



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΧΩΡΩΝ ΚΑΙ
ΝΕΡΟΥ ΧΡΗΣΗΣ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM) ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ
ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ.»

«A parametric study of space and domestic water solar heating
using Phase Change Materials (PCM) in the Athens area. »

ΑΝΑΓΝΩΣΤΑΚΟΥ ΧΡΙΣΤΙΝΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ ΚΙΜΩΝ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΧΩΡΩΝ ΚΑΙ ΝΕΡΟΥ
ΧΡΗΣΗΣ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM) ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ
ΑΘΗΝΑΣ.»

«A parametric study of space and domestic water solar heating
using Phase Change Materials (PCM) in the Athens area. »

ΕΚΠΟΝΗΣΗ: ΑΝΑΓΝΩΣΤΑΚΟΥ ΧΡΙΣΤΙΝΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ ΚΙΜΩΝ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2016

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κίμωνα Α. Αντωνόπουλο, για την ανάθεση του θέματος, τις πληροφορίες που μου παρείχε, την εποπτεία της εργασίας, την καθοδήγηση, την ενθάρρυνση και το χρόνο που μου διέθεσε για την επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τα αδέρφια μου καθώς και όλους τους δικούς μου ανθρώπους για την αγάπη και τη συμπαράσταση που μου έδειξαν όλο το διάστημα των σπουδών μου.

Αναγνωστάκου Χριστίνα

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

*Αφιερωμένη στους γονείς μου,
Παναγιώτη και Διαμάντω.*

Περίληψη

Η ραγδαία αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης σε συνδυασμό με την εξάντληση των συμβατικών καυσίμων και τη μόλυνση του περιβάλλοντος καθιστούν αναγκαία την αναζήτηση και χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και εναλλακτικών συστημάτων διαχείρισης. Μια τέτοια εναλλακτική τεχνολογία είναι η αποθήκευση θερμικής ενέργειας με χρήση Υλικών Αλλαγής Φάσης (PCM).

Στην παρούσα διπλωματική μελετάται παραμετρικά η θέρμανση χώρου και η χρήση ζεστού νερού μέσω κυκλώματος ηλιακού συλλέκτη- δεξαμενής νερού- PCM σε εσωτερικό τοίχο κατοικίας στην περιοχή της Αθήνας κατά τη χειμερινή περίοδο.

Στο πρώτο μέρος της διπλωματικής {Κεφάλαια 1-5} παρουσιάζονται αρχικά οι διάφορες μορφές ΑΠΕ και οι εναλλακτικές μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας. Στη συνέχεια, αναλύονται διεξοδικά τα Υλικά Αλλαγής φάσης ως προς τα είδη, τις ιδιότητες, και τις μεθόδους που υιοθετούνται για την προσομοίωση της συμπεριφοράς τους. Τέλος, αναλύονται εφαρμογές και παραδείγματα χρήσης των υλικών αλλαγής φάσης και παρουσιάζεται μια ιστορική αναδρομή της ανάπτυξης τους.

Στο δεύτερο μέρος {Κεφάλαια 6-7} περιγράφεται αρχικά το κύκλωμα που θα μελετηθεί και παρουσιάζονται οι εξισώσεις που καθορίζουν την λειτουργία του. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η υπολογιστική διαδικασία που θα ακολουθηθεί για την παραμετρική μελέτη του κυκλώματος και παρατίθενται υπό μορφή διαγραμμάτων τα αποτελέσματα που πρόέκυψαν με τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

Abstract

The soaring of energy consumption in conjunction with exhaustion of conventional fuels and the environmental pollution make it necessary the search and use of renewable energy sources and alternative management systems. An alternative technology, like this, is the thermal energy storage using Phase Change Materials (PCM).

In this diplomatic, we study parametrically the space heating and the use of hot water through a circuit of a solar collector- a tank of water – PCM in an internal house wall in the Athens area during winter season.

In the first part of the diplomatic {Chapters 1-5} first we present various forms of renewable energy sources and alternative methods of energy storage. Subsequently, we thoroughly analyze the types of Phase Change Materials, their properties and the methods of the simulation of their operation. Finally, we analyze applications and examples of the using of PCMs and we present an historical flashback of their development.

In the second part of this diplomatic {Chapters 6-7} we describe firstly the circuit which is studied and we present the equations that determine its function. Subsequently, we present the computational procedure for the parametric study of the circuit and we provide the results in diagram form with the respective conclusions.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή.....	15
1.1 Η Ενέργεια στη ζωή μας.....	15
1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ)	17
1.3 Μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας	20
1.3.1 Αποθήκευση μηχανικής ενέργειας.....	20
1.3.2 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας.....	21
1.3.3 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Υλικά Αλλαγής Φάσης (PCM)	25
2.1 Γενικά.....	25
2.2 Ιδιότητες και κριτήρια επιλογής PCM	25
2.3 Κατηγοριοποίηση PCM	27
2.3.1 Οργανικά υλικά.....	28
2.3.2 Παραφίνες.....	28
2.3.3 Ανόργανα υλικά	30
2.3.4 Εύτηκτα μίγματα	32
2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα PCM.....	33
2.5 Μέθοδοι μέτρησης των ιδιοτήτων	34
2.5.1 Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA)	34
2.5.2 Διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης (DSC).....	36
2.5.3 Μέθοδος T-History.....	37
2.5.4 Μέθοδος διπλού κελιού (double cell).....	38
2.6 Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης	40
2.6.1 Μέθοδος Ενθαλπίας	41
2.6.2 Μέθοδος Ενεργού θερμοχωρητικότητας.....	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Εφαρμογές των Υλικών Αλλαγής	
Φάσης	45
3.1 Εισαγωγή.....	45
3.2 Κτηριακές εφαρμογές.....	45

3.2.1	Παθητικά συστήματα θέρμανσης-ψύξης κτηρίων.....	46
3.2.2	Ενεργητικά συστήματα θέρμανσης - ψύξης κτηρίων ..	54
3.3	Ηλεκτρονικές εφαρμογές	55
3.4	Εφαρμογές στη διαστημική τεχνολογία	57
3.5	Εφαρμογές σε υφάσματα (ένδυση).....	59
3.6	Ιατρικές εφαρμογές.....	61
3.7	PCM στην αυτοκινητοβιομηχανία	63
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Περιπτώσεις-Παραδείγματα</u>		69
4.1	Παραδείγματα πάνελ οροφής.....	69
4.2	Οροφές για ενεργητική θέρμανση και ψύξη.....	70
4.3	Ηλιακή θέρμανση με PCM	71
4.4	Συνδυασμένο σύστημα θέρμανσης – ψύξης με PCM..	72
4.5	Πειραματικές οικίες με PCM	75
4.6	Ηλιακές κατοικίες με PCM (FlatICE-Solar House).....	77
4.7	Σύστημα αποθήκευσης ψύξης με ενθυλάκωση PCM ..	80
4.8	Θερμοκήπια με χρήση PCM	82
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ιστορική ανασκόπηση των PCM</u>		89
5.1	Εισαγωγή.....	89
5.2	Τα πρώτα βήματα.....	91
5.3	Συνέχεια εφαρμογών PCM σε σπίτια	93
5.4	Διεθνείς έρευνες στον τομέα των PCM	95
5.4.1	Ευρώπη	97
5.4.2	ΗΠΑ	99
5.4.3	Ιαπωνία	101
5.5	Νεότερες μελέτες.....	102
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παραμετρική μελέτη ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού χρήσης με PCM</u>		105
6.1	Σκοπός της εφαρμογής	105
6.2	Ηλιακός Συλλέκτης	107

6.3 Υπολογισμός ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου	108
6.4 Υπολογισμός θερμοκρασίας περιβάλλοντος	113
6.5 Μεθοδολογία μελέτης	114
6.5.1 Υπολογιστική διαδικασία	114
6.5.2 Αποδιδόμενη ισχύς ηλιακού συλλέκτη	115
6.5.3 Εφαρμογή μεθόδου ενεργού θερμοχωρητικότητας	117
6.5.4 Ισολογισμός συναλλασσόμενης θερμότητας	120
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Παραμετρική μελέτη</u>	<u>123</u>
7.1 Υλικό PCM SP25A8	124
7.2 Δοκιμές για PCM SP25A8	127
7.2.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων για διαφορετικές επιφάνειες συλλέκτη Ac	127
7.2.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για διαφορετικούς όγκους δεξαμενής V	131
7.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για διαφορετικά πάχη PCM I	133
7.3 Υλικό PCM RT27	134
7.4 Δοκιμές για PCM RT27	137
7.4.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων για διαφορετικές επιφάνειες συλλέκτη Ac	137
7.4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για διαφορετικούς όγκους δεξαμενής V	139
7.4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για διαφορετικά πάχη PCM I	140
7.5 Υλικό PCM RT21	145
7.6 Δοκιμές για PCM RT21	148
7.6.1 Σύγκριση τιμών για διαφορετικές επιφάνειες συλλέκτη Ac	148
7.6.2 Σύγκριση τιμών για διαφορετικούς όγκους δεξαμενής V	149
7.6.3 Σύγκριση τιμών για διαφορετικά πάχη PCM I	154
<u>Βιβλιογραφία.....</u>	<u>157</u>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:Εισαγωγή

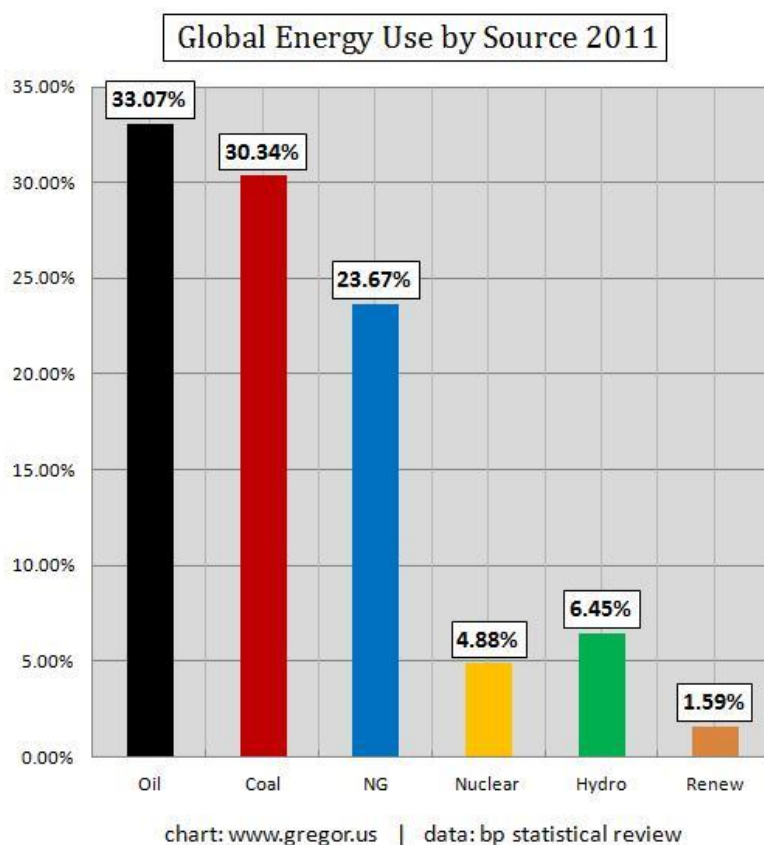
1.1 Η Ενέργεια στη ζωή μας

[1]

Η ενέργεια αποτελεί τη ζωογόνο πηγή των σύγχρονων κοινωνιών και είναι πάντα σημαντική σε όλες τις μορφές για τις ανθρώπινες δραστηριότητες και υπηρεσίες, όπως φως, θέρμανση, ψύξη, επικοινωνίες, μεταφορές, κατασκευαστικές, βιομηχανικές και εμπορικές διαδικασίες κ.ά. Είναι το φυσικό μέγεθος που συνοδεύει άρρηκτα κάθε μεταβολή στο φυσικό μας κόσμο, από την πιο απλή και ανεπαίσθητη έως την πιο πολύπλοκη και έντονα αντιληπτή. Γίνεται κυρίως αισθητή εκ του αποτελέσματός της, που είναι γνωστό ως έργο, και ευθύνεται για τις διάφορες μεταβολές που παρατηρούνται στον υλικό κόσμο. Η ύλη, όταν προσλάβει ενέργεια, μπορεί να αποκτήσει διαφορετική οργάνωση στη δομή της (π.χ. από στερεή να γίνει υγρή ή αέρια), ή ακόμη και να αλλάξει ριζικά τη δομή της (π.χ. με χημική αντίδραση). Γενικά, λοιπόν, το σύνολο των ανθρώπινων δραστηριοτήτων δεσμεύει, παράγει, καταναλώνει, μετατρέπει, αποθηκεύει και υποβαθμίζει τεράστια ποσά ενέργειας. Για την παροχή αυτής της ενέργειας και προκειμένου η κοινωνία μας να λειτουργεί με τα σημερινά της πρότυπα τεράστιες ποσότητες άνθρακα, φυσικού αερίου και πετρελαίου εξάγονται από τη γη και καίγονται.

Η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση αναμένεται να αυξηθεί σε 22 Gtoe (toe= τόνος ισοδύναμου πετρελαίου) ετησίως το 2050, από 10 Gtoe ετησίως σήμερα. Τα ορυκτά καύσιμα καλύπτουν συνολικά το 70% (ο άνθρακας και το πετρέλαιο από 26%, το φυσικό αέριο 18%) και οι μη ορυκτές πηγές 30%. Το μερίδιο των μη ορυκτών πηγών χωρίζεται περίπου σε δύο ίσα τμήματα μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της πυρηνικής ενέργειας. Η αύξηση του πληθυσμού, οι αυξανόμενες προσδοκίες και τα μέσα, οι επιστημονικές και τεχνολογικές εξελίξεις έχουν οδηγήσει σε απότομη αύξηση της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης. 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.

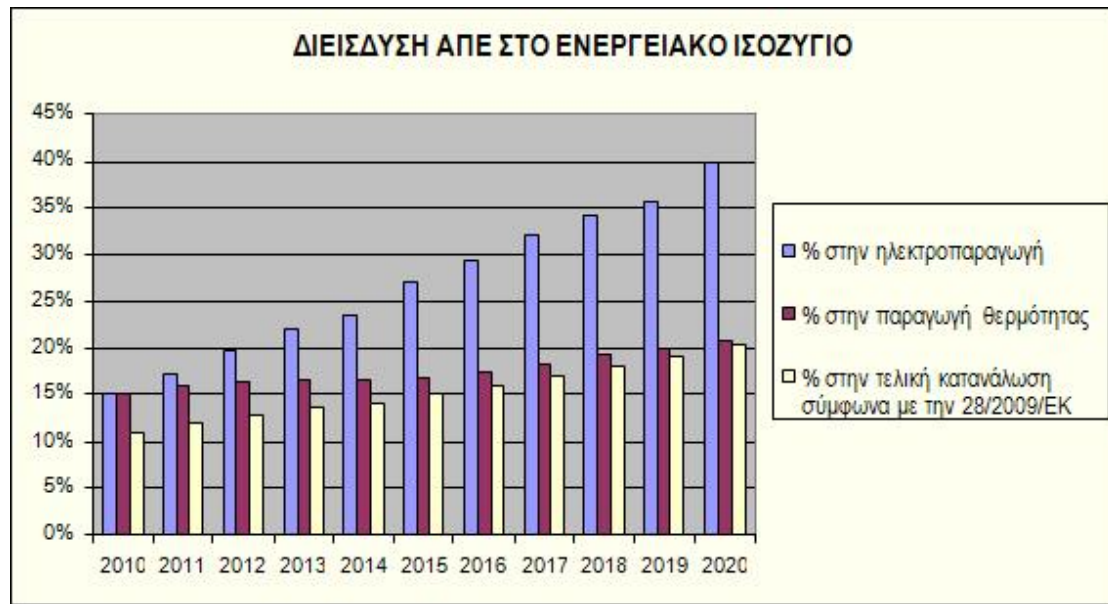
Όλα τα παραπάνω καταδεικνύουν την ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας, ορθολογικότερη χρήση των ενεργειακών αποθεμάτων, αξιοποίηση των διαφόρων ανανεώσιμων πηγών και ανάπτυξη νέων τρόπων αποθήκευσης ενέργειας τόσο σε εθνικό, όσο και σε διεθνές επίπεδο. Μάλιστα, η αποθήκευση θερμικής ενέργειας ειδικότερα, προσελκύει ολοένα και πιο πολύ το ενδιαφέρον, καθώς είναι μια τεχνολογία που μπορεί να συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας, μειώνοντας σημαντικά τις απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας για θερμικές εφαρμογές σε κτίρια, όπως θέρμανση χώρων και νερού, ψύξη και κλιματισμός.



Σχήμα 1.1 Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανάλογα με την πηγή

1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ)

[1,2,3]



Εικόνα 1.2 Διείσδυση ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο

Στα πλεονεκτήματα τους σημειώνουμε ότι:

- Είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα.
- Δεν πρόκειται να εξαντληθούν ποτέ, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα.
- Μπορούν να βοηθήσουν την ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, καθώς και να αποτελέσουν την εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου.
- Είναι ευέλικτες εφαρμογές, που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού, καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής ενέργειας (καταρχήν για την ύπαιθρο) αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.
- Ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει πολύ μεγάλο χρόνο ζωής.
- Επιδοτούνται από τις περισσότερες κυβερνήσεις.

Στον αντίποδα, όμως, πρέπει να επισημάνουμε ότι:

- Έχουν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια της γης. Γι' αυτό το λόγο μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικές πηγές ενέργειας.
- Για τον παραπάνω λόγο προς το παρόν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων.
- Η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους, αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.
- Για τις αιολικές μηχανές υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη κι ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών. Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας τους και την προσεκτικότερη επιλογή χώρων εγκατάστασης (π.χ. σε πλατφόρμες στην ανοιχτή θάλασσα) αυτά τα προβλήματα έχουν σχεδόν λυθεί.
- Για τα υδροηλεκτρικά έργα λέγεται ότι προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω από το νερό κι έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Τα είδη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι:

- Αιολική ενέργεια. Χρησιμοποιήθηκε παλιότερα για την άντληση νερού από πηγάδια καθώς και για μηχανικές εφαρμογές (π.χ. την άλεση στους ανεμόμυλους). Έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται ευρέως για ηλεκτροπαραγωγή.
- Ηλιακή ενέργεια. Χρησιμοποιείται περισσότερο για θερμικές εφαρμογές (ηλιακοί θερμοσίφωνες και φούρνοι) ενώ η χρήση της για την παραγωγή ηλεκτρισμού έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος, με την βοήθεια της πολιτικής προώθησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας από το ελληνικό κράτος και την Ευρωπαϊκή Ένωση.
- Υδραυλική ενέργεια. Είναι τα γνωστά υδροηλεκτρικά έργα, που στο πεδίο των ήπιων μορφών ενέργειας εξειδικεύονται

περισσότερο στα μικρά υδροηλεκτρικά. Είναι η πιο διαδεδομένη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας.

- Βιομάζα. Χρησιμοποιεί τους υδατάνθρακες των φυτών (κυρίως αποβλήτων της βιομηχανίας ξύλου, τροφίμων και ζωοτροφών και της βιομηχανίας ζάχαρης) με σκοπό την αποδέσμευση της ενέργειας που δεσμεύτηκε από το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Ακόμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αστικά απόβλητα και απορρίμματα. Μπορεί να δώσει βιοαιθανόλη και βιοαέριο, που είναι καύσιμα πιο φιλικά προς το περιβάλλον από τα παραδοσιακά.
- Είναι μια πηγή ενέργειας με πολλές δυνατότητες και εφαρμογές, που θα χρησιμοποιηθεί πλατιά στο μέλλον.
- Γεωθερμική ενέργεια. Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται από τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια, π.χ. στους θερμοπίδακες ή στις πηγές ζεστού νερού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας για θερμικές εφαρμογές, είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η Ισλανδία καλύπτει το 80-90% των ενεργειακών της αναγκών, όσον αφορά τη θέρμανση, και το 20%, όσον αφορά τον ηλεκτρισμό, με γεωθερμική ενέργεια.
- Ενέργεια από τη θάλασσα
 - Ενέργεια από παλίρροιες. Εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του Ήλιου και της Σελήνης, που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού. Το νερό αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει και για να ξανακατέβει αναγκάζεται να περάσει μέσα από μια τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρισμό. Έχει εφαρμοστεί στην Αγγλία, τη Γαλλία, τη Ρωσία και αλλού.
 - Ενέργεια από κύματα. Εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας.
 - Ενέργεια από τους ωκεανούς. Εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων. Βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας.
- Ωσμωτική ενέργεια. Η ανάμειξη γλυκού και θαλασσινού νερού απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας, όπως συμβαίνει όταν ένα ποτάμι εκβάλει στον ωκεανό. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται ωσμωτική ενέργεια (ή γαλάζια ενέργεια) και ανακτάται όταν το νερό του ποταμού και το θαλασσινό νερό

είναι διαχωρισμένα από μια ημι-διαπερατή μεμβράνη και το γλυκό νερό περνάει μέσω αυτής.

1.3 Μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας

[1,4,5,6,7,8,9,10,14,15]

Μια άλλη επιλογή, εκτός από την αναζήτηση νέων ανανεώσιμων πηγών, είναι η ανάπτυξη συσκευών αποθήκευσης που είναι εξίσου σημαντική. Η αποθήκευση της ενέργειας όχι μόνο μειώνει την έλλειψη ισορροπίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης, αλλά επίσης βελτιώνει τις επιδόσεις και την αξιοπιστία των συστημάτων ενέργειας και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της ενέργειας.

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

1.3.1 Αποθήκευση μηχανικής ενέργειας

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

Η αποθήκευση ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα (CAES) περιγράφει ένα σύστημα που αποθηκεύει δυναμική ενέργεια μέσω της αποθήκευσης του συμπιεσμένου αερίου που αντλείται σε φυσικά υπόγεια πετρώματα ή μεγάλες δεξαμενές αποθήκευσης. Ένα σύστημα CAES χρησιμοποιεί ένα συμπιεστή κινούμενο από κινητήρα κατά καιρούς χαμηλών τιμών ηλεκτρικής ενέργειας για να αποθηκεύσει αέρα, πιο ευρέως, σε 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 CAES συνδυάζεται με τεχνολογία αιολικής ενέργειας, συμπιέζοντας αέρα κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής ταχύτητας του ανέμου και χρησιμοποιώντας το συμπιεσμένο αέρα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις περιόδους χαμηλής ταχύτητας του ανέμου.

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

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

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

1.3.2 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας

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.

1.3.3 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας

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, λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας, θερμοχημικής αποθήκευσης θερμότητας ή συνδυασμός αυτών.

1.3.3.1 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 φθηνό και έχει υψηλή ειδική θερμότητα. Ωστόσο, πάνω από τους 100⁰ C, έλαια, τετηγμένα άλατα και τήγματα, κλπ., χρησιμοποιούνται συνήθως.

1.3.3.2 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας

Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας (LHS) βασίζεται στην απορρόφηση ή απελευθέρωση θερμότητας όταν ένα υλικό αποθήκευσης υποβάλλεται σε αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό ή από υγρό σε αέριο ή το αντίστροφο. Η ικανότητα αποθήκευσης σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας με ένα υλικό αλλαγή φάσης δίνεται από τον τύπο:

$$Q = m[C_{sp} (T_m - T_t) + a_m \Delta h_m + C_{lp} (T_f - T_m)]$$

1.3.3.3 Αποθήκευση θερμοχημικής θερμότητας

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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Υλικά Αλλαγής Φάσης (PCM)

2.1 Γενικά

Τα Υλικά Αλλαγής Φάσης (PCM) είναι ουσίες ή μίγματα που έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν ή να απελευθερώνουν θερμική ενέργεια με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας διατηρώντας σταθερή θερμοκρασία (σημείο αλλαγής φάσης) ή σχεδόν σταθερή θερμοκρασία (ονομαστική θερμοκρασία αλλαγής φάσης) για την περίπτωση μιγμάτων πολλών συστατικών. Έτσι χαρακτηρίζονται ως υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Ωστόσο, σε θερμοκρασίες διαφορετικές της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης τους, συμπεριφέρονται όπως τα συμβατικά υλικά (υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας), δηλαδή αποθηκεύουν θερμότητα και ταυτόχρονα αυξάνουν τη θερμοκρασία τους. Όταν ένα PCM υπόκειται σε αλλαγή φάσης απαιτείται ένα πολύ μεγάλο ποσό ενέργειας, το οποίο μπορεί να παρέχει η αποθήκευση θερμότητας σε λανθάνουσα μορφή, καθώς κύριο χαρακτηριστικό της είναι η μεταφορά πολύ μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας συγκριτικά με την αισθητή θερμότητα. Τα υλικά αυτά εμφανίζουν θερμοκρασία τήξεως μεταξύ των 23°C και 26°C, μεγάλη απορροφητικότητα θερμότητας ανά κυβικό μέτρο, υψηλή θερμική αγωγιμότητα, μικρή θερμική μεταβολή όγκου, ομοιογένεια κατά την τήξη τους και πλήρως αναστρέψιμο κύκλο μεταβολών φυσικής κατάστασης, καθώς και υψηλή αντίσταση στη διάβρωση και την ανάφλεξη.

2.2 Ιδιότητες και κριτήρια επιλογής PCM

[1,6,21,22]

Ένα υλικό δεν μπορεί να έχει όλες τις απαιτούμενες ιδιότητες ώστε να αποτελέσει ένα ιδανικό μέσο θερμικής αποθήκευσης σε μια εφαρμογή. Η βασική απαίτηση είναι ένα τέτοιο PCM που θα δώσει την επιθυμητή θερμική απόδοση με το ελάχιστο κόστος. Για το λόγο αυτόν οι σχεδιαστές και οι μηχανικοί πρέπει να εξετάσουν και να λάβουν υπόψη έναν αριθμό κριτηρίων. Τα κριτήρια για την επιλογή του υλικού αλλαγής φάσης, με σκοπό την επιτυχή λειτουργία του στο εκάστοτε σύστημα, είναι οι ιδιότητες του PCM που διακρίνονται σε θερμικές, φυσικές, κινητικές, χημικές και οικονομικές.

Θερμοφυσικές Ιδιότητες

- Κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης ώστε να εξασφαλιστεί η αποθήκευση/απελευθέρωση θερμότητας σε μια εφαρμογή. Δηλαδή οι θερμοκρασίες τήξης και πήξης πρέπει να εμπεριέχονται στο θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής.
- Μεγάλη ενθαλπία αλλαγής φάσης με σκοπό την υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης ανά όγκο, ώστε να έχουμε υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης θερμότητας συγκριτικά με την αποθήκευση αισθητής θερμότητας.
- Υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα έτσι ώστε να επιτύχουμε μεγάλο ποσό αισθητής θερμότητας
- Μικρή μεταβολή όγκου και μικρή τάση ατμών στις θερμοκρασίες λειτουργίας ώστε να μειωθούν τα προβλήματα αποθήκευσης ανά μονάδα όγκου και οι ανάγκες μηχανικής σταθερότητας και στεγανότητας στο δοχείο που περιέχει το PCM.
- Σταθερότητα των ιδιοτήτων του υλικού σε κάθε φόρτιση/αποφόρτιση προκειμένου να έχω σταθερή αποθηκευτική ικανότητα.

Κινητικές Ιδιότητες

- Υψηλή ταχύτητα σχηματισμού του πυρήνα προκειμένου να αποφεύγεται το φαινόμενο υπόψυξης (supercooling) κατά την υγρή φάση.
- Υψηλή ταχύτητα ανάπτυξης των κρυστάλλων, ώστε το σύστημα να καλύπτει τις ανάγκες ζήτησης ανακτώντας θερμότητα από το σύστημα αποθήκευσης.

Χημικές ιδιότητες

- Χημική σταθερότητα μεγάλης διάρκειας
- Απολύτως αναστρέψιμη διαδικασία αλλαγής φάσης.
- Να μην υπόκεινται υποβάθμιση μετά από ένα μεγάλο αριθμό κύκλων ώστε το υλικό να μπορεί να χρησιμοποιηθεί πολλές φορές.
- Να μην διαβρώνει τα υλικά με τα οποία έρχεται σε επαφή.
- Να μην είναι τοξικό, εύφλεκτο και να μην εκρήγνυται για λόγους ασφαλείας.

Οικονομικές ιδιότητες

- Χαμηλή τιμή πώλησης, ώστε να είναι ανταγωνιστικό σε σχέση με άλλα προϊόντα που χρησιμοποιούνται για ίδιους σκοπούς.
- Να είναι διαθέσιμο σε πολύ μεγάλη κλίμακα.

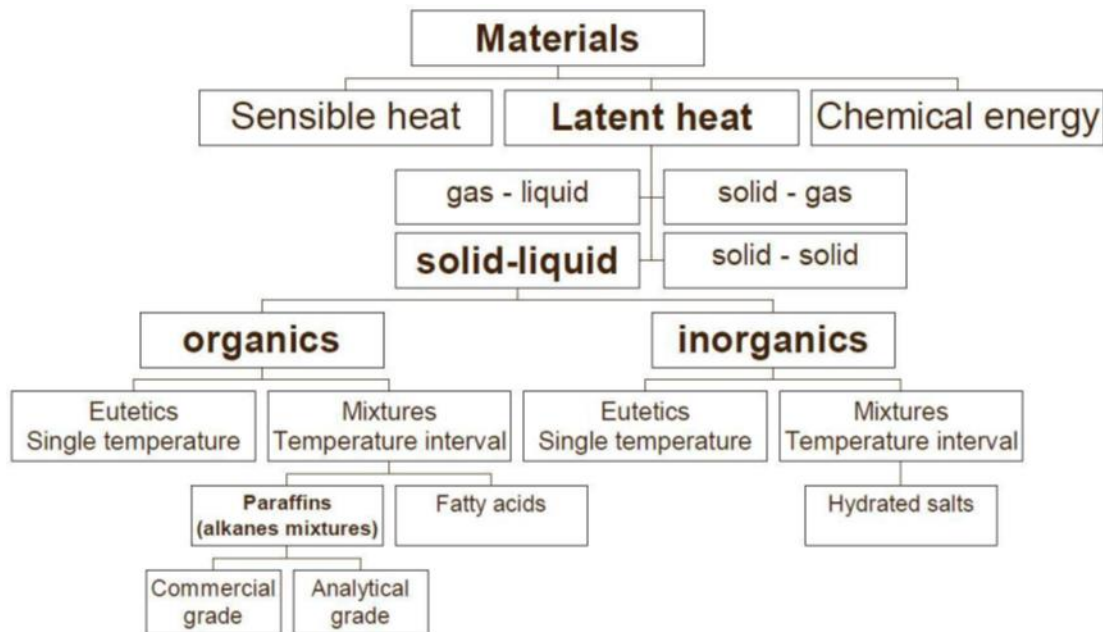
2.3 Κατηγοριοποίηση PCM

[1,4,6,7,9,17,23,24]

Μεγάλος αριθμός υλικών αλλαγής φάσης είναι διαθέσιμος ώστε να καλύπτει κάθε θερμοκρασιακό εύρος που απαιτείται από την εκάστοτε εφαρμογή. Για τα υλικά αλλαγής φάσης και ειδικότερα αυτά

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 ομαδοποίηση των υλικών αλλαγής φάσης μπορεί να γίνει βάσει πολλών διαφορετικών παραγόντων. Πρώτος και σημαντικότερος παράγοντας είναι η σύσταση, σύμφωνα με την οποία χωρίζονται σε οργανικά και ανόργανα υλικά. Άλλοι παράγοντες είναι το εύρος θερμοκρασιών που λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης τους καθώς επίσης και οι εφαρμογές που καλύπτουν.

Θα αναλύσουμε παρακάτω την κατηγοριοποίηση ως προς τη σύσταση επειδή είναι η συνηθέστερη και πιο σημαντική.



Εικόνα 2.1 Κατηγοριοποίηση PCM ως προς την σύσταση

2.3.1 Οργανικά υλικά

Τα οργανικά υλικά καλύπτουν σχετικά μικρό θερμοκρασιακό εύρος, περίπου 0°C έως 150°C. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει κυρίως τις παραφίνες, τα λιπαρά οξέα και τις σακχαρώδεις αλκοόλες. Λόγω της μικρής πυκνότητας που εμφανίζουν (μικρότερη από 1g/cm^3), έχουν σχετικά μικρές τιμές λανθάνουσας θερμότητας ανά όγκο. Ακόμη, παρουσιάζουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και είναι εύφλεκτα. Ωστόσο, πλεονεκτούν ως προς τη συμβατότητα τους με άλλα υλικά, γιατί είναι μη τοξικά, εμφανίζουν λίγη ή καθόλου υπόψυξη, έχουν χημική και θερμική σταθερότητα και είναι αρκετά φθηνότερα. Παρακάτω θα αναλύσουμε περισσότερο τις παραφίνες και τα λιπαρά οξέα, ως κύριους εκπροσώπους της κατηγορίας αυτής.

2.3.2 Παραφίνες

Οι παραφίνες είναι προϊόντα ορυκτού λαδιού (πετρελαίου) που αποτελούνται κυρίως από την οργανική οικογένεια των βαρέων υδρογονανθράκων που ονομάζονται αλκάνια, με μοριακό τύπο C_nH_{2n+2} με $n \geq 16$. Πρέπει να σημειωθεί ότι γενικά παρουσιάζουν παρόμοιες ιδιότητες. Η πιο απλή παραφίνη είναι το μεθάνιο (CH_4).

Όταν ισχύει $5 \leq n \leq 15$ οι παραφίνες βρίσκονται σε υγρή μορφή ενώ όταν $20 \leq n \leq 40$ είναι σε εύπλαστη στερεή μορφή και λέγονται paraffin wax. Η παραφίνη σε στερεά μορφή είναι το κύριο χρησιμοποιούμενο εμπορικό οργανικό PCM, το οποίο παρουσιάζει θερμοκρασία τήξης που κυμαίνεται από 23°C-67°C. Οι μη εμπορικές παραφίνες δε χρησιμοποιούνται στην πράξη εξαιτίας του μεγάλου κόστους. Γενικά, οι παραφίνες είναι συνδεδεμένες με την αποθήκευση ενέργειας σε κτιριακές εφαρμογές.

Η εμπορική (τεχνητή) παραφίνη δημιουργείται από απόσταξη πετρελαίου και δεν είναι καθαρή ουσία αλλά συνδυασμός διαφόρων υδρογονανθράκων και έχει κυρίως την ευθεία αλυσίδα υδρογονανθράκων με μοριακό τύπο $CH_3-(CH_2)-CH_3$. Γενικά, η θερμοκρασία και η θερμότητα τήξης αυξάνει όσο αυξάνει ο αριθμός των ατόμων άνθρακα και το μήκος της αλυσίδας. Ανάλογα με τον αριθμό των ατόμων άνθρακα στην αλυσίδα, διαχωρίζουμε τις τεχνητές παραφίνες σε δύο ομάδες: τις n-παραφίνες, οι οποίες έχουν άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα, και τις ισο-παραφίνες, οι οποίες έχουν περιττό.

Οι παραφίνες, στα πλεονεκτήματά τους, καλύπτουν μία ευρεία περιοχή θερμοκρασιών τήξης, έχουν υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης, αμελητέα εμφάνιση του φαινομένου υπέρψυξης, χαμηλή τάση ατμών, χημική αδράνεια και σταθερότητα, δεν παρουσιάζουν διαχωρισμό φάσης, είναι διαθέσιμα στο εμπόριο σε λογικές τιμές και εντελώς ακίνδυνα για το περιβάλλον. Ειδικότερα, είναι σημαντικό το γεγονός της ύπαρξης μεγάλου πλήθους παραφινών με σημεία τήξης από 20-26° C, δηλαδή στα πλαίσια των απαιτήσεων των κτιριακών εφαρμογών που μας ενδιαφέρουν εν προκειμένω. Όμως, εκτός από τις επιθυμητές αυτές ιδιότητες, φέρουν και κάποια αρνητικά στοιχεία, όπως η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και η μεγάλη μεταβολή όγκου που υφίστανται κατά την αλλαγή φάσης τους. Τα προβλήματα αυτά ωστόσο, μπορούν να εξαλειφθούν με μεθόδους που θα αναπτύξουμε στη συνέχεια του κεφαλαίου. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από μέτρια αναφλεξιμότητα και μη συμβατότητα με πλαστικά δοχεία αποθήκευσης.

2.3.2.1 Λιπαρά Οξέα

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, μακρίας και πολύ – μακρίας αλυσίδας.

Το σημείο τήξης τους κυμαίνεται από 10 έως 70ο C, ενώ η θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου από 128 έως 183MJ/ και είναι συγκρίσιμη με αυτή των παραφινών. Στα πλεονεκτήματα των λιπαρών οξέων συγκαταλέγεται η δυνατότητα συνεχούς παροχής τους, αφού προέρχονται από κοινά φυτικά και ζωικά έλαια, καθώς και η εμπορική τους διαθεσιμότητα, δεδομένου ότι πολλά από αυτά χρησιμοποιούνται ήδη σε μεγάλες ποσότητες για την παραγωγή πλαστικών, καλλυντικών και υφασμάτων. Επίσης, παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά στην κυκλική καταπόνηση τήξης/πήξης. Το βασικότερο, ίσως, μειονέκτημά τους είναι το υψηλό κόστος τους (2-2,5 φορές υψηλότερο από αυτό των εμπορικών παραφινών), το οποίο περιορίζει την έκταση της εφαρμογής τους στον τομέα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Επιπλέον, είναι ελαφρώς διαβρωτικά και χαρακτηρίζονται από κακοσμία.

2.3.3 Ανόργανα υλικά

Τα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης περιλαμβάνουν τα ένυδρα άλατα και τα μέταλλα (τα μέταλλα έχουν πολύ υψηλές θερμοκρασίες τήξης για παθητικές εφαρμογές κτιρίων). Γενικά, καλύπτουν μία πλατιά θερμοκρασιακή κλίμακα, χαρακτηρίζονται από αρκετά μεγάλη θερμότητα τήξης και καλή θερμική αγωγιμότητα, είναι οικονομικά, μη εύφλεκτα και λόγω της μεγάλης πυκνότητάς τους έχουν σχεδόν διπλάσια ογκομετρική ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας σε σχέση με τα οργανικά PCM. Τα περισσότερα όμως από αυτά, προκαλούν διαβρώσεις σε αρκετά μέταλλα, υφίστανται έντονα υπέρψυξη και διαχωρισμό φάσης και η ικανότητά τους να αποθηκεύουν λανθάνουσα θερμότητα μειώνεται μετά από κυκλική καταπόνηση. Ακόμα, έχουν μεγάλο κόστος

πώλησης, λόγω της επιβεβλημένης ενσωμάτωσής τους σε προστατευτικό κάλυμμα και της χρήσης πρόσθετων ουσιών σταθεροποίησης των ιδιοτήτων τους.

2.3.3.1 Ένυδρα άλατα

Τα ένυδρα άλατα είναι τα πιο συνηθισμένα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης. Περιέχουν μόρια νερού συνδυασμένα με μία καθορισμένη αναλογία, έτσι ώστε να αποτελούν εσωτερικό μέρος του κρυστάλλου, τα οποία είναι είτε δεσμευμένα στο κέντρο του μετάλλου είτε έχουν κρυσταλλωθεί με το μεταλλικό σύνολο. Ο γενικός χημικός τύπος των κρυσταλλικών ένυδρων αλάτων είναι $X(Y)_n \cdot mH_2O$. Η αλλαγή φάσης τους από στερεό σε υγρό είναι ουσιαστικά μία αφυδάτωση της υγρασίας του άλατος, παρόλο που αυτή η διαδικασία μοιάζει θερμοδυναμικά με τήξη.

Στο σημείο τήξης οι κρύσταλλοι των ένυδρων αλάτων διασπώνται σε άνυδρα άλατα και νερό ή σε ένυδρα άλατα με χαμηλότερο ποσοστό υγρασίας και νερό.

Ένα πρόβλημα με τα περισσότερα ένυδρα άλατα είναι ότι κατά τη διάρκεια της τήξης, το νερό που απελευθερώνεται δεν αρκεί για να διαλύσει όλη τη στερεή φάση. Εξαιτίας της διαφοράς στην πυκνότητα το ένυδρο άλας με το χαμηλότερο ποσοστό υγρασίας ή το άνυδρο άλας εγκαθίσταται στον πυθμένα του δοχείου σχηματίζοντας ίζημα. Επίσης, τα πιο πολλά ένυδρα άλατα παρουσιάζουν αδυναμία σχηματισμού πυρήνα, γεγονός που οδηγεί σε εμφάνιση του φαινομένου supercooling στο υγρό πριν την κρυσταλλοποίηση. Στα πλεονέκτημά τους είναι η μεγάλη τιμή της λανθάνουσας θερμότητας που κυμαίνεται περίπου στα 250Kj/Kg, η καλή θερμική αγωγιμότητα με τιμή περίπου 0,6W/mK, η μη αναφλεξιμότητά τους και η σχετικά υψηλή πυκνότητα των ένυδρων αλάτων, η οποία ενισχύει την ικανότητά τους για αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων θερμότητας. Όμως, πρέπει να σημειωθεί ότι τα ένυδρα άλατα τα οποία χρησιμοποιούνται για κτιριακές εφαρμογές έχουν χαμηλό κόστος υλικού αλλά υψηλό κόστος συσκευασίας και πώλησης σε σχέση με τις παραφίνες. Το πιο πολυεξετασμένο υλικό για εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας είναι το άλας Glauber.

2.3.3.2 Μέταλλα

Η ομάδα αυτή περιλαμβάνει από μέταλλα χαμηλής τήξης και εύτηκτα μέταλλα. Βασικά μειονεκτήματά τους είναι το βάρος τους, η χαμηλή

διαθεσιμότητά τους και το μεγάλο τους κόστος. Σε περιπτώσεις όμως που ο όγκος είναι σημαντικός παράγοντας, η κατηγορία αυτή μπορεί να είναι υποψήφια για χρήση, χάρη στην υψηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου που χαρακτηρίζει τα υλικά της. Ακόμα, σημαντικό πλεονέκτημα αυτών, είναι η μεγάλη θερμική αγωγιμότητά τους. Τέλος, άλλα χαρακτηριστικά τους είναι η χαμηλή ειδική θερμότητα και η χαμηλή τάση ατμών.

2.3.4 Εύτηκτα μίγματα

Εύτηκτα ονομάζονται τα μίγματα PCM, τα οποία μπορεί να είναι είτε οργανικά, είτε ανόργανα ή ακόμα και μίγμα ανόργανων με οργανικά PCM. Έτσι, μπορούν να χωριστούν σε τρεις υποκατηγορίες ανάλογα με τα υλικά από τα οποία συντίθενται: οργανικά-οργανικά, ανόργανα-ανόργανα και οργανικά-ανόργανα εύτηκτα υλικά. Κάθε ένα από τα συστατικά ενός εύτηκτου μίγματος, λιώνει και στερεοποιείται χωρίς προβλήματα, σχηματίζοντας έτσι όλα μαζί ένα μίγμα κρυστάλλων των συστατικών κατά τη διαδικασία της κρυστάλλωσης. Η θερμοκρασία τήξης/πήξης τους είναι συνήθως χαμηλότερη από τη θερμοκρασία τήξης/πήξης των συστατικών τους.

Βασικό πλεονέκτημα με τα εύτηκτα PCM είναι ότι εμφανίζουν την τάση να συγκεντρώνουν τα πλεονεκτήματα και των δύο ομάδων, ενώ παράλληλα δεν έχουν την τάση να κάνουν το ίδιο με τα μειονεκτήματα. Το βασικό τους μειονέκτημα όμως είναι το κόστος παραγωγής, το οποίο είναι διπλάσιο έως τριπλάσιο απ' ότι των οργανικών και ανόργανων PCM. Γενικά, τα οργανικά εύτηκτα μίγματα έχουν μικρότερη θερμοκρασία τήξης και μεγαλύτερη θερμότητα τήξης απ' ότι τα ανόργανα εύτηκτα μίγματα, καθιστώντας τα πρώτα λίγο πιο κατάλληλα για αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε κτιριακές εφαρμογές.

Οι πληροφορίες για τα εύτηκτα μίγματα σχετικά με τις θερμοφυσικές τους ιδιότητες, είναι αρκετά περιορισμένες. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια μελετάται η δημιουργία εύτηκτων μιγμάτων με ανάμιξη οργανικών και ανόργανων υλικών για χρήση ως PCM με βελτιωμένες ιδιότητες.

2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα PCM

[1,17,35,40,41,42,43,44,45]

Όπως είναι φυσικό όλες οι κατηγορίες διαθέτουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία όμως αποκτούν διαφορετική βαρύτητα ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται ένα υποψήφιο PCM. Παρακάτω, συνοψίζονται τα βασικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τριών κατηγοριών PCM.

Οργανικά PCM

Πλεονεκτήματα

- Καθόλου ή αμελητέα εμφάνιση του φαινομένου υπέρψυξης
- Δεν υφίστανται διαχωρισμό φάσεων
- Χημική και θερμική σταθερότητα
- Μη διαβρωτικά
- Διαθέσιμα στο εμπόριο

Μειονεκτήματα

- Μικρότερη θερμική αγωγιμότητα από τα ανόργανα PCM
- Μικρότερη πυκνότητα από τα ανόργανα PCM
- Αναφλεξιμότητα

Ανόργανα PCM

Πλεονεκτήματα

- Μεγαλύτερη λανθάνουσα θερμότητα τήξης από τα οργανικά PCM
- Μεγάλη πυκνότητα
- Μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου
- Υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα από τα οργανικά PCM
- Μη εύφλεκτα
- Διαθέσιμα στο εμπόριο
- Οικονομικά
-

Μειονεκτήματα

- Εμφάνιση υπέρψυξης
- Εμφάνιση διαχωρισμού φάσεων
- Διαβρωτικά
- Δημιουργία ιζήματος(ένυδρα άλατα)

Εύτηκτα μίγματα

Πλεονεκτήματα

- Δεν εμφανίζουν διαχωρισμό φάσης
- Συγκεντρώνουν τα πλεονεκτήματα των οργανικών και ανόργανων PCM, χωρίς όμως να παρουσιάζουν τα μειονεκτήματα αυτών

Μειονεκτήματα

- Πολύ μεγάλο κόστος παραγωγής σε σχέση με τις άλλες δύο κατηγορίες
- Χαμηλή διαθεσιμότητα

2.5 Μέθοδοι μέτρησης των ιδιοτήτων

[1,6,31,49,50,51]

Κατά τα τελευταία χρόνια, έχει παρατηρηθεί ότι ο θερμικός χαρακτηρισμός των υλικών αλλαγής φάσης είναι βασικός παράγοντας για το σωστό και κατάλληλο τελικό σχεδιασμό ενός συστήματος αποθήκευσης θερμότητας. [53] Το εκάστοτε PCM πρέπει να έχει την κατάλληλη θερμοκρασία τήξης, την επιθυμητή θερμότητα τήξης και τη θερμική αγωγιμότητα που υπαγορεύει η πρακτική εφαρμογή για την οποία προορίζεται. Έτσι, αναπτύχθηκαν τεχνικές θερμικής ανάλυσης με τις οποίες επιτυγχάνεται η μέτρηση των σημαντικότερων ιδιοτήτων των PCM. Μεταξύ αυτών των τεχνικών, οι πιο συνηθισμένες είναι οι:

- Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA- Differential Thermal Analysis)
- Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (DSC- Differential Scanning Calorimetry)
- T-History
- Μέθοδος διπλού κελιού (Double cell)

2.5.1 Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA)

Η διαφορική Θερμική Ανάλυση ή DTA ορίζεται ως μια τεχνική καταγραφής και μέτρησης της διαφοράς θερμοκρασίας που

αναπτύσσεται μεταξύ ενός δείγματος του υλικού που εξετάζεται και ενός αδρανούς υλικού αναφοράς όταν και τα δύο υπόκεινται σε πανομοιότυπο θερμοκρασιακό καθεστώς εντός περιβάλλοντος ελεγχόμενης θέρμανσης ή ψύξης. Οι διαφορές αυτές της θερμοκρασίας που παρατηρούνται κατά τη θέρμανση ή τη ψύξη του δείγματος και του υλικού αναφοράς καταγράφονται συναρτήσει του χρόνου ή 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.

Ακόμα όμως, 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. Στις περιπτώσεις αυτές, η βασική καμπύλη του διαγράμματος θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ασυνέχειες στις μεταβατικές θερμοκρασίες ενώ η κλίση της σε οποιοδήποτε σημείο θα πρέπει να εξαρτάται από την κατάσταση της μικροδομής του δείγματος στην αντίστοιχη θερμοκρασία. Ένα βασικό χαρακτηριστικό αυτών των διαγραμμάτων είναι ότι η περιοχή που εκτείνεται κάτω από το ακρότατο της καμπύλης, η μορφή του οποίου εξαρτάται από το βάρος του δείγματος και το ρυθμό θέρμανσης που χρησιμοποιείται, είναι ενδεικτική της μεταβολής ενθαλπίας και δεν επηρεάζεται από τη θερμοχωρητικότητα του δείγματος.

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. Ο προγραμματιστής θερμοκρασίας 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 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)

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος μέτρησης των ιδιοτήτων είναι η 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, μετριέται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Είναι η πιο διαδεδομένη τεχνική για τη θερμική ανάλυση ενός PCM, καθώς παρέχει τις ενθαλπίες τήξης/στερεοποίησης, τις θερμοκρασίες τήξης/στερεοποίησης, την ειδική θερμότητα των υπό μελέτη υλικών και άλλες θερμικές ιδιότητες. 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. Στα πλεονεκτήματά της είναι ο γρήγορος χρόνος ανάλυσης, συνήθως τριάντα λεπτά, η εύκολη προετοιμασία του δείγματος, η εφαρμοσιμότητα όχι μόνο στα υγρά αλλά και στα στερεά, η 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.

Στον αντίποδα, κάποια αρνητικά χαρακτηριστικά της μεθόδου DSC είναι το μικρό μέγεθος δείγματος που επιβάλλει η μέθοδος (μικρότερο από 90mg), η επιρροή της μάζας του δείγματος στη θερμική απόκριση, η εξάρτηση της απόκρισης από το ρυθμό θέρμανσης και η παρέμβαση του κύριου συστατικού στο σήμα, στην περίπτωση μελέτης σύνθετων υλικών.

2.5.3 Μέθοδος T-History

Αν και οι μέθοδοι DTA και DSC είναι καλά ανεπτυγμένες, οι ανεπάρκειες τους

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

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

Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι τα εξής: μπορεί να χρησιμοποιηθεί, λόγω του μεγάλου μεγέθους του δείγματος, για τα ανόργανα και οργανικά, ενσωματωμένα σε κάψουλες ή σύνθετα PCM, τα εύρη των ρυθμών θέρμανσης και ψύξης και τα θερμοκρασιακά εύρη είναι αρκετά μεγάλα για να ταιριάζουν PCM για πολύ διαφορετικές εφαρμογές και τα όργανα μέτρησης και η διαμόρφωση που απαιτείται είναι απλά γεγονός ότι συνεπάγεται χαμηλό κόστος εξοπλισμού. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα οπτικής παρατήρησης του φαινομένου δηλαδή της διαδικασίας αλλαγής φάσης του δείγματος PCM καθώς και ταυτόχρονη μέτρηση πολλών δειγμάτων σε ένα πείραμα.

Η μέθοδος T-history παρόλο που είναι ένα πολύ χρήσιμο και απλό εργαλείο για τη μέτρηση των θερμικών ιδιοτήτων των μεικτών δειγμάτων, έχει όρια στην ανάλυση των δεδομένων. Ένα από τα κυριότερα προβλήματα στην αρχική μέθοδο είναι να υιοθετηθεί το σημείο απελευθέρωσης της υπέρψυξης ως το τέλος της περιόδου αλλαγής φάσης. Ένας βαθμός υπέρψυξη ποικίλει ανάλογα με

συνθήκες όπως είναι η ταχύτητα ψύξης, η καθαρότητα και οι δονήσεις και είναι ανεξάρτητος από το τέλος της αλλαγής φάσης. Έτσι λοιπόν δημιουργήθηκε η τροποποιημένη μέθοδος, η οποία χρησιμοποιεί ένα σημείο καμψής ως το σύνορο μεταξύ των περιόδων της αλλαγής φάσης και της στερεάς κατάστασης, όπου η πρώτη παράγωγος της καμπύλης T-history για PCM γίνεται ελάχιστη. Αυτό μπορεί φυσικά να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή ή μειώνεται σταδιακά με την απελευθέρωση λανθάνουσας θερμότητας, αλλά μειώνεται εκθετικά κατά τη διαδικασία ψύξης που συνοδεύει μόνο την αισθητή θερμότητα. Ένα ακόμα πρόβλημα της συγκεκριμένης μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι το σφάλμα των μετρήσεων έχει άμεση σχέση με την προσεκτική κατασκευή της διάταξης και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται καθώς και τη διεξαγωγή του πειράματος.

2.5.4 Μέθοδος διπλού κελιού (double cell)

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

Το υλικό PCM, με συνολικό βάρος 2.000g, χωρίζεται σε δύο μέρη ίσου μεγέθους, που περικλείονται σε δύο πλαστικές θήκες και τίθενται σε καλά θερμομονωμένο πλαίσιο σε κατακόρυφη θέση. Οι θήκες χωρίζονται από μια λεπτή μεταλλική μεμβράνη και είναι

τοποθετημένες μεταξύ δύο θερμαινόμενων / ψυχόμενων πλακών χαλκού. Οι συμμετρικά θερμαινόμενες ή ψυχόμενες θήκες είναι εξοπλισμένες με μια σειρά από αισθητήρες θερμοκρασίας που βρίσκονται και στις δύο πλευρές των θηκών. Οι θήκες υπόκεινται σε εναλλασσόμενους κύκλους θέρμανσης (ηλεκτρική θέρμανση) και ψύξης (ψυκτικό υγρό).

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

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

2.6 Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης

[1,6,31,49,50,51]

Η ανάλυση της συμπεριφοράς των συστημάτων, στα οποία λαμβάνει χώρα η διαδικασία αλλαγής φάσης είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Αυτό οφείλεται σε μία σειρά παραγόντων που χαρακτηρίζει τα συστήματα αυτά, όπως είναι η περιορισμένη γνώση της διεργασίας μεταφοράς θερμότητας στη διεπιφάνεια στερεού και υγρού, οι διαφορετικές θερμοφυσικές ιδιότητες του PCM στις δύο φάσεις, η αβεβαιότητα για τη θερμική αντίσταση στη διεπιφάνεια δοχείου και στερεού PCM, η μεταβολή του όγκου του υλικού αλλαγής φάσης κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, η ύπαρξη κενών σε ένα στερεό και κυρίως η μη γραμμικότητα του προβλήματος, που οφείλεται στην κίνηση της διεπιφάνειας στερεής και υγρής φάσης κατά την αλλαγή φάσης.

Το μη γραμμικό πρόβλημα της κίνησης της διεπιφάνειας-ορίου στερεής και υγρής φάσης εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία αποθηκεύεται και απελευθερώνεται θερμότητα από το PCM και είναι γνωστό ως πρόβλημα «κινούμενου ορίου» ή πρόβλημα Stefan. Αν και το πρόβλημα αυτό μελετήθηκε για πρώτη φορά από τους Clapeyron και Lamé το 1831, το όνομά του δόθηκε από τον Σλοβένο φυσικό Josef Stefan, ο οποίος γύρω στο 1890 έδωσε τη λύση σ' αυτό, καθώς υπολόγιζε πόσο γρήγορα μεγαλώνει ένα στρώμα πάγου πάνω στο νερό. Αρχικά, το πρόβλημα Stefan προσεγγίστηκε θεωρώντας τη μεταφορά θερμότητας μόνο μέσω αγωγής σε ένα ημι-άπειρο υλικό και αργότερα θεωρώντας τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή κατά τη διάρκεια τήξης και στερεοποίησης του υλικού αλλαγής φάσης.

Για την επίλυση του προβλήματος Stefan υπάρχουν διάφορες αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι. Μερικές αναλυτικές τεχνικές προσέγγισης είναι το ολοκλήρωμα της θερμικής ισορροπίας (heat balance integral), η τεχνική της μεταβολής (variation technique), η «ισοθερμική μετανάστευση» (isothermal migration), η μέθοδος της πηγής (source method) και η περιοδική λύση (periodic solution). Ένα βασικό μειονέκτημα όμως των αναλυτικών μεθόδων επίλυσης είναι, ότι η εφαρμογή τους περιορίζεται μόνο σε περιπτώσεις μονοδιάστατων προβλημάτων, αφού σε πολυδιάστατα προβλήματα γίνονται ιδιαίτερα πολύπλοκες. Έτσι, τη λύση στο πρόβλημα μπορεί να δώσει η άλλη κατηγορία, αυτή των αριθμητικών μεθόδων επίλυσης, στις οποίες ανήκουν οι μέθοδοι εντοπισμού του μετώπου αλλαγής φάσης ή αλλιώς μέθοδοι μεταβλητού πλέγματος (front-

tracking methods/ variable grid methods) και οι μέθοδοι σταθερού πλέγματος(fixed-domain methods). Οι μέθοδοι εντοπισμού του μετώπου αλλαγής φάσης εντοπίζουν συνεχώς τη διεπιφάνεια αλλαγής φάσης. Ωστόσο, παρουσιάζουν τα εξής μειονεκτήματα: απαιτούν πλέγμα που να αλλάζει συνεχώς, μετασχηματισμό συντεταγμένων ή χρήση χωροχρονικού πλέγματος, που μπορεί να κοστίζει πολύ υπολογιστικά και δεν είναι κατάλληλες για αλλαγή φάσης με πεπερασμένο εύρος ψύξης. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης είναι η μέθοδος ενθαλπίας και η μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας, που αναλύονται συνοπτικά παρακάτω.

2.6.1 Μέθοδος Ενθαλπίας

Το πρόβλημα της αλλαγής φάσης γίνεται πιο εύκολο εισάγοντας τη μέθοδο της ενθαλπίας, καθώς διαθέτει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα: η εξίσωση που διέπει το πρόβλημα είναι παρόμοια με την εξίσωση της κάθε φάσης, δεν υπάρχει καμία προϋπόθεση που πρέπει να πληρείται στη διεπιφάνεια στερεού και υγρού και τέλος η μέθοδος ενθαλπίας επιτρέπει τη δημιουργία μιας πολτώδους ζώνης μεταξύ των δύο φάσεων, η οποία είναι γνωστή ως mushy zone και χάρη στη θεώρηση αυτής αποφεύγονται ασυνέχειες που μπορεί να δημιουργούν αριθμητικές αστάθειες. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί με οποιοδήποτε υλικό, ακόμα και αν δεν πρόκειται για υλικό αλλαγής φάσης. Για την περίπτωση PCM, είναι δυνατός ο καθορισμός της συνάρτησης ενθαλπίας, εξετάζοντας τα αποτελέσματα των DSC-μετρήσεων. Η μέθοδος ενθαλπίας έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε πολλές περιπτώσεις, ενώ ο Hunter το 1989 και ο Amdjadi το 1990 επιβεβαίωσαν πως είναι η καταλληλότερη για τυπικές εφαρμογές, με τον περιορισμό ότι δεν υπάρχει καμία μεταβολή στο αριθμητικό μοντέλο στη διεπιφάνεια. Προτού περιγράψουμε τη μέθοδο ενθαλπίας, πρέπει να κάνουμε κάποιες παραδοχές. Συγκεκριμένα, θεωρούμε ότι οι θερμοφυσικές ιδιότητες του PCM είναι ανεξάρτητες της θερμοκρασίας, αλλά παίρνουν διαφορετικές τιμές στη στερεή και στην υγρή φάση, το υλικό αλλαγής φάσης είναι αρχικά στερεό, ομοιογενές και ιστροπικό και η μεταφορά θερμότητας γίνεται μέσω αγωγής.

Για μία διαδικασία αλλαγής φάσης, συμπεριλαμβανομένων είτε της τήξης είτε της στερεοποίησης, η διατήρηση της ενέργειας μπορεί να

εκφραστεί με τους όρους της ολικής ογκομετρικής ενθαλπίας και της θερμοκρασίας για σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες ως εξής:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla(k_k(\nabla T))$$

όπου H: είναι η ολική ογκομετρική ενθαλπία και αποτελεί το άθροισμα της αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας του PCM, δηλαδή:

$$H(T) = h(T) + \rho_1 f(T) \lambda$$

με ρ : πυκνότητα, k : θερμική αγωγιμότητα, λ : θερμική αντίσταση και

$$h = \int_{T_m}^T \rho_k c_k dT$$

Σε περίπτωση ισοθερμικής αλλαγής φάσης, το ποσοστό της υγρής φάσης παίρνει τις παρακάτω τιμές:

$$f = \begin{cases} 0, & \text{αν } T < T_m \text{ (στερεό)} \\ 0 - 1, & \text{αν } T = T_m \text{ (πολτώδες)} \\ 1, & \text{αν } T = T_m \text{ (υγρό)} \end{cases}$$

2.6.2 Μέθοδος Ενεργού Θερμοχωρητικότητας

Ιδανικά, ένα PCM κατά τη διαδικασία αλλαγής φάσης μπορεί να απορροφήσει ή να απελευθερώσει θερμότητα σε μία σταθερή θερμοκρασία, δηλαδή ιδανικά έχουμε ταύτιση θερμοκρασίας τήξης και θερμοκρασίας στερεοποίησης. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται άπειρη θερμοχωρητικότητα του υλικού αλλαγής φάσης, που προφανώς δεν υφίστανται στην πράξη για κανένα PCM. Είναι φανερό λοιπόν, ότι η αλλαγή φάσης στην πραγματικότητα, λαμβάνει χώρα σε ένα θερμοκρασιακό εύρος, μεταξύ θερμοκρασίας τήξης και στερεοποίησης. Η μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας είναι μία ακόμη μέθοδος που δίνει τη δυνατότητα περιγραφής της μη-ισοθερμοκρασιακής αλλαγής φάσης ενός PCM και είναι η πιο εύχρηστη από τις δύο μεθόδους προσομοίωσης που αναπτύσσουμε εδώ, καθώς χρησιμοποιεί τη διαδικασία της συνηθισμένης αριθμητικής λύσης της εξίσωσης μεταφοράς ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, το μέγεθος της ενεργού θερμοχωρητικότητας είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας $C_{Peff}(T)$ και είναι ανάλογο τόσο του ποσού ενέργειας που αποθηκεύεται ή

απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, όσο και της ειδικής θερμότητας. Ωστόσο, είναι αντιστρόφως ανάλογο με το θερμοκρασιακό εύρος τήξης ή στερεοποίησης.

Για τη δημιουργία της συνάρτησης ενεργού θερμοχωρητικότητας χρειάζονται κάποια χαρακτηριστικά του υλικού αλλαγής φάσης. Πρόκειται για τη θερμοκρασία τήξης T_l και στερεοποίησης T_s του υλικού αλλαγής φάσης, τις αντίστοιχες θερμοχωρητικότητές του C_{pl} και C_{ps} και τη θερμότητα αλλαγής φάσης του H .

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, χρησιμοποιείται η μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας και συγκεκριμένα η τριγωνική συνάρτηση (Triangular function). Άλλες εκδοχές της μεθόδου είναι η συνάρτηση αναβαθμού (Ramp function), η αντίστροφη συνάρτηση αναβαθμού (Reversed ramp function) και η βηματική συνάρτηση (Step function).

Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε ότι η μέθοδος ενθαλπίας επιλέγεται, όταν η διαδικασία αλλαγής φάσης ενδιαφέρει ως μικροσκοπικό φαινόμενο, ενώ η μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας χρησιμοποιείται, όταν υφίσταται ενδιαφέρον για μακροσκοπική μελέτη του φαινομένου, όπως συμβαίνει στην παρούσα εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Εφαρμογές των Υλικών Αλλαγής Φάσης

3.1 Εισαγωγή

[52]

Τα υλικά αποθήκευσης ενέργειας μέσω αλλαγής φάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές. Ο λόγος για τον οποίο είναι τόσο χρήσιμα είναι η δυνατότητά τους να αποθηκεύσουν μεγάλη πυκνότητα ενέργειας με μικρότερη θερμοκρασιακή διακύμανση κατά την ανάκτησή τους. Η χρήση τους βέβαια παρουσιάζει και ορισμένες δυσκολίες, λόγω της χαμηλής τιμής του συντελεστή αγωγιμότητας, της μεταβολής της πυκνότητας, της αστάθειας των ιδιοτήτων τους σε μακροχρόνια χρήση και επίσης λόγω του διαχωρισμού των φάσεων, η οποία μπορεί να οδηγήσει και σε αλλαγή της χημικής τους σύστασης.

Τα υλικά αλλαγής φάσης είναι πολύ σημαντικά για την εξοικονόμηση ενέργειας, γιατί έχουν τη δυνατότητα να την αποθηκεύουν και να την αξιοποιούν κατάλληλα. Σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές είναι απαραίτητη η αποθήκευση ενέργειας μικρής διάρκειας. Τα PCM βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε κτήρια, συστήματα ψύξης έκτακτης ανάγκης για ηλεκτρονικές συσκευές, ηλεκτρονικούς υπολογιστές, ρούχα, κράνη αγώνων, διαστημική τεχνολογία, κουτιά μεταφοράς φαρμάκων κ.λπ.

3.2 Κτηριακές εφαρμογές

[52]

Τα PCM είναι χρήσιμα σε κτηριακές εφαρμογές, τόσο σε παθητικά όσο και σε ενεργητικά συστήματα. Στα παθητικά συστήματα θέρμανσης-ψύξης, η συλλογή, η αποθήκευση και η διανομή ενέργειας γίνονται χωρίς την κατανάλωση ηλεκτρομηχανολογικής ισχύος ή ηλεκτρονικού ελέγχου, παρά μόνο με φυσικά μέσα. Αυτό γίνεται με

την κατάλληλη τοποθέτηση των τοίχων, των οροφών και των παραθύρων ώστε να συλλέγουν, να αποθηκεύουν τη θερμική ενέργεια. Για να είναι αυτό εφικτό, συνδυάζονται τόσο τα δομικά υλικά του κτηρίου, π.χ. πέτρες, τούβλα, τσιμέντο κ.λπ., όσο και οι φυσικές διεργασίες, όπως η εξάτμιση, η φυσική και η εξαναγκασμένη συναγωγή κ.λπ., ώστε να ικανοποιούν τις ανάγκες του κτηρίου και τις απαιτήσεις των χρηστών. Η ενέργεια αποθηκεύεται στα υλικά αυτά κατά τη διάρκεια της ημέρας και αποδίδεται όταν είναι πιο απαραίτητη, δηλαδή κατά τη διάρκεια της νύχτας. Τα PCM μπορούν να αποθηκεύσουν πολύ μεγαλύτερη ποσότητα θερμικής ενέργειας ανά μονάδα μάζας δομικού στοιχείου σε σύγκριση με τα συμβατικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην οικοδομή. Το σημαντικό επίσης είναι ότι η θερμότητα αποθηκεύεται υπό λανθάνουσα και όχι αισθητή μορφή. Η αλλαγή φάσης είναι ισοθερμική και με τον τρόπο αυτό η ρύθμιση της θερμοκρασίας του χώρου είναι πολύ καλύτερη.

Ορισμένα από τα παθητικά συστήματα που βασίζονται στα PCM είναι:

- ο τοίχος Trombe
- ο ηλιακός τοίχος
- η γυψοσανίδα με ενσωματωμένα PCM
- τα ενεργειακά παράθυρα
- τα συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης

Τα ενεργητικά συστήματα κτηρίων, στα οποία βρίσκουν εφαρμογή τα PCM είναι:

- τα ενεργητικά πάνελ οροφής
- οι οροφές για ενεργητική θέρμανση και ψύξη
- ηλιακά συστήματα θέρμανσης αέρα με PCM
- ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού με PCM

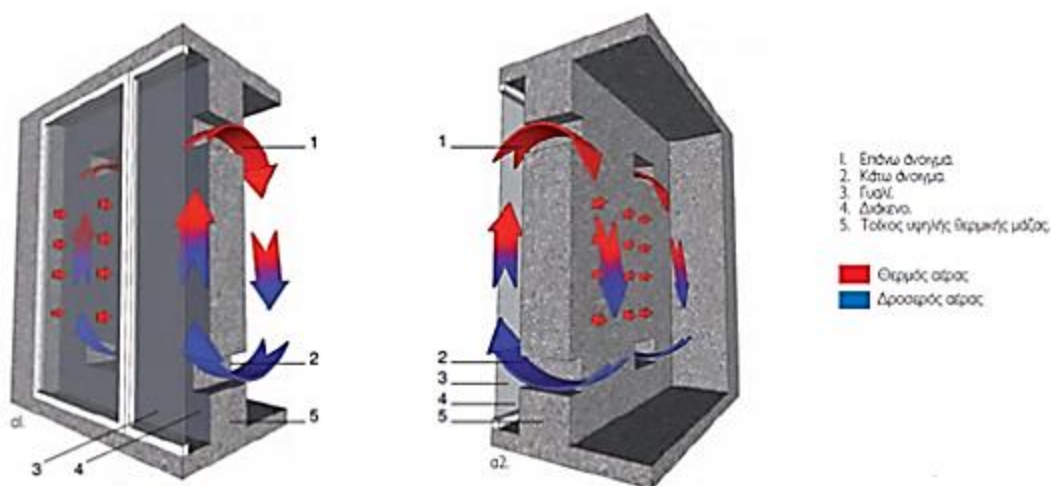
3.2.1 Παθητικά συστήματα θέρμανσης-ψύξης κτηρίων

[52,53,54,55,58,59,60]

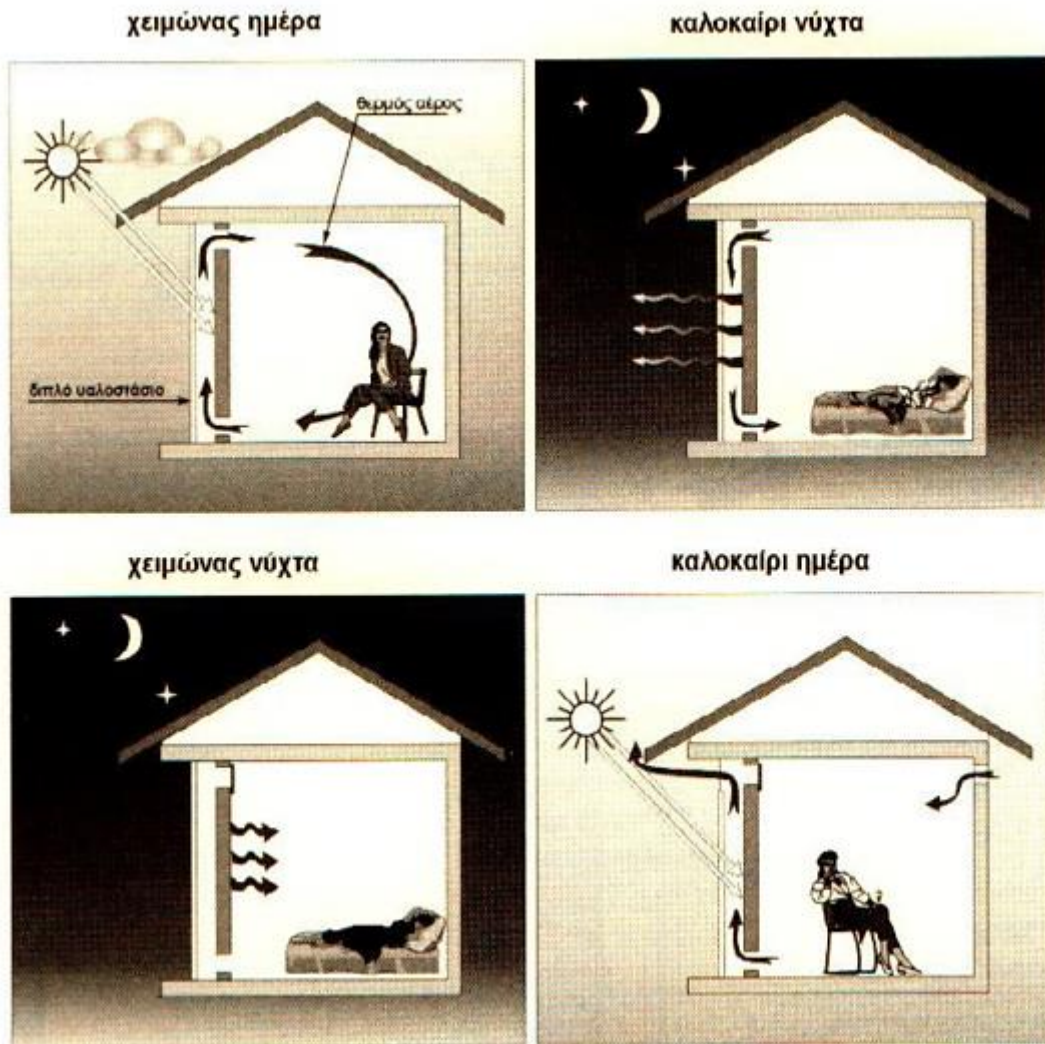
Τοίχος Trombe

Ο τοίχος Trombe είναι ένας συνηθισμένος τοίχος μεγαλύτερου πάχους με νότιο προσανατολισμό, στον οποίο όμως έχει τοποθετηθεί ένα κάλυμμα από γυαλί ή πλαστικό σε απόσταση τεσσάρων ιντσών περίπου. Ανάμεσα στον τοίχο και το κάλυμμα, καθώς και στη μάζα του τοίχου, ο οποίος είναι συνήθως μαύρου χρώματος, αποθηκεύεται ηλιακή ενέργεια. Στη συνέχεια, η θερμική ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στον τοίχο, διοχετεύεται προς το εσωτερικό του κτηρίου για αρκετές ώρες. Ο παραδοσιακός τοίχος Trombe βασίζεται στην αισθητή θερμότητα, αλλά η προσθήκη PCM αυξάνει τη δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από το PCM, προκαλώντας την τήξη του. Το βράδυ, η θερμότητα που έχει αποθηκευτεί αποδίδεται για τη θέρμανση του χώρου του κτηρίου. Η λειτουργία αυτή περιγράφεται σχηματικά στην **Εικόνα 3.1** και στην **Εικόνα 3.2**.

Οι τοίχοι Trombe με PCM μπορούν να αποθηκεύσουν μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα μάζας, και για το λόγο αυτό απαιτούν μικρότερο χώρο, ενώ παράλληλα είναι και ελαφρύτεροι σε σχέση με τους παραδοσιακούς. Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα PCM για την εφαρμογή αυτή είναι τα ένυδρα άλατα και οι υδρογονάνθρακες.



Εικόνα 3.1: Λειτουργία του τοίχου Trombe κατά τη διάρκεια αποθήκευσης θερμότητας (ημέρα)



Εικόνα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του τοίχου Trombe

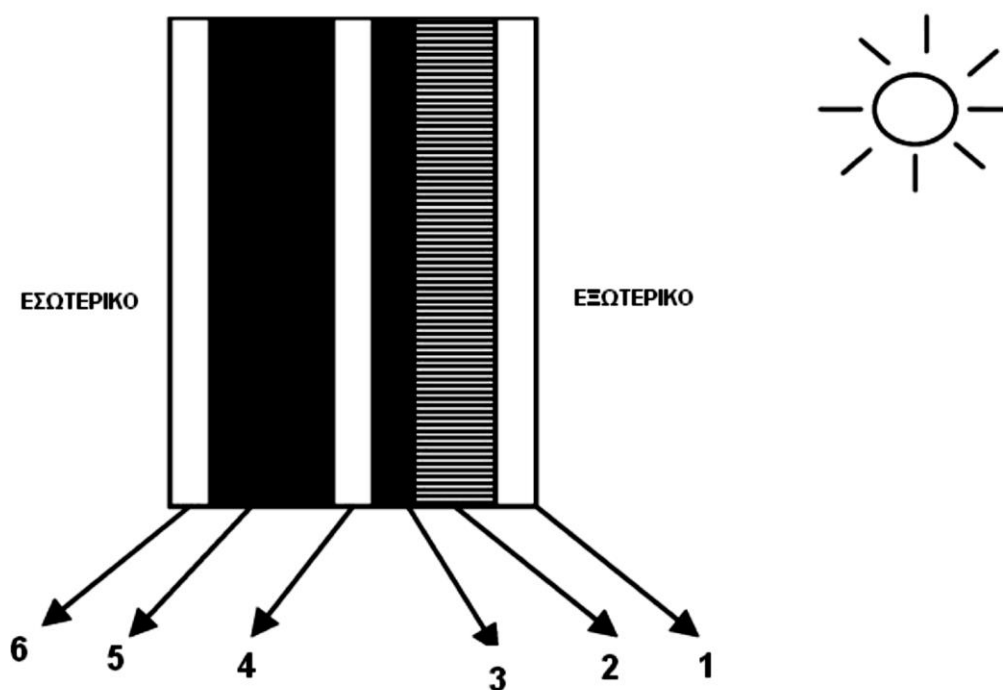
Ηλιακός Τοίχος

Ο ηλιακός τοίχος είναι ένας τοίχος με ενσωματωμένα PCM, ώστε να αποθηκεύει με τον τρόπο αυτό ένα μεγάλο ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνειά του. Λόγω της μεγάλης θερμικής τους αδράνειας, έχουν τη δυνατότητα να μην επιτρέπουν στις διακυμάνσεις της εξωτερικής θερμοκρασίας να επηρεάσουν σημαντικά τη θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου.

Μια πειραματική μελέτη των Stritih και Novak (2002) έδειξε ότι ένας ηλιακός τοίχος, στον οποίο χρησιμοποιείται μαύρο κερί παραφίνης με σημείο τήξης 25-30°C, μπορεί να απορροφήσει την ηλιακή ενέργεια σε ποσοστό 79%. Ο πειραματικός αυτός τοίχος χρησιμοποιήθηκε για

αερισμό του κτηρίου και προέκυψε ότι το σημείο τήξης του PCM επηρέαζε τη θερμοκρασία του αέρα που χρησιμοποιείται για τον αερισμό του χώρου.

Στην Εικόνα 3.3 παρουσιάζονται τα στοιχεία που αποτελούν έναν ηλιακό τοίχο με ενσωματωμένο PCM. Κινούμενοι από το εξωτερικό προς το εσωτερικό, βλέπουμε ότι η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στο γυαλί και το διαφανές μονωτικό υλικό (1 και 2), ο ρόλος του οποίου είναι να εμποδίσει τη συναγωγή θερμότητας προς το εσωτερικό, καθώς και τη μετάδοση μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας. Το σημείο 3 αποτελεί το PCM, το οποίο βρίσκεται μέσα σε διάφανη πλαστική θήκη. Το στρώμα 4 θερμαίνει τον αέρα που χρησιμοποιείται για τον αερισμό, ενώ τα στρώματα 5 και 6 αποτελούν τη μόνωση και το γύψο, αντίστοιχα.

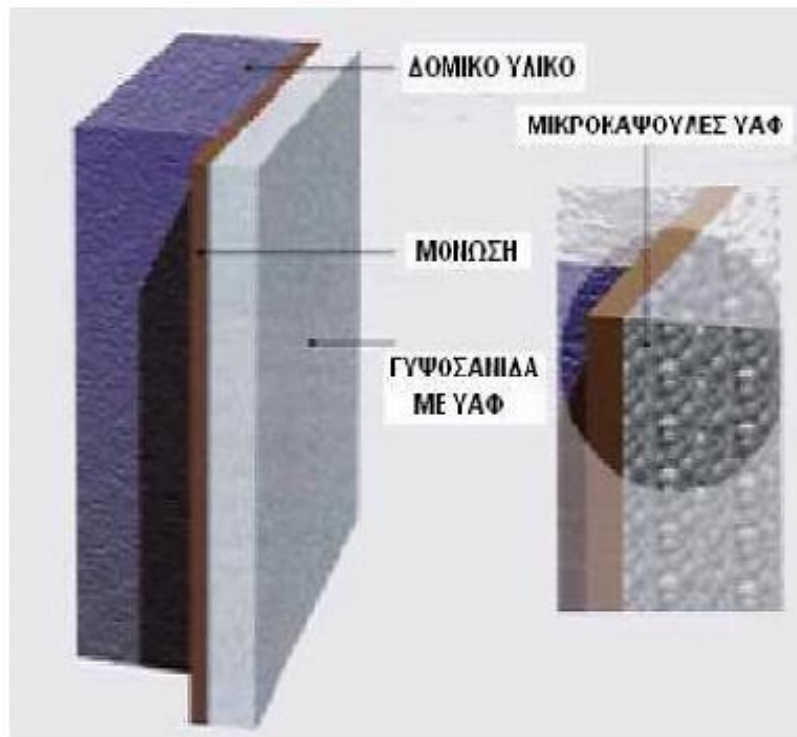


Εικόνα 3.3: Ηλιακός τοίχος με ενσωματωμένα PCM

Γυψοσανίδα με ενσωματωμένο PCM

Οι συγκεκριμένες γυψοσανίδες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν προς αντικατάσταση των παραδοσιακών, ώστε να αποθηκεύουν και

να αποδίδουν ενέργεια κατά μήκος του κτηρίου, οδηγώντας έτσι σε σημαντική μείωση των θερμικών, ψυκτικών και ηλεκτρικών φορτίων.



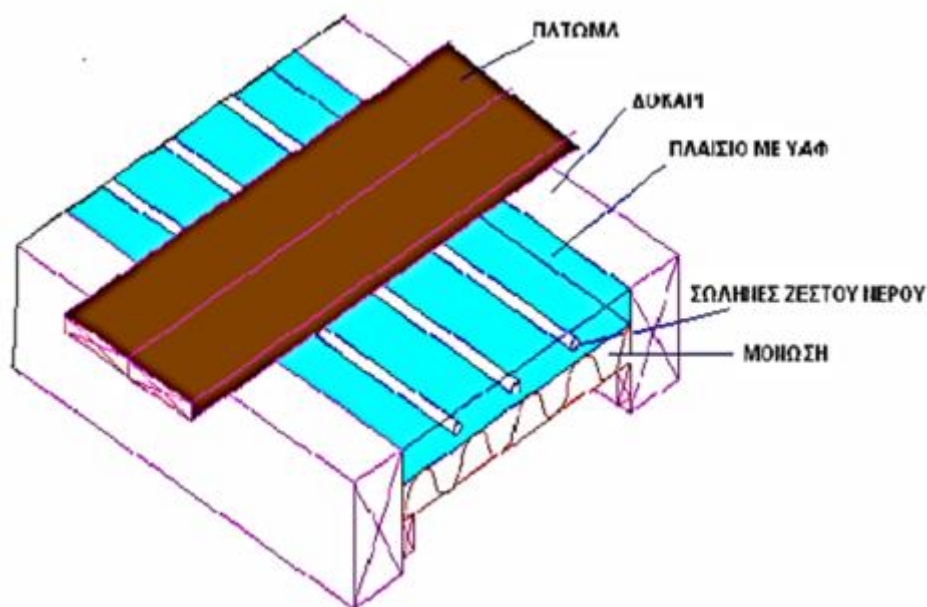
Εικόνα 3.4: Εφαρμογή γυψοσανίδας με PCM

Έχουν γίνει εκτεταμένες έρευνες για τη χρήση των PCM σε γυψοσανίδες. Τα υλικά αυτά είναι σε μορφή κάψουλας, η οποία ύστερα από την τήξη του PCM, δεν έχει τη δυνατότητα να μεταδώσει θερμότητα στο κτήριο. Οι Peirpo et al. (1991) μελέτησαν ένα κτήριο στο Wisconsin, στο οποίο υπήρχαν γυψοσανίδες με ενσωματωμένο PCM, καθώς και μεγάλη επιφάνεια από γυαλί με νότιο προσανατολισμό. Η εξοικονόμηση ενέργειας που μπορούσε να επιτύχει ήταν 3 GJ ή 15% της ετήσιας κατανάλωσης. Κατέληξαν επίσης στο συμπέρασμα ότι ένα PCM με θερμοκρασία τήξης 1-3 °C πάνω από τη μέση θερμοκρασία του δωματίου είναι το καταλληλότερο για την αποθήκευση ενέργειας.

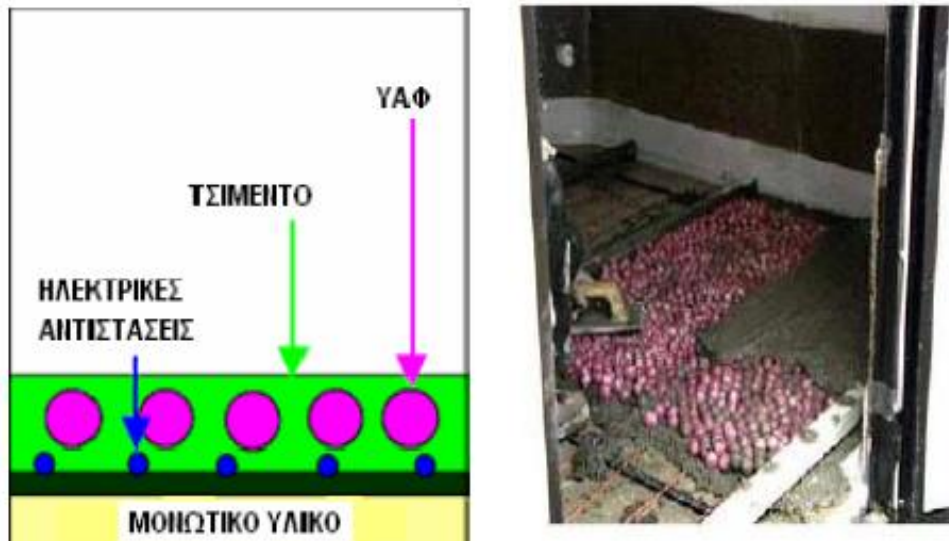
Σε μελέτη των Stetiu και Feustel (1997) εξετάστηκε η επιπλέον αύξηση της δυνατότητας αποθήκευσης ενέργειας σε ένα κτήριο, μέσω της χρήσης διπλής γυψοσανίδας. Η εφαρμογή αφορούσε οικία στην περιοχή Sunnynvale στην California, όπου παρατηρήθηκε σημαντική μείωση της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα.

Ενδοδαπέδια θέρμανση με PCM

Η ενδοδαπέδια θέρμανση προσφέρει θερμική άνεση ομοιόμορφα στο χώρο και η θερμοκρασίες που επιτυγχάνει κυμαίνονται μεταξύ 25-28°C. Πρόκειται για ένα σύστημα ασφαλές στη χρήση του, το οποίο διατηρεί και την αισθητική του χώρου, καθώς δεν είναι ορατό. Η θέρμανση μπορεί να προέρχεται είτε από σύστημα ύδατος, είτε από ηλεκτρικό σύστημα. Στα συστήματα ύδατος, η θέρμανση του νερού γίνεται μέσω της καύσης πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Αν το σύστημα όμως εκμεταλλεύεται μια πηγή θερμότητας όπως η ηλιακή, μπορεί να συνδυαστεί με χρήση υλικών PCM. Αν τη στιγμή που η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη, δεν υπάρχει ανάγκη θέρμανσης του χώρου, τότε η ενέργεια αυτή μπορεί να αποθηκευτεί στο PCM για μεταγενέστερη χρήση. Επιπλέον, και τα ηλεκτρικά συστήματα μπορούν να συνδυαστούν με τα PCM, καθώς δίνουν τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας, όταν το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλό. Στα συστήματα αυτά, το PCM χρησιμοποιείται σε μορφή σφαιριδίων τα οποία περιβάλλουν τις ηλεκτρικές αντιστάσεις.



Εικόνα 3.5: Ενδοδαπέδια θέρμανση υγρού συστήματος



Εικόνα 3.6: Ενδοδαπέδια θέρμανση ξηρού συστήματος

Όσον αφορά τον τρόπο θέρμανσης, έχει προκύψει ότι η θέρμανση μέσω ακτινοβολίας είναι προτιμότερη σε σχέση με τη συναγωγή, διότι οδηγεί στην εξοικονόμηση χώρου, μιας και η απορρόφηση της ακτινοβολίας από το δάπεδο είναι άμεση. Με τη χρήση υλικών αλλαγής φάσης, η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας είναι μεγαλύτερη, πράγμα το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στις κτηριακές εφαρμογές, καθώς οι διαφορές θερμοκρασίας είναι μικρές.

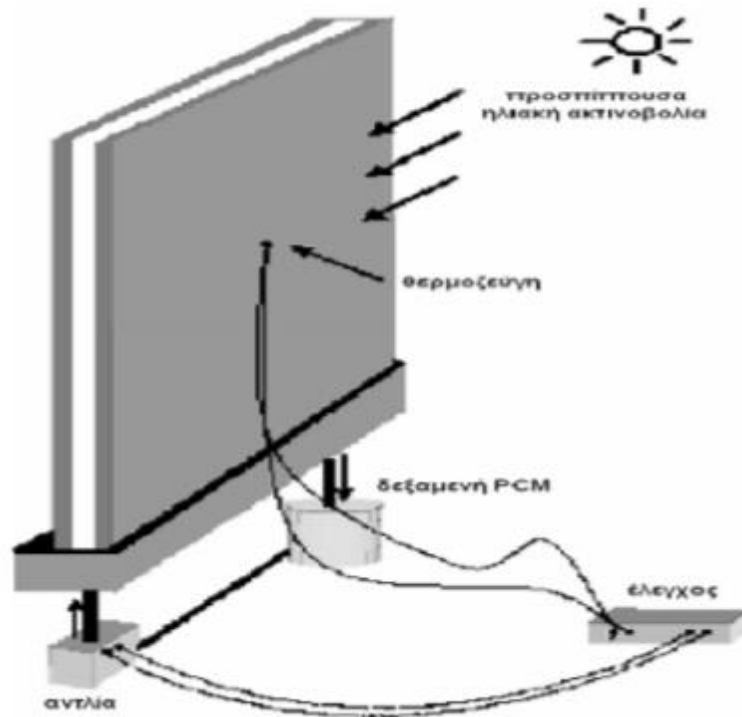
Ενεργειακά παράθυρα

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ώστε ένα απλό παράθυρο να μετατραπεί σε ενεργειακό, π.χ. με χρήση παραθυρόφυλλων υλικών αλλαγής φάσης, τα οποία τοποθετούνται έξω από τα παράθυρα. Οι γρίλιες περιέχουν υλικό αλλαγής φάσης το οποίο θερμαίνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, καθώς είναι ανοικτές. Στη συνέχεια κατά τη διάρκεια της νύχτας, οι γρίλιες κλείνουν και μεταφέρουν την θερμότητα που έχουν αποθηκεύσει στο χώρο, οδηγώντας σε μείωση της θερμοκρασίας του χώρου ως και 2°C.



Εικόνα 3.7: Γρίλιες παραθύρων με PCM

Μια ακόμη διάταξη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι τα θερμικά ενεργά παράθυρα με κινούμενες κουρτίνες με PCM. Το παράθυρο αποτελείται από διπλά τζάμια με κενό μεταξύ τους, ενώ στην πάνω πλευρά υπάρχει εξαεριστήρας. Όλες οι υπόλοιπες πλευρές είναι σφραγισμένες, εκτός από δύο ανοικτά σημεία στο κάτω μέρος, οι οποίες είναι συνδεδεμένες μέσω ενός πλαστικού σωλήνα με αντλία και μια δεξαμενή που περιέχει το PCM, σε υγρή μορφή. Ένας αισθητήρας διαφοράς θερμοκρασίας ελέγχει τη λειτουργία της αντλίας. Όταν η διαφορά θερμοκρασίας υπερβεί ένα προκαθορισμένο όριο, η αντλία τίθεται σε λειτουργία και το PCM κατευθύνεται προς το κενό μεταξύ των τζαμιών του παραθύρου. Επειδή η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας είναι χαμηλότερη, το PCM ψύχεται σχηματίζοντας ένα στρώμα στερεού υλικού αυξανόμενου πάχους, καθώς συνεχίζεται η ψύξη. Αυτό το στρώμα που δημιουργείται εμποδίζει την απώλεια θερμότητας από τον εσωτερικό χώρο.



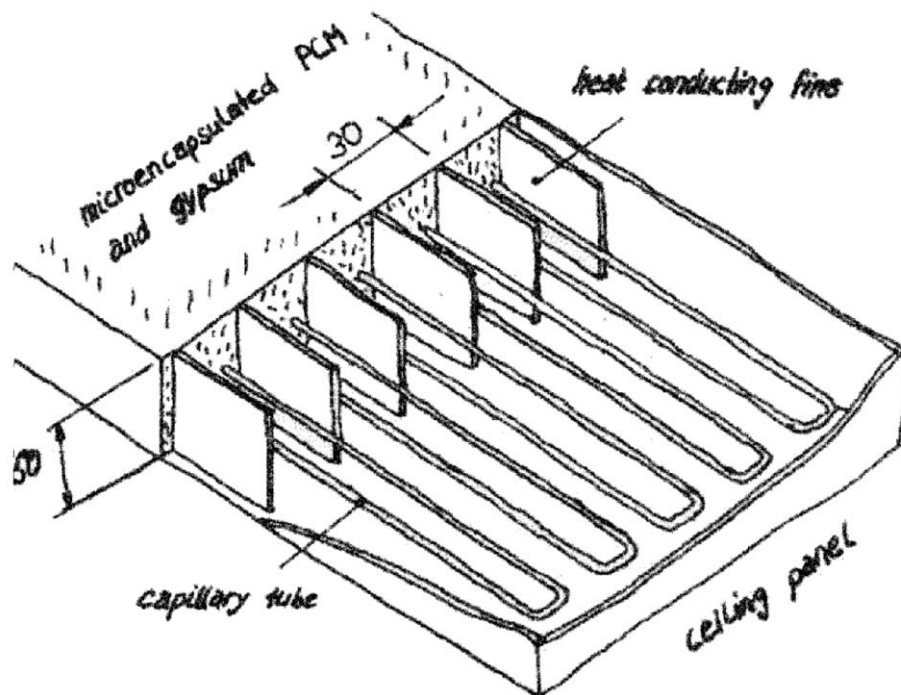
Εικόνα 3.8: Διάταξη ενεργειακά αποδοτικού παραθύρου με PCM

3.2.2 Ενεργητικά συστήματα θέρμανσης - ψύξης κτηρίων

[61]

Πάνελ οροφής – οροφές ενεργητικής θέρμανσης – ψύξης

Το PCM ενσωματώνεται στο πάνελ οροφής, ώστε να μπορεί να αποθηκεύσει θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας, η οποία θα οδηγήσει στην τήξη του υλικού, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας ψύχεται και στερεοποιείται μέσω ενός συστήματος σωληνώσεων που περιέχουν νερό. Ως PCM στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιείται υγρή παραφίνη, η οποία είναι πολύ εύφλεκτη και απαιτεί ειδικό χειρισμό. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται συνήθως εγκλωβισμένη σε μικροκάψουλες, και ενσωματωμένη σε άλλο υλικό, όπως ο γύψος. Αυτό είναι χρήσιμο διότι το νερό που υπάρχει στο γύψο δεν θα επιτρέψει την ενδεχόμενη εξάπλωση της πυρκαγιάς.



Εικόνα 3.9: Σχηματική αναπαράσταση πάνελ οροφής με PCM

Η χρήση των PCM στις σκεπές των κτηρίων μπορεί να εφαρμοσθεί τόσο για θέρμανση όσο και για δροσισμό. Διάφοροι μελετητές έχουν ασχοληθεί με τέτοιου είδους εφαρμογές, όπου θα παρουσιαστούν συγκεκριμένα παραδείγματα συστημάτων στο ακόλουθο κεφάλαιο.

3.3 Ηλεκτρονικές εφαρμογές

[62,63,65,67]

Η χρήση των PCM σε ηλεκτρονικές συσκευές αποσκοπεί στην προστασία έναντι της υπερθέρμανσης και στη δημιουργία πρωτοποριακών ηλεκτρονικών μνημών. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε φορητές ηλεκτρικές συσκευές, όπως υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα, PDAs, καθώς μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας και στην επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας

λειτουργίας. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας απαιτεί τον κατάλληλο συνδυασμό υλικών και τρόπων μεταφοράς θερμότητας. Η μεταφορά θερμότητας ενισχύεται με τη χρήση ανεμιστήρων, όταν δηλαδή πρόκειται για εξαναγκασμένη συναγωγή. Εναλλακτικά, η ψύξη των συσκευών αυτών μπορεί να γίνει μέσω οργανικών PCM. Η θερμότητα που απάγεται μπορεί να αποθηκευτεί σε μια ψύκτρα PCM. Η ψύκτρα PCM αποτελείται από μικροκάψουλες που περιέχουν το επιθυμητό υλικό και οι οποίες βρίσκονται μέσα σε λεπτό μέταλλο.

Η ψύξη με PCM μπορεί να περιγραφεί από τα ακόλουθα στάδια:

- η ηλεκτρονική συσκευή θερμαίνεται και αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί αύξηση της θερμοκρασίας του PCM ως το σημείο τήξης του
- το PCM τήκεται υπό σταθερή θερμοκρασία και μετατρέπεται από στερεό σε υγρό
- το πλήρως τηγμένο PCM θα θερμανθεί αν συνεχιστεί η αύξηση της θερμοκρασίας

Σύμφωνα με μελέτες ερευνητών σε κινητά τηλέφωνα, η χρήση των PCM σε σταθεροποιεί τη θερμοκρασία λειτουργία τους και οδηγεί σε αύξηση της διάρκειας ζωής και της διάρκειας χρήσης τους. Χωρίς τη χρήση του PCM, η θερμοκρασία του κινητού τηλεφώνου μπορεί να φτάσει τους 45°C. Επιπλέον, ο χρόνος τήξης του PCM μειώνεται όταν το επίπεδο ισχύος είναι υψηλότερο, πράγμα το οποίο οδηγεί και σε υψηλότερη θερμοκρασία. Οι πρόσθετες λειτουργίες των κινητών τηλεφώνων οδηγούν σε αυξημένα επίπεδα ισχύος. Για το λόγο αυτό προτείνεται από τους ερευνητές και η χρήση εσωτερικών πτερυγίων στην ψύκτρα, ώστε να αυξηθεί η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας. Το προβληματικό σημείο στις συγκεκριμένες εφαρμογές είναι το στάδιο επαναστεροποίησης του PCM ύστερα από την τήξη του διότι απαιτεί πολύ περισσότερο χρόνο.

Οι τηλεπικοινωνίες απαιτούν τη χρήση μηχανημάτων και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων για τη σωστή λειτουργία του δικτύου. Τα ηλεκτρονικά τους κυκλώματα είναι ακριβά, καταναλώνουν σημαντική ενέργεια και η λειτουργία τους επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις υψηλές θερμοκρασίες. Τα μηχανήματα αυτά τοποθετούνται σε ειδικά κουβούκλια σε χώρους ανοικτούς και σε υψώματα. Επειδή σε αυτές τις περιοχές η πρόσβαση είναι δύσκολη, ο έλεγχος της θερμοκρασίας γίνεται μέσω της χρήσης PCM. Τα κουβούκλια τηλεπικοινωνίας

διαθέτουν μόνωση και κλιματισμό, ούτως ώστε να προστατεύεται η πομποδέκτης βάσης, ο οποίος διαχειρίζεται την κίνηση και το σήμα του δικτύου (Εικόνα 3.10). Η θερμοκρασία του χώρου στον οποίο βρίσκεται ο πομποδέκτης και η μπαταρία του πρέπει να είναι κάτω από 35°C. Τα PCM μπορούν να απορροφήσουν τη θερμότητα από τον εσωτερικό χώρο, χωρίς τη χρήση άλλου συστήματος κλιματισμού.

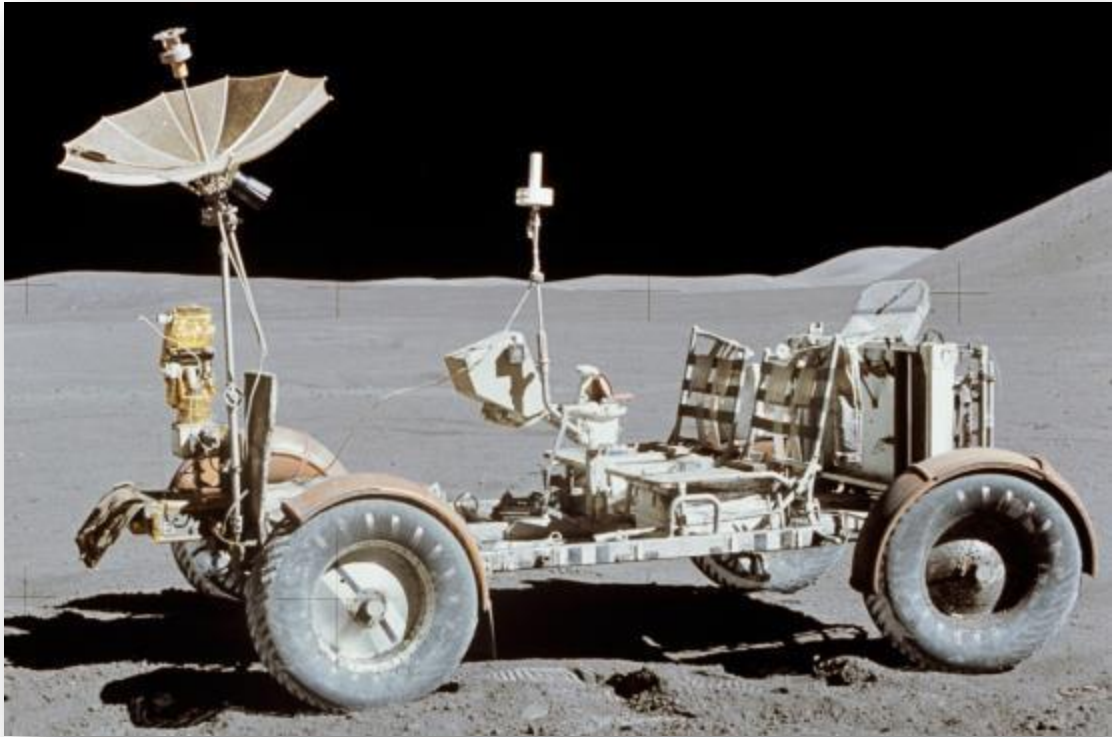


Εικόνα 3.10: Συσκευασίες υλικών αλλαγής φάσης που χρησιμοποιούνται σε τηλεπικοινωνιακά κουβούκλια

3.4 Εφαρμογές στη διαστημική τεχνολογία

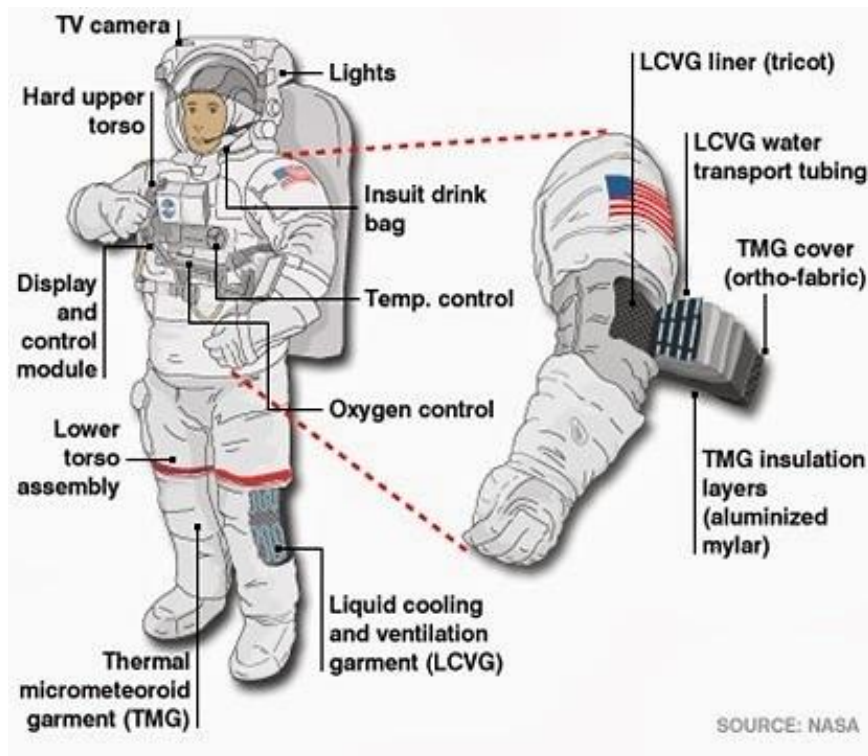
[68]

Η δεκαετία του 1960 χαρακτηρίστηκε από μεγάλη ανάπτυξης στον τομέα της διαστημικής τεχνολογίας. Διάφορα επιστημονικά προγράμματα του MIT σχετικά με τα PCM επιχορηγήθηκαν από τη NASA. Τα προγράμματα αυτά μελετούσαν τη χρήση των PCM για τον θερμικό έλεγχο των διαφόρων συστημάτων. Η πρώτη εφαρμογή ήταν στο διαστημόπλοιο Apollo 15 Lunar Rover Vehicle, στο οποίο η χρήση των PCM αφορούσε τον έλεγχο της θερμότητας που εκλυόταν από τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό του διαστημόπλοιου. Συγκεκριμένα, όσο διήρκεσε το διαστημικό ταξίδι, τα PCM αποθήκευαν τη θερμότητα των συσκευών αυτών και την απέβαλλαν υπό μορφή ακτινοβολίας.



Εικόνα 3.11: Apollo 15 Lunar Rover Vehicle

Το διαστημικό πρόγραμμα της NASA στις αρχές της δεκαετίας του '80 αποτέλεσε τη βάση για την εξέλιξη των PCM. Η χρήση των PCM είχε στόχο την προστασία των αστροναυτών και των οργάνων από την έκθεση σε ακραίες θερμοκρασιακές μεταβολές στο διάστημα. Τα PCM ενσωματώθηκαν στις ίνες των υφασμάτων, ενώ παράλληλα ήταν ιδιαίτερος χρήσιμα καθώς η θερμοχωρητικότητά τους δεν ήταν συνάρτηση της ποσότητας του αέρα μέσα στο ύφασμα.



Εικόνα 3.12: Απαιτήσεις στολής αστροναυτών

3.5 Εφαρμογές σε υφάσματα (ένδυση)

[68,69]

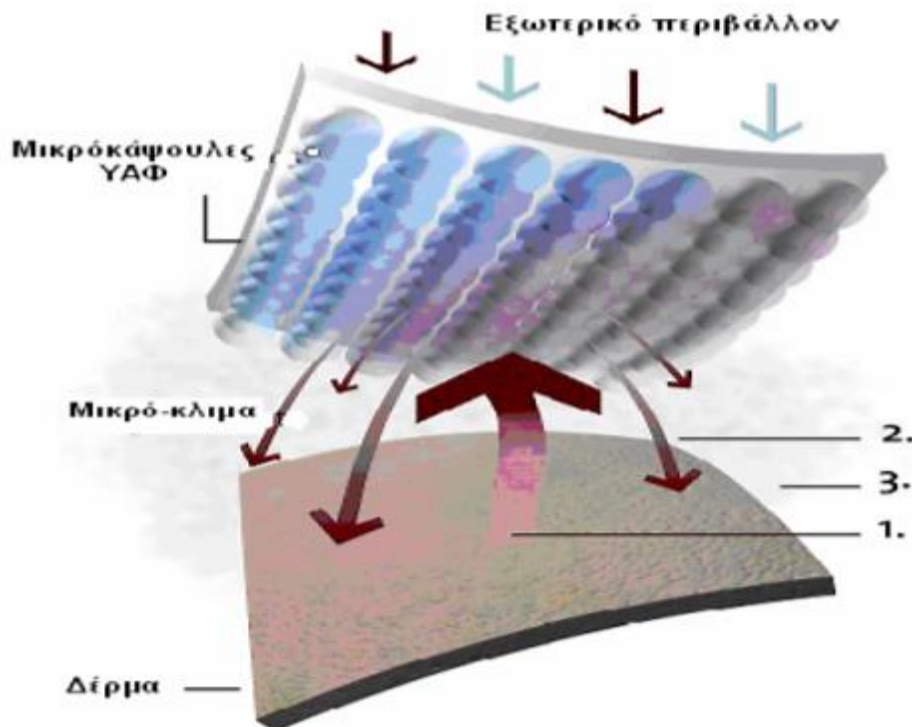
Τα PCM χρησιμοποιούνται επίσης σε ρούχα με στόχο τη θερμική άνεση και την ομοιόμορφη θερμοκρασία του σώματος. Τα πρώτα είδη ένδυσης στα οποία χρησιμοποιήθηκαν αφορούσαν διαστημικές εφαρμογές, καθώς χρησιμοποιούνταν στις στολές των αστροναυτών. Πλέον έχουν βρει εφαρμογή και σε άλλες κατηγορίες ένδυσης, όπου υπάρχουν εξαιρετικά αντίξοες θερμοκρασίες, οι οποίες μπορεί να αφορούν είτε υπερβολική ζέση είτε υπερβολικό κρύο. Έτσι βρίσκουν εφαρμογή σε στολές πυροσβεστών, σε ορειβατικά ρούχα, καθώς και σε αγωνιστικές στολές. Πέρα από τις ειδικές αυτές κατηγορίες, σιγά σιγά επεκτείνονται και σε καθημερινά ρούχα, όπως κουβέρτες, κάλτσες, γάντια κ.λπ. αλλά και σε άλλες κατηγορίες όπως καλύμματα καθισμάτων αυτοκινήτων, κράνη και διάφορα άλλα.



Εικόνα 3.13: Ρούχα με PCM

Τα PCM που χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις αυτές είναι οργανικά σε μορφή μικροκάψουλας, ώστε κατά την τήξη τους να μην υπάρχουν διαρροές. Με τον τρόπο αυτό, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας ελαττώνεται και η θερμοχωρητικότητα του ρούχου μπορεί δεκαπλασιαστεί. Τα PCM αποτελούν συνήθως το 20-35% του συνολικού βάρους του ενδύματος. Η θερμοκρασία τήξης των PCM που χρησιμοποιούνται βρίσκεται μεταξύ 28 - 30°C.

Στην **Εικόνα 3.14** παρουσιάζεται η λειτουργία του PCM σε εφαρμογές ένδυσης. Στο στάδιο 1 το PCM απορροφά την περίσσεια θερμότητας από το δέρμα. Στο στάδιο 2 η θερμότητα που έχει αποθηκευτεί κατευθύνεται προς το δέρμα, όταν υπάρχει ανάγκη, έτσι ώστε το μικροκλίμα του δέρματος να παραμένει σταθερό (στάδιο 3).



Εικόνα 3.14: Αρχή λειτουργίας υφασμάτων ενισχυμένων με PCM

3.6 Ιατρικές εφαρμογές

[70,71,72,73]

Η χρήση των PCM σε ιατρικές εφαρμογές είναι εξαιρετικά σημαντική, καθώς επιτρέπει τη μεταφορά αίματος και οργάνων, καθώς και ειδικές θεραπείες.

Οι θερμοκρασίες στις οποίες πρέπει να μεταφέρονται τέτοια υλικά ποικίλλουν. Άλλα μεταφέρονται σε θερμοκρασίες μεταξύ 20 και 24°C, άλλα μεταξύ 2 και 6°C και άλλα μεταξύ -30 και -26°C. Τα κιβώτια που έχουν σχεδιαστεί, χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά από το νοσοκομείο στο όχημα μεταφοράς και από το όχημα μεταφοράς στον τελικό προορισμό. Το όχημα μεταφοράς κλιματίζεται στην κατάλληλη θερμοκρασία.



Εικόνα 3.15: Ειδικές θήκες με PCM για τη μεταφορά αίματος

Μια ακόμη ιατρική εφαρμογή των PCM είναι σε στρώμα για χειρουργικά τραπέζια. Ο λόγος για τον οποίο χρειάζονται στην περίπτωση αυτή είναι διότι κατά τη διάρκεια των πολύωρων εγχειρήσεων, η θερμοκρασία του σώματος μειώνεται σημαντικά. Το στρώμα μπορεί να θερμανθεί πριν από την εγχείριση μέσω ηλεκτρικών αντιστάσεων και να απελευθερώσει τη θερμοκρασία του σταδιακά κατά τη διάρκεια της εγχείρισης. Η θερμοκρασία τήξης των PCM που είναι κατάλληλα για τις περιπτώσεις αυτές είναι περίπου 37°C, όσο και η θερμοκρασία του ανθρώπινου σώματος.

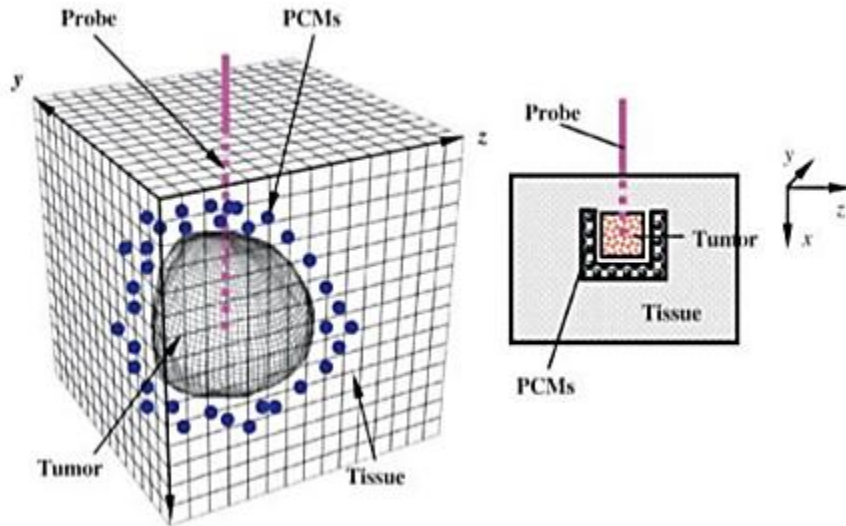
Τέλος, εξαιρετικά σημαντική είναι η εφαρμογή τους στην καρδιαγγειακή χειρουργική. Τα κατεστραμμένα αιμοφόρα αγγεία

μπορούν να επανασυνδένονται μέσω ενός θερμοευαίσθητου συνθετικού gel, αντί μέσω ραμμάτων. Όταν τα κύτταρα καταστρέφονται και φράζουν το αγγείο, μπορεί να δημιουργηθεί θρόμβος. Αρχικά προτάθηκε η χρήση πάγου από τον Gurtner για την αντιμετώπιση του κινδύνου αυτού, αλλά αυτό απαιτούσε την ψύξη του αγγείου, η οποία θα ήταν χρονοβόρα και δύσκολη. Για το λόγο αυτό στράφηκε στην αναζήτηση ενός βιοσυμβατού PCM. Με τη βοήθεια του Gerald Fuller, οδηγήθηκαν στην ανακάλυψη ενός θερμοαναστρέψιμου πολυμερούς, του Poloxamer 407, για το οποίο υπήρχε ήδη έγκριση για ιατρική χρήση από τον FDA.

Με τη συμβολή της επιστημονικής ομάδας του Stanford University Medical Center τροποποιήθηκαν οι ιδιότητες του υλικού αυτού, ώστε όταν θερμαίνεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από του ανθρώπινου σώματος να γίνεται στερεό και ελαστικό, ενώ όταν είναι στη θερμοκρασία του ανθρώπινου σώματος να διαλύεται στο κυκλοφορικό σύστημα.

Ένας ακόμη τομέας στον οποίο βρίσκουν εφαρμογή τα PCM είναι η κρυσταλλοχειρουργική, η οποία χρησιμοποιείται στη θεραπεία όγκων. Το πρόβλημα είναι όμως ότι η μέθοδος αυτή προκαλεί θερμική βλάβη στους υγιείς ιστούς γύρω από τον καρκινικό. Αυτό θα μπορούσε να αποφευχθεί μέσω της χρήσης PCM νανοσωματιδίων σε μορφή μικροκάψουλας.

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο ότι τα PCM με υψηλή θερμότητα αλλαγής φάσης και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα οδηγούνται στον υγιή ιστό, π.χ. μέσω αρτηριακής ή υποδερμικής ένεσης, καθώς και άμεσης έγχυσης. Όταν η θερμοκρασία του υγιούς ιστού γίνει ίση με τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης του PCM, επιβραδύνεται η μείωση της θερμοκρασίας του ιστού. Επιπλέον, επειδή η θερμική αγωγιμότητά τους είναι χαμηλή, η θερμότητα που έχει διοχετευτεί στον καρκινικό ιστό, δεν μεταφέρεται στον υγιή. Ταυτόχρονα, η ενσωμάτωση των PCM στον υγιή ιστό, προλαμβάνει και επιβραδύνει τη μετάσταση όγκων.



Εικόνα 3.16: Χρήση νανοσωματιδίων PCM σε βιολογικό ιστό γύρω από καρκινικό όγκο κατά τη διάρκεια της κρυοχειρουργικής

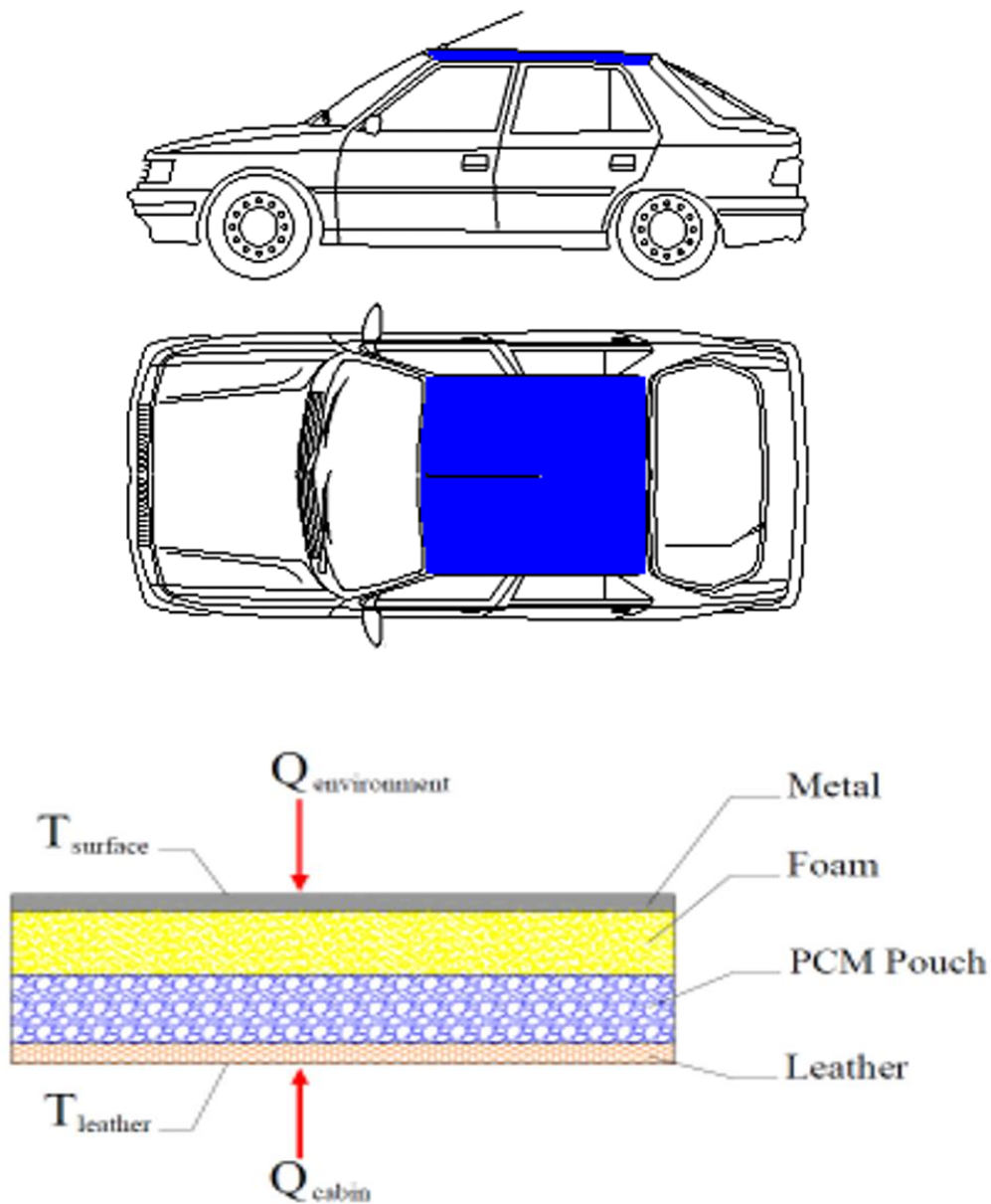
3.7 PCM στην αυτοκινητοβιομηχανία

[74,75,76]

Τις ηλιόλουστες μέρες ειδικά το καλοκαίρι, οι προσπίπτουσες ακτίνες του ηλίου πάνω στα σταθμευμένα ή ακόμα και κινούμενα οχήματα, προκαλούν στους οδηγούς και επιβάτες ένα έντονο αίσθημα θερμικής δυσφορίας, ιδιαίτερα κατά την είσοδό τους σε αυτά. Ως εκ τούτου, απαιτείται ένα τεράστιο ποσό ενέργειας ψύξης από το σύστημα κλιματισμού προκειμένου να φτάσει η θερμοκρασία σε επίπεδα θερμικής άνεσης. Αρκετές αν και ακραίες είναι οι περιπτώσεις θανάτων μικρών παιδιών ή ζώων (σκύλων), που είχαν μείνει εντός σταθμευμένων αυτοκινήτων σε ώρες και μέρες έντονης ηλιοφάνειας. Για τη διατήρηση συνθηκών άνεσης στο εσωτερικό του αυτοκινήτου κατά τη διάρκεια οδήγησης, οι αυτοκινητοβιομηχανίες εξοπλίζουν τα μοντέλα τους με συστήματα κλιματισμού, γεγονός όμως που οδηγεί σε κατανάλωση περισσότερων καυσίμων και συνεπώς σε μεγαλύτερο κόστος και αυξημένους ρύπους προς την ατμόσφαιρα. Από την άλλη πλευρά, κατά τους χειμερινούς μήνες, απαιτείται η πάροδος μερικών λεπτών μετά την ενεργοποίηση του συστήματος θέρμανσης, ώστε να επιτευχθεί κατάσταση θερμικής άνεσης. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, ορισμένα

μοντέλα αυτοκινήτων διαθέτουν επιπλέον συστήματα θέρμανσης εγκατεστημένα στα καθίσματά τους, με την απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία αυτών να παρέχεται από την μπαταρία του αυτοκινήτου. Προκειμένου να αποφευχθεί η περαιτέρω ζήτηση για αυξημένη χωρητικότητα της μπαταρίας και να παραταθεί η διάρκεια ζωής της είναι απαραίτητη η εξοικονόμηση ενέργειας.

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας μέσω των υλικών αλλαγής φάσης είναι ιδιαίτερα ελπιδοφόρα, καθώς πρόκειται για μέσα μηδενικής χρήσης ενέργειας που δύνανται να μειώσουν το προφίλ θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στην καμπίνα του αυτοκινήτου, τόσο κατά τους θερινούς όσο και κατά τους χειμερινούς μήνες. Οι Jamekhorshid και Sadrameli εισήγαγαν ένα καινοτόμο σχεδιασμό για το θερμοκρασιακό έλεγχο στο θάλαμο ενός σταθμευμένου ή κινούμενου αυτοκινήτου υπό συνθήκες ηλιοφάνειας. Στην οροφή του αυτοκινήτου τοποθετήθηκε ένα πολύ λεπτό στρώμα από PCM σε συσκευασία σακούλας. Όταν η εσωτερική θερμοκρασία του αυτοκινήτου είναι μεγαλύτερη από το σημείο τήξης του PCM, θερμότητα μεταφέρεται στο υλικό αλλαγής φάσης τήκοντάς το και μειώνοντας έτσι τη θερμοκρασία του οχήματος. Όταν η θερμοκρασία του αυτοκινήτου είναι χαμηλότερη του σημείου τήξης του PCM, απελευθερώνεται θερμική ενέργεια και το υλικό αλλαγής φάσης στερεοποιείται. Στο σύστημα θερμοκρασιακής ρύθμισης με PCM, ανάμεσα στη σακούλα PCM και στο μεταλλικό σώμα του αυτοκινήτου υπάρχει ένα στρώμα αφρού, το οποίο εξαλείφει την ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον, ενώ το δερμάτινο στρώμα είναι για την ικανοποίηση των κριτηρίων εσωτερικού σχεδιασμού. Η απαιτούμενη ποσότητα υλικού αλλαγής φάσης υπολογίστηκε και προέκυψε περίπου 755g, ενώ ως PCM χρησιμοποιήθηκε ένας τύπος παραφίνης (nNonadecane). Το σύστημα αυτό είναι απλό και έχει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί ως πρακτική λύση για την αντιμετώπιση ανεπιθύμητης θέρμανσης της καμπίνας του οχήματος. Παρακάτω φαίνεται σχηματικά η διαμόρφωση του στρώματος PCM στην οροφή ενός αυτοκινήτου.

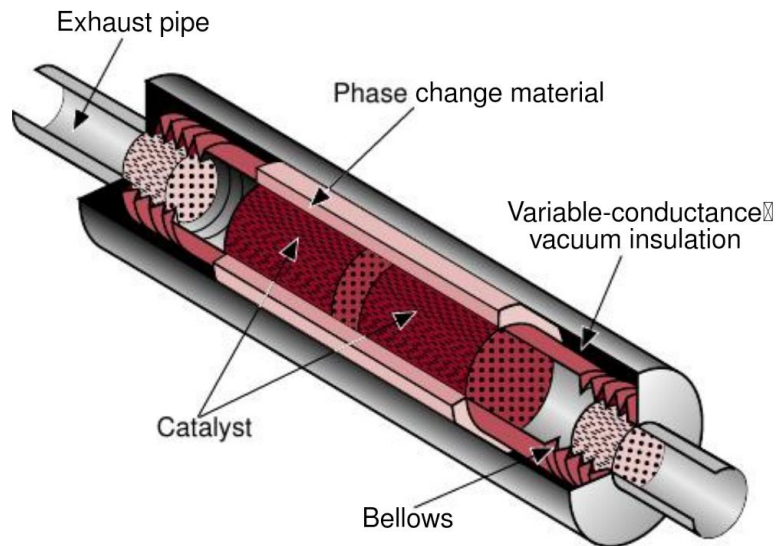


Εικόνα 3.17: Διαμόρφωση στρώματος PCM στην οροφή του αυτοκινήτου

Πέρα από την εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης στα υφάσματα καθισμάτων των οχημάτων, που αναφέρθηκε στην ενότητα εφαρμογής των PCM σε υφάσματα, και που στοχεύει στην εξασφάλιση θερμικής άνεσης οδηγού και επιβατών, τα PCM μπορούν να εφαρμοστούν σε μπαταρίες, αλλά και να τοποθετηθούν στο σύστημα εξαγωγής των καυσαερίων (εξάτμιση). Στην πρώτη περίπτωση, το PCM συνδέεται με το ψυγείο του αυτοκινήτου και

αποθηκεύει την περίσσεια θερμότητας, όταν ο κινητήρας λειτουργεί στα θερμοκρασιακά όρια σχεδίασης. Η θερμότητα αυτή είναι διαθέσιμη στην επόμενη εκκίνηση του οχήματος με κρύο κινητήρα, με σκοπό τη γρηγορότερη θέρμανση αυτού και κατ' επέκταση την καλύτερη κατανάλωση καυσίμου. Παράλληλα, επιτυγχάνεται και θέρμανση της καμπίνας του αυτοκινήτου. Μία τέτοια μπαταρία λανθάνουσας θερμότητας παρέχεται στα οχήματα της BMW της σειράς 5, από την εταιρεία Bridgeway Ltd. Μάλιστα, χάρη στην εξαιρετική μόνωση της μπαταρίας, η αποθηκευμένη θερμότητα στο υλικό αλλαγής φάσης μπορεί να διατηρηθεί έως και δύο εικοσιτετράωρα για μία εξωτερική θερμοκρασία -20°C .

Κατά την εφαρμογή των PCM στο σύστημα εξαγωγής καυσαερίων, τα υλικά αλλαγής φάσης τοποθετούνται στον καταλυτικό μετατροπέα, ο οποίος αναλαμβάνει τη μείωση των εκπομπών υδρογονανθράκων και άλλων ρύπων. Για τη λειτουργία του καταλύτη προϋποτίθεται μία θερμοκρασία περίπου 300°C , η οποία επιτυγχάνεται μετά την πάροδο μερικών λεπτών από την εκκίνηση του αυτοκινήτου. Αυτό σημαίνει πως κατά την εκκίνηση του οχήματος, όπου ο κινητήρας είναι ακόμα κρύος, ο καταλύτης δεν μπορεί να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός, κάτι που αποδεικνύεται και από έρευνες, που θέλουν το 60-80% των τοξικών αερίων να εκλύονται κατά την κρύα εκκίνηση. Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα έρχονται να δώσουν τα PCM, τα οποία αποθηκεύουν θερμότητα κατά την εκκίνηση και την απελευθερώνουν στην επόμενη εκκίνηση του οχήματος, διατηρώντας τη θερμοκρασία του καταλύτη σε υψηλά επίπεδα. Οι ερευνητές της NREL σχεδίασαν έναν καταλυτικό μετατροπέα με PCM, ο οποίος παραμένει αρκετά ζεστός και ως εκ τούτου λειτουργεί αποτελεσματικά, μειώνοντας κατά 84% τις εκπομπές υδρογονανθράκων και κατά 91% τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα.



Εικόνα 3.18: Καταλυτικός μετατροπέας με PCM

Τα υλικά αλλαγής φάσης έχουν φανεί χρήσιμα ακόμα και σε αγώνες της Formula1. Το Grand Prix στη Μαλαισία δικαίως χαρακτηρίζεται ως ένας από τους πιο απαιτητικούς αγώνες της Formula1, καθώς μεταξύ άλλων οι οδηγοί έχουν να αντιμετωπίσουν την τροπική ζέστη και υγρασία που επικρατούν. Όπως είναι αναμενόμενο, αυτές οι συνθήκες επιδρούν όχι μόνο στις ανάγκες ψύξης των κινητήρων των μονοθεσίων, αλλά και στην κατάσταση των οδηγών. Σήμερα, δίνεται μεγάλη προσοχή στην κατάσταση των οδηγών (ψύξη και ενυδάτωσή τους), αφού ο περιορισμένος χώρος της καμπίνας και η αγωνιστική στολή τους προκαλούν θερμική δυσφορία και υπερβολική εφίδρωση (έχει υπολογιστεί ότι χάνουν περίπου 3 κιλά υγρά σώματος), γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αφυδάτωση, εάν δεν υπάρξει κατάλληλη μέριμνα. Η εταιρεία PCM Products μετά από έναν αγώνα Grand Prix στη Μαλαισία ανέλαβε να σχεδιάσει ένα προϊόν με στόχο τη βελτίωση της άνεσης του οδηγού καθ' όλη τη διάρκεια του αγώνα. Το πρόβλημα είχε προκύψει εξαιτίας των υπερβολικά υψηλών θερμοκρασιών, που είχαν ως αποτέλεσμα τη θέρμανση της φιάλης ενυδάτωσης των οδηγών, καθιστώντας το περιεχόμενο αυτής πρακτικά άχρηστο. Έτσι, πριν το επόμενο Grand Prix, το μονοθέσιο εξοπλίστηκε με φιάλες νερού εγκιβωτισμένες σε PCM, εξασφαλίζοντας τη σωστή ενυδάτωση του οδηγού. Τα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν επίσης να εφαρμοστούν και για τη μόνωση της δεξαμενής καυσίμου του μονοθεσίου, ώστε η ποσότητα του καυσίμου

να καθορίζεται ανεξαρτήτως των περιβαλλοντικών συνθηκών (διαχείριση καυσίμων).



Εικόνα 3.19: Μονοθέσιο Formula 1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Περιπτώσεις-Παραδείγματα

4.1 Παραδείγματα πάνελ οροφής

[77,78]

Τα πάνελ οροφής αποτελούν ιδέα των Markus Koschenz και Beat Lehmann (2004). Όπως έχει αναφερθεί, το PCM δέχεται θερμικά φορτία κατά τη διάρκεια της ημέρας, τα οποία οδηγούν στην τήξη του, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας χρησιμοποιείται ένα ολοκληρωμένο σύστημα σωληνώσεων νερού με σκοπό να το ψύξουν. Σύμφωνα με το σύστημα αυτό, το PCM στα πάνελ οροφής τήκεται κατά τη διάρκεια της ημέρας μετά από έκθεσή του σε θερμικά φορτία, ενώ ψύχεται κατά τη διάρκεια της νύχτας με τη βοήθεια ενός ολοκληρωμένου συστήματος σωληνών νερού. Η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται προσωρινά στο PCM, μειώνοντας το εύρος της θερμοκρασιακής διακύμανσης του κτηρίου, και επιπλέον η απόρριψη θερμότητας είναι ετεροχρονισμένη σε σχέση με το θερμικό κέρδος. Στις κτηριακές εφαρμογές, τα PCM μπορούν να ενσωματωθούν σε δομικά υλικά όπως το σκυρόδεμα, τα στοιχεία ξηράς δόμησης, το ξύλο κ.ά. προκειμένου να ενισχύσουν τη θερμική συμπεριφορά των κατασκευών. Μπορούν επίσης να ενσωματωθούν σε κυκλώματα νερού και αέρα σε ειδικά συστήματα θέρμανσης.



Εικόνα 4.1: Έκχυση τοιμέντου με προσμίξεις PCM στην οροφή του κτηρίου WILO, στην Ολλανδία

Στην Εικόνα 4.1 φαίνεται η τοποθέτηση σωλήνων θέρμανσης, οι οποίοι ενσωματώνονται στον τσιμέντο της κατασκευής, με σκοπό η κυκλοφορία του νερού μέσα σε αυτούς να απορροφά σημαντικό ποσοστό της αποθηκευμένης θερμότητας.

4.2 Οροφές για ενεργητική θέρμανση και ψύξη

[80]

Η οροφή με ενσωματωμένα PCM μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για θέρμανση όσο και για δροσισμό των κτηρίων. Μερικές από τις μελέτες διαφόρων επιστημόνων που αξίζει να αναφερθούν, παρατίθενται στη συνέχεια.

Ένα σύστημα δροσισμού με PCM αναπτύχθηκε από τον Bruno (2002). Η ενέργεια αποθηκευόταν κατά τις ώρες που η ζήτηση ήταν χαμηλή ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τις ώρες αιχμής. Η θερμοκρασία τήξης του χρησιμοποιούμενου PCM βρίσκεται στο εύρος 20-30°C, το οποίο είναι το εύρος θερμοκρασιών θερμικής άνεσης ενός δωματίου.

Ο Benard (1981) μελέτησε την ικανότητα μιας ηλιακής στέγης λανθάνουσας θερμότητας να διατηρεί ισοθερμικές συνθήκες σε ένα πειραματικό εκκολαπτήριο πτηνών. Η πειραματική αυτή διάταξη βρισκόταν στο Περού. Το εκκολαπτήριο αποτελούνταν από δύο ξεχωριστά, αλλά συνδεδεμένα μεταξύ τους τμήματα, μια αυλή και μια θερμαινόμενη περίφραξη.

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ως PCM είναι η παραφίνη σε ποσότητα 42 kg. Βρισκόταν τοποθετημένη μέσα σε δυο ημικυκλικές δεξαμενές, οι επιφάνειες των οποίων ήταν καλυμμένες με γυαλί και βρισκόνταν κάτω από αεροστεγή, γυάλινη σκεπή. Για να παραμείνει η θερμοκρασία της περίφραξης στο εύρος 22°C -30°C κατά τη διάρκεια της νύχτας, μεταξύ των δεξαμενών και της γυάλινης οροφής τοποθετούνταν μονωτές πολυουρεθάνης μεγάλου πάχους. Στην Εικόνα 4.2 παρουσιάζεται μια πραγματική εικόνα εγκατάστασης.



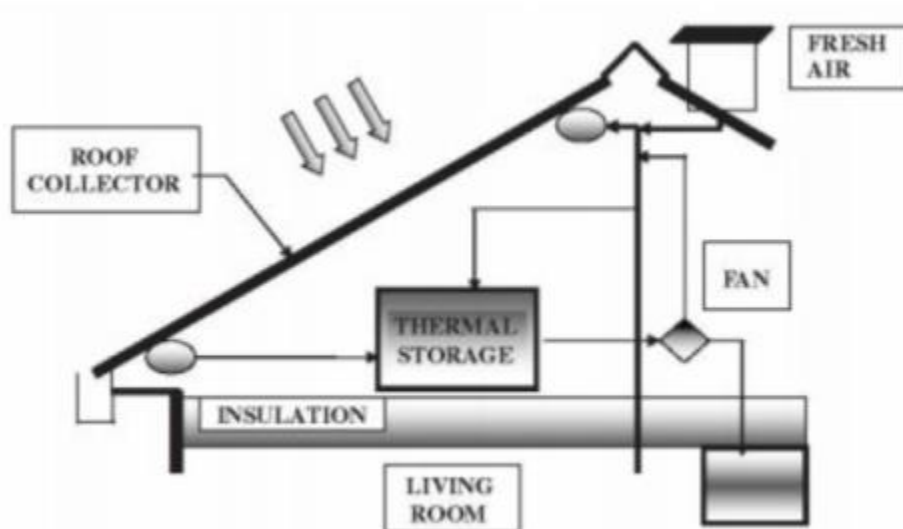
Εικόνα 4.2: Πειραματική εγκατάσταση του ερευνητή Benard. Αριστερά φαίνεται η αυλή και δεξιά η θερμαινόμενη από τον ήλιο περίφραξη

4.3 Ηλιακή θέρμανση με PCM

[80]

Στο συγκεκριμένο τμήμα εφαρμογών, αρκετά πανεπιστήμια πραγματοποίησαν πειράματα και μελέτες στην τοποθέτηση ζωνών υλικών αλλαγής φάσης στις στέγες κτηρίων.

Ένα τέτοιο σύστημα ηλιακής θέρμανσης, δημιουργήθηκε στο πανεπιστήμιο της Νότιας Αυστραλίας (UniSA), και αφορούσε τη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας από μια μεταλλική οροφή με σκοπό τη θέρμανση αέρα. Στη συνέχεια, ο θερμός αέρας διοχετεύεται στο εσωτερικό του κτηρίου ή σε μια δεξαμενή με PCM, ώστε να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί όταν υπάρχει ανάγκη. Για να επιτευχθεί θερμική χωρητικότητα ίση με τα εσωτερικά φορτία, μελετήθηκε η κατασκευή μιας θερμικά ενεργής ψευδοροφής στο εσωτερικό του κτηρίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3.



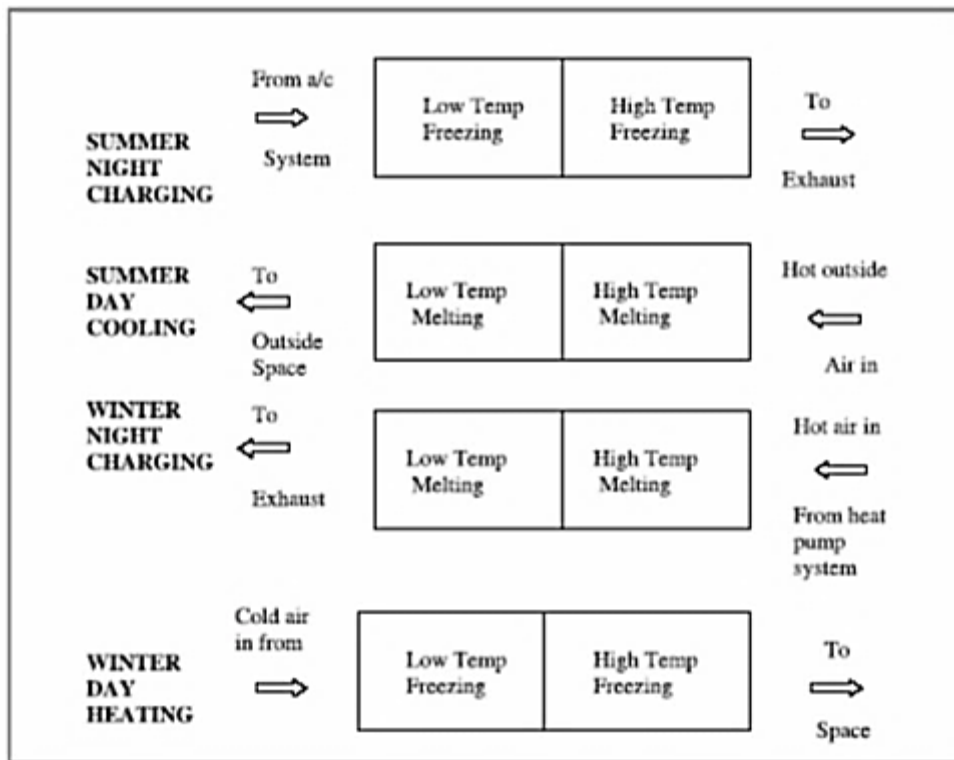
Εικόνα 4.3: Ηλιακό σύστημα θέρμανσης με PCM ενσωματωμένο σε οροφή

4.4 Συνδυασμένο σύστημα θέρμανσης - ψύξης με PCM

[77,78]

Το κέντρο βιώσιμης ενέργειας στη UniSA, ασχολήθηκε τη δεκαετία του 1990 με την ανάπτυξη μιας μονάδας αποθήκευσης με χρήση PCM, η οποία μπορεί να εφαρμοσθεί τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη του χώρου. Χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά PCM ενσωματωμένα σε ένα σύστημα αντιστρεπτού κύκλου. Η μονάδα φορτίζεται κατά τη διάρκεια της νύχτας και η ενέργεια χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια, η οποία όμως δεν έχει παραχθεί τις ώρες αιχμής. Καθώς ο αέρας ωθείται στο σύστημα, υπόκειται σε διαδικασία θέρμανσης ή ψύξης δύο βημάτων.

Περνά διαδοχικά από το πρώτο και το δεύτερο PCM, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.4. Το πρώτο υλικό έχει σημείο τήξης κάτω από τη θερμοκρασία θερμικής άνεσης, της άνεσης, ενώ το δεύτερο έχει σημείο τήξης - στερεοποίησης πάνω από αυτή την θερμοκρασία.



Εικόνα 4.4: Φόρτιση κατά της διάρκεια της νύχτας και χρήση κατά τη διάρκεια της μέρας

Η ροή του αέρα εξαρτάται από την εποχή του έτους. Το χειμώνα, το σύστημα αποθηκεύει τη νύχτα θερμότητα, η οποία αποθηκεύει θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας, σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από τις συνθήκες άνεσης. Το καλοκαίρι, η κατεύθυνση της ροής του αέρα είναι αντίστροφη. Κατά τη διάρκεια της νύχτας το σύστημα αποθηκεύει ψυχρή ενέργεια με στόχο να αποδώσει τον ψυχρό αέρα κάτω από την θερμοκρασία άνεσης την ημέρα.

Μέσω ενός υπολογιστικού μοντέλου για το σύστημα αποθήκευσης προσδιορίστηκε το ποσοστό μείωσης της απαιτούμενης ικανότητας του κλιματιστικού και οι ποσότητες των θερμών και ψυχρών φορτίων που μεταφέρονται στις περιόδους χαμηλής ζήτησης. Υπολογίστηκε επίσης και το ετήσιο κέρδος που προέκυπτε μέσω της εξοικονόμησης ενέργειας. Με το σύστημα αυτό μειώνεται η απαιτούμενη ισχύς ενός κλιματιστικού, και συνεπώς και το αρχικό κόστος του. Είναι επίσης εφικτή η μετατόπιση μέρους των φορτίων θέρμανσης και ψύξης σε ώρες χαμηλής ζήτησης, όπου η ηλεκτρική ενέργεια είναι πιο φθηνή.

Σύμφωνα με μελέτη του συστήματος αυτού για ένα τυπικό σπίτι στην Αδελαΐδα, στο οποίο το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας

αποτελείται από 100 kg PCM θερμοκρασίας 29°C και από 80 kg PCM θερμοκρασίας 18°C, το ποσοστό του απαιτούμενου φορτίου μειώθηκε στο 50% του συνολικού φορτίου. Επιπλέον, καθώς η ζήτηση φορτίου μετατοπίστηκε σε ώρες χαμηλής ζήτησης, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας μειώθηκε 32%.

Αντίστοιχα συστήματα έχουν εφαρμοσθεί και σε δύο ακόμη περιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα στην Εικόνα 4.5 παρουσιάζεται ένας φουτουριστικός εκθεσιακός χώρος με το όνομα "Floating Pavilion" που βρίσκεται στην Ολλανδία στην περιοχή του Rijnhaven και φέρει συνδυασμένο σύστημα ψύξης - θέρμανσης με χρήση PCM. Στην Εικόνα 4.6 φαίνονται τα γραφεία της επιτροπής Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην Ολλανδία, το οποίο φέρει σύστημα κλιματισμού με ενσωματωμένα PCM.



Εικόνα 4.5: Το Floating pavilion με σύστημα κλιματισμού με ενσωματωμένα PCM στο Rotterdam



Εικόνα 4.6: Κτήριο γραφείων επιτροπής Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην Ολλανδία, το οποίο φέρει σύστημα κλιματισμού με ενσωματωμένα PCM

4.5 Πειραματικές οικίες με PCM

[81,82]

Στην Καταλωνία και πιο ειδικά στην περιοχή Lleida διεξήχθη ένα πείραμα ενσωμάτωσης των PCM σε κτήρια με τη βοήθεια του λογισμικού TRNSYS. Η συγκεκριμένη μελέτη περιελάμβανε ωριαία δεδομένα θερμοκρασιών υγρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας για το μέσο χρόνο κατά τη διάρκεια των μηνών Ιουνίου, Ιουλίου και Αυγούστου.

Έτσι στο χώρο του πανεπιστημίου κατασκευάστηκαν πειραματικές κατοικίες (Εικόνα 4.7) από οπλισμένο σκυρόδεμα που περιείχε 5% υλικό PCM (Micronal). Οι μετρήσεις έδειξαν ότι η προσθήκη του PCM στη δομή του κτηρίου μπορεί να μειώσει τη μέγιστη θερμοκρασία στο εσωτερικό του, βελτιώνοντας παράλληλα τη θερμική του αδράνεια [Ibanez M. et al.]. Ωστόσο προκειμένου να χρησιμοποιηθεί με

βέλτιστο τρόπο το PCM απαιτείται η προσθήκη ενός “trombe wall” (τοιχος μάζας θερμοσιφωνικής ροής) κατά τη διάρκεια του χειμώνα καθώς και προσεκτικός σχεδιασμός του αερισμού των κατοικιών. Εξάλλου, ο εν λόγω σχεδιασμός είναι εξαιρετικά σημαντικός ειδικά κατά τους μήνες του Ιουλίου και του Αυγούστου.



Εικόνα 4.7: Πειραματικές κατοικίες στο πανεπιστήμιο της Lleida, από οπλισμένο σκυρόδεμα με προσθήκη 5% PCM

Η ανάπτυξη ενός νέου τοίχου που περιέχει PCM και Vacuum Isolation Panel (VIP) έγινε στο Επιστημονικό κέντρο Τεχνολογίας Δόμησης (CSTB) της Γαλλίας. Και σε αυτό το πείραμα διεξήχθησαν προσομοιώσεις με το λογισμικό TRNSYS, ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά ενός μικρού οικήματος στο ποίο είχε προστεθεί ένας τέτοιος τοίχος. Στη συνέχεια για την επαλήθευση των θεωρητικών μοντέλων έγιναν πειράματα που έδειξαν σημαντική βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς της εν λόγω κατοικίας .

Μια ακόμη πρωτοποριακή έρευνα διεξήχθη από το πανεπιστήμιο της Zaragoza στην Ισπανία από τον καθηγητή Zalba, με αντικείμενο την ελεύθερη ψύξη (free cooling). Έτσι σκοπός του ήταν ο σχεδιασμός αι η κατασκευή μιας πειραματικής εγκατάστασης για τη μελέτη υλικών αλλαγής φάσης με θερμοκρασίες τήξεως μεταξύ 20 και 25°C.

Μια εναλλακτική μελέτη έγινε στο πανεπιστήμιο του Nottingham και αφορούσε την αντικατάσταση ενός ολοκληρωμένου συστήματος κλιματισμού από ένα νέο σύστημα νυκτερινής ψύξης. Το κέντρο διατήρησης ενέργειας (SEC) στο πανεπιστήμιο της νοτίου Αυστραλίας ξεκίνησε μια σχετική μελέτη με PCM στα μέσα της δεκαετίας του '90 με την ανάπτυξη μιας μονάδας αποθήκευσης η οποία θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση και για ψύξη του συγκεκριμένου χώρου.

Μια νέα ιδέα αναπτύχθηκε από τους επιστήμονες Koschenz και Lehmann με σκοπό να επιτευχθεί χωρητικότητα θερμικής αποθήκευσης περίπου ίση με το θερμικό κέρδος εντός του χώρου κατά τη διάρκεια ενός ημερήσιου κύκλου, ώστε τελικά να ενσωματωθεί το σύστημα σε ένα «ελαφρύ» κτήριο. Ο Velraj et al., παρουσίασαν μια λεπτομερή έρευνα για την ενεργειακή αποθήκευση ψύξης βασισμένη στα PCM σε συνδυασμό με ένα σύστημα κλιματισμού σε κτήριο στο Tidel Park, στο Chennai της Ινδίας. Το ιδιαίτερο σημείο του συγκεκριμένου ενεργειακού συστήματος είναι ότι η δεξαμενή αποθήκευσης σε διαφορετικό μέρος από το κτήριο.

4.6 Ηλιακές κατοικίες με PCM (FlatICE-Solar House)

[84]

Η συγκεκριμένη περίπτωση αφορά την κατασκευή ηλιακών σπιτιών ως μέρος του διαγωνισμού για το ηλιακό δέκαθλο των ΗΠΑ. Οι κυριότερες απαιτήσεις του διαγωνισμού ήταν η ελάχιστη ή μηδαμινή χρήση εξωτερικής ενέργειας για τη λειτουργία των οικιακών συσκευών και η χρήση της αποθήκευσης ενέργειας. Η ενέργεια θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση του χώρου, ζεστού νερού χρήσης, ψύξης για τις απαιτήσεις δροσισμού κατά τη διάρκεια της μέρας ή θέρμανσης τις νυκτερινές ώρες. Η κεντρική ιδέα λοιπόν ήταν η δραματική μείωση έως και εξάλειψη χρήσης οποιασδήποτε μορφής εξωτερικής ενέργειας.

Μια τέτοια εγκατάσταση παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.8 και σχεδιάστηκε στο πλαίσιο του διαγωνισμού του ηλιακού δέκαθλου.



Εικόνα 4.8: Το σύστημα που σχεδιάστηκε για το ηλιακό δέκαθλο στις ΗΠΑ

Αρχή λειτουργίας του συστήματος

Η παραγωγή του ζεστού νερού γίνεται με τη βοήθεια ηλιακών σωληνοειδών συλλέκτες εκκένωσης, το οποίο με τη σειρά του αποθηκεύεται σε μια δεξαμενή. Η λειτουργία της δεξαμενής είναι διπλή, για αποθήκευση του ζεστού νερού χρήσης και για την παροχή θέρμανσης. Έτσι μέσω ενός θερμικού εναλλάκτη η θερμότητα του ζεστού νερού μεταφέρεται σε ένα θερμικό κουτί με PCM. Μόλις η δεξαμενή φθάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία, οποιαδήποτε άλλη περίσσεια θερμότητα αποθηκεύεται στο PCM για μελλοντική χρήση. Έτσι κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε μια μέρα με αρκετή συννεφιά, το σύστημα απορροφά θερμότητα από το PCM και τη χρησιμοποιεί για την κάλυψη των θερμικών αναγκών του σπιτιού με τη βοήθεια θερμαντικών πάνελ οροφής δια ακτινοβολίας (Radiant Heating Ceiling panels).

Ένα ενδιαφέρον στοιχείο από την συγκεκριμένη πειραματική εγκατάσταση ήταν ότι αν και κατά τη διάρκεια του διαγωνισμού το ηλιοφάνεια ήταν ιδιαίτερος χαμηλή για 8 ημέρες, ακόμη και υπό αυτές τις συνθήκες το σύστημα ήταν σε θέση να θερμάνει το σπίτι με

τη βοήθεια των PCM. Τα ημερήσια θερμοκρασιακά εύρη ήταν $25,6^{\circ}\text{C}$ κατά τη διάρκεια της ημέρας και μέχρι $12,2^{\circ}\text{C}$ κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Έτσι με τη βοήθεια ενός αυτοσχέδιου εναλλάκτη θερμότητας στο εσωτερικό των κουτών γίνεται μεταφορά της θερμότητας στα PCM.



Εικόνα 4.9: Το σύστημα σωληνώσεων του ηλιακού σπιτιού για την κυκλοφορία του ζεστού νερού χρήσης

Στη συνέχεια υπάρχει μια διάταξη χάλκινων αγωγών, η οποία χρησιμοποιεί πλάκες μεγάλου πάχους από αλουμίνιο για τη μεταφορά και αποθήκευση θερμότητας στα PCM, ώστε να την απορροφήσει με τη σειρά τους όποτε υπάρχει ανάγκη (Εικόνα 4.9). Το σύστημα έχει και αγωγούς επιστροφής για τη διασφάλιση της

ροής εντός και εκτός των πλακών μεταφοράς θερμότητας. Τα κουτιά μεταφοράς θερμότητας φέρουν ισχυρή μόνωση καθώς και φράγματα ακτινοβολίας ώστε να εγκλωβίζει τη θερμότητα και να την διοχετεύει αποδοτικά στις ειδικές πλάκες. Το σύστημα αντλιών του ηλιακού σπιτιού είναι διζωνικό μεταβλητής ταχύτητας.

Πρόκειται για ένα σύνθετο σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται για τη θέρμανση και ψύξη των χώρων δια ακτινοβολίας (radiant heating and radiant cooling).

Από την άλλη, η ψύξη δια ακτινοβολίας απαιτεί θερμοκρασία νερού μόλις 15,6°C, όπου το εν λόγω σύστημα βασίζεται σε δυο ανεμιστήρες υψηλής απόδοσης στο κουτί ψύξης και θερμικά μονωμένους διανεμητές στα δυο άκρα. Έτσι όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι κάτω από 15,6°C, η θερμότητα αυτή αποθηκεύεται με τη βοήθεια ανεμιστήρων μεταβλητής ταχύτητας στα PCM για μελλοντική χρήση όταν υπάρχει απαίτηση για δροσισμό.

Σε γενικές γραμμές το σύστημα απέδωσε αρκετά ικανοποιητικά και παρείχε ιδανικές συνθήκες για τη θερμική άνεση των κατοίκων του ηλιακού σπιτιού,, σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές.

4.7 Σύστημα αποθήκευσης ψύξης με ενθυλάκωση PCM

[85]

Το σύστημα με ενθυλάκωση (encapsulation) PCM, χρησιμοποιεί ένα μέσο αποθήκευσης ψύξης το οποίο είναι ενσωματωμένο στο εσωτερικό μικρών σφαιρών, οι οποίες με τη σειρά τους τοποθετούνται σε δοχείο και ψύχονται ή θερμαίνονται με τη βοήθεια κάποιου εργαζόμενου ρευστού. Η επιλογή του υλικού αποθήκευσης θερμότητας γίνεται με βάση τις θερμοκρασιακές απαιτήσεις της εφαρμογής στην οποία θα χρησιμοποιηθεί, αφού θα πρέπει να διαθέτει την κατάλληλη θερμοκρασία τήξης. Από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά είναι το νερό.

Στην παρακάτω Εικόνα 4.10 παρουσιάζονται οι κτηριακές εγκαταστάσεις της νομαρχίας του Ibaraki. Πρόκειται για μια περιοχή

στα βόρεια του Τόκιο της Ιαπωνίας, όπου έγινε εφαρμογή του εν λόγω συστήματος.

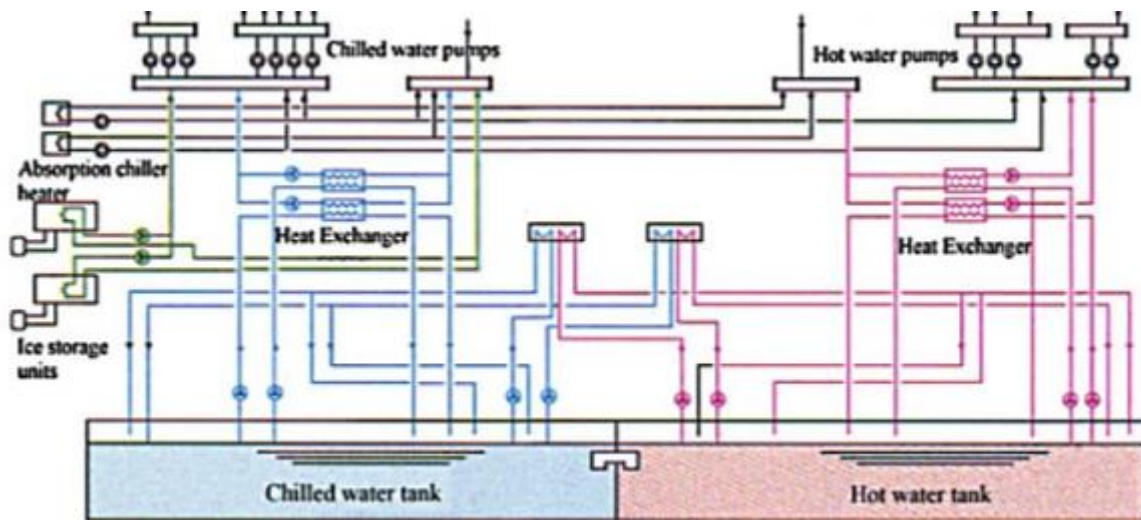


Εικόνα 4.10: Πραγματική εικόνα νομαρχιακών κτηρίων διοίκησης του Ibaraki, στην Ιαπωνία

Το συγκεκριμένο κτήριο φέρει εξοπλισμό όπως ηλιακοί συλλέκτες, αντλίες θερμότητας νερού, ενώ έχει σχεδιαστεί για τη δημιουργία επαρκούς φυσικού αερισμού. Η τροφοδοσία ενέργειας για τη θέρμανση και τον κλιματισμό του επιτυγχάνεται κατά 50% με ηλεκτρισμό και κατά 50% με φυσικό αέριο. Η μισή ποσότητα της παραγόμενης ψύξης με ηλεκτρισμό αποθηκεύεται σε δεξαμενή νερού (όγκου 2820m^3), ενώ η υπόλοιπη σε παγολεκάνη. Οι δυο δεξαμενές αποθήκευσης πολλές φορές συνεργάζονται για την επίτευξη της απαιτούμενης ψύξης. Ο συντελεστής συμπεριφοράς COP του ψύκτη είναι χαμηλότερος από τον αντίστοιχο ψύκτη της δεξαμενής νερού, λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας εξατμίσης του πρώτου.

Η παραπάνω εγκατάσταση παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 4.11. Παρόλο που η χρήση αποθηκευτικών δεξαμενών νερού είναι προτιμότερη, υπάρχουν δυο σημαντικά πλεονεκτήματα που καθιστούν τις παγολεκάνες αποθήκευσης ψύξης αρκετά συμφέρουσες. Πρώτον, το μέγεθος των δεξαμενών νερού είναι πολλές φορές δεσμευτικό, ιδίως σε κτήρια που δεν διαθέτουν τον απαραίτητο χώρο. Δεύτερον, τα εσωτερικά θερμικά κέρδη των κτηρίων, που προέρχονται από τη χρήση συσκευών, όπως τα φώτα και οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, ολοένα και αυξάνονται, κάνοντας το ψυκτικό φορτίο να ξεπερνά σε μεγάλο βαθμό το αντίστοιχο

θερμικό. Για το λόγο αυτό η αποθήκευση ψύξης μέσω πάγου είναι η καταλληλότερη μέθοδος αντιστάθμισης αυτής της διαφοράς.



Εικόνα 4.11: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος αποθήκευσης ψύξης στο νομαρχιακό κτήριο του Ibaraki

4.8 Θερμοκήπια με χρήση PCM

[86,87,88,89,90]

Η χρησιμότητα των ηλιακών θερμοκηπίων είναι η δημιουργία ενός προστατευμένο περιβάλλοντος για την καλλιέργεια λαχανικών και φρούτων, μιας και έτσι αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά οι απρόβλεπτες κλιματικές συνθήκες. Η μεταφορά θερμότητας λαμβάνει χώρα από το εξωτερικό μέρος προς το εσωτερικό του ηλιακού θερμοκηπίου. Έτσι οι απαιτήσεις θέρμανσης, ψύξης και αερισμού του θερμοκηπίου διαμορφώνονται με βάση το εξωτερικό περιβάλλον, ενώ οι συνθήκες στο εσωτερικό θα πρέπει να διατηρούνται σταθερές και ευνοϊκές για την ανάπτυξη των φυτικών καλλιεργειών και την αποφυγή πιθανής καταστροφής τους.

Η χρήση των PCM στα θερμοκήπια για τη διαδικασία θέρμανσης, έχει αποδειχθεί ότι εμφανίζει πολλά πλεονεκτήματα. Το μειονέκτημα του αρχικού υψηλού κόστους της εγκατάστασης των PCM στα θερμοκήπια, μπορεί να ξεπεραστεί με το χαμηλό κόστος λειτουργίας, τον οικολογικό τους χαρακτήρα και την ασφάλεια χρήσης τους. Ένα

ακόμη σημαντικό στοιχείο που καθιστά ιδανική τη χρήση των PCM για εφαρμογές θερμοκηπίων, είναι η υψηλή τους ενεργειακή πυκνότητα και παραγωγή τους σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών.

Έτσι στην Εικόνα 4.12 παρουσιάζονται δυο περιπτώσεις θερμοκηπίων στα οποία έχουν ενσωματωθεί PCM για την αποδοτικότερη κάλυψη των θερμικών απαιτήσεων των καλλιεργειών.



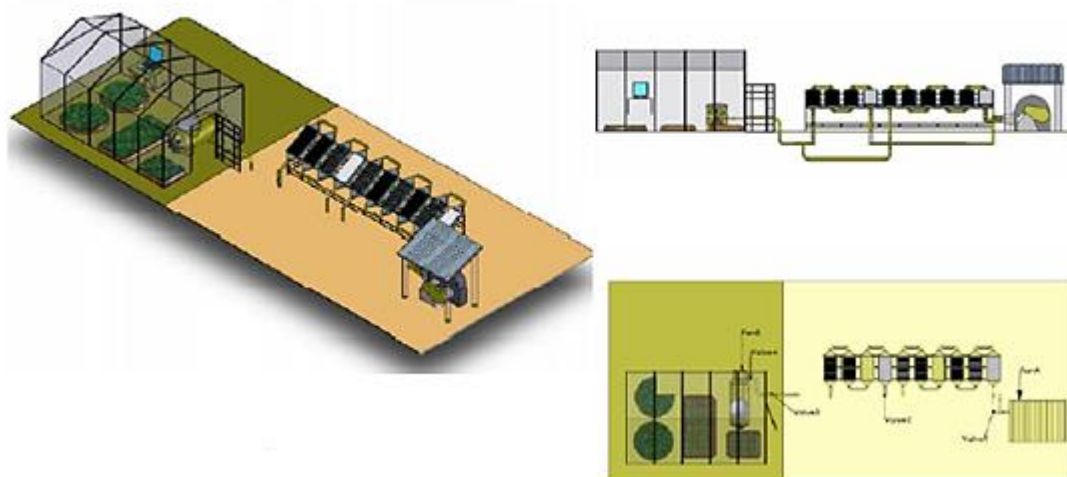
Εικόνα 4.12: Ηλιακά θερμοκήπια με PCM, (πάνω) καλλιέργεια καπνού, (κάτω) καλλιέργεια φυσιτικών

Οι πρωτοπόροι στις συγκεκριμένες εφαρμογές ήταν οι Huang και Toksoy, οι οποίοι χρησιμοποίησαν κυλινδρικές ράβδους του εμπορίου με προσθήκη υλικού αλλαγής φάσης, ως το κύριο μέσο αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας για ένα ηλιακό θερμοκήπιο. Τα πειράματα έγιναν σε ένα ηλιακό θερμοκήπιο καλλιέργειας τριαντάφυλλων στη Γαλλία. Η ηλιακή ενέργεια που προσέπιπτε στο εσωτερικό του

θερμοκηπίου, μεταφερόταν και αποθηκεύονταν, ανακυκλώνοντας τον αέρα μέσω ενός δικτύου υπογείων επιπέδων εναλλακτών θερμότητας, οι οποίοι ήταν πληρωμένοι με PCM. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε σύγκριση με ένα συμβατικό θερμοκήπιο χωρίς αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας,, το συγκεκριμένο ηλιακό θερμοκήπιο με PCM έδειξε 80% λιγότερες εκπομπές προπανίου σε σχέση με το συμβατικό.

Μια άλλη μελέτη από τους Benli και Durmus αφορούσε τη θερμική συμπεριφορά μιας μονάδας αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Το εν λόγω σύστημα απαρτίζεται από 10 ηλιακούς συλλέκτες και ο σκοπός του ήταν θέρμανση του θερμοκηπίου με ενσωματωμένο ως PCM το $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, το οποίο έχει θερμοκρασία τήξης 29°C .

Το πειραματικό σύστημα θέρμανσης του θερμοκηπίου των Benli και Durmus παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.13.



Εικόνα 4.13: Διαφορετικές απεικονίσεις του πειραματικού εξοπλισμού ηλιακού θερμοκηπίου με PCM

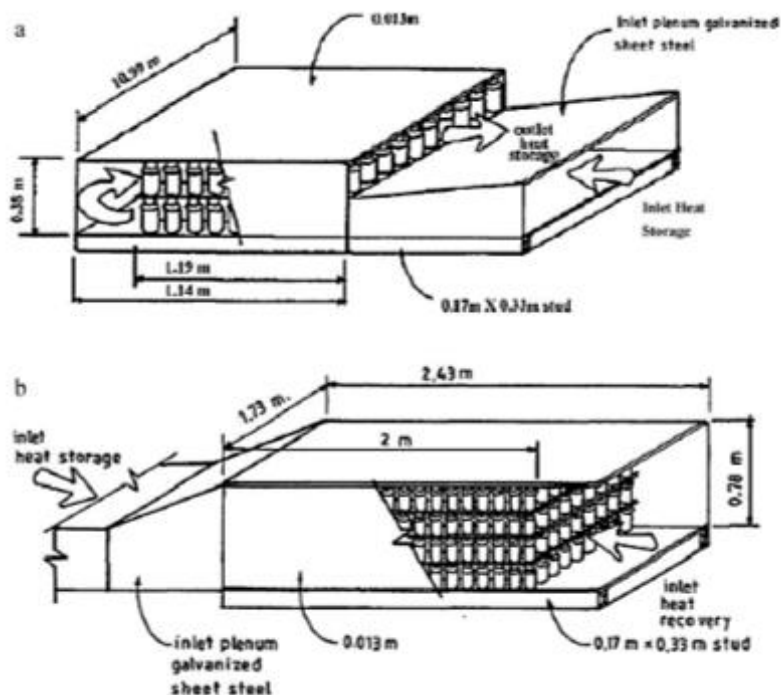
Ο αέρας που θερμαίνεται από τους ηλιακούς συλλέκτες, διέρχεται από το PCM, οδηγώντας στην τήξη του και την φόρτιση της μονάδας θέρμανσης. Έτσι με τη σειρά της η αποθηκευμένη λανθάνουσα θερμότητα χρησιμοποιείται για την θέρμανση του εισερχόμενου ατμοσφαιρικού αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Από τις μετρήσεις των ερευνητών

Οι μετρήσεις των επιστημόνων έδειξαν ότι επετεύχθη διαφορά θερμοκρασία μεταξύ του εσωτερικού του θερμοκηπίου με το

εξωτερικό περιβάλλον, της τάξεως των 6 – 9°. Ένα ακόμη ενδιαφέρον εύρημα της επιστημονικής ομάδας ήταν ότι το σύστημα λειτουργούσε ικανοποιητικά και αποδοτικά, όχι μόνο τις μέρες με υψηλές θερμοκρασίες και αρκετή ηλιοφάνεια, αλλά και σε μέρες με χαμηλές θερμοκρασίες, λίγη ηλιοφάνεια καθώς και τη νύχτα. Πιο ειδικά αυτές τις ημέρες το θερμικό αυτό σύστημα είχε τη δυνατότητα να καλύπτει το 18-23% των ημερήσιων θερμικών αναγκών του θερμοκηπίου για 3-4 ώρες, σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα χωρίς το PCM.

Μια παρόμοια εγκατάσταση σχεδιάστηκε από τους Kern και Aldrich συνολικής επιφάνειας 36m². Το PCM που επελέγη ήταν το CaCl₂.6H₂O με ποσότητα 1650kg ενσωματωμένη σε ειδικά δοχεία, ώστε να ελέγχεται η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας. Έτσι ο θερμός αέρας κατά τη διάρκεια της ημέρας που εισερχόταν στην κορυφή του θερμοκηπίου απορροφούνταν από την εσωτερική μονάδα αποθήκευσης θερμότητας, όπου κατά τη διάρκεια της νύχτας απελευθερωνόταν ενέργειας, μιας και η κατεύθυνση της ροής του αέρα λάμβανε αντίστροφη τροχιά. 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 απόδοσης της αποθηκευμένης θερμότητας.

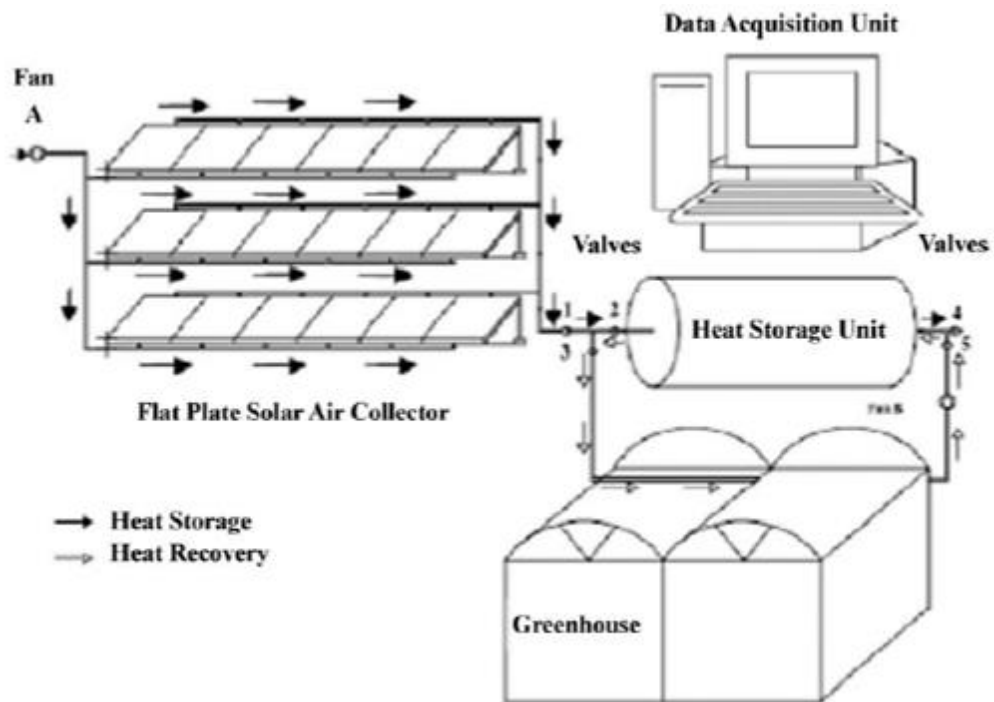
Στην Εικόνα 4.14 παρουσιάζεται παραστατικά το συγκεκριμένο σύστημα των Kern και Aldrich.



Εικόνα 4.14: Μονάδα θερμικής αποθήκευσης (α) εσωτερικά και (β) εξωτερικά του θερμοκηπίου

Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων έδειξαν ότι η αποθηκευμένη ενέργεια στην εξωτερική μονάδα ήταν μεταξύ των τιμών 105,5 και 158,25MJ , ενώ η αποθηκευμένη ενέργεια στην εσωτερική μονάδα ήταν μεταξύ των τιμών 21,1 και 31,65MJ. Επίσης, υπολογίστηκε ότι η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα διατηρήθηκε 2°C υψηλότερα από τις μέσες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, οι οποίες ήταν 8,5°C για τον Δεκέμβριο και 6,5°C για τον Ιανουάριο.

Ένα ακόμη παράδειγμα εγκατάστασης θερμοκηπίου με ενσωματωμένα PCM δοκιμάστηκε από τον Ozturk, το οποίο αφορούσε ένα σύστημα εποχιακής αποθήκευσης ενέργειας, χρησιμοποιώντας κερί παραφίνης ως μέσο αποθήκευσης. Το σύστημα είχε τη δυνατότητα θέρμανσης ενός θερμοκηπίου επιφάνειας 180m². Η εγκατάσταση αποτελούνταν από 5 επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες, μια μονάδα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας ενσωματωμένη σε μία δεξαμενή, μια μονάδα μεταφοράς θερμότητας, το θερμοκήπιο των φυτικών καλλιεργειών και μια μονάδα λήψης δεδομένων ώστε να καταγράφονται όλα τα στοιχεία για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος.



Εικόνα 4.15: Σχηματική αναπαράσταση της εγκατάστασης θερμοκηπίου του Ozturk

Από τις πειραματικές μετρήσεις της ενέργειας και της εξέργειας που διεξήχθησαν, διαπιστώθηκε αύξηση της αποδοτικότητας του συγκεκριμένου συστήματος με PCM. Πιο ειδικά 40,4% καλύτερη ενεργειακή απόδοση και 4,2% εξεργειακή απόδοση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ιστορική ανασκόπηση των PCM

5.1 Εισαγωγή

[91]

Η πρώτη ιστορικά χρήση των υλικών αλλαγής φάσης αποτελεί ο πάγος. Η χρήση λοιπόν του πάγου σαν ΥΑΦ είναι η πρώτη χρήση τέτοιων συστημάτων. Τα ιγκλού (σπίτια από πάγο) κατασκευάζονταν χρησιμοποιώντας μεγάλα κομμάτια πάγου από την παγωμένη επιφάνεια ποταμών, τα οποία μετά αποθηκεύονταν σε πριονίδι για μετέπειτα χρήση κατά την περίοδο της Άνοιξης.



Εικόνα 5.1: Ιγκλού

Η βιομηχανία τροφίμων πέρα από τον πάγο μετέπειτα χρησιμοποίησε και άλλες μεθόδους για τη διατήρηση των τροφίμων σε επιθυμητή θερμοκρασία. Για παράδειγμα, κατά τη μεταφορά ή αποθήκευση τροφίμων, χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικά δοχεία μεγάλου πλάτους και μικρού αντίστοιχα πάχους, γεμάτα με στερεοποιημένα μίγματα αλάτων, τα οποία άλλαζαν φάση κατά τη μεταφορά ή αποθήκευση του τροφίμου, απορροφώντας θερμότητα και διατηρώντας το εσωτερικό στην επιθυμητή θερμοκρασία. Τα ίδια υλικά χρησιμοποιήθηκαν και στη βιομηχανία φαρμάκων, σε πλαστικά δοχεία, ώστε να διατηρούν τα θερμοκρασιακά επίπεδα χημικών και φαρμάκων, κατά τη μεταφορά ή την αποθήκευσή τους. Το βασικό

ΥΑΦ που χρησιμοποιήθηκε σε τέτοιες εφαρμογές, ήταν κάποιο μίγμα ανόργανων αλάτων, όπως Θεϊκό Νάτριο, Θεϊκό Μαγνήσιο, Θεϊκό Κάλιο, Θεϊκό Αμμώνιο, Θεϊκό Ασβέστιο και κάποια χλωρίδια του Μαγνησίου. Από τη στιγμή που η επιστημονική κοινότητα κατάλαβε τις προοπτικές των ΥΑΦ, ξεκίνησε να διεξάγει μελέτες και πειράματα για την εύρεση και ανάπτυξη όλο και καλύτερων ΥΑΦ, με διάφορα σημεία τήξης και υψηλές θερμοότητες υγροποίησης. Οι πρώτες προσπάθειες για τη χρήση των υλικών αλλαγής φάσης σε σπίτια με σκοπό την ουσιαστική συμβολή τους στη θερμική συμπεριφορά των κτιρίων έγιναν μόλις από τη δεκαετία του 1920. Σε πρώτη φάση το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στους μεμονωμένους χρήστες των συστημάτων αυτών και όχι σε τεχνολογικώς ανεπτυγμένα θερμικά συστήματα. Μερικά δείγματα δουλειάς, ήταν κάποια συστήματα, τα οποία προοριζόνταν για εστιατορές και ξενοδόχους και ήταν σχεδιασμένα να διατηρούν τα ζεστά πιάτα σε ικανοποιητική θερμοκρασία όση ώρα διαρκούσε το σερβίρισμα. Άλλες εφαρμογές ήταν προϊόντα για τη διατήρηση ζεστών ροφημάτων, αλλά η εφεύρεση του "Θερμός" ήταν πολύ αποτελεσματική, οπότε αυτό το προϊόν δεν έτυχε απήχησης, και διάφορα προϊόντα σε ρούχα διαβίωσης (ρούχα για ακραίες συνθήκες). Στα τέλη της δεκαετίας του 1940 διατέθηκε στην αγορά ένα φαρμακευτικό προϊόν, μία θερμαντική ζώνη που προοριζόταν για θεραπευτικούς σκοπούς, το οποίο βασιζόταν στη θερμική συμπεριφορά του Βορικού Θείου. Το πρώτο προϊόν το οποίο αναπτύχθηκε για θεραπευτικό σκοπό ήταν μία συσκευασία παροχής ψύξης, ονομαζόταν γενικά "cool rack" και αναπτύχθηκε από αθλητρες σε συνεργασία με νοσοκομειακές μονάδες και η κύρια χρήση του ήταν περιορίζει το μωλώπισμα σε περίπτωση τραυματισμού. Το προϊόν αποτελείται από μία σακούλα που λειτουργεί σαν εξωτερική συσκευασία, η οποία είναι εσωτερικά χωρισμένη σε δύο τμήματα. Το ένα και μεγαλύτερο περιέχει το υλικό αλλαγής φάσης, το οποίο έχει σταθεροποιηθεί σε υπέρψυκτη κατάσταση. Το άλλο τμήμα περιέχει έναν παράγοντα πυρηνοποίησης, κάποιου είδους πηκτικό δηλαδή. Μια απότομη κίνηση καταστρέφει το διαχωριστικό εντός της συσκευασίας και επιτρέπει την ανάμιξη των δύο υλικών, με αποτέλεσμα το ΥΑΦ να σταθεροποιείται, απελευθερώνοντας την αποθηκευμένη θερμότητα.

5.2 Τα πρώτα βήματα

[92,93]

Η πρώτη επιστήμονας που τόλμησε να ασχοληθεί και να μελετήσει την τεχνολογία και τη συμπεριφορά των υλικών αλλαγής φάσης (PCM). Πιο ειδικά στην Εικόνα 5.2 παρουσιάζεται ένα από τα πρώτα πειράματα που διενήργησε για τη μελέτη της συμπεριφοράς των PCM.



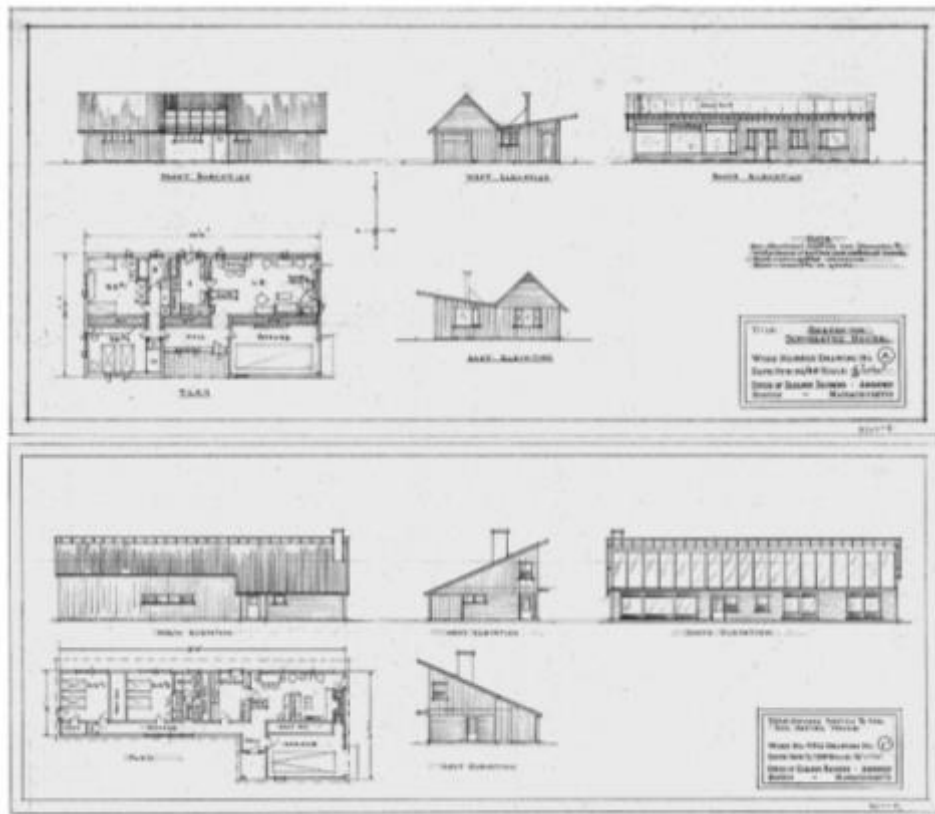
Εικόνα 5.2: Πείραμα της Δρ. Maria Telkes για την παρουσίαση της μετάβασης ενός υλικού αλλαγής φάσης, χρησιμοποιώντας ένα κερί και παγάκια (December 31, 1948)

Στη συνέχεια έκανε την πρώτη εφαρμογή τους σε ένα κτήριο. Η πρώτη απόπειρα μεγάλης κλίμακας έγινε το 1948 στην περιοχή Dover Mass της πολιτείας της Βοστώνης. Η εν λόγω τοποθεσία έγινε από την ίδια την επιστήμονα λόγω των αυξημένων ετήσιων επιπέδων ηλιοφάνειας (πάνω από τις μέσες τιμές), τα οποία εξασφάλιζαν τη βέλτιστη λειτουργία του ηλιακού συστήματος που κατασκευάστηκε.

Το κτήριο που κατασκευάστηκε ήταν μια μονώροφη κατοικία, με 2 υπνοδωμάτια και συνολικά 5 δωμάτια, τα οποία κάλυπταν επιφάνεια 135 m². Το σύστημα λειτουργούσε με τη βοήθεια της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία με τη μορφή θερμότητας μέσω 28 συλλεκτών,

οδηγούταν μέσω ειδικών ανεμιστήρων σε 3 δοχεία αποθήκευσης θερμότητας.

Τα συγκεκριμένα δοχεία αποθήκευσης θερμότητας χρησιμοποιούσαν το άλας του Glauber με σημείο τήξης 32°C, ενώ η συνολική του ποσότητα ήταν 21 τόνοι και με δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας 11 MJ.



Εικόνα 5.3: Διαφορετικές απεικονίσεις και απόψεις του ηλιακού σπιτιού που σχεδίασε η Δρ. Telkes

Το σπίτι που κατασκευάστηκε κόστισε συνολικά 20.000\$, όπου τα 3.000\$ ήταν για την κατασκευή του συστήματος θερμότητας (ίσο με το 15% του συνόλου). Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι για δεδομένα της εποχής ήταν μια αρκετά δαπανηρή εγκατάσταση.

Το σύστημα θέρμανσης λειτουργούσε αρκετά αποδοτικά και ικανοποιητικά κατά τα 2 πρώτα χρόνια από την ολοκλήρωσή του, ακόμη και σε περιόδους με έλλειψη ηλιοφάνειας λόγω παρατεταμένης συννεφιάς. Έτσι το σύστημα είχε τη δυνατότητα να

παρέχει ένα σταθερό περιβάλλον κοντά στους 21°C, χωρίς την απαίτηση επέμβασης οποιουδήποτε άλλου βοηθητικού συστήματος.



Εικόνα 5.4: Η Δρ. Maria Telkes (δεξιά) με την αρχιτέκτονα Eleanor Raymond (αριστερά) στο Ηλιακό Σπίτι του Dover της Μασαχουσέτης

Τα προβλήματα εμφανίστηκαν στο 3^ο έτος λειτουργίας, λόγω του διαχωρισμού του άλατος Glauber, σε διάλυμα και άνυδρο άλας θειικού νατρίου (Na_2SO_4), μειώνοντας έτσι την αποθηκευτική του ικανότητα. Παράλληλα με αυτό το γεγονός, παρατηρήθηκε διάβρωση στα δοχεία αποθήκευσης με επακόλουθο την δραματικότερη αύξηση των απωλειών του θερμαντικού συστήματος.

5.3 Συνέχεια εφαρμογών PCM σε σπίτια

[92,94]

Η συνέχεια των εφαρμογών των PCM σε κτηριακές εγκαταστάσεις δόθηκε από τον Lawrence Gardshire με ένα νέο ηλιακό σπίτι στο New Mexico το 1953. Το συγκεκριμένο σπίτι ήταν διώροφο με

επιφάνεια 102 m^2 σε κάθε όροφο. Ο συγκεκριμένος επιστήμονας χρησιμοποίησε δοχεία αποθήκευσης όγκου 1.9 m^3 . Η καινοτομία του ήταν ότι σε αντίθεση με την Telkes, δεν τοποθέτησε τα δοχεία ανάμεσα στα δωμάτια του σπιτιού, αλλά στη στέγη, μειώνοντας έτσι την απόσταση από τους ηλιακούς συλλέκτες.

Μια ακόμη διαφοροποίηση του συστήματος του ήταν η χρήση διφθορικού νάτριου στο άλας του Glauber ώστε να δρα ως παράγοντας πήξης, με στόχο τη στερεοποίηση του άλατος και την αποφυγή του διαχωρισμού που συνέβη στην Δρ. Telkes.

Παρόλα αυτά και η συγκεκριμένη εγκατάσταση αντιμετώπισε ανάλογα προβλήματα σε αργότερο στάδιο βέβαια σε σχέση με την αντίστοιχη της Telkes. Η παράταση της διάρκειας καλής λειτουργίας του συστήματος με το PCM αποδόθηκε στη χρήση του παράγοντα πήξης.

Το επόμενο έτος οι J.Hodgins και T.Hoffman έκαναν τη δική τους απόπειρα το 1959, με την κατασκευή ηλιακού σπιτιού με χρήση PCM στον Καναδά. Το συγκεκριμένο σπίτι ήταν διώροφο συνολικής επιφάνειας 111 m^2 , όπως παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 5.5. Εμπιστευόμενοι την εμπειρία της Δρ. Telkes, της ανέθεσαν το σχεδιασμό και την επίβλεψη του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, το οποίο περιελάμβανε το άλας του Glauber, με σύσταση $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ και σημείο τήξης 32°C .



Εικόνα 5.5: Το νέο ηλιακό σπίτι των Hodgins και Hoffman, σχεδιασμένο από την Δρ. Telkes

Η καινοτομία της νέας αυτής κατασκευής με γνώμονα την επίλυση των προηγούμενων προβλημάτων, έφερε 12 τόνους PCM με προσθήκη πυριτικού άλατος νατρίου και χρωμίου, το τελευταίο προστέθηκε ως αντιδιαβρωτικό για τις δεξαμενές. Τα PCM ενσωματώθηκαν σε κυλινδρικά χαλύβδινα δοχεία, με ύψος 0,6m και διάμετρο 0,1m και τοποθέτηση κάθετα στους τοίχους. Τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερος ενθαρρυντικά και επιτυχημένα, όμως δεν συνεχίστηκαν από την επιστημονική ομάδα.

5.4 Διεθνείς έρευνες στον τομέα των PCM

[94]

Το 1971 αναπτύχθηκε το 1^ο ολοκληρωμένο ερευνητικό πρόγραμμα από το πανεπιστήμιο της Πενσυλβάνια, με θέμα την αποθήκευση θερμότητας με χρήση υλικών αλλαγής φάσης. Η ερευνητική ομάδα

αποτελούνταν από 3 κορυφαίες επιστημονικές ομάδες καταξιωμένες στον τομέα της λανθάνουσας θερμότητας, ενώ έλαβε χρηματοδότηση από το National Science Foundation των ΗΠΑ.

Το κύριο αντικείμενο της έρευνας τους ήταν η μελέτη και η ανάπτυξη νέων αποδοτικών PCM είτε από οργανικές είτε ανόργανες ενώσεις, κατάλληλες για χρήση τους σε εφαρμογές ψύξης και θέρμανσης. Επίσης άλλες παράμετροι που πρέπει να αναλυθούν είναι τα οικονομικά δεδομένα των PCM και η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας. Τα κύρια υλικά που μελετήθηκαν για τα ανωτέρω στοιχεία ήταν: οργανικές ευτηκτικές ενώσεις, οργανικά-ανόργανα ευτηκτικά μίγματα, ένυδρα άλατα και ένυδρο κλειθρίτες.

Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι για κλιματιστικές εφαρμογές ενδείκνυνται ορισμένα κεριά παραφίνης από τα οργανικά PCM, ενώ από τα ανόργανα PCM το $K_2 HPO_4 \cdot 6H_2O$ (ένυδρο φωσφορικό κάλιο). Από την άλλη αναφορικά με τη δυνατότητα θέρμανσης διακρίθηκαν τα ανόργανα PCM, όπως το $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ και $Ca(NO_3)_2 \cdot 4 H_2O$.

Δυο χρόνια αργότερα και με τον Αραβο-ισραηλινό πόλεμο σε εξέλιξη, επήλθε το θέμα του εμπάργκο στο πετρέλαιο της Αραβίας. Το πρόβλημα αυτό κατέδειξε την ανάγκη για έρευνα και ενεργειακή ανεξαρτητοποίηση, μιας και η ισορροπία μπορούσε να διαταραχθεί είτε λόγω πολιτικών αναταραχών είτε λόγω πιθανής εξάντλησης των κοιτασμάτων ενός καυσίμου. Τα γεγονότα αυτά έδωσαν το έναυσμα για αύξηση των ερευνών και των χρηματοδοτήσεων από αρκετές κυβερνήσεις χωρών, για τον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή ενέργεια, καθώς και στροφή στην αποδοτικότερη ανάκτηση και αποθήκευση θερμότητας. Οι χώρες που συμμετείχαν πιο ενεργά σε αυτή την προσπάθεια ήταν η Γερμανία, η Σουηδία, η Γαλλία και η Μεγάλη Βρετανία από την Ευρώπη, οι ΗΠΑ και η Ιαπωνία. Ο κύριος τομέας που έδωσαν βάση ήταν αυτός της ηλιακής ενέργειας, μιας και ο συγκεκριμένος τομέας υπολειπόταν σε πρόοδο.

5.4.1 Ευρώπη

[94,96]

- Γαλλία

Ο στυλοβάτης των ερευνών αποθήκευσης ερευνών με χρήση PCM ήταν το κέντρο CNRS στη Νίκαια της Γαλλίας, το οποίο σχεδίασε και κατασκεύασε αρκετές εφαρμογές με ενσωμάτωση των εν λόγω συστημάτων. Στην Εικόνα 5.6 παρουσιάζεται το κτήριο ερευνών CNRS στη Νίκαια της Γαλλίας. Η έρευνα και ανάπτυξη του επικεντρώθηκε στο παραφινικό κερί ως μέσο αποθήκευσης, με παράλληλη χρήση μιγμάτων μετάλλων για την ενίσχυση των χαρακτηριστικών μεταφοράς θερμότητας.

Επίσης, στο Παρίσι μια επιστημονική ομάδα από το Center Scientific et Technique du Batiment επικύρωσε διάφορες πατέντες συσκευών που έφεραν PCM για κλιματιστικές εφαρμογές, με σημεία τήξης 15 – 40°C.



Εικόνα 5.6: Το κτήριο ερευνών CNRS στη Νίκαια της Γαλλίας

- Γερμανία

Οι Γερμανικές επιστημονικές ομάδες μελέτησαν την τεχνολογία αποθήκευσης θερμότητας με χρήση PCM και δημιούργησαν πίνακες με τις φυσικές και θερμικές ιδιότητες υλικών για κατασκευαστικές και

μονωτικές εφαρμογές. Το κύριο σημείο των ερευνών τους ήταν στα ένυδρα άλατα, στους κλειθρίτες και στις παραφίνες, υλικά τα οποία προορίζονταν για εφαρμογές στο πεδίο θερμοκρασιών κάτω των 100°C. Το πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης διεξήγαγε πειραματικές έρευνες με χρήση διαφόρων οργανικών και ένυδρων αλάτων σε δοχεία σωλήνων με πτερύγια, τα οποία έφεραν εναλλάκτες θερμότητας σε συνδυασμό με θερμοσωλήνες.

Από ιδιωτικές πρωτοβουλίες ξεχώρισαν οι έρευνες εταιρειών για την αποδοτικότητα των PCM, όπως αυτή στο BBC Solar House. Η εν λόγω εγκατάσταση χρησιμοποιούσε θέρμανση μέσω αντλίας θερμότητας με νερό ως μέσο θερμικής αποθήκευσης. Με την εξέλιξη των πειραμάτων και των μετρήσεων, η επιστημονική ομάδα χρησιμοποίησε και άλλα μέσα αποθήκευσης θερμότητας, όπως ο πάγος και στη συνέχεια παραφίνη (σημείο τήξης 18 - 25 °C). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παραφίνη είχε τη καλύτερη απόδοση από θερμικής πλευράς, είχε καλύτερο COP για την αντλία της τάξεως 2,6 με 3,3, ενώ ήταν και πιο οικονομικά αποδοτική, μιας και απαιτούσε το μισό του απαιτούμενου όγκου σε σχέση με το νερό.

- Σουηδία

Πρωτοστάτης στην έρευνα για την τεχνολογία των PCM στη Σουηδία ήταν το πανεπιστήμιο Energiteknik Studsvik AB με επικεφαλής τον καθηγητή H. Hedman. Μια από τις κυριότερες έρευνες στον τομέα ήταν η εφαρμογή ένυδρων αλάτων με τον αέρα ως μέσο μεταφοράς θερμότητας. Μια ακόμη εφαρμογή που εξετάστηκε ήταν συστήματα με ενσωματωμένα PCM σε μεταλλικές κάψουλες αποδείχθηκαν πιο αποτελεσματικά από τις δεξαμενές νερού και τα πετρώματα, που χρησιμοποιούνται σήμερα για παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης σε σπίτια στη Δανία.

Οι ιδιωτικές πρωτοβουλίες κινήθηκαν προς την κατεύθυνση της διερεύνησης για ενσωμάτωση των PCM σε κτηριακές κατασκευές. Έτσι δημιουργήθηκε ένα κοινό έργο με 3 διαφορετικά συστήματα θέρμανσης Σουηδικής κατασκευής. 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.

- Μεγάλη Βρετανία

Στη Μεγάλη Βρετανία το κέντρο ερευνών Watford ήταν το πρώτο που ασχολήθηκε με το θέμα της έρευνας για την αποθήκευση θερμότητας με χρήση PCM. Η επιστημονική ομάδα αποτελούνταν από τους AKRBromley, EMMcKay και JP Wilkins, οι οποίοι ήταν πρωτοπόροι σε θέματα αποθήκευσης θερμότητας, θέρμανσης με αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας και πιο ειδικά αποθήκευση σε πάγο. Το πανεπιστήμιο του Salford πραγματοποίησε έρευνες, χρησιμοποιώντας ένυδρο φωσφορικό νάτριο και χλωριούχο ασβέστιο, ενώ στην Ουαλία, το πανεπιστήμιο του Cardiff επικεντρώθηκε στη χρήση οργανικών PCM, όπως η παραφίνη, ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας.

5.4.2 ΗΠΑ

[94]

Ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης ανάγκης για έρευνα σχετικά με τα συστήματα θερμικής αποθήκευσης, οι ΗΠΑ πρωτοστάτησαν στο πρώτο μεγάλης κλίμακας ερευνητικό πρόγραμμα που χρηματοδοτήθηκε από τη National Science Federation. Η ηγέτης στον τομέα των PCM εκείνη την περίοδο Dow Chemical, βραβεύτηκε για την έρευνα της, που αποτελούταν από περίπου 20.000 πειράματα στον τομέα έρευνας ενδεχόμενης υιοθέτησης PCM. Στα πειράματα και τις συγκεκριμένες μελέτες συμμετείχαν και επιστημονικές ομάδες από τον Καναδά σε συμβουλευτικό ρόλο, μιας και ο αριθμός τους ήταν πολύ μεγάλος. Εξάλλου, χρησιμοποιήθηκε ως βάση τα δεδομένα προηγούμενων μελετών από το πανεπιστήμιο της Πενσυλβάνια σχετικά με τις δυνητικές πηγές λανθάνουσας θερμότητας. Από τον συνολικό αριθμό των 20.000 διαφορετικών υλικών που δοκιμάστηκαν, μόνο το 1% αυτών προκρίθηκαν για

συνέχιση της έρευνας, τα οποία ήταν σειρά ένυδρων αλάτων ομοιόμορφης τήξης και κοινά οργανικά υλικά.

Παράλληλα με τις ερευνητικές δραστηριότητες της Dow Chemical, η Δρ Maria Telkes από το πανεπιστήμιο του Delaware συνέχισε την έρευνα με στόχο τη βελτίωση της δυνατότητας αποθήκευσης και της διάρκειας ζωής του άλατος του Glauber, το οποίο είχε χρησιμοποιήσει αρκετά στις κτηριακές της εφαρμογές. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση διαφόρων πηκτικών μέσων για πάχυνση του άλατος Glauber αύξησαν σημαντικά τη διάρκεια ζωής των υλικών. Το μειονέκτημα όμως ήταν 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 πειραματίστηκε με ανάμειξη του άλατος του Glauber με ένα είδος πηλού ως πηκτικό μέσο και το οποίο τελικά οδήγησε σε αύξηση των κύκλων αποθήκευσης θερμότητας, αλλά με επακόλουθο τη μείωση στη δυνατότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Σε συνέχεια των συγκεκριμένων πειραμάτων, ο Δρ S. B. Marks χρησιμοποίησε μια σειρά από άλλες μορφές πηκτικών μέσων, όπως ένα πολυμερές πολυκαρβοξυλικό οξύ που αύξησε τη διάρκεια ζωής καθώς και την ικανότητας αποθήκευσης θερμότητας.

Ο Δρ P. G. Rueffel, ασχολήθηκε με τη χρήση του άλατος Glauber ως PCM και πραγματοποίησε μια σειρά δοκιμών χρησιμοποιώντας μήτρα τύρφης για την απορρόφηση του PCM. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η τύρφη σχημάτιζε ένα ινώδες δίκτυο, που απορροφούσε το PCM, δημιουργώντας ένα ιδανικό πηκτικό μέσο με αποτέλεσμα τη αύξηση της διάρκειας ζωής της αποθήκευσης θερμότητας.

Η εταιρεία Boardman Energy Systems διεξήγαγε έρευνες αναφορικά με ειδικά μίγματα PCM, με χρήση άλατος του Glauber και προσθήκη κοινού τσιμέντου Portland. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι για πάνω από 2000 κύκλους δεν εμφανίστηκε καμιά μείωση της θερμικής αποθήκευσης. Το σύστημα αυτό ήταν χημικά σταθερό και παρείχε σημαντικά πλεονεκτήματα ως σύστημα θερμικής αποθήκευσης για ενσωμάτωση σε κτήρια.

Κατά τη διάρκεια της αρχικής μελέτης της Dow Chemical για τον προσδιορισμό πιθανών PCM, το κερί παραφίνης θεωρήθηκε αρκετά αποδοτικό ως ένα πιθανό υλικό αποθήκευσης θερμότητας για την οικοδομική βιομηχανία. Ο Δρ John Bailey και οι συνεργάτες του αποφάσισαν να μελετήσουν αυτήν την υπόθεση διεξοδικότερα, επικεντρώνοντας τις έρευνές του σε θερμοσυσσωρευτές αλουμινίου

κυψελωτού πλέγματος με ενσωματωμένη παραφίνη (σημείο τήξης 36°C).

Η συνέχεια των ερευνών δόθηκε από τον Δρ T. R. Galloway, το 1974. Η μελέτη βασίστηκε στη χρησιμοποίηση κεριού παραφίνης ως PCM σε τρεις διαφορετικές εφαρμογές θέρμανσης: δεξαμενή PCM με πλαστικό πηνίο ανταλλαγής θερμότητας, χαλύβδινα δοχεία πληρωμένα με PCM που περιβάλλονταν από νερό μέσα σε μια δεξαμενή και μεγάλοι δίσκοι με κεριό ενσωματωμένο σε κάψουλες που περιβάλλονταν από νερό εντός μιας δεξαμενής.

5.4.3 Ιαπωνία

[94]

Μια άλλη ηγετική δύναμη στον τομέα της αποθήκευσης θερμότητας με PCM ήταν η Ιαπωνία, με πολλαπλές επιστημονικές ομάδες οι οποίες λάμβαναν χρηματοδότηση από τις εκάστοτε κυβερνήσεις. Τα υλικά που κρίθηκαν ως τα πλέον αποδοτικά κατά τη διάρκεια των συγκεκριμένων ερευνών από την Mitsubishi Electronic Corp. και την Tokyo Electric Power Co. ήταν τα ένυδρα νιτρικά άλατα, τα φωσφορικά άλατα, τα φθοριούχα άλατα και το χλωριούχο ασβέστιο.

Η έρευνα μέχρι τη δεκαετία του '70 επικεντρωνόταν στα συστήματα θέρμανσης με αποθήκευση θερμότητας με PCM, ενώ τα επόμενα χρόνια οι έρευνες επικεντρώθηκαν σε ψυκτικές εφαρμογές.

Στις αρχές της δεκαετίας του '80, αρκετές νέες εταιρείες, όπως η Nirron Pillar Packing Co., κατοχύρωσαν πατέντες για τη χρήση του εξαένυδρου βρωμιούχου ασβέστιου ως υλικό αλλαγής φάσης. Από την άλλη, η Kureha Chemical Industry κινήθηκε στην έρευνα του άλατος του Glauber ως PCM για θέρμανση και ψύξη, χρησιμοποιώντας για τη σταθεροποίηση του PCM, γύψο και άλλα ελαφρού τύπου αδρανή υλικά. Σημαντική έρευνα και ανάπτυξη πραγματοποιήθηκε σε μια σειρά από ευτηκτικά νιτρικά άλατα για εφαρμογές σε θερμοκρασία δωματίου.

Οι Yoneda και Takanashi ανέπτυξαν μια σειρά από μοντέλα, χρησιμοποιώντας ένα απλό εναλλάκτη θερμότητας για την παρακολούθηση του συστήματος PCM, και κατέληξαν στο

συμπέρασμα ότι το σύστημα ήταν πολύ αποδοτικό σε γενικές γραμμές, αν και τελικά εμφανίστηκαν προβλήματα μείωσης της αποτελεσματικότητας κατά τη σύνδεσή του με ένα ηλιακό συλλέκτη.

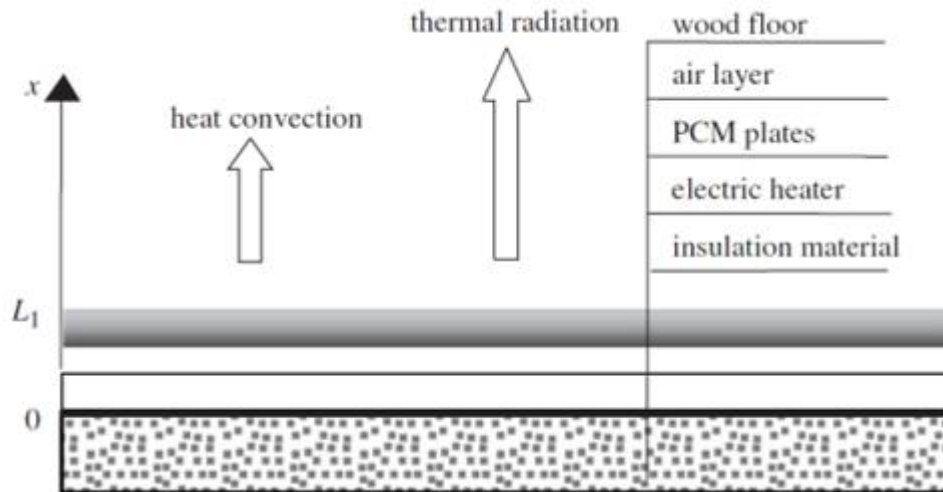
5.5 Νεότερες μελέτες

[99,100,102]

Τα πιο πρόσφατα των ερευνών είναι ιδιαίτερος ενθαρρυντικά και ικανοποιητικά αναφορικά με τις προσπάθειες ενσωμάτωσης υλικών αλλαγής φάση σε δομικά στοιχεία και κτηριακές εφαρμογές. Εξάλλου οι έρευνες και τα παραδείγματα των τελευταίων 20 ετών καταδεικνύουν την ευρεία πληθώρα επιτυχημένων εφαρμογών εκτός και από τον κτηριακό τομέα.

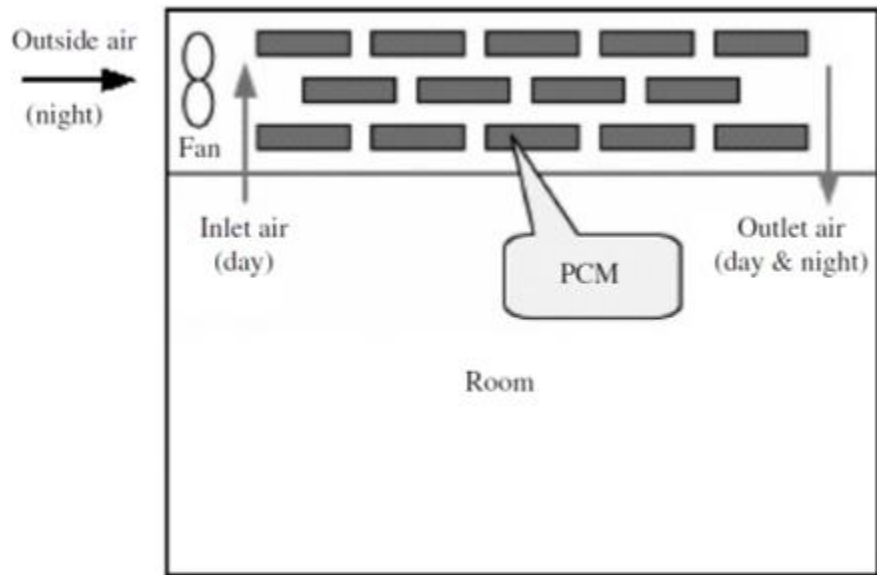
Τα αποτελέσματα είναι σαφής βελτίωση των χαρακτηριστικών αποθήκευσης ενέργειας και θερμότητας με τη χρήση των PCM, μιας και είναι δυνατή η μείωση των ενεργειακών μέγιστων και παράλληλα ευρύτερη γκάμα θερμικών φορτίων και απαιτήσεων κατά τη διάρκεια ενός έτους.

Έτσι στην Εικόνα 5.7 παρουσιάζεται ένα σύστημα ενδοδαπέδιου ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης με πλάκες PCM, οι οποίες εμπεριέχουν μόνωση πολυστυρενίου. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται χαρακτηριστικά και τα διαφορετικά στρώματα από τα διάφορα υλικά του συστήματος.



Εικόνα 5.7: Σχηματική αναπαράσταση ενδοδαπέδιου ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης με πλάκες PCM

Μια ακόμη ιδιαίτερη και πρόσφατη εφαρμογή που μελετήθηκε από τους Zhang et al. το 2007, παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.8 και φορά ένα σύστημα νυχτερινού εξαερισμού με χρήση υλικών αλλαγής φάσης. Εξάλλου ο νυχτερινός εξαερισμός είναι ένας χρήσιμος και οικονομικός τρόπος βελτίωσης της θερμικής άνεσης κατά το καλοκαίρι, είτε βασίζεται στα ανοίγματα των παραθύρων είτε σε ανεμιστήρες οροφής. Το συγκεκριμένο καινοτόμο σύστημα έρχεται να καλύψει αποδοτικότερα τις απαιτήσεις των χρηστών. Έτσι τα PCM που έχουν τοποθετηθεί στην οροφή αποθηκεύουν ψύξη μέσω των κύκλων του ανεμιστήρα, που κινείται από τον εξωτερικό αέρα κατά τη διάρκεια της μέρας, και τη νύχτα αποδίδουν στο δωμάτιο την ψύξη που έχουν συσσωρεύσει.



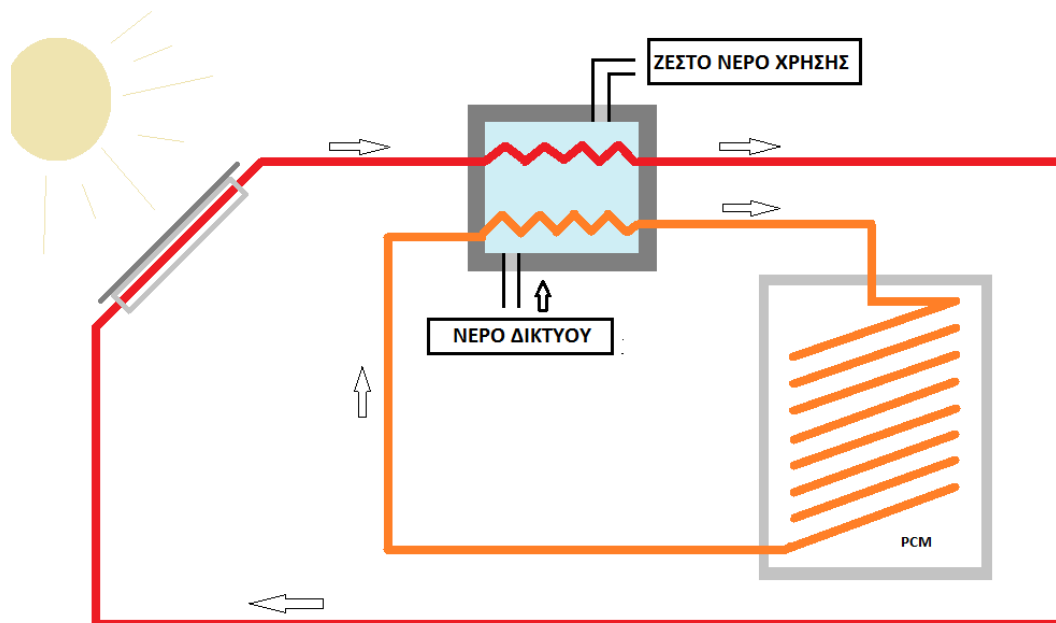
Εικόνα 5.8: Σχηματική αναπαράσταση συστήματος νυκτερινού εξαερισμού με χρήση PCM

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παραμετρική μελέτη ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού χρήσης με PCM

[103,104,105]

6.1 Σκοπός της εφαρμογής

Στόχος και αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η μελέτη της θερμικής απόδοσης υλικών αλλαγής φάσης ως σύστημα θέρμανσης δώματος, χωρίς βοηθητική πηγή. Το σύστημα βρίσκεται στην περιοχή της **Αθήνας** και βασίζεται στην φόρτιση των ΥΑΦ από ηλιακούς συλλέκτες. Η εγκατάσταση αποτελείται από το κύκλωμα θερμού νερού του ηλιακού συλλέκτη, το οποίο μέσω εναλλάκτη θερμαίνει νερό δεξαμενής. Η δεξαμενή (πλήρους ανάμειξης) χρησιμοποιείται με σκοπό την παράλληλη θέρμανση ζεστού νερού χρήσης (\dot{m}_x) και του κυκλώματος νερού (\dot{m}_w) που έρχεται σε επαφή με στρώσεις υλικού αλλαγής φάσης ενσωματωμένων σε τοίχο. Το νερό του κυκλώματος PCM απορροφά θερμότητα από τη δεξαμενή και οδηγείται εσωτερικά του τοίχου με σερπαντίνα, η οποία διαπερνά το υλικό αλλαγής φάσης, επιτυγχάνοντας την θερμική του φόρτιση με αγωγή. Το νερό, με μειωμένη πλέον θερμοκρασία, εξέρχεται από τον τοίχο και επανέρχεται μέσω εναλλάκτη στη δεξαμενή για την επανάληψη της διαδικασίας.

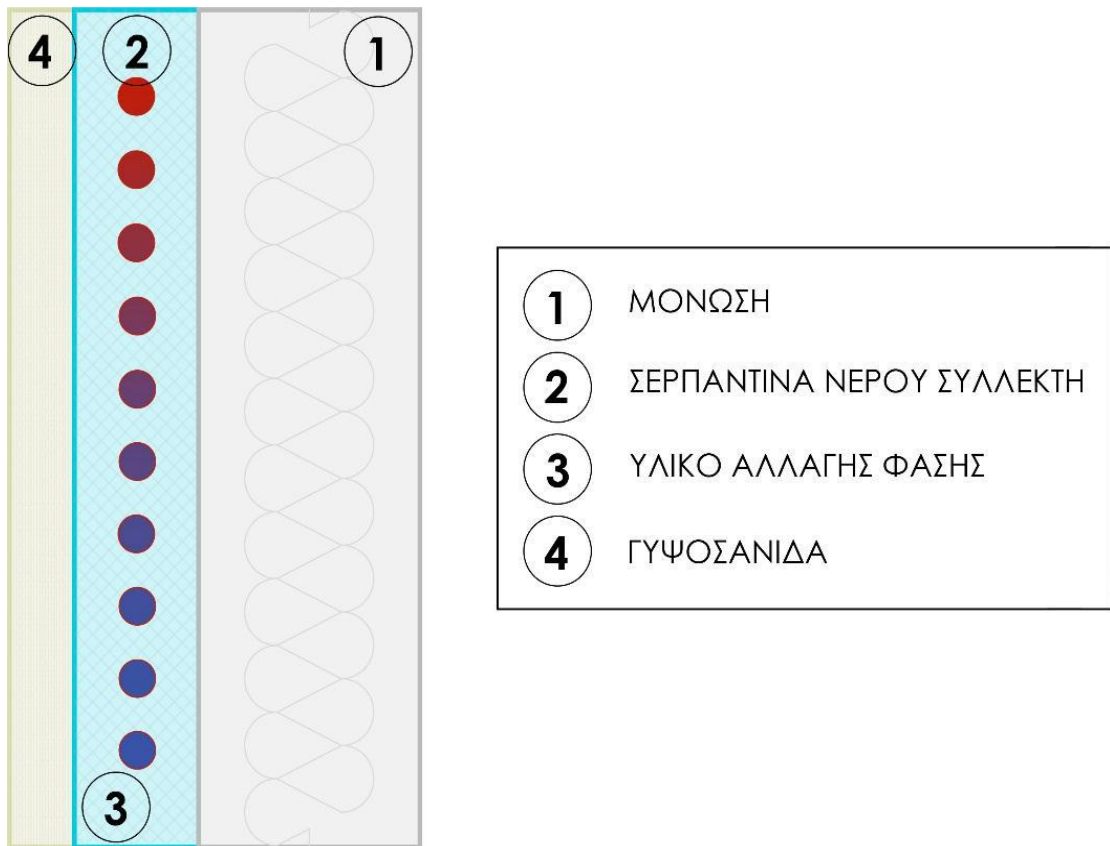


Σχήμα 6.1: Η εγκατάσταση πάνω στην οποία γίνεται η μελέτη.

Ο τοίχος, επιφανείας $A_T = 3 \times 3 \text{ m}^2$, που περιλαμβάνει τα ΥΑΦ αποτελεί μέρος δωματίου 12 m^2 , στο οποίο επικρατούν συνθήκες θερμικής άνεσης με σταθερή θερμοκρασία $T_\Delta = 20^\circ\text{C}$ και τους υπόλοιπους τρεις τοίχους αδιαβατικούς. Για λόγους απλότητας, η θερμοκρασία διατηρείται θεωρητικά σταθερή με χρήση μηχανισμού αποβολής της πλεονάζουσας θερμότητας από το δωμάτιο, θερμότητα προσφερόμενη από την αποφόρτιση των ΥΑΦ. Προφανώς, η συναλλαγή θερμότητας των ΥΑΦ με το δωμάτιο, είναι επιθυμητή μόνο κατά την μία κατεύθυνση, δηλαδή μόνο η απόδοση θερμότητας από τα ΥΑΦ στο δωμάτιο και όχι το αντίστροφο. Για τον λόγο αυτόν, η θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης έχει κατώτατο όριο την θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος T_Δ . Στην περίπτωση εξίσωσης των δύο αυτών θερμοκρασιών, η κυκλοφορία του νερού από τον συλλέκτη διακόπτεται ώστε να μην υπάρξει απορρόφηση θερμότητας από το ΥΑΦ, λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας του νερού και να διατηρηθεί η ισορροπία μεταξύ ΥΑΦ και δωματίου.

Η διαστρωμάτωση του τοίχου φαίνεται στα παρακάτω σχήματα και είναι η εξής :

- **Μόνωση** : Η εξωτερική επιφάνεια του τοίχου είναι μονωμένη, με θεωρητικά μηδενική συναλλαγή θερμότητας με το εξωτερικό περιβάλλον, για την αποφόρτιση του ΥΑΦ μόνο προς το εσωτερικό περιβάλλον.
- **Στρώμα ΥΑΦ** : Το πάχος του στρώματος I_{PCM} αποτελεί παράμετρο της μελέτης, ενώ επιλέγεται μία τυπική τιμή πυκνότητας του ΥΑΦ $\rho_{PCM} = 790 \text{ Kg/m}^3$. Το υλικό διαπερνάται καθόλη την επιφάνεια του τοίχου από σερπαντίνα κυκλοφορίας του θερμού νερού.
- **Γυψοσανίδα** : Η γυψοσανίδα τυπικού πάχους $I_{ΓΥΨ} = 0,01 \text{ m}$ και θερμικής αγωγιμότητας $k_{ΓΥΨ} = 0,21 \text{ W/mK}$, αποτελεί την εσωτερική επιφάνεια του τοίχου στο δωμάτιο.



Εικόνα 6.2: Τομή τοίχου εγκατάστασης

6.2 Ηλιακός Συλλέκτης

Για την μελέτη επιλέγεται ηλιακός συλλέκτης της ελληνικής εταιρείας Sole A.E. (Βιομηχανία Ηλιακών Συστημάτων). Το μοντέλο Climasol 2.70 με τα παρακάτω χαρακτηριστικά που δίνονται από τον κατασκευαστή :

A_c [m^2]	2,464
$F_R(\tau\alpha)$	0,64
$F_R U_L$ [$W/m^2 \text{ } ^\circ C$]	4,23

όπου:

- **A_c** : η συλλεκτική επιφάνεια του συλλέκτη
- **F_R(τα)** : το γινόμενο του παράγοντα θερμικής απολαβής του συλλέκτη **F_R**, της διαπερατότητας του καλύμματος **τ** και της απορροφητικότητας του απορροφητήρα του συλλέκτη **α**.
- **F_RU_L** : το γινόμενο του παράγοντα θερμικής απολαβής του συλλέκτη **F_R** και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας **U_L** [W/m² K], που εκφράζει τις θερμικές απώλειες από τον συλλέκτη στο περιβάλλον δι' αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας.

Η συλλεκτική επιφάνεια **A_c** θα αποτελέσει παράμετρο της μελέτης, αλλά η αρχική τιμή που παρέχεται από τον κατασκευαστή αξίζει να σημειωθεί ότι άτυπα και από εμπειρική αντιστοιχία συλλεκτικής επιφάνειας και τετραγωνικών μέτρων κτιρίου, μπορεί να ανταπεξέλθει στην θέρμανση ενός δωματίου 12m², σε σύστημα σωμάτων καλοριφέρ. Συνεπώς, στην περίπτωση χρήσης υλικών αλλαγής φάσης για θέρμανση, είναι πολύ πιθανόν να υπάρξει απαίτηση μεγαλύτερης συλλεκτικής επιφάνειας. Ωστόσο, οι δοκιμές της μελέτης θα ξεκινήσουν με την συλλεκτική επιφάνεια του κατασκευαστή, ενδεικτικά.

6.3 Υπολογισμός ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου

Αρχικά, τονίζεται ότι η μελέτη για τους μήνες Νοέμβρη έως και Μάρτιο, αναφέρεται στην 21^η ημέρα κάθε μήνα, εφόσον ερευνητικά δεδομένα αποδεικνύουν τις συνθήκες της ημέρας αντιπροσωπευτικές για ολόκληρο τον μήνα. Οι απαραίτητοι, για την μελέτη, υπολογισμοί, ξεκινούν με την εύρεση της ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου, την οποία απορροφά ο ηλιακός συλλέκτης της εγκατάστασης. Παρακάτω παρατίθενται οι απαραίτητοι ορισμοί και η αλληλουχία των υπολογισμών για το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Το **γεωγραφικό πλάτος φ** (latitude lat) είναι ένα από τα δύο μεγέθη των γεωγραφικών συντεταγμένων με τα οποία προσδιορίζεται η θέση στην επιφάνεια της γης. Συγκεκριμένα, προσδιορίζει την γωνιακή απόσταση των διαφόρων τόπων από τον Ισημερινό, του οποίου το γεωγραφικό πλάτος είναι 0. Αποδίδεται σε

μοίρες, πρώτα και δεύτερα της μοίρας ή ως δεκαδικός αριθμός των παραπάνω, ενώ αποτελεί πάντα διψήφιο αριθμό από 00°-90° Β (Βόρειο-North N) ή 00°-90° Ν (Νότιο-South S). Για την περιοχή της Αθήνας, στην οποία βρίσκεται εφαρμογή η εγκατάσταση της παρούσας μελέτης, το γεωγραφικό πλάτος έχει τιμή **$\varphi=37,97^\circ \text{ B}$** .

Κλίση επιπέδου β είναι η γωνία που σχηματίζει μια επίπεδη επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο, με τιμές $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$. Για το οριζόντιο επίπεδο ορίζεται $\beta=0^\circ$, για το κατακόρυφο $\beta=90^\circ$, ενώ για $\beta > 90^\circ$ το επίπεδο βλέπει προς τα κάτω. Για τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη της εγκατάστασης επιλέγεται η βέλτιστη κλίση για την χειμερινή περίοδο, η οποία πρόκειται για το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής προσαυξημένο κατά 15° , δηλαδή $\beta=37,97^\circ+15^\circ \Rightarrow$ **$\beta=52,97^\circ$** .

Αζιμούθιο επιφανείας γ είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και την νότια κατεύθυνση, με τιμές $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$. Ορίζονται $\gamma=0^\circ$ στον Νότο, $\gamma=90^\circ$ στην Δύση, $\gamma=180^\circ$ στον Βορρά και $\gamma=-90^\circ$ στην Ανατολή. Για τον νότιο προσανατολισμό του ηλιακού συλλέκτη της εγκατάστασης, λοιπόν, θα είναι **$\gamma=0^\circ$** .

Ωριαία γωνία ω είναι η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονά της με ρυθμό $15^\circ/\text{h} = 0,25^\circ/\text{min}$. Λαμβάνεται $\omega < 0$ για π.μ. και $\omega > 0$ για μ.μ. :

$$\omega = 0,25^\circ * (\text{λεπτά (minutes) από ηλιακό μεσημέρι 12:00}) [^\circ] \quad [1]$$

Ηλιακή απόκλιση δ είναι η γωνιακή θέση του ήλιου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Ισχύει $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$, με θετικές τιμές προς τον βορρά και υπολογίζεται από την σχέση :

$$\delta = 23,45 * \sin\left(\frac{360 * (284 + n)}{365}\right) [^\circ] \quad [2]$$

Με $n=1 \div 365$, ο αύξων αριθμός της ημέρας του χρόνου. Για την συγκεκριμένη μελέτη απαιτούνται οι τιμές του n για την 21η ημέρα κάθε μήνα και δίνονται στον παρακάτω πίνακα, παράλληλα με τις αντίστοιχες τιμές της ηλιακής απόκλισης που υπολογίστηκαν :

Μήνας	n (#21ης ημέρας)	δ (rad)
Νοέμβριος	325	-0,35677
Δεκέμβριος	355	-0,40928
Ιανουάριος	21	-0,35147
Φεβρουάριος	2	-0,19594
Μάρτιος	80	-0,00705

Ο **λόγος R_b** της άμεσου στιγμιαίας ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου G_{bT} προς την άμεσο στιγμιαία οριζοντίου επιπέδου G_b , για κεκλιμένες επιφάνειες που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο και είναι στραμμένες προς τον νότο ($\gamma=0^\circ$), υπολογίζεται από την σχέση:

$$R_b = \frac{\sin \delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \omega}{\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega} \quad [3]$$

Άμεσος ακτινοβολία είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην γη κατευθείαν από τον ήλιο χωρίς να μεσολαβήσει διασκορπισμός μέσα στην ατμόσφαιρα. Η στιγμιαία τιμή της άμεσου ακτινοβολίας που δέχεται το οριζόντιο επίπεδο συμβολίζεται με G_b [KW/m^2], ενώ αντίστοιχα για κεκλιμένο επίπεδο με G_{bT} [KW/m^2]. Η άμεσος στιγμιαία ακτινοβολία υπολογίζεται από την σχέση :

$$G_b = M_t + A_t * \sin\left(\frac{360}{365} * D - P_t\right) [KW/m^2] \quad [4]$$

Διάχυτος ακτινοβολία είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη ύστερα από διασκορπισμό και αλλαγή κατεύθυνσης κατά την διαδρομή μέσα στην ατμόσφαιρα. Η στιγμιαία τιμή της άμεσου ακτινοβολίας που δέχεται το οριζόντιο επίπεδο συμβολίζεται με G_d [KW/m^2], ενώ αντίστοιχα για κεκλιμένο επίπεδο με G_{dT} [KW/m^2]. Η διάχυτος στιγμιαία ακτινοβολία υπολογίζεται από την σχέση :

$$G_d = m_t + a_t * \sin\left(\frac{360}{365} * D - p_t\right) \quad [KW/m^2] \quad [5]$$

Για τις σχέσεις ο δείκτης **t** αντιστοιχεί στην ώρα κατά την διάρκεια του 24ώρου με **t=7÷18** ώρες, ενώ στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές των συντελεστών :

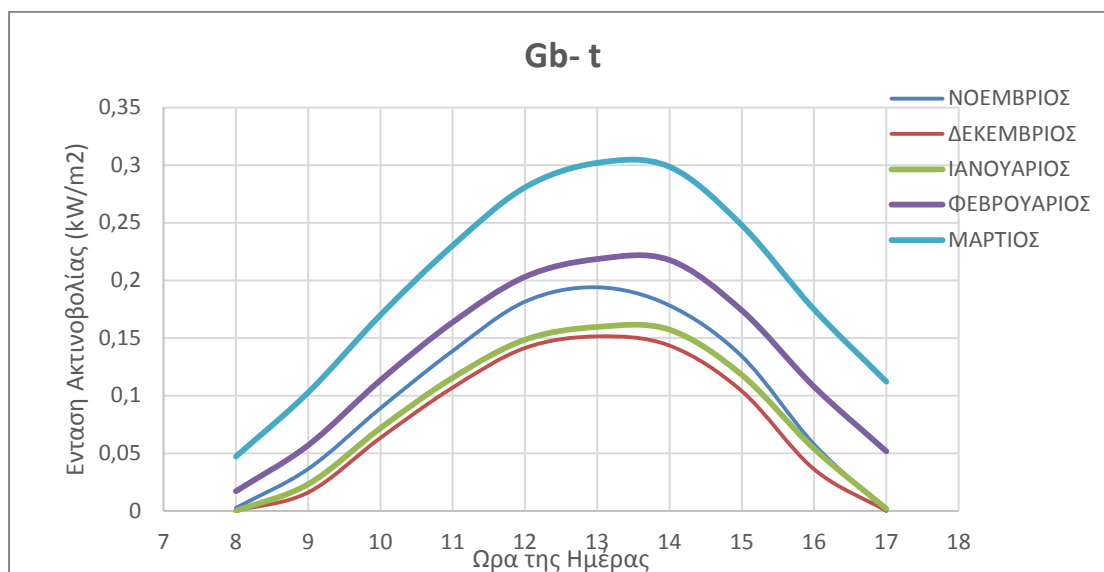
Ώρα ημέρας	Mt	At	Pt	Mt	at	pt
7	0,007	0,046	86,18	0,048	0,111	81,23
8	0,057	0,068	87,31	0,134	0,127	82,45
9	0,119	0,104	87,94	0,208	0,133	83,94
10	0,191	0,129	88,31	0,261	0,129	85,6
11	0,258	0,153	89,35	0,283	0,117	86,05
12	0,319	-0,181	-88,88	0,271	0,099	82,71
13	0,342	-0,194	-89,18	0,243	0,081	81,95
14	0,325	0,183	87,21	0,21	0,083	87,23
15	0,269	0,166	86,22	0,176	0,087	89,53
16	0,183	0,147	82,1	0,141	-0,085	-88,19
17	0,11424	0,131	79,85	0,104	-0,079	-88,97
18	-0,025	0,114	77,36	0,051	0,091	86,79

Ολική ακτινοβολία είναι το άθροισμα της αμέσου και της διαχύτου ηλιακής ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένης και της ανακλώμενης ακτινοβολίας από παρακείμενες επιφάνειες. Η στιγμιαία τιμή της ολικής ακτινοβολίας που δέχεται το οριζόντιο επίπεδο συμβολίζεται με G [KW/m^2], ενώ αντίστοιχα για κεκλιμένο επίπεδο με G_T [KW/m^2]. Η ολική στιγμιαία ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου υπολογίζεται από την σχέση :

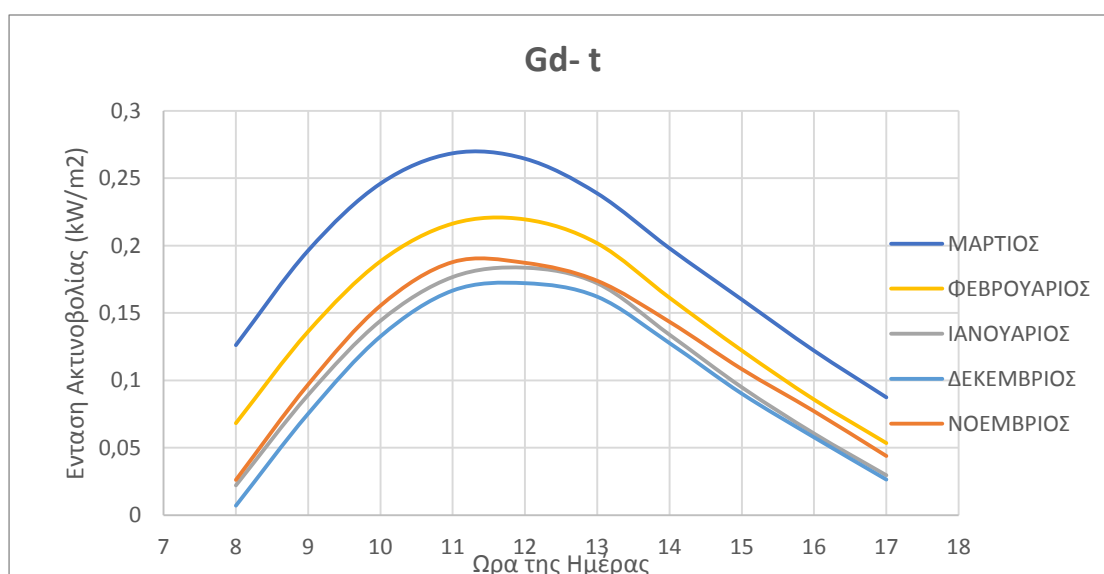
$$G_T = G_b * R_b + G_d * \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + (G_b + G_d) * \rho * \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad [KW/m^2] \quad [6]$$

Όπου ρ η ανακλαστικότητα του εδάφους με τιμές 0,2 για συνηθισμένο έδαφος και μέγιστη τιμή 0,7 για χιονισμένο έδαφος. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται $\rho=0,2$.

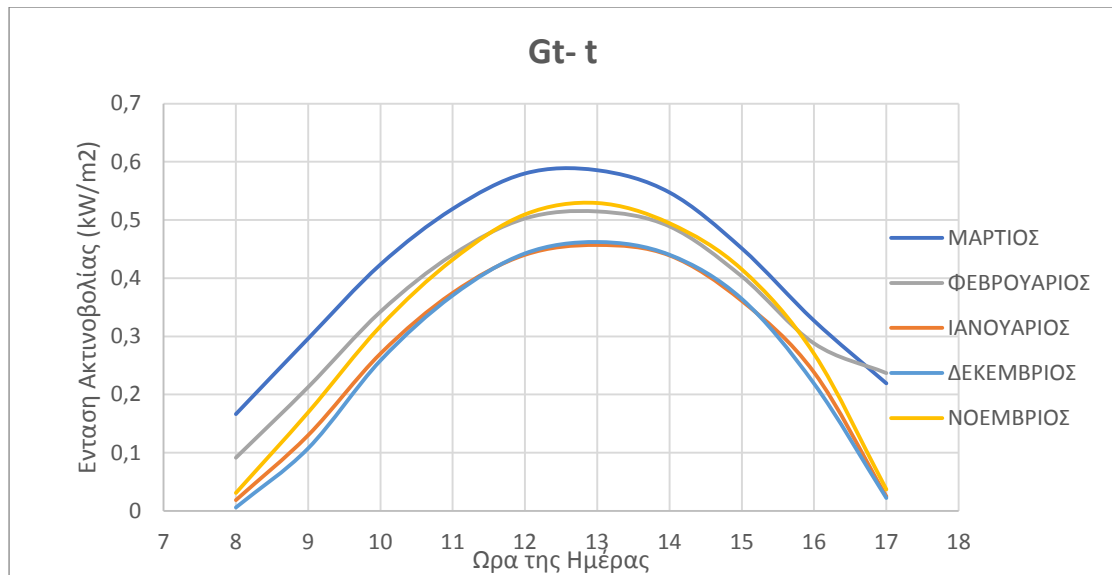
Υπολογίζοντας τα μεγέθη των εξισώσεων [1] έως [6] με χρήση του Excel, για τις ώρες t=7÷18, την 21η ημέρα των μηνών Νοέμβριο έως και Μάρτιο, προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα των G_b , G_d και G_T συναρτήσει του χρόνου :



Σχήμα 6.3: Στιγμαία άμεσος ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου συναρτήσει του χρόνου, την 21^η ημέρα των μηνών Νοέμβριο- Μάρτιο, για την περιοχή της Αθήνας



Σχήμα 6.4: Στιγμαία διάχυτος ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου συναρτήσει του χρόνου, την 21^η ημέρα των μηνών Νοέμβριο- Μάρτιο, για την περιοχή της Αθήνας



Σχήμα 6.5: Στιγμαία ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου συναρτήσει του χρόνου, την 21^η ημέρα των μηνών Νοέμβριο- Μάρτιο, για την περιοχή της Αθήνας

6.4 Υπολογισμός θερμοκρασίας περιβάλλοντος

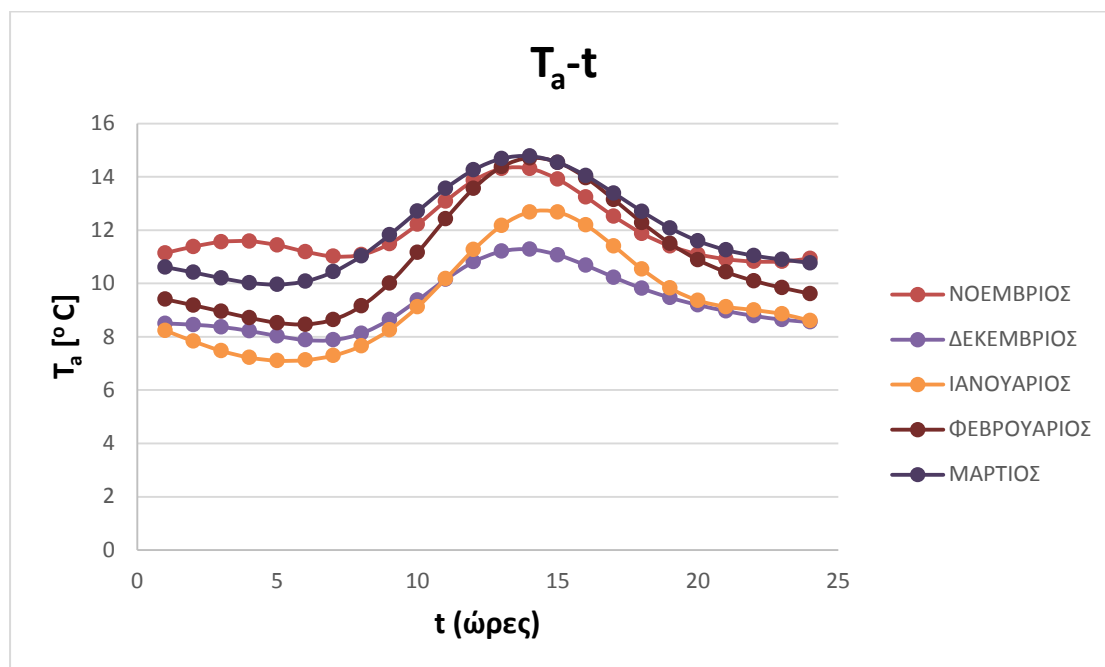
Για τον υπολογισμό της ωφέλιμης ισχύος του ηλιακού συλλέκτη ανά ώρα είναι απαραίτητες οι αντίστοιχες τιμές της θερμοκρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος την 21^η ημέρα κάθε εξεταζόμενου μήνα. Μία προσεγγιστική σχέση υπολογισμού της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στην περιοχή της Αθήνας, προέκυψε με στατιστική επεξεργασία μετρήσεων της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, στον Τομέα Θερμότητας Ε.Μ.Π. και δίνεται παρακάτω :

$$T_a(H) = M + \sum_{i=1}^a C_i \cos \left[i \frac{360}{24} (H - 0,5) \right] + \sum_{i=1}^a S_i \sin \left[i \frac{360}{24} (H - 0,5) \right] \quad [7]$$

Ο δείκτης **H** αντιστοιχεί στην ώρα κατά την διάρκεια του 24ώρου, ενώ στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές των συντελεστών M , C_i , S_i κάθε μήνα:

21 ^η ημέρα	M	C ₁	C ₂	C ₃	S ₁	S ₂	S ₃
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	11,968	-1,3	0,616	-0,252	-0,317	0,629	-0,049
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	9,264	-1,11	0,521	-0,152	-0,881	0,333	0,008
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	9,384	-1,673	0,711	0,0085	-1,723	0,524	-0,241
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	10,984	-2,15	0,785	-0,107	-1,75	0,578	-0,0724
ΜΑΡΤΙΟΣ	11,955	-1,898	0,651	-0,0097	-1,084	0,256	-0,0093

Υπολογίζοντας τα μεγέθη της εξίσωσης [7] με χρήση του Excel, για κάθε ώρα του 24ώρου την 21^η ημέρα κάθε μήνα, προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα της T_a συναρτήσεως του χρόνου :



Σχήμα 6.4: Ωριαία θερμοκρασία περιβάλλοντος συναρτήσεως του χρόνου, την 21^η ημέρα των μηνών Νοέμβριο- Μάρτιο, για την περιοχή της Αθήνας

6.5 Μεθοδολογία μελέτης

6.5.1 Υπολογιστική διαδικασία

Η μελέτη της εγκατάστασης έχει ως αντικειμενικό στόχο την προσέγγιση του θερμοκρασιακού προφίλ του υλικού αλλαγής φάσης, και την εκτίμηση της ροής θερμότητας από το υλικό προς τον εσωτερικό περιβάλλον (δωμάτιο). Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στηρίζεται στην επαναληπτική επίλυση των παραμετρικών εξισώσεων, οι οποίες αφορούν στην αποδιδόμενη ισχύς ηλιακού συλλέκτη, στην ενέργεια που καταναλώνεται για το νερό χρήσης καθώς και τους ισολογισμούς θερμότητας στα όρια της δεξαμενής και στον όγκο του PCM.

Θεωρούμε ότι η θερμοκρασία του υλικού στην αρχή κάθε ώρας του 24ώρου είναι ίση με T_{PCM}^{PPIN} , ενώ στο τέλος της ώρας έχει μεταβληθεί

στην τιμή T_{PCM}^{META} . Προφανώς, το τέλος κάθε ώρας ταυτίζεται με την αρχή της επόμενης, άρα η θερμοκρασία T_{PCM}^{META} της προηγούμενης ώρας αποτελεί την θερμοκρασία T_{PCM}^{PPIN} της επόμενης. Με την ίδια λογική, η θερμοκρασία του υλικού στο τέλος του 24ώρου αποτελεί την αρχική θερμοκρασία του επόμενου 24ώρου.

Η εξέταση της θεωρητικής αυτής εφαρμογής προορίζεται για τους χειμερινούς μήνες, Νοέμβριο-Μάρτιο. Ωστόσο, λόγω της πληθώρας των πειραματικών αποτελεσμάτων (διαγράμματα κλπ), η προσέγγιση πραγματοποιείται ενδεικτικά, **μόνο** για τον **Ιανουάριο**. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, οι υπολογισμοί αφορούν την **21η ημέρα** του Ιανουαρίου, αφού θεωρείται αντιπροσωπευτική των συνθηκών ολόκληρου του μήνα.

6.5.2 Αποδιδόμενη ισχύς ηλιακού συλλέκτη

Η συναλλαγή θερμότητας του θερμού νερού του ηλιακού συλλέκτη με τη δεξαμενή, θεωρούμε για λόγους απλότητας ότι πραγματοποιείται **χωρίς θερμικές απώλειες**. Συνεπώς, η πραγματικά αποδιδόμενη θερμική ισχύς του ηλιακού συλλέκτη, προσδίδεται πλήρως στη δεξαμενή και δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$Q_u^{SYM} = A_c * [F_R(\tau\alpha) * G_T - F_R U_L * (T_{fi} - T_a)] \quad [W] \quad [8]$$

όπου:

- **A_c**: η επιφάνεια του συλλέκτη [m²].
- **F_R(τα)**: το γινόμενο του παράγοντα θερμικής απολαβής του συλλέκτη **F_R**, της διαπερατότητας του καλύμματος **τ** και της απορροφητικότητας του απορροφητήρα του συλλέκτη **α**.
- **G_T**: ολική στιγμιαία ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου [KW/m²].
- **F_RU_L**: το γινόμενο του παράγοντα θερμικής απολαβής του συλλέκτη **F_R** και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας **U_L** [W/ m²K], που εκφράζει τις θερμικές απώλειες από τον συλλέκτη στο περιβάλλον δι' αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας.
- **T_{fi}**: θερμοκρασία εισόδου του νερού κυκλοφορίας στο συλλέκτη [°C]
- **T_a**: θερμοκρασία περιβάλλοντος [°C]

Για την επίλυση της εξίσωσης [8] για κάθε ώρα απαιτείται η υπόθεση μίας αρχικής τιμής για την θερμοκρασία εισόδου του νερού στον συλλέκτη, η οποία θα ταυτίζεται με την θερμοκρασία εξόδου της δεξαμενής. Υποθέτοντας T_{fi} ΑΡΧΙΚΗ, υπολογίζεται η πρώτη τιμή της αποδιδόμενης ισχύος για την συνέχεια των υπολογισμών που θα αναλυθούν παρακάτω. Για την διεκπεραίωση της μελέτης θα θεωρηθεί ότι κάθε τιμή της θερμοκρασία T_{fi} θα ισούται με την θερμοκρασία εξόδου της δεξαμενής στο τέλος της προηγούμενης ώρας. Δηλαδή, η έξοδος του νερού από τη δεξαμενή στο τέλος της ώρας θα έχει θερμοκρασία $T_{\Delta EE}^{META}$, η οποία βέβαια ταυτίζεται με την είσοδο του νερού στον συλλέκτη στην αρχή της επόμενης ώρας.

Η θερμότητα που λαμβάνει το νερό της δεξαμενής αποδίδεται σε θερμότητα για το νερό χρήσης $Q_{u,x}$ και θερμότητα για το νερό που θα κυκλοφορήσει τον τοίχο $Q_{u,PCM}$.

Το νερό κυκλοφορίας της σερπαντίνας στον τοίχο εισέρχεται στην αρχή της ώρας με θερμοκρασία $T_{\Delta EE}^{META}$ και εξέρχεται στο τέλος της ώρας με θερμοκρασία ίση με το υλικό αλλαγής φάσης, T_{PCM}^{META} .

Η ενέργεια που καταναλώνεται για το νερό χρήσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_{u,x} = \dot{m}_x C_{P_w} (T_{\Delta EE}^{META} - T_{\Delta ΙΚΤΥΟΥ}) \quad [9]$$

όπου:

- \dot{m}_x : παροχή νερού χρήσης
- C_{P_w} : ειδική θερμοχωρητικότητα νερού υπό σταθερή πίεση 4,190 [KJ/Kg K]
- $T_{\Delta ΙΚΤΥΟΥ}$: η θερμοκρασία του δικτύου όπου την θεωρούμε σταθερή και ίση με 10,4 [°C] για τον μήνα Ιανουάριο.

Η παροχή μάζας \dot{m}_x αφορά την ωριαία κατανάλωση ζεστού νερού χρήσης το χειμώνα. Η κατανάλωση του ζεστού νερού χρήσης από τη δεξαμενή συμπληρώνεται απευθείας από το δίκτυο, κρατώντας σταθερή την περιεκτικότητα νερού της δεξαμενής. Οι τιμές της παροχής \dot{m}_x για ολόκληρο το 24ωρο, που λήφθηκαν από το διαθέσιμο προφίλ Κατανάλωσης Ζεστού νερού χρήσης 24ωρου της πορτογαλικής εταιρείας Netgreen Solar, δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Ώρα	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
\dot{m}_x [kg/h]	2,2	1,7	1,2	0,8	1,4	2,1	5,5	10,8	9,2	7,2	7	6
Ώρα	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
\dot{m}_x [kg/h]	5	4	3,5	3,6	4,1	6,2	7,2	8,8	10,8	8,6	7,5	4,1

Πίνακας 6.5: 24ωρη κατανάλωση ζεστού νερού χρήσης

6.5.3 Εφαρμογή μεθόδου ενεργού θερμοχωρητικότητας

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, για την προσομοίωση της συμπεριφοράς και της μεταβολής κατάστασης του υλικού αλλαγής φάσης, θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της Ενεργού Θερμοχωρητικότητας.

Η μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της C_{Peff} του υλικού αλλαγής φάσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του υλικού. Ωστόσο, στους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται οι ιδιότητες του υλικού που αναφέρονται παρακάτω :

- T_s : θερμοκρασία πλήρους στερεοποίησης του PCM (έναρξη στερεής κατάστασης- solid) [$^{\circ}C$]
- T_l : θερμοκρασία πλήρους υγροποίησης του PCM (έναρξη υγρής κατάστασης- liquid) [$^{\circ}C$]
- T_c : θερμοκρασία στο μέσο της διφασικής περιοχής [$^{\circ}C$]

$$T_c = \frac{T_s + T_l}{2}$$

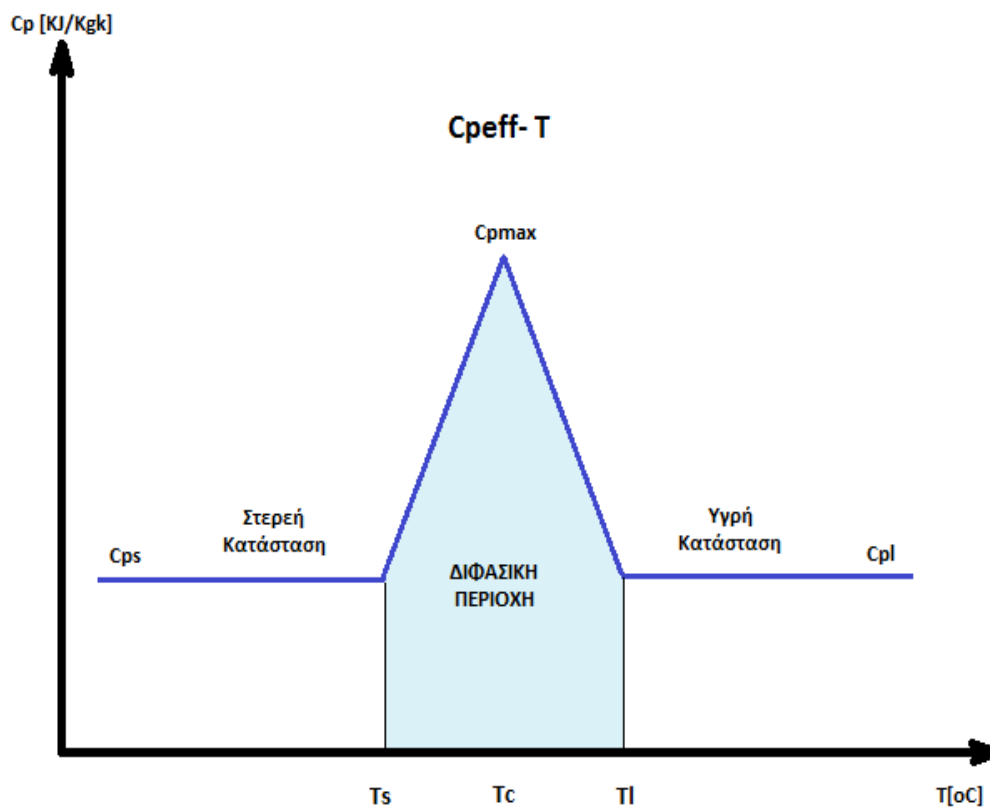
- C_{Ps} : ειδική θερμοχωρητικότητα στερεής κατάστασης [KJ/Kg K]
- C_{Pl} : ειδική θερμοχωρητικότητα υγρής κατάστασης [KJ/Kg K]
- C_{Pmax} : μέγιστη θερμοχωρητικότητα υλικού για θερμοκρασία T_c [KJ/Kg K]
- b : θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης του υλικού

$$b = T_l - T_s$$

- $C_{Peff}(T)$: ενεργός θερμοχωρητικότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας του υλικού [KJ/Kg K]

Ο κύκλος μεταβολών του PCM, σύμφωνα με την μέθοδο, προσεγγίζεται από την εξής συνάρτηση τριγωνικής μορφής (τριγωνική καμπύλη), η οποία απεικονίζεται και στο παρακάτω κάτω σχήμα :

$$\frac{|C_{peff}(T) - C_{ps}|}{T - T_S} = \frac{C_{pmax} - C_{ps}}{T_C - T_S} \quad [10]$$



Σχήμα 6.6: Καμπύλη προσέγγισης πλήρους κύκλου μεταβολών κατάστασης του PCM

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, η καμπύλη απεικονίζει τον κύκλο φόρτισης και αποφόρτισης του PCM, που αντιστοιχεί στην πλήρη τήξη του υλικού και την πλήρη επαναφορά του στην στερεή κατάσταση μέσω της στερεοποίησης (ιδανική περίπτωση).

Το ολικό εμβαδόν κάτω από την καμπύλη εκφράζει την θερμότητα αλλαγής φάσης του υλικού, η οποία υπολογίζεται από την εξής σχέση :

$$H = (T_c - T_s) * (C_{Pmax} + C_{Ps}) \quad [11]$$

Ωστόσο, η τιμή της H συνήθως συμπεριλαμβάνεται στις ιδιότητες του PCM που παρέχονται από την εταιρεία κατασκευής, όσον αφορά τα υλικά του εμπορίου.

Με γνωστή την θερμοκρασία $T = T_{\Delta E \Xi, \Pi P I N}$, προχωράμε στον υπολογισμό της ενεργούς θερμοχωρητικότητας του υλικού για ολόκληρη την ώρα, που δίνεται από τις επόμενες σχέσεις, ανάλογα με την θερμοκρασίας :

- Για το θερμοκρασιακό εύρος $T_s \leq T \leq T_c$, εφαρμόζεται η σχέση:

$$C_{P_{eff}} = 4(H - b * C_{Ps}) * \frac{(T - T_s)}{b^2} + C_{Ps} \quad [12]$$

- Για το θερμοκρασιακό εύρος $T_c \leq T \leq T_l$, εφαρμόζεται η σχέση:

$$C_{P_{eff}} = 4(b * C_{Pl} - H) * \frac{(T - T_s - \frac{b}{2})}{b^2} + \frac{2H}{b} - C_{Ps} \quad [13]$$

Επομένως, για κάθε τιμή της θερμοκρασίας του υλικού στην αρχή της ώρας, T_{PCM}^{PPIN} , υπολογίζεται η αντίστοιχη ενεργός θερμοχωρητικότητα, μέγεθος απαραίτητο για την συνέχιση των υπολογισμών. Η χρήση της T_{PCM}^{PPIN} , αντί για την μέση θερμοκρασία της ώρας (ημιάθροισμα των T_{PCM}^{PPIN} και T_{PCM}^{META}), γίνεται για λόγους ευκολίας στην υπολογιστική διαδικασία, αφού αποφέρει σφάλμα μικρής τάξης. Με την ολοκλήρωση της επαναληπτικής διαδικασίας των τριών 24ώρων, το θερμοκρασιακό προφίλ του υλικού υποδεικνύει το θερμοκρασιακό εύρος μέσα στο οποίο λειτούργησε το PCM. Δύναται, με αυτόν τον τρόπο, η απεικόνιση του κύκλου φόρτισης και αποφόρτισης του υλικού, σε διάγραμμα όμοιο του Σχήματος 6.6. Μέσω της 'τροχιάς' του υλικού πάνω στην καμπύλη πλήρους μεταβολής κατάστασης, φαίνεται το ποσοστό εκμετάλλευσής του στην συγκεκριμένη εφαρμογή. Σημειώνεται ότι σε πραγματικές συνθήκες και εγκαταστάσεις τα υλικά αλλαγής φάσης

του εμπορίου δεν καταφέρνουν να πραγματοποιήσουν τον πλήρη κύκλο φόρτισης και αποφόρτισης.

Με τον υπολογισμό του εμβαδού H_o της καμπύλης που διαγράφει ο κύκλος του PCM σε κάθε ολοκλήρωση της επαναληπτικής διαδικασίας, ορίζεται ο **βαθμός εκμετάλλευσης ε** του υλικού από την παρακάτω σχέση :

$$\varepsilon = \frac{H_o}{H} \quad [14]$$

6.5.4 Ισολογισμός συναλλασσόμενης θερμότητας

Γνωρίζοντας πλέον όλα τα απαραίτητα μεγέθη, υπολογίζεται η θερμοκρασία του υλικού στο τέλος της ώρας $T_{\Delta E \Xi}^{META}$ μέσω της παρακάτω σχέσης που εκφράζει τον ισολογισμό θερμότητας στα όρια της δεξαμενής θεωρώντας μηδενικές τις απώλειες προς το περιβάλλον:

$$\begin{aligned} Q_{u,SYLL}^{PPIN} * 3600 - Q_{u,X}^{PPIN} * 3600 - \dot{m}_w C_{P_w} (T_{\Delta E \Xi}^{META} - T_{PCM}^{PPIN}) \\ = M C_{P_w} (T_{\Delta E \Xi}^{META} - T_{\Delta E \Xi}^{PPIN}) \quad => \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{u,SYLL}^{PPIN} * 3600 - \dot{m}_\chi C_{P_w} (T_{\Delta E \Xi}^{META} - T_{ΔΙΚΤΥΟΥ}) * 3600 - \dot{m}_w C_{P_w} (T_{\Delta E \Xi}^{META} - T_{PCM}^{PPIN}) \\ = M C_{P_w} (T_{\Delta E \Xi}^{META} - T_{\Delta E \Xi}^{PPIN}) \quad => \end{aligned}$$

$$T_{\Delta E \Xi}^{META} = \frac{Q_{u,SYLL}^{PPIN} * 3600 + C_{P_w} (\dot{m}_\chi T_{\Delta ΙΚΤΥΟΥ} + \dot{m}_w T_{PCM}^{PPIN} + M T_{\Delta E \Xi}^{PPIN})}{C_{P_w} (\dot{m}_\chi + \dot{m}_w + M)}$$

Επιπλέον, από την σχέση ισολογισμού θερμότητας για τον όγκο του του PCM, υπολογίζεται η θερμοκρασία του PCM στο τέλος της ώρας T_{PCM}^{META} :

$$\dot{m}_w C_{P_w} (T_{\Delta E \Xi}^{META} - T_{PCM}^{\mu\epsilon\tau\alpha}) = U_T A_T (T_{PCM}^{META} - T_{\Delta\Omega M}) + V_{PCM} * \rho_{PCM} * C_{P_{eff}} (T_{PCM}^{META} - T_{PCM}^{PPIN})$$

$$\Rightarrow T_{PCM}^{META} = \frac{\dot{m}_w C_{P_w} T_{\Delta E \Xi}^{META} + U_T A_T T_{\Delta\Omega M} + V_{PCM} * \rho_{PCM} * C_{P_{eff}} T_{PCM}^{PPIN}}{\dot{m}_w C_{P_w} + U_T A_T + V_{PCM} * \rho_{PCM} * C_{P_{eff}}}$$

Όπου:

- $V_{PCM} * \rho_{PCM} = m_{PCM} = l_{PCM} * A_T * \rho_{PCM}$
- C_{P_w} : ειδική θερμοχωρητικότητα νερού υπό σταθερή πίεση 4,190 [KJ/Kg K]
- \dot{m}_w : παροχή νερού στο δίκτυο PCM
- A_C : επιφάνεια ηλιακού συλλέκτη [m²]
- U_T : συντελεστής θερμικών απωλειών τοίχου
- A_T : Επιφάνεια τοίχου και ίση με 9 [m²]
- M : μάζα νερού δεξαμενής

Για την παραμετρική μελέτη του κυκλώματος που παρουσιάζεται παραπάνω αναπτύχθηκε υπολογιστικός κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran. Ο σκοπός της επαναληπτικής διαδικασίας που δομήθηκε είναι η προσέγγιση εκείνων των αρχικών τιμών της θερμοκρασίας του PCM και της δεξαμενής τη χρονική στιγμή t=0s για τις οποίες οι κατανομές των θερμοκρασιών σε χρονικό ορίζοντα 3 εικοσιτετράωρων συγκλίνουν σε μια μόνιμη χρονική μεταβολή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Παραμετρική μελέτη

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζονται και σχολιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραμετρική ανάλυση του κυκλώματος που αναλύθηκε παραπάνω. Στόχος της ανάλυσης είναι η εξαγωγή ποιοτικών συμπερασμάτων όσον αφορά τη μεταβολή διαφόρων χαρακτηριστικών μεγεθών του κυκλώματος και όχι ο ποσοτικός προσδιορισμός τους. Για το λόγο αυτό στην ανάλυσή μας χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας και της ημερήσιας θερμοκρασιακής διακύμανσης του τυπικού εικοσιτετραώρου του Ιανουαρίου και χρονικό βήμα ίσο με μια ώρα.

Οι τιμές που θεωρήθηκαν σταθερές καθ' όλη την παραμετρική μελέτη είναι:

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΩΜΑΤΙΟΥ		
Επιφάνεια Τοίχου	A_T [m ²]	9
Θερμοκρασία Δωματίου	T_{Δ} [°C]	20

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΛΛΕΚΤΗ	
F_R (τα)	0,64
$F_R U_L$ [W/m ² °C]	4,23

Θερμική Συναγωγιμότητα Εσωτερικού Περιβάλλοντος	h_{in} [W/m ² K]	8
Θερμική Αγωγιμότητα Γυψοσανίδας	$k_{γυψ}$ [W/mK]	0,21
Πάχος Γυψοσανίδας	$l_{γυψ}$ [m]	0,01
Θερμική Διαπερατότητα	U [W/m ² K]	5,793103448

Ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας για την συναλλαγή PCM - Δωματίου αφορά τα υλικά διαμέσου των οποίων πραγματοποιείται η συναλλαγή θερμότητας, δηλαδή τη γυψοσανίδα και του αέρα εσωτερικού περιβάλλοντος του δωματίου. Δίνεται από την σχέση :

$$\frac{1}{U} = \frac{l_{\Gamma\Upsilon\psi}}{k_{\Gamma\Upsilon\psi}} + \frac{1}{h_{in}}$$

7.1 Υλικό PCM SP25A8

Τα χαρακτηριστικά του υλικού παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

SP25A8		
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης	H [J/Kg]	141500
Θερμοκρασία Στερεοποίησης	T _s [°C]	22
Θερμοκρασία Τήξης	T _l [°C]	32
Θερμοκρασιακό Εύρος	b=T _l -T _s	10
Μέση Θερμοκρασία Διφασικής Περιοχής	T _c [°C]	27
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Φάσης	C _{p s} [J/Kg K]	2600
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Φάσης	C _{p l} [J/Kg K]	2700
Μέγιστη Θερμοχωρητικότητα	C _{p max} [J/KgK]	25700

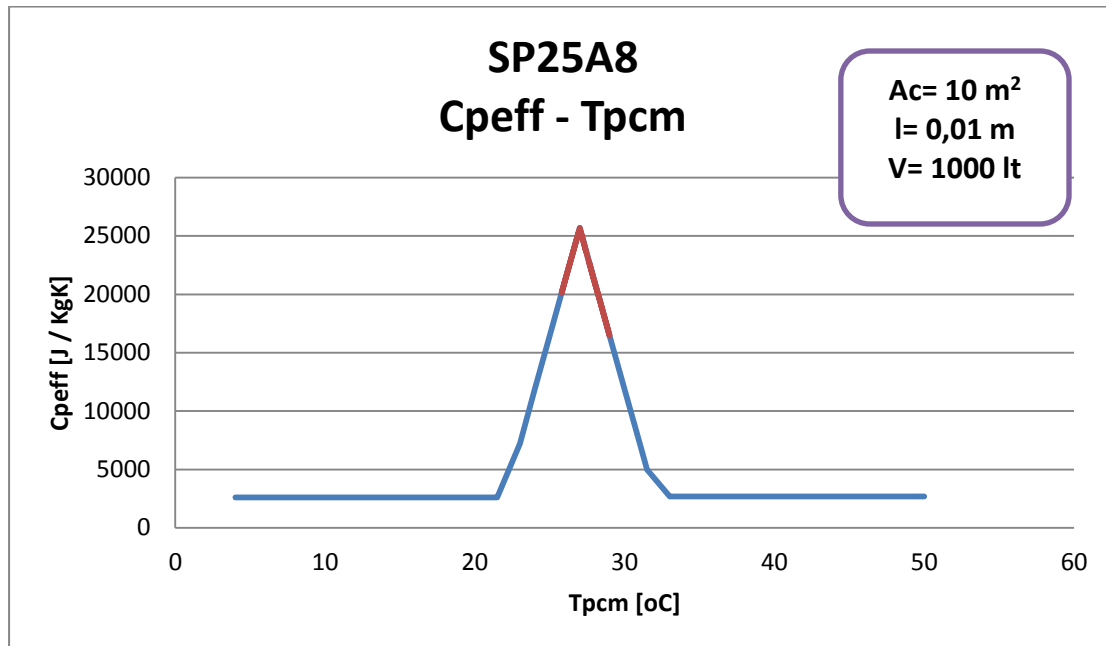
ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΓΙΑ SP25A8	
Όγκος δεξαμενής	V= 1000 lt
Πάχος PCM	l= 0,01 m

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή θερμοχωρητικότητας του υλικού με παράμετρο την επιφάνεια του συλλέκτη.

Όπως είναι αναμενόμενο η αύξηση της επιφάνειας του συλλέκτη έχει ως αποτέλεσμα την απορρόφηση μεγαλύτερων ποσών θερμότητας από το συλλέκτη και συνεπώς την αύξηση της θερμοκρασίας του PCM και τη λειτουργία του σε περιοχές που ξεκινούν από τη στερεή φάση για μικρές επιφάνειες συλλέκτη και μετακινούνται προς την περιοχή της υγρής φάσης για πολύ μεγάλη επιφάνεια συλλέκτη.

Όσον αφορά την αποτελεσματικότητα, η βέλτιστη τιμή της είναι ίση με $\varepsilon=0,49$ και εμφανίζεται για την περίπτωση που η επιφάνεια συλλέκτη είναι $A_c= 10 \text{ m}^2$, ενώ η μικρότερη τιμή της είναι $\varepsilon=0,1$ και εμφανίζεται για επιφάνεια συλλέκτη $A_c= 20 \text{ m}^2$.

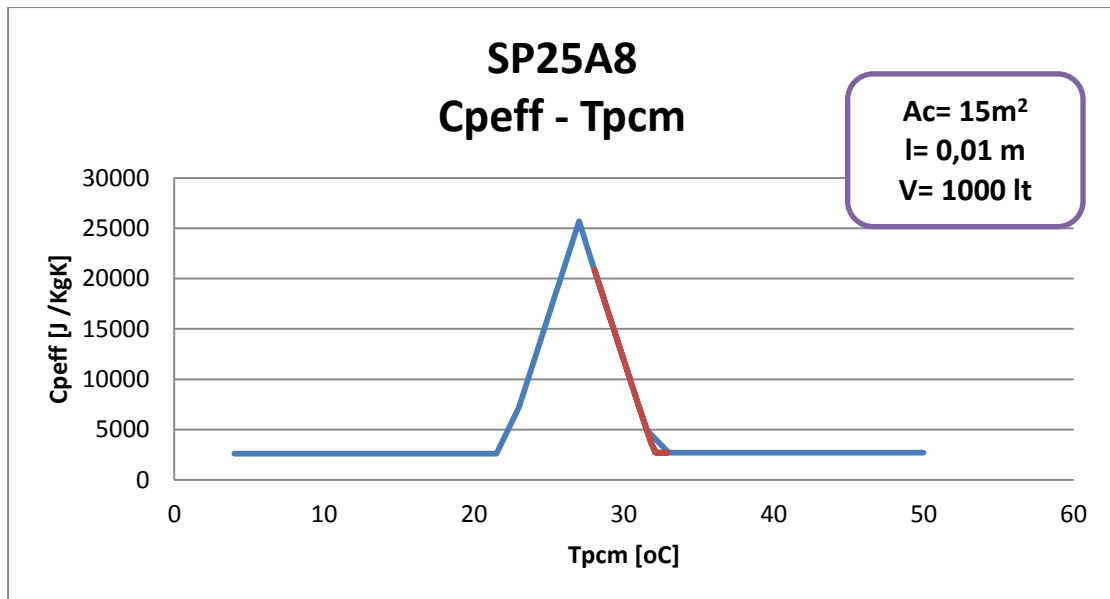
➤ Για επιφάνεια συλλέκτη $A_c= 10 \text{ m}^2$:



Σχήμα 7.1 Καμπύλη κύκλου φόρτισης- αποφόρτισης του υλικού

Ο βαθμός εκμετάλλευσης είναι $\varepsilon = \frac{H_o}{H} = 0,49$.

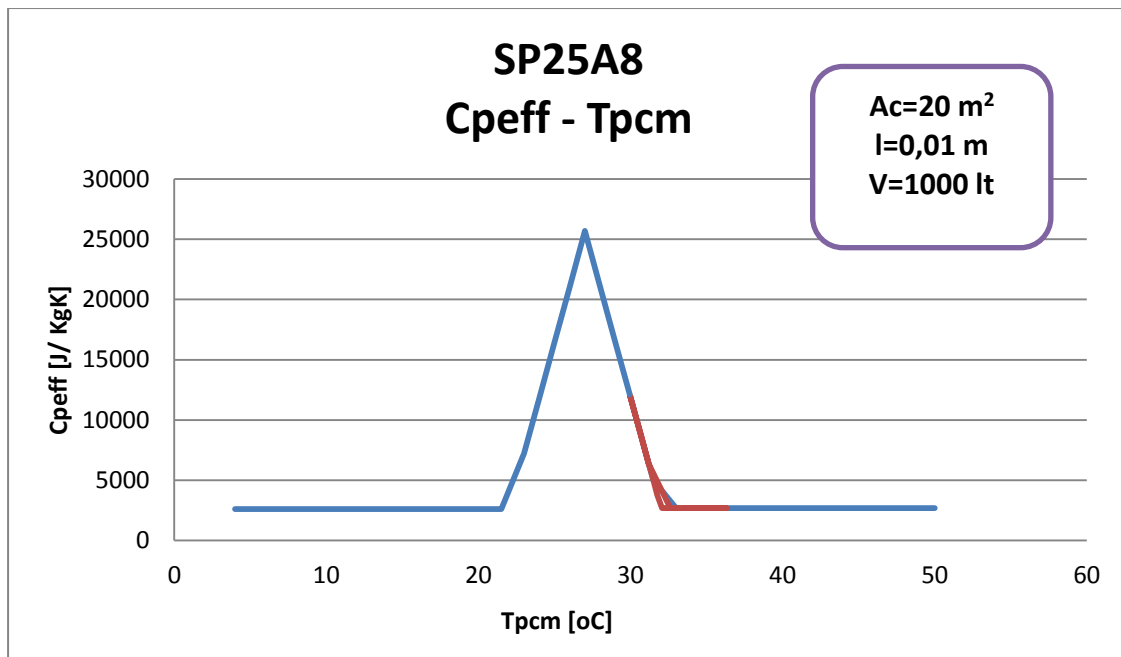
➤ Για επιφάνεια συλλέκτη $A_c= 15 \text{ m}^2$:



Σχήμα 7.2 Καμπύλη κύκλου φόρτισης- αποφόρτισης του υλικού

Ο βαθμός εκμετάλλευσης είναι $\varepsilon = \frac{H_o}{H} = 0,35$.

➤ Για επιφάνεια συλλέκτη $A_c = 20 \text{ m}^2$:



Σχήμα 7.3 Καμπύλη κύκλου φόρτισης- αποφόρτισης του υλικού

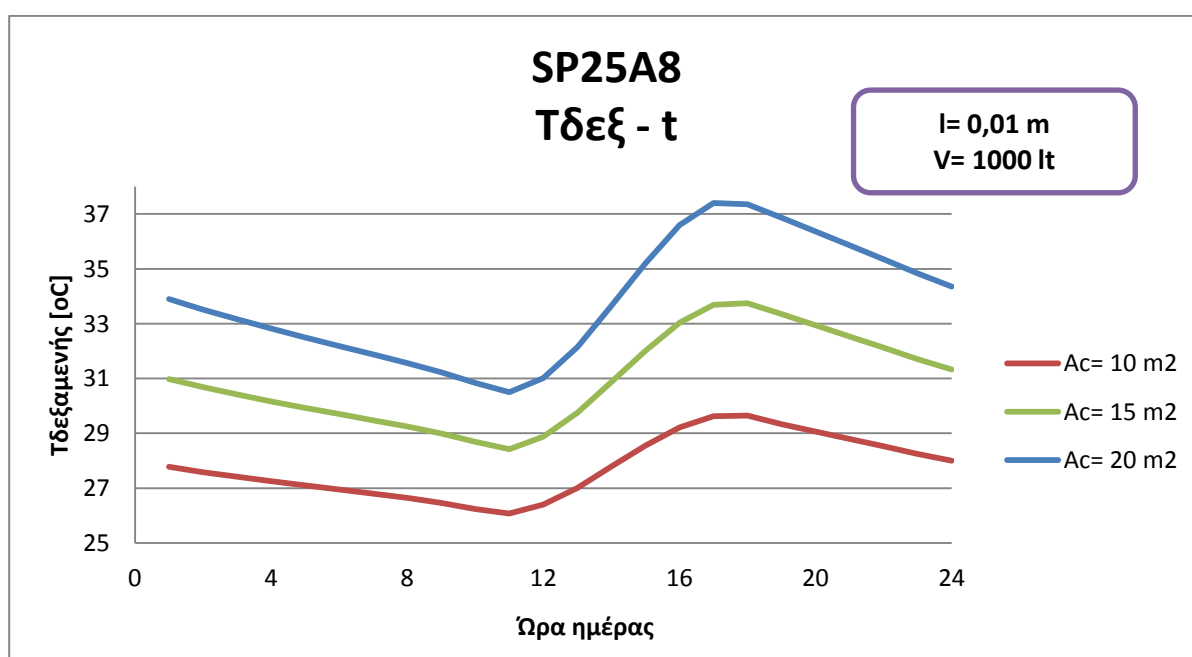
Ο βαθμός εκμετάλλευσης είναι $\varepsilon = \frac{H_o}{H} = 0,1$.

7.2 Δοκιμές για PCM SP25A8

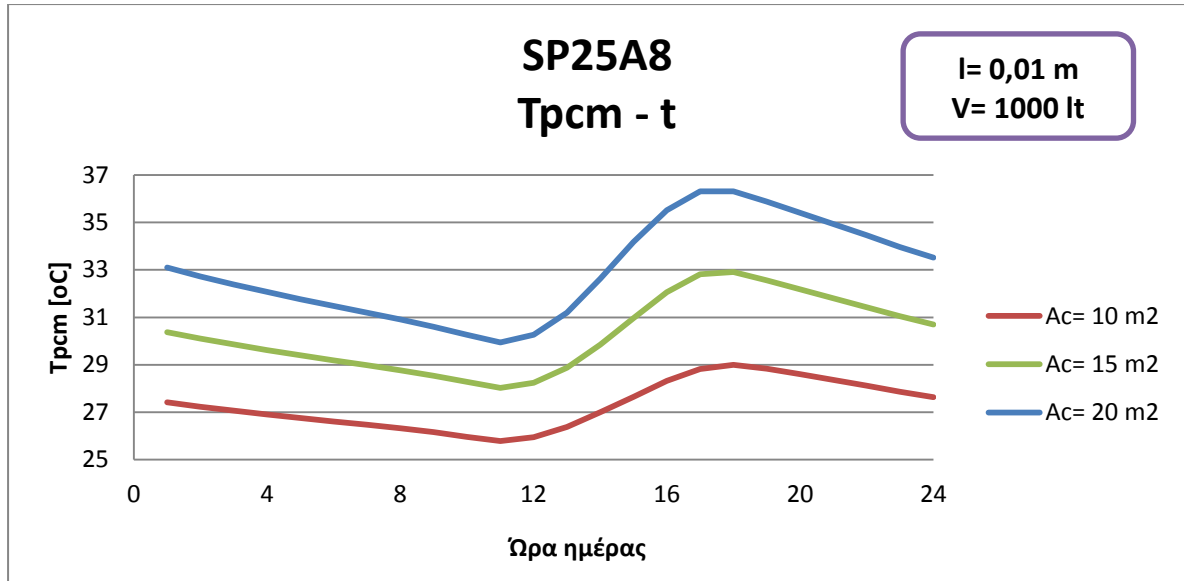
7.2.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων για διαφορετικές επιφάνειες συλλέκτη Ac

7.2.1.1 1^η Περίπτωση

ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ 1 ^{ης} ΔΟΚΙΜΗΣ [SP25A8]	
Όγκος δεξαμενής	V= 1000 lt
Πάχος PCM	l= 0,01 m



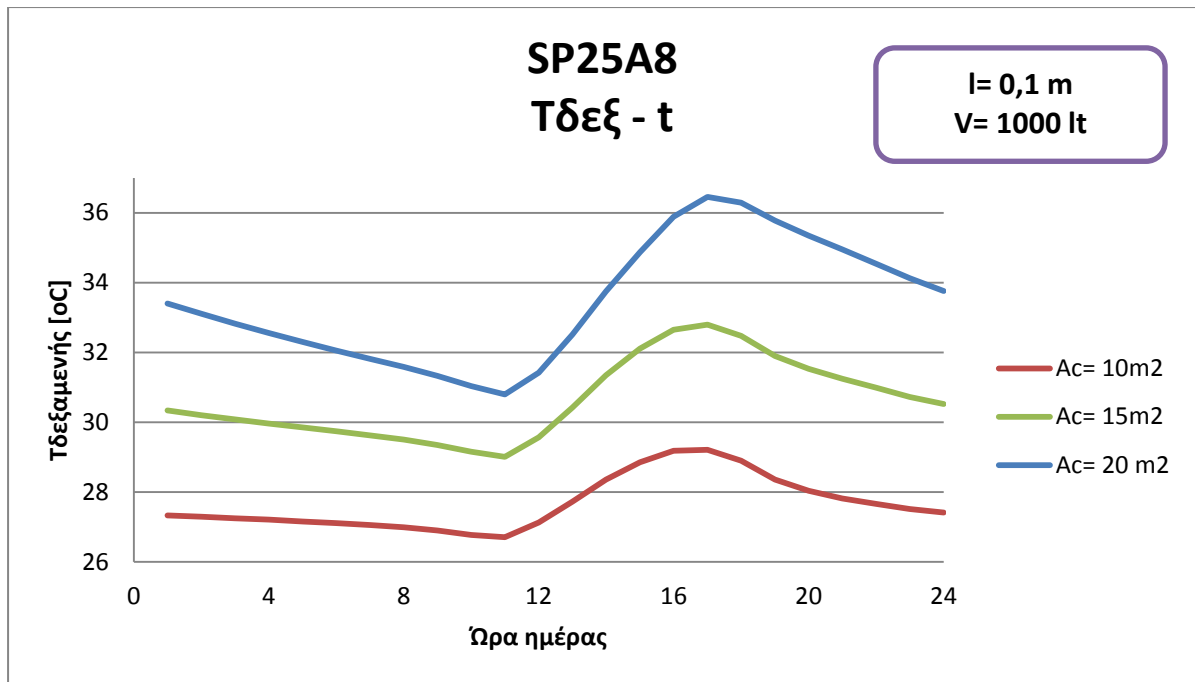
Σχήμα 7.4 Θερμοκρασιακό προφίλ δεξαμενής



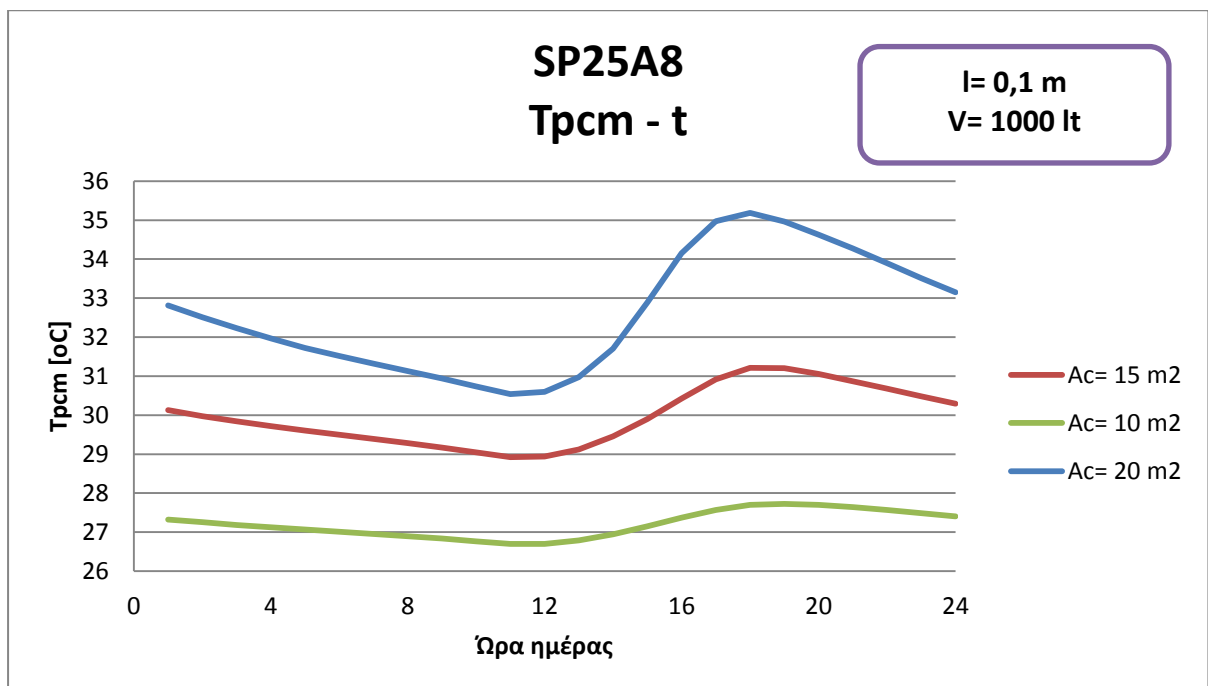
Σχήμα 7.5 Θερμοκρασιακό προφίλ PCM

7.2.1.2 2^η Περίπτωση

ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ 2^{ης} ΔΟΚΙΜΗΣ [SP25A8]	
Όγκος δεξαμενής	V= 1000 lt
Πάχος PCM	l= 0,1 m



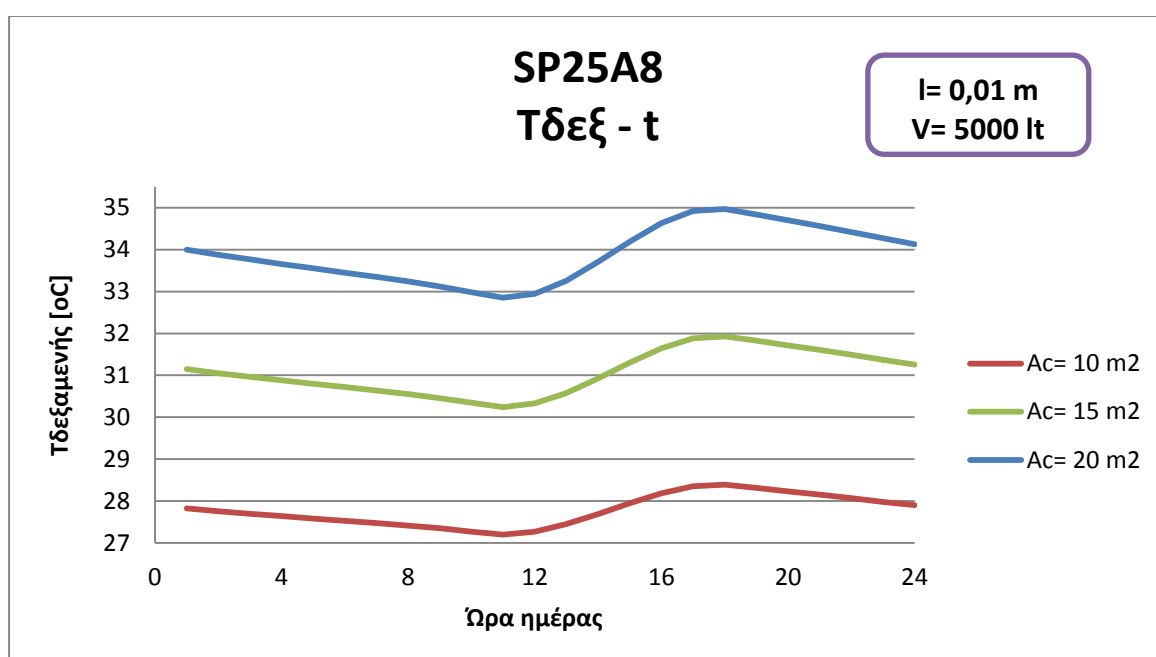
Σχήμα 7.6 Θερμοκρασιακό προφίλ δεξαμενής



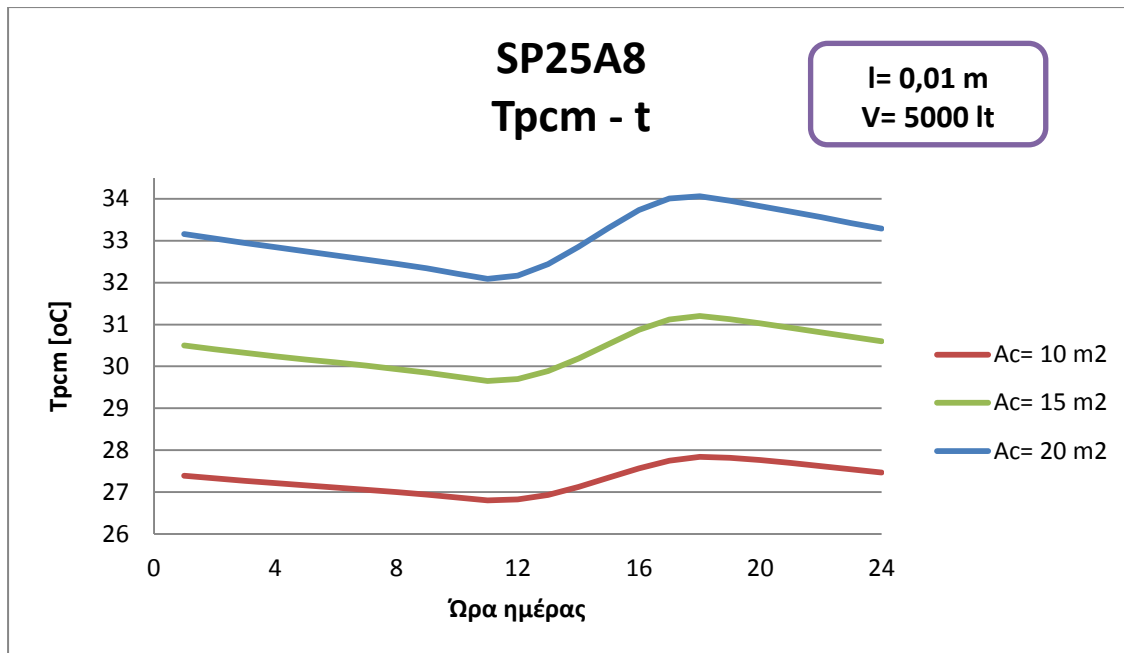
Σχήμα 7.7 Θερμοκρασιακό προφίλ PCM

7.2.1.3 3^η Περίπτωση

ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ [SP25A8]	
Όγκος δεξαμενής	V= 5000 lt
Πάχος PCM	l= 0,01 m



Σχήμα 7.8 Θερμοκρασιακό προφίλ δεξαμενής



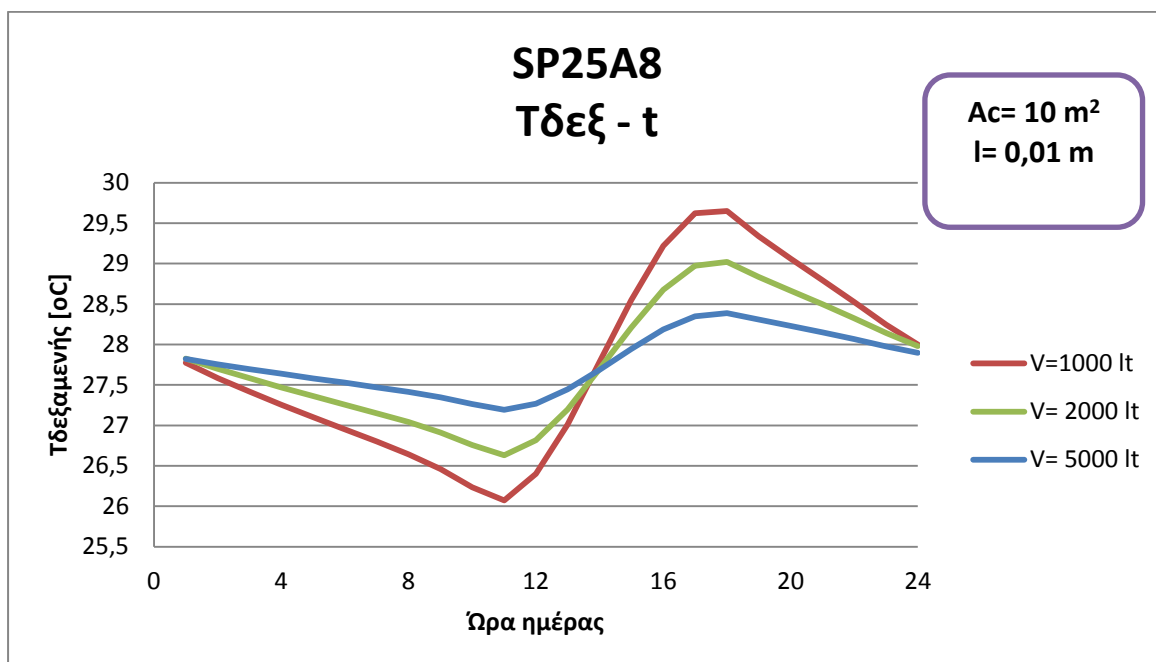
Σχήμα 7.9 Θερμοκρασιακό προφίλ PCM

7.2.1.4 Συμπεράσματα

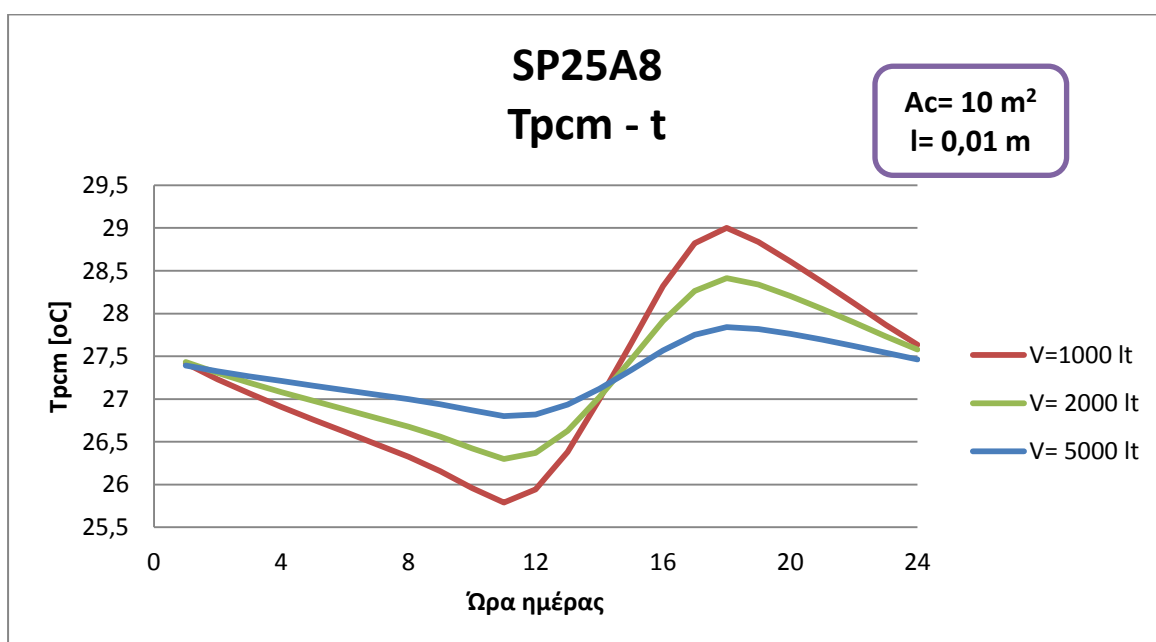
Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η επιφάνεια του συλλέκτη αυξάνεται η θερμοκρασία της δεξαμενής και επομένως και η θερμοκρασία του PCM. Για τη μέγιστη επιφάνεια συλλέκτη οι μεταβολές της θερμοκρασίας είναι πιο απότομες και η $T_{pcm,max}$ εμφανίζεται πιο νωρίς το μεσημέρι. Στην δοκιμή για $V_{δεξ}=5000$ lt, είναι φυσικό οι θερμοκρασίες να μένουν σε χαμηλότερες τιμές.

7.2.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για διαφορετικούς όγκους δεξαμενής V

ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΟΚΙΜΗΣ [SP25A8]	
Επιφάνεια συλλέκτη	Ac= 10 m²
Πάχος PCM	l= 0,01 m



Σχήμα 7.10 Θερμοκρασιακό προφίλ δεξαμενής



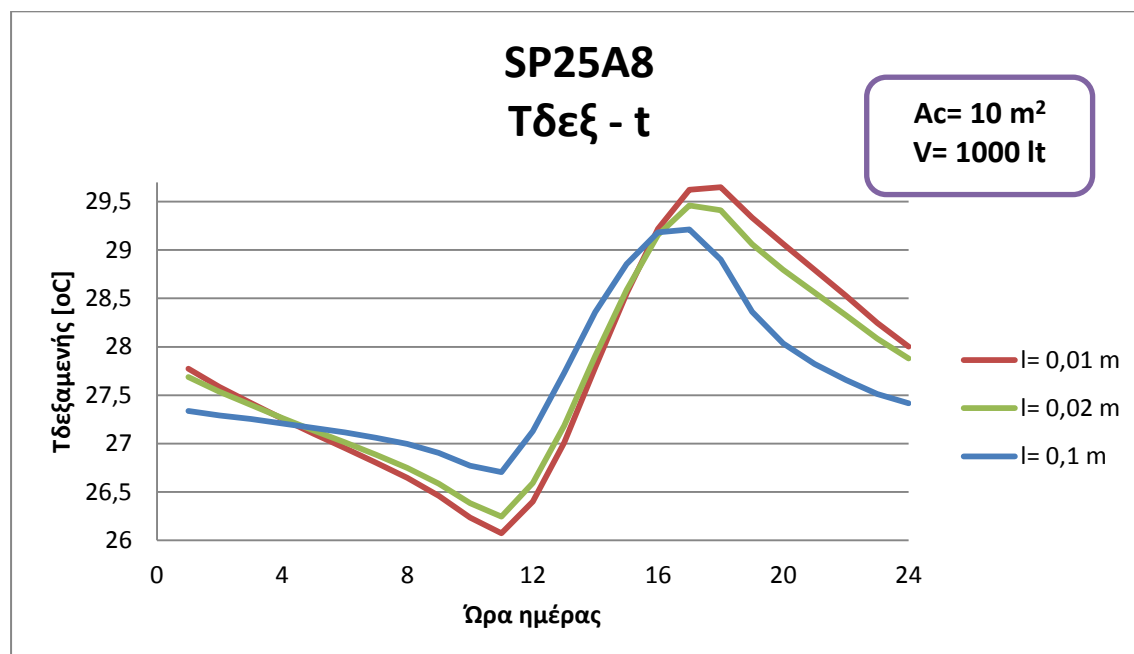
Σχήμα 7.11 Θερμοκρασιακό προφίλ PCM

Συμπεράσματα:

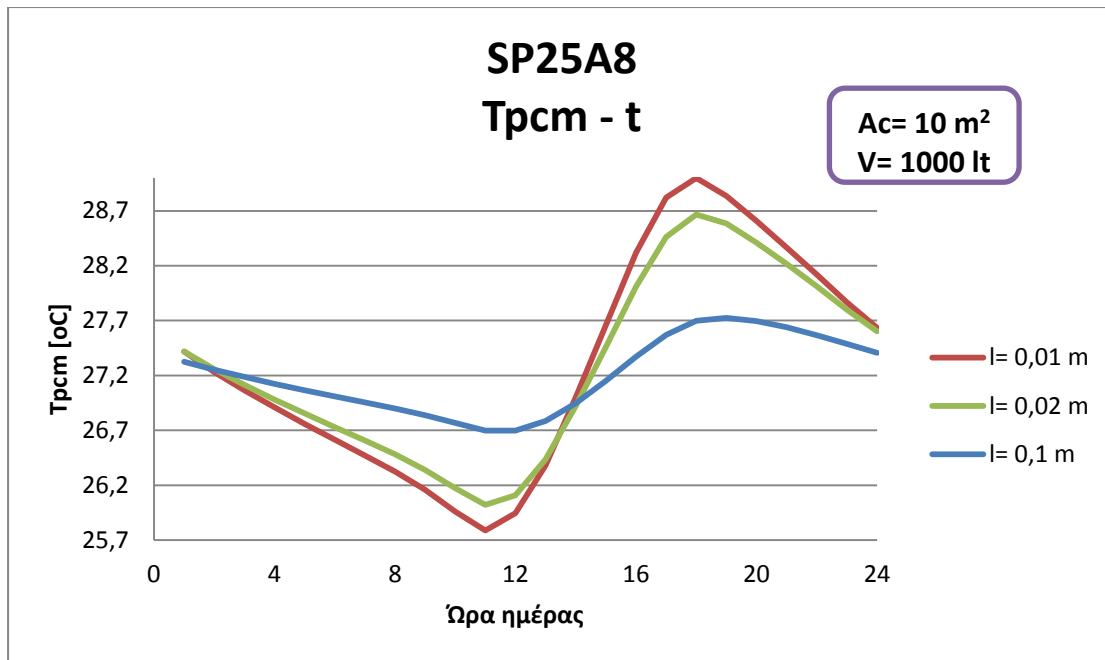
Η ύπαρξη μεγάλου όγκου δεξαμενής συνεπάγεται μεγαλύτερη αδράνεια στο σύστημα, άρα και ήπιες μεταβολές και χαμηλότερες θερμοκρασίες.

7.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για διαφορετικά πάχη PCM 1

ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΟΚΙΜΗΣ [SP25A8]	
Επιφάνεια συλλέκτη	$A_c = 10 \text{ m}^2$
Όγκος δεξαμενής	$V = 1000 \text{ lt}$



Σχήμα 7.12 Θερμοκρασιακό προφίλ δεξαμενής



Σχήμα 7.13 Θερμοκρασιακό προφίλ PCM

Συμπεράσματα:

Με την αύξηση του πάχους PCM, αποθηκεύεται μεγάλο ποσό ενέργειας στο PCM με αποτέλεσμα η μεταβολή της θερμοκρασίας της δεξαμενής, σε συνδυασμό με την θερμότητα που αντλούμε για το ζεστό νερό χρήσης, να περιορίζεται και η μέγιστη τιμή της να εμφανίζεται σε χαμηλότερες τιμές και πιο νωρίς το μεσημέρι. Αντίστοιχα, όπως είναι αναμενόμενο, η αύξηση του πάχους PCM οδηγεί σε μικρότερες μεταβολές της θερμοκρασίας του PCM.

7.3 Υλικό PCM RT27

Τα χαρακτηριστικά του υλικού παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

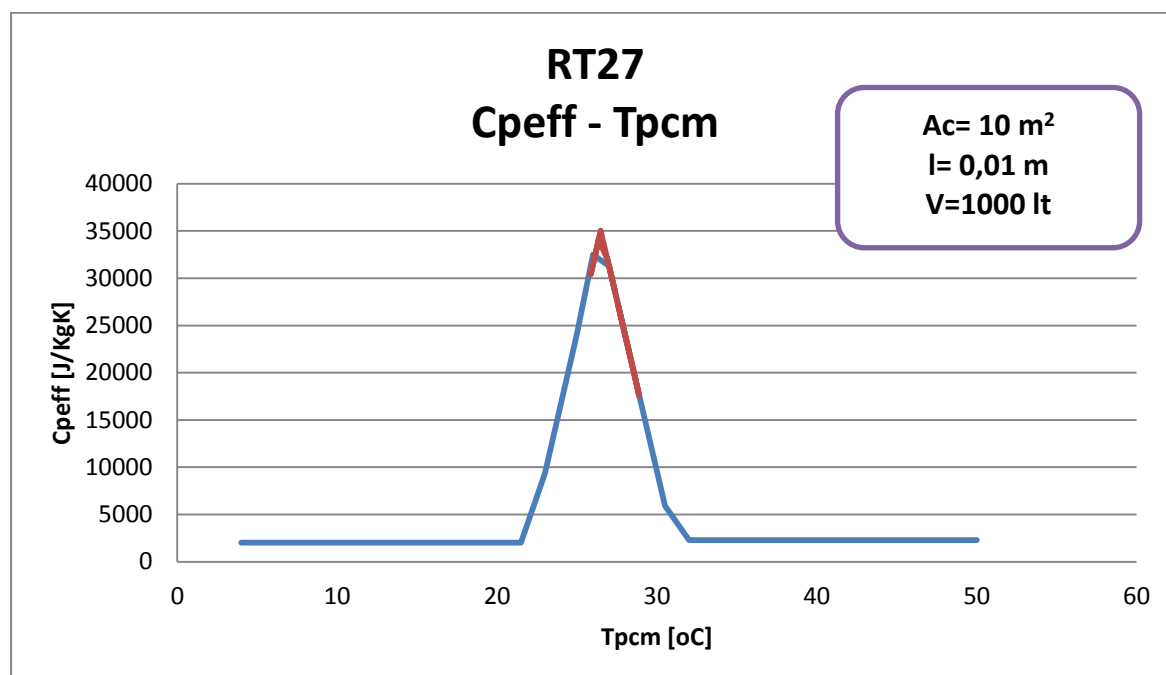
RT27		
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης	H [J/Kg]	167400

Θερμοκρασία Στερεοποίησης	T_s [°C]	22
Θερμοκρασία Τήξης	T_l [°C]	31
Θερμοκρασιακό Εύρος	$b=T_l-T_s$	9
Μέση Θερμοκρασία Διφασικής Περιοχής	T_c [°C]	26,5
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Φάσης	C_{p_s} [J/Kg K]	2000
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Φάσης	C_{p_l} [J/Kg K]	2300
Μέγιστη Θερμοχωρητικότητα	$C_{p_{max}}$ [J/KgK]	35200

Όπως στην προηγούμενη περίπτωση PCM, έτσι και εδώ ακολουθούν διαγράμματα που παρουσιάζουν τη μεταβολή του συντελεστή θερμοχωρητικότητας του υλικού με παράμετρο την επιφάνεια του συλλέκτη.

Όσον αφορά την αποτελεσματικότητα, η βέλτιστη τιμή της είναι ίση με $\varepsilon=0,41$ και εμφανίζεται για την περίπτωση που η επιφάνεια συλλέκτη είναι $A_c= 10 \text{ m}^2$, ενώ η μικρότερη τιμή της είναι $\varepsilon=0,06$ και εμφανίζεται για επιφάνεια συλλέκτη $A_c= 20 \text{ m}^2$.

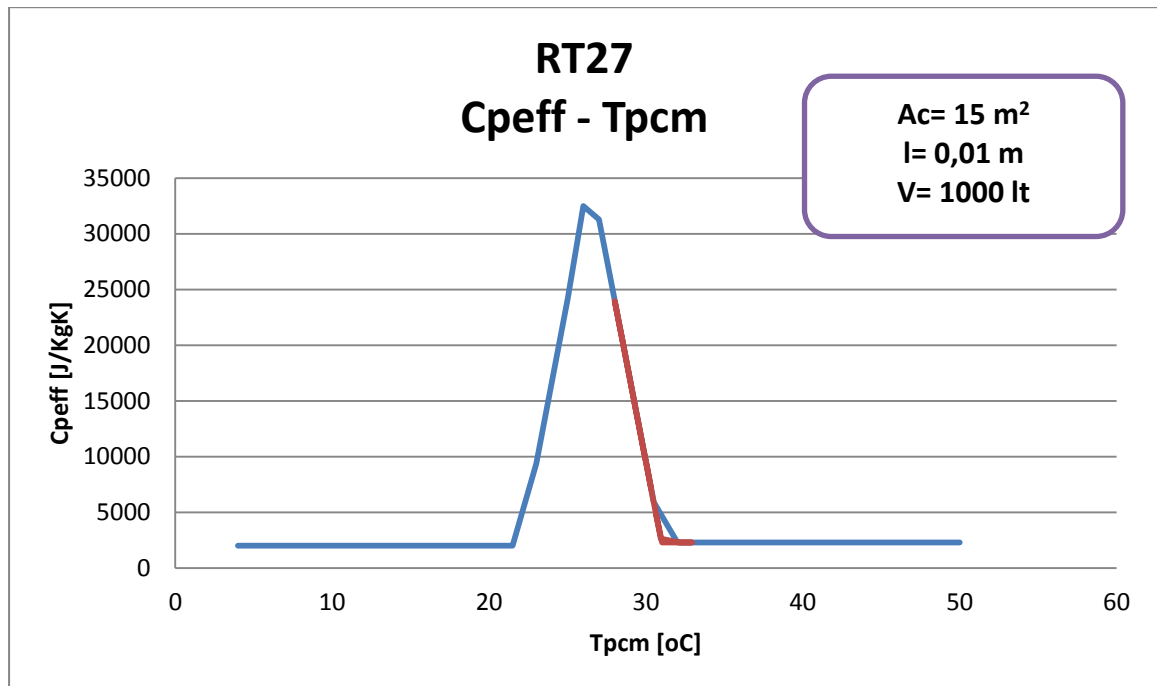
- Για επιφάνεια συλλέκτη $A_c= 10 \text{ m}^2$.



Σχήμα 7.14 Καμπύλη κύκλου φόρτισης- αποφόρτισης του υλικού

Ο βαθμός εκμετάλλευσης είναι $\varepsilon = \frac{H_o}{H} = 0,41$.

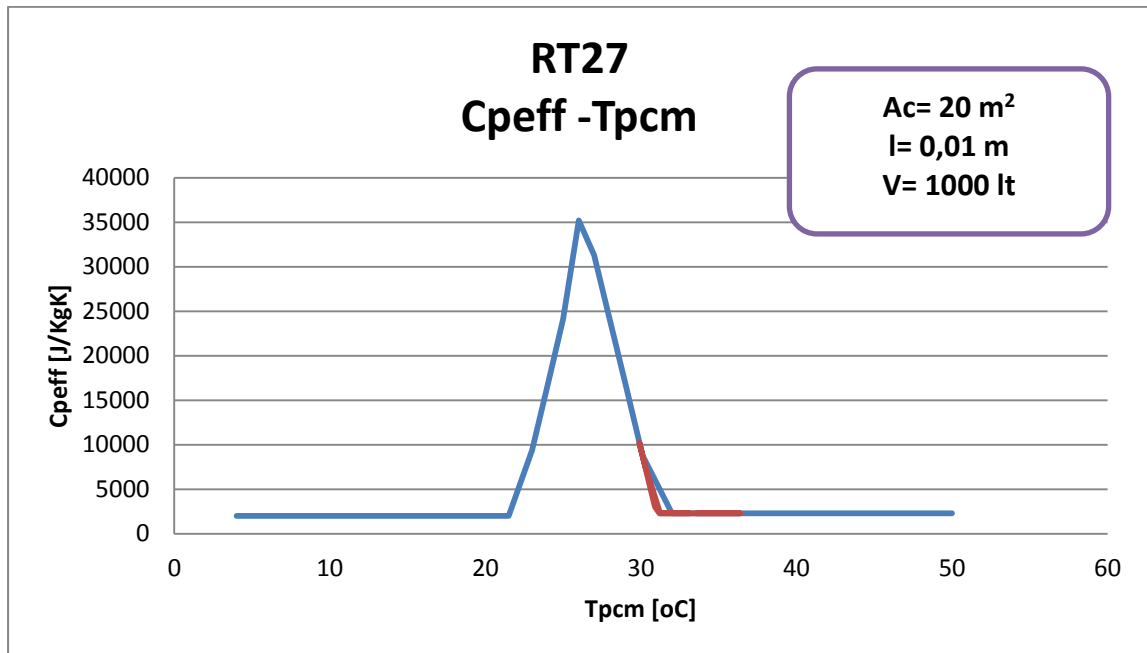
➤ Για επιφάνεια συλλέκτη $A_c = 15 \text{ m}^2$.



Σχήμα 7.15 Καμπύλη κύκλου φόρτισης- αποφόρτισης του υλικού

Ο βαθμός εκμετάλλευσης είναι $\varepsilon = \frac{H_o}{H} = 0,27$.

➤ Για επιφάνεια συλλέκτη $A_c = 20 \text{ m}^2$.



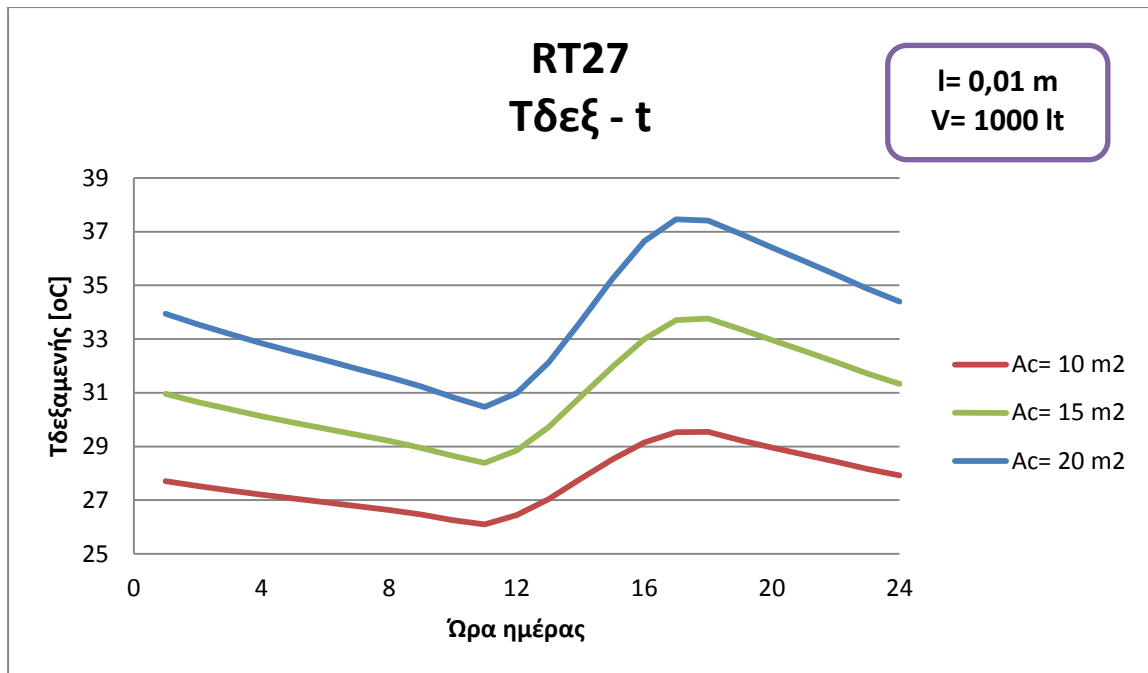
Σχήμα 7.16 Καμπύλη κύκλου φόρτισης- αποφόρτισης του υλικού

Ο βαθμός εκμετάλλευσης είναι $\varepsilon = \frac{H_o}{H} = 0,06$.

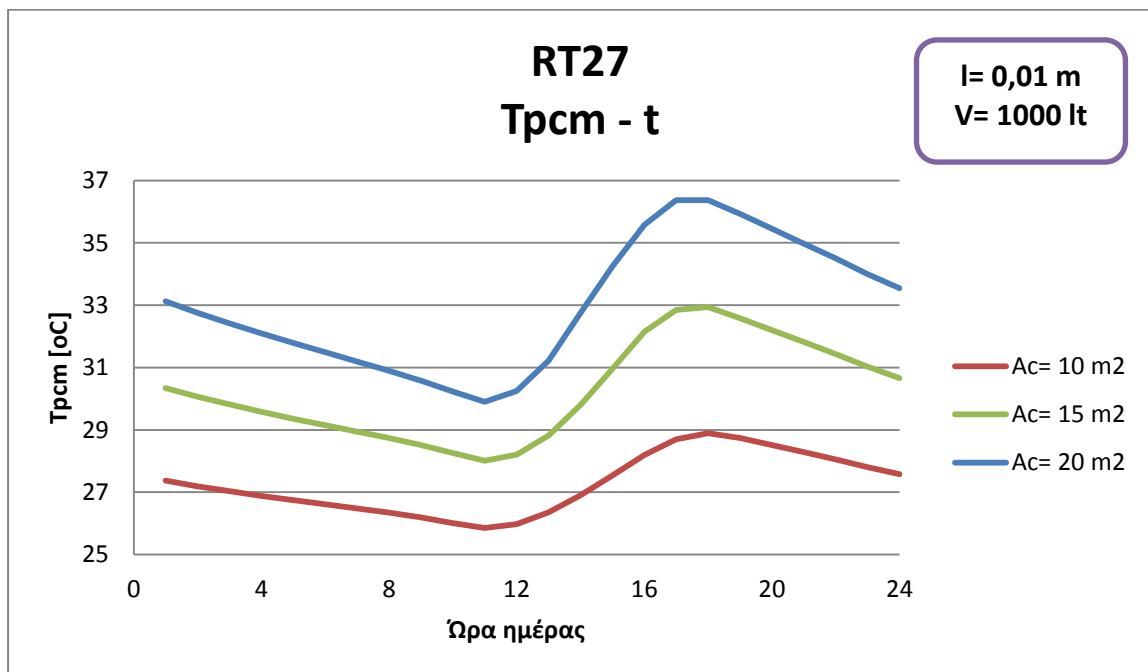
7.4 Δοκιμές για PCM RT27

7.4.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων για διαφορετικές επιφάνειες συλλέκτη A_c

ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ [RT27]	
Όγκος δεξαμενής	V= 1000 lt
Πάχος PCM	l= 0,01 m



Σχήμα 7.17 Θερμοκρασιακό προφίλ δεξαμενής



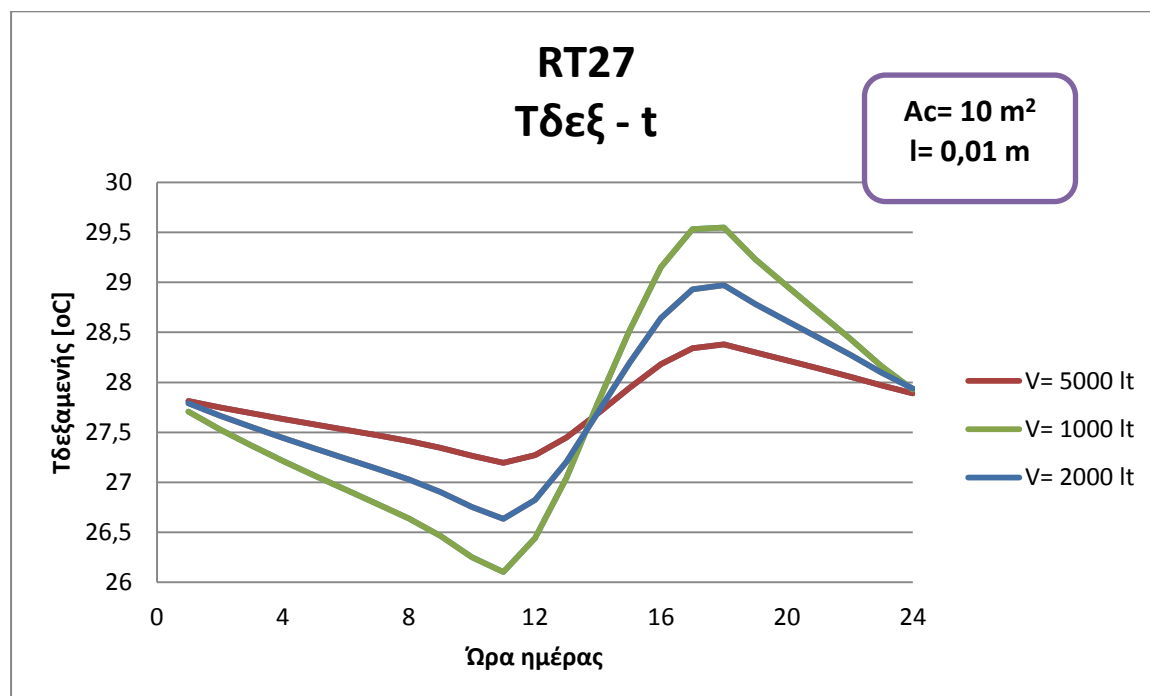
Σχήμα 7.18 Θερμοκρασιακό προφίλ PCM

Συμπεράσματα:

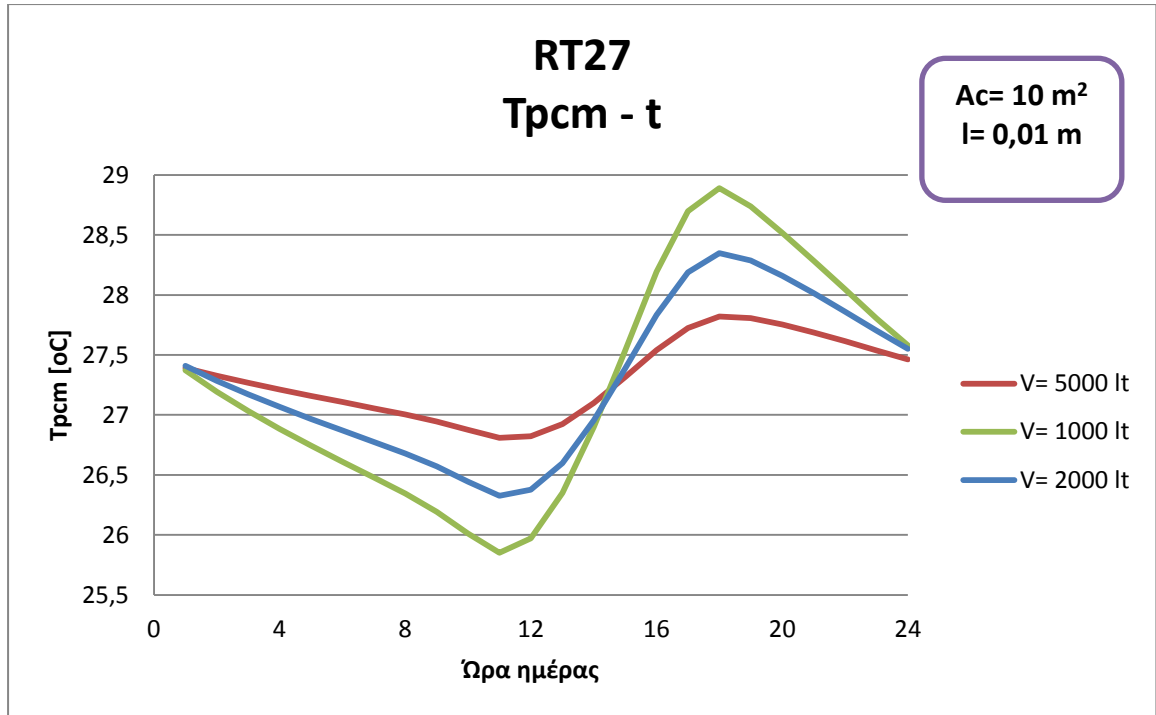
Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη περίπτωση υλικού, η αύξηση επιφάνειας συλλέκτη συνεπάγεται την αύξηση θερμοκρασιών δεξαμενής και υλικού PCM.

7.4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για διαφορετικούς όγκους δεξαμενής V

ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΟΚΙΜΗΣ [RT27]	
Επιφάνεια συλλέκτη	$A_c = 10 \text{ m}^2$
Πάχος PCM	$l = 0,01 \text{ m}$



Σχήμα 7.19 Θερμοκρασιακό προφίλ δεξαμενής



Σχήμα 7.20 Θερμοκρασιακό προφίλ PCM

Συμπεράσματα:

Και εδώ το συμπέρασμα είναι ίδιο με την αντίστοιχη περίπτωση του προηγούμενου PCM, ότι δηλαδή όσο μεγαλώνει ο όγκος της δεξαμενής το σύστημα αδρανοποιείται με αποτέλεσμα χαμηλότερες θερμοκρασίες με ήπιες μεταβολές.

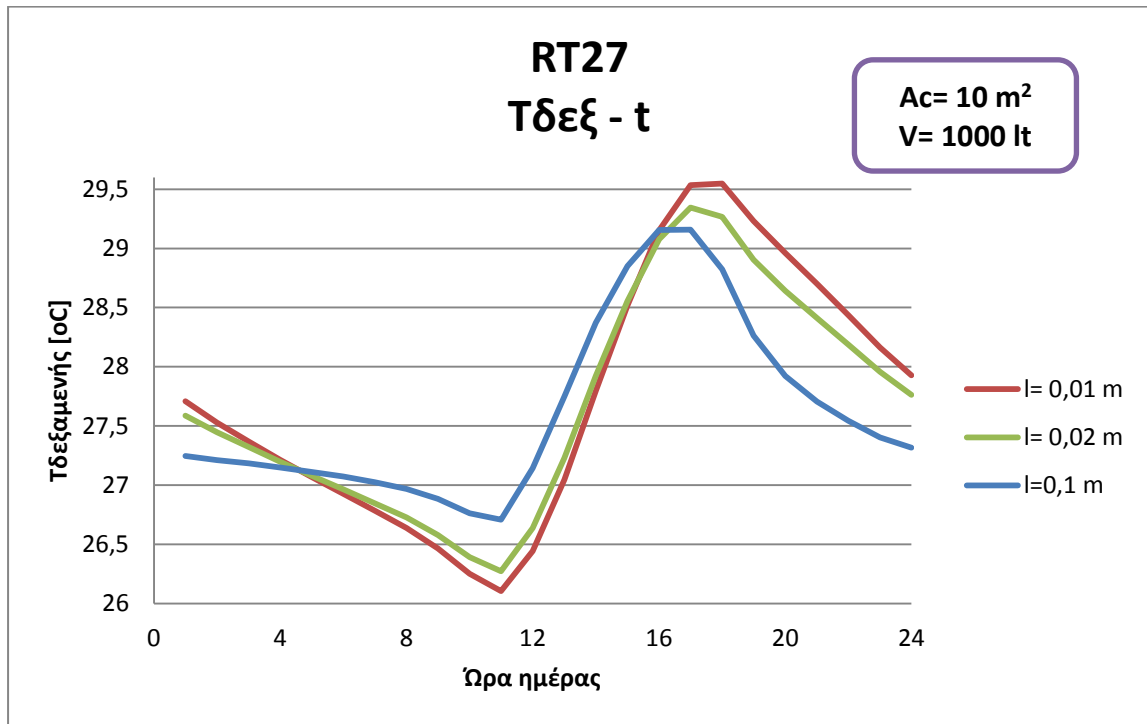
7.4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για διαφορετικά πάχη PCM 1

7.4.3.1 1^η Περίπτωση

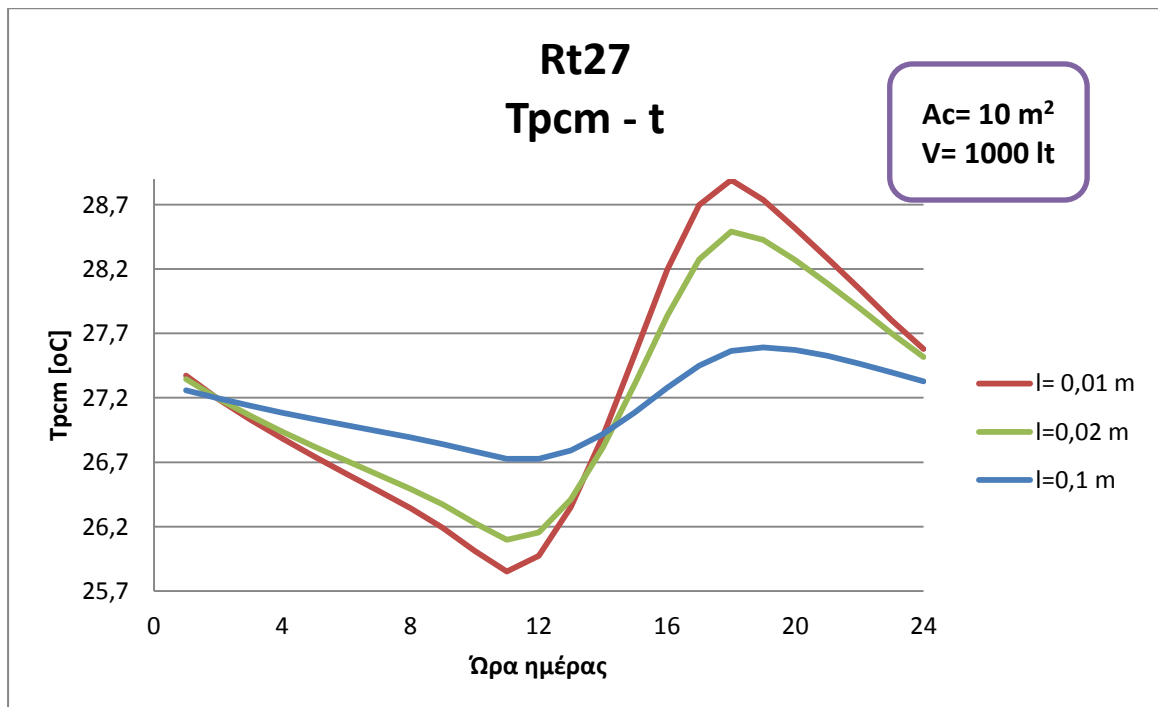
ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ [RT27]	
Επιφάνεια συλλέκτη	Ac= 10 m²

Όγκος δεξαμενής

V= 1000 lt



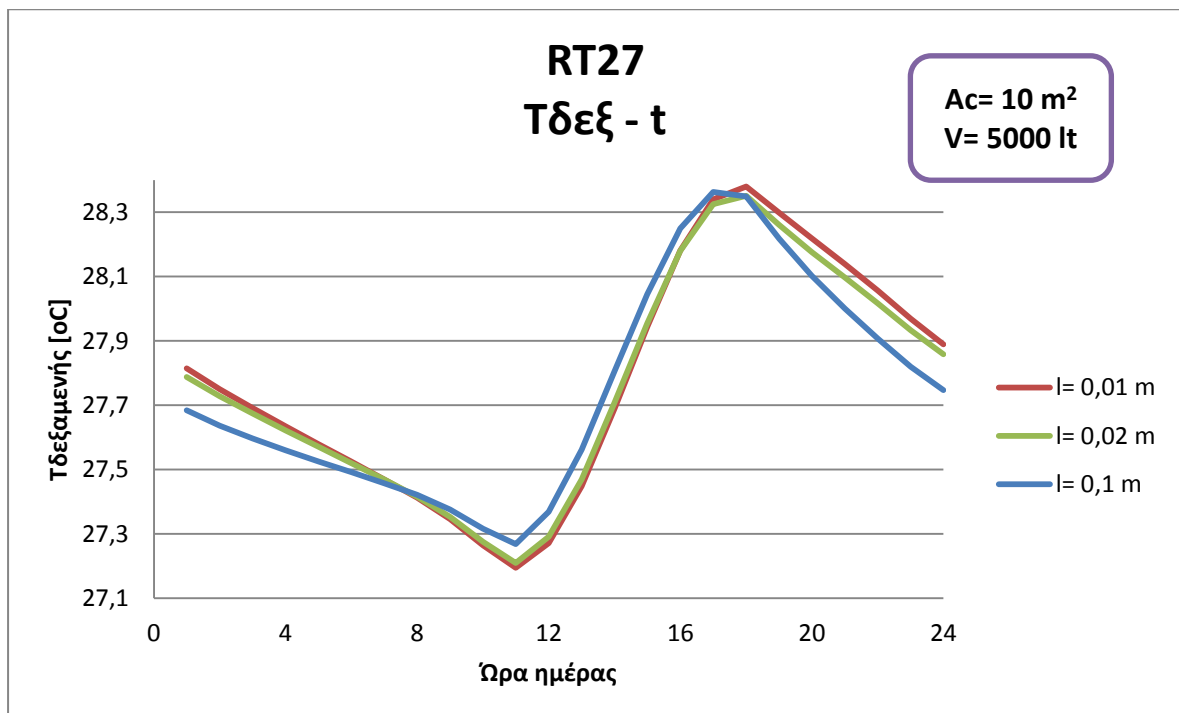
Σχήμα 7.21 Θερμοκρασιακό προφίλ δεξαμενής



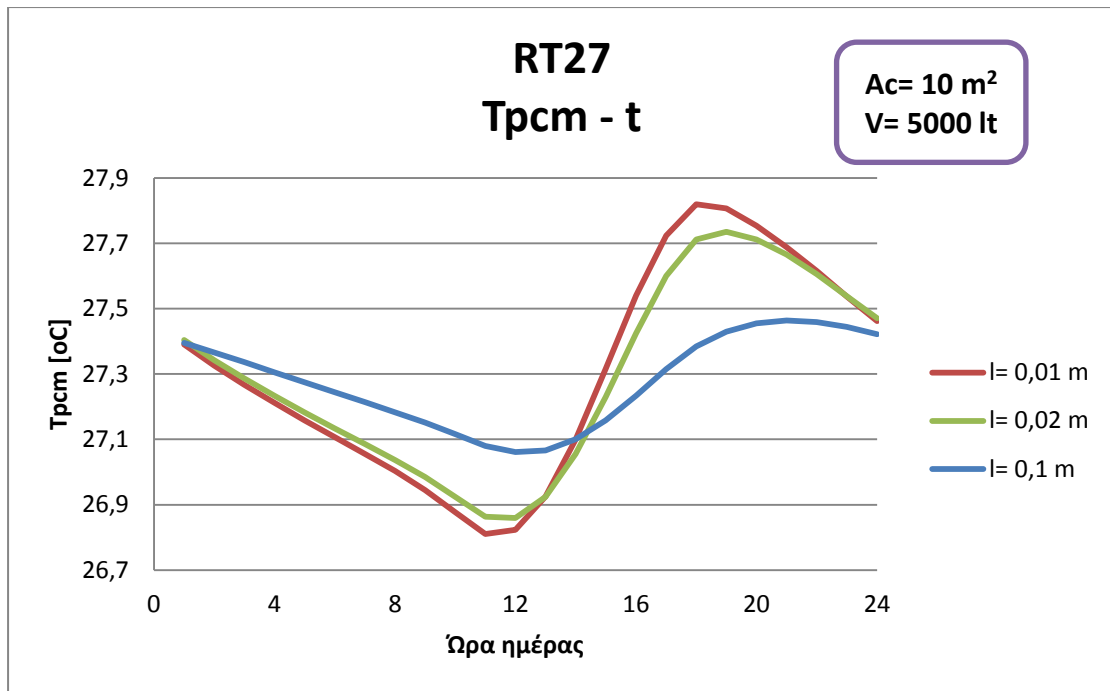
Σχήμα 7.22 Θερμοκρασιακό προφίλ PCM

7.4.3.2 2^η Περίπτωση

ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ [RT27]	
Επιφάνεια συλλέκτη	$A_c = 10 \text{ m}^2$
Όγκος δεξαμενής	$V = 5000 \text{ lt}$



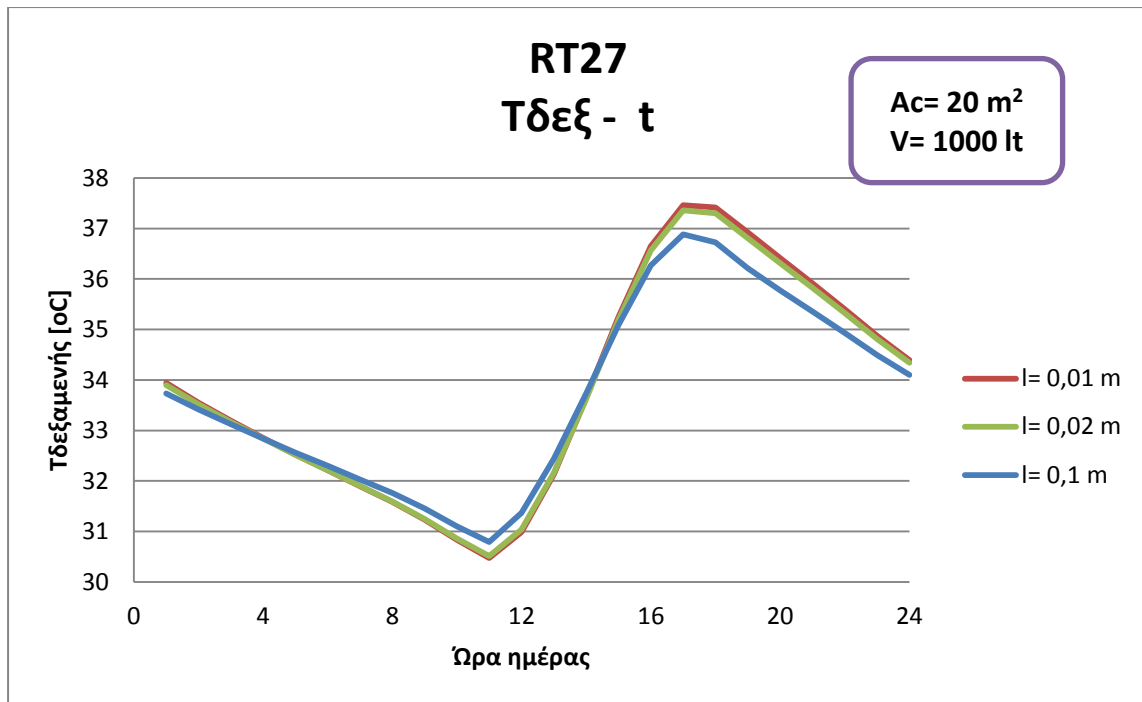
Σχήμα 7.23 Θερμοκρασιακό προφίλ δεξαμενής



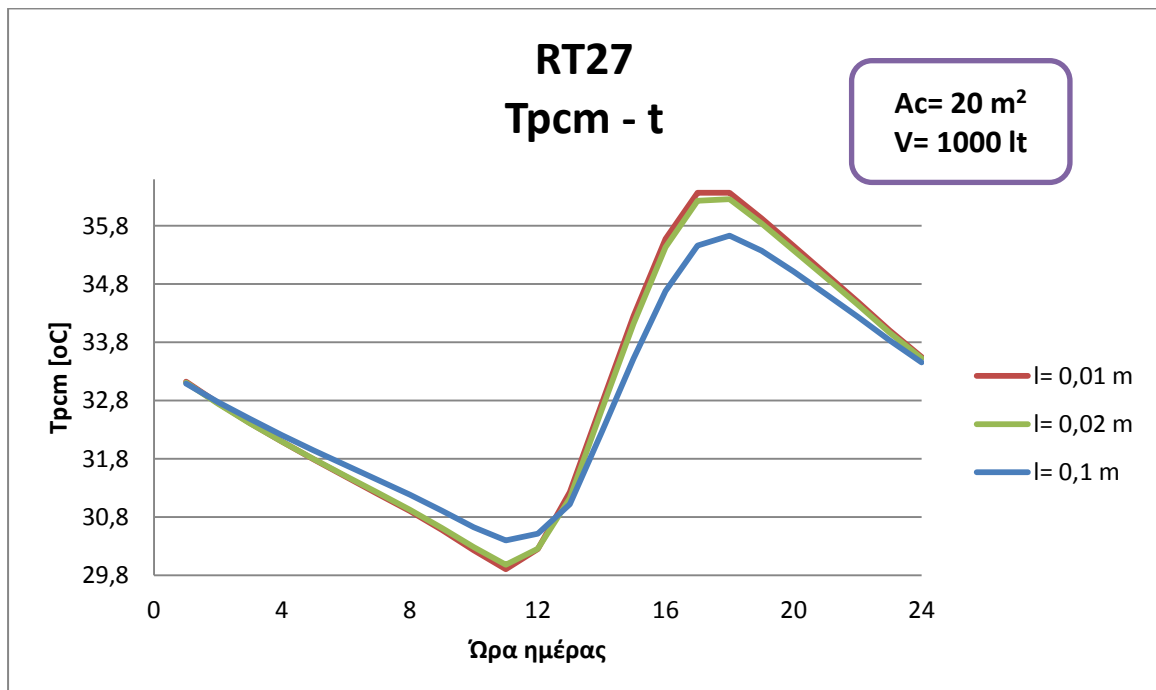
Σχήμα 7.24 Θερμοκρασιακό προφίλ PCM

7.4.3.3 3^η Περίπτωση

ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ [RT27]	
Επιφάνεια συλλέκτη	A_c = 20 m²
Όγκος δεξαμενής	V = 1000 lt



Σχήμα 7.25 Θερμοκρασιακό προφίλ δεξαμενής



Σχήμα 7.26 Θερμοκρασιακό προφίλ PCM

7.4.3.4 Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι με την αύξηση πάχους PCM, στην 1^η δοκιμή, αποθηκεύεται στο PCM μεγάλο ποσό ενέργειας με αποτέλεσμα η μεταβολή της θερμοκρασίας της δεξαμενής, σε συνδυασμό με τη θερμότητα που απορροφά το ζεστό νερό χρήσης, να περιορίζεται και η μέγιστη τιμή της να εμφανίζεται σε χαμηλότερες τιμές και πιο νωρίς το μεσημέρι. Αντίστοιχα, όπως είναι αναμενόμενο, η αύξηση του πάχους PCM οδηγεί σε μικρότερες μεταβολές της θερμοκρασίας του PCM. Στη 2^η περίπτωση, λόγω του μεγάλου όγκου που έχει η δεξαμενή η μεταβολή της θερμοκρασίας της δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από το πάχος του PCM. Αντιστοίχως, και η θερμοκρασία του PCM ακολουθεί τη γνωστή κατανομή με μόνη διαφοροποίηση την περίπτωση του I_{max} που η μέγιστη θερμοκρασία PCM είναι μετατοπισμένη προς αργότερα το απόγευμα μιας και ο μεγάλος όγκος δεξαμενής κάνει πιο αργή μεταβολή της θερμοκρασίας. Στην 3^η περίπτωση, η μεγάλη επιφάνεια συλλέκτη και η αύξηση της αναρροφούμενης από το συλλέκτη θερμότητας σε συνδυασμό με το μικρό όγκο δεξαμενής συνεπάγεται την απορρόφηση μεγαλύτερου ποσοστού θερμότητας από το PCM και τη συνακόλουθη αύξηση της θερμοκρασίας του.

7.5 Υλικό PCM RT21

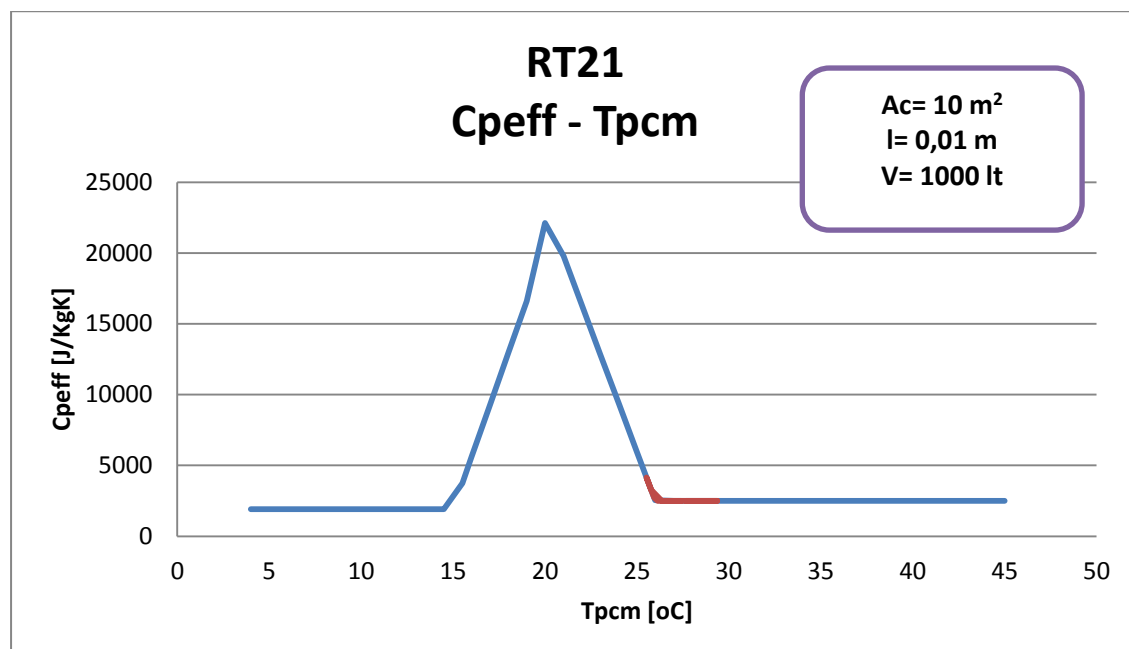
Τα χαρακτηριστικά του υλικού παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

RT21		
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης	H [J/Kg]	132100
Θερμοκρασία Στερεοποίησης	T_s [°C]	15
Θερμοκρασία Τήξης	T_l [°C]	26
Θερμοκρασιακό Εύρος	$b=T_l-T_s$	11
Μέση Θερμοκρασία Διφασικής Περιοχής	T_c [°C]	20,5

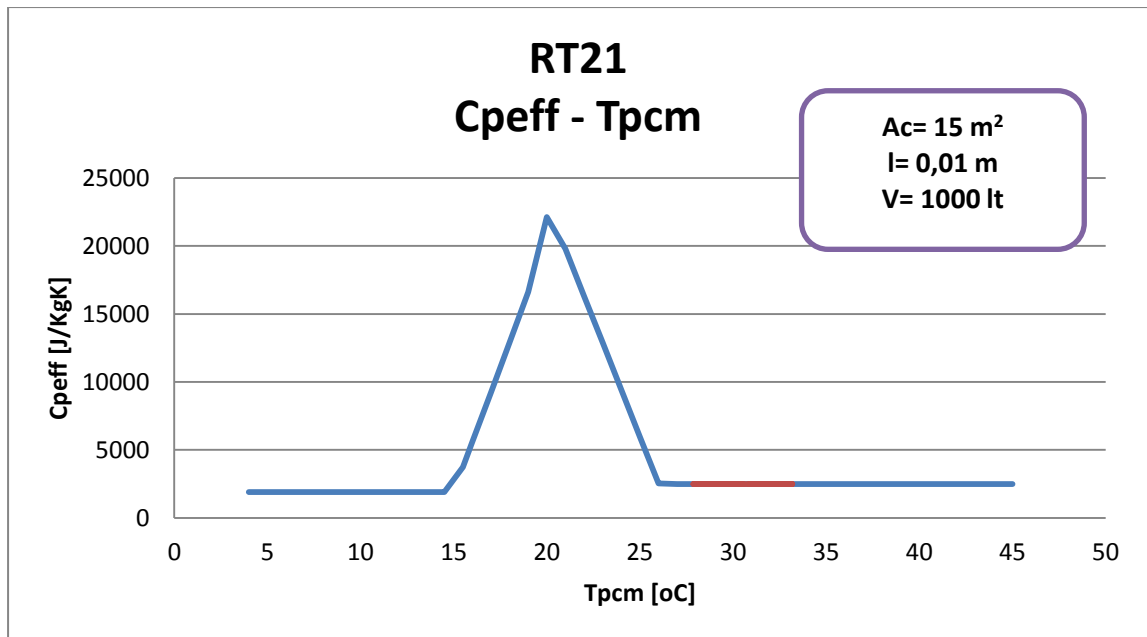
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Φάσης	C_{p_s} [J/Kg K]	1900
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Φάσης	C_{p_l} [J/Kg K]	2500
Μέγιστη Θερμοχωρητικότητα	$C_{p_{max}}$ [J/KgK]	22118,18182

Όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις PCM, έτσι και εδώ ακολουθούν διαγράμματα που παρουσιάζουν τη μεταβολή του συντελεστή θερμοχωρητικότητας του υλικού με παράμετρο την επιφάνεια του συλλέκτη.

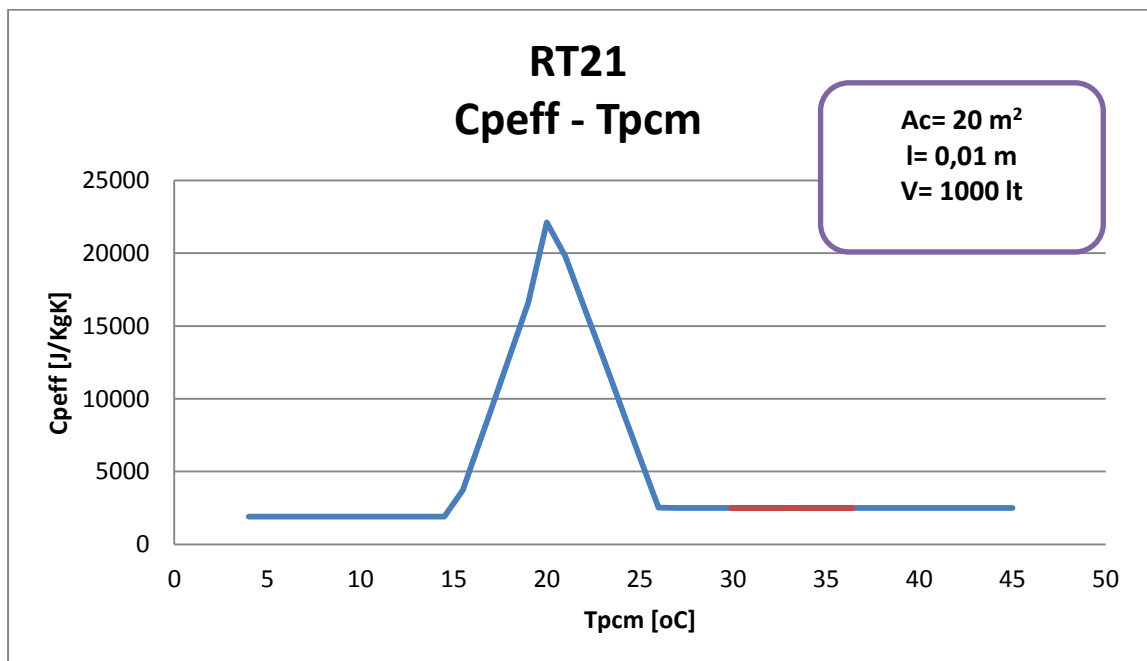
Το αξιοσημείωτο στην περίπτωση του RT21 είναι ότι για επιφάνειες συλλέκτη 15m^2 και 20m^2 οι τιμές θερμοκρασίας του υλικού βρίσκονται μόνιμα στην περιοχή υγρής κατάστασης με αποτέλεσμα να μη λειτουργεί το υλικό σαν PCM. Αυτό συμβαίνει γιατί οι θερμοκρασίες που προκύπτουν από την υπολογιστική διαδικασία είναι μεγαλύτερες από τη θερμοκρασία τήξης του υλικού. Για επιφάνεια συλλέκτη $A_c=10\text{ m}^2$ ο βαθμός εκμετάλλευσης είναι $\varepsilon = \frac{H_o}{H} = 0,002$.



Σχήμα 7.27 Καμπύλη κύκλου φόρτισης- αποφόρτισης του υλικού



Σχήμα 7.28 Καμπύλη κύκλου φόρτισης- αποφόρτισης του υλικού

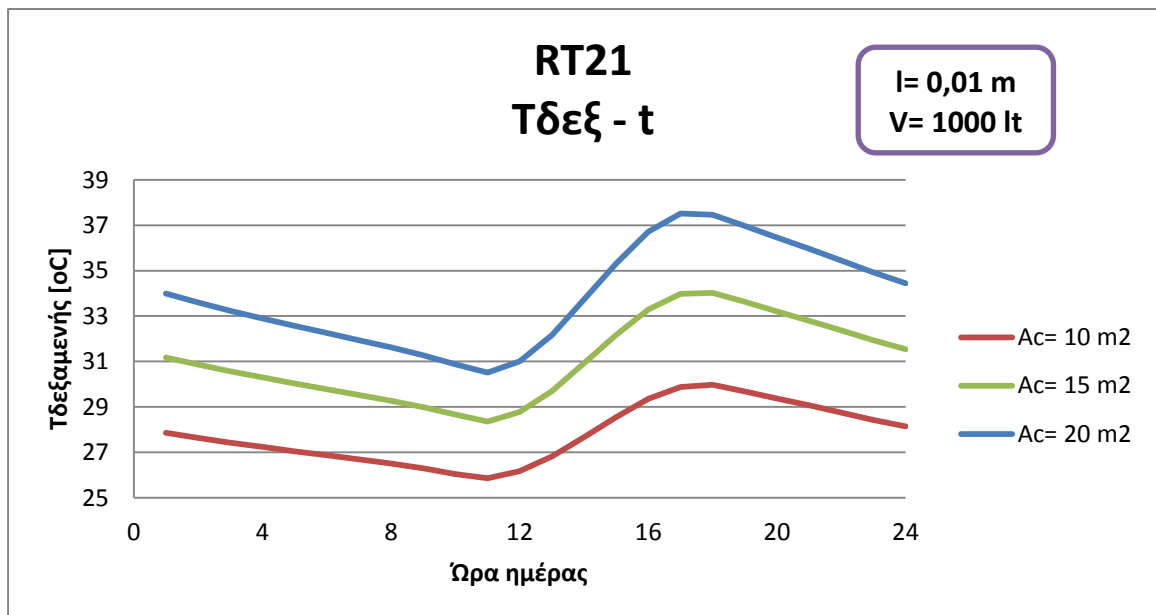


Σχήμα 7.29 Καμπύλη κύκλου φόρτισης- αποφόρτισης του υλικού

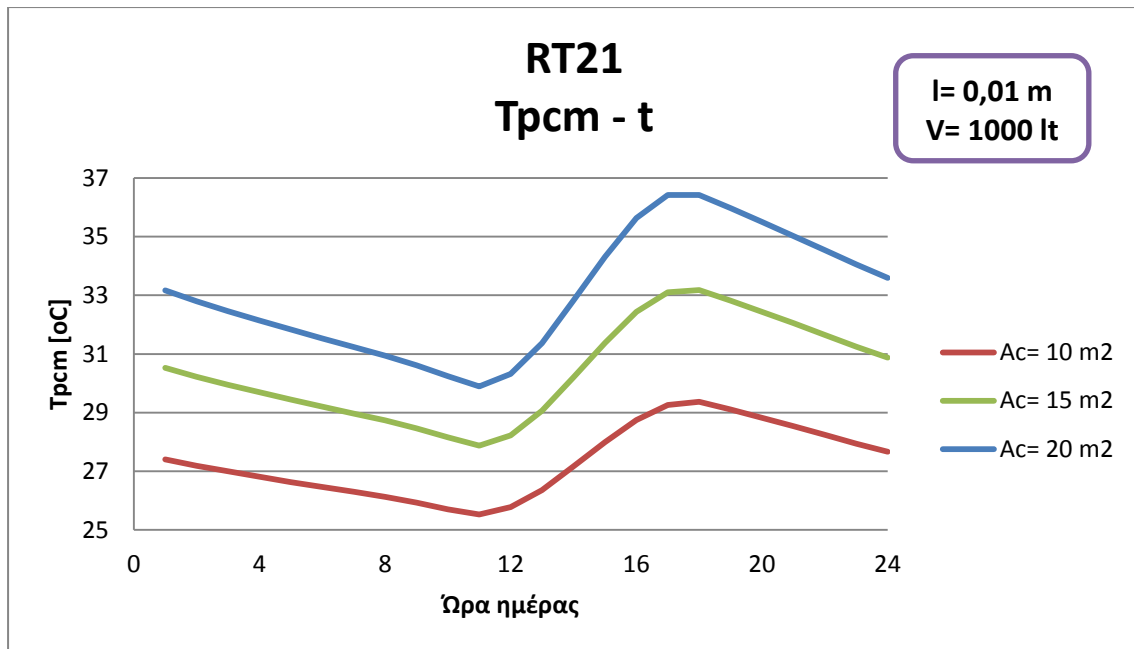
7.6 Δοκιμές για PCM RT21

7.6.1 Σύγκριση τιμών για διαφορετικές επιφάνειες συλλέκτη A_c

ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΟΚΙΜΗΣ [RT21]	
Όγκος δεξαμενής	V= 1000 lt
Πάχος PCM	l= 0,01 m



Σχήμα 7.30 Θερμοκρασιακό προφίλ δεξαμενής



Σχήμα 7.31 Θερμοκρασιακό προφίλ PCM

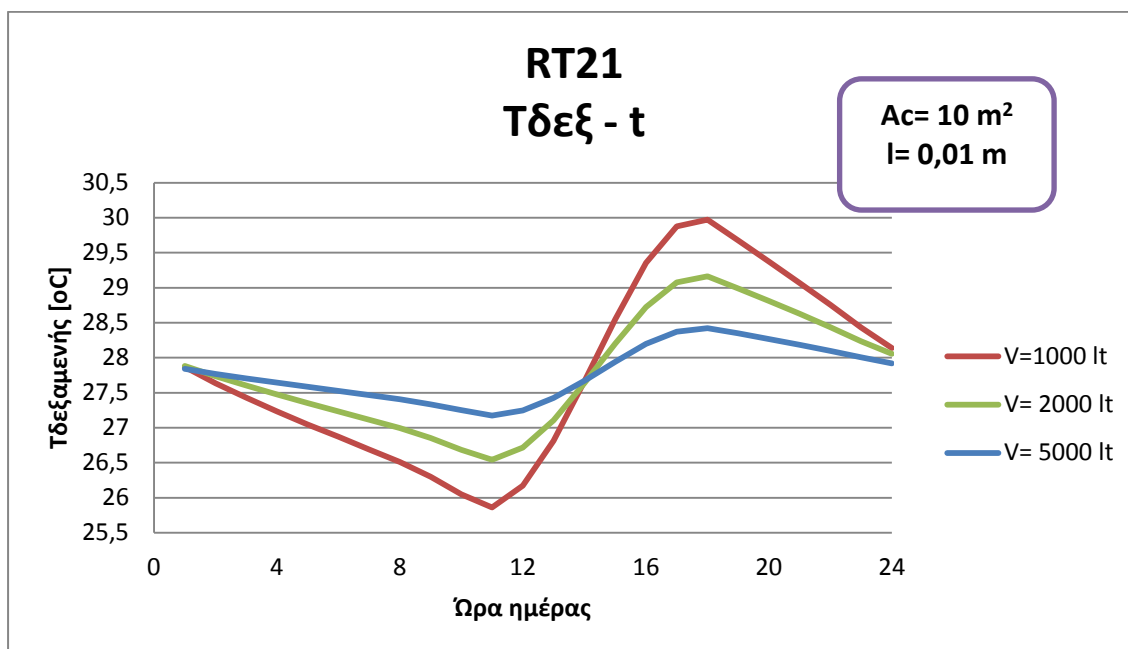
Συμπεράσματα:

Είναι όμοια με τις αντίστοιχες περιπτώσεις των άλλων δύο τύπων PCM, δηλαδή η αύξησης A_c οδηγεί σε αύξηση θερμοκρασιών δεξαμενής και υλικού PCM.

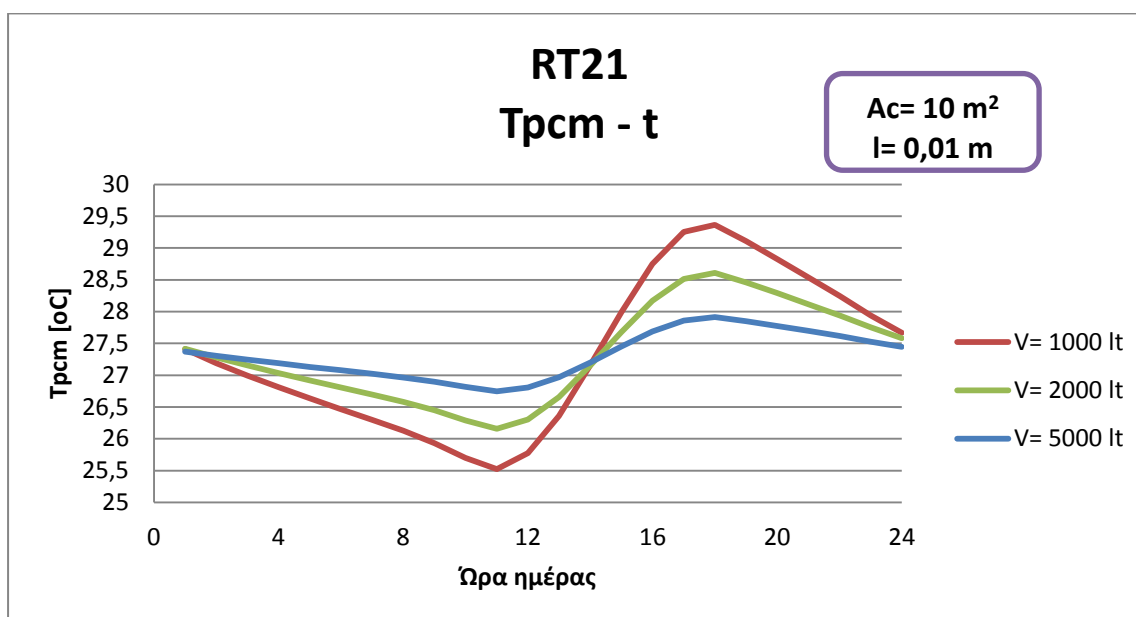
7.6.2 Σύγκριση τιμών για διαφορετικούς όγκους δεξαμενής V

7.6.2.1 1^η Περίπτωση

ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ [RT21]	
Επιφάνεια συλλέκτη	$A_c = 10 \text{ m}^2$
Πάχος PCM	$l = 0,01 \text{ m}$



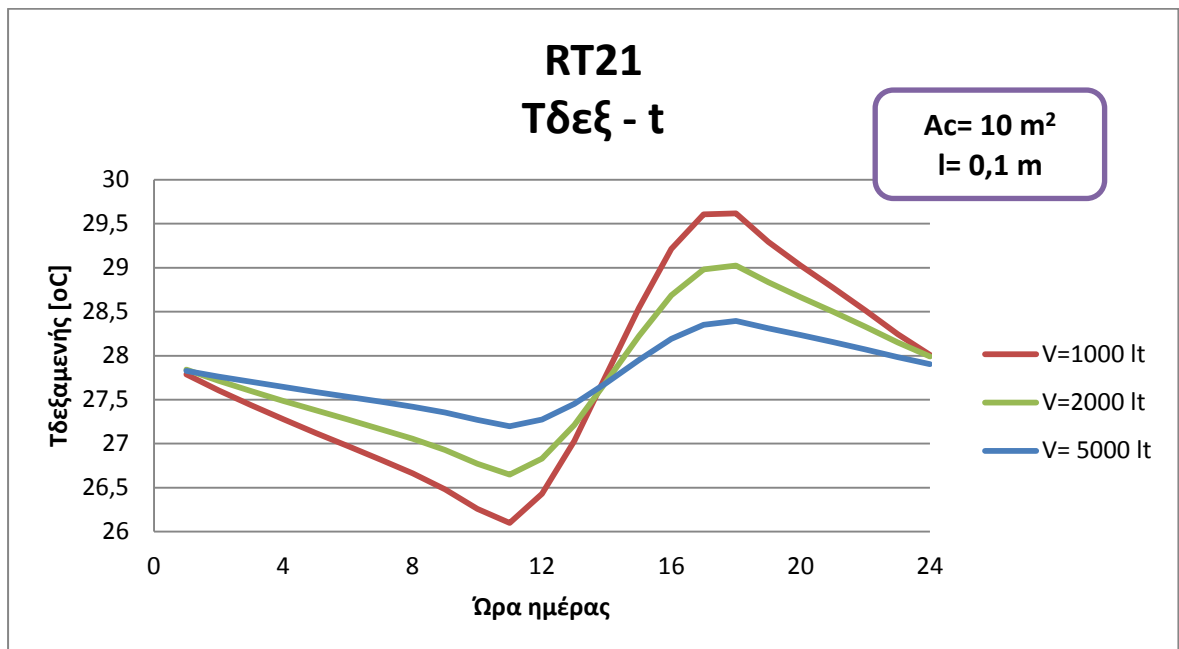
Σχήμα 7.32 Θερμοκρασιακό προφίλ δεξαμενής



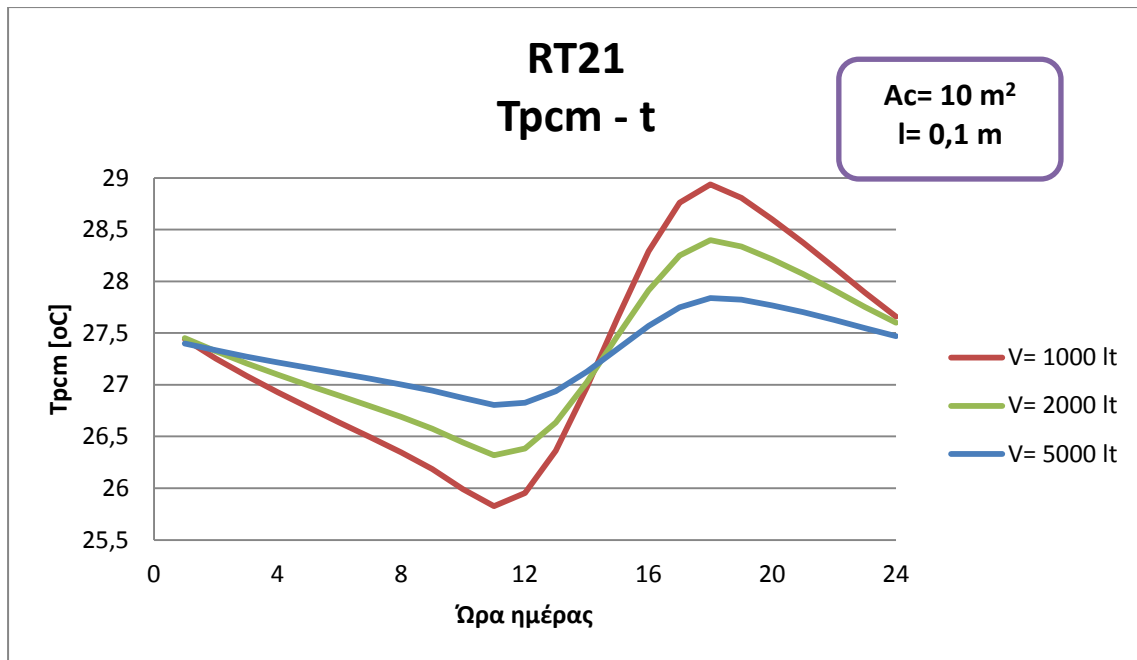
Σχήμα 7.33 Θερμοκρασιακό προφίλ PCM

7.6.2.2 2^η Περίπτωση

ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ [RT21]	
Επιφάνεια συλλέκτη	$A_c = 10 \text{ m}^2$
Πάχος PCM	$l = 0,1 \text{ m}$



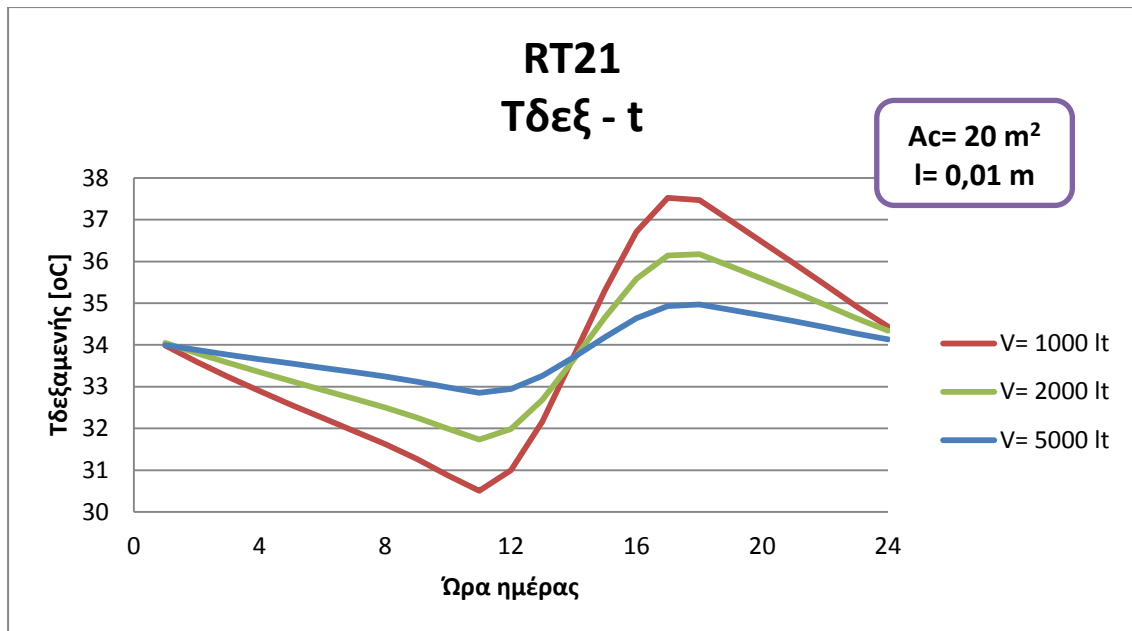
Σχήμα 7.34 Θερμοκρασιακό προφίλ δεξαμενής



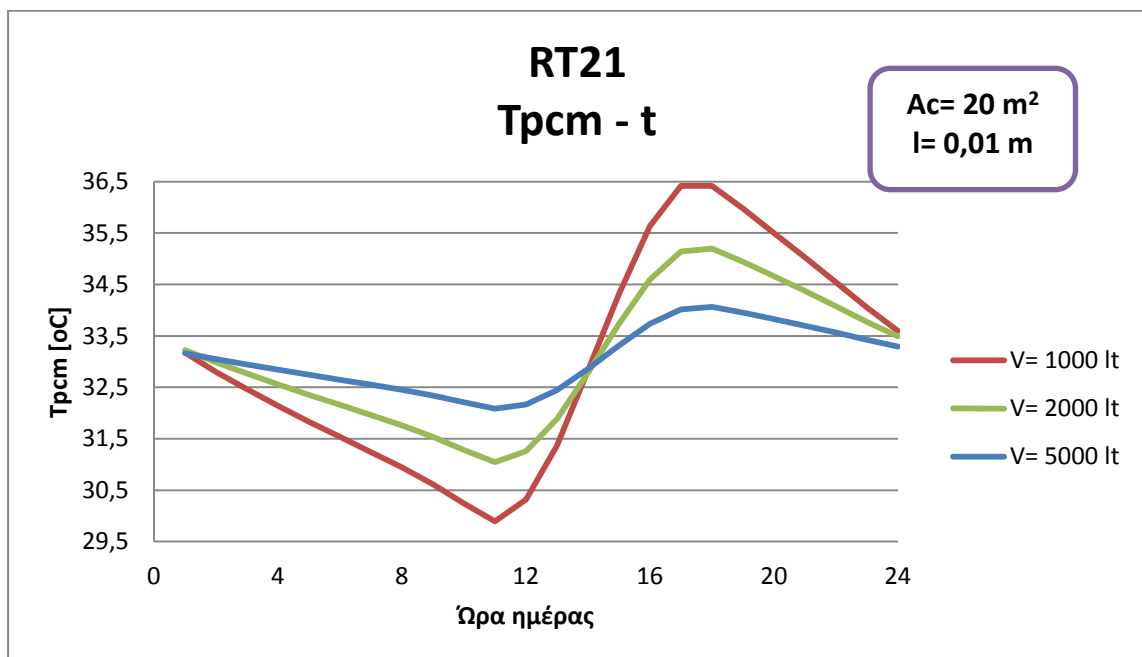
Σχήμα 7.35 Θερμοκρασιακό προφίλ PCM

7.6.2.3 3^η Περίπτωση

ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ [RT21]	
Επιφάνεια συλλέκτη	A_c = 20 m²
Πάχος PCM	l = 0,01 m



Σχήμα 7.36 Θερμοκρασιακό προφίλ δεξαμενής



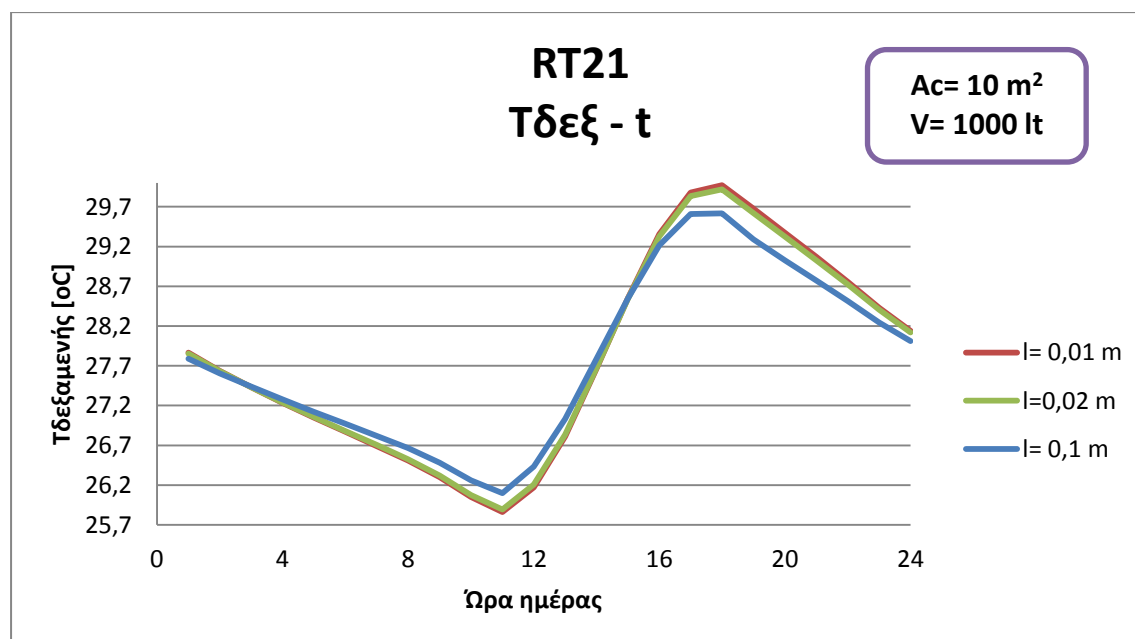
Σχήμα 7.37 Θερμοκρασιακό προφίλ PCM

7.6.2.4 Συμπεράσματα

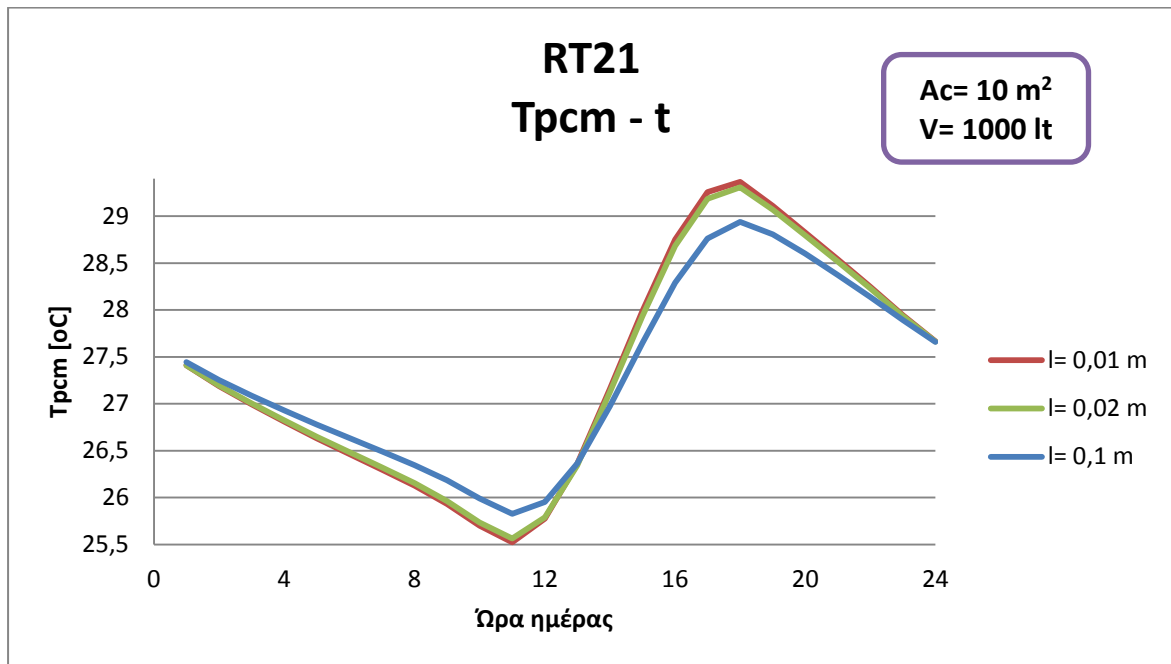
Το συμπέρασμα των περιπτώσεων αυτών είναι ίδιο με αυτό που προέκυψε και από τις προηγούμενες αντίστοιχες περιπτώσεις. Η ύπαρξη μεγάλου όγκου δεξαμενής συνεπάγεται μεγαλύτερη αδράνεια στο σύστημα, άρα και πιο ήπιες μεταβολές με χαμηλότερες θερμοκρασίες. Σημειώνεται ότι στην 3^η περίπτωση, η μεγάλη επιφάνεια συλλέκτη οδηγεί σε μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος.

7.6.3 Σύγκριση τιμών για διαφορετικά πάχη PCM 1

ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ 1 ^{ης} ΔΟΚΙΜΗΣ [RT21]	
Επιφάνεια συλλέκτη	$A_c = 10 \text{ m}^2$
Όγκος δεξαμενής	$V = 1000 \text{ lt}$



Σχήμα 7.38 Θερμοκρασιακό προφίλ δεξαμενής



Σχήμα 7.39 Θερμοκρασιακό προφίλ PCM

Συμπεράσματα:

Οι μεταβολές θερμοκρασίας του PCM είναι αντίστοιχες με τις μεταβολές θερμοκρασίας της δεξαμενής με μόνη μικρή διαφορά στην περίπτωση του μέγιστου πάχους του υλικού που είναι αναμενόμενο μιας και απορροφά μεγαλύτερα ποσά θερμότητας.

Βιβλιογραφία

- [1] <http://dspace.lib.ntua.gr/handle/123456789/39693>
- [2] <http://www.allaboutenergy.gr/Piges23.html>
- [3] <http://www.ypeka.gr/?tabid=285>
- [4] H. Mehling και L. F. Cabeza, Heat and cold storage with PCM: an up to date introduction into basics and applications, New York: Springer, 2008.
- [5] N. Yu, R. Z. Wang και L. W. Wang, Sorption thermal storage for solar energy.
- [6] A. Sharma, V. Tyagi, C. Chen και D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications.
- [7] S. Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part 1: Heat storage materials and techniques, 1996.
- [8] H. P. Garg, S. C. Mullick και A. K. Bhargava, Solar thermal energy storage, Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1985.
- [9] P. Tatsidjodoung, N. L. Pierres και L. Luo, A review of potential materials for thermal energy storage in building applications.
- [10] «<http://www.eolss.net/ebooks/Sample%20Chapters/C08/E3-14-02-00.pdf>,» [Ηλεκτρονικό].
- [11] D. David, F. Kuznik και J.-J. Roux, Numerical study of the influence of the convective heat transfer on the dynamical behaviour of a phase change material wall.
- [12] R. A. Serway και J. W. Jewett, Principles of physics: a calculus-based text, 2006.
- [13] F. P. Incropera και D. P. DeWitt, Introduction to heat transfer, New York: John Wiley and Sons Publishing Co., 1990.
- [14] H. O. Paksoy, Thermal energy storage for sustainable energy consumption- Fundamentals, case studies and design, Springer, 2007.
- [15] A. Pasupathy, R. Velraj και R. V. Seeniraj, Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments.
- [16] I. Ceróna, N. Jaview και K. Mohamed, Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use.

- [17] R. Baetens, B. P. Jelle και G. Arild, Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review.
- [18] P. Arce, C. Castellón, A. Castell και L. F. Cabeza, Use of microencapsulated PCM in buildings and the effect of adding awnings.
- [19] J. Mazo, M. Delgado, J. M. Marin και B. Zalba, Modeling a radiant floor system with Phase Change Material (PCM) integrated into a building simulation tool: Analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump.
- [20] J. N.-W. Chiu, Heat transfer aspects of using phase change material in thermal energy storage applications.
- [21] Ι. Μανδηλαράς, Μ. Φούντη, Μ. Πατρώνης και Κ. Λασκαριδής, Πολυ-Λειτουργικά δομικά προϊόντα με βάση μάρμαρο και υλικά αποθήκευσης ενέργειας με ιδιότητες αποθήκευσης ενέργειας, 2008.
- [22] L. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia και A. I. Fernandez, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review.
- [23] N. Soares, J. J. Costa, A. R. Gaspar και P. Santos, Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency.
- [24] A. Sharma, A. Shukla, C. R. Chen και S. Dwivedi, Development of phase change materials for building applications.
- [25] P. A. Maldonado, Application of passive thermal energy storage in buildings using PCM and awnings.
- [26] W. Zhao, Characterization of Encapsulated Phase Change Materials for Thermal Energy Storage, 2013.
- [27] «<http://www.micronal.de/portal/streamer?fid=309980>,»
- [28] Q. T. Nguyen, T. Ngo και P. Mendis, «Performance-enhancement of Phase Change Materials for Energy Conservation in the Built Environment: A State-of-the-art Review».
- [29] H. Mehling και L. F. Cabeza, «Phase change materials and their basic properties».
- [30] G. A. Lane, «Solar Heat Storage: Latent Heat Materials, vol. I: Background and Scientific Principles,» Florida, CRC Press, Inc, , 1983.

- [31] A. F. Regin, S. C. Solanki και J. S. Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review.
- [32] Y. Zhang, G. Zhou, K. Lin, Q. Zhang και H. Di, Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook.
- [33] B. Zalba, J. M. Marin, L. F. Cabeza και H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications.
- [34] L. Bledjlan, D. V. Hale, M. J. Hoover και M. J. O'Neill, Spacecraft Thermal Control: 11. Phase - Change Materials.
- [35] D. Zhou, C. Y. Zhao και Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications.
- [36] E. Rodriguez-Ubinas, L. Ruiz-Valero, S. Vega και J. Neila, Applications of Phase Change Material in highly energy-efficient houses.
- [37] «<http://www.ise.fraunhofer.de/en>,» [Ηλεκτρονικό].
- [38] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames και M. Smyth, A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS).
- [39] «<http://www.marketsandmarkets.com>,» [Ηλεκτρονικό].
- [40] A. Solé, L. Miró, C. Barreneche, I. Martorell και L. F. Cabeza, Review of the T-history method to determine thermophysical properties of phase change materials (PCM).
- [41] L. Klimes, P. Charvat και M. Ostry, CHALLENGES IN THE COMPUTER MODELING OF PHASE CHANGE MATERIALS.
- [42] C. Barreneche, A. Solé, L. Miró, I. Martorell, A. I. Fernandez και L. F. Cabeza, Study on differential scanning calorimetry analysis with two operation modes and organic and inorganic phase change material (PCM).
- [43]
«http://www.univie.ac.at/chemwiki/lib/exe/fetch.php?media=maste:r:anorg:char_anorg_mat:2_dynamic_methods.pdf,»
- [44] «http://en.wikipedia.org/wiki/Differential_thermal_analysis,»

- [45] Y. Zhang και Y. Jiang, A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials, 1999.
- [46] H. Hiki, K. S. Kuk και K. Y. Shik, Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials.
- [47] S. B. Stankovic και P. A. Kyriacou, Improved measurement technique for the characterization of organic and inorganic phase change materials using the T-history method.
- [48] E. Günther, S. Hiebler και H. Mehling, DETERMINATION OF THE HEAT STORAGE CAPACITY OF PCM AND PCM-OBJECTS AS A FUNCTION OF TEMPERATURE.
- [49] «http://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Stefan,»
- [50] H. Yang και Y. He, Solving heat transfer problems with phase change via smoothed effective heat capacity and element-free Galerkin methods.
- [51] P. Lamberg, R. Lehtiniemi και A.-M. Henell, Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage.
- [52] Vineet Veer Tyagi, D. Buddhi, Thermal Energy Storage Laboratory, School Of Energy and Environmental Studies, Faculty of Engineering Science, Devi Ahilya University, India, 2005.
- [53] V.V. Tyagi, D. Buddhi, "PCM thermal storage in buildings: A state of art", Renewable and Sustainable Energy Reviews 2007; 11: 1146-1166.
- [54] Stritih U, Novak P, Thermal storage of solar energy in the wall for building ventilation. Second workshop IEA, Advanced thermal energy storage techniques feasibility studies and demonstration projects , Ljubjana, Slovenia, April 2002).
- [55] A.Pasupathy, R.Velraj, Department of Mechanical Engineering, Anna Venkateswara College of Engineering, Sriperumpudur, Tamilnadu, India, Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments.
- [56] Peippo K, Kauranen P, Lund PD, Multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating, Energy and Buildings, 1991.

- [57] Feustel HE, Stetiu C., Thermal performance of phase change wallboard for residential cooling application, Lawrence Berkeley National laboratory, 1997.
- [58] K. Lin, Y. Zhang, Experimental study of under-floor electric heating system, with shape- stabilized PCM plates, Energy and Buildings, Vol 37.
- [59] K. Nagano, S. Tadeka, study of a floor supply air conditioning system using granular phase change material to augment building thermal storage, Energy and Buildings, Vol 38.
- [60] JM Gutherz, ME Schiler, "A passive solar heating system for the perimeter zone of office buildings", Energy Sources 1991; 13: 39–54.
- [61] Markus Koschenz, Beat Lehmann., Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings. Energy Build 2004;36:567–78.
- [62] F.L.Tan, C.P.Tso, Cooling of mobile electronic devices using phase change materials.
- [63] G.Setoh, F.L.Tan, S.C.Fok, Experimental studies on the use of a phase change material for cooling mobile phones.
- [64] <http://www.goodcellphonereviews.com/samsung-blue-earth-solar-powered-mobile/>
- [65] 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.
- [67] Abdel-Kader Darwiche, Samivullah Shaik: Air conditioning remote telecom enclosures.
- [68] Harald Mehling, Luisa F. Cabeza, "Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications", Springer Berlin Heidelberg publications (2008).
- [69] Belen Zalba, Jose Marina, Luisa F. Cabeza, Harald Mehling, « Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications », October 2002.
- [70] www.rubitherm.de

[71] Yonggang Lv, Yang Zou, Li Yang: Feasibility study for thermal protection by microencapsulated phase change micro/nanoparticles during cryosurgery.

[72] Andreas Hauer, Harald Mehling, Peter Schossig, Motoi Yamaha, Luisa Cabeza, Viktoria Martin, Fredrik Setterwall: Advanced Thermal Energy Storage through Phase Change Materials and Chemical Reactions – Feasibility Studies and Demonstration projects.

[73] D. Mondieig, F. Rajabalee, Protection of temperature sensitive biomedical products using pcm, Transfusion and Aphaeresis science, Vol 28.

[74]
«<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/techbr.pdf>,»

[75]
«<http://www.pcmproducts.net/files/PCM%20Products%20General.pdf>,»

[76] H. Mehling και L. F. Cabeza, Heat and cold storage with PCM, Heat and Mass TransferII, Chapter 7: Applications in transport and storage containers, Springer Berlin Heidelberg publications , 2008.

[77] N. Παπαμανώλης, Εφαρμογές των Υλικών Αλλαγής Φάσης στα Κτήρια, <http://www.econ3.gr>, access date 23 Φεβρουαρίου 2013.

[78] Markus Koschenz, Beat Lehmann., Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings. Energy Build 2004;36:567–78.

[79] Bruno Frank, “Phase change material for space heating and cooling”, Sustainable Energy Centre: University of South Australia; Presentation 2002.

[80] C. Benard, D. Gobin, M. Gutierrez, “Experimental results of a latent heat solar roof used for breeding chickens”, Solar Energy 1981; 6(4): 347–54.

[81] Vakilatov S., Saman M., Domestic heating and cooling with thermal storage.Eight international conference on thermal energy storage , Stuttgart, Germany, 2000 .

[82] Manuel Ibanez, Ana Lazaro, Belen Zalba, Luisa F. Cabeza, An approach to the simulation of PCMs in building applications using TRNSYS.

- [83] A. Pasupathy, R. Velraj, Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management.
- [84] <http://www.pcmproducts.net/>
- [85] Halime O. Paksoy, "Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption – Fundamentals, Case Studies and Design", NATO Science Series, Springer publications (2007).
- [86] Atyah Najjar, Afif Hasan, Modeling of greenhouse with PCM energy storage
- [87] Atul Sharma, V.V.Tyagi, C.R.Chen, D.Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications
- [88] B.K.Huang, M.Toksoy, Design and analysis of greenhouse solar systems in agricultural production
- [89] Hüseyin Benli, Aydın Durmus, Performance analysis of a latent heat storage system with phase change material for new designed solar collectors in greenhouse heating
- [90] Mahmud M. Alkilani, K. Sopian, M.A. Alghoul, M. Sohif, M.H. Ruslan, Review of solar air collectors with thermal storage units
- [91] Lane, G.A., Solar Heat Storage: Latent Heat Materials Volume I: Background and Scientific Principles. Vol. I. 1983, Florida: CRC Press, Inc.
- [92] Lane GA. Solar heat storage: latent heat material, vol. II, technology. Florida: CRC Press; 1986.
- [93] Farid MM, Khudhair AM, Razack SAK, Said AH. A review on phase change energy storage: materials and applications. Energy Conversion and Management 2004;45(9-10):1597-615.
- [94] Barber Daniel A., the world solar energy project, ca. 1954. Grey room 51, spring 2013, pp. 64-93. © 2013 grey room, inc. And massachusetts institute of technology
- [95] V.V. Tyagi, S.C. Kaushik, S.K. Tyagi, T. Akiyama: Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review
- [96] http://www2.cnrs.fr/sites/en/image/serie3_139.jpg
- [97] Lane, G.A., Solar Heat Storage: Latent Heat Materials Volume I: Background and Scientific Principles. Vol. I, RC Press Inc., Florida, USA, 1983

- [98] <http://freespace.virgin.net/m.eckert/index.htm>
- [99] Khudhair AM, Farid MM., A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials, *Energy Conversion and Management* 45 (2004) 263-275.
- [100] Zhang Y., Zhou G., Lin K., Zhang Q., Di H., Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook, *Building and Environment* 42 (2007) 2197-2209.
- [101] Lane GA., *Solar Heat Storage: Latent Heat Materials*, 1983, Vol. I and II, Background and Scientific Principles, CRC Press.
- [102] Zalba B, Marin JM, Cabeza LF, Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering* 2003;23(3):251-83.
- [103] Κίμων Α Αντωνόπουλος, *Θερμικά- Ηλιακά Συστήματα, Μέρος Πρώτο*, 2008
- [104] Κίμων Α Αντωνόπουλος, *Κλιματισμός, Μέρος Πρώτο*, 20011
- [105] <http://dspace.lib.ntua.gr/handle/123456789/43337>