των εσωτερικών θερμοκρασιών ήταν μεγάλη, εξαιτίας της μικρής θερμικής χωρητικότητας του σπιτιού.

Μετρήθηκε ότι η μέση εσωτερική θερμοκρασία του σπιτιού ήταν 20oC και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της ημέρας και της νύχτας ήταν 12oC, χωρίς ηλεκτρική θέρμανση. Όταν εφαρμόστηκε νυχτερινή ηλεκτρική θέρμανση, μετρήθηκε η μέση εσωτερική θερμοκρασία 31oC, ενώ η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της ημέρας και της νύχτας διατηρήθηκε περίπου στους 12oC. Άρα, το εν λόγω σύστημα αύξησε την εσωτερική θερμοκρασία, ενώ δεν αύξησε την ταλάντωσή της.

Η θερμοκρασία της ανώτερης επιφάνειας των πλακών με PCM διατηρήθηκε πάνω από τους 45oC για περισσότερο από 10 ώρες, αφού οι θερμοαντήρες είχαν σταματήσει να λειτουργούν. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο εσωτερικών σημείων μέτρησης (σε δύο διαφορετικά ύψη) ήταν λιγότερο από 0,5oC, στοιχείο που δείχνει ότι επικρατούσε υψηλή αίσθηση θερμικής άνεσης. Επίσης, οι απώλειες της θερμικής ενέργειας από τη μόνωση δεν ήταν περισσότερες από το 15%, ενώ περίπου 3,3kWh ηλεκτρικής ενέργειας μετατοπίστηκαν από τις ώρες αιχμής σε περίοδο εκτός των αιχμών λειτουργίας, ποσότητα που ήταν περίπου το 54% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Αυτό το γεγονός μπορούσε να προσφέρει σημαντικό ενεργειακό όφελος από τη διαφορετική κοστολόγηση της ενέργειας μεταξύ της ημέρας και της νύχτας.

Βιβλιογραφία 4^ο 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. A.Pasupathy, R.Velraj, R.V.Seeniraj, Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments
10. Vineet Veer Tyagi, D.Buddhi, PCM thermal storage in buildings: A state of art
11. Atul Sharma, V.V.Tyagi, C.R.Chen, D.Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications
12. D.W.Hawes, D.Feldman, D.Banu, Latent heat storage in building materials
13. <http://www.ecohookups.com/profiles/blogs/melting-walls-that-heat-and>

14. Luisa F.Cabeza, Cecilia Castellon, Miquel Nogues, Marc Medrano, Ron Leppers, Oihana Zubillaga, Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings
15. Meng Zhang, Mario A.Medina, Jennifer B.King, Development of a thermally enhanced frame wall with phasechange materials for on-peak air conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings
16. A.Castell, I.Martorell, M.Medrano, G.Perez, L.F.Cabeza, Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling
17. Esam M.Alawadhi, Thermal analysis of a building brick containing phase change material
18. K.A.R.Ismail, J.R.Henriquez, Thermally effective windows with moving phase change material curtains
19. 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
20. T.Kondo, T.Ibamoto, S.Iwamoto, Research on thermal storage using rock wool PCM ceiling board
21. James M.Gutherz, Marc E.Schiler, A passive solar heating system for the perimeter zone of office buildings
22. Markus Koschenz, Beat Lehmann, Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings
23. Na Zhu, Zhenjun Ma, Shengwei Wang, Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials:A review
24. 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
25. 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
26. M.M.Farid,X.D.Chen, Domestic electrical space heating with heat storage

ΜΕΡΟΣ 2^ο : **Θεωρητική προσομοίωση των Υλικών Αλλαγής Φάσης στον κτιριακό τομέα**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

«Θεωρητική προσομοίωση»

Περιγραφή της προσομοίωσης και τυπολόγιο [1,2,3]

Η αξιοπιστία της χρήσης των PCM σε πρακτικές εφαρμογές είναι πολύ σημαντικό να αποδειχθεί. Για αυτόν τον λόγο πραγματοποιείται στο 2ο μέρος της εργασίας μία μελέτη σχετικά με τη χρήση PCM σε μία απλή, αλλά πολύ χρήσιμη εφαρμογή στον κτιριακό τομέα.

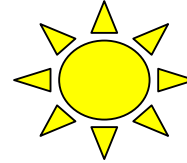
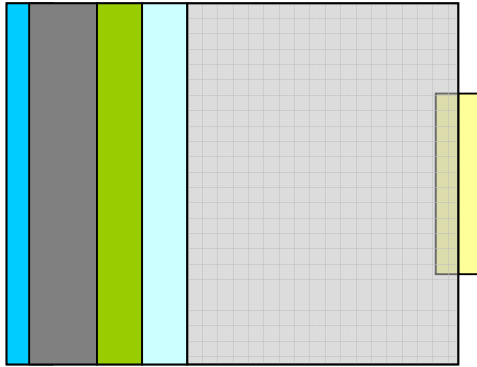
Ο στόχος της παρούσας μελέτης είναι να διαπιστωθεί η συμπεριφορά του PCM, όταν χρησιμοποιείται σε ανάμιξη με τον σοβά σε νότιο εσωτερικό τοίχο δωματίου απέναντι από υαλοπίνακα, για την παθητική ηλιακή θέρμανση του στην περιοχή της Αθήνας για τους χειμερινούς μήνες του έτους.

Εξετάζονται κυρίως οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM ανάλογα με την περιεκτικότητα του στο μίγμα PCM-σοβά τους χειμερινούς μήνες που δεν έχουμε υψηλές τιμές στην ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό επιτυγχάνεται με ορισμένες παραμετρικές μελέτες στις οποίες μεταβάλλονται διάφοροι παράγοντες όπως η ποσότητα του PCM στο μείγμα PCM-σοβά, το πάχος της διαστρωμάτωσης αυτού του μείγματος, ο μήνας μελέτης, η θερμοκρασία του δωματίου και ο αριθμός των δωματίων με τα οποία συναλλάσσεται θερμότητα..





Παρακάτω αναλύονται η κτιριακή διάταξη που χρησιμοποιείται, τα δεδομένα που λαμβάνονται και παραμένουν σταθερά σε όλες τις παραμετρικές μελέτες, οι σχέσεις που εφαρμόζονται και οι παραδοχές που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς.

Προσομοίωση δωματίου

Θεωρείται δωμάτιο στην περιοχή της Αθήνας με υαλοπίνακα στον νότιο εσωτερικό τοίχο.



Νότος

-  Σοβάς- 20mm
-  Οπτοπλινθοδομή 90mm
-  Μόνωση 50mm
-  Μεταβλητό στρώμα σοβά-PCM 40mm

Διαστάσεις δωματίου:

- Μήκος : 4m
- Πλάτος : 3m
- Ύψος : 3m

Διαστάσεις υαλοπίνακα :

- Πλάτος : 1m
- Ύψος : 2m

Συνεπώς προκύπτουν :

Διατομή νοτίου τοίχου_ $A = (\text{πλάτος δωμ}) * (\text{ύψος δωμ}) = (3\text{m}) * (3\text{m}) = 9 \text{ m}^2$

Διατομή υαλοπίνακα $A_{\pi} = (\text{πλάτος υαλοπ}) * (\text{ύψος υαλοπ}) = (1\text{m}) * (2\text{m}) = 2\text{m}^2$
Γεωγραφικό πλάτος για την περιοχή της Αθήνας $\varphi = 37,97^\circ$ ή $\varphi = 0,6627 \text{ rad}$

Θα χρειαστούμε τις σχέσεις της μέσης στιγμιαίας άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου G_b και G_d , οι οποίες δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$G_b = M_t + A_t \sin \left(\frac{360}{365} D - P_t \right) \quad (1)$$

$$G_d = mt + at \sin\left(\frac{360}{365}D - Pt\right) \quad (2)$$

Η σταθερά D παίρνει τιμές από $1 \div 365$ ανάλογα με την ημέρα του έτους που μελετάμε ενώ οι υπόλοιπες σταθερές των παραπάνω σχέσεων λαμβάνονται από τον ακόλουθο πίνακα για τις αντίστοιχες ώρες μελέτης:

Πίν. 5.1: Σταθερές για τον υπολογισμό των G_b G_d

Time t	Mt	At	Pt	mt	at	Pt
hrs LST		KW/m2	Degrees		KW/m2	Degrees
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

Επίσης χρειαζόμαστε τα παρακάτω μεγέθη τα οποία υπολογίζονται ως εξής:

R_b : Λόγος της άμεσης ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου:

$$R_b = \frac{\sin \delta * \sin(\phi - \beta) + \cos \delta * \cos(\phi - \beta) * \cos \omega}{\sin \delta * \sin \phi + \cos \delta * \cos \phi * \cos \omega} \quad (3)$$

Τα μεγέθη στην παραπάνω σχέση υπολογίζονται ως εξής:
Εφόσον ο τοίχος μελέτης είναι κατακόρυφος $\beta = 90^\circ$

δ : Ηλιακή απόκλιση

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360(284 + n)}{365}\right) \quad (4)$$

όπου (n) είναι ο αύξων αριθμός της ημέρας του έτους που μελετάται.
 ω : Ωριαία γωνία

$$\omega = \pm 0,25 \text{ (min από 12:00)} \quad (5)$$

Για τις ώρες μετά το ηλιακό μεσημέρι χρησιμοποιείται το θετικό πρόσημο, ενώ το αρνητικό πρόσημο χρησιμοποιείται για τις ώρες πριν το ηλιακό μεσημέρι.

Τα παραπάνω μεγέθη χρησιμοποιούνται τελικά για τον υπολογισμό της στιγμιαίας ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου G_T από την σχέση:

$$G_T = G_b R_b + G_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (G_d + G_b) \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (6)$$

Η σταθερά $\rho = 0,2$ και συμβολίζει την ανακλαστικότητα του εδάφους (για συνηθισμένο έδαφος)

Οι ώρες δύσης και ανατολής υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις, στις οποίες με N συμβολίζεται η διάρκεια της ημέρας:

$$\text{time}_{\text{δύσης}} = 12 + \frac{N}{2} \quad (7)$$

$$\text{time}_{\text{ανατολής}} = 12 - \frac{N}{2} \quad (8)$$

$$N = \frac{2}{15} \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (9)$$

Οι ώρες δύσης και ανατολής υπολογίζονται ώστε να αποκλειστούν κάποιες τιμές ως μη αποδεκτές

Χαρακτηριστικά PCM και σοβά

Το υλικό αλλαγής φάσης επιλέγεται αυθαίρετα.

Τα μεγέθη του PCM, τα οποία θα χρησιμοποιήσουμε παρακάτω, είναι:

- Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης, ορίζεται από τη θερμοκρασία έναρξης της τήξης T_s και τη θερμοκρασία ολοκλήρωσης της τήξης ή στερεοποίησης **Tl**
- Θερμότητα αλλαγής φάσης ή αλλιώς θερμότητα της τήξης, συμβολίζεται ως **H**
- Πυκνότητα συμβολίζεται ως **ρ**
- Ειδική θερμική αγωγιμότητα συμβολίζεται ως **κ**
- Ειδικές θερμοχωρητικότητες για τα σημεία έναρξης της τήξης και ολοκλήρωσης της τήξης, οι οποίες συμβολίζονται από τα μεγέθη και **Cps** και **Cpl** αντίστοιχα.

Επίσης θα χρειαστούμε για τους υπολογισμούς μας και δύο βοηθητικά μεγέθη και είναι τα εξής:

- Η θερμοκρασία στο μέσο του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης **$T_c = (T_l + T_s)/2$**
- Το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης **$b = T_l - T_s$**

Η ειδική θερμοχωρητικότητα κατά τη διάρκεια αλλαγής φάσης μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM.

Χρησιμοποιώντας για την προσομοίωση της αλλαγής φάσης την μέθοδο της ενεργούς θερμοχωρητικότητας, όπως αυτή περιγράφηκε στο πρώτο μέρος της παρούσας εργασίας, οι σχέσεις που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της ειδικής θερμοχωρητικότητας λόγω αυτής της μεταβολής παρουσιάζονται παρακάτω:

$$\begin{aligned} T \leq T_s \\ C_{p\text{eff}} = C_{ps} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} T_s \leq T \leq T_c \\ C_{p\text{eff}} = 4 \cdot (H - b \cdot C_{ps}) \cdot (T - T_s) / b^2 + C_{ps} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} T_c \leq T \leq T_l \\ C_{p\text{eff}} = 4 \cdot (b \cdot C_{pl} - H) \cdot (T - T_s - (b/2)) / b^2 + (2 \cdot H / b) - C_{pl} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} T \geq T_l \\ C_{p\text{eff}} = C_{pl} \end{aligned} \quad (13)$$

Εκτός όμως από τα χαρακτηριστικά του PCM θα χρειαστούμε και τα χαρακτηριστικά του σοβά αφού όπως αναφέραμε και παραπάνω στην εσωτερική διαστρωμάτωση του τοίχου θα χρησιμοποιήσουμε μία μίξη του PCM με σοβά.

Χαρακτηριστικά του σοβά

- Πυκνότητα σοβά $\rho = 1860 \text{ kg/m}^3$
- Ειδική θερμοχωρητικότητα σοβά $C_p = 835 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

Στο μείγμα όμως των PCM-σοβά η πυκνότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητα θα υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις ανάλογα με το ποσοστό του κάθε υλικού στο μείγμα αφού .Οι εξισώσεις είναι:

$$\rho_{\text{μείγ}} = X_{\text{PCM}} \rho_{\text{PCM}} + X_{\text{σοβά}} \rho_{\text{σοβά}} \quad (14)$$

$$C_{p\text{μείγ}} = X_{\text{PCM}} C_{p\text{eff}}(T) + X_{\text{σοβά}} C_{p\text{σοβά}} \quad (15)$$

Μαθηματικό μοντέλο

Η αρχική μορφή της βασικής εξίσωσης η οποία θα εφαρμοστεί προκύπτει από έναν ισολογισμό ενέργειας και είναι η εξής:

$$Q_{\text{απορροφούμενη από PCM-σοβά}} = Q_{\text{ακτινοβολίας προς PCM-σοβά}} - Q_{\text{συναγωγής PCM-δωμ}} \quad (16)$$

Παραδοχές:

- Θεωρείται αδιαβατικό όριο μεταξύ της διαστρωμάτωσης PCM-σοβά και της μόνωσης, για την αποφυγή συναλλαγής θερμότητας.
- Η θερμοκρασία μέσα στο δωμάτιο θεωρείται σταθερή και ομοιόμορφη.
- Η θερμοκρασία στην διαστρωμάτωση PCM-σοβά θεωρείται ομοιόμορφη.

Q_{ακτινοβολίας προς PCM-σοβά}

Είναι η θερμότητα που προσπίπτει στο μείγμα από την ηλιακή ακτινοβολία και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q_{\text{ακτινοβολίας προς PCM-σοβά}} = 0,85 \text{ GT } 3600 \text{ Απ} \quad (17)$$

Μετά από την παραδοχή ότι υπάρχει ένα ποσοστό της τάξης του 10% της ακτινοβολίας που προσπίπτει στον υαλοπίνακα που απορροφάται από αυτόν και επίσης ότι υπάρχει ένα ποσοστό της τάξης του 5% της ακτινοβολίας που εισέρχεται στο χώρο που απορροφάται από τον άερα του εσωτερικού περιβάλλοντος τελικά καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι στον τοίχο μελέτης προσπίπτει το 85% της αρχικής υπολογισθείσας ακτινοβολίας. Άρα θα πάρουμε ένα ποσοστό 85% της ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου για τους υπολογισμούς μας.

Q_{απορροφούμενη από PCM-σοβά}

Είναι η θερμότητα που απορροφάται από το μίγμα και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q_{\text{απορροφούμενη από PCM-σοβά}} = m_{\text{μειγ}} C_{p\text{μειγ}} (T_{\text{PCM}^1} - T_{\text{PCM}^0}) \quad (18)$$

Q_{συναγωγής PCM-δωμ}

Είναι η θερμότητα που προσφέρεται από το υλικό αλλαγής φάσης στον εσωτερικό χώρο, και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q_{\text{συναγωγής PCM-δωμ}} = U A (T_{\text{PCM}^0} - T_{\text{δωμ}}) 3600 \quad (19)$$

Όπου :

Ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ εσωτερικού τοίχου και εσωτερικού περιβάλλοντος έχει την τιμή που προτείνει η ASHRAE και είναι :

$U = h_{in} = 8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ αφού δεν μεσολαβεί άλλο στρώμα υλικού μεταξύ του δωματίου με το μίγμα σοβά-PCM

Η μάζα του μείγματος θα εκφραστεί ως γινόμενο της πυκνότητας του μείγματος και του όγκου που καταλαμβάνει:

$$m_{\text{μειγ}} = \rho_{\text{μειγματος}} V_{\text{μειγματος}} \quad (20)$$

με τον όγκο

$$V_{\text{μειγματος}} = (\text{πάχος}) (\text{ύψος}) (\text{πλάτος}) = 0,04 * 3 * 3 = 0,36 \text{m}^3$$

με βάση τα αρχικά δεδομένα για το πάχος της διαστρωμάτωσης του μείγματος PCM – σοβά το ύψος και το πλάτος του δωματίου.

Συνεπώς , από εξ.17,18,19,20 η εξ 16 γίνεται:

$$C_{\rho_{\text{μειγματος}}} \rho_{\text{μειγματος}} V_{\text{μειγματος}} (T_{\text{PCM}}^1 - T_{\text{PCM}}^0) = \frac{0,85 G_T 3600}{A\pi - U A (T_{\text{PCM}}^0 - T_{\text{δωμ}}) 3600} \quad (21)$$

5.1 Παραμετρική μελέτη ως προς την περιεκτικότητα PCM για ένα 24ωρο

Σκοπός της μελέτης αυτής είναι να εξετάσουμε την συμπεριφορά του PCM για διαφορετικές περιεκτικότητες των υλικών (σοβάς και PCM) στο μείγμα Σοβά – PCM για ένα 24ωρο για τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο.

ΒΗΜΑ 1- D,δ

Επιλέγετε για την μελέτη η 21^η μέρα κάθε μήνα που θα εξεταστεί και υπολογίζετε ανάλογα με την ημέρα η ηλιακή απόκλιση 'δ' από εξ.(4) :

21 Νοεμβρίου : D=325 → n=325 → δ=. -20,4415° = -0,35677rad
21 Δεκεμβρίου : D=355 → n=355 → δ=. -23,4498° = -0,40928rad
21 Ιανουαρίου : D=21 → n=21 → δ=. -20,138° = -0,35147rad
21 Φεβρουαρίου : D=51 → n=51 → δ=. -11,579° = -0,20209rad
21 Μαρτίου : D=80 → n=80 → δ=. -40,365° = -0,00705rad

ΒΗΜΑ 2- G_b, G_d, G_T

Υπολογίζουμε με την βοήθεια του Πιν.5.1 την μέση στιγμιαία άμεση ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου G_b εξ.(1) και την μέση στιγμιαία διάχυτη ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου G_d εξ.(2)

Επίσης υπολογίζουμε την στιγμιαία ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου G_T εξ.(6) αφού πρώτα υπολογιστούν η ωριαία γωνία ω εξ.(5) και ο λόγος άμεσου ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεση ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου R_b εξ.(3)

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών μας παρουσιάζονται παρακάτω:

Πιν.5.1.1 : G_b, G_d, G_T Νοεμβρίου

t	G _b (W/m ²)	G _d (W/m ²)	Ω	R _b	G _T (W/m ²)
7:00	0	0	-75	0	0
8:00	2,523302	26,183	-60	3,648465	25,16832
9:00	36,37212	96,95508	-45	2,221369	142,6062
10:00	89,01766	155,3967	-30	1,823222	264,4388
11:00	138,7647	187,7509	-15	1,668899	358,1114
12:00	181,5145	190,5781	0	1,626207	427,6785
13:00	193,9812	173,8639	15	1,668899	447,4515
14:00	178,2027	143,4371	30	1,823222	428,7855
15:00	134,1469	108,3712	45	2,221369	376,4272
16:00	57,73173	77,10541	60	3,648465	262,6686
17:00	0	43,91186	75	0	26,34714
18:00	0	0	90	0	0

Πιν.5.1.2 : G_b , G_d , G_T Δεκεμβρίου

T	ω	Rb	Gb(W/m ²)	Gd(W/m ²)	GT(W/m ²)
7:00	-75	0	0	0	0
8:00	-60	5,103118	0	7,103473	4,262087
9:00	-45	2,674157	15,96297	75,29287	89,45953
10:00	-30	2,103636	63,31021	132,5859	219,0643
11:00	-15	1,892943	106,9737	166,6225	313,1661
12:00	0	1,835635	141,3152	176,0958	379,1923
13:00	15	1,892943	151,3624	162,0405	398,8811
14:00	30	2,103636	143,3926	127,6352	392,5663
15:00	45	2,674157	103,9347	90,16649	342,431
16:00	60	5,103118	36,08627	57,75795	222,4159
17:00	75	0	0	26,42344	15,85408
18:00	90	0	0	0	0

Πιν.5.1.3 : G_b , G_d , G_T Ιανουαρίου

T	ω	Rb	Gb(W/m ²)	Gd(W/m ²)	GT(W/m ²)
7:00	-75	0	0	0	0
8:00	-60	3,540119	0	22,13981	13,2839
9:00	-45	2,182265	23,10678	89,25714	106,2901
10:00	-30	1,798062	71,73556	144,1934	222,6746
11:00	-15	1,648504	115,5118	176,6724	307,9763
12:00	0	1,607066	148,4795	187,1218	365,7375
13:00	15	1,648504	159,5753	171,9935	382,2141
14:00	30	1,798062	157,181	133,8738	378,6636
15:00	45	2,182265	117,9372	94,87813	326,0909
16:00	60	3,540119	53,95165	60,58386	232,7408
17:00	75	0	0	29,61562	17,76939
18:00	90	0	0	0	0

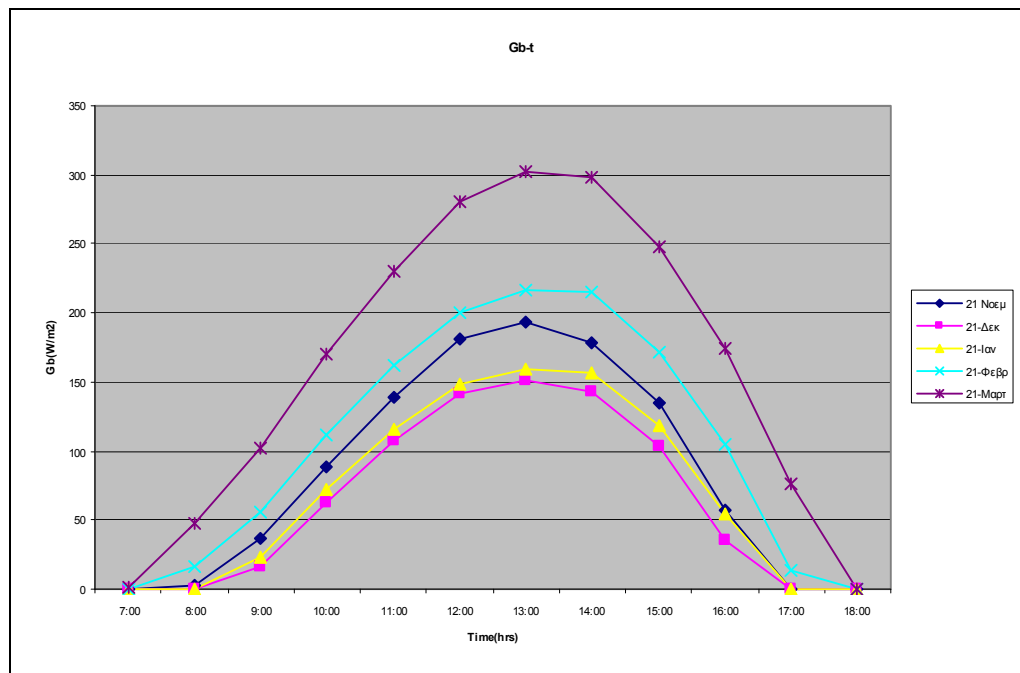
Πιν.5.1.4 : G_b , G_d , G_T Φεβρουαρίου

T	ω	Rb	Gb(W/m ²)	Gd(W/m ²)	GT(W/m ²)
7:00	-75	4,113418	0	0	0
8:00	-60	1,749829	16,0684	66,42109	69,57647
9:00	-45	1,382934	55,48936	134,3243	162,8817
10:00	-30	1,247338	111,5644	186,4589	262,1904
11:00	-15	1,18947	161,6131	214,6451	337,1824
12:00	0	1,17288	200,6863	220,0844	387,5004
13:00	15	1,18947	215,9591	200,4986	398,7721
14:00	30	1,247338	215,1011	160,132	385,8932
15:00	45	1,382934	171,6185	120,9798	327,0867
16:00	60	1,749829	105,5405	84,66771	246,0325
17:00	75	4,113418	13,39576	52,4543	87,91456
18:00	90	0	0	0	0

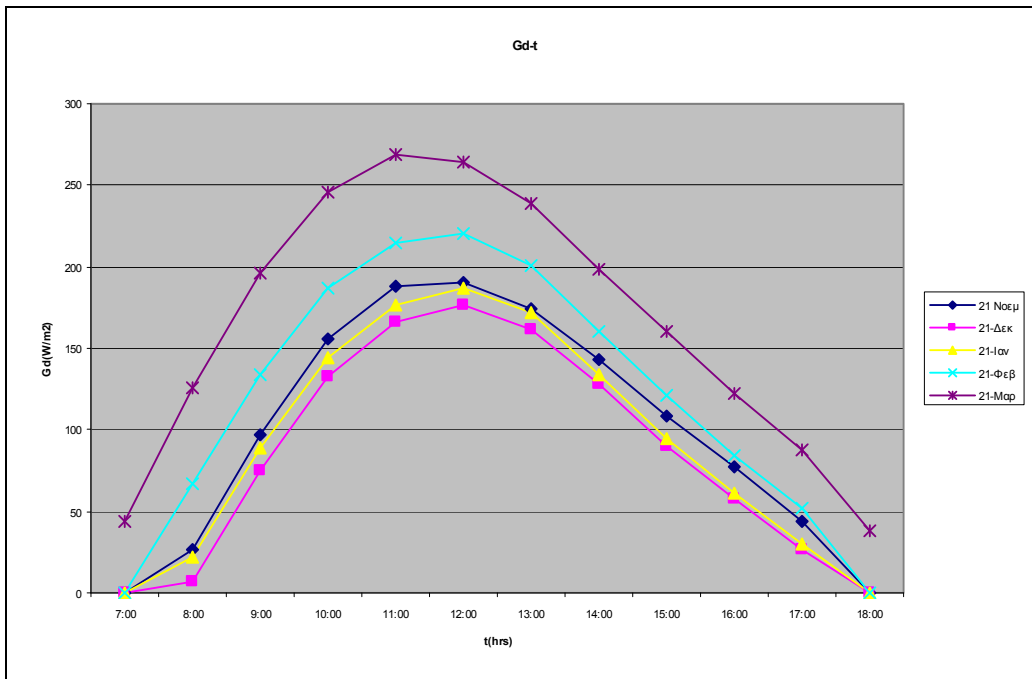
Πιν.5.1.5 : G_b , G_d , G_T Μαρτίου

T	ω	Rb	$G_b(W/m^2)$	$G_d(W/m^2)$	$G_T(kW/m^2)$
7:00	-75	0,825194	1,174228	43,49525	27,18356
8:00	-60	0,803368	47,05944	126,1453	118,1992
9:00	-45	0,796601	102,6665	196,3253	209,8461
10:00	-30	0,793617	169,9179	245,9587	299,4168
11:00	-15	0,792247	230,26	268,4456	366,5162
12:00	0	0,791842	280,7011	264,6942	409,1578
13:00	15	0,792247	301,9437	238,696	412,626
14:00	30	0,793617	298,5642	197,9813	385,5909
15:00	45	0,796601	247,8616	159,9576	318,2075
16:00	60	0,803368	174,8048	122,0152	231,1222
17:00	75	0,825194	75,83743	87,40523	122,6075
18:00	90	0	0	38,51474	23,10887

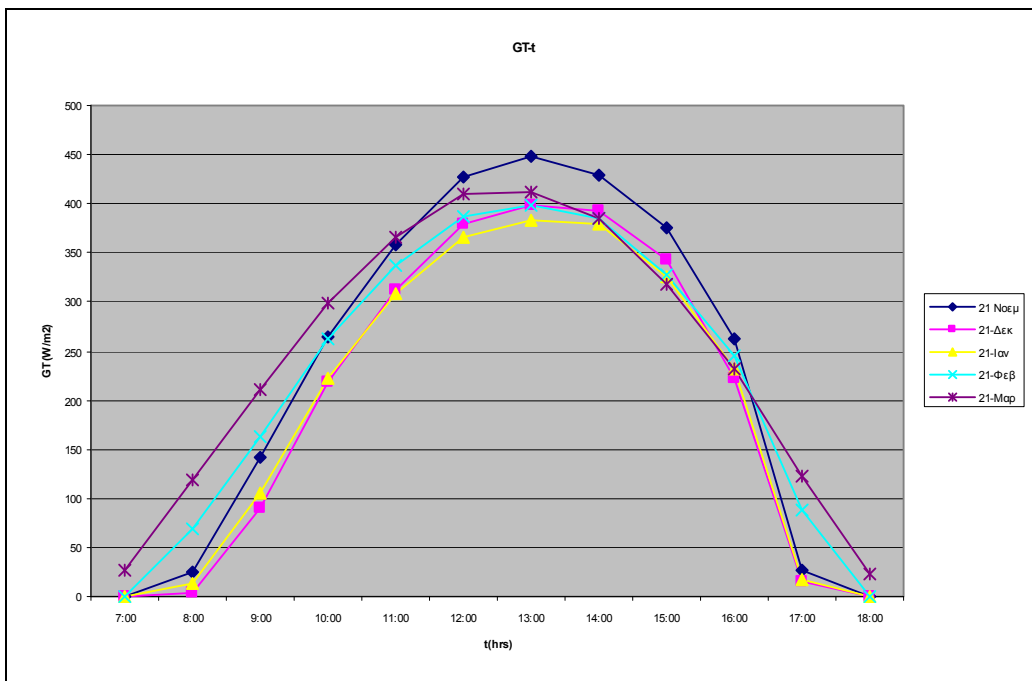
Τις υπόλοιπες ώρες της ημέρας η G_T είναι ίση με μηδέν.
 Οπότε, τα διαγράμματα G_b , G_d , G_T συναρτήσει του χρόνου προκύπτουν ως εξής:



Σχήμα 5.1.1: Μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας G_b συναρτήσει της ώρας για τους μήνες Νοέμβριο έως Μάρτιο



Σχήμα 5.1.2: Μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας G_d συναρτήσει της ώρας για τους μήνες Νοέμβριο έως Μάρτιο



Σχήμα 5.1.3: Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου G_T συναρτήσει της ώρας για τους μήνες Νοέμβριο έως Μάρτιο

Παρατηρούμε όπως ήταν αναμενόμενο πως η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει υψηλότερες τιμές κατά κύριο λόγο τον Νοέμβριο και τον Μάρτιο δηλαδή τέλος του Φθινοπώρου και αρχές της Άνοιξης ενώ χαμηλότερες τιμές παρουσιάζει τους χειμερινούς μήνες και κυρίως τον Ιανουάριο.

ΒΗΜΑ 3-PCM

Επιλέγουμε PCM με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Πίνακας 5.1.6.: Χαρακτηριστικά του PCM

T_s	20	°C
T_l	26	°C
ρ	950	kg/m ³
H	150000	J/kg
T_c	23	°C
b	6	°C
C_{ps}	4000	J/kg°C
C_{pl}	4000	J/kg°C

Συνεπώς οι εξισώσεις (10),(11),(12),(13) προκύπτουν ως εξής:

- $T \leq 20$
 $C_{p\text{eff}}=4000$
- $20 \leq T \leq 23$
 $C_{p\text{eff}}= 14000(T-20)+4000$
- $23 \leq T \leq 26$
 $C_{p\text{eff}}= -14000(T-23)+46000$
- $T \geq 26$
 $C_{p\text{eff}}=4000$

ΒΗΜΑ 4-Ποσοστό PCM (X_{pcm})

Εξετάζουμε όλα τα πιθανά ποσοστά PCM στο μείγμα PCM-Σοβά όπου X_{pcm} είναι το ποσοστό που καταλαμβάνει το PCM στο μείγμα και $X_{\text{σοβά}}$ είναι το ποσοστό που καταλαμβάνει ο σοβάς στο μείγμα.

Στον παρακάτω πίνακα έχουμε υπολογίσει την πυκνότητα $\rho_{\text{μείγ}}$ εξ.(14) και την ειδική θερμοχωρητικότητα $C_{p\text{μείγ}}$ του μείγματος εξ.(15) ανάλογα με το $C_{p\text{eff}}(T)$.

Τα χαρακτηριστικά του σοβά παραμένουν σταθερά όπως δόθηκαν παραπάνω.

Σημειώνουμε επίσης, ότι το ποσοστό $X_{\text{pcm}} = 100\%$ πρακτικά είναι αδύνατο να εφαρμοστεί όμως εξετάζεται και αυτή η περίπτωση ώστε η σύγκριση των αποτελεσμάτων να είναι ολοκληρωμένη.

Πίνακας 5.1.7: $C_{p\mu\epsilon\iota\gamma}$ και $\rho_{\mu\epsilon\iota\gamma}$ για όλες τις πιθανές περιεκτικότητες				
$X_{pcm}(\%)$	$X_{so\beta\acute{\alpha}}(\%)$	$\rho_{\mu\epsilon\iota\gamma} (kg/m^3)$	$C_{p\mu\epsilon\iota\gamma} (J/kgC)$	
0	100	1860	$T \leq 20$	835
			$20 \leq T \leq 23$	835
			$23 \leq T \leq 26$	835
			$T \geq 26$	835
10	90	1769	$T \leq 20$	1151,5
			$20 \leq T \leq 23$	$1400(T-20)+1151,5$
			$23 \leq T \leq 26$	$-1400(T-23)+5351,5$
			$T \geq 26$	1151,5
20	80	1678	$T \leq 20$	1468
			$20 \leq T \leq 23$	$2800(T-20)+1468$
			$23 \leq T \leq 26$	$-2800(T-23)+9868$
			$T \geq 26$	1468
30	70	1587	$T \leq 20$	1784,5
			$20 \leq T \leq 23$	$4200(T-20)+1784,5$
			$23 \leq T \leq 26$	$-4200(T-23)+14384,5$
			$T \geq 26$	1784,5
40	60	1496	$T \leq 20$	2101
			$20 \leq T \leq 23$	$5600(T-20)+2101$
			$23 \leq T \leq 26$	$-5600(T-23)+18901$
			$T \geq 26$	2101
50	50	1405	$T \leq 20$	2417,5
			$20 \leq T \leq 23$	$7000(T-20)+2417,5$
			$23 \leq T \leq 26$	$-7000(T-20,5)+23417,59$
			$T \geq 26$	2417,5
60	40	1314	$T \leq 20$	2734
			$20 \leq T \leq 23$	$8400(T-20)+2734$
			$23 \leq T \leq 26$	$-8400(T-23)+27934$
			$T \geq 26$	2734
70	30	1223	$T \leq 20$	3050,5
			$20 \leq T \leq 23$	$9800(T-20)+3050,5$
			$23 \leq T \leq 26$	$-9800(T-23)+32450,5$
			$T \geq 26$	3050,5
80	20	1132	$T \leq 20$	3367
			$20 \leq T \leq 23$	$11200(T-20)+3367$
			$23 \leq T \leq 26$	$-11200(T-23)+36967$
			$T \geq 26$	3367
90	10	1041	$T \leq 20$	3683,5
			$20 \leq T \leq 23$	$12600(T-20)+3683,5$
			$23 \leq T \leq 26$	$-12600(T-23)+41483,5$
			$T \geq 26$	3683,5
100	0	950	$T \leq 20$	4000
			$20 \leq T \leq 23$	$14000(T-20)+4000$
			$23 \leq T \leq 26$	$-14000(T-23)+46000$
			$T \geq 26$	4000

ΒΗΜΑ 5- $T_{\delta\omega\mu}$, T_{pcm}^0

Χρειαζόμαστε για τους υπολογισμούς μας την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου και την αρχική θερμοκρασία του PCM. Θα πάρουμε δύο τιμές αυθαίρετα:

- $T_{pcm}^0 = 25$
- $T_{\delta\omega\mu} = 20$

Το τελικό αποτέλεσμα δεν επηρεάζεται από τις αρχικές μας υποθέσεις εφόσον με τις επαναλήψεις που θα γίνουν έχουμε εξασφαλίσει την ανεξαρτησία του.

ΒΗΜΑ 6- T_{pcm}

Υπολογίζουμε τη θερμοκρασία του PCM, T_{pcm} , για όλο το 24ωρο κάθε ημέρας.

Αντικαθιστώντας στην βασική εξίσωση εξ.(21) που προκύπτει από τον ισολογισμό ενέργειας όλα τα γνωστά μεγέθη και λύνοντας ως προς T_{pcm}^1 έχουμε:

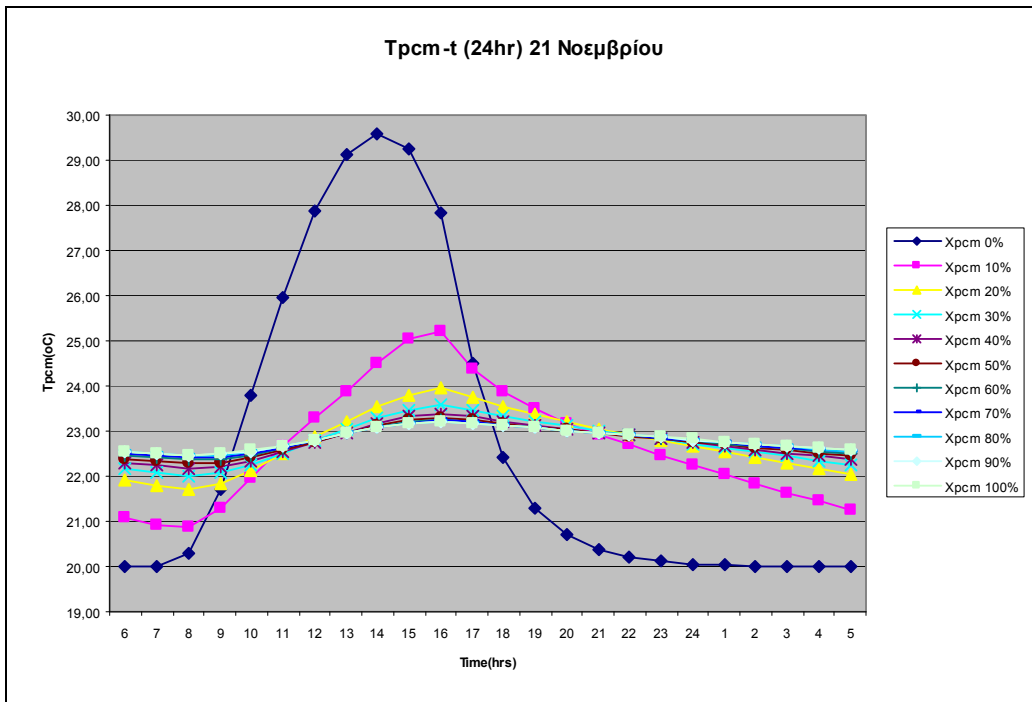
$$\boxed{T_{pcm}^1 = T_{pcm}^0 + (6120 G_T - 259200(T_{pcm}^0 - 20)) / (0,36 \rho_{μείγ} C_{p_{μείγ}})} \quad (22)$$

Εφαρμόζουμε αυτή την εξίσωση έντεκα φορές, για κάθε μήνα και για όλα δηλαδή τα πιθανά ποσοστά PCM που δίνονται στον Πιν.5.1.7. Η διαδικασία που ακολουθούμε κάθε φορά είναι η εξής:

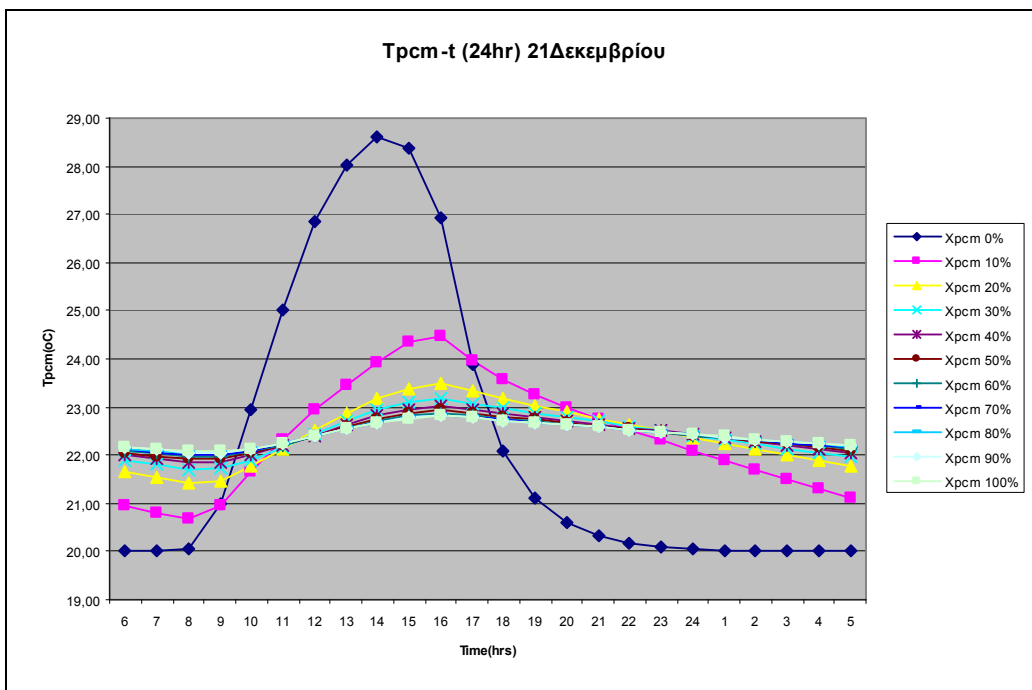
Π.χ. για $X_{pcm} = 10\%$ και $X_{σοβά} = 90\%$

- Παίρνουμε σαν αρχικές τιμές όπως είπαμε παραπάνω $T_{pcm}^0 = 25$ και $T_{\delta\omega\mu} = 20$
- Ανατρέχουμε στον Πιν.5.1.7 και βλέπουμε ότι για αυτά τα ποσοστά έχω $\rho_{μείγ} = 1775,9$ και $C_{p_{μείγ}}$ μεταβλητή ανάλογη της θερμοκρασίας του PCM.
- Αντικαθιστούμε στην εξ.22 και αρχίζουμε τους υπολογισμούς από τις 6:00 έως τις 5:00, δηλαδή για όλο το 24ωρο με βήμα μίας ώρας. Η ηλιακή ακτινοβολία G_T π.χ. για 21 Ιανουαρίου δίνεται από τον Πιν.5.1.3 για τις ώρες 9:00-16:00 και τις υπόλοιπες ώρες είναι ίση με μηδέν.
- Μετά την ολοκλήρωση των υπολογισμών, επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία λαμβάνοντας τώρα σαν αρχική τιμή για την T_{pcm} την τιμή που βρήκα για τις 5:00 της προηγούμενης επανάληψης.
- Συνεχίζουμε την ίδια διαδικασία ώσπου οι τιμές που βρίσκουμε για το 24ωρο να συγκλίνουν με εκείνες της προηγούμενης επανάληψης.

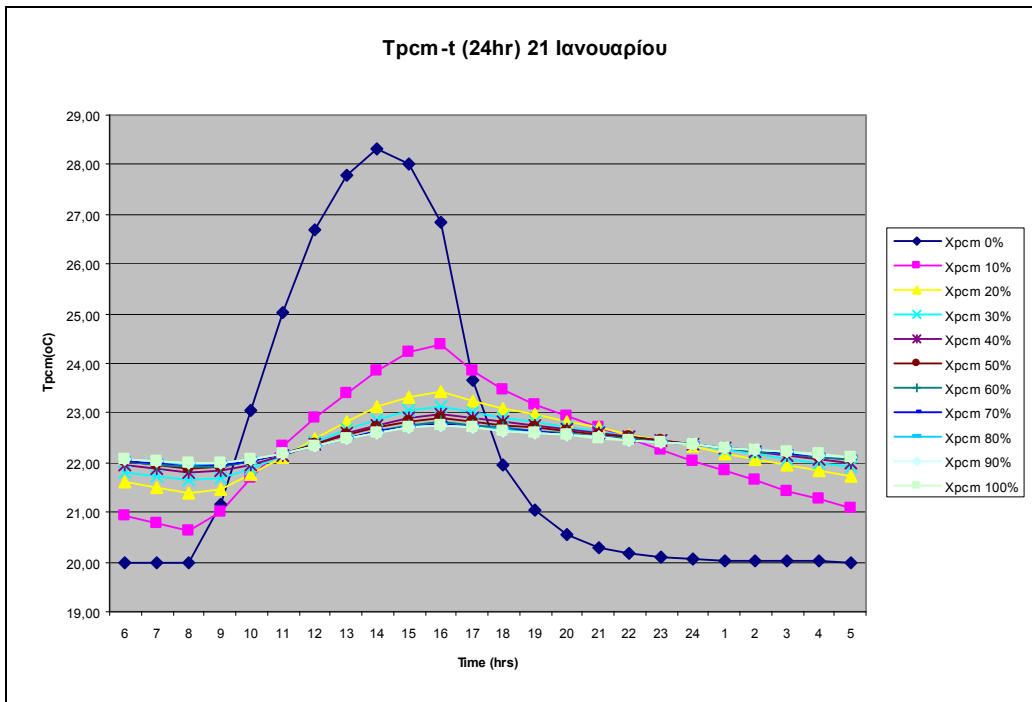
Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM συναρτήσει της ώρας για όλο το 24ωρο και για όλα τα πιθανά ποσοστά PCM όπως προέκυψαν από τους υπολογισμούς μας για τους μήνες Νοέμβριο έως Μάρτιο.



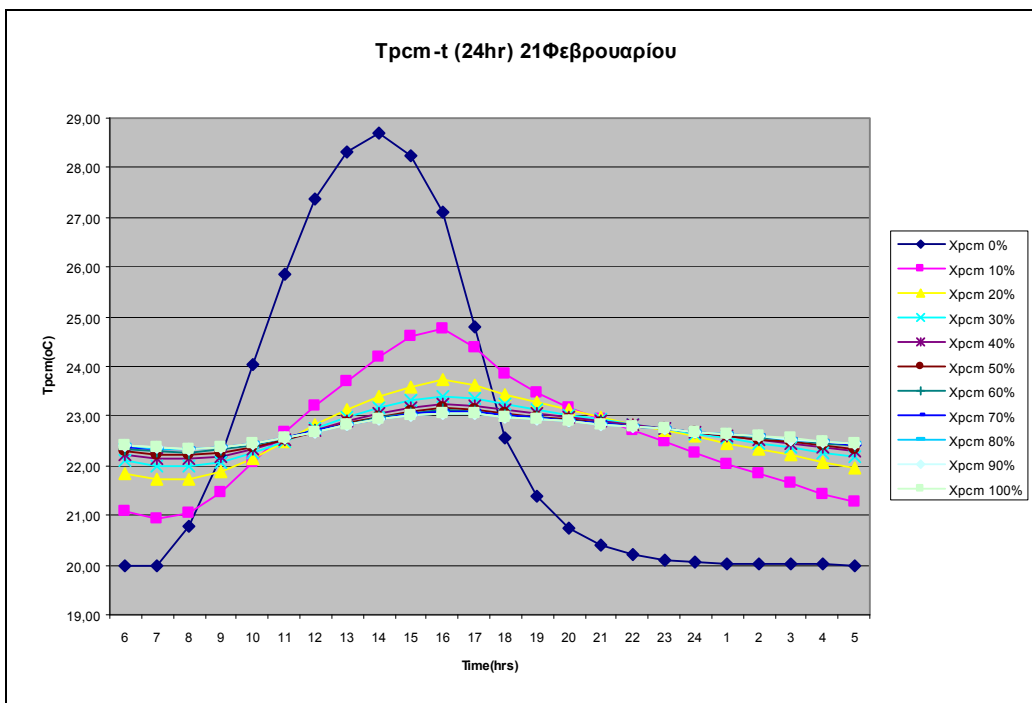
Σχήμα 5.1.4: Μεταβολή Τpcm για 21 Νοεμβρίου ανάλογα με το ποσοστό PCM για ένα 24ωρο



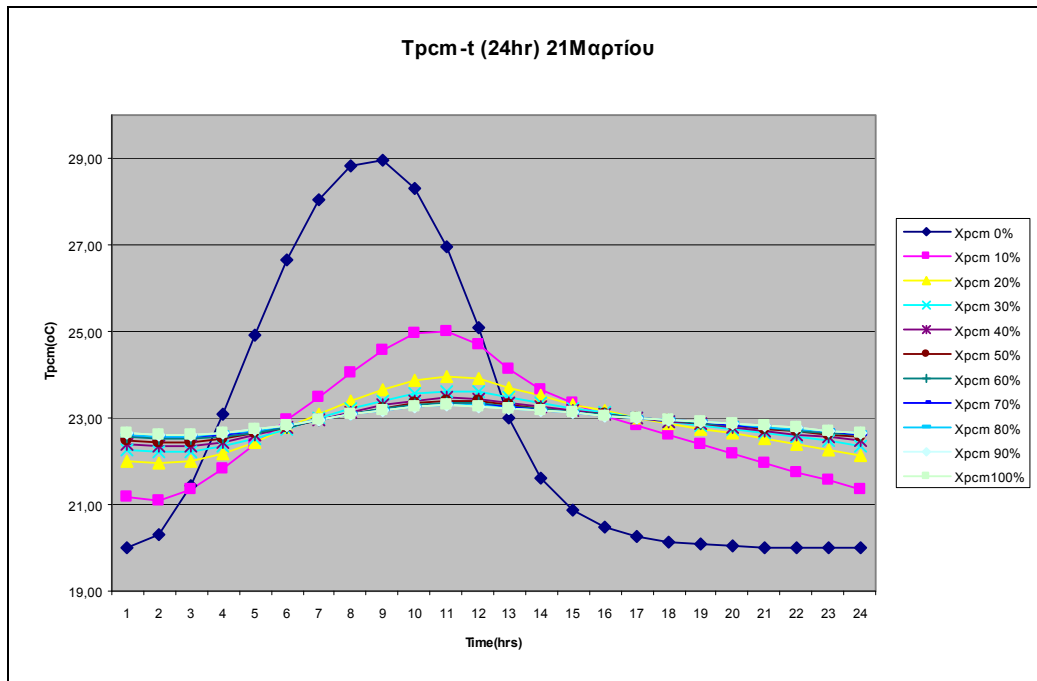
Σχήμα 5.1.5: Μεταβολή Τpcm για 21 Δεκεμβρίου ανάλογα με το ποσοστό PCM για ένα 24ωρο.



Σχήμα 5.1.6: Μεταβολή Trpcm για 21 Ιανουαρίου ανάλογα με το ποσοστό PCM για ένα 24ωρο.



Σχήμα 5.1.7: Μεταβολή Trpcm για 21 Φεβρουαρίου ανάλογα με το ποσοστό PCM για ένα 24ωρο.



Σχήμα 5.1.8: Μεταβολή T_{pcm} για 21 Μαρτίου ανάλογα με το ποσοστό PCM για ένα 24ωρο.

Παρατηρήσεις για τα διαγράμματα

Παρατηρείται ότι τον Νοέμβριο και τον Μάρτιο το PCM αναπτύσσει υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τους υπόλοιπους μήνες γεγονός που ήταν αναμενόμενο αφού η ηλιακή ακτινοβολία είναι εντονότερη κατά την διάρκεια τους σε σχέση με τους κατ' εξοχήν χειμερινούς μήνες Δεκέμβριο, Ιανουάριο και Φεβρουάριο.

Στο $X_{pcm} = 0\%$ το μείγμα αποτελείται εξ ολοκλήρου από σοβά. Επομένως η μεταβολή που παρουσιάζει η θερμοκρασία είναι η θερμοκρασία που αναπτύσσει ο σοβάς υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Οπότε, γίνεται σαφές ότι όταν το υλικό είναι μόνο σοβάς οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι πολύ μεγαλύτερες από τις περιπτώσεις συνδυασμού PCM και σοβά. Αυτό εξηγείται διότι όταν έχω μόνο σοβά τότε όλη η θερμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται προς αύξηση της θερμοκρασίας του PCM (αισθητή θερμότητα) ενώ όταν περιλαμβάνεται στο μείγμα και το PCM μέρος της ακτινοβολίας χρησιμοποιείται για την αλλαγή φάσης του υλικού (λανθάνουσα θερμότητα)

Στα υπόλοιπα ποσοστά PCM (από 10%-100%) παρατηρούμε εντονότερη μεταβολή της θερμοκρασίας. Όμως όσο το ποσοστό PCM αυξάνεται τόσο το εύρος των θερμοκρασιών μειώνετε εξαιτίας της πτώσης των μέγιστων θερμοκρασιών.

Για παράδειγμα τον Ιανουάριο (Σχ.5.1.6) στο μικρότερο ποσοστό PCM, δηλαδή το 10% έχω μέγιστη θερμοκρασία 24,38°C και ελάχιστη 20,62°C ,ενώ στο μεγαλύτερο ποσοστό PCM δηλαδή το 100% έχω πτώση της μέγιστης θερμοκρασίας στους 22,75°C και η ελάχιστη παραμένει στα ίδια επίπεδα και λίγο υψηλότερη από πριν στους 21,98 °C.

Βέβαια, η περίπτωση που δεν χρησιμοποιούμε καθόλου σοβά και έχουμε 100% υλικό αλλαγής φάσης είναι θεωρητική και δεν γίνεται να εφαρμοστεί στην πραγματικότητα.

Όμως, εξετάζοντας και αυτή την περίπτωση καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι όταν χρησιμοποιείται μεγάλο ποσοστό από το υλικό αλλαγής φάσης στο μείγμα και δεν αυξάνεται η ηλιακή ακτινοβολία τότε το PCM δεν αποδίδει καλύτερα αφού το εύρος θερμοκρασιών για τα ποσοστά 40%-100% παρουσιάζει για όλους τους μήνες μηδαμινές διαφορές.

Βέβαια θα πραγματοποιήσουμε περαιτέρω έλεγχο πέρα από τα συμπεράσματα του διαγράμματος γιατί δεν είναι δυνατόν να εξαχθεί ένα ασφαλές συμπέρασμα για το αν η αποθηκευμένη θερμότητα στο PCM είναι μεγαλύτερη στις μικρές ή στις μεγάλες περιεκτικότητες. Αυτό γίνεται εύκολα κατανοητό αν παρατηρηθεί η αρχική εξίσωση, δηλαδή η εξ.(21):

$$C_{\rho_{\text{μειγ}}} \rho_{\text{μειγ}} V_{\text{μειγ}} (T_{\text{PCM}}^1 - T_{\text{PCM}}^0) = 0,85 G_T 3600 A \pi - U A (T_{\text{PCM}}^0 - T_{\text{δωμ}}) 3600$$

όπου, όταν αυξάνεται η περιεκτικότητα σε PCM ο πρώτος όρος στο δεξί μέλος μένει σταθερός ενώ ο δεύτερος όρος στο δεξί μέλος μειώνεται καθώς οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM πέφτουν. Άρα το αριστερό μέλος πρέπει να αυξηθεί.

Το γεγονός ότι αυξάνεται το δεύτερο μέλος θα μπορούσε να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι αυξάνεται η αποθηκευόμενη θερμότητα. Αυτό το συμπέρασμα όμως είναι εσφαλμένο διότι η αύξηση αυτή μπορεί να μην είναι ποιοτική, αφού όταν αυξάνεται πολύ η μάζα, το PCM λόγω της μικρής θερμικής αγωγιμότητας αρχίζει και λειτουργεί σαν μόνωση και δεν επιτρέπει στην θερμότητα να εισχωρήσει στο εσωτερικό του PCM και να αποθηκευτεί ως ωφέλιμη λανθάνουσα θερμότητα.

Επομένως, απαιτείται περαιτέρω έλεγχος για να διαπιστωθεί αν η αποθηκευόμενη θερμότητα είναι περισσότερη στις μικρές ή στις μεγάλες περιεκτικότητες ο οποίος πραγματοποιείται στο επόμενο βήμα.

ΒΗΜΑ 7- C_{peff} , T_{PCM}

Για να διαπιστωθεί αν η αποθηκευόμενη θερμότητα είναι περισσότερη στις μικρές ή στις μεγάλες περιεκτικότητες κατασκευάζονται για τρία ποσοστά ενδεικτικά (10%,50%,90%) και για τους μήνες Νοέμβριο, Ιανουάριο και Μάρτιο τα διαγράμματα C_{peff} , T_{PCM} που θα αποδείξουν τι ποσοστό της ενεργούς καμπύλης καλύπτεται.

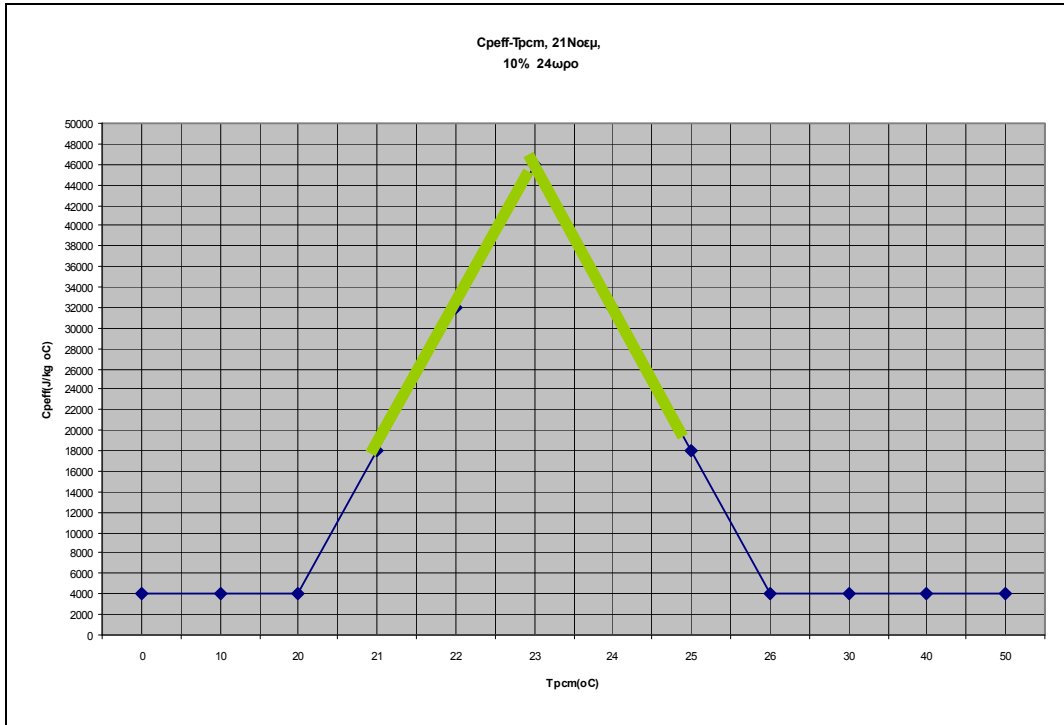
Για τους πίνακες τιμών που ακολουθούν έχουν χρησιμοποιηθεί η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία που αναπτύσσει το PCM για κάθε ποσοστό και οι αντίστοιχες ειδικές θερμοχωρητικότητες που δίνουν, ενώ έχει γίνει παρεμβολή των σημείων της ενεργούς καμπύλης και φαίνεται στα διαγράμματα με το πράσινο χρώμα.

Μετά τους πίνακες τιμών ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα:

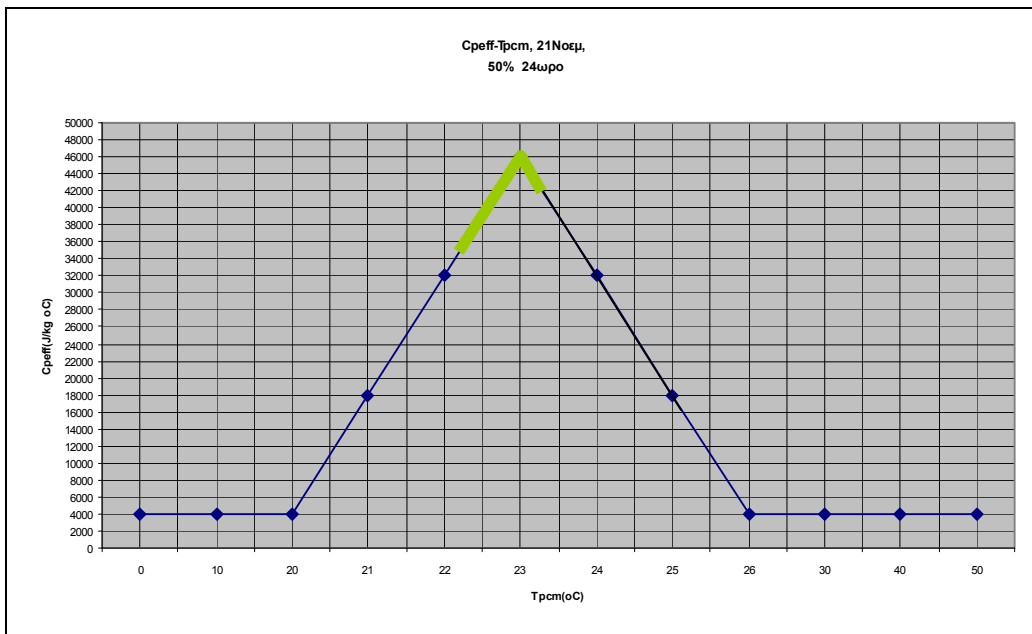
Πίν.5.1.8: C_{peff}, T_{PCM}	
21 Νοεμβρίου, $X_{PCM}=10\%$ (24ωρο)	
20,86	16040
23	46000
24	32000
25	18000
25,22	14920

Πίν.5.1.9: C_{peff}, T_{PCM}	
21 Νοεμβρίου, $X_{PCM}=50\%$ (24ωρο)	
22,28	35920
23	46000
23,31	41660

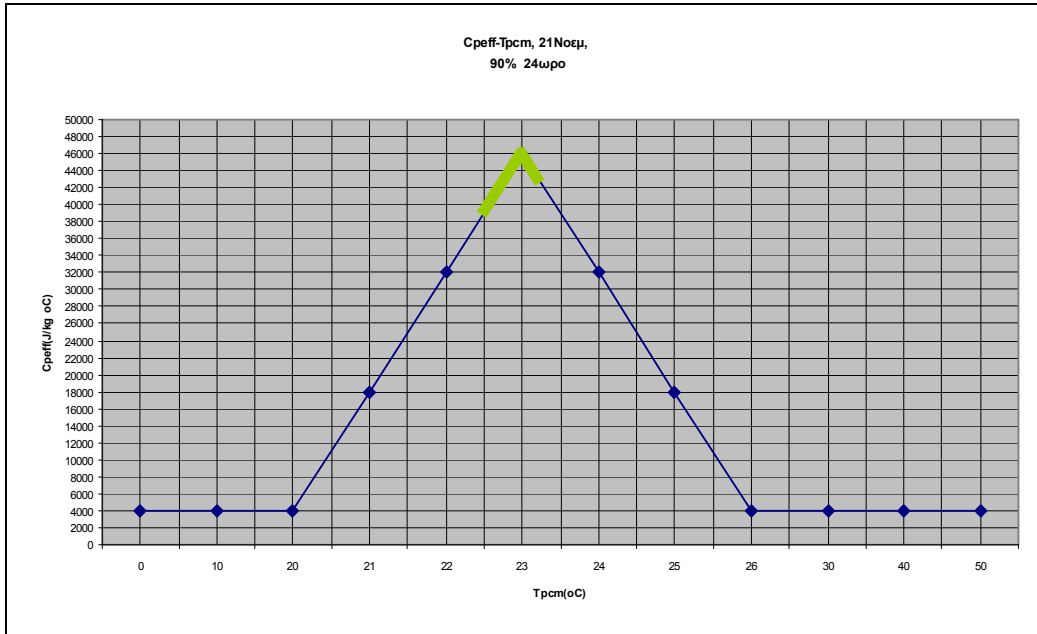
Πίν.5.1.10: C_{peff}, T_{PCM}	
21 Νοεμβρίου, $X_{PCM}=90\%$ (24ωρο)	
22,47	38580
23	46000
23,22	42920



Σχήμα 5.1.9 : Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Νοέμβριο με 10% PCM το 24ωρο



Σχήμα 5.1.10 : Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Νοέμβριο με 50% PCM το 24ωρο



Σχήμα 5.1.11 : Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Νοέμβριο με 90% PCM το 24ωρο

Πίν.5.1.11: C_{peff}, T_{PCM},
21 Ιανουαρίου, X_{PCM}=10% (24ωρο)

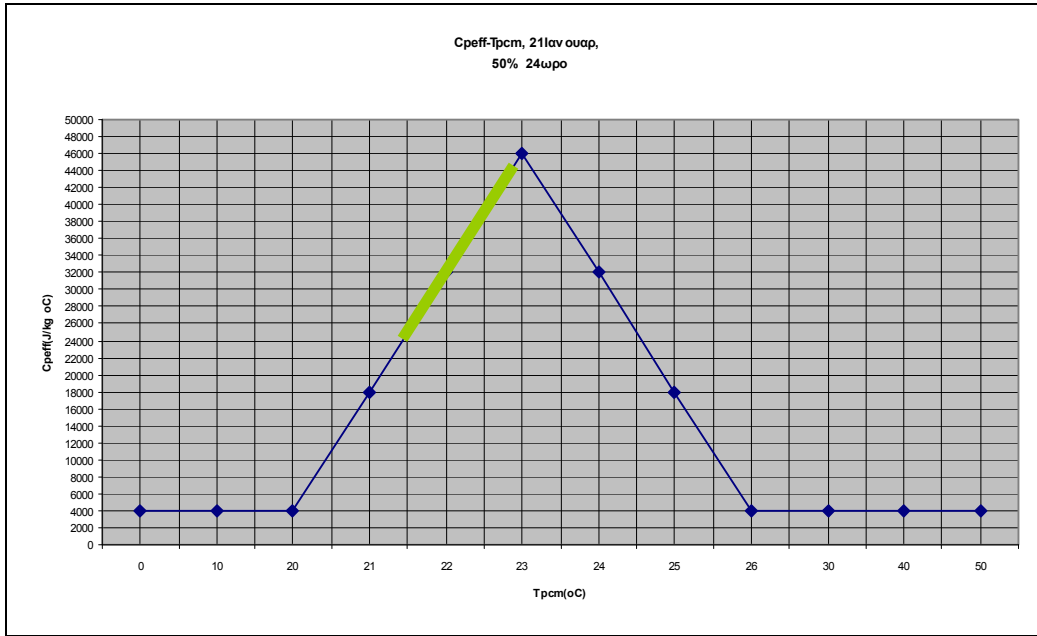
20,62	12680
21	18000
22	32000
23	46000
24,38	26680

Πίν.5.1.12: C_{peff}, T_{PCM},
21 Ιανουαρίου, X_{PCM}=50% (24ωρο)

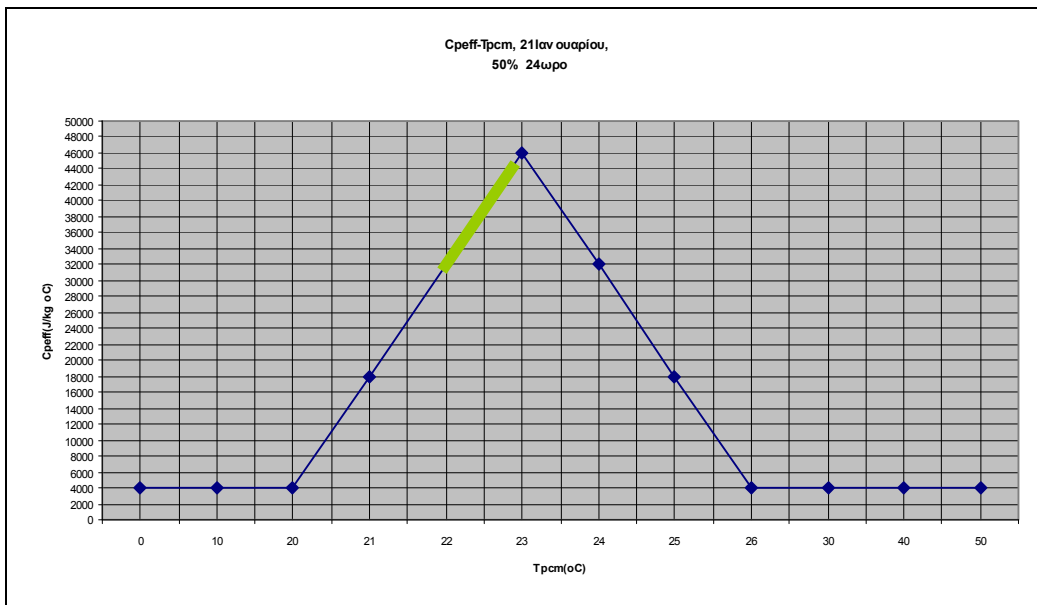
21,9	30600
22	32000
22,89	44460

Πίν.5.1.13: C_{peff}, T_{PCM},
21 Ιανουαρίου, X_{PCM}=90% (24ωρο)

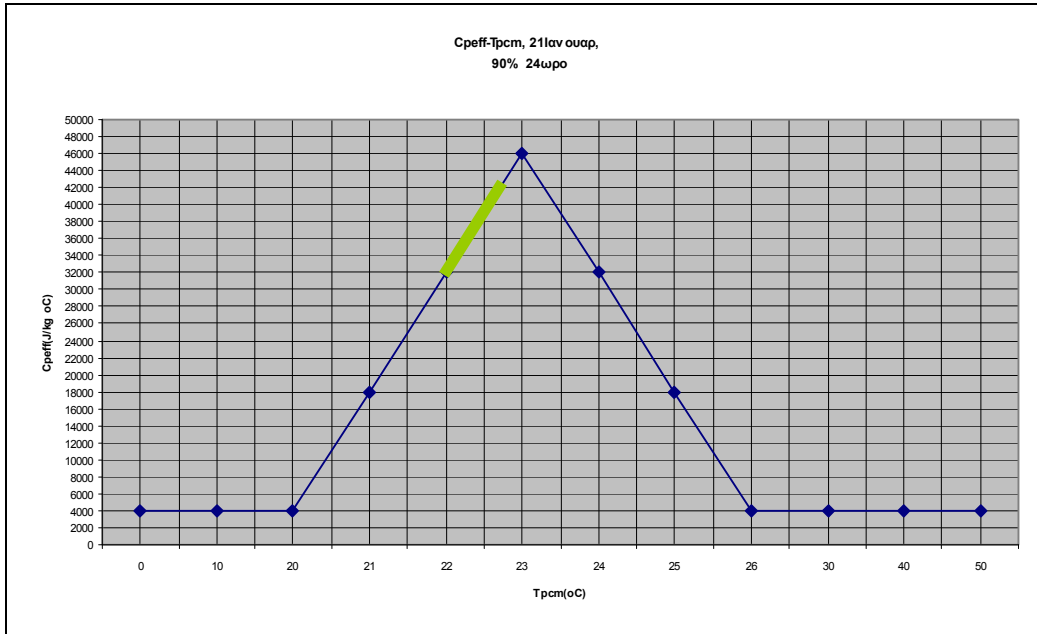
21,98	31720
22	32000
22,75	42500



Σχήμα 5.1.12 : Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 10% PCM το 24ωρο



Σχήμα 5.1.13 : Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 50% PCM το 24ωρο



Σχήμα 5.1.14 : Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 90% PCM το 24ωρο

Πίν.5.1.14: Cp_{eff}, T_{PCM},
21 Μαρτίου, X_{PCM}=10% (24ωρο)

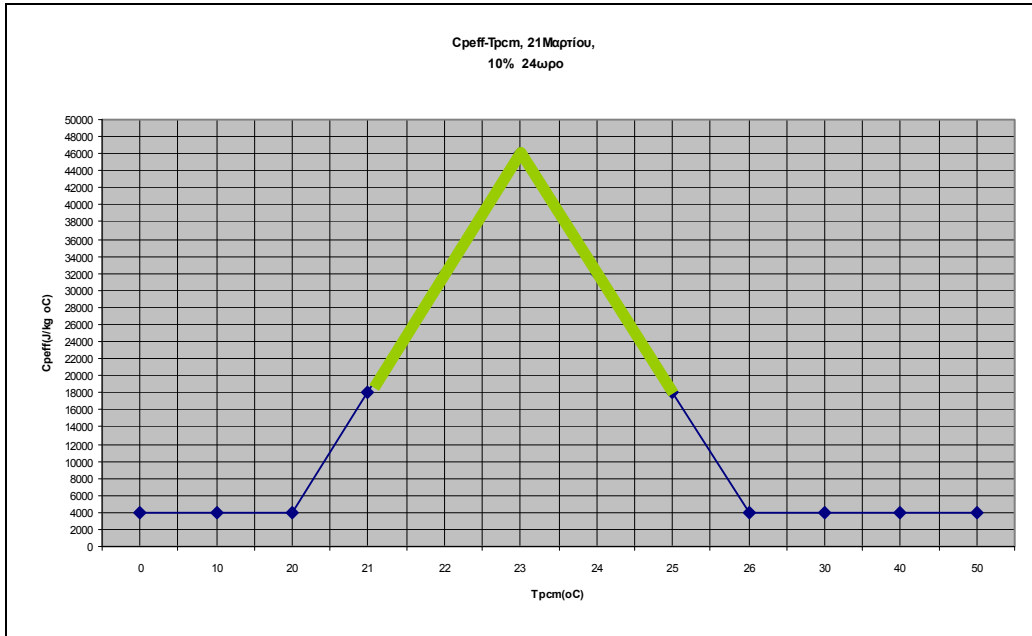
21,1	19400
22	32000
23	46000
24	32000
25,02	17720

Πίν.5.1.15: Cp_{eff}, T_{PCM},
21 Μαρτίου, X_{PCM}=50% (24ωρο)

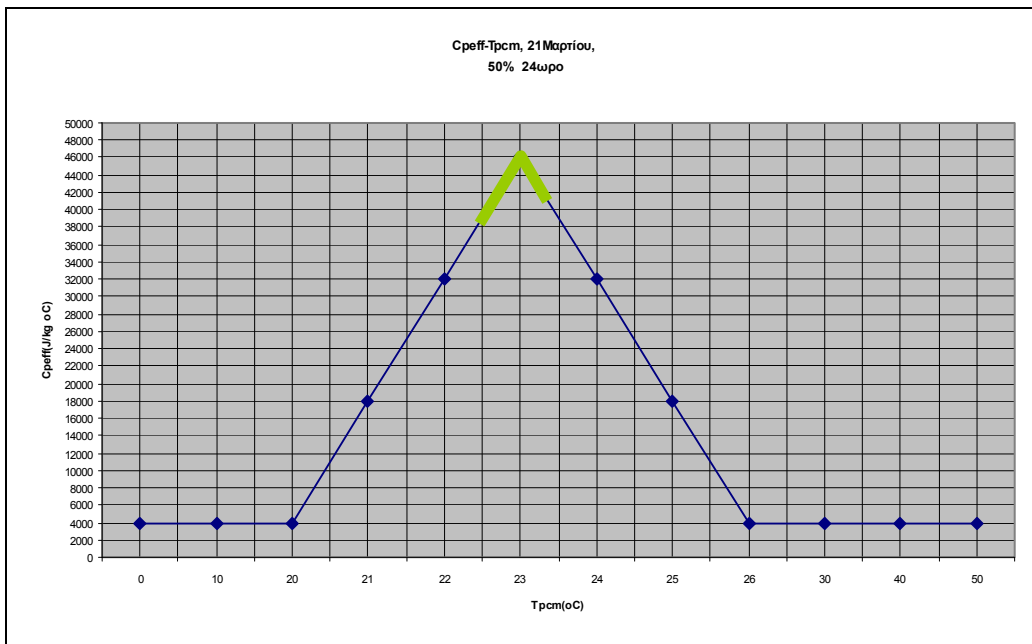
22,45	38300
23	46000
23,38	40680

Πίν.5.1.16: Cp_{eff}, T_{PCM},
21 Μαρτίου, X_{PCM}=90% (24ωρο)

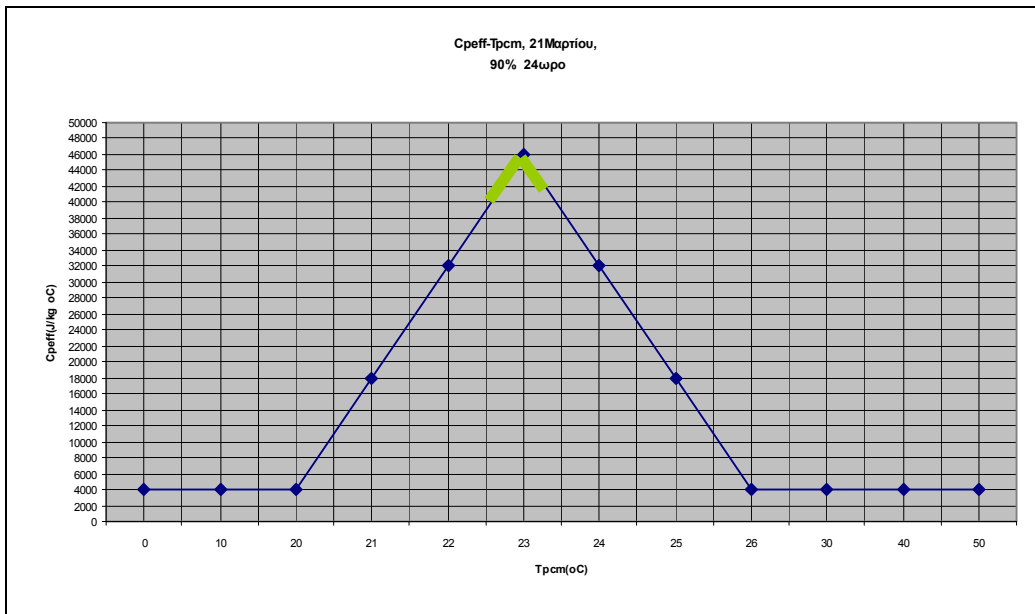
22,6	40400
23	46000
23,29	41940



Σχήμα 5.1.15 : Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Μάρτιο με 10% PCM το 24ωρο



Σχήμα 5.1.16 : Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Μάρτιο με 50% PCM το 24ωρο



Σχήμα 5.1.17 : Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Μάρτιο με 90% PCM το 24ωρο

Συμπεράσματα

Όπως είναι εμφανές από τα διαγράμματα, όταν χρησιμοποιείται ένα μικρό ποσοστό PCM, όπως το 10%, πραγματοποιείται καλύτερη εκμετάλλευση του PCM και για τους τρεις μήνες. Αυτό σημαίνει ότι καλύπτεται μεγαλύτερο μέρος του τριγώνου που σχηματίζει η καμπύλη που αντιστοιχεί στο εύρος αλλαγής φάσης. Αν υπολογιστεί και το εμβαδόν κάτω από τις έγχρωμες καμπύλες δίνει την αποθηκευμένη θερμότητα στο PCM.

Η θερμότητα αυτή για τις τρεις περιπτώσεις είναι η εξής:

π.χ. για 21 Νοεμβρίου με 10% PCM υπολογίζεται το εμβαδόν ως εξής:
 $Q = ((46000 + 16040) * (23 - 20,86) / 2) + ((46000 + 14920) * (25,22 - 23) / 2) = 13400$

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζουμε την αποθηκευμένη θερμότητα και στις υπόλοιπες περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα

Πιν.5.1.17	10%	50%	90%
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	134004,0	43078,5	32194,9
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	119978,4	37154,7	28574,7
ΜΑΡΤΙΟΣ	126487,2	39651,7	30031,3

Άρα αποδεικνύεται και από τα αποτελέσματα του Πιν.5.1.17 ότι και για τους τρεις μήνες μελέτης οι μικρές περιεκτικότητες είναι προτιμότερες γιατί επιτρέπουν στο PCM να αποθηκεύει περισσότερη θερμότητα, την οποία αποδίδει αργότερα με κάποια χρονική καθυστέρηση ώστε να θερμανθεί ο χώρος.

5.2 Παραμετρική μελέτη ως προς την περιεκτικότητα PCM το 48ωρο με δύο περιπτώσεις ηλιακής ακτινοβολίας για το δεύτερο 24ωρο

Σκοπός της μελέτης αυτής είναι να εξεταστεί η συμπεριφορά του PCM για διαφορετικές περιεκτικότητες των υλικών (σοβάς και PCM) στο μείγμα PCM-Σοβά το 48ωρο για τους χειμερινούς μήνες Νοέμβριο έως Μαρτίο. Θα μελετηθεί η συμπεριφορά του PCM για δύο περιπτώσεις ηλιακής ακτινοβολίας στο δεύτερο 24ωρο όπως περιγράφονται στο Βήμα 2.

ΒΗΜΑ 1- D,δ

Επιλέγονται για την μελέτη αυτή οι ίδιες ημέρες όπως και στην 1^η Παραμετρική μελέτη οπότε ισχύουν και οι ίδιες ηλιακές αποκλίσεις δ.

ΒΗΜΑ 2- G_b , G_d , G_T

Τα μεγέθη G_b , G_d θα άλλαζαν μόνο αν είχαμε διαφορετικό D. Εφόσον το D είναι ίδιο με πριν τα G_b , G_d παραμένουν ίδια. Το ίδιο ισχύει και για την ηλιακή ακτινοβολία G_T

Όμως μόνο για το πρώτο 24ωρο. Για το δεύτερο 24ωρο λαμβάνονται 2 περιπτώσεις:

- **1^η περίπτωση** Η G_T είναι ίση με την μισή από εκείνη του πρώτου 24ωρου
- **2^η περίπτωση** Η G_T είναι ίση με μηδέν

Στην 1^η περίπτωση θεωρείται μία νεφοσκεπή μέρα με λιγότερο ήλιο από την προηγούμενη.

Η 2^η περίπτωση πρακτικά δεν υφίσταται αφού ακόμη και τις πιο συννεφιασμένες μέρες υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία. Παρ' όλα αυτά για να αποδειχθεί η αποδοτικότητα του PCM ακόμα και χωρίς ηλιακή ακτινοβολία το δεύτερο 24ωρο μελετάται και αυτή η περίπτωση.

Ισχύουν λοιπόν οι πίνακες Πιν.5.1.1, Πιν.5.1.2, Πιν.5.1.3, Πιν.5.1.4, Πιν.5.1.5 αλλά για το δεύτερο 24ωρο θα υπολογιστεί η G_T για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις που περιγράψαμε παραπάνω

ΒΗΜΑ 3-PCM

Επιλέγετε το ίδιο PCM όπως και στην προηγούμενη μελέτη συνεπώς έχουμε τα ίδια χαρακτηριστικά και τις ίδιες εξισώσεις. Ισχύει λοιπόν ο Πιν.5.1.6 και οι εξισώσεις (10),(11),(12),(13).

ΒΗΜΑ 4-Ποσοστό PCM (X_{pcm})

Θα εξεταστούν όλα τα πιθανά ποσοστά μείγματος PCM-σοβά οπότε ισχύει ο Πιν.5.1.7 για τους υπολογισμούς που θα κάνουμε σε αυτή την Παραμετρική μελέτη.

ΒΗΜΑ 5- $T_{\delta\omega\mu}, T_{pcm}^0$

Η εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου παραμένει ίδια όπως και πριν καθώς και η αρχική θερμοκρασία PCM που θα επιλεγθεί αυθαίρετα για τους υπολογισμούς μας και είναι:

- $T_{pcm}^0 = 25$
- $T_{\delta\omega\mu} = 20$

ΒΗΜΑ 6- T_{pcm}

Υπολογίζεται η θερμοκρασία του PCM, T_{pcm} , για όλο το 48ωρο και για όλα τα πιθανά ποσοστά PCM χρησιμοποιώντας την εξ (22) που προκύπτει από τον ισολογισμό ενέργειας στο στρώμα PCM και είναι ίδια με πριν:

$$T_{pcm}^1 = T_{pcm}^0 + (6120 G_T - 259200(T_{pcm}^0 - 20)) / (0,36 \rho_{μείγ} C\rho_{μείγ})$$

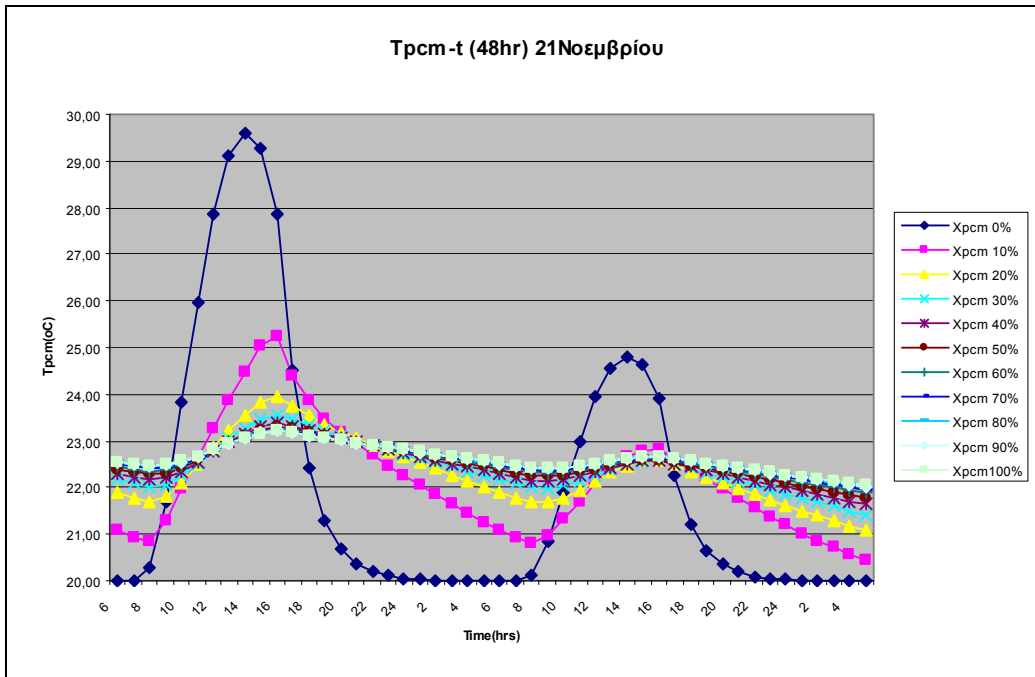
Η διαδικασία που ακολουθείτε θα επαναληφθεί 11 φορές για όλα τα πιθανά ποσοστά PCM του Πιν.5.1.7 και είναι η εξής :

Π.χ. για $X_{pcm} = 10\%$ και $X_{σοβά} = 90\%$ με $T_{pcm} = 25$ και $T_{\delta\omega\mu} = 20$

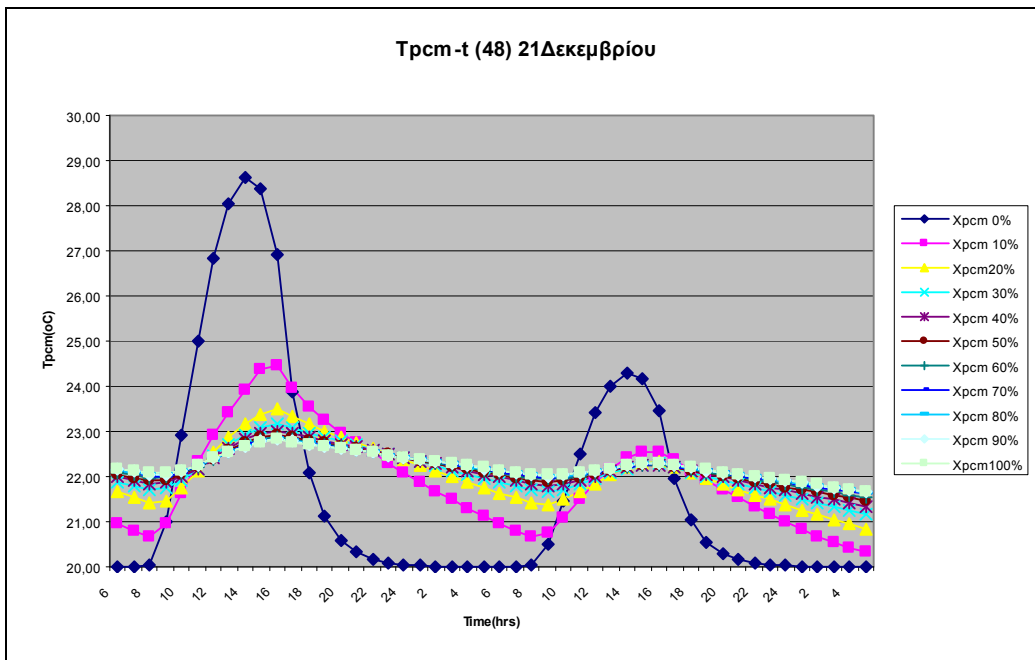
Ανατρέχουμε στον Πιν.5.1.7 και βλέπουμε την πυκνότητα $\rho_{μείγ}$ και την ειδική θερμοχωρητικότητα $C\rho_{μείγ}$ όπως και στην 1^η Παραμετρική μελέτη. Για $t = 6.00$ έχω $G_T = 0$ και συνεπώς βρίσκουμε T_{pcm}^1 και συνεχίζουμε για όλο το 48ωρο με βήμα 1 ώρας. Επαναλαμβάνεται αυτή η διαδικασία ώσπου οι τιμές που προκύπτουν να συγκλίνουν.

Από τους υπολογισμούς μας προκύπτει η μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM το 48ωρο για όλα τα πιθανά ποσοστά PCM για τους μήνες Νοέμβριο έως και Μάρτιο.

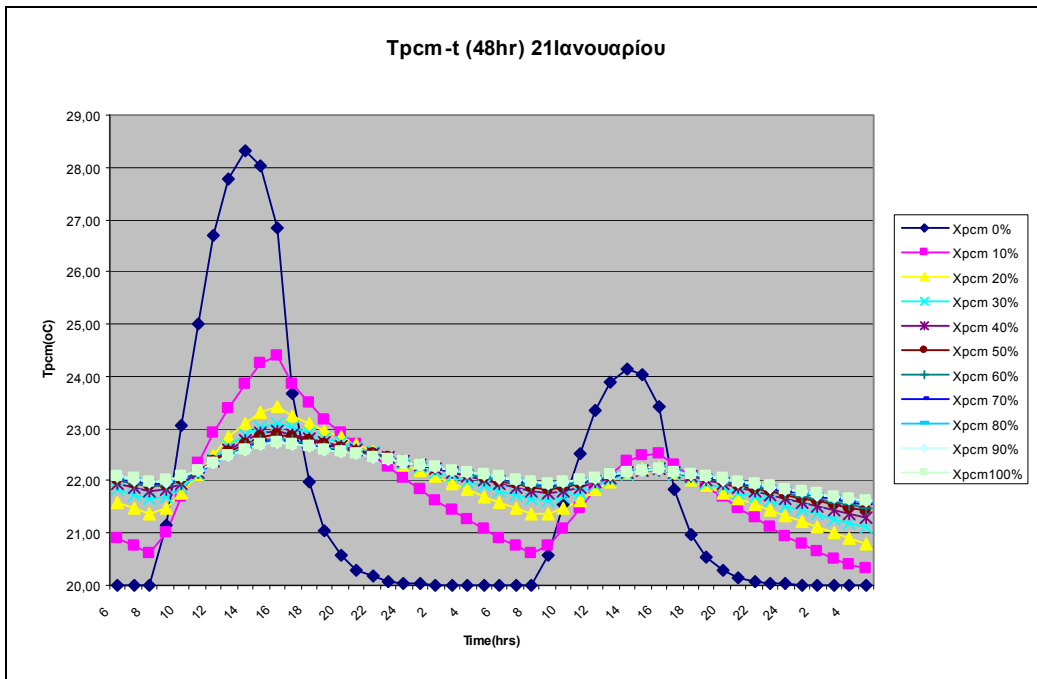
1^η περίπτωση το δεύτερο 24ωρο η G_T είναι ίση με την μισή του πρώτου 24ωρου



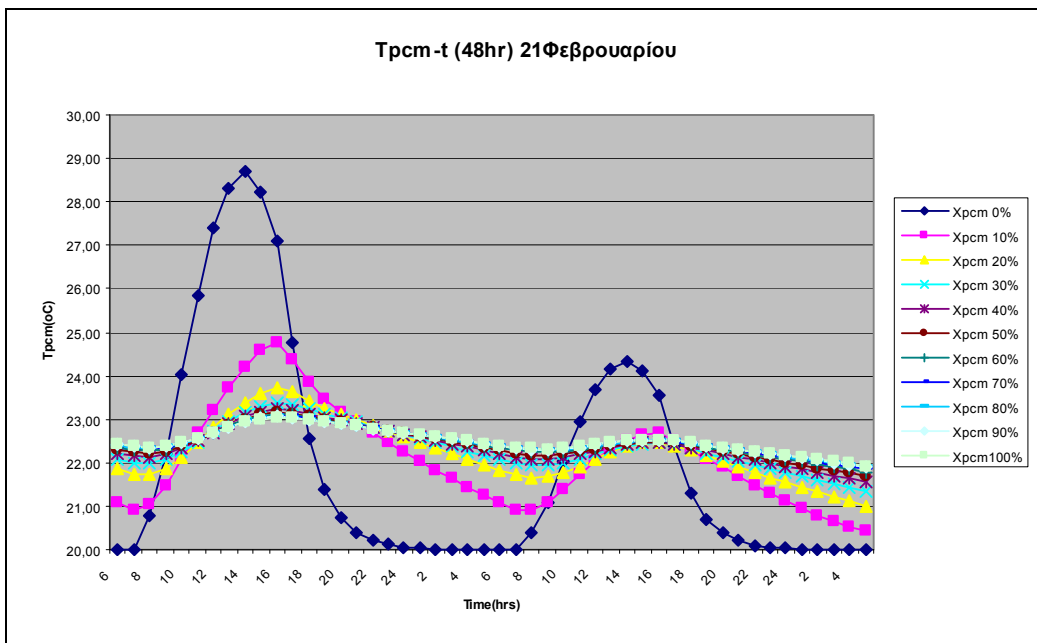
Σχήμα 5.2.1: Μεταβολή της T_{PCM} συναρτήσει της ώρας για το 48ωρο ανάλογα με το ποσοστό του PCM στις 21 Νοεμβρίου



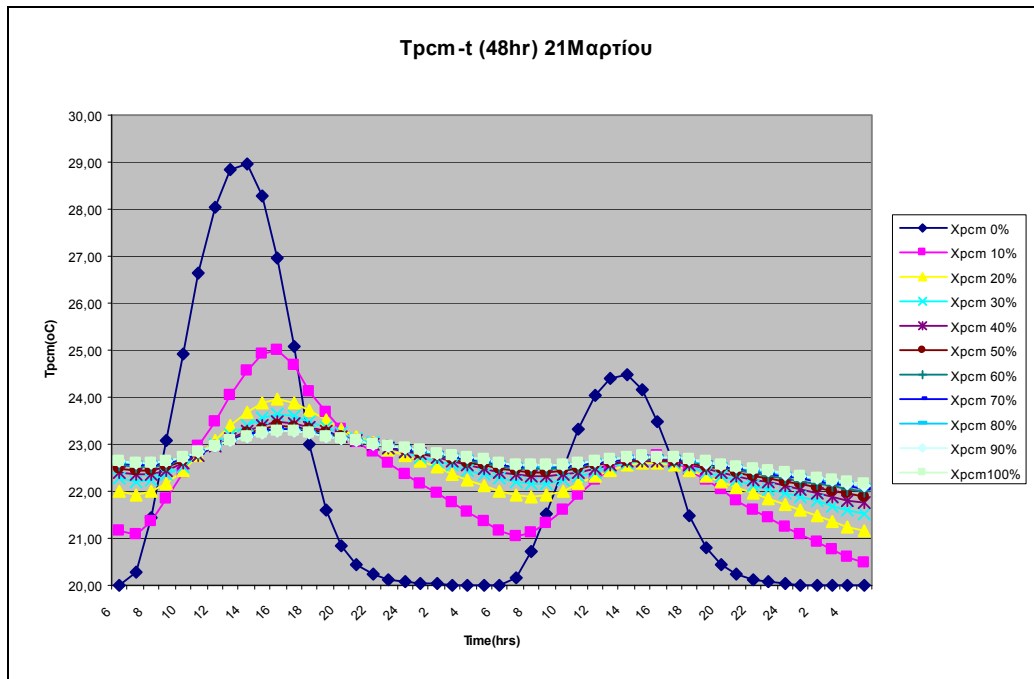
Σχήμα 5.2.2: Μεταβολή της T_{PCM} συναρτήσει της ώρας για το 48ωρο ανάλογα με το ποσοστό του PCM στις 21 Δεκεμβρίου



Σχήμα 5.2.3: Μεταβολή της T_{PCM} συναρτήσεως της ώρας για το 48ωρο ανάλογα με το ποσοστό του PCM στις 21 Ιανουαρίου



Σχήμα 5.2.4: Μεταβολή της T_{PCM} συναρτήσεως της ώρας για το 48ωρο ανάλογα με το ποσοστό του PCM στις 21 Φεβρουαρίου



Σχήμα 5.2.5: Μεταβολή της T_{PCM} συναρτήσει της ώρας για το 48ωρο ανάλογα με το ποσοστό του PCM στις 21 Μαρτίου

Παρατηρήσεις για την 1^η Περίπτωση

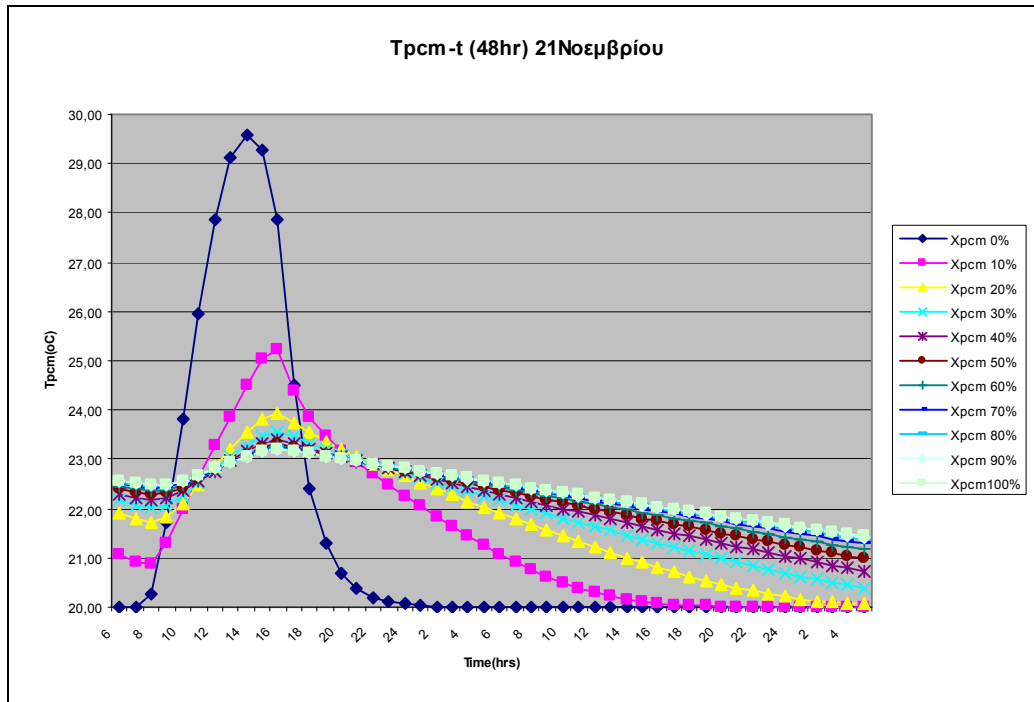
Συγκρίνοντας το πρώτο με το δεύτερο 24ωρο παρατηρείτε δικαιολογημένα σημαντική μείωση των μέγιστων θερμοκρασιών για όλα τα ποσοστά PCM κατά το δεύτερο 24ωρο αφού έχω την μισή ηλιακή ακτινοβολία από το πρώτο 24ωρο.

Επίσης, όσο αυξάνονται οι περιεκτικότητες το εύρος των θερμοκρασιών του δεύτερου 24ωρου μειώνεται και ειδικά από 40% -100% ελεχιστοποιείται ,ενώ οι διαφορές στα μέγιστα της θερμοκρασίας μεταξύ πρώτου και δεύτερου εικοσιτετραώρου είναι μικρότερες.

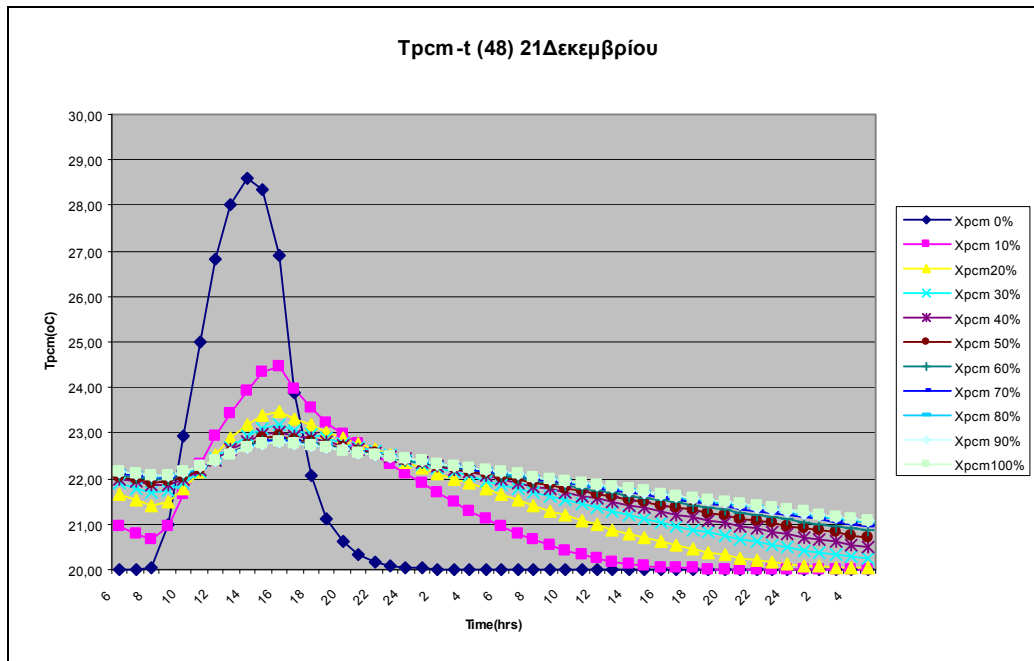
Οπότε, ακόμα και μία ημέρα νεφοσκεπή το PCM διατηρεί θερμοκρασίες πάνω από 21oC ενώ για ποσοστό 40% έως και 100% διατηρεί έως και 22,5oC γεγονός που αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα του υλικού.

Σκοπός αυτής της μελέτης είναι να αποδείξει αν το PCM μπορεί να είναι ωφέλιμο ακόμα και σε περιπτώσεις όπου λόγω νεφοσκεπούς ημέρας, η ηλιακή ακτινοβολία είναι αρκετά μειωμένη. Για να αποδειχθεί κάτι τέτοιο κατασκευάζονται πάλι τα διαγράμματα $C_{p,eff} - T_{PCM}$ και υπολογίζεται το εμβαδόν κάτω από τις καμπύλες με όμοιο τρόπο όπως στην 1η Παραμετρική μελέτη. Ακολουθούν οι πίνακες τιμών και τα διαγράμματα αφού παρουσιαστούν και τα διαγράμματα T_{pcm-t} για την 2^η περίπτωση όπου $GT=0$ για το δεύτερο 48ωρο.

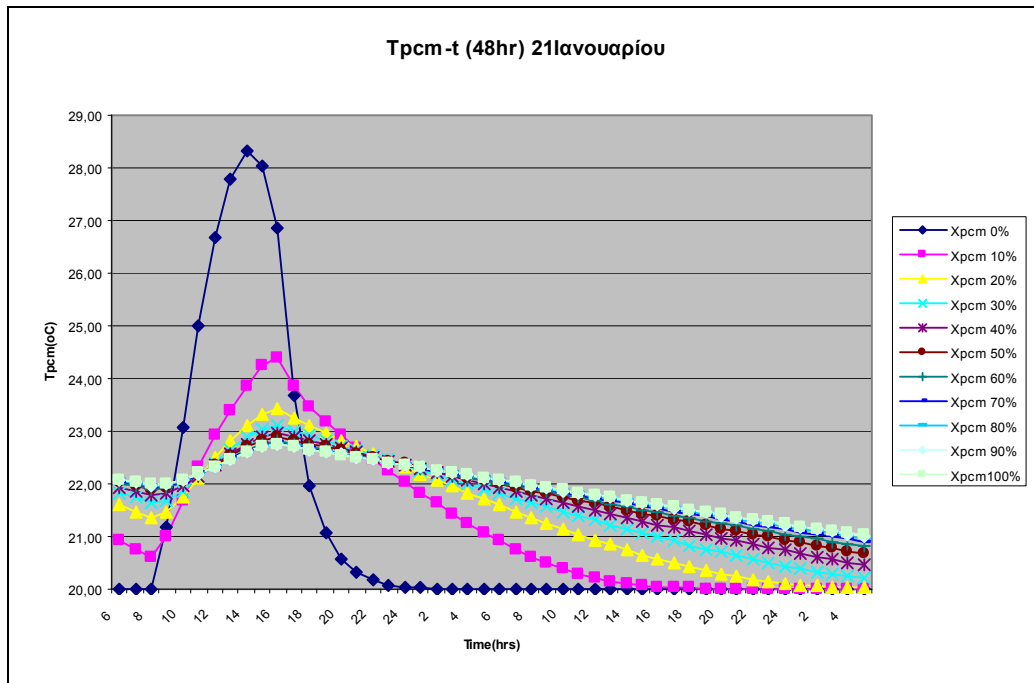
2^η περίπτωση το δεύτερο 24ωρο η G_T είναι ίση με μηδέν



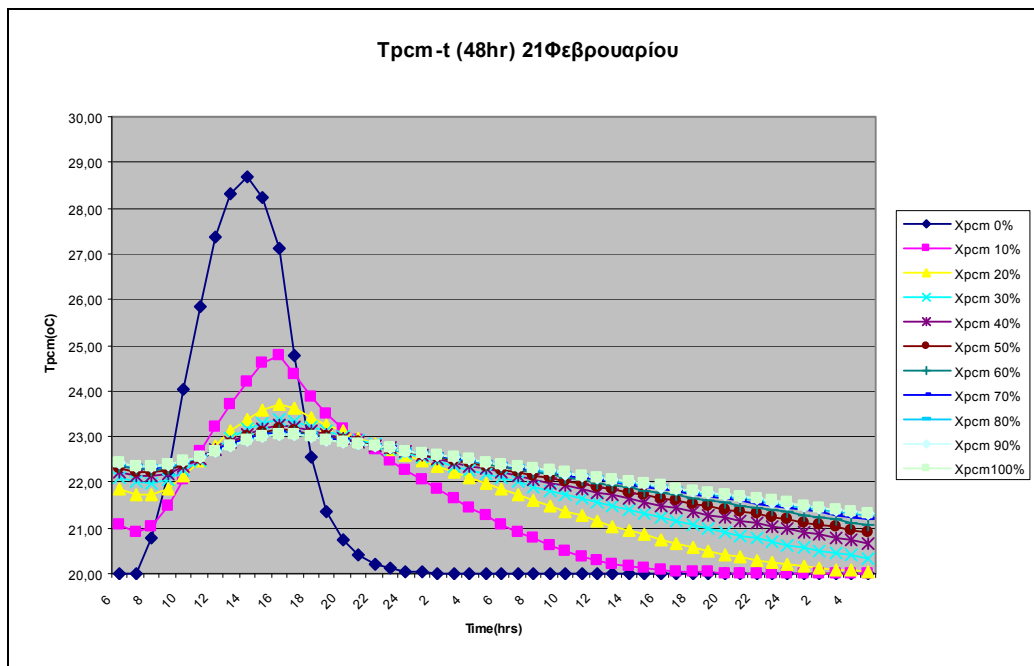
Σχήμα 5.2.6: Μεταβολή της T_{PCM} συναρτήσεως της ώρας για το 48ωρο ανάλογα με το ποσοστό του PCM στις 21 Νοεμβρίου



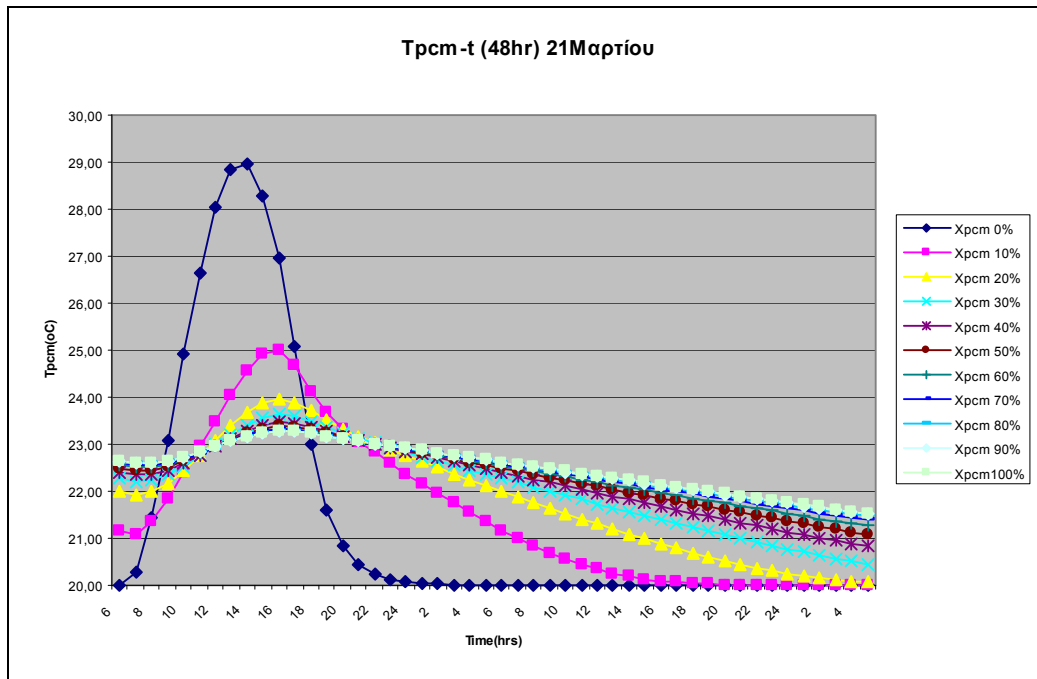
Σχήμα 5.2.7: Μεταβολή της T_{PCM} συναρτήσεως της ώρας για το 48ωρο ανάλογα με το ποσοστό του PCM στις 21 Δεκεμβρίου



Σχήμα 5.2.8: Μεταβολή της T_{PCM} συναρτήσεως της ώρας για το 48ωρο ανάλογα με το ποσοστό του PCM στις 21 Ιανουαρίου



Σχήμα 5.2.9: Μεταβολή της T_{PCM} συναρτήσεως της ώρας για το 48ωρο ανάλογα με το ποσοστό του PCM στις 21 Φεβρουαρίου



Σχήμα 5.2.10: Μεταβολή της T_{PCM} συναρτήσει της ώρας για το 48ωρο ανάλογα με το ποσοστό του PCM στις 21 Μαρτίου

Παρατηρήσεις για την 2^η περίπτωση

Συγκρίνοντας το πρώτο με το δεύτερο 24ωρο παρατηρείτε δικαιολογημένα πολύ σημαντική μείωση των μέγιστων θερμοκρασιών για όλα τα ποσοστά PCM κατά το δεύτερο 24ωρο αφού έχω μηδενική ηλιακή ακτινοβολία.

Αυτό που έχει σημασία είναι ότι ακόμα και μία ημέρα που θεωρητικά και μόνο η ηλιακή ακτινοβολία είναι μηδενική (αφού στην πραγματικότητα όπως έχει αναφερθεί παραπάνω είναι αδύνατον να συμβεί) το PCM διατηρεί θερμοκρασίες πάνω από 20°C ενώ για ποσοστό 40% έως και 100% διατηρεί έως και 22°C γεγονός που αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα του υλικού.

Σκοπός αυτής της μελέτης είναι να αποδείξει αν το PCM μπορεί να είναι ωφέλιμο ακόμα και σε περιπτώσεις μηδενικής ηλιακής ακτινοβολίας. Για να αποδειχθεί κάτι τέτοιο κατασκευάζονται πάλι τα διαγράμματα $C_{p,eff} - T_{PCM}$ και υπολογίζεται το εμβαδόν κάτω από τις καμπύλες με όμοιο τρόπο όπως στην 1η Παραμετρική μελέτη.

Ακολουθούν οι πίνακες τιμών και τα διαγράμματα και για τις 2 περιπτώσεις δηλαδή στην 1^η περίπτωση για ηλιακή ακτινοβολία μισή για το δεύτερο 24ωρο σε σχέση με το πρώτο και για την 2^η περίπτωση η ηλιακή ακτινοβολία ίση με μηδέν το δεύτερο 24ωρο:

ΒΗΜΑ 7- C_{peff} , T_{PCM}

Για να διαπιστωθεί αν το PCM μπορεί να είναι ωφέλιμο ακόμα και σε περιπτώσεις μικρής ή μηδενικής ηλιακής ακτινοβολίας εξετάζεται η αποθηκευόμενη θερμότητα σε κάθε περίπτωση και κατασκευάζονται για τρία ποσοστά ενδεικτικά και για τους μήνες Νοέμβριο, Ιανουάριο και Μάρτιο τα διαγράμματα C_{peff} , T_{PCM} που θα αποδείξουν τι ποσοστό της ενεργούς καμπύλης καλύπτεται.

Για τους πίνακες τιμών που ακολουθούν έχουν χρησιμοποιηθεί η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία που αναπτύσσει το PCM για κάθε ποσοστό και οι αντίστοιχες ειδικές θερμοχωρητικότητες που δίνουν, ενώ έχει γίνει παρεμβολή των σημείων της ενεργούς καμπύλης και φαίνεται στα διαγράμματα με το πράσινο χρώμα.

Μετά τους πίνακες τιμών ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα:

1^η περίπτωση**Πίν.5.2.1: C_{peff} , T_{PCM}** 21 Νοεμβρίου, $X_{PCM}=10\%$ (48ωρο)

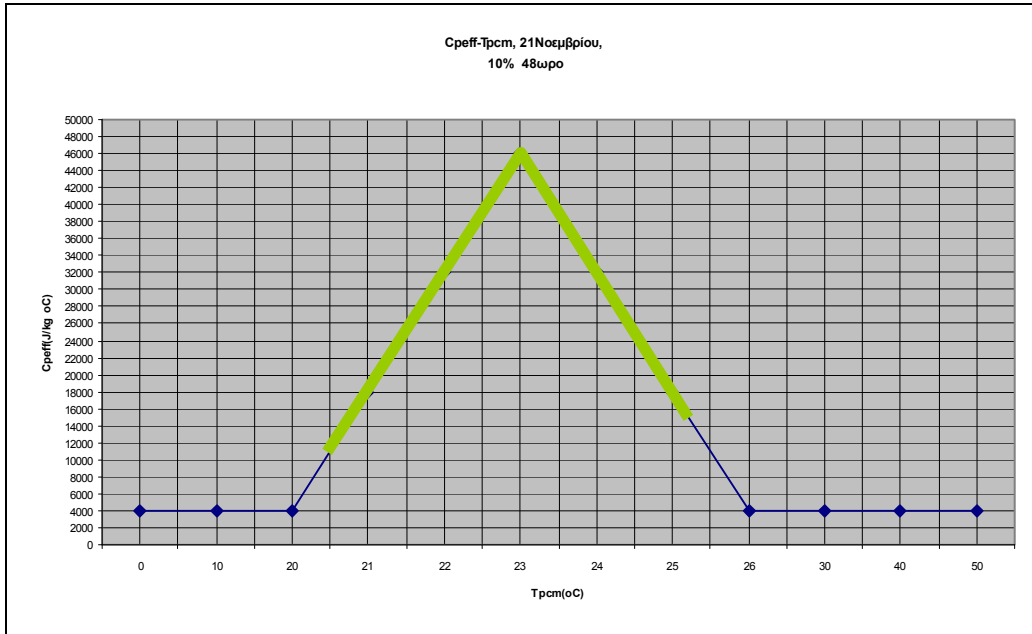
20,46	10440
21	18000
22	32000
23	46000
24	32000
25	18000
25,22	14920

Πίν.5.2.2: C_{peff} , T_{PCM} 21 Νοεμβρίου, $X_{PCM}=50\%$ (48ωρο)

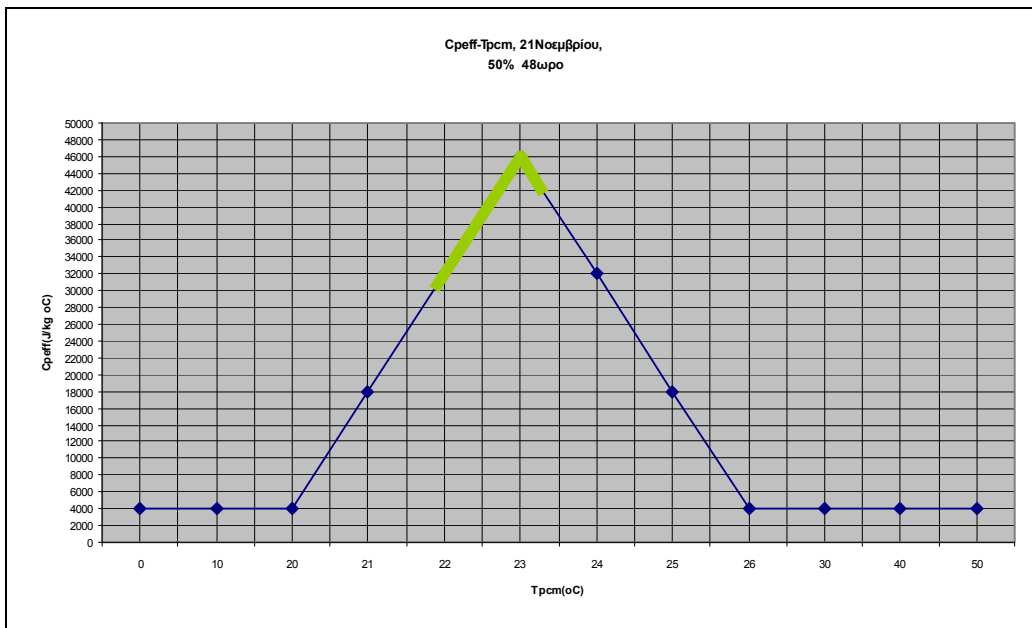
21,79	29060
22	32000
23	46000
23,31	41660

Πίν.5.2.3: C_{peff} , T_{PCM} 21 Νοεμβρίου, $X_{PCM}=90\%$ (48ωρο)

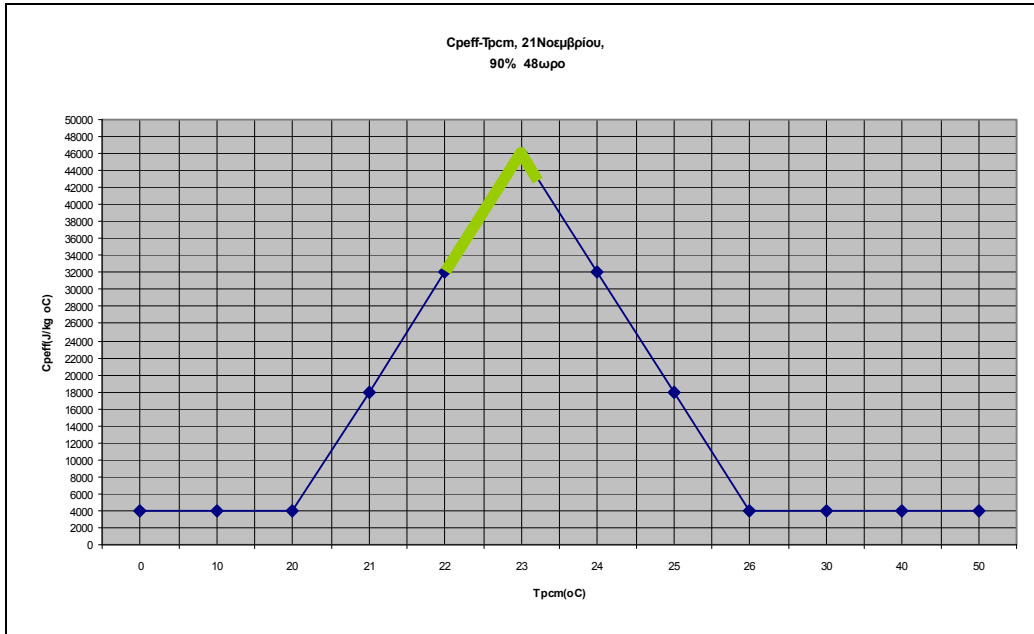
22,03	32420
23	46000
23,22	42920



Σχήμα 5.2.11: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Νοέμβριο με 10% PCM το 48ωρο.



Σχήμα 5.2.12: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Νοέμβριο με 50% PCM το 48ωρο.



Σχήμα 5.2.13: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Νοέμβριο με 90% PCM το 48ωρο.

Πίν.5.2.4: C_{peff}, T_{PCM}

21 Ιανουαρίου, X_{PCM}=10% (48ωρο)

20,31	8340
21	18000
22	32000
23	46000
24	32000
24,38	26680

Πίν.5.2.5: C_{peff}, T_{PCM}

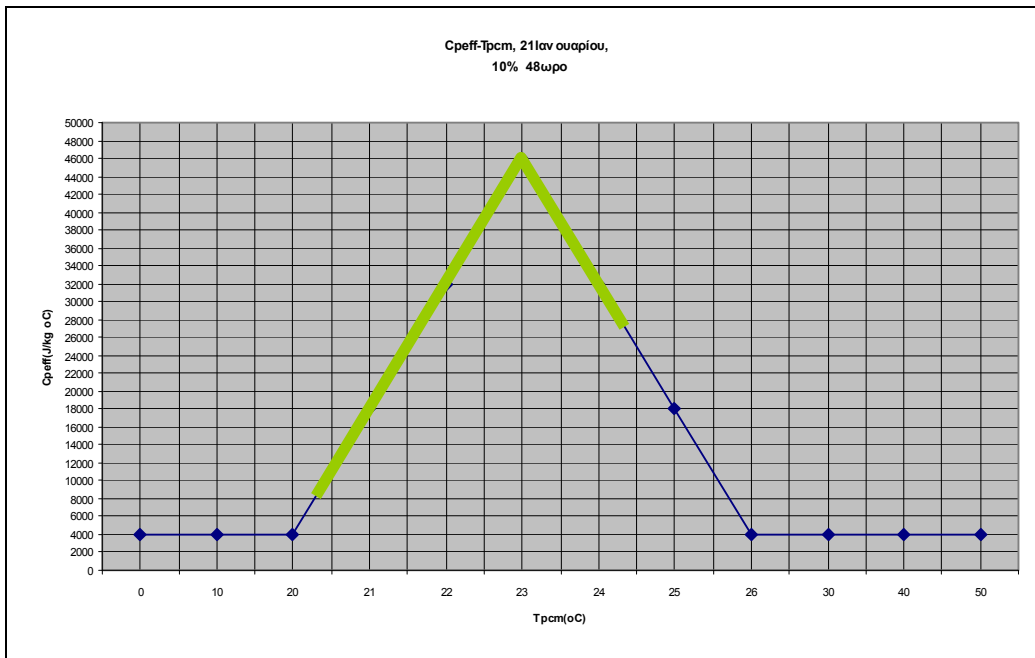
21 Ιανουαρίου, X_{PCM}=50% (48ωρο)

21,43	24020
22	32000
22,89	44460

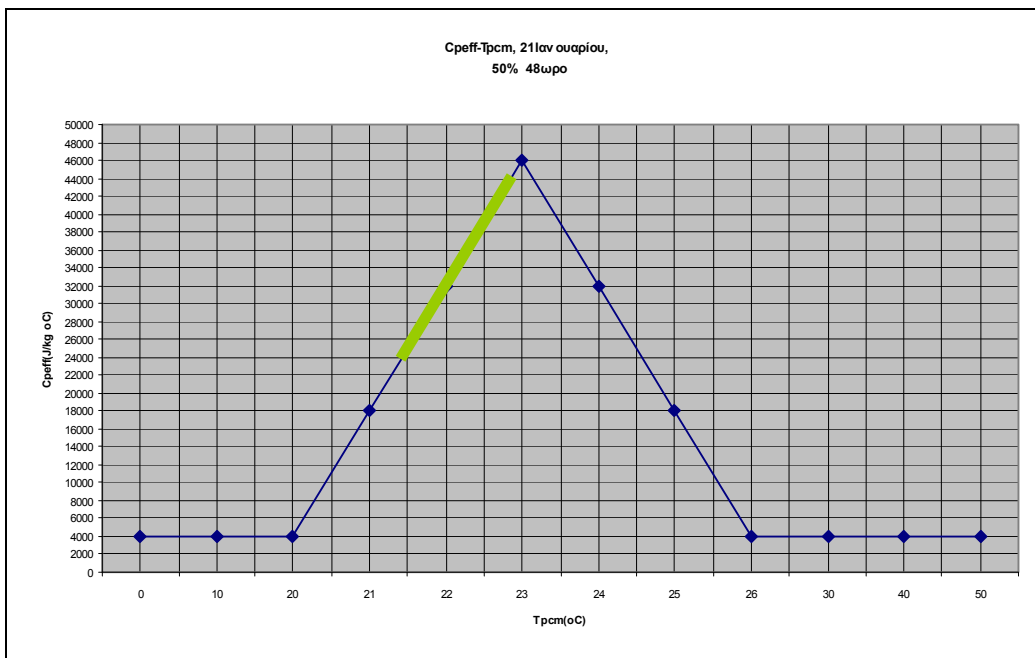
Πίν.5.2.6: C_{peff}, T_{PCM}

21 Ιανουαρίου, X_{PCM}=90% (48ωρο)

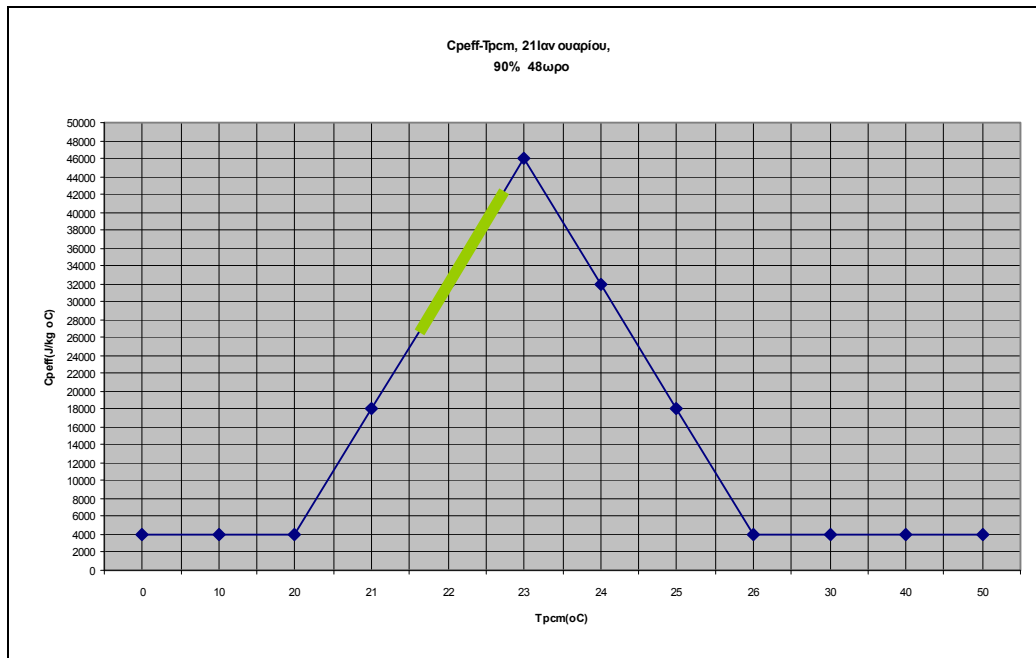
21,6	26400
22	32000
22,75	42500



Σχήμα 5.2.14: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 10% PCM το 48ωρο.



Σχήμα 5.2.15: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 50% PCM το 48ωρο.



Σχήμα 5.2.16: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 90% PCM το 48ωρο.

Πίν.5.2.7: C_{peff}, T_{PCM}

21 Μαρτίου, X_{PCM}=10% (48ωρο)

20,49	10860
21	18000
22	32000
23	46000
24	32000
25,02	17720

Πίν.5.2.8: C_{peff}, T_{PCM}

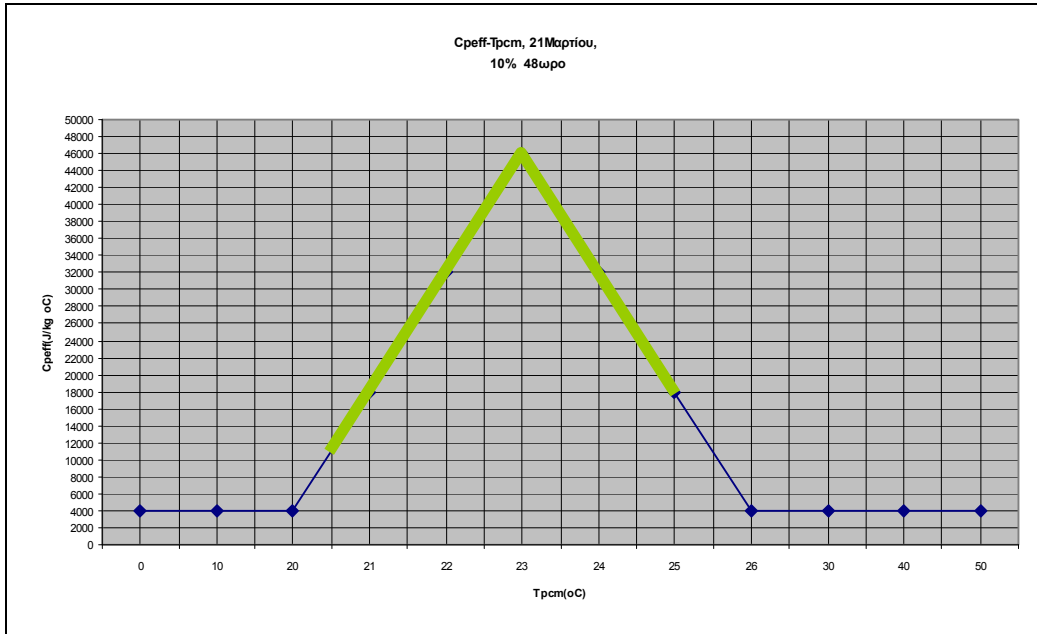
21 Μαρτίου, X_{PCM}=50% (48ωρο)

21,89	30460
22	32000
23	46000
23,38	40680

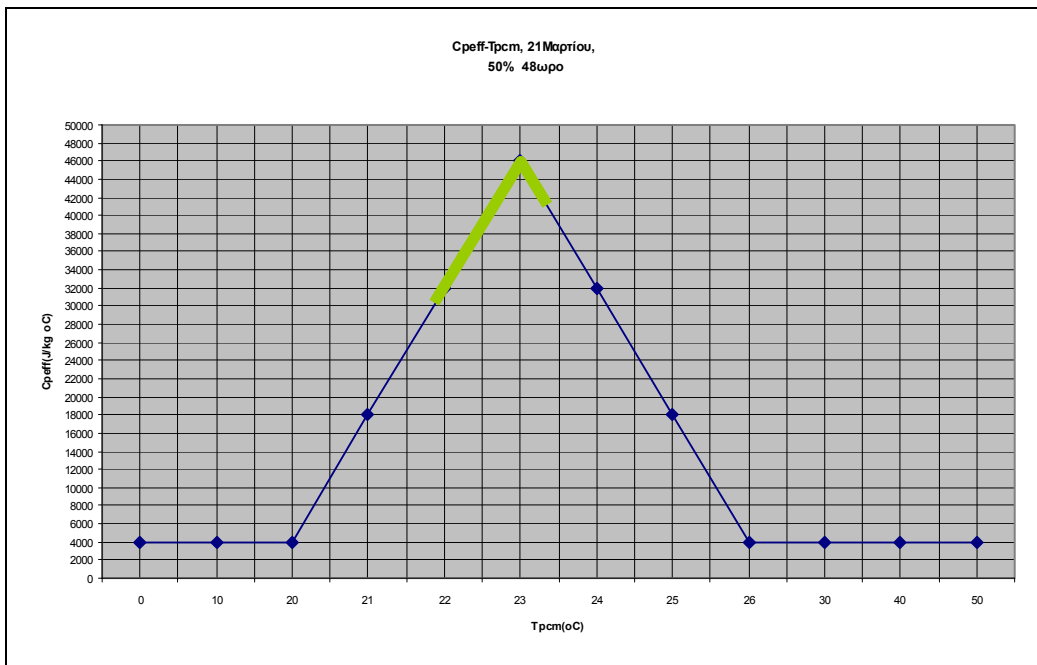
Πίν.5.2.9: C_{peff}, T_{PCM}

21 Μαρτίου, X_{PCM}=90% (48ωρο)

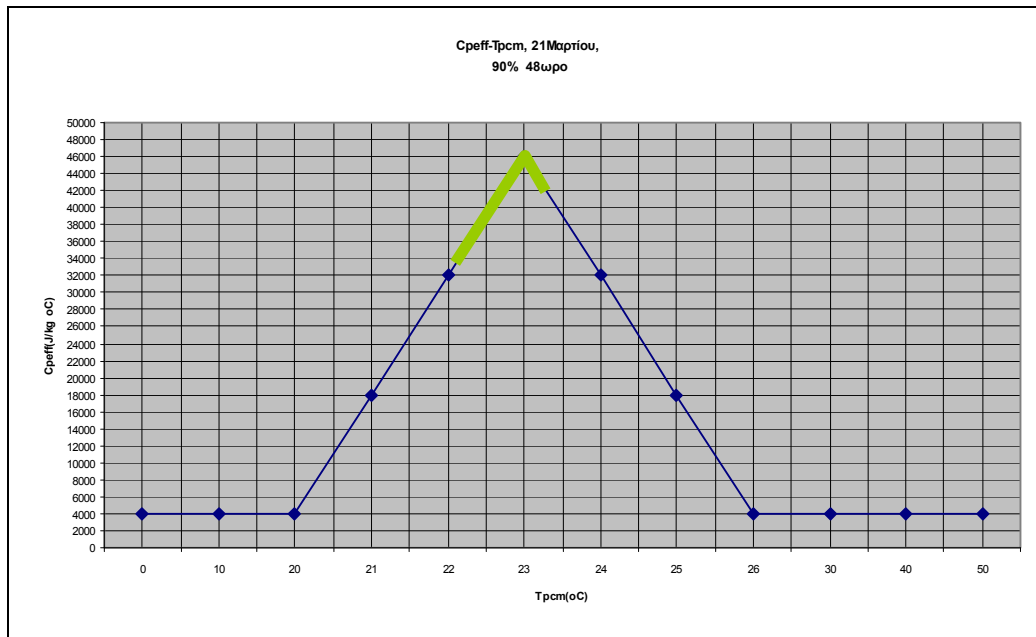
22,13	33820
23	46000
23,29	41940



Σχήμα 5.2.17: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Μάρτιο με 10% PCM το 48ωρο.



Σχήμα 5.2.18: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Μάρτιο με 50% PCM το 48ωρο.



Σχήμα 5.2.19: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Μάρτιο με 90% PCM το 48ωρο.

2^η περίπτωση

Πίν.5.2.10: Cp_{eff}, T_{PCM}

21 Νοεμβρίου, X_{PCM}=10% (48ωρο)

20	4000
21	18000
22	32000
23	46000
24	32000
25	18000
25,22	14920

Πίν.5.2.11: Cp_{eff}, T_{PCM}

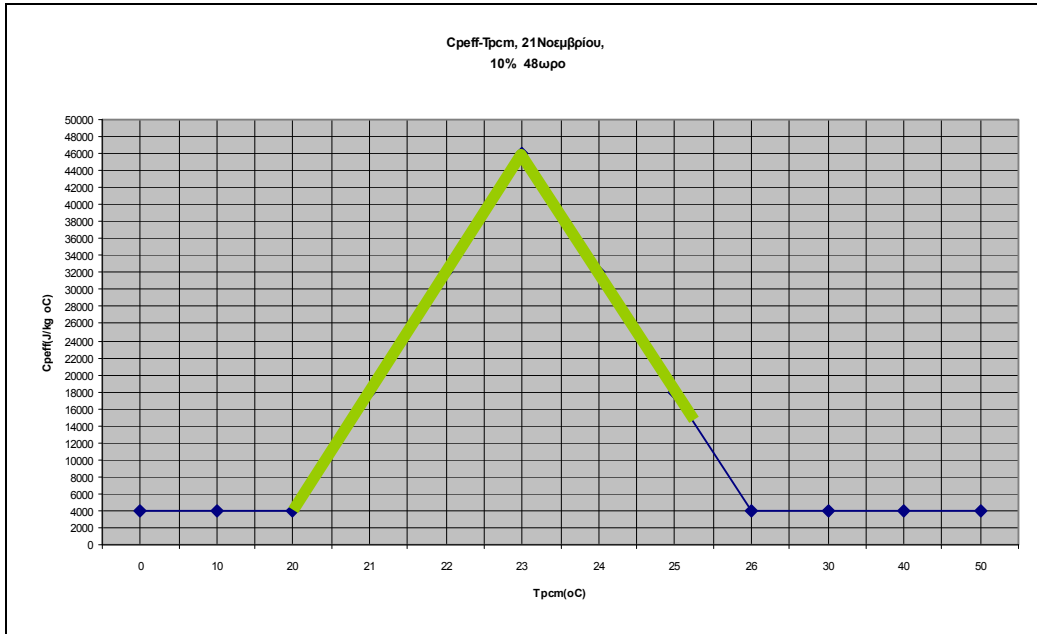
21 Νοεμβρίου, X_{PCM}=50% (48ωρο)

20,99	17860
21	18000
22	32000
23	46000
23,31	41660

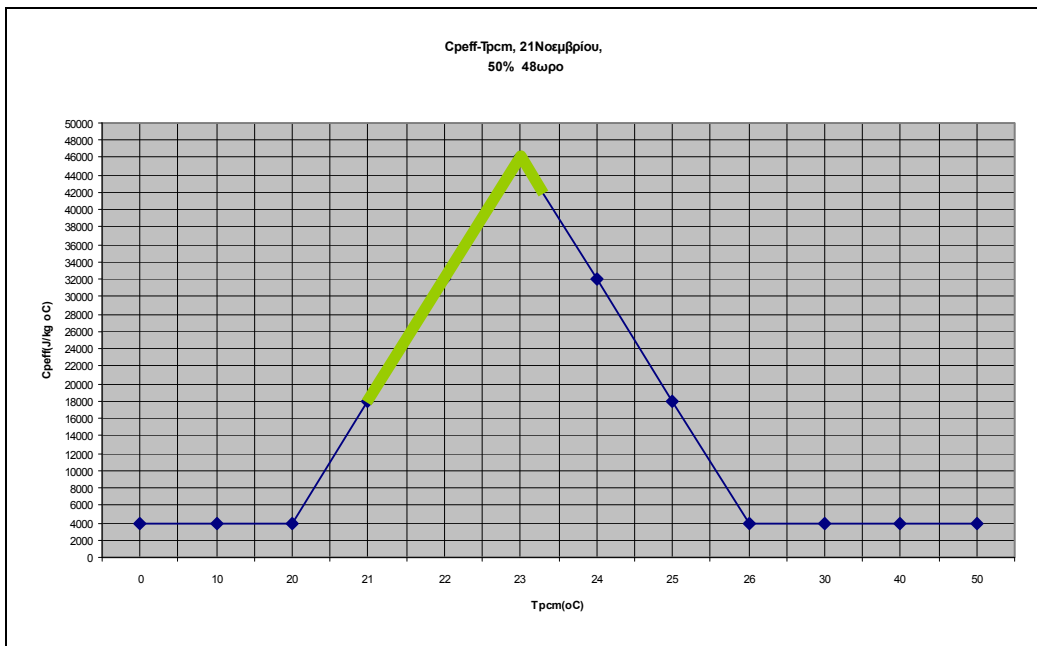
Πίν.5.2.12: Cp_{eff}, T_{PCM}

21 Νοεμβρίου, X_{PCM}=90% (48ωρο)

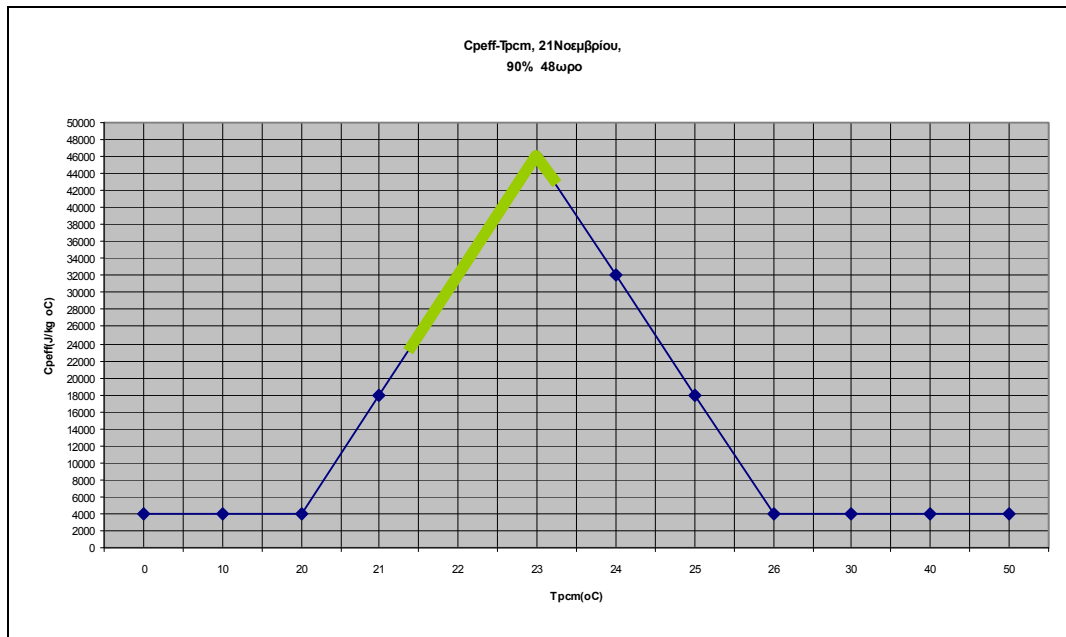
21,42	23880
22	32000
23	46000
23,22	42920



Σχήμα 5.2.20: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Νοέμβριο με 10% PCM το 48ωρο.



Σχήμα 5.2.21: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Νοέμβριο με 50% PCM το 48ωρο.



Σχήμα 5.2.22: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Νοέμβριο με 90% PCM το 48ωρο.

Πίν.5.2.13: Cp_{eff}, T_{PCM}

21 Ιανουαρίου, X_{PCM}=10% (48ωρο)

20	4000
21	18000
22	32000
23	46000
24	32000
24,38	26680

Πίν.5.2.14: Cp_{eff}, T_{PCM}

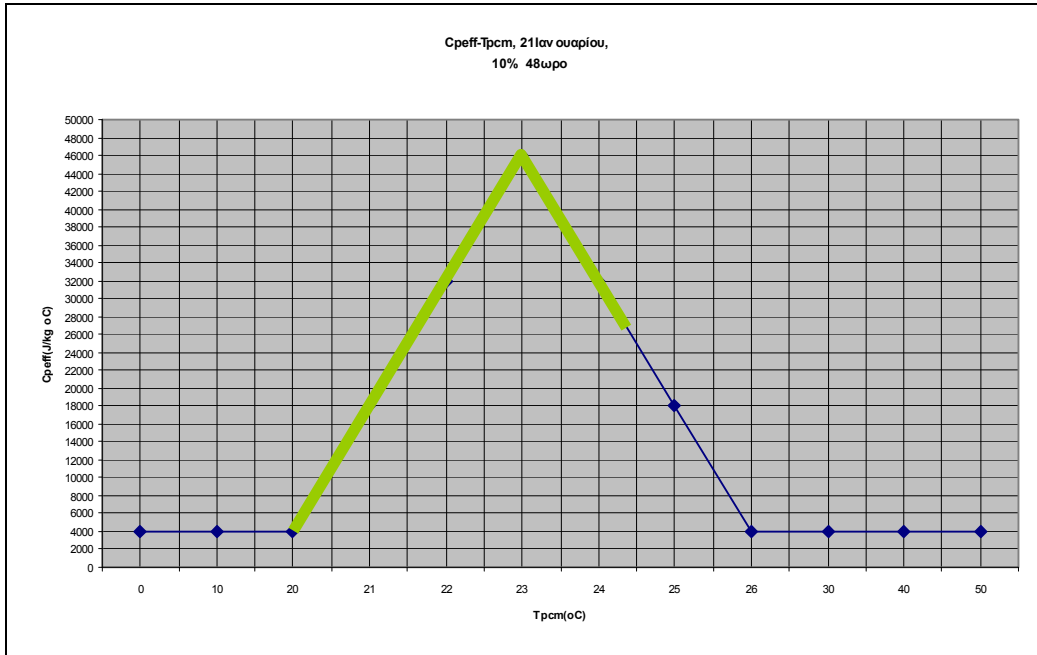
21 Ιανουαρίου, X_{PCM}=50% (48ωρο)

20,68	13520
21	18000
22	32000
22,89	44460

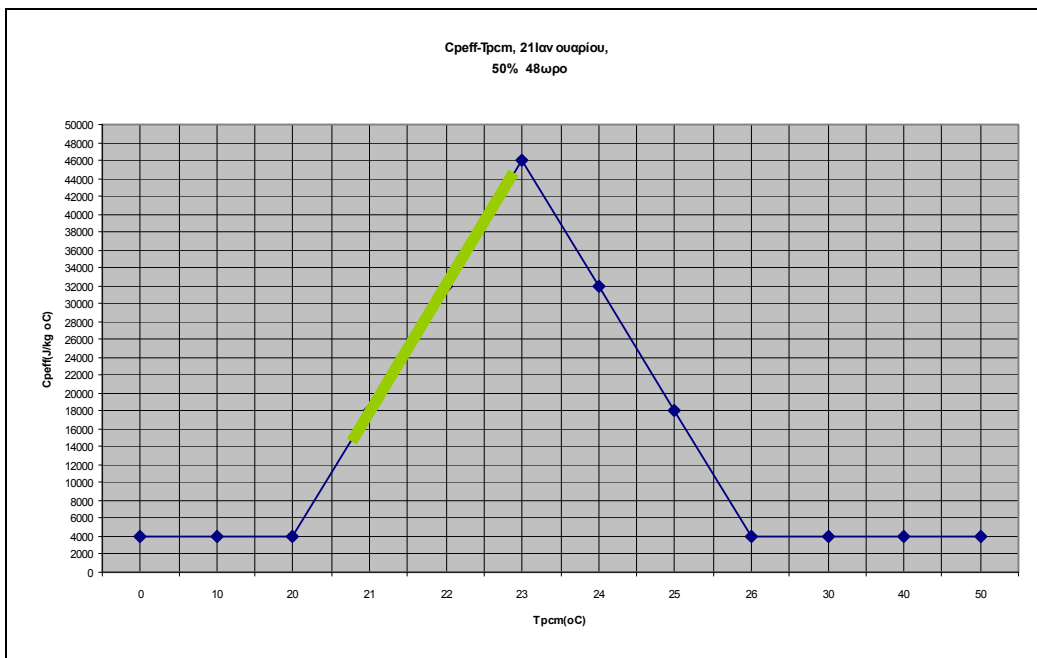
Πίν.5.2.15: Cp_{eff}, T_{PCM}

21 Ιανουαρίου, X_{PCM}=90% (48ωρο)

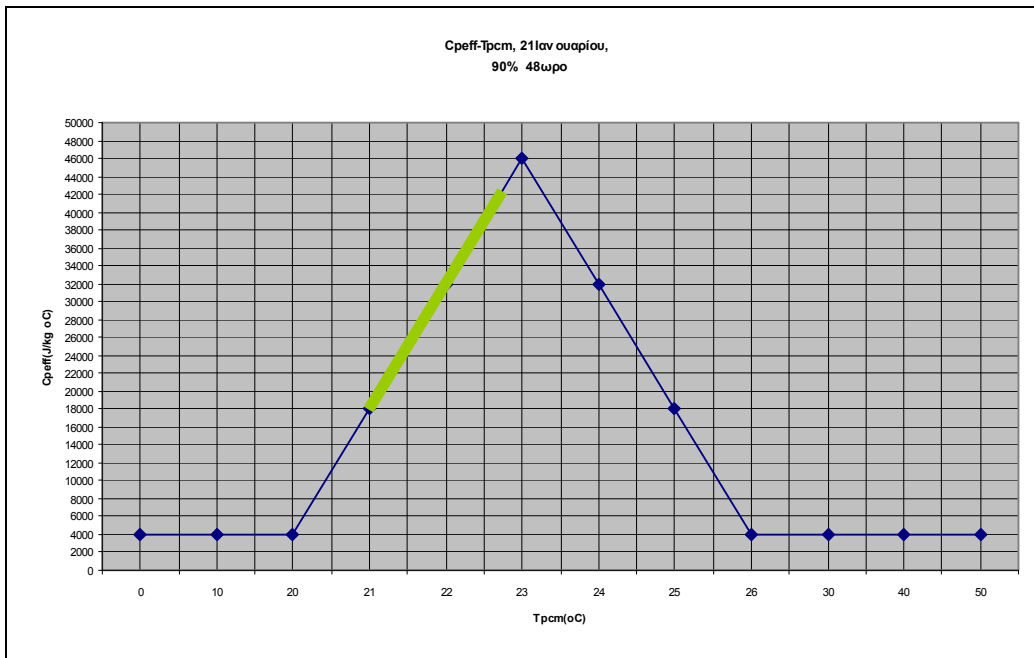
21,01	18140
22	32000
22,75	42500



Σχήμα 5.2.23: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 10% PCM το 48ωρο.



Σχήμα 5.2.24: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 50% PCM το 48ωρο.



Σχήμα 5.2.25: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 90% PCM το 48ωρο.

Πίν.5.2.16: C_{peff}, T_{PCM}

21 Μαρτίου, X_{PCM}=10% (48ωρο)

20	4000
21	18000
22	32000
23	46000
24	32000
25,02	17720

Πίν.5.2.17: C_{peff}, T_{PCM}

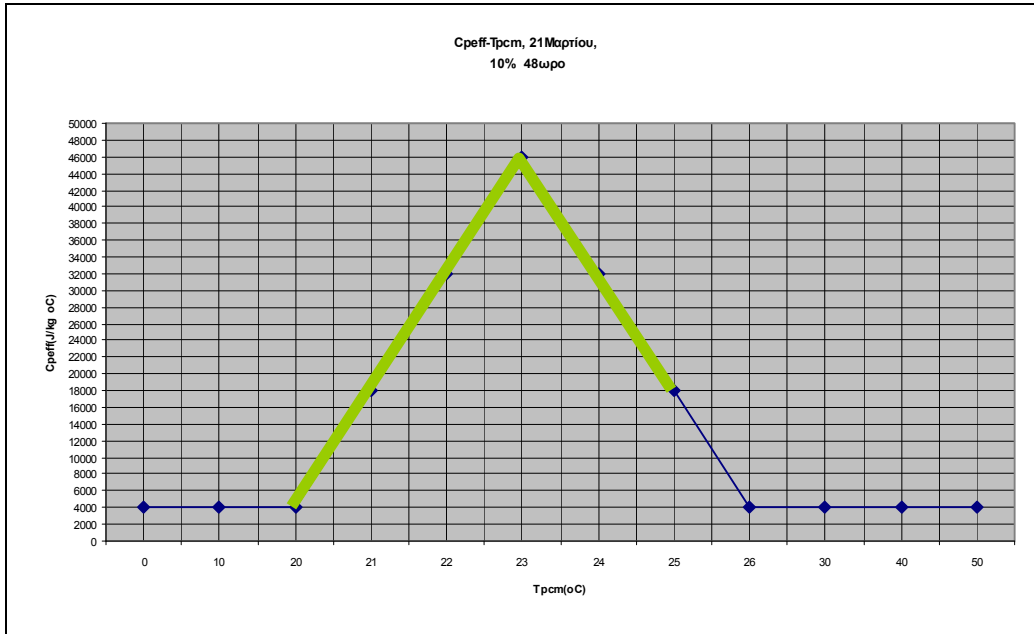
21 Μαρτίου, X_{PCM}=50% (48ωρο)

21,08	19120
22	32000
23	46000
23,38	40680

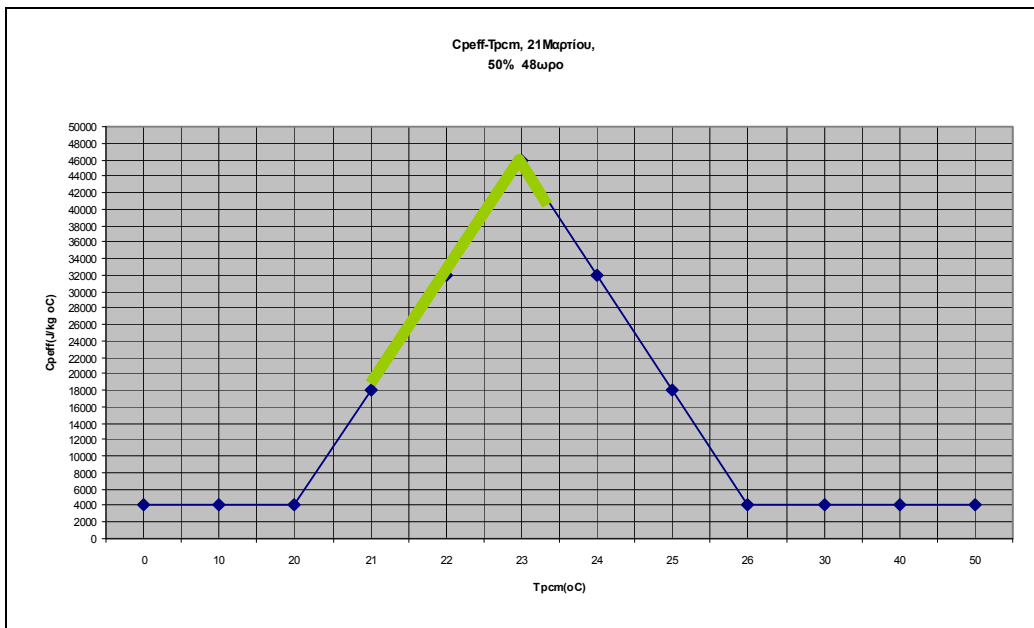
Πίν.5.2.18: C_{peff}, T_{PCM}

21 Μαρτίου, X_{PCM}=90% (48ωρο)

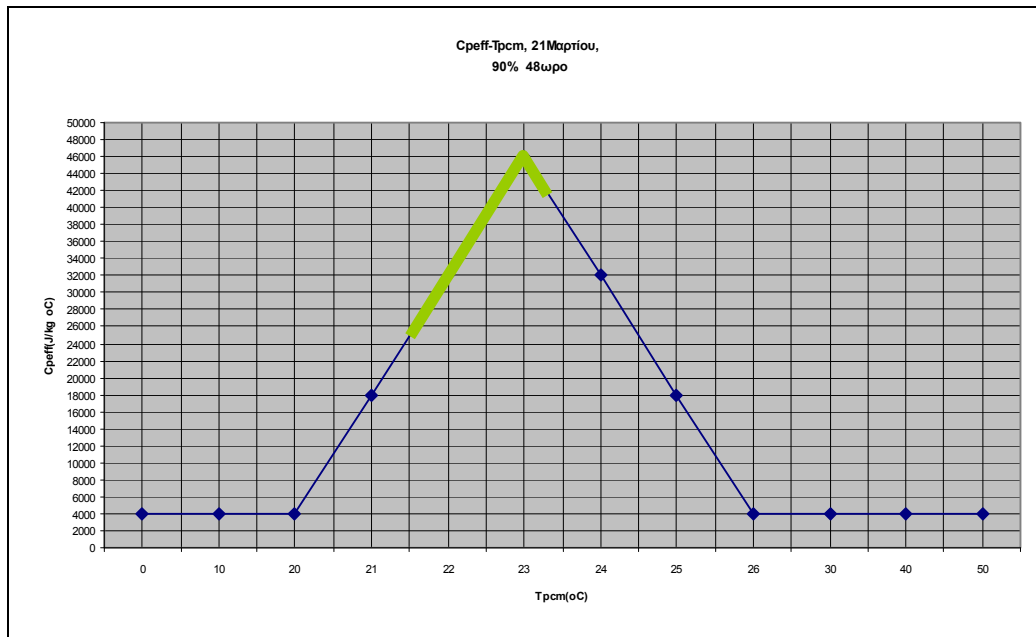
21,51	25140
22	32000
23	46000
23,29	41940



Σχήμα 5.2.26: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Μάρτιο με 10% PCM το 48ωρο.



Σχήμα 5.2.27: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Μάρτιο με 50% PCM το 48ωρο.



Σχήμα 5.2.28: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Μάρτιο με 90% PCM το 48ωρο.

Συμπεράσματα

Τα διαγράμματα δεν παρουσιάζουν αξιόλογη διαφορά με τα αντίστοιχα διαγράμματα της 1ης Παραμετρικής μελέτης εκ πρώτης όψεως. Υπολογίζεται και η αποθηκευόμενη θερμότητα από τα εμβαδόν κάτω από τις έγχρωμες καμπύλες. Οι τύποι είναι όμοιοι με την 1η Παραμετρική μελέτη.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τις 2 περιπτώσεις (1^η Περίπτωση με την μισή ηλιακή ακτινοβολία το δεύτερο 24ωρο και 2^η Περίπτωση με μηδενική ηλιακή ακτινοβολία το δεύτερο 24ωρο) που εξετάζονται σε αυτή την μελέτη στους παρακάτω πίνακες:

1^η Περίπτωση

Πιν.5.2.19	10%	50%	90%
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	139300,0	58998,6	47814,9
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	123236,5	49990,4	39617,5
ΜΑΡΤΙΟΣ	135716,5	58904,5	47473,0

2^η Περίπτωση

Πιν.5.2.20	10%	50%	90%
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	142621,2	77766,5	64986,4
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	125149,2	64067,9	52756,8
ΜΑΡΤΙΟΣ	139357,2	78984,4	65750,6

Συμπερασματικά φαίνεται από τις θερμότητες ότι στην 1^η περίπτωση είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του εικοσιτετραώρου της 1ης Παραμετρικής μελέτης, και στην 2^η περίπτωση ακόμα λίγο πιο αυξημένες, όχι όμως σε τέτοιο βαθμό αν συνυπολογιστεί μάλιστα ότι πρόκειται για τον διπλάσιο χρόνο ο οποίος μεσολαβεί με μία μέρα είτε νεφосκεπή είτε με πλήρη απώλεια ηλιακής ακτινοβολίας.

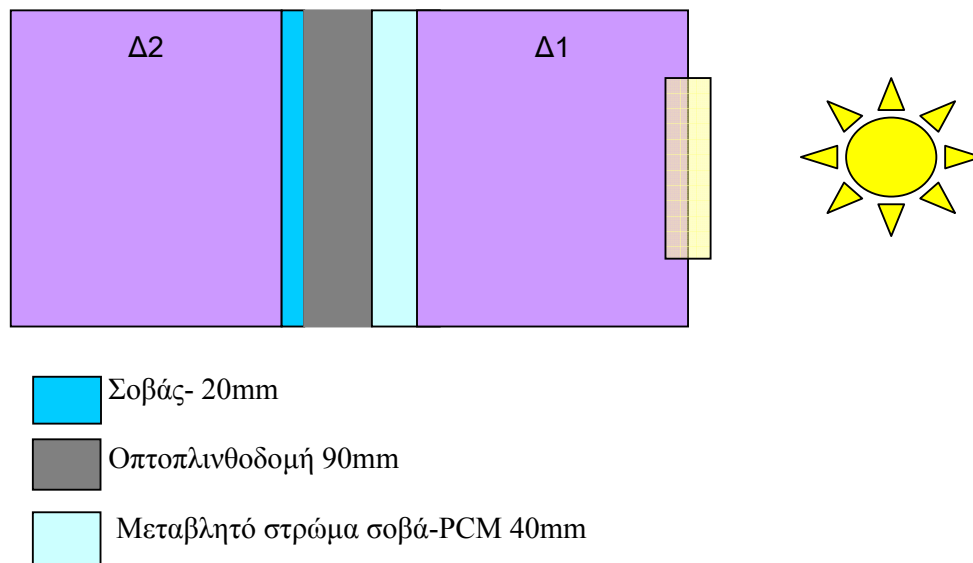
Άρα φυσικά η απόδοση του συστήματος μειώνεται , αλλά εφόσον αυτή ακολουθεί μετά από μία ημέρα με πλήρη ηλιακή ακτινοβολία, το σύστημα με το PCM μπορεί να παραμείνει οριακά ωφέλιμο.

5.3 Παραμετρική μελέτη ως προς την περιεκτικότητα PCM στο μείγμα PCM-Σοβά για ένα 24ωρο κάθε μήνα από τον Νοέμβριο-Μάρτιο για την συναλλαγή με δύο δωμάτια

Σκοπός της μελέτης αυτής είναι να εξετασθεί η συμπεριφορά του PCM για όλα τα πιθανά ποσοστά του Πιν.5.1.7 για το μείγμα PCM-Σοβά όταν συναλλάσσει θερμότητα με δύο δωμάτια.

Στις προηγούμενες περιπτώσεις υπήρχε μόνωση μεταξύ της διαστρωμάτωσης του μείγματος PCM-Σοβά και της διαστρωμάτωσης του τούβλου και του σοβά του διπλανού δωματίου. Συνεπώς υπήρχε συναλλαγή με το ένα δωμάτιο το νότιο όχι και το βορινό.

Σε αυτή την μελέτη παρατηρείται η συμπεριφορά και η απόδοση του PCM εάν αφαιρεθεί η μόνωση που αναφέρθηκε ώστε να γίνεται συναλλαγή με τα δύο δωμάτια όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Οι διαστάσεις του δεύτερου δωματίου είναι Μήκος =4m και Πλάτος=3m οπότε $A_{\Delta 2}=12\text{m}^2$ και $A_{\Delta 1}=A=9\text{m}^2$ γνωστό από την εισαγωγή του 5^{ου} Κφαλαίου.

ΒΗΜΑ 1- D

Επιλέγονται για την μελέτη αυτή οι ίδιες ημέρες όπως και στις προηγούμενες παραμετρικές μελέτες οπότε ισχύουν και οι ίδιες ηλιακές αποκλίσεις δ.

ΒΗΜΑ 2- G_b, G_d, G_T

Τα μεγέθη G_b, G_d θα άλλαζαν μόνο αν είχαμε διαφορετικό D. Εφόσον το D είναι ίδιο με πριν τα G_b, G_d παραμένουν ίδια. Το ίδιο ισχύει και για την ηλιακή ακτινοβολία G_T

Ισχύουν λοιπόν οι πίνακες Πιν.5.1.1, Πιν.5.1.2, Πιν.5.1.3, Πιν.5.1.4, Πιν.5.1.5

ΒΗΜΑ 3-PCM

Επιλέγετε το ίδιο PCM όπως και στην προηγούμενη μελέτη συνεπώς έχουμε τα ίδια χαρακτηριστικά και τις ίδιες εξισώσεις. Ισχύει λοιπόν ο Πιν.5.1.6 και οι εξισώσεις (10),(11),(12),(13).

ΒΗΜΑ 4-Ποσοστό PCM (X_{pcm})

Θα εξεταστούν όλα τα πιθανά ποσοστά μείγματος PCM-σοβά οπότε ισχύει ο Πιν.5.1.7 και οι εξισώσεις για την πυκνότητα $\rho_{μείγ}$ εξ.(14) και την ειδική θερμοχωρητικότητα $C_{pμείγ}$ εξ.(15) ανάλογα με το $C_{p\text{eff}}(T)$.

ΒΗΜΑ 5- $T_{\Delta 1}, T_{\Delta 2}, T_{pcm}^0$

Η εσωτερική θερμοκρασία των δωματίων θα είναι ίδια και για τα δύο δωμάτια. Η αρχική θερμοκρασία PCM που θα επιλεγεί αυθαίρετα για τους υπολογισμούς μας και είναι:

- $T_{pcm}^0 = 25$
- $T_{\Delta 1} = T_{\Delta 2} = 20$

ΒΗΜΑ 6- T_{pcm}

Εφόσον έχουμε συναλλαγή με δύο δωμάτια ο ισολογισμός ενέργειας εξ.(16) προκύπτει ως εξής

$$Q_{\text{απορροφούμενη από PCM-σοβά}} = Q_{\text{ακτινοβολίας προς PCM-σοβά}} - Q_{\text{συναγωγής PCM-}\Delta 1} - Q_{\text{συναγωγής PCM-}\Delta 2} \quad (23)$$

Παραδοχές:

- Η θερμοκρασία μέσα στα δωμάτια θεωρείται σταθερή και ομοιόμορφη.
- Η θερμοκρασία στην διαστρωμάτωση PCM-σοβά θεωρείται ομοιόμορφη

Ισχύουν οι ίδιες εξισώσεις για $Q_{\text{απορροφούμενη από PCM-σοβά}}$ (εξ.17) και για $Q_{\text{ακτινοβολίας προς PCM-σοβά}}$ εξ(18)

Για την $Q_{\text{συναγωγής PCM-}\Delta 1} = U_1 A_{\Delta 1} (T_{pcm}^0 - T_{\Delta 1})3600$ όπου $U_1 = h_{in} = 8 \text{ W/m}^2\text{C}$
 Για την $Q_{\text{συναγωγής PCM-}\Delta 2} = U_2 A_{\Delta 2} (T_{pcm}^0 - T_{\Delta 2})3600$

και για τον δείκτη U_2 ισχύει

$$U_2 = 1/h_{in} + l_{\text{σοβά}}/k_{\text{σοβά}} + l_{\text{τούβλο}}/k_{\text{τούβλο}} \quad (24)$$

Αφού μεταξύ του $\Delta 2$ και του στρώματος PCM σοβά ακολουθούν άλλα δύο στρώματα του τούβλου και του σοβά.

Για σοβά πάχους 0,02mm ισχύει $k_{\text{σοβά}} = 1,2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Για τούβλο πάχους 0,09mm ισχύει $k_{\text{τούβλο}} = 0,72 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Συνεπώς $U_2 = 3,75 \text{ W/m}^2\text{C}$

Άρα η εξ (23) προκύπτει με βάση την παραπάνω ανάλυση των όρων της ως εξής:

$$C\rho_{\text{μείγ}} V_{\text{μείγ}} (T_{\text{pcm}}^1 - T_{\text{pcm}}^0) = 0,85 G_T 3600 A_{\text{π}} - U_1 A_{\Delta 1} (T_{\text{pcm}}^0 - T_{\Delta 1}) 3600 - U_2 A_{\Delta 2} (T_{\text{pcm}}^0 - T_{\Delta 2}) 3600$$

Αν λυθεί ως προς T_{pcm}^1 και αντικαταστήσουμε και τα γνωστά μεγέθη προκύπτει

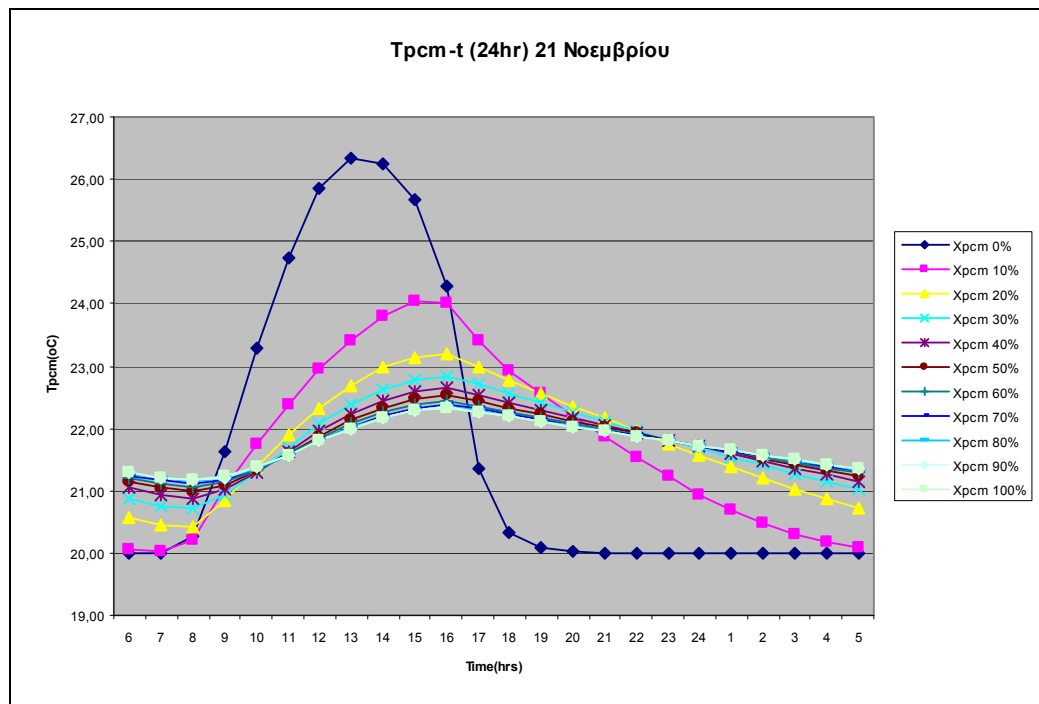
$$T_{\text{pcm}}^1 = T_{\text{pcm}}^0 + (6120 G_T - 421200(T_{\text{pcm}}^0 - 20)) / (0,36 \rho_{\text{μείγ}} C\rho_{\text{μείγ}}) \quad (24)$$

Η διαδικασία που ακολουθείτε θα επαναληφθεί 11 φορές για όλα τα πιθανά ποσοστά PCM του Πιν.5.1.7 και είναι η εξής :

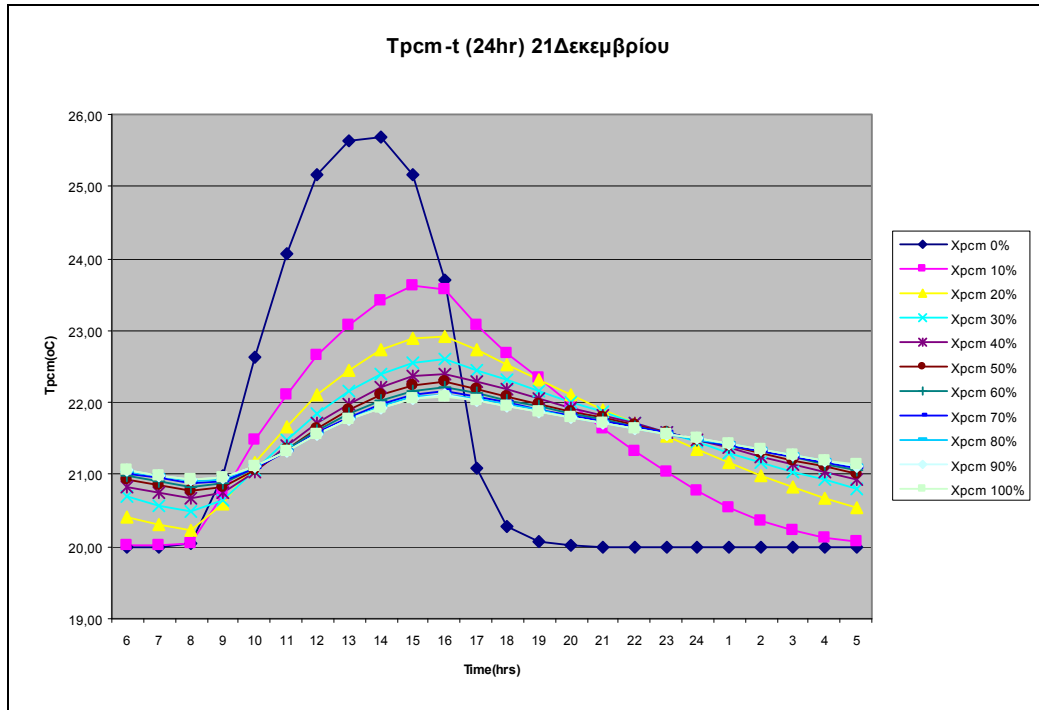
Π.χ. για $X_{\text{pcm}} = 10\%$ και $X_{\text{σοβά}} = 90\%$ με $T_{\text{pcm}} = 25$ και $T_{\Delta 1} = T_{\Delta 2} = 20$

Ανατρέχουμε στον Πιν.5.1.7 και βλέπουμε την πυκνότητα $\rho_{\text{μείγ}}$ και την ειδική θερμοχωρητικότητα $C\rho_{\text{μείγ}}$ όπως και στην 1^η Παραμετρική μελέτη και αντικαθιστούμε στην εξ.24. Για $t = 6.00$ έχω $G_T = 0$ και συνεπώς βρίσκουμε T_{pcm}^1 και συνεχίζουμε για όλο το 24ωρο με βήμα 1 ώρας .Επαναλαμβάνεται αυτή η διαδικασία ώσπου οι τιμές που προκύπτουν να συγκλίνουν.

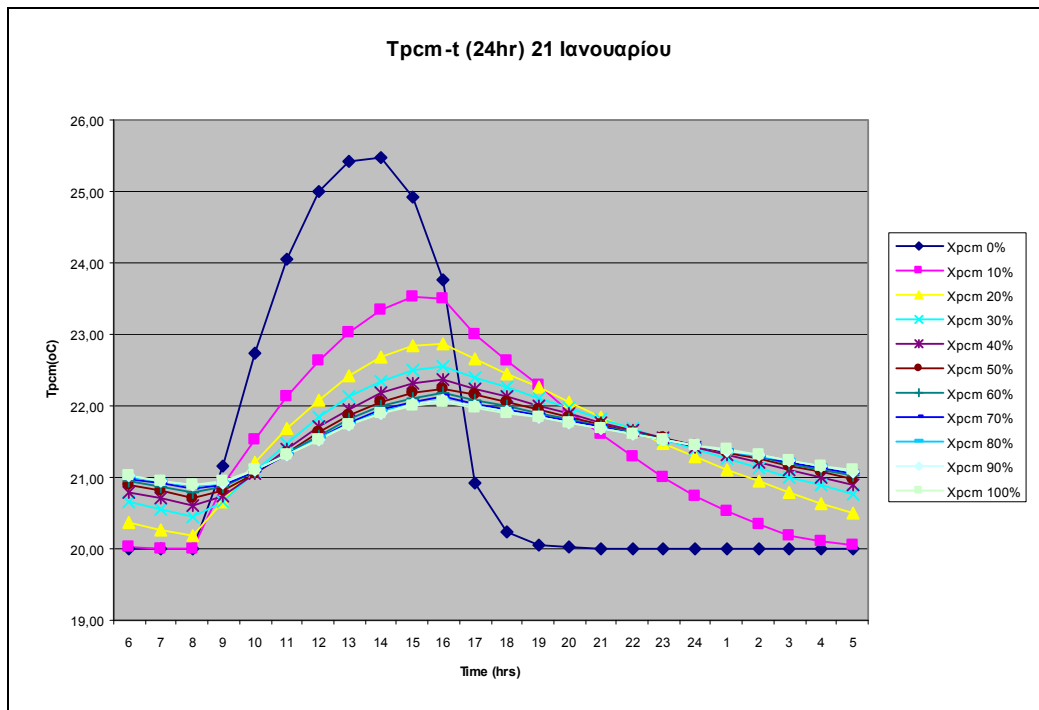
Από τους υπολογισμούς μας προκύπτει η μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM το 24ωρο για όλα τα πιθανά ποσοστά PCM τους μήνες Νοέμβριο έως και Μάρτιο για συναλλαγή με δύο δωμάτια και παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα.



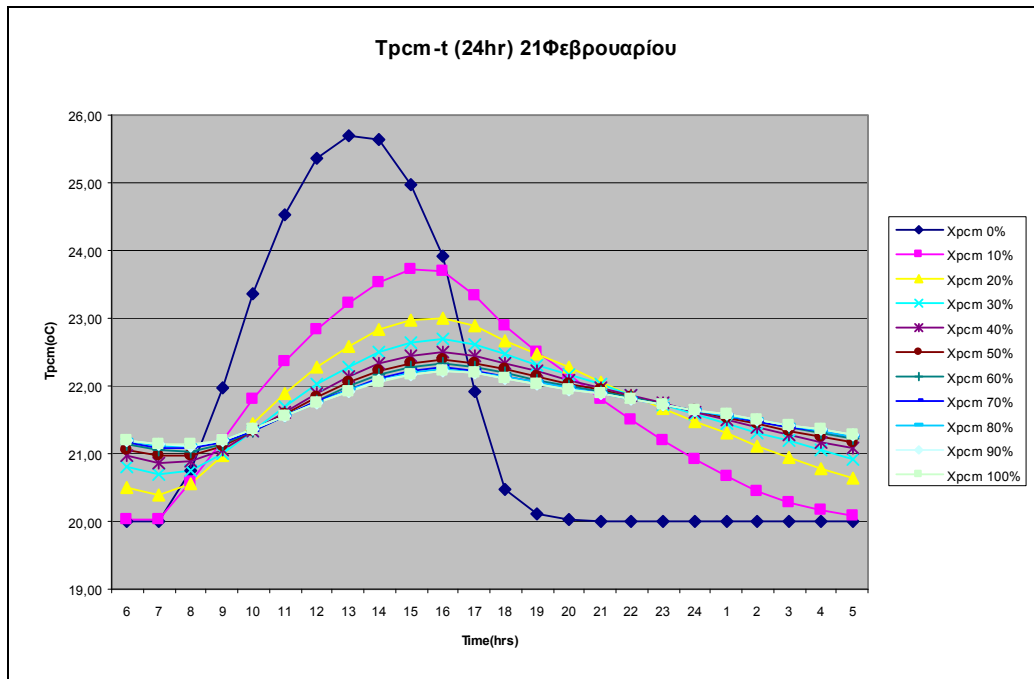
Σχήμα 5.3.1.Μεταβολή της T_{pcm} για συναλλαγή με δύο δωμάτια για ένα 24ωρο για όλα τα ποσοστά X_{pcm} 21 Νοεμβρίου



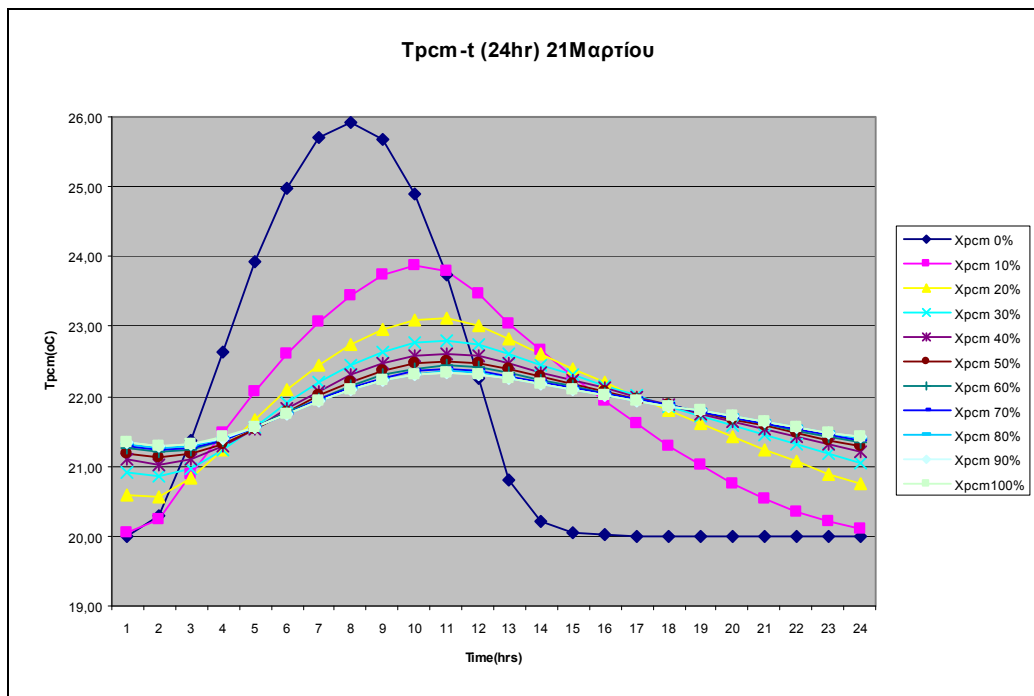
Σχήμα 5.3.2. Μεταβολή της Trcm για συναλλαγή με δύο δωμάτια για ένα 24ωρο για όλα τα ποσοστά Xrcm 21 Δεκεμβρίου



Σχήμα 5.3.3. Μεταβολή της Trcm για συναλλαγή με δύο δωμάτια για ένα 24ωρο για όλα τα ποσοστά Xrcm 21 Ιανουαρίου



Σχήμα 5.3.4. Μεταβολή της Trcm για συναλλαγή με δύο δωμάτια για ένα 24ωρο για όλα τα ποσοστά Xrcm 21 Φεβρουαρίου



Σχήμα 5.3.5. Μεταβολή της Trcm για συναλλαγή με δύο δωμάτια για ένα 24ωρο για όλα τα ποσοστά Xrcm 21 Μαρτίου

Παρατηρήσεις για τα διαγράμματα

Ισχύουν και πάλι οι παρατηρήσεις που έγιναν για τα αντίστοιχα διαγράμματα της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης όπου τον Νοέμβριο και τον Μάρτιο παρατηρείται μία μικρή αύξηση στα μέγιστα των θερμοκρασιών. Επίσης παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση όπως ήταν αναμενόμενο ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό του PCM στο μίγμα τόσο το εύρος των θερμοκρασιών μειώνεται εξαιτίας της πτώσης των μέγιστων θερμοκρασιών.

Σκοπός αυτής της μελέτης είναι να εξετασθεί και η περιεκτικότητα στην οποία η απόδοση είναι μεγαλύτερη αλλά και να συγκριθεί η απόδοση του υλικού για την συναλλαγή με δύο δωμάτια σε σχέση με την συναλλαγή με ένα δωμάτιο για τρεις μήνες Νοέμβριο, Ιανουάριο και Μάρτιο.

Από τα διαγράμματα παρατηρείται μία μείωση των μέγιστων και των ελάχιστων θερμοκρασιών σε σχέση με τα αντίστοιχα διαγράμματα της 1^{ης} Παραμετρικής μελέτης όπως ήταν βέβαια αναμενόμενο εφόσον το PCM συναλλάσσει θερμότητα με δύο δωμάτια π.χ για ποσοστό 10% στις 21 Ιανουαρίου έχω θερμοκρασία στις 14:00 24,2°C για συναλλαγή με 1 δωμάτιο και 23,2°C για συναλλαγή με δύο δωμάτια..

Βέβαια και εδώ θα πραγματοποιήσουμε περαιτέρω έλεγχο πέρα από τα συμπεράσματα του διαγράμματος γιατί δεν είναι δυνατόν να εξαχθεί ένα ασφαλές συμπέρασμα για το αν η αποθηκευμένη θερμότητα στο PCM είναι μεγαλύτερη στις μικρές ή στις μεγάλες περιεκτικότητες. Αυτό γίνεται εύκολα κατανοητό αν παρατηρηθεί η αρχική εξίσωση, δηλαδή η εξ.(23) για την περίπτωση της συναλλαγής με δύο δωμάτια:

$$C_{p_{μειγ}} \rho_{μειγ} V_{μειγ} (T_{pcM}^1 - T_{pcM}^0) = 0,85 G_T 3600) A_{\pi} - U_1 A_{\Delta 1} (T_{pcM}^0 - T_{\Delta 1}) 3600 - U_2 A_{\Delta 2} (T_{pcM}^0 - T_{\Delta 2}) 3600$$

όπου, όταν αυξάνεται η περιεκτικότητα σε PCM ο πρώτος όρος στο δεξί μέλος μένει σταθερός ενώ ο δεύτερος και ο τρίτος όρος στο δεξί μέλος μειώνεται καθώς οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει το PCM πέφτουν. Άρα το αριστερό μέλος πρέπει να αυξηθεί.

Το γεγονός ότι αυξάνεται το δεύτερο μέλος θα μπορούσε να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι αυξάνεται η αποθηκευόμενη θερμότητα. Αυτό το συμπέρασμα όμως είναι εσφαλμένο διότι η αύξηση αυτή μπορεί να μην είναι ποιοτική, αφού όταν αυξάνεται πολύ η μάζα, το PCM λόγω της μικρής θερμικής αγωγιμότητας αρχίζει και λειτουργεί σαν μόνωση και δεν επιτρέπει στην θερμότητα να εισχωρήσει στο εσωτερικό του PCM και να αποθηκευτεί ως ωφέλιμη λανθάνουσα θερμότητα.

Επομένως, απαιτείται περαιτέρω έλεγχος για να διαπιστωθεί αν η αποθηκευόμενη θερμότητα είναι περισσότερη στις μικρές ή στις μεγάλες περιεκτικότητες ο οποίος πραγματοποιείται στο επόμενο βήμα.

ΒΗΜΑ 7- C_{peff} , T_{pcm}

Για να διαπιστωθεί αν η αποθηκευόμενη θερμότητα είναι περισσότερη στις μικρές ή στις μεγάλες περιεκτικότητες και για να συγκριθεί η απόδοση του υλικού για την συναλλαγή με δύο δωμάτια σε σχέση με τις προηγούμενες μελέτες που υπήρχε συναλλαγή μόνο με ένα δωμάτιο, κατασκευάζονται για τρία ποσοστά ενδεικτικά και για τους μήνες Νοέμβριο, Ιανουάριο και Μάρτιο τα διαγράμματα C_{peff} , T_{pcm} που θα αποδείξουν τι ποσοστό της ενεργούς καμπύλης καλύπτεται.

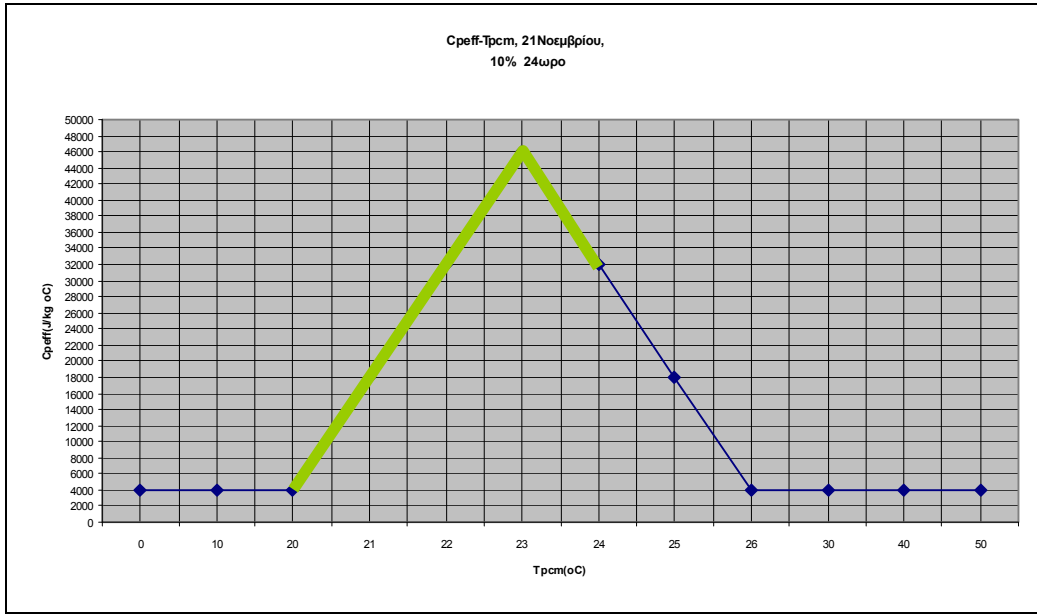
Για τους πίνακες τιμών που ακολουθούν έχουν χρησιμοποιηθεί η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία που αναπτύσσει το PCM για κάθε ποσοστό και οι αντίστοιχες ειδικές θερμοχωρητικότητες που δίνουν, ενώ έχει γίνει παρεμβολή των σημείων της ενεργούς καμπύλης και φαίνεται στα διαγράμματα με το πράσινο χρώμα.

Μετά τους πίνακες τιμών ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα:

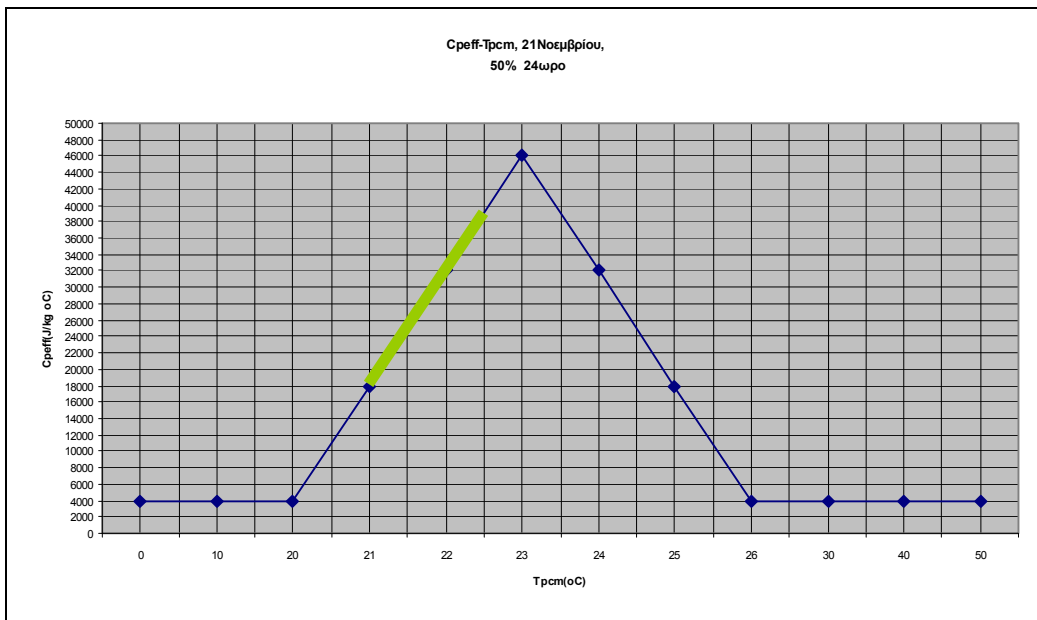
Πίν.5.3.1: C_{peff}, T_{PCM}	
21 Νοεμβρίου, $X_{PCM}=10\%$ (24ωρο)	
20,02	4280
21	18000
22	32000
23	46000
24,05	31300

Πίν.5.3.2: C_{peff}, T_{PCM}	
21 Νοεμβρίου, $X_{PCM}=50\%$ (24ωρο)	
20,99	17860
21	18000
22	32000
22,52	39280

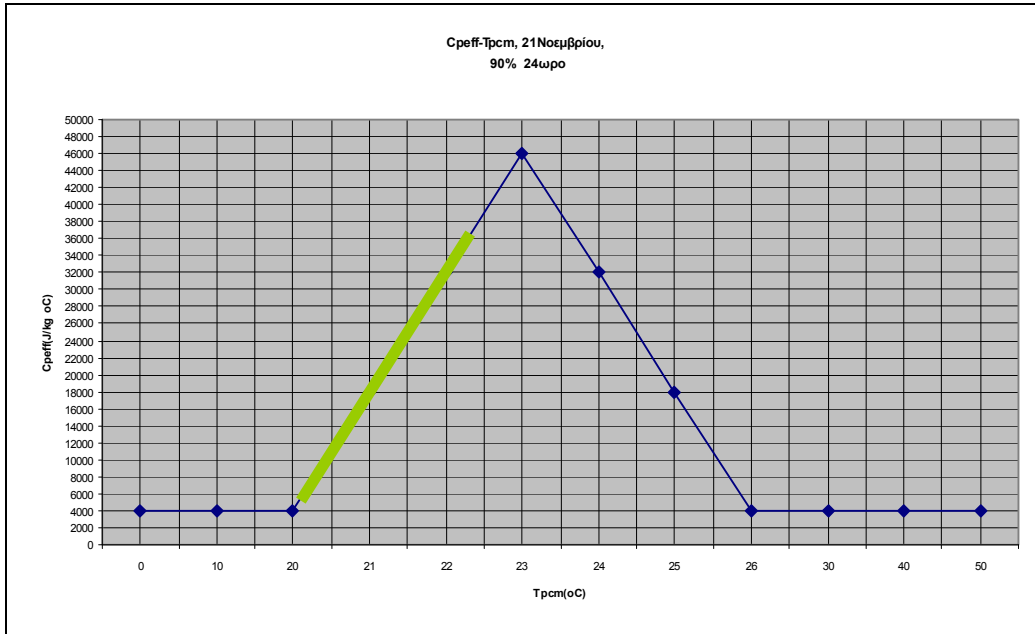
Πίν.5.3.3: C_{peff}, T_{PCM}	
21 Νοεμβρίου, $X_{PCM}=90\%$ (24ωρο)	
21,16	20240
22	32000
22,34	36760



Σχήμα 5.3.6: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Νοέμβριο με 10% PCM το 24ωρο (2δωμάτια).



Σχήμα 5.3.7: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Νοέμβριο με 50% PCM το 24ωρο (2δωμάτια).



Σχήμα 5.3.8: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Νοέμβριο με 90% PCM το 24ωρο(2δωμάτια).

Πίν.5.3.4: C_{peff}, T_{PCM},

21 Ιανουαρίου, X_{PCM}=10% (24ωρο)

20	4000
21	18000
22	32000
23	46000
23,53	38580

Πίν.5.3.5: C_{peff}, T_{PCM}

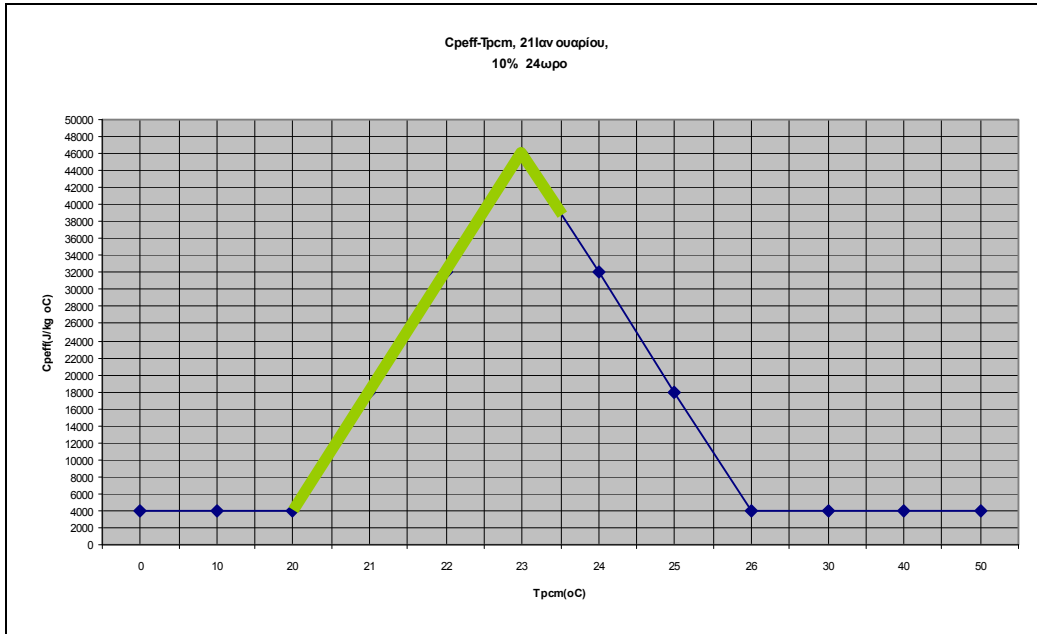
21 Ιανουαρίου, X_{PCM}=50% (24ωρο)

20,72	14080
21	18000
22	32000
22,25	35500

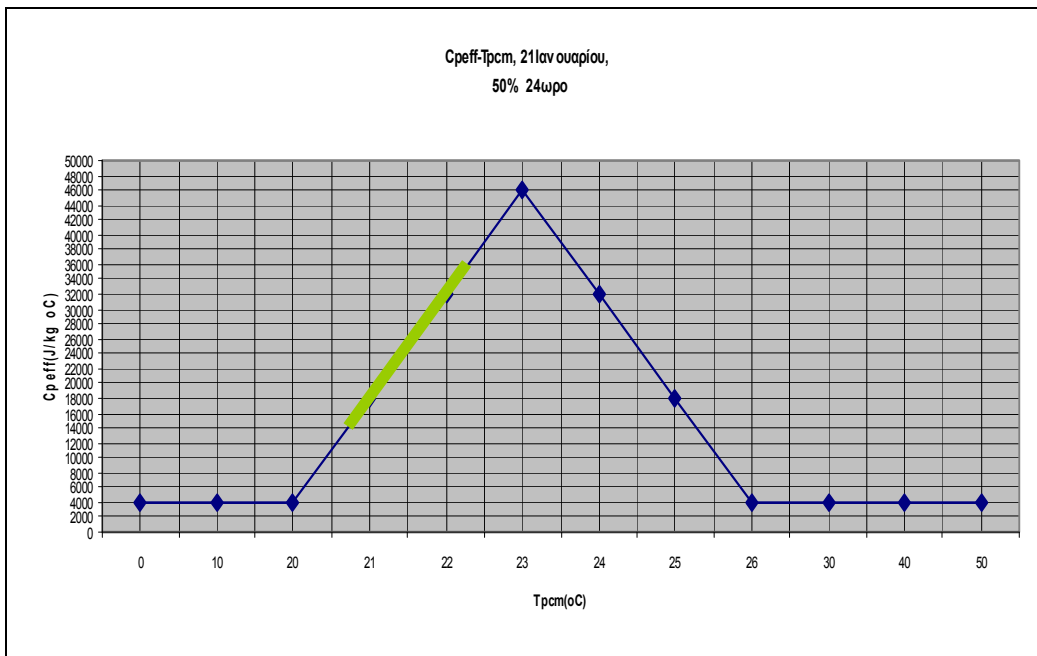
Πίν.5.3.6: C_{peff}, T_{PCM}

21 Ιανουαρίου, X_{PCM}=90% (24ωρο)

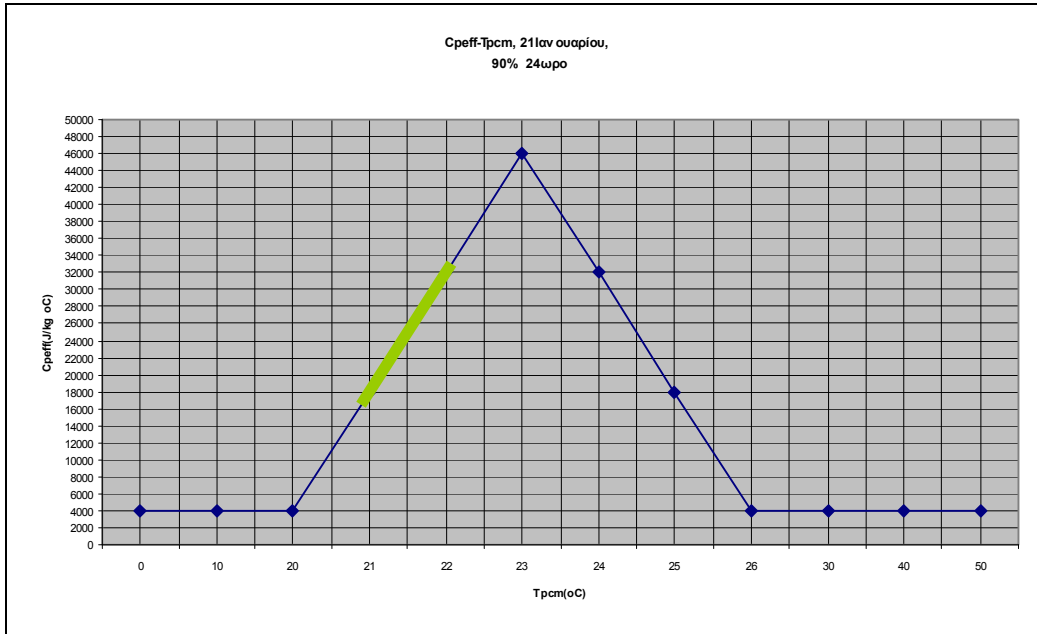
20,88	16320
21	18000
22,07	32980



Σχήμα 5.3.9: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 10% PCM το 24ωρο (2δωμάτια).



Σχήμα 5.3.10: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 50% PCM το 24ωρο (2δωμάτια).



Σχήμα 5.3.11: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 90% PCM το 24ωρο(2δωμάτια).

Πίν.5.3.7: C_{peff}, T_{PCM},

21 Μαρτίου, X_{PCM}=10% (24ωρο)

20,05	4700
21	18000
22	32000
23	46000
23,87	33820

Πίν.5.3.8: C_{peff}, T_{PCM}

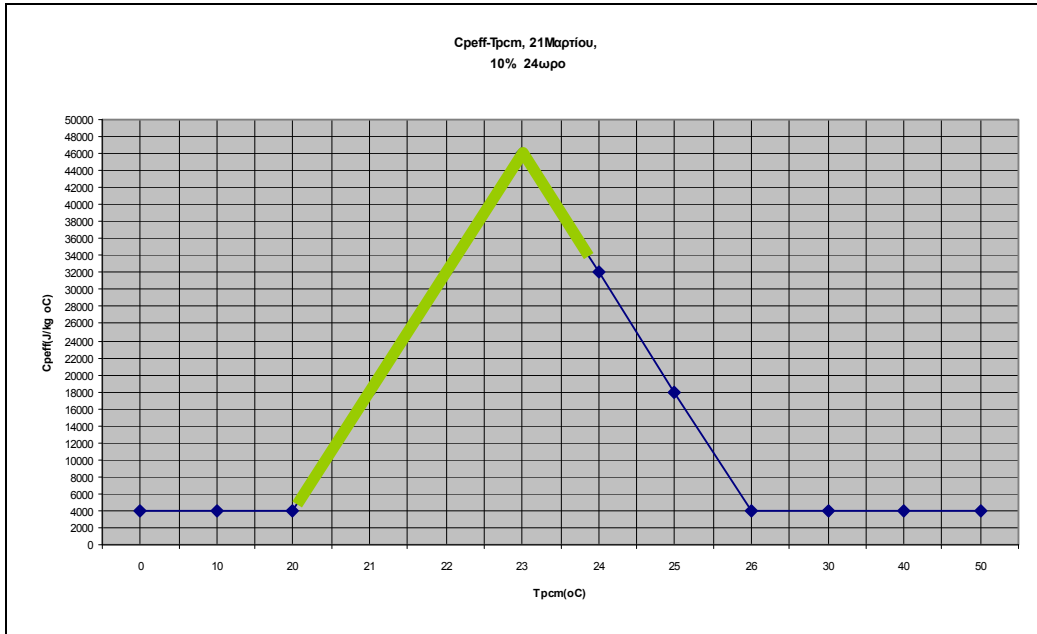
21 Μαρτίου, X_{PCM}=50% (24ωρο)

21,13	19820
22	32000
22,51	39140

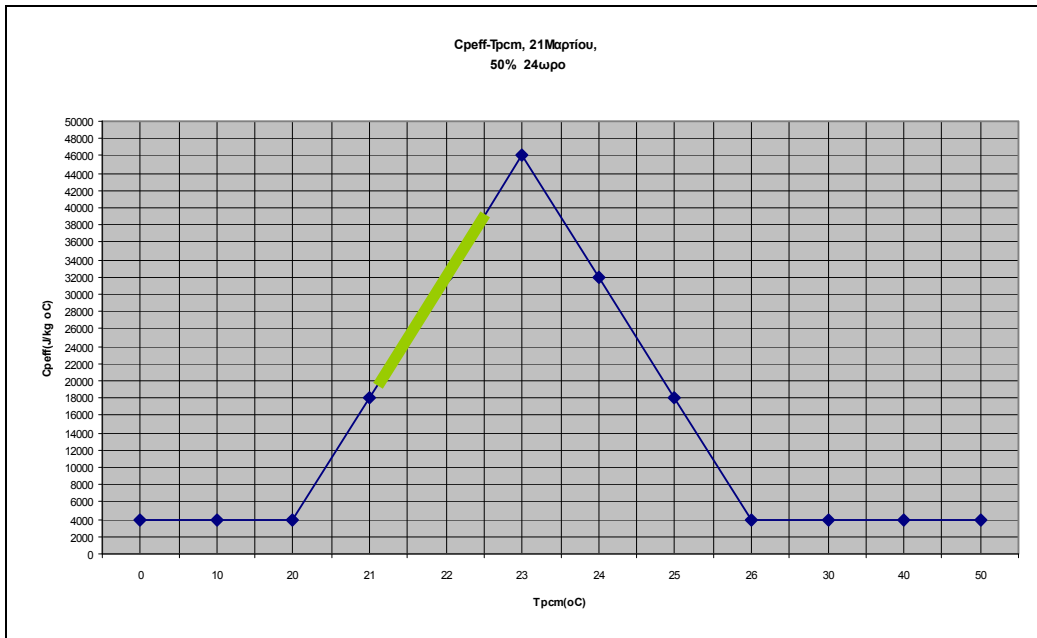
Πίν.5.3.9: C_{peff}, T_{PCM}

21 Μαρτίου, X_{PCM}=90% (24ωρο)

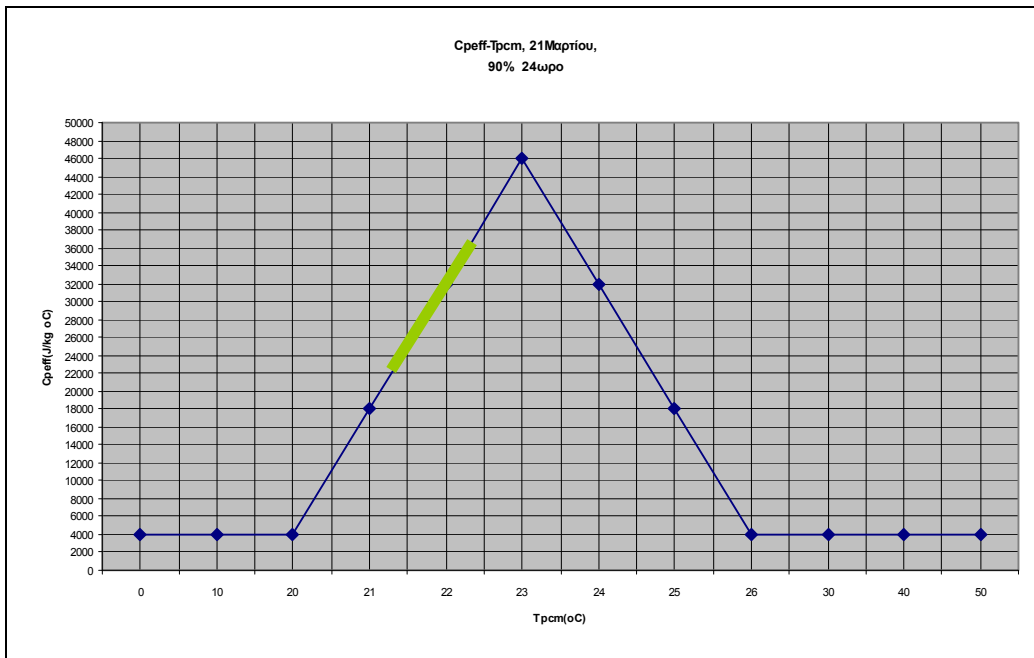
21,29	22060
22	32000
22,34	36760



Σχήμα 5.3.12: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Μάρτιο με 10% PCM το 24ωρο (2δωμάτια).



Σχήμα 5.3.13: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Μάρτιο με 50% PCM το 24ωρο (2δωμάτια).



Σχήμα 5.3.14: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Μάρτιο με 90% PCM το 24ωρο(2δωμάτια).

Συμπεράσματα

Όπως είναι εμφανές από τα διαγράμματα, όταν χρησιμοποιείται ένα μικρό ποσοστό PCM, όπως το 10%, πραγματοποιείται καλύτερη εκμετάλλευση του PCM και για τους τρεις μήνες. Αυτό σημαίνει ότι καλύπτεται μεγαλύτερο μέρος του τριγώνου που σχηματίζει η καμπύλη που αντιστοιχεί στο εύρος αλλαγής φάσης. Αν υπολογιστεί και το εμβαδόν κάτω από τις έγχρωμες καμπύλες δίνει την αποθηκευμένη θερμότητα στο PCM.

Η θερμότητα αυτή για τις τρεις περιπτώσεις υπολογίζεται όπως και στην 1^η Παραμετρική μελέτη. Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζουμε την αποθηκευμένη θερμότητα και στις υπόλοιπες περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα

Πιν.5.3.10	10%	50%	90%
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	115499,7	43712,1	33630,0
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	97413,7	44622,0	29333,5
ΜΑΡΤΙΟΣ	109504,2	40682,4	30880,5

Το ποσοστό 10% είναι και πάλι το πιο αποδοτικό με την μεγαλύτερη αποθήκευση θερμότητας σε σχέση με τα άλλα δύο ποσοστά που μελετάμε. Άρα αποδεικνύεται και από τα αποτελέσματα του Πιν.5.3.10 ότι και για τους τρεις μήνες μελέτης οι μικρές περιεκτικότητες είναι προτιμότερες γιατί επιτρέπουν στο PCM να αποθηκεύει περισσότερη θερμότητα, την οποία αποδίδει αργότερα με κάποια χρονική καθυστέρηση ώστε να θερμανθεί ο χώρος.

5.4 Παραμετρική μελέτη ως προς την περιεκτικότητα PCM στο μείγμα PCM-Σοβά για ένα 48ωρο κάθε μήνα από τον Νοέμβριο-Μάρτιο για την συναλλαγή με δύο δωμάτια

Σκοπός της μελέτης αυτής είναι να εξετασθεί η συμπεριφορά του PCM για όλα τα πιθανά ποσοστά του Πιν.5.1.7 για το μείγμα PCM-Σοβά όταν συναλλάσσει θερμότητα με δύο δωμάτια για ένα 48ωρο.

Σε αυτή την μελέτη παρατηρείται η συμπεριφορά και η απόδοση του PCM εάν αφαιρεθεί η μόνωση μεταξύ της διαστρωμάτωσης του PCM-Σοβά και του σοβά ώστε να γίνεται συναλλαγή με τα δύο δωμάτια όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παραμετρική μελέτη(5.3)

ΒΗΜΑ 1,3,4,5,6 είναι ακριβώς ίδια με την προηγούμενη παραμετρική μελέτη(5.3)

ΒΗΜΑ 2 - G_b , G_d , G_T

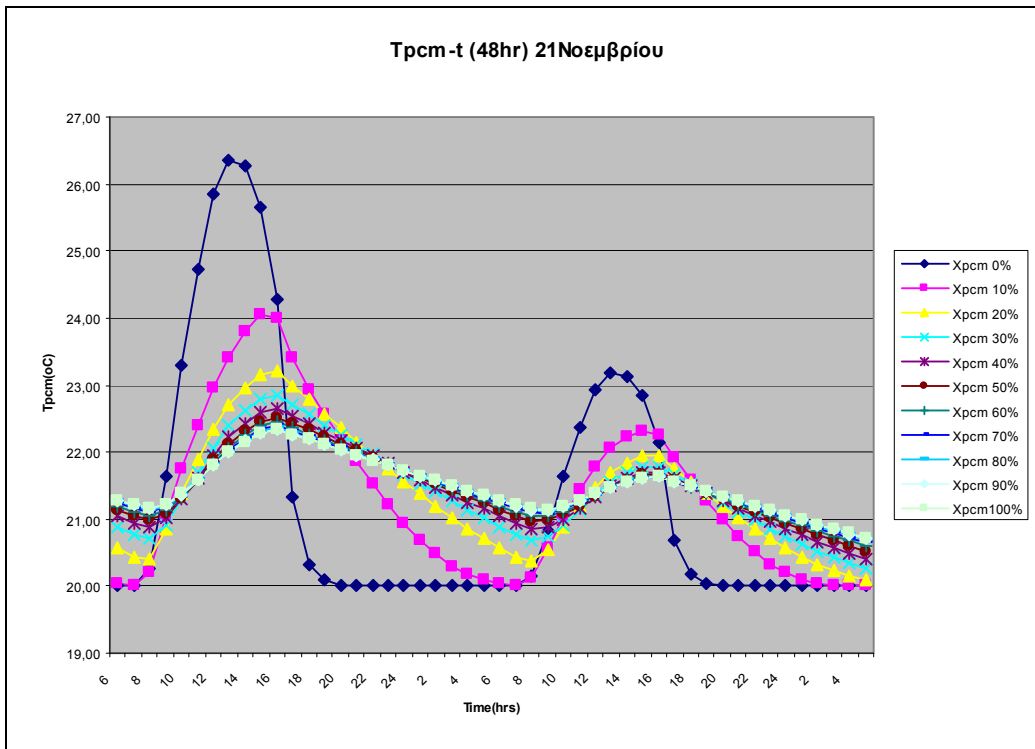
Για το πρώτο 24ωρο τα μεγέθη G_b , G_d , G_T θα άλλαζαν μόνο αν ήταν διαφορετικό το D. Εφόσον το D είναι ίδιο παραμένουν ίδια και τα 3 μεγέθη
Ισχύουν λοιπόν οι πίνακες Πιν.5.1.1, Πιν.5.1.2, Πιν.5.1.3, Πιν.5.1.4, Πιν.5.1.5

Για το δεύτερο 24ωρο θεωρείτε μία νεφοσκεπή μέρα και θα μειωθεί η ηλιακή ακτινοβολία στο μισό.

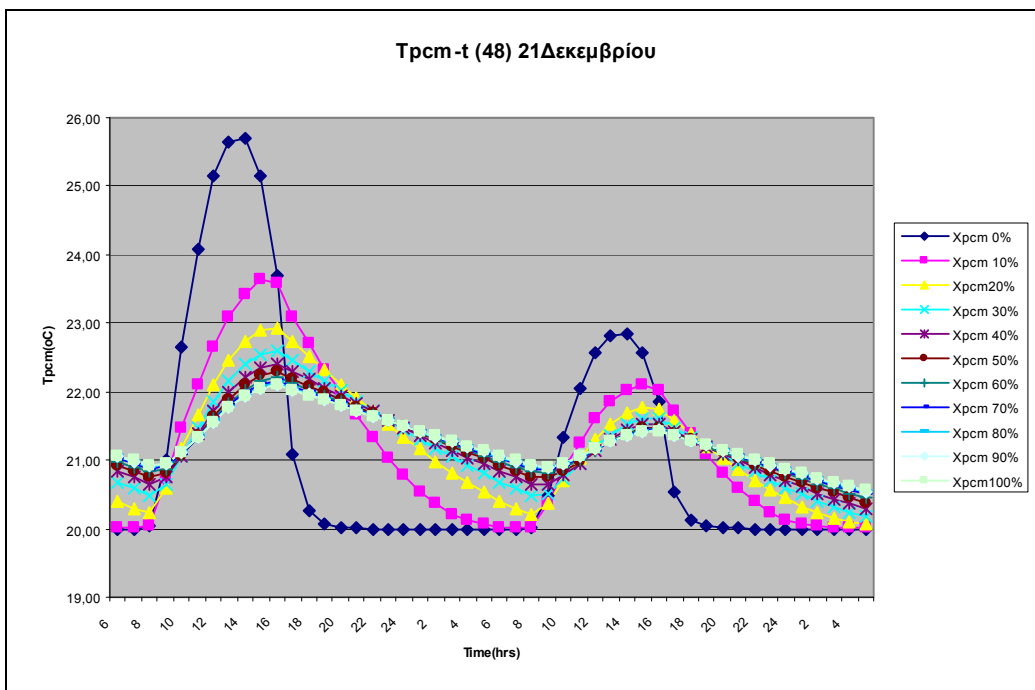
Συνεπώς θα υπολογιστεί η θερμοκρασία του PCM για ένα 48ωρο από την εξ.(24)

$$T_{\text{pcm}}^1 = T_{\text{pcm}}^0 + (6120 G_T - 421200(T_{\text{pcm}}^0 - 20)) / (0,36 \rho_{\text{μείν}} C_{\rho_{\text{μείν}}})$$

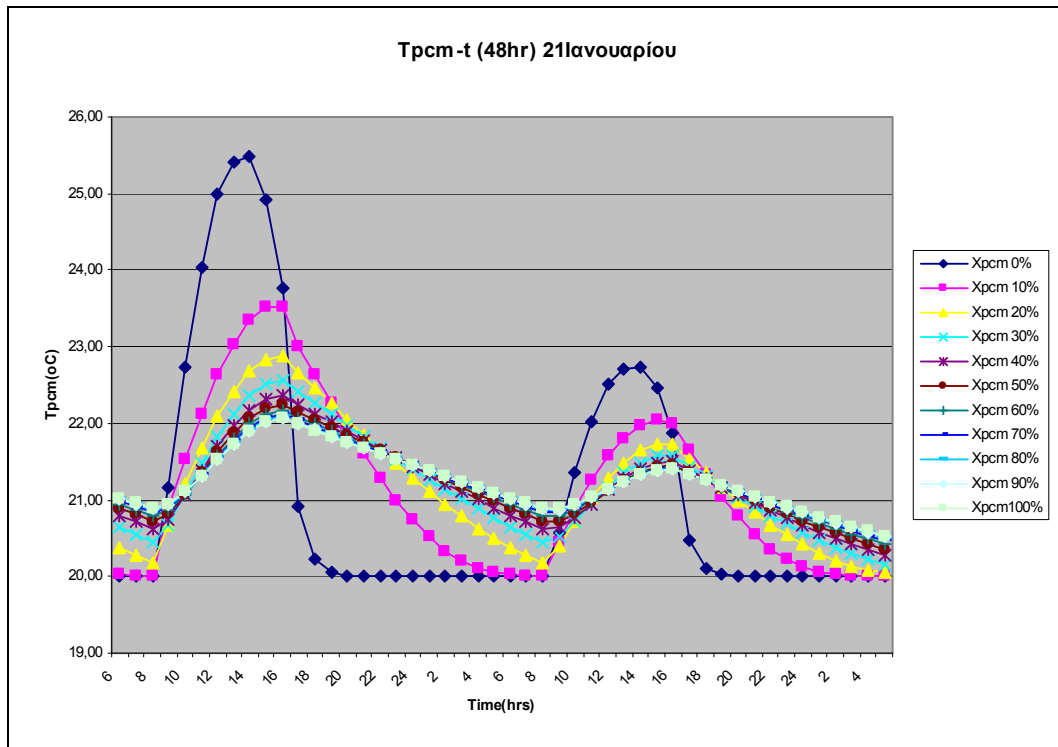
Τα αποτελέσματα παρατίθενται στα παρακάτω διαγράμματα και παρουσιάζουν την συμπεριφορά του PCM όταν συναλλάσει θερμότητα με δύο δωμάτια για όλες τις πιθανές περιεκτικότητες του Πιν.5.1.7 για τους μήνες Νοέμβριο έως και Μάρτιο



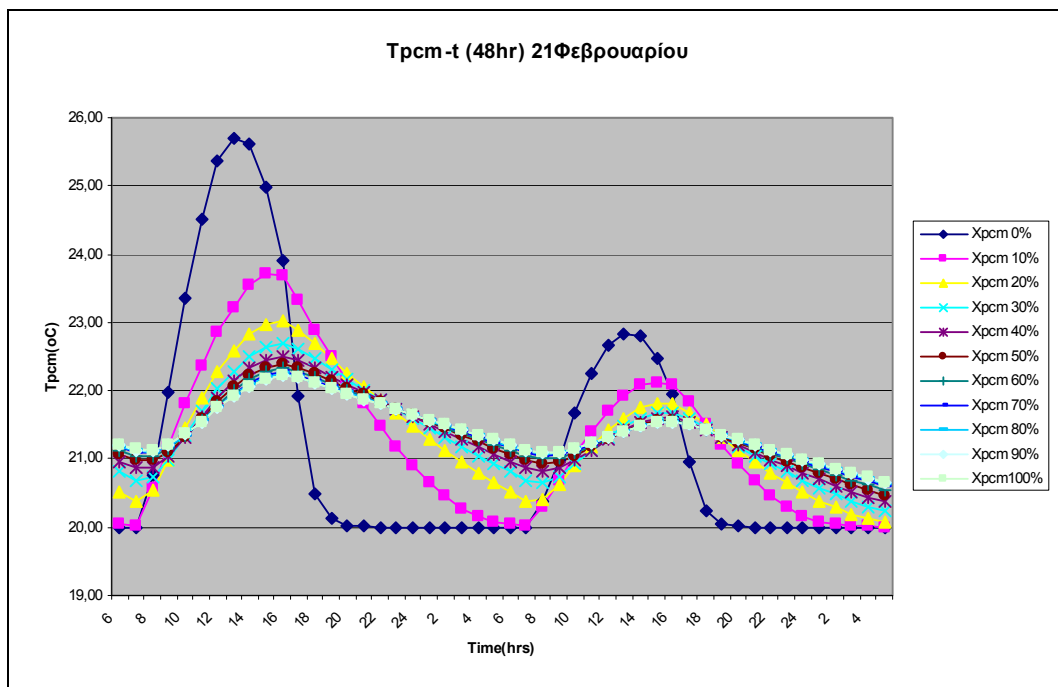
Σχήμα 5.4.1. Μεταβολή της Trcm για συναλλαγή με δύο δωμάτια για ένα 48ωρο για όλα τα ποσοστά Xrcm 21 Νοεμβρίου



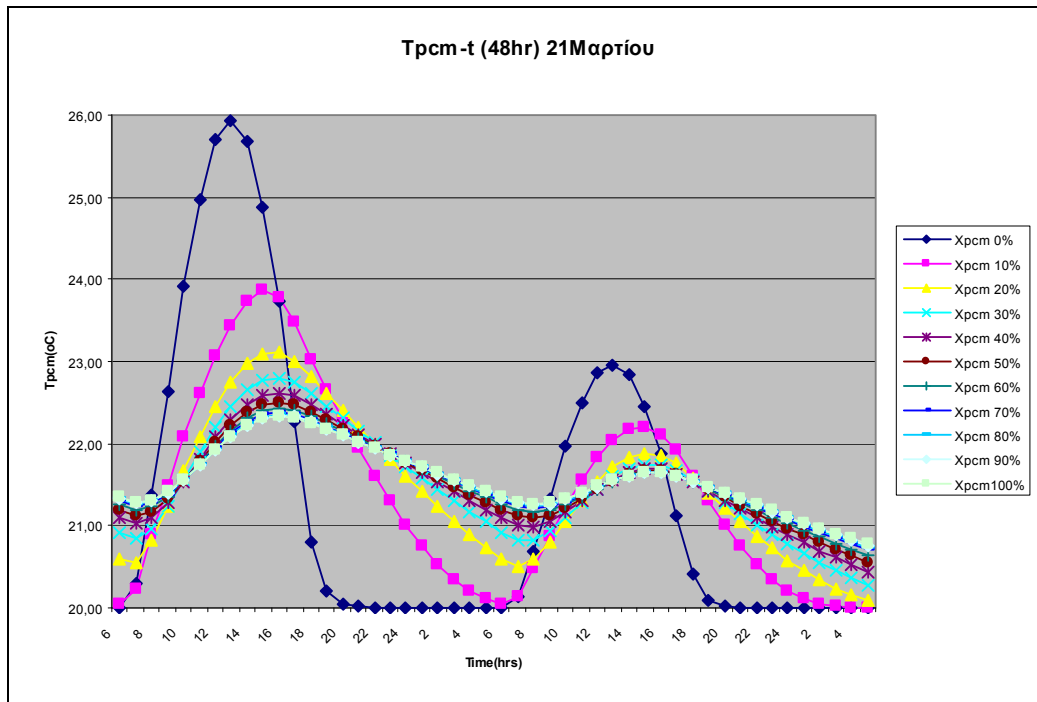
Σχήμα 5.4.2. Μεταβολή της Trcm για συναλλαγή με δύο δωμάτια για ένα 48ωρο για όλα τα ποσοστά Xrcm 21 Δεκεμβρίου



Σχήμα 5.4.3. Μεταβολή της Trcm για συναλλαγή με δύο δωμάτια για ένα 48ωρο για όλα τα ποσοστά Xrcm 21 Ιανουαρίου



Σχήμα 5.4.4. Μεταβολή της Trcm για συναλλαγή με δύο δωμάτια για ένα 48ωρο για όλα τα ποσοστά Xrcm 21 Φεβρουαρίου



Σχήμα 5.4.5. Μεταβολή της T_{pcm} για συναλλαγή με δύο δωμάτια για ένα 48ωρο για όλα τα ποσοστά X_{pcm} 21 Μαρτίου

Παρατηρήσεις για τα διαγράμματα

Συγκρίνοντας το πρώτο με το δεύτερο 24ωρο παρατηρείτε δικαιολογημένα σημαντική μείωση των μέγιστων θερμοκρασιών για όλα τα ποσοστά PCM κατά το δεύτερο 24ωρο αφού έχω την μισή ηλιακή ακτινοβολία από το πρώτο 24ωρο.

Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι δεν υπήρξε αξιόλογη μεταβολή στα ελάχιστα των θερμοκρασιών μεταξύ πρώτου και δεύτερου εικοσιτετράωρου, ωστόσο παρατηρήθηκε μία μικρή μείωση των ελαχίστων το δεύτερο εικοσιτετράωρο.

Αυτό που έχει σημασία είναι ότι ακόμα και μία ημέρα νεφοσκεπή το PCM διατηρεί θερμοκρασίες έως και 22°C ενώ για ποσοστό 40% έως και 100% διατηρεί πάνω από 21°C γεγονός που αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα του υλικού.

Σκοπός αυτής της μελέτης είναι να αποδείξει αν το PCM μπορεί να είναι ωφέλιμο ακόμα και σε περιπτώσεις όπου λόγω νεφοσκεπούς ημέρας, η ηλιακή ακτινοβολία είναι αρκετά μειωμένη και φυσικά για την συναλλαγή με δύο δωμάτια. Για να αποδειχθεί κάτι τέτοιο κατασκευάζονται πάλι τα διαγράμματα $C_{p,eff}$ - T_{PCM} και υπολογίζεται το εμβαδόν κάτω από τις καμπύλες

ΒΗΜΑ 7- $C_{p,eff}$, T_{pcm}

Για να αποδειχθεί αν το PCM μπορεί να είναι ωφέλιμο ακόμα και σε περιπτώσεις όπου λόγω νεφοσκεπούς ημέρας, η ηλιακή ακτινοβολία είναι αρκετά μειωμένη και φυσικά για την συναλλαγή με δύο δωμάτια, κατασκευάζονται για τρία ποσοστά ενδεικτικά και για τους μήνες Νοέμβριο, Ιανουάριο και Μάρτιο τα διαγράμματα $C_{p,eff}$, T_{pcm} που θα αποδείξουν τι ποσοστό της ενεργούς καμπύλης καλύπτεται.

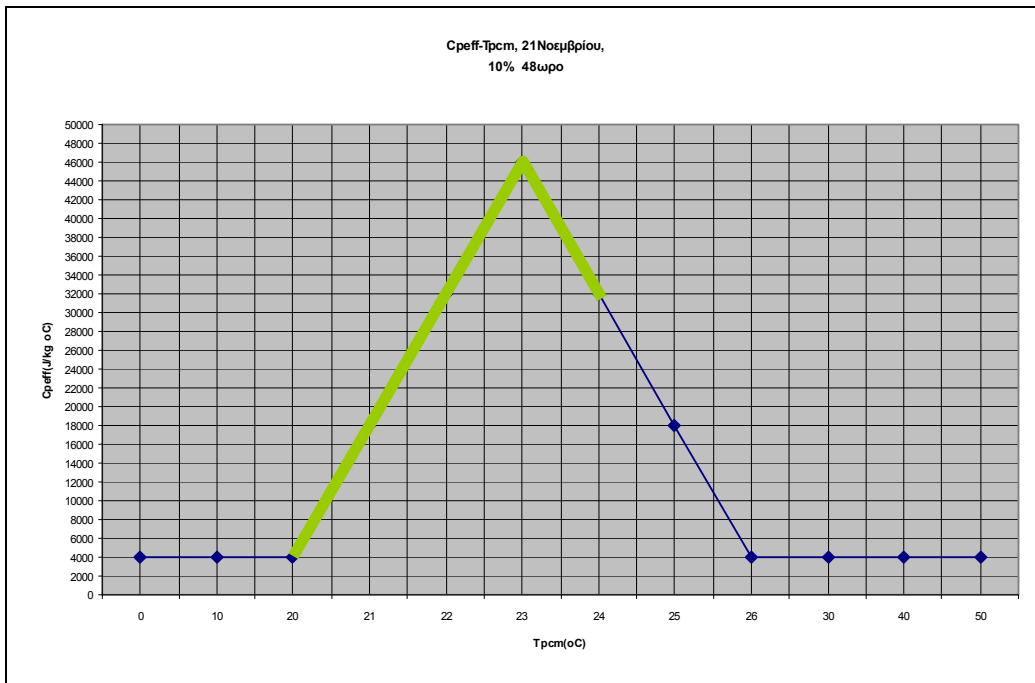
Για τους πίνακες τιμών που ακολουθούν έχουν χρησιμοποιηθεί η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία που αναπτύσσει το PCM για κάθε ποσοστό και οι αντίστοιχες ειδικές θερμοχωρητικότητες που δίνουν, ενώ έχει γίνει παρεμβολή των σημείων της ενεργούς καμπύλης και φαίνεται στα διαγράμματα με το πράσινο χρώμα.

Μετά τους πίνακες τιμών ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα:

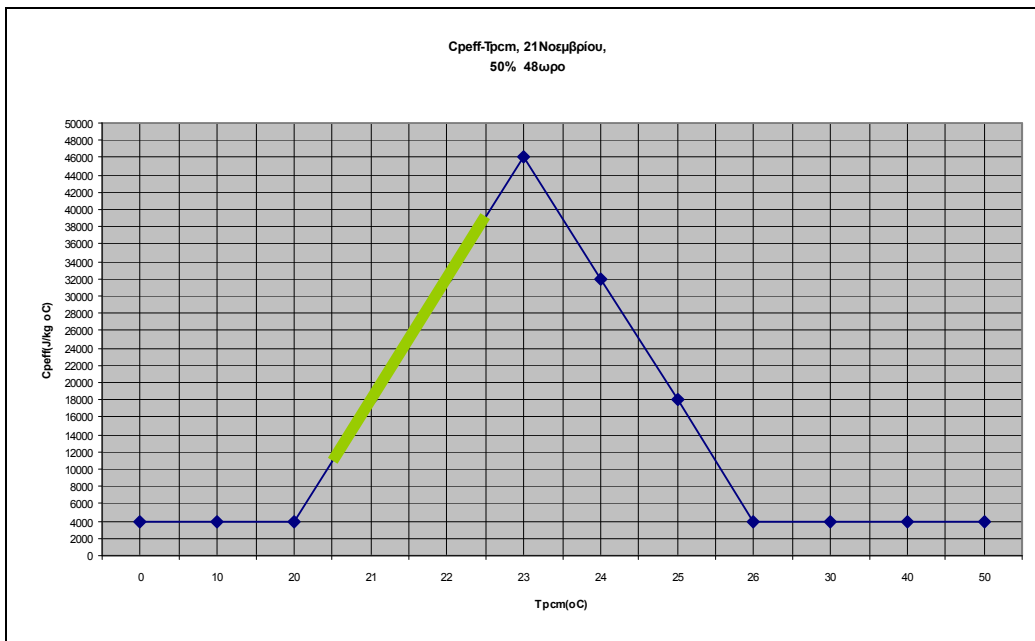
Πίν.5.4.1: $C_{p_{eff}}, T_{PCM}$	
21 Νοεμβρίου, $X_{PCM}=10\%$ (48ωρο)	
20	4000
21	18000
22	32000
23	46000
24,05	31300

Πίν.5.4.2: $C_{p_{eff}}, T_{PCM}$	
21 Νοεμβρίου, $X_{PCM}=50\%$ (48ωρο)	
20,52	11280
21	18000
22	32000
22,52	39280

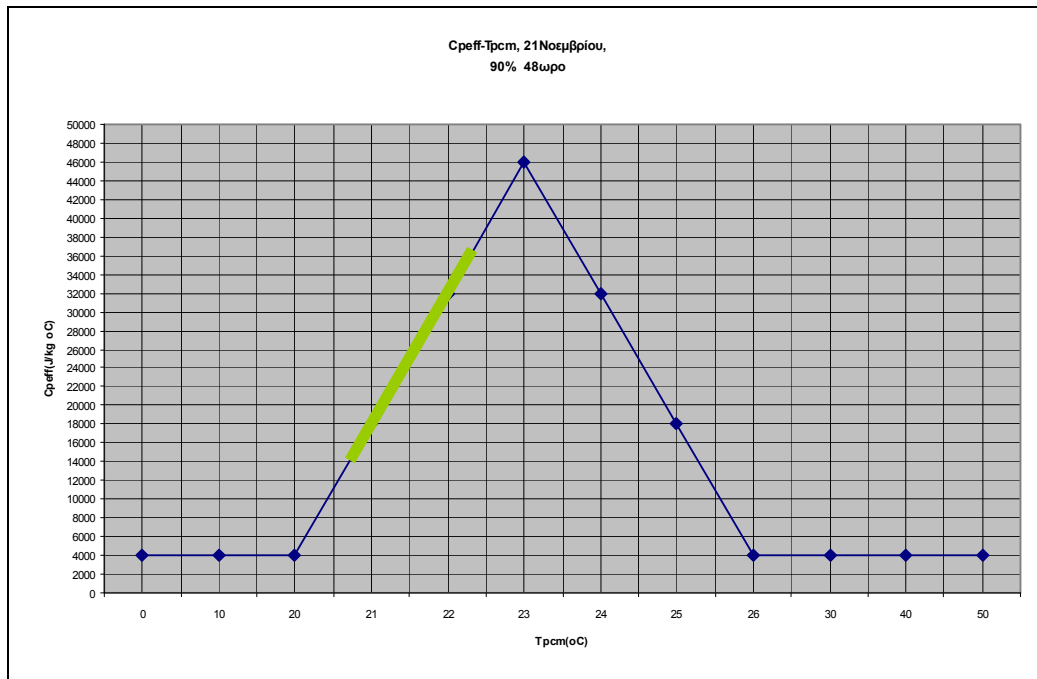
Πίν.5.4.3: $C_{p_{eff}}, T_{PCM}$	
21 Νοεμβρίου, $X_{PCM}=90\%$ (48ωρο)	
20,71	13940
21	18000
22	32000
22,34	36760



Σχήμα 5.4.6: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Νοέμβριο με 10% PCM το 24ωρο(2δωμάτια).



Σχήμα 5.4.7: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Νοέμβριο με 50% PCM το 24ωρο(2δωμάτια).



Σχήμα 5.4.8: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Νοέμβριο με 90% PCM το 24ωρο(2δωμάτια).

Πίν.5.4.4: $C_{p\text{eff}}, T_{\text{PCM}}$,

21 Ιανουαρίου, $X_{\text{PCM}}=10\%$ (48ωρο)

20	4000
21	18000
22	32000
23	46000
23,53	38580

Πίν.5.4.5: $C_{p\text{eff}}, T_{\text{PCM}}$

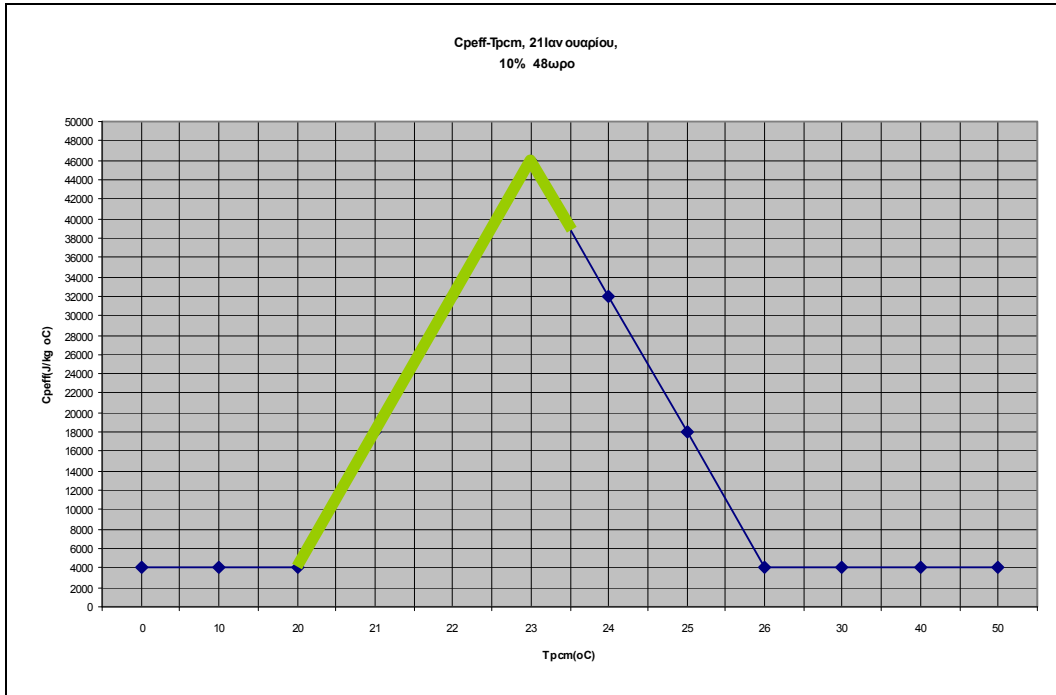
21 Ιανουαρίου, $X_{\text{PCM}}=50\%$ (48ωρο)

20,36	9040
21	18000
22	32000
22,25	35500

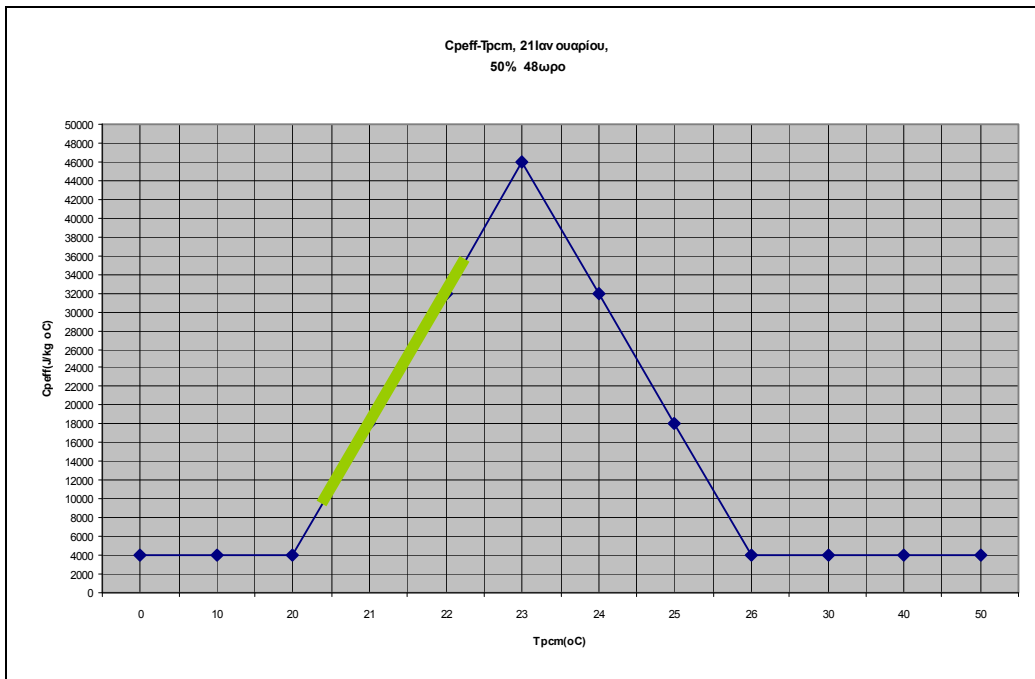
Πίν.5.4.6: $C_{p\text{eff}}, T_{\text{PCM}}$

21 Ιανουαρίου, $X_{\text{PCM}}=90\%$ (48ωρο)

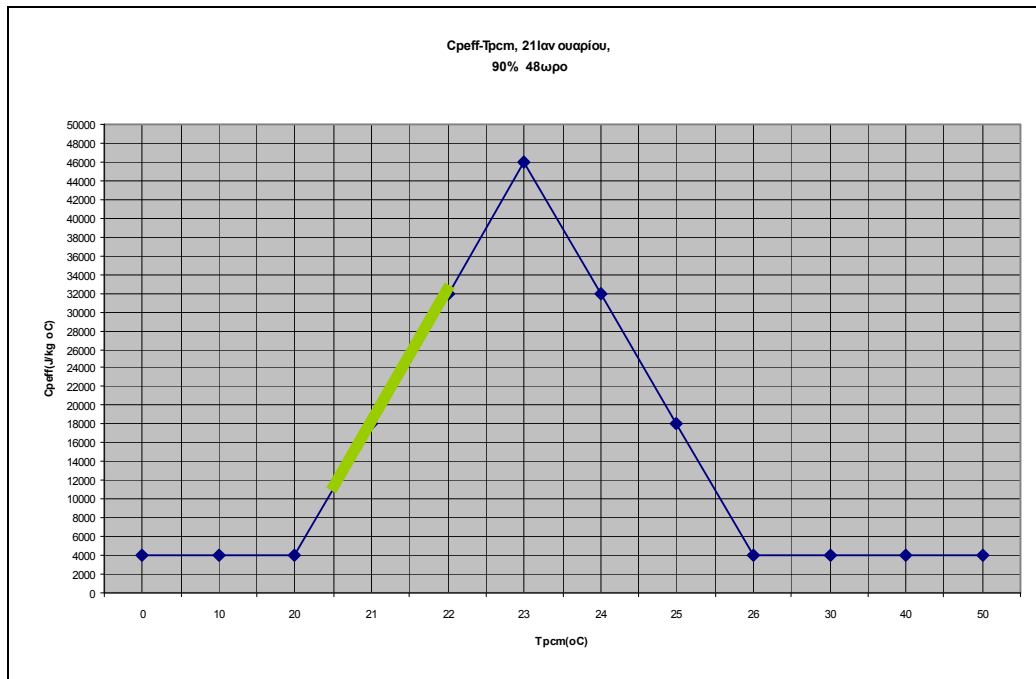
20,52	11280
21	18000
22,07	32980



Σχήμα 5.4.9: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 10% PCM το 24ωρο(2δωμάτια).



Σχήμα 5.4.10: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 50% PCM το 24ωρο(2δωμάτια).



Σχήμα 5.4.11: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Ιανουάριο με 90% PCM το 24ωρο(2δωμάτια).

Πίνακ.5.4.7: C_{peff}, T_{PCM} ,

21 Μαρτίου, X_{PCM}=10% (48ωρο)

20	4000
21	18000
22	32000
23	46000
23,87	33820

Πίνακ.5.4.8: C_{peff}, T_{PCM}

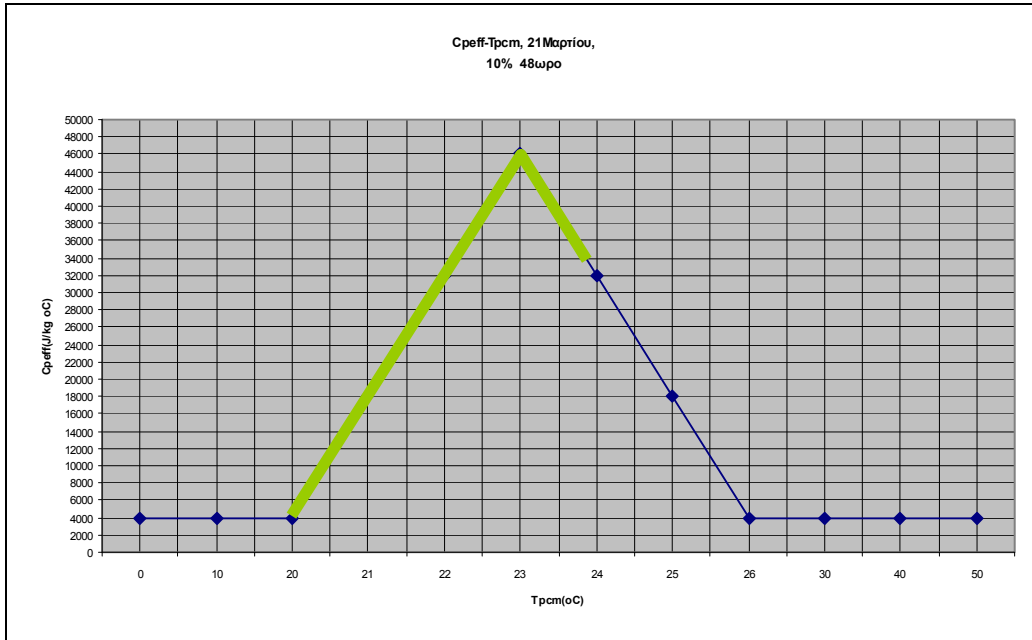
21 Μαρτίου, X_{PCM}=50% (48ωρο)

20,56	11840
21	18000
22	32000
22,51	39140

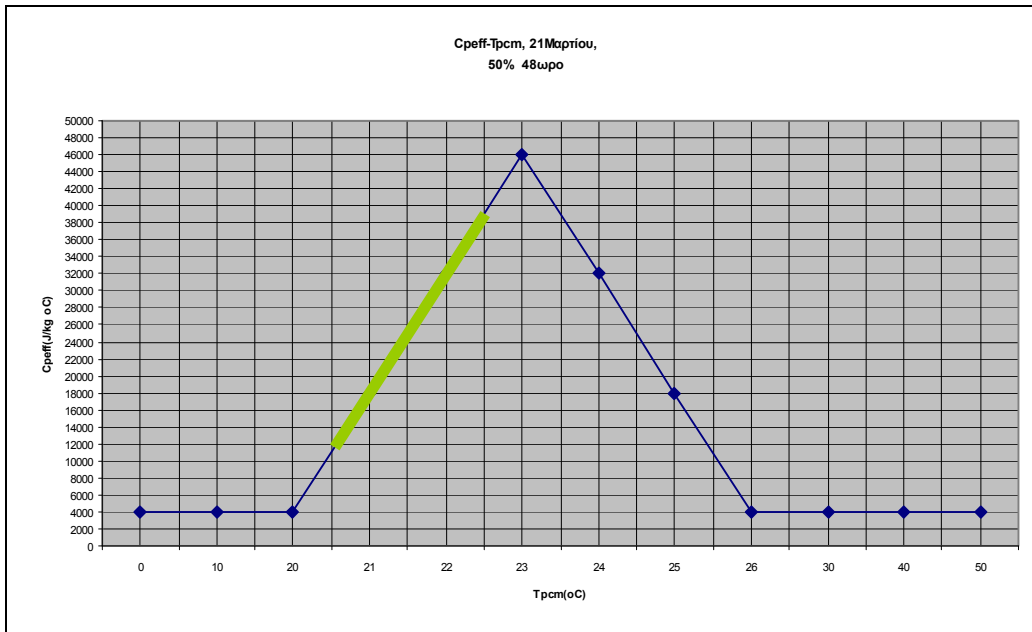
Πίνακ.5.4.9: C_{peff}, T_{PCM}

21 Μαρτίου, X_{PCM}=90% (48ωρο)

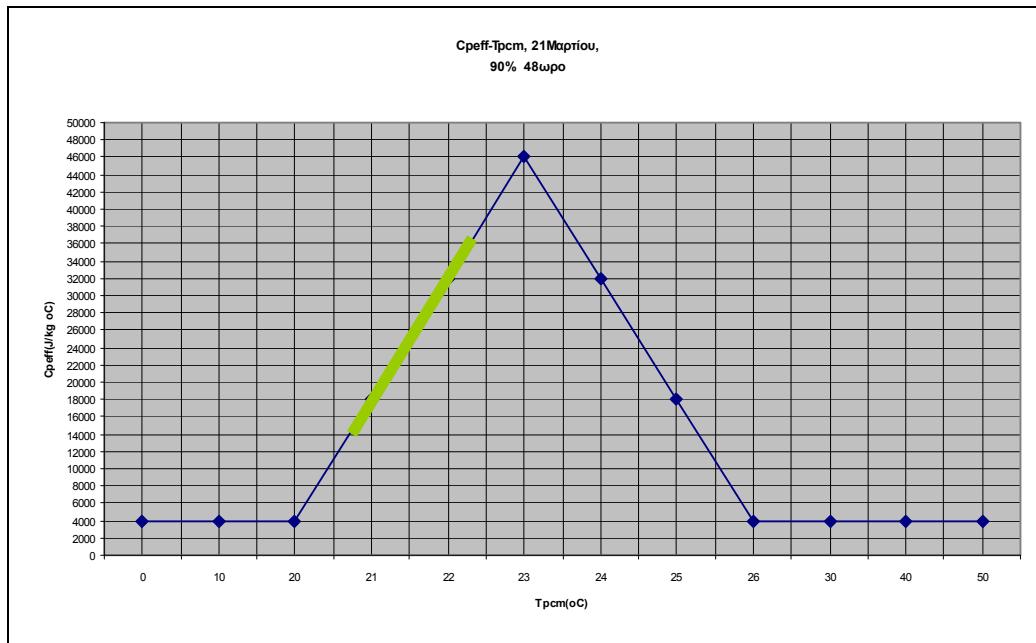
20,76	14640
21	18000
22	32000
22,34	36760



Σχήμα 5.4.12: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Μάρτιο με 10% PCM το 24ωρο(2δωμάτια).



Σχήμα 5.4.13: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Μάρτιο με 50% PCM το 24ωρο(2δωμάτια).



Σχήμα 5.4.14: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για Μάρτιο με 90% PCM το 24ωρο (2δωμάτια).

Συμπεράσματα

Τα διαγράμματα δεν παρουσιάζουν αξιόλογη διαφορά με τα αντίστοιχα διαγράμματα της προηγούμενης μελέτης εκ πρώτης όψεως. Υπολογίζεται και η αποθηκευόμενη θερμότητα από τα εμβαδόν κάτω από τις έγχρωμες καμπύλες.

Οι τύποι είναι όμοιοι με την 1^η Παραμετρική μελέτη.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

Πιν.5.4.10	10%	50%	90%
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	115582,5	50560	41320,5
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	97413,7	42090,3	34301,5
ΜΑΡΤΙΟΣ	109721,7	49705,5	40606

Το ποσοστό 10% είναι και πάλι το πιο αποδοτικό με την μεγαλύτερη αποθήκευση θερμότητας.

Από τα αποτελέσματα του Πιν.5.3.10 της προηγούμενης παραμετρικής μελέτης που μελετήθηκε η συμπεριφορά του υλικού αλλαγής φάσης για την συναλλαγή του με δύο δωμάτια για ένα 24ωρο φαίνεται πως οι θερμότητες του Πιν.5.4.10 είναι ελαφρώς μεγαλύτερες κατά κύριο λόγο, όχι όμως σε τέτοιο βαθμό αν συνυπολογιστεί μάλιστα ότι πρόκειται για τον διπλάσιο χρόνο ο οποίος πρέπει να καλυφθεί με μία μέρα νεφοσκεπή.

5.5 Παραμετρική μελέτη ως προς την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου για ένα 24ωρο

Σκοπός της μελέτης αυτής είναι να εξετασθεί η συμπεριφορά του PCM για διαφορετικές εσωτερικές θερμοκρασίες του δωματίου για την συναλλαγή θερμότητας με ένα δωμάτιο για ένα 24ωρο για τους τρεις χειμερινούς μήνες Νοέμβριο, Ιανουάριο, Μάρτιο.

ΒΗΜΑ 1- D,δ

Για την μελέτη αυτή επιλέγονται ενδεικτικά οι μέρες:

21 Νοεμβρίου ,21 Ιανουαρίου και 21 Μαρτίου για τα οποία το D και η ηλιακή απόκλιση δ είναι γνωστά από την 1^η Παραμετρική μελέτη.

ΒΗΜΑ 2 - G_b , G_d ,G_T

Τα μεγέθη G_b , G_d ,G_T θα άλλαζαν μόνο αν ήταν διαφορετικό τοD. Εφόσον το D είναι ίδιο παραμένουν ίδια και τα 3 μεγέθη για τους μήνες που θα εξετασθεί (Νοέμβριο,Ιανουάριο,Μάρτιο)

Ισχύουν λοιπόν οι πίνακες Πιν.5.1.1, Πιν.5.1.3, Πιν.5.1.5

ΒΗΜΑ 3-PCM

Επιλέγουμε το ίδιο PCM όπως και στην προηγούμενη μελέτη συνεπώς έχουμε τα ίδια χαρακτηριστικά και τις ίδιες εξισώσεις .Ισχύει λοιπόν ο Πιν.5.1.7 και οι εξισώσεις 10,11,12,13.

ΒΗΜΑ 4-Ποσοστό PCM (X_{pcm})

Επιλέγουμε ενδεικτικά κάποια ποσοστά PCM-σοβά για

X_{pcm} = 10%, 50%, 90%.

Έτσι καλύπτω το ελάχιστο, το μέσο και το μέγιστο ποσοστό που μπορεί πρακτικά να χρησιμοποιηθεί ως PCM στο μείγμα PCM-σοβά ώστε να εξετάσουμε την συμπεριφορά του PCM προσεγγίζοντας όλα τα πιθανά ποσοστά.

Οπότε ισχύει ο Πιν.5.1.7 και οι εξισώσεις για την πυκνότητα ρ_{μείγ} (εξ.14) και την ειδική θερμοχωρητικότητα C_{pμείγ} (εξ.15) ανάλογα με το C_peff(T).

ΒΗΜΑ 5-T_{δωμ} ,T_{pcm}⁰

Σε αυτή την μελέτη θέλουμε να παρατηρήσουμε την μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για διαφορετικές τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου .Η T_{δωμ} που έχουμε πάρει στις προηγούμενες παραμετρικές μελέτες είναι T_{δωμ} =20°C .Οπότε για αυτή την μελέτη θα πραγματοποιήσω δύο εφαρμογές με δύο άλλες τιμές για την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου.

Θα επιλέξω μία τιμή χαμηλότερη και μία υψηλότερη από τους 20°C

Συνεπώς:

- $T_{\delta\omega\mu 1}=16^{\circ}\text{C}$
- $T_{\delta\omega\mu 2}=24^{\circ}\text{C}$

Η αρχική θερμοκρασία του PCM , T_{pcm} παραμένει ίδια με πριν $T_{\text{pcm}}^0 =25^{\circ}\text{C}$

ΒΗΜΑ 6- T_{pcm}

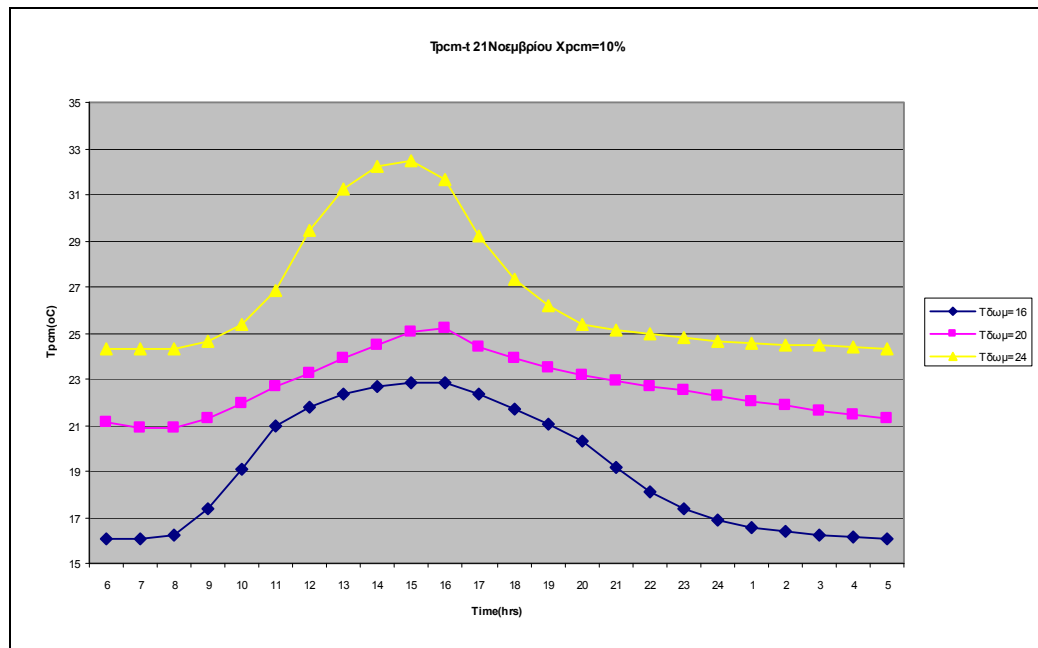
Η σχέση που χρησιμοποιούμε για τους υπολογισμούς μας εφαρμόζεται δύο φορές για $T_{\delta\omega\mu 1}=16^{\circ}\text{C}$ και $T_{\delta\omega\mu 2}=24^{\circ}\text{C}$ και με βάση την εξ.(22) προκύπτει ως εξής:

$$T_{\text{pcm}}^1 = T_{\text{pcm}}^0 + (6120 G_T - 259200(T_{\text{pcm}}^0 - 16)) / (0,36 \rho_{\text{μείγ}} C\rho_{\text{μείγ}}) \quad (25)$$

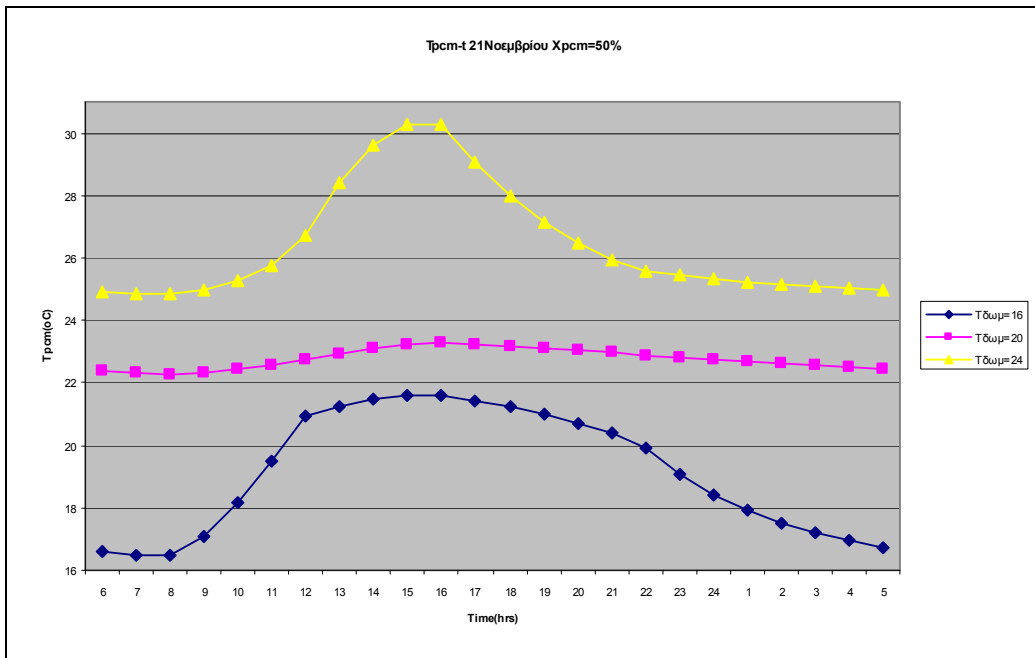
$$T_{\text{pcm}}^1 = T_{\text{pcm}}^0 + (6120 G_T - 259200(T_{\text{pcm}}^0 - 24)) / (0,36 \rho_{\text{μείγ}} C\rho_{\text{μείγ}}) \quad (26)$$

Κάθε μία από τις δύο εξισώσεις εφαρμόζεται 3 φορές για κάθε ποσοστό PCM που επιλέξαμε στο βήμα 4 για τις 21 Νοεμβρίου, 21 Ιανουαρίου, 21 Μαρτίου και για τις δύο περιπτώσεις εσωτερικής θερμοκρασίας. Η διαδικασία υπολογισμού κάθε φορά παραμένει ίδια όπως και στις προηγούμενες μελέτες.

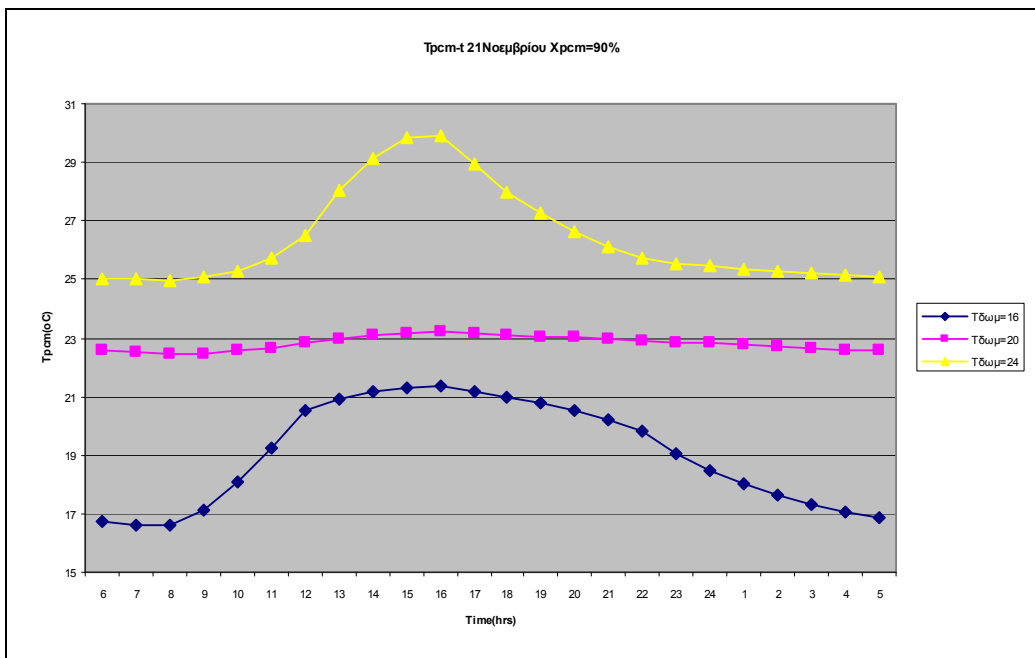
Από τους υπολογισμούς μας προκύπτει η μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για κάθε ώρα το 24ωρο ανάλογα με την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου και το ποσοστό PCM για τον Νοέμβριο, Ιανουάριο, Μάρτιο και παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα στα οποία προσθέσαμε και τα αποτελέσματα που είχαν παρουσιαστεί και σε προηγούμενη παραμετρική μελέτη(5.1) για $T_{\delta\omega\mu}=20^{\circ}\text{C}$ ώστε να συγκριθεί με τις δύο καινούργιες περιπτώσεις:



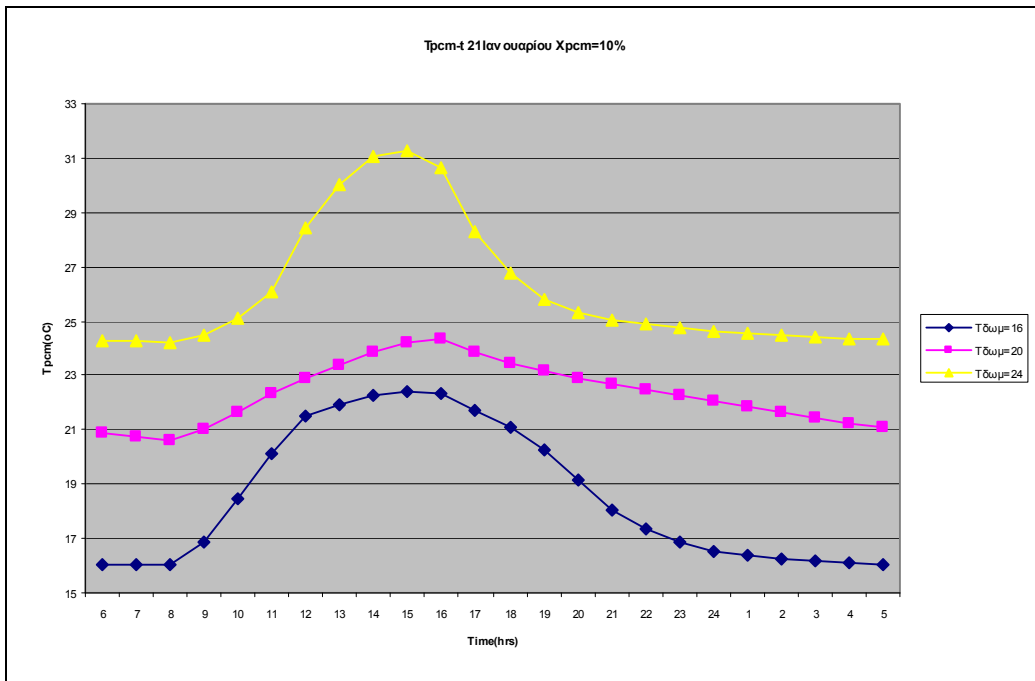
Σχήμα 5.5.1: Μεταβολή T_{PCM} το 24ωρο ανάλογα με την $T_{\delta\omega\mu}$ για $X_{\text{PCM}}=10\%$ (21 Νοεμβρίου)



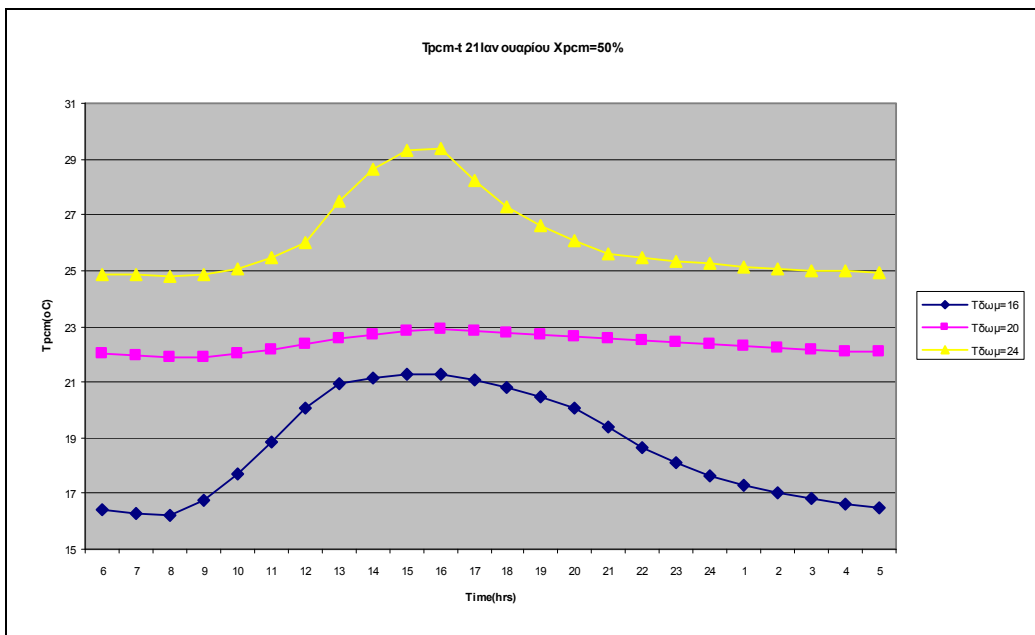
Σχήμα 5.5.2: Μεταβολή T_{PCM} το 24ωρο ανάλογα με την T_{δωμ} για X_{PCM}=50% (21 Νοεμβρίου)



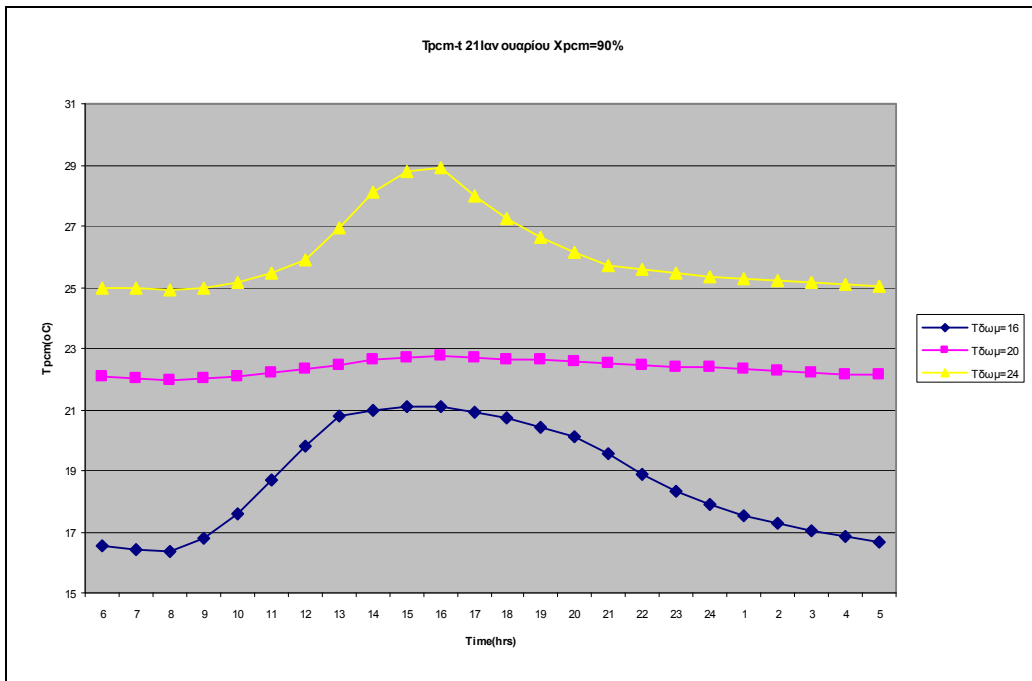
Σχήμα 5.5.3: Μεταβολή T_{PCM} το 24ωρο ανάλογα με την T_{δωμ} για X_{PCM}=90% (21 Νοεμβρίου)



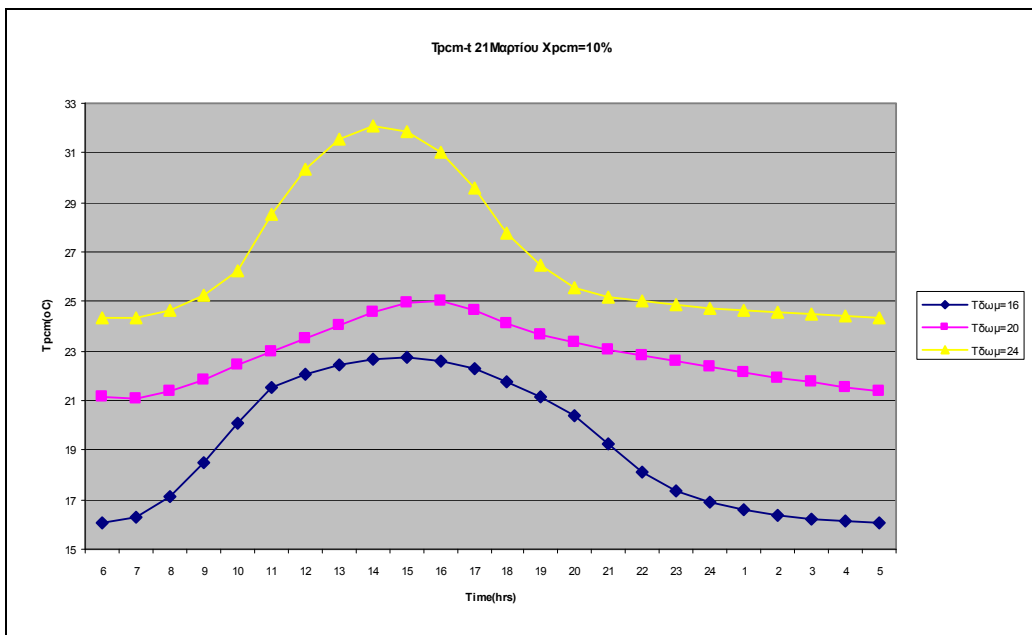
Σχήμα 5.5.4: Μεταβολή T_{PCM} το 24ωρο ανάλογα με την $T_{\delta\omega\mu}$ για $X_{PCM}=10\%$ (21 Ιανουαρίου)



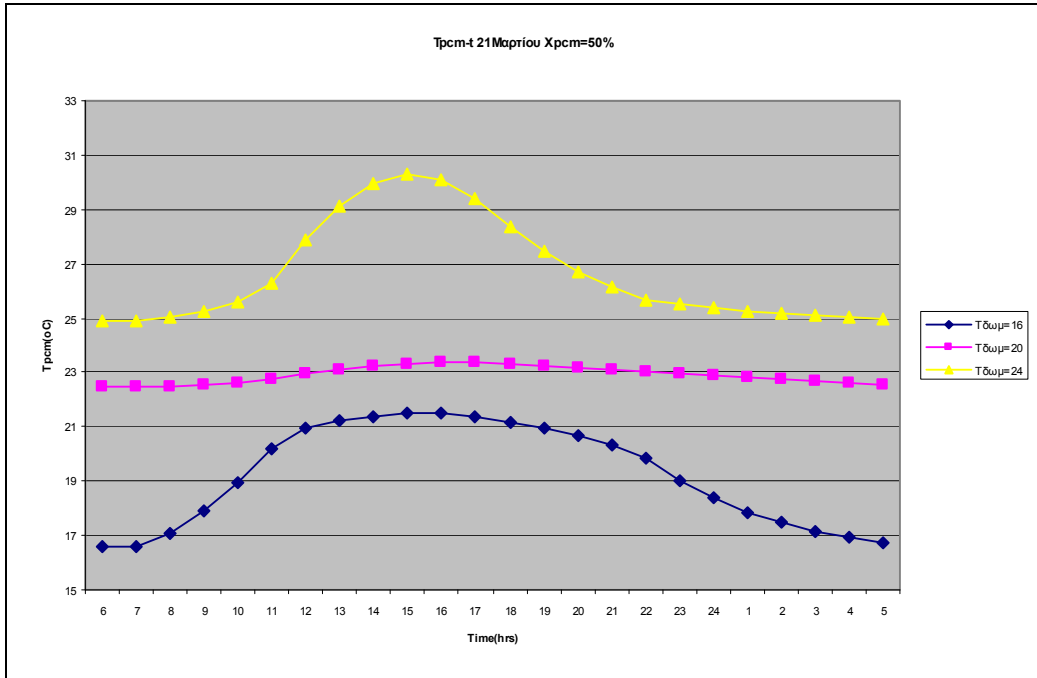
Σχήμα 5.5.5: Μεταβολή T_{PCM} το 24ωρο ανάλογα με την $T_{\delta\omega\mu}$ για $X_{PCM}=50\%$ (21 Ιανουαρίου)



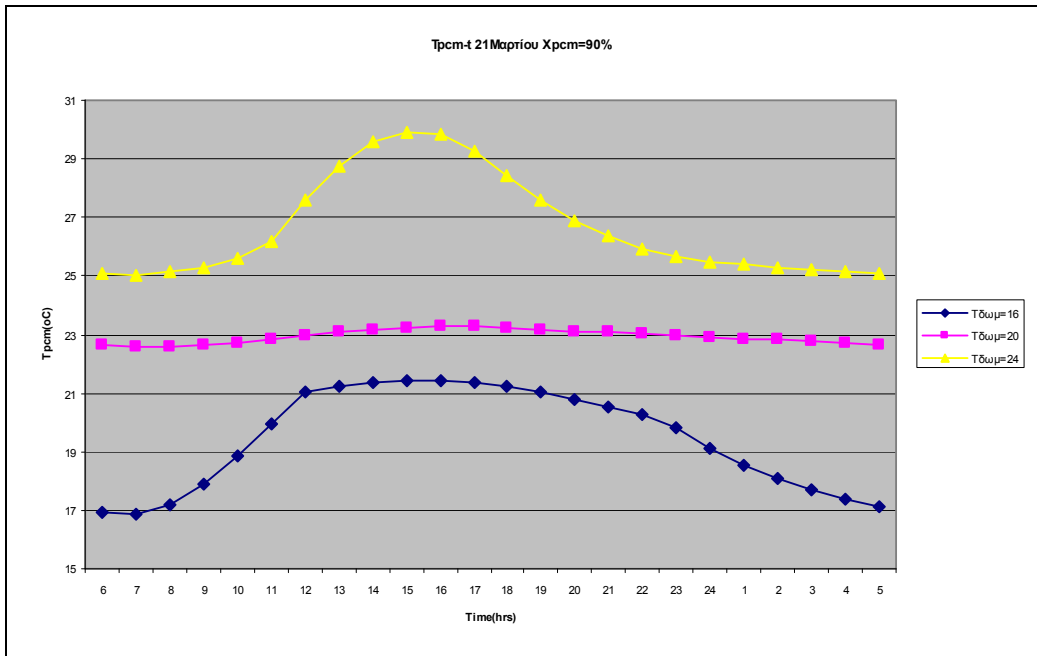
Σχήμα 5.5.6: Μεταβολή T_{PCM} το 24ωρο ανάλογα με την $T_{\delta\omega\mu}$ για $X_{PCM}=90\%$ (21 Ιανουαρίου)



Σχήμα 5.5.7: Μεταβολή T_{PCM} το 24ωρο ανάλογα με την $T_{\delta\omega\mu}$ για $X_{PCM}=10\%$ (21 Μαρτίου)



Σχήμα 5.5.8: Μεταβολή T_{PCM} το 24ωρο ανάλογα με την $T_{\delta\omega\mu}$ για $X_{PCM}=50\%$ (21 Μαρτίου)



Σχήμα 5.5.9: Μεταβολή T_{PCM} το 24ωρο ανάλογα με την $T_{\delta\omega\mu}$ για $X_{PCM}=90\%$ (21 Μαρτίου)

Παρατηρήσεις

Παρατηρούμε ότι και στα τρία ποσοστά για $T_{\delta\omega\mu 2} = 24^{\circ}\text{C}$ το PCM αναπτύσσει μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Αυτό δικαιολογείται αμέσως παρατηρώντας την εξ. (21)

$$\frac{C_{\rho_{\text{μειγματος}} \rho_{\text{μειγματος}} V_{\text{μειγματος}} (T_{\text{PCM}}^1 - T_{\text{PCM}}^0)}{0,85 G_T 3600 A\pi - U A (T_{\text{PCM}}^0 - T_{\delta\omega\mu}) 3600} =$$

Όταν αυξάνεται η $T_{\delta\omega\mu}$ τότε μειώνεται ο δεύτερος όρος του δεξιού μέλους και αυξάνεται το δεύτερο μέλος της εξίσωσης. Οπότε αν π.χ. για $X_{\text{PCM}} = 10\%$ παραμένουν σταθερά $\rho_{\text{μείγ}}$, $C_{\rho_{\text{μείγ}}}$ και $V_{\text{μείγ}}$ τότε η αύξηση αυτή του δεύτερου μέρους αφορά αποκλειστικά την T_{PCM}

Αυτό εξηγείται διότι όταν η θερμοκρασία του δωματίου είναι αυξημένη το PCM καλείται να δώσει λιγότερη θερμότητα στον χώρο οπότε την υπόλοιπη την αποθηκεύει.

Επίσης όσο περισσότερη είναι η περιεκτικότητα του PCM τόσο μειώνονται οι τιμές της θερμοκρασίας του PCM για όλες τις περιπτώσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου. Για παράδειγμα τον Μάρτιο με 10% PCM στις 14:00 για θερμοκρασία δωματίου 24°C έχουμε θερμοκρασία PCM 32°C και για 90% πέφτει στους 30°C

5.6 Παραμετρική μελέτη ως προς το πάχος του στρώματος PCM-Σοβά για ένα 24ωρο

Σκοπός της μελέτης αυτής είναι να εξετασθεί η συμπεριφορά του PCM για διαφορετικά πάχη του στρώματος PCM-Σοβά για την συναλλαγή θερμότητας με ένα δωμάτιο για ένα 24ωρο για τους τρεις χειμερινούς μήνες Νοέμβριο, Ιανουάριο, Μάρτιο.

ΒΗΜΑ 1- D,δ

Για την μελέτη αυτή επιλέγονται ενδεικτικά οι μέρες:

21 Νοεμβρίου, 21 Ιανουαρίου και 21 Μαρτίου για τα οποία το D και η ηλιακή απόκλιση δ είναι γνωστά από την 1^η Παραμετρική μελέτη.

ΒΗΜΑ 2 - G_b, G_d, G_T

Τα μεγέθη G_b, G_d, G_T θα άλλαζαν μόνο αν ήταν διαφορετικό το D. Εφόσον το D είναι ίδιο παραμένουν ίδια και τα 3 μεγέθη για τους μήνες που θα εξετασθεί (Νοέμβριο, Ιανουάριο, Μάρτιο)

Ισχύουν λοιπόν οι πίνακες Πιν.5.1.1, Πιν.5.1.3, Πιν.5.1.5

ΒΗΜΑ 3-PCM

Επιλέγουμε το ίδιο PCM όπως και στην προηγούμενη μελέτη συνεπώς έχουμε τα ίδια χαρακτηριστικά και τις ίδιες εξισώσεις. Ισχύει λοιπόν ο Πιν.5.1.7 και οι εξισώσεις 10,11,12,13.

ΒΗΜΑ 4-Ποσοστό PCM (X_{pcm})

Επιλέγουμε ενδεικτικά κάποια ποσοστά PCM-σοβά για X_{pcm} = 10%, 50%, 90%.

Έτσι καλύπτω το ελάχιστο, το μέσο και το μέγιστο ποσοστό που μπορεί πρακτικά να χρησιμοποιηθεί ως PCM στο μείγμα PCM-σοβά ώστε να εξετάσουμε την συμπεριφορά του PCM προσεγγίζοντας όλα τα πιθανά ποσοστά.

Οπότε ισχύει ο Πιν.5.1.7 και οι εξισώσεις για την πυκνότητα ρ_{μείγ} (εξ.14) και την ειδική θερμοχωρητικότητα C_{pμείγ} (εξ.15) ανάλογα με το C_{p,eff}(T).

ΒΗΜΑ 5-T_{δωμ}, T_{pcm}⁰

Χρειαζόμαστε για τους υπολογισμούς μας την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου και την αρχική θερμοκρασία του PCM. Θα πάρουμε δύο τιμές αυθαίρετα:

- T_{pcm}⁰ = 25
- T_{δωμ} = 20

Το τελικό αποτέλεσμα δεν επηρεάζεται από τις αρχικές μας υποθέσεις εφόσον με τις επαναλήψεις που θα γίνουν έχουμε εξασφαλίσει την ανεξαρτησία του.

ΒΗΜΑ 6- T_{pcm}

Στις προηγούμενες παραμετρικές μελέτες το πάχος του στρώματος του PCM-Σοβά ήταν 0,04μ. Επιλέγουμε μία τιμή λίγο μεγαλύτερη και λίγο μικρότερη από αυτήν για να πραγματοποιηθεί αυτή η μελέτη και είναι

$$d_1=0,02\mu$$

$$d_2=0,06\mu$$

Παρατηρούμε ότι αν αλλάξει το πάχος επηρεάζεται ο όγκος $V_{μειγ}$ από την εξ.(21):

$$C_{ρ_{μειγματος}} ρ_{μειγματος} V_{μειγματος} (T_{pcm}^1 - T_{pcm}^0) = \frac{0,85 G_T 3600 A \pi - U A (T_{pcm}^0 - T_{δωμ}) 3600}{}$$

οπότε από την εξ.20 όπου $V_{μειγματος} = (\text{πάχος}) (\text{ύψος}) (\text{πλάτος})$ προκύπτει:

$$V_{μειγ1}=0,18m^3$$

$$V_{μειγ2}=0,54m^3$$

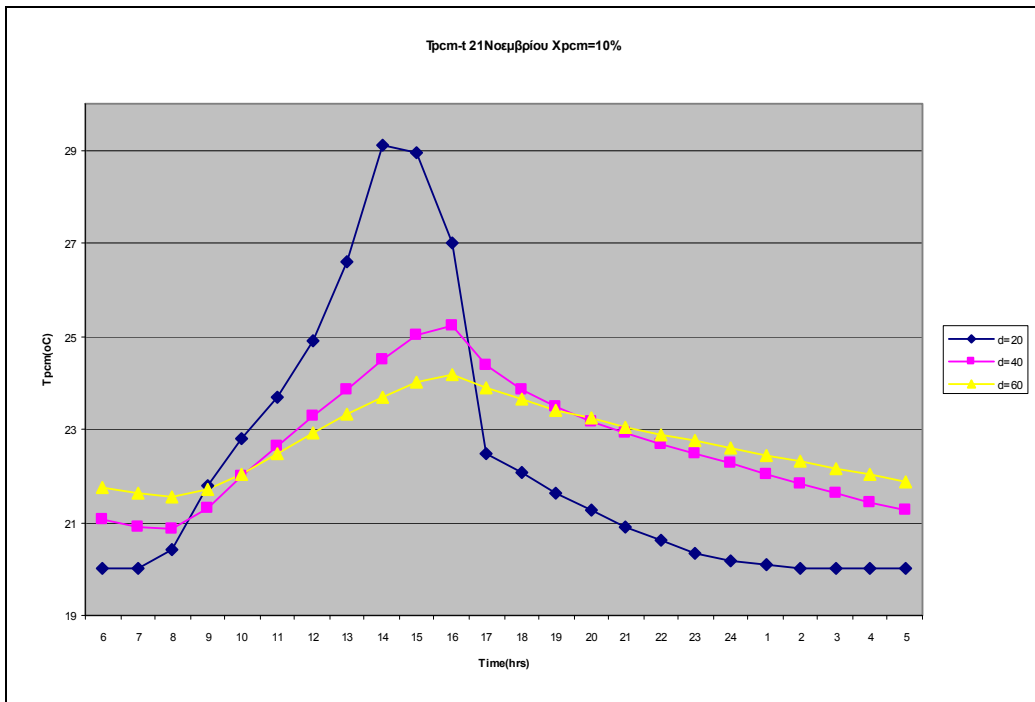
Συνεπώς η σχέση που χρησιμοποιούμε για τους υπολογισμούς μας εφαρμόζεται δύο φορές για $V_{μειγ1}=0,18m^3$ και $V_{μειγ2}=0,54m^3$ και η εξ.22 προκύπτει ως εξής:

$$T_{pcm}^1 = T_{pcm}^0 + (6120 G_T - 259200(T_{pcm}^0 - 20)) / (0,18 \rho_{μειγ} C_{ρ_{μειγ}}) \quad (27)$$

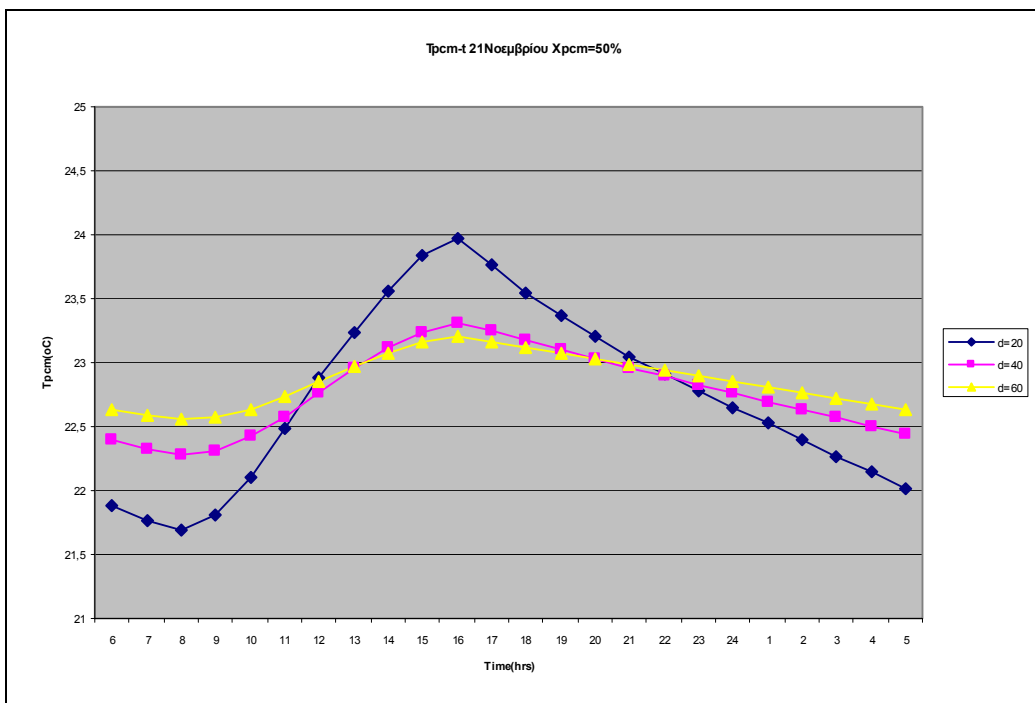
$$T_{pcm}^1 = T_{pcm}^0 + (6120 G_T - 259200(T_{pcm}^0 - 20)) / (0,54 \rho_{μειγ} C_{ρ_{μειγ}}) \quad (28)$$

Κάθε μία από τις δύο εξισώσεις εφαρμόζεται 3 φορές ,για κάθε ποσοστό PCM που επιλέξαμε στο βήμα 4 για 21 Νοεμβρίου, 21 Ιανουαρίου, 21 Μαρτίου. Η διαδικασία υπολογισμού κάθε φορά παραμένει ίδια όπως και στις προηγούμενες μελέτες.

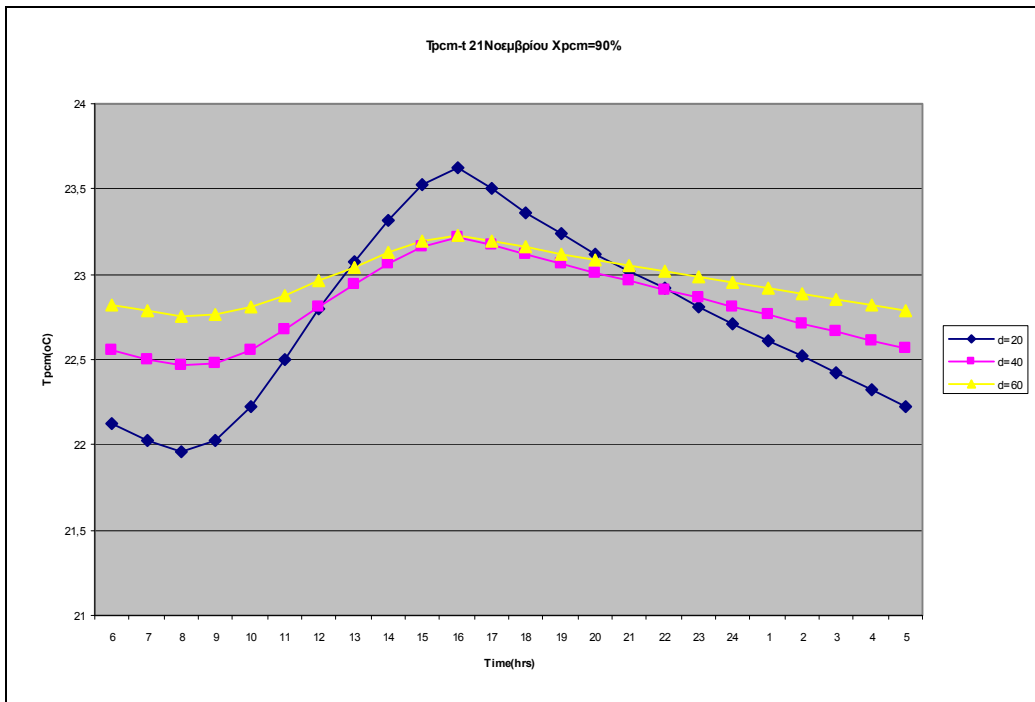
Από τους υπολογισμούς μας προκύπτει η μεταβολή της θερμοκρασίας του PCM για κάθε ώρα το 24ωρο ανάλογα με το πάχος του στρώματος και το ποσοστό PCM για τον Νοέμβριο, Ιανουάριο, Μάρτιο και παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα στα οποία προσθέσαμε και τους αντίστοιχους υπολογισμούς από προηγούμενη παραμετρική μελέτη (5.1) για πάχος 0,04m ώστε να συγκριθεί με τις δύο καινούργιες περιπτώσεις:



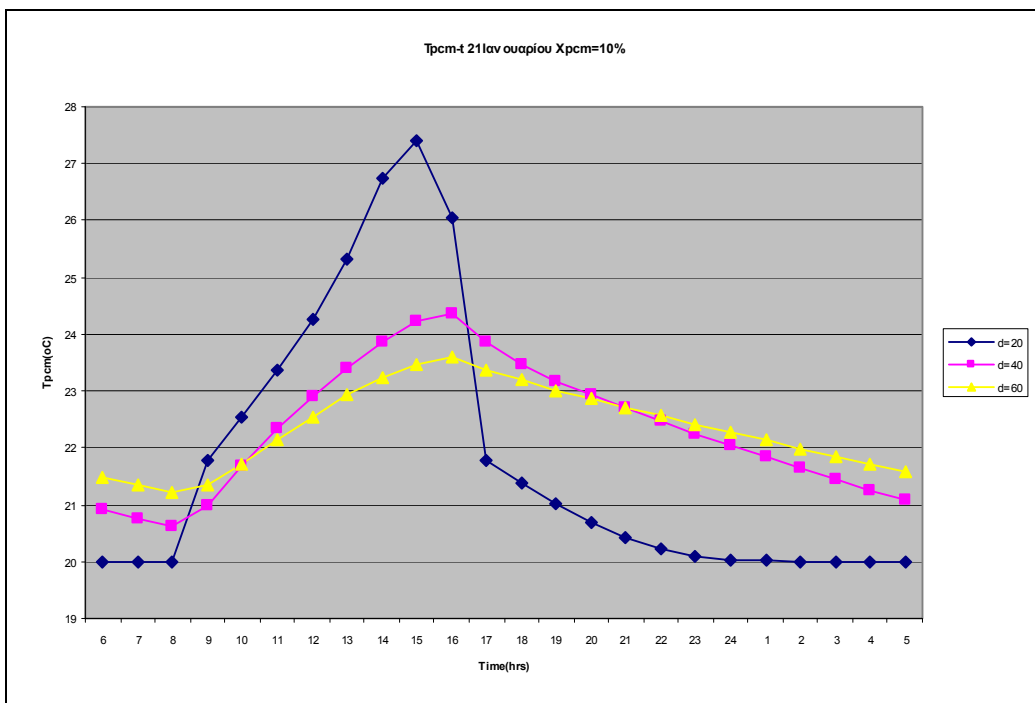
Σχήμα 5.6.1: Μεταβολή T_{PCM} το 24ωρο ανάλογα με το πάχος στρώματος για $X_{PCM}=10\%$ (21 Νοεμβρίου)



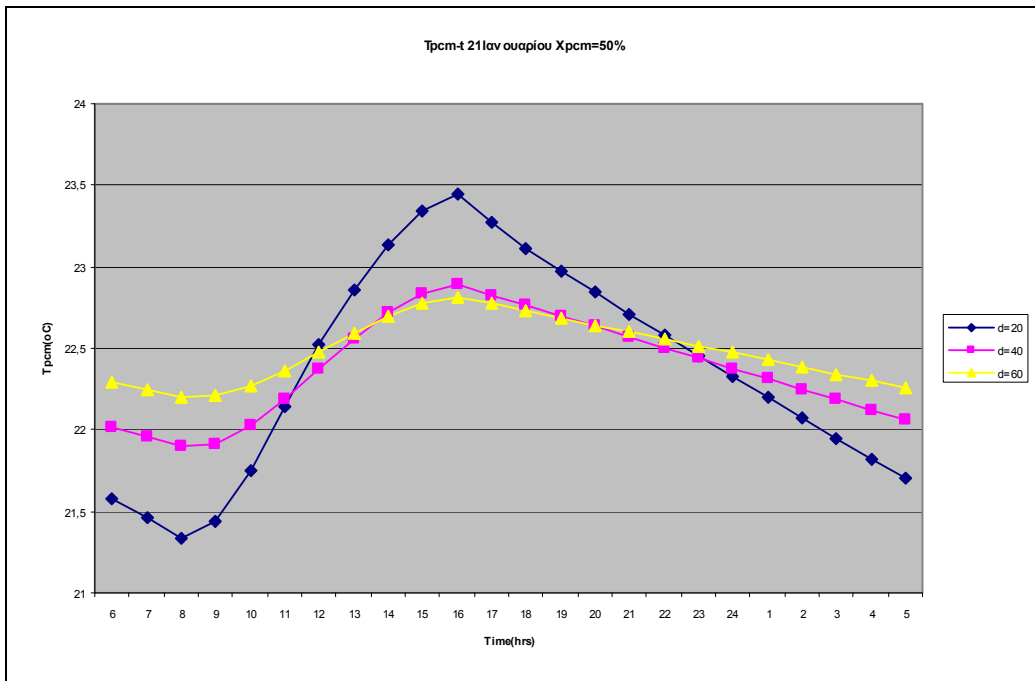
Σχήμα 5.6.2: Μεταβολή T_{PCM} το 24ωρο ανάλογα με το πάχος στρώματος για $X_{PCM}=50\%$ (21 Νοεμβρίου)



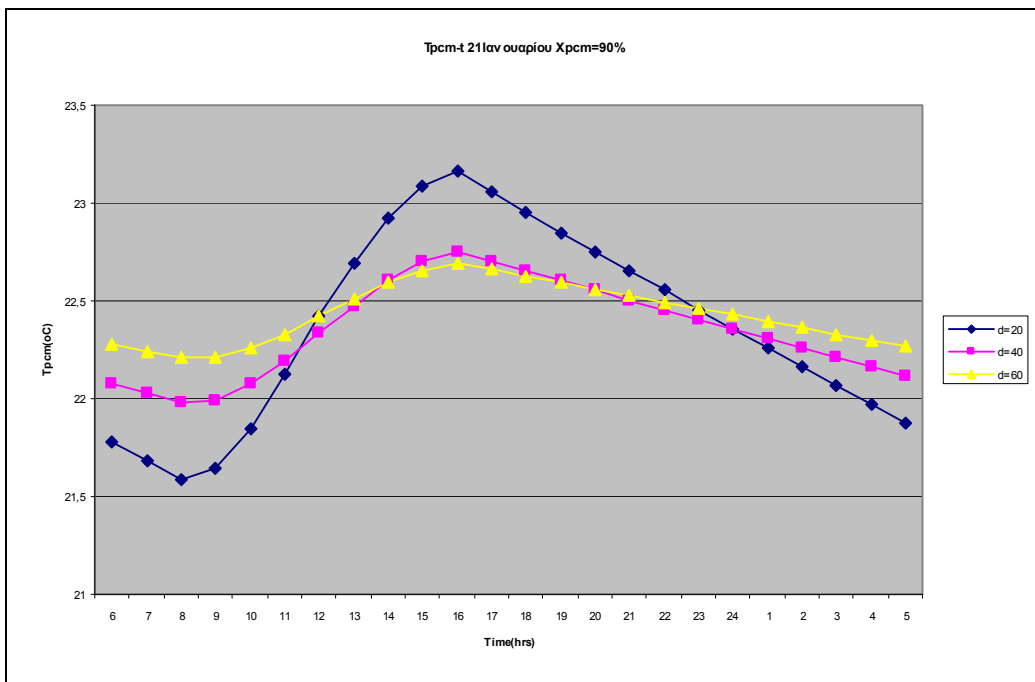
Σχήμα 5.6.3: Μεταβολή T_{PCM} το 24ωρο ανάλογα με το πάχος στρώματος για $\chi_{PCM}=90\%$ (21 Νοεμβρίου)



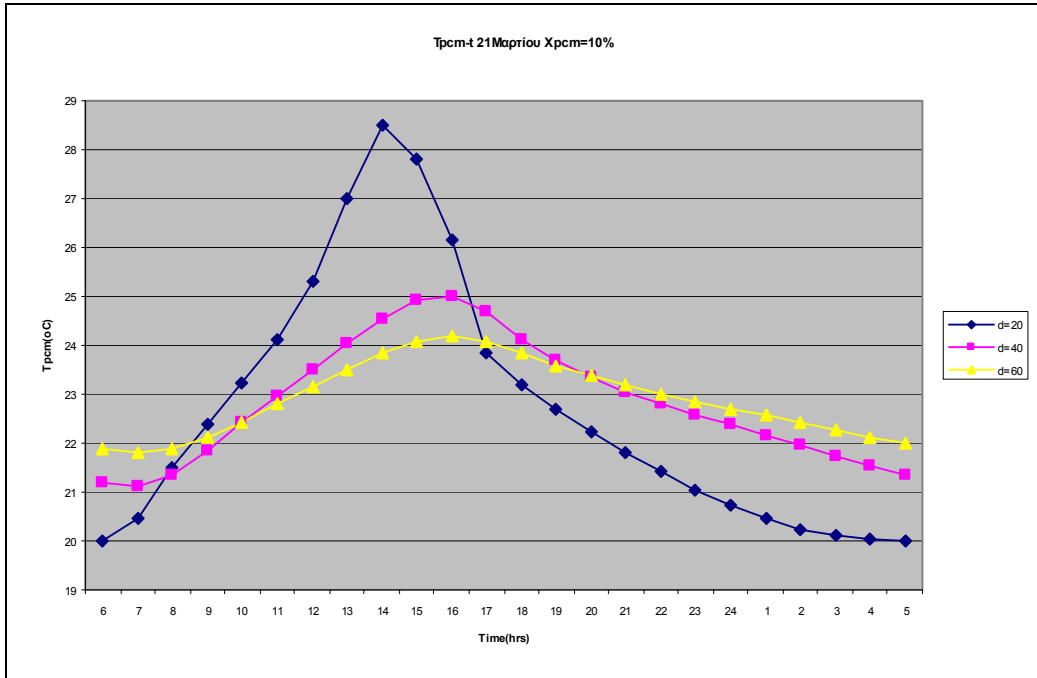
Σχήμα 5.6.4: Μεταβολή T_{PCM} το 24ωρο ανάλογα με το πάχος στρώματος για $\chi_{PCM}=10\%$ (21 Ιανουαρίου)



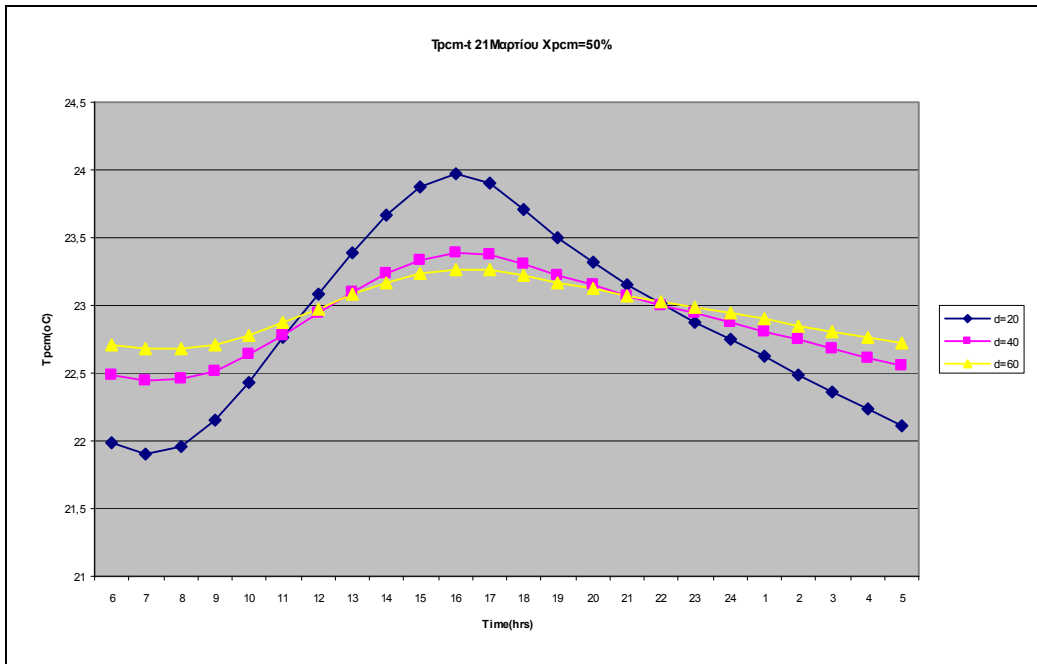
Σχήμα 5.6.5: Μεταβολή T_{PCM} το 24ωρο ανάλογα με το πάχος στρώματος για $X_{PCM}=50\%$ (21 Ιανουαρίου)



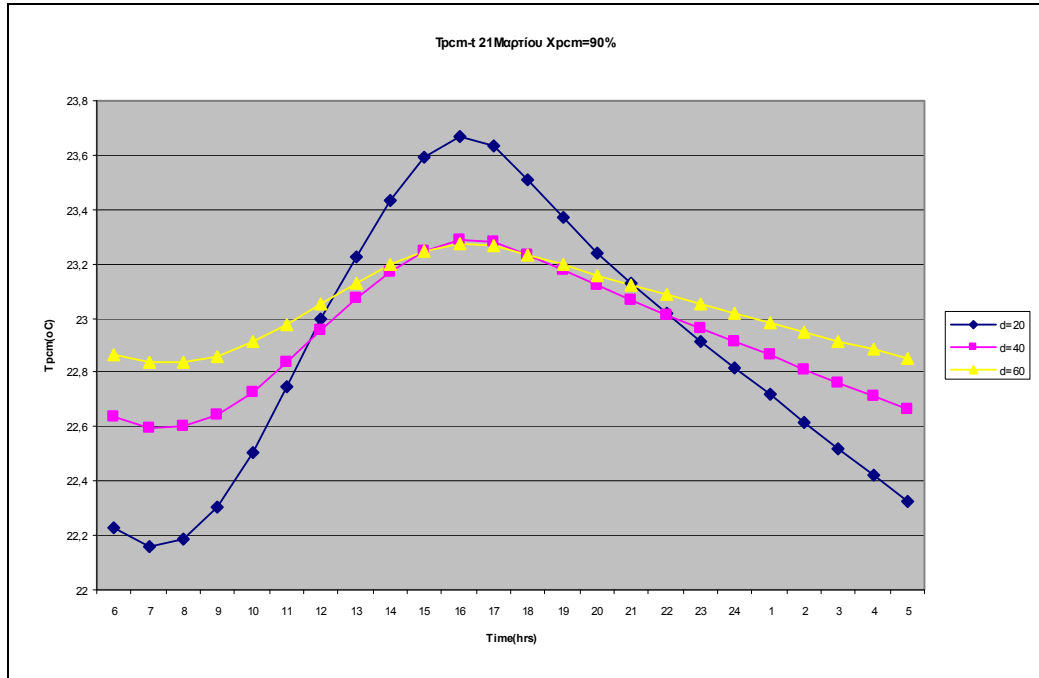
Σχήμα 5.6.6: Μεταβολή T_{PCM} το 24ωρο ανάλογα με το πάχος στρώματος για $X_{PCM}=90\%$ (21 Ιανουαρίου)



Σχήμα 5.6.7: Μεταβολή T_{PCM} το 24ωρο ανάλογα με το πάχος στρώματος για $X_{PCM}=10\%$ (21 Μαρτίου)



Σχήμα 5.6.8: Μεταβολή T_{PCM} το 24ωρο ανάλογα με το πάχος στρώματος για $X_{PCM}=50\%$ (21 Μαρτίου)



Σχήμα 5.6.9: Μεταβολή T_{PCM} το 24ωρο ανάλογα με το πάχος στρώματος για $X_{PCM}=90\%$ (21 Μαρτίου)

Παρατηρήσεις

Παρατηρούμε ότι και στα τρία ποσοστά (10%,50%,90%) για $d=20\text{mm}$ το PCM αναπτύσσει μεγαλύτερες θερμοκρασίες και για $d=60\text{mm}$ παρατηρούνται οι χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Αυτό δικαιολογείται αμέσως παρατηρώντας τον ισολογισμό ενέργειας στην εξ 22:

$$T_{pcm}^1 = T_{pcm}^0 + (6120 G_T - 259200(T_{pcm}^0 - 20)) / (V_{μείγ} \rho_{μείγ} C_{pμείγ})$$

Όταν αυξάνεται το πάχος τότε αυξάνεται ο όγκος του μείγματος $V_{μείγ}$ άρα μειώνεται ο δεύτερος όρος του δεξιού μέλους και η T_{pcm} συνεπώς μειώνεται. Αντίστοιχα, όταν μειώνεται το πάχος τότε μειώνεται ο όγκος $V_{μείγ}$ άρα αυξάνεται η T_{pcm} .

Επίσης όσο περισσότερη είναι η περιεκτικότητα του PCM τόσο μειώνονται οι τιμές της θερμοκρασίας του PCM για όλες τις περιπτώσεις του πάχους του στρώματος PCM-Σοβά.

Βιβλιογραφία 5^{ου} Κεφαλαίου

- [1] Κίμων Α.Αντωνόπουλος, Θερμικά-Ηλιακά Συστήματα, Μέρος Πρώτο, Αθήνα 2008
- [2] Eleftherios Dimitrios Kravvaritis, Kimon Antonopoulos, Christos Tzivanidis, Solar energy management using PCM passive systems in the Athens area buildings, (υπό δημοσίευση)
- [3] Eleftherios Dimitrios Kravvaritis, Kimon Antonopoulos, Christos Tzivanidis, Improvements to the measurement of the thermal properties of phase change materials