



Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης  
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών – Τμήμα Μηχανολογίας

Πτυχιακή Εργασία  
**Υλικά αλλαγής φάσης**



Φοιτητής: Γιαλιτάκης Ιωάννης AM 5581  
Επιβλέπων καθηγητής: Σαββάκης Κώστας

Ηράκλειο 2017-2018







## Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου που με στήριξε όλα αυτά τα χρόνια καθώς επίσης και τους συμφοιτητές μου για τις υπέροχες αναμνήσεις που αποκτήσαμε όλο αυτό το καιρό.

*Γαλιτάκης Ιωάννης*



## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	1
Περιεχόμενα .....	2
Περιεχόμενα εικόνων.....	3
Πρόλογος.....	5
Abstract.....	5
1. Εισαγωγή .....	6
1.1 Ορισμός υλικών αλλαγής φάσης – Αρχή λειτουργίας.....	6
1.2 Ιστορική εξέλιξη υλικών αλλαγής φάσης.....	9
1.3 Ιδιότητες και κατηγοριοποίηση των υλικών αλλαγής φάσης .....	11
1.3.1 Οργανικά υλικά αλλαγής φάσης .....	11
1.3.2 Ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης.....	14
1.3.3 Ευτηκτικά υλικά αλλαγής φάσης.....	16
1.3.4 Σύγκριση των κατηγοριών υλικών αλλαγής φάσης .....	17
2. Εφαρμογές υλικών αλλαγής φάσης σε κτήρια.....	19
2.1 Κριτήρια επιλογής υλικών αλλαγής φάσης.....	22
2.2 Γενικές εφαρμογές για ψύξη / θέρμανση.....	24
2.3 Εφαρμογές για θερμική μόνωση.....	28
2.4 Εφαρμογές για υποδαπέδια συστήματα θέρμανσης .....	31
2.5 Εφαρμογές για γυψοσανίδες .....	36
2.6 Εφαρμογές για οροφές.....	39
2.7 Εφαρμογές για υάλινες επιφάνειες.....	44
3. Λοιπές εφαρμογές.....	46
3.1 Εφαρμογές σε θερμοκήπια .....	46
3.2 Εφαρμογές σε ηλεκτρονικά.....	48
3.3 Εφαρμογές σε συσκευασίες προϊόντων .....	52
3.4 Εφαρμογές σε αυτοκίνητα .....	57
3.5 Εφαρμογές σε ρούχα .....	60
3.6 Εφαρμογές σε φωτοβολταϊκά .....	61
4. Συμπεράσματα και μελλοντική εξέλιξη .....	67
Βιβλιογραφία .....	68
Πληροφορίες εγγράφου .....	69



## Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1.1: Ο μηχανισμός λειτουργίας των υλικών αλλαγής φάσης.....	6
Εικόνα 1.2: Διάγραμμα θερμοκρασιακής συμπεριφοράς υλικών αλλαγής φάσης με τους αντίστοιχους τύπους της κάθε μεταβολής.....	7
Εικόνα 1.3: Διάγραμμα θερμοκρασιακής συμπεριφοράς υλικών αλλαγής φάσης.....	8
Εικόνα 1.4: Το σπίτι του Ντόβερ όπως αυτό σχεδιάστηκε.....	10
Εικόνα 1.5: Κατηγορίες υλικών αλλαγής φάσεων.....	12
Εικόνα 1.6: Πίνακας θερμικών ιδιοτήτων κεριών παραφίνης για χρήση σε υλικά αλλαγής φάσης.....	13
Εικόνα 1.7: Πίνακας θερμικών ιδιοτήτων πολύ-αιθυλενογλυκολών για χρήση σε υλικά αλλαγής φάσης.....	13
Εικόνα 1.8: Πίνακας θερμικών ιδιοτήτων λιπαρών οξέων και παραγώγων τους για χρήση σε υλικά αλλαγής φάσης.....	14
Εικόνα 1.9: Πίνακας θερμικών ιδιοτήτων οργανικών και ανόργανων υλικών αλλαγής φάσεων.....	15
Εικόνα 2.1: Βασική εφαρμογή και λειτουργία υλικού αλλαγής φάσης σε κτίριο.....	19
Εικόνα 2.2: Παράδειγμα εφαρμογής υλικών αλλαγής φάσης σε τοίχους και οροφές.....	20
Εικόνα 2.3: Εφαρμογή υλικών αλλαγής φάσης σε γυψοσανίδες και δομικά υλικά.....	21
Εικόνα 2.4: Διάγραμμα βημάτων επιλογής υλικών αλλαγής φάσης.....	23
Εικόνα 2.5: (α) Σχέδιο συστήματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. (β) Σχέδιο λειτουργίας παντζουριού την ημέρα. (γ) Σχέδιο λειτουργίας παντζουριού την νύχτα.....	24
Εικόνα 2.6: Μονάδα θερμικών σωλήνων μόνωσης PCM.....	25
Εικόνα 2.7: Υποδαπέδιο σύστημα θέρμανσης.....	26
Εικόνα 2.8: Ταβανοσανίδα με υλικά αλλαγής φάσης.....	27
Εικόνα 2.9: Πίνακας θερμοφυσικών ιδιοτήτων πρώτου υλικού αλλαγής φάσης.....	28
Εικόνα 2.10: Πίνακας θερμοφυσικών ιδιοτήτων δεύτερου υλικού αλλαγής φάσης.....	28
Εικόνα 2.11: Πορώδες υλικό πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) τον εμποτισμό με υλικό αλλαγής φάσης.....	29
Εικόνα 2.12: Γράφημα απεικόνισης καμπύλης υλικού αλλαγής φάσης χωρίς (κόκκινη καμπύλη) και μαζί με το οικοδομικό υλικό (μαύρη καμπύλη).....	29
Εικόνα 2.13: Πίνακας ιδιοτήτων υλικών.....	30
Εικόνα 2.14: Τούβλο 6 πών, υλικό αλλαγής φάσης και σωλήνες.....	30
Εικόνα 2.15: Γράφημα απεικόνισης θερμοκρασίας στο εσωτερικό του τούβλου ως προς τον χρόνο, για σταθερή εξωτερική θερμοκρασία 40°C.....	31
Εικόνα 2.16: Πίνακας ιδιοτήτων τούβλου με και χωρίς υλικό αλλαγής φάσης.....	31
Εικόνα 2.17: Υλικό αλλαγής φάσης κατασκευασμένο από 75% παραφίνη και 25% πολυαιθυλένιο.....	32
Εικόνα 2.18: Πίνακας υλικού αλλαγής φάσης.....	32
Εικόνα 2.19: Γράφημα απεικόνισης θερμικής ροής συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	32
Εικόνα 2.20: Πειραματικό δωμάτιο.....	33
Εικόνα 2.21: Στρώματα από το δάπεδο του πειραματικού δωματίου.....	33
Εικόνα 2.22: Σημεία τοποθέτησης των θεرمόμετρων.....	34
Εικόνα 2.23: Θερμοκρασία πειραματικού δωματίου χωρίς το υλικό αλλαγής φάσης σε διάστημα 4 ημερών.....	34
Εικόνα 2.24: Θερμοκρασία πειραματικού δωματίου με το υλικό αλλαγής φάσης σε διάστημα 6 ημερών.....	35
Εικόνα 2.25: Πίνακας που εμφανίζει τις θερμοκρασίες για τους χειμερινούς μήνες.....	36
Εικόνα 2.26: Γράφημα απεικόνισης θερμικής ροής συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	36
Εικόνα 2.27: Γράφημα απεικόνισης θερμικής ροής συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	37
Εικόνα 2.28: Συγκριτικό γράφημα ειδικής θερμικής χωρητικότητας γυψοσανίδας και γυψοσανίδας με υλικό αλλαγής φάσης.....	37
Εικόνα 2.29: Σχέδιο πειραματικού δωματίου.....	38
Εικόνα 2.30: Συγκριτικό γράφημα θερμοκρασίας πειραματικού δωματίου με και χωρίς το υλικό αλλαγής φάσης - εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος.....	38
Εικόνα 2.31: Συγκριτικό γράφημα θερμοκρασίας πειραματικού δωματίου με και χωρίς το υλικό αλλαγής φάσης - εσωτερική θερμοκρασία δωματίου.....	38
Εικόνα 2.32: Συγκριτικό γράφημα διαφοράς θερμοκρασίας αέρα - τοίχου του πειραματικού δωματίου με και χωρίς το υλικό αλλαγής φάσης.....	39
Εικόνα 2.33: Εικόνα πειραματικής οικείας με επένδυση υλικού αλλαγής φάσης σε τοίχους και οροφές.....	40
Εικόνα 2.34: Επεξηγηματική εικόνα στρώσεων υλικού αλλαγής φάσης σε οροφές.....	41



Εικόνα 2.35: Αποτελέσματα διακύμανσης θερμοκρασίας για όλο το χρόνο με και χωρίς εφαρμογή υλικών αλλαγής φάσης.....	42
Εικόνα 2.36: Εφαρμογή υλικών αλλαγής φάσης σε πλακίδια οροφής .....	43
Εικόνα 2.37: Υλικά αλλαγής φάσης εντός υάλινων επιφανειών και παραθύρων.....	44
Εικόνα 2.38: Αλλαγή φάσεων σε υλικό αλλαγής φάσης εγκλεισμένο σε υάλινη επιφάνεια.....	45
Εικόνα 3.1: Υλικά αλλαγής φάσης μορφής σωλήνα εφαρμοσμένα σε πραγματικό θερμοκήπιο.....	46
Εικόνα 3.2: Υλικά αλλαγής φάσης τοίχου, εφαρμοσμένα σε πραγματικό θερμοκήπιο.....	47
Εικόνα 3.3: Διάγραμμα θερμοκρασιών επεξεργαστή με θερμική πάστα, υλικό αλλαγής φάσης και ξηρή σύνδεση.....	48
Εικόνα 3.4: Εμπορική εφαρμογή υλικού φιλμ αλλαγής φάσης για τη ψύξη ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.....	49
Εικόνα 3.5: Εμπορικό προϊόν της NASA για ψύξη ηλεκτρονικών κυκλωμάτων στο διάστημα με χρήση υλικού αλλαγής φάσης με παραφίνη .....	50
Εικόνα 3.6: Διάγραμμα απόδοσης θερμοκρασίας σε ηλεκτρονική εφαρμογή με τη χρήση υλικών αλλαγής φάσης.....	51
Εικόνα 3.7: Συσκευασία από υλικό αλλαγής φάσης .....	53
Εικόνα 3.8: Συσκευασία από υλικό αλλαγής φάσης με χρήση παραφίνης.....	54
Εικόνα 3.9: Σύστημα υλικού αλλαγής φάσης για συσκευασίες με χρήση γέλης.....	55
Εικόνα 3.10: Σύστημα υλικού αλλαγής φάσης για συσκευασίες με χρήση φυτικών ελαίων .....	56
Εικόνα 3.11: Σύστημα υλικού αλλαγής φάσης για συσκευασίες με χρήση Ευτηκτικών αλάτων .....	57
Εικόνα 3.12: Εφαρμογή υλικών αλλαγής φάσης σε πειραματικό στάδιο σε αυτοκίνητο .....	58
Εικόνα 3.13: Θερμική απόκριση αυτοκινήτου με εφαρμογή υλικών αλλαγής φάσης και χωρίς .....	59
Εικόνα 3.14: Υλικά αλλαγής φάσης εντός κάψουλας – θεωρητική προσέγγιση .....	60
Εικόνα 3.15: Ρούχο φτιαγμένο με υποδοχές για υλικά αλλαγής φάσης.....	61
Εικόνα 3.16: Υλικά αλλαγής φάσης τοποθετημένα στο πίσω πλαίσιο φωτοβολταϊκού .....	62
Εικόνα 3.17: Διάγραμμα φωτοβολταϊκών με χρήση PCM στο σκελετό τους.....	63
Εικόνα 3.18: Διάγραμμα θερμοκρασιών φωτοβολταϊκών σταθμών με και χωρίς χρήση υλικών αλλαγής φάσης .....	64
Εικόνα 3.19: Επιλογή υλικού αλλαγής φάσης και τοποθέτησή του στο πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού πάνελ.....	65

## Πρόλογος

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάζεται ο σκοπός, η ανάπτυξη, η λειτουργία, οι κατηγορίες και τα κριτήρια επιλογής των υλικών αλλαγής φάσης. Πρόκειται για μια σπουδαία και ιδιαίτερα χρήσιμη κατηγορία υλικών η οποία είναι πολλά υποσχόμενη ειδικότερα στο τομέα των θερμομονώσεων.

Στα πρώτα κεφάλαια της παρούσας πτυχιακής αναγράφονται οι ιδιότητες και οι κατηγορίες των υλικών αλλαγής φάσης ενώ στα επόμενα κεφάλαια περιγράφεται και τονίζεται η σημαντικότητα της εφαρμογής των υλικών αλλαγής φάσης σε μεγάλος εύρος εφαρμογών. Στη συγκεκριμένη κατηγορία υλικών γίνονται πολλές επενδύσεις και υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για τη περαιτέρω ανάπτυξή τους και όχι μόνο για εφαρμογές θερμομόνωσης.

Τα υλικά αυτά δίνουν τις λύσεις για καλύτερη ενεργειακή οικονομία τόσο σε κτιριακές εφαρμογές όσο και σε περιβαλλοντικές εφαρμογές ακόμα και σε ηλεκτρονικά. Στη παρούσα πτυχιακή αναλύονται οι τομείς εφαρμογής αυτών των καινοτόμων υλικών καθώς και τα πεδία έρευνας σε σχέση με τα υλικά αλλαγής φάσης. Εκτενής αναφορά επίσης γίνεται και στο κόστος δημιουργίας και εφαρμογής τους.

## Abstract

This thesis examines the purpose, development, function, categories and criteria for selection of phase change materials. This is a great and very useful category of materials which is promising particularly in the field of thermal insulation.

The first chapters of this thesis describe the properties and categories of phase change materials, and the following chapters describe and highlight the importance of applying phase change materials to a wide range of applications. There is a lot of investment in this category of materials and there is great interest in their further development and not just thermal insulation applications.

These materials provide solutions for better energy savings both in building applications and in environmental applications, even in electronics. This section examines the fields of application of these innovative materials as well as the fields of research in relation to phase change materials. Extensive reference is also made to the cost of creating and implementing such materials.



# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Ορισμός υλικών αλλαγής φάσης – Αρχή λειτουργίας

Υλικά αλλαγής φάσης ή αλλιώς PCM (Phase Change Materials) είναι υλικά με υψηλές θερμοκρασίες σύτηξης τα οποία τήκονται και στερεοποιούνται σε ορισμένες θερμοκρασίες και είναι ικανά να αποθηκεύουν και να απελευθερώνουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Η θερμότητα απορροφάται ή απελευθερώνεται όταν το υλικό μεταβάλλεται από στερεό σε υγρό και αντίστροφα. Επομένως αυτά τα υλικά, ταξινομούνται ως μονάδες αποθήκευσης με λανθάνουσα θερμότητα (LHS – Latent heat Storage) [1].

Η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί σε όλες τις αλλαγές φάσης των υλικών. Ωστόσο, μόνο οι μεταβολές στερεάς φάσης σε υγρά και οι φάσεις από υγρά σε στερεά είναι πρακτικές για τα υλικά αλλαγής φάσεων.

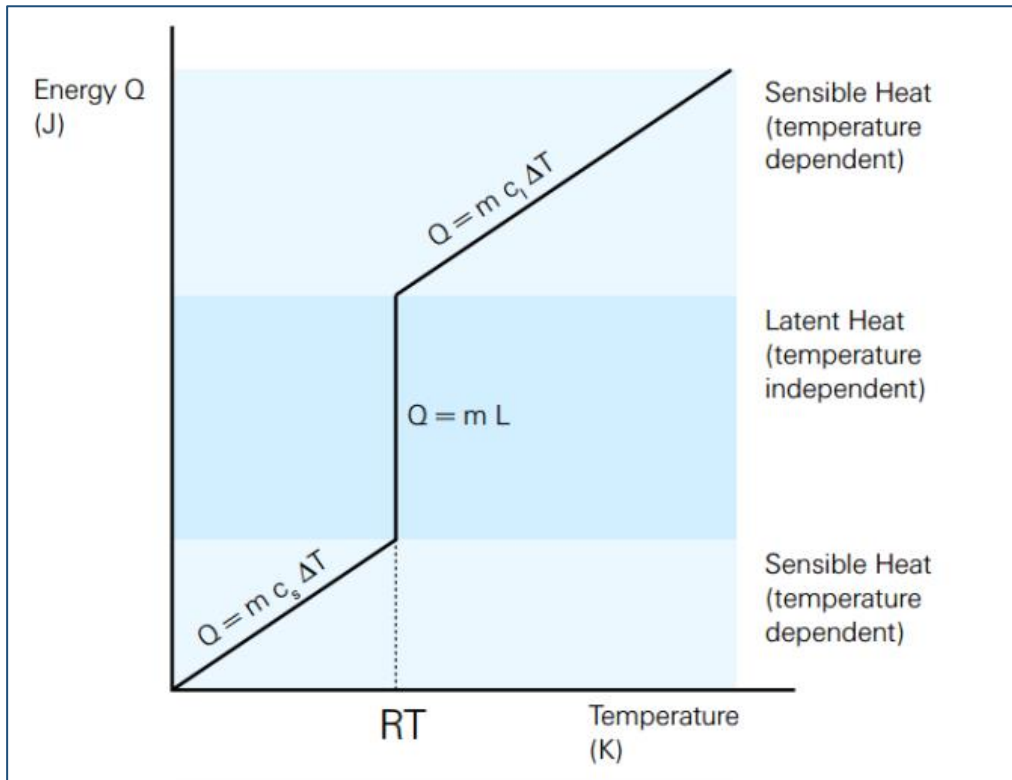
Παρόλο που οι μεταβολές από υγρά σε αέρια έχουν υψηλότερη θερμότητα μετασχηματισμού από τις μεταβολές στερεών σε στερεά και σε υγρά, οι αλλαγές φάσης υγρού σε αέριο, δεν είναι πρακτικές διότι απαιτούν μεγάλες ποσότητες ή υψηλές πιέσεις για την αποθήκευση των υλικών στην αέρια φάση τους. Οι αλλαγές αυτές και ειδικότερα από στερεό σε στερεό, είναι συνήθως πολύ αργές και έχουν σχετικά χαμηλή θερμότητα μετασχηματισμού.



Εικόνα 1.1: Ο μηχανισμός λειτουργίας των υλικών αλλαγής φάσης

Αρχικά, τα PCM στερεών – υγρών συμπεριφέρονται σαν υλικά λογικής αποθήκευσης θερμότητας (SHS). Αυτό σημαίνει πως η θερμοκρασία τους αυξάνεται καθώς απορροφούν θερμότητα. Σε αντίθεση με τα συμβατικά υλικά SHS όμως, όταν τα PCM φτάσουν σε θερμοκρασία στην οποία αλλάζουν φάση (θερμοκρασία τήξης) απορροφούν μεγάλες ποσότητες θερμότητας σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία.

Τα PCM συνεχίζουν να απορροφούν τη θερμότητα χωρίς σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας τους μέχρις ότου όλο το υλικό να μετασχηματιστεί στην υγρή του φάση. Όταν πέσει η θερμοκρασία περιβάλλοντος γύρω από ένα υγρό υλικό, το PCM στερεοποιείται απελευθερώνοντας σταθερά την αποθηκευμένη λανθάνουσα θερμότητα.



Εικόνα 1.2: Διάγραμμα θερμοκρασιακής συμπεριφοράς υλικών αλλαγής φάσης με τους αντίστοιχους τύπους της κάθε μεταβολής

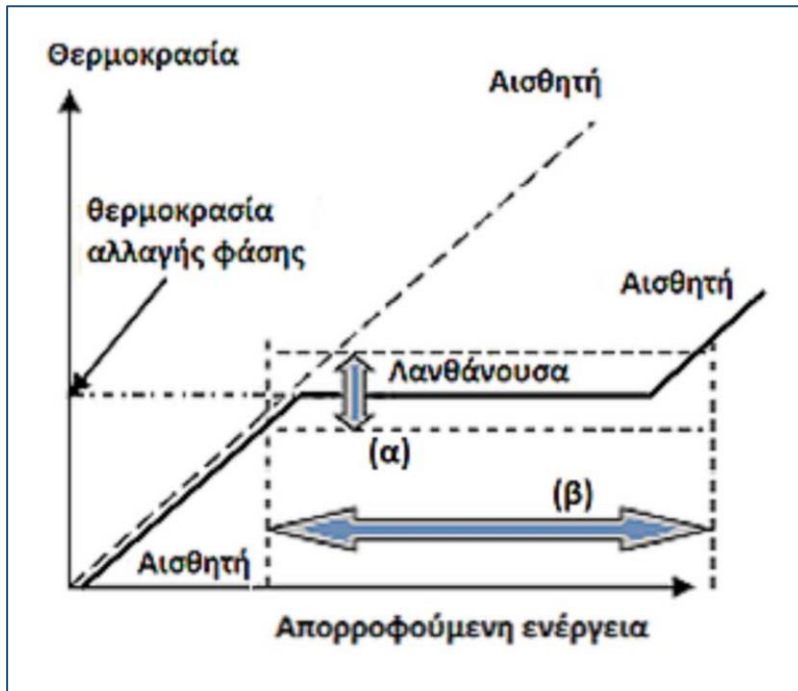
Τα υλικά αλλαγής φάσης είναι διαθέσιμα σε οποιοδήποτε απαιτούμενο θερμοκρασιακό εύρος, από -5 έως και 190° C. Εντός κλίμακας ανθρώπινης άνεσης, δηλαδή μεταξύ 20 έως 30° C ορισμένα PCM είναι πολύ αποτελεσματικά αποθηκεύοντας 5 έως και 14 φορές περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα όγκου σε σύγκριση με τα συμβατικά υλικά αποθήκευσης όπως το νερό και η πέτρα [1].

Η θερμοχωρητικότητα των υλικών αυτών είναι συγκεκριμένη και καθορίζεται από τον ακόλουθο τύπο που δίνει τη θερμοχωρητικότητα λόγο όγκου,

$$VHC = \rho c_p \text{ σε } J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1} \text{ (1)},$$

Όπου,  $\rho$  είναι η πυκνότητα του υλικού σε  $kg \cdot m^{-3}$  και  $c_p$  είναι η ειδική σταθερά θερμοχωρητικότητας με μονάδες  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ .

Η ογκομετρική χωρητικότητα θερμότητας (VHC), περιγράφει την ικανότητα ενός υλικού δεδομένου όγκου, να αποθηκεύει εσωτερική ενέργεια ενώ υφίσταται μια δεδομένη αλλαγή θερμοκρασίας, αλλά χωρίς να υποστεί μεταβατική φάση. Στη παρακάτω εικόνα, απεικονίζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας συναρτήσει της ενέργειας σε ένα υλικό αλλαγής φάσης.



Εικόνα 1.3: Διάγραμμα θερμοκρασιακής συμπεριφοράς υλικών αλλαγής φάσης



## 1.2 Ιστορική εξέλιξη υλικών αλλαγής φάσης

Οι πρώτες προσπάθειες που έγιναν για να χρησιμοποιηθούν τα υλικά αλλαγής φάσης κυρίως στη θέρμανση και τη ψύξη κτηρίων ξεκινούν το 1920. Στα τέλη της δεκαετίας του 1940 κτίζονται τα πρώτα σπίτια-δείγματα που χρησιμοποιούν πλέον υλικά αλλαγής φάσης για την επένδυση των τοίχων τους.

Η Δρ. Maria Telkes από τις Η.Π.Α, ήταν από τους πρώτους που προσπάθησε να εισαγάγει τα καινοτόμα για την εποχή υλικά αλλαγής φάσης στα κτήρια. Το 1946 η Δρ. Maria Telkes πρότεινε τη κατασκευή ενός δοκιμαστικού πρότυπου σπιτιού, που ονομάστηκε το σπίτι του Ντόβερ και που κατασκευάστηκε με τη βοήθεια του αρχιτέκτονα Eleanor Raymond σε ένα κτήμα κοντά στη Βοστώνη. Το σπίτι αποτελείτο από έναν όροφο 135 m<sup>2</sup> με δύο υπνοδωμάτια, κουζίνα, σαλόνι και γκαράζ.

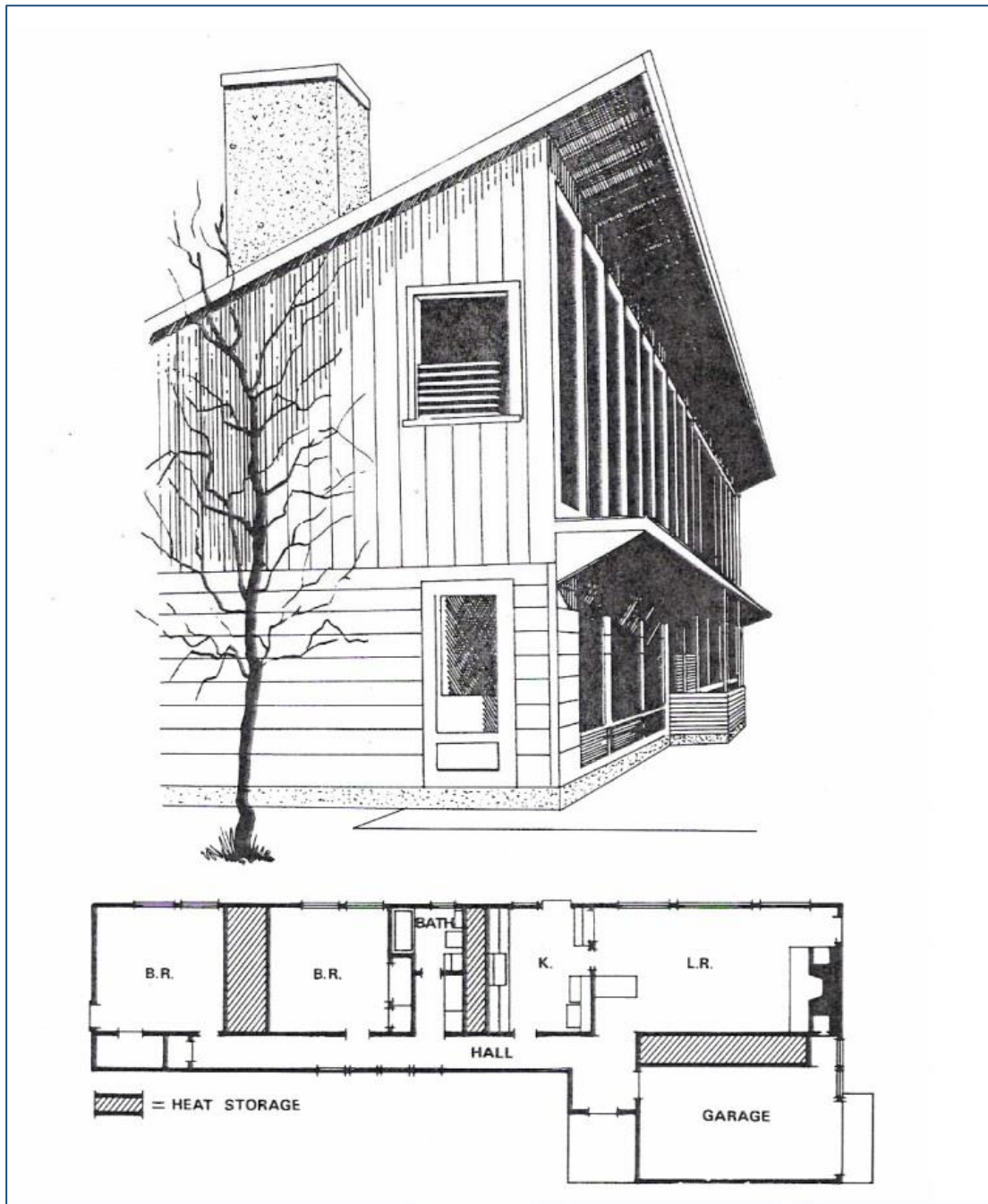
18 ηλικικοί συλλέκτες συνολικής επιφάνειας 67 m<sup>2</sup> συνέλλεξαν θερμική ενέργεια. Στη συνέχεια, η θερμότητα αυτή μεταφερόταν μέσω ενός αγωγού με τη βοήθεια ενός ανεμιστήρα σε τρία «δοχεία» αποθήκευσης που βρίσκονταν ανάμεσα στα δωμάτια. Κάθε τέτοιο «δοχείο» είχε χωρητικότητα 1.9 m<sup>3</sup> και περιείχε ως υλικό αλλαγής φάσης το λεγόμενο άλας του Glauber (ένυδρο θειικό άλας, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> · 10H<sub>2</sub>O) με σημείο τήξης τους 32° C.

Με 21 τόνους υλικού αλλαγής φάσης που περιείχαν συνολικά τα «δοχεία» αποθήκευσης το κτήριο μπορούσε να αποθηκεύει θερμότητα ύψους 11 MJ (4.7 εκατομ. Btu). Τα PCM που διέθετε το κτήριο είχαν την ικανότητα να αποθηκεύουν θερμότητα για 12 ημέρες παρέχοντας αισθητή θερμότητα για θερμοκρασίες μέχρι 32° C (σημείο τήξης).

Η κατασκευή ολοκληρώθηκε το 1948 με κόστος 20.000 δολάρια εκ των οποίων τα 3.000 δολάρια είχαν δαπανηθεί για την εγκατάσταση των PCM. Το σπίτι κατοικήθηκε από τον Dr. Anthony Nemethy και την οικογένειά του, ο οποίος τα πρώτα δύο χρόνια έμεινε απόλυτα ικανοποιημένος από τη θερμοκρασιακή συμπεριφορά του οικήματος.

Όπως αναφέρει ο Telkes, τα πρώτα δύο έτη το σύστημα θέρμανσης αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματικό ακόμα και σε περιόδους με επτά ημέρες συνεχόμενης συννεφιάς. Το σύστημα λειτούργησε με επιτυχία παρέχοντας ένα άνετο περιβάλλον γύρω στους 21° C, χωρίς να χρειαστεί οποιοδήποτε συνοδευτικό σύστημα θέρμανσης. Τον τρίτο χρόνο, όμως, το σύστημα απέτυχε. Βρέθηκε ότι η απόδοση του άλατος του Glauber πέφτει μετά από επαναλαμβανόμενους κύκλους.

Παρατηρήθηκε ότι το άλας του Glauber είχε διαχωριστεί σε διάλυμα και άνυδρο άλας (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), χάνοντας έτσι την αποθηκευτική του ιδιότητα. Επίσης τα «δοχεία» αποθήκευσης άρχισαν να διαβρώνονται, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι απώλειες. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 80 κατασκευάστηκε υλικό αλλαγής φάσης με ενθυλακωμένη παραφίνη (κερί) για τη χρήση σε μόνωση κτιρίων. Όταν τα υλικά αποθήκευσης θερμότητας που αλλάζουν φάση ενσωματώνονται στο περίβλημα του κτιρίου ή στα εσωτερικά δομικά στοιχεία του κτιρίου, κατά τη διάρκεια της ημέρας απορροφούν θερμότητα από το τζάμι και το αδιαφανές περίβλημα.



Εικόνα 1.4: Το σπίτι του Ντόβερ όπως αυτό σχεδιάστηκε

Τα επόμενα βήματα σχετικά με τα υλικά αλλαγής φάσης, έγιναν το 1978 όταν ξεκίνησε να χρησιμοποιείται η παραφίνη σα κύριο υλικό. Καθώς το υλικό αλλαγής φάσης από παραφίνη λιώνει, σταθεροποιείται η εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου.

Τη νύκτα όταν μειώνονται οι θερμοκρασίες του εσωτερικού χώρου, σε σενάρια παθητικής ψύξης, το υλικό αλλαγής φάσης απελευθερώνει την αποθηκευμένη ενέργεια, μετατρέπεται ξανά σε στερεό και αποτρέπει έτσι την υπερβολικά χαμηλή θερμοκρασία των δωματίων. Από το 1948, περισσότεροι πόροι έχουν επενδυθεί για την ανάπτυξη αυτών των υλικών ενώ τα συστήματα έχουν μελετηθεί πλέον εκτενώς κυρίως από τα τέλη της δεκαετίας του 90.



Ωστόσο, παρά τα πολυάριθμα πειραματικά αποδεδειγμένα πλεονεκτήματα απόδοσης και το γεγονός ότι έχει ήδη επιλυθεί μεγάλο μέρος των δυσκολιών που συνδέονται με το σχεδιασμό συστημάτων ενισχυμένων με PCM και της μακροχρόνιας ανθεκτικότητάς τους, η τεχνολογία εξακολουθεί να κινείται μέσω του ανώμαλου δρόμου ανάπτυξης και αποδοχής της αγοράς. Το 2014, θα μπορούσε να συναχθεί το συμπέρασμα ότι για πολλές εφαρμογές PCM ο λόγος κόστους προς όφελος είναι απλά πολύ υψηλός για πολλές εφαρμογές PCM, ώστε να γίνει μια κοινή επιλογή σχεδιασμού επιλογής [3].

### 1.3 Ιδιότητες και κατηγοριοποίηση των υλικών αλλαγής φάσης

Τα υλικά αλλαγής φάσης ή αλλιώς PCM υπάρχουν πλέον διαθέσιμα σε πολλές μορφές, κατηγορίες και για κάθε είδους εφαρμογή. Οι πιο βασικές κατηγορίες των υλικών αυτών βάση τη σύστασή τους παρουσιάζεται στα επόμενα υποκεφάλαια.

#### 1.3.1 Οργανικά υλικά αλλαγής φάσης

Η πρώτη κύρια κατηγορία υλικών αλλαγής φάσης είναι τα οργανικά PCM. Με τον όρο «οργανικά» ορίζονται στη σύγχρονη χημεία τα υλικά που έχουν δημιουργηθεί με ενώσεις βασισμένες στον άνθρακα. Οι περισσότεροι είναι συνδυασμοί μερικών από τα ελαφρύτερα στοιχεία, ιδιαίτερα του άνθρακα του αζώτου και του οξυγόνου.

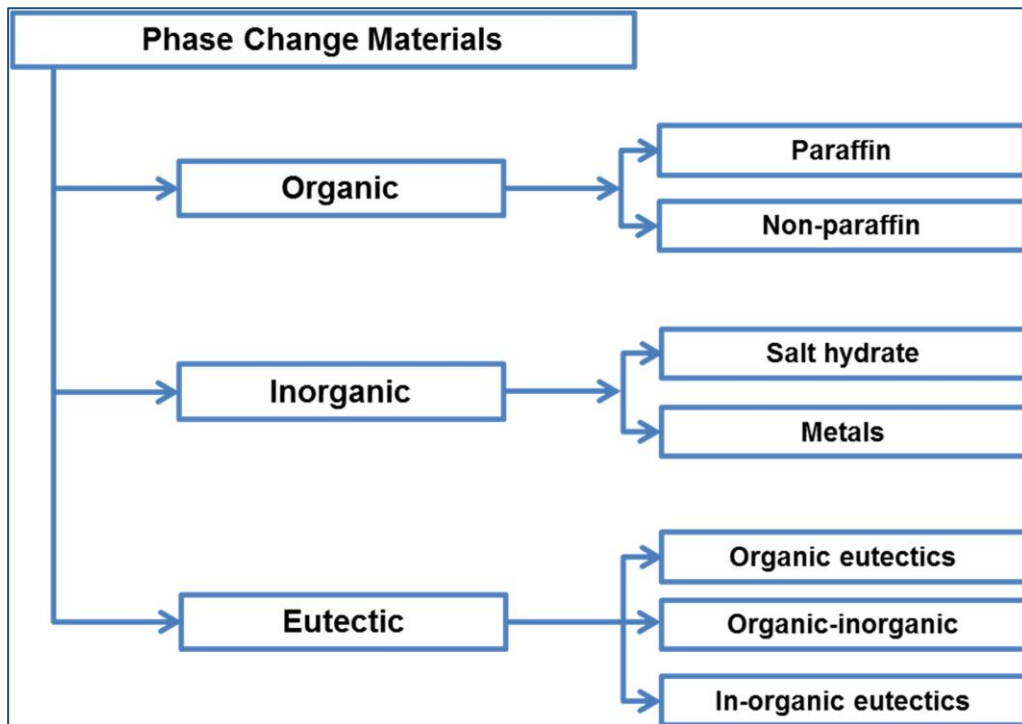
Τα οργανικά PCMs και τα μείγματα τους που δείχνουν αλλαγή φάσης γύρω στους 18-65 ° C είναι κατάλληλα για εφαρμογές θερμικής άνεσης σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα και σε κτίρια.

Τα γνωστά και εκτενώς μελετημένα οργανικά PCMs, τα οποία υφίστανται μετάβαση φάσης στερεού-υγρού κατά τη διάρκεια της θέρμανσης και της επακόλουθης ψύξης, ήταν οι παραφινικοί κηροί, poly (αιθυλενογλυκόλη), λιπαρά οξέα και τα παράγωγά τους. Επιπλέον, μια ομάδα οργανικών PCMs, όπως οι πολυαλκοόλες είναι και τα πολυαιθυλένια, τα οποία υπόκεινται σε μετάπτωση στερεάς-στερεής φάσης σε σταθερή θερμοκρασία απορροφώντας και απελευθερώνοντας μεγάλη ποσότητα λανθάνουσας θερμότητας, έχουν δοθεί προσοχή ως πολλά υποσχόμενα οργανικά PCMs.

Τα γενικά πλεονεκτήματα από αυτή τη κατηγορία υλικών αλλαγής φάσης, είναι τα ακόλουθα,

1. Υψηλή ικανότητα λανθάνουσας θερμότητας για υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης,
2. Μικρή μεταβολή όγκου κατά τη διάρκεια της μετάβασης φάσης,
3. Επαναληψιμότητα του προϊόντος,
4. Θερμική σταθερότητα κατά τη διάρκεια πολλών κύκλων θέρμανσης και ψύξης,
5. Υψηλή πυκνότητα ώστε να επιτρέπεται μικρό μέγεθος δοχείου αποθήκευσης,
6. Χημικά σταθερά,
7. Μη διαβρωτικά,
8. Μη τοξικά,
9. Μη εύφλεκτα,
10. Χαμηλό κόστος και
11. Εύκολα διαθέσιμα.

Οι περιορισμοί που αναφέρθηκαν από πολλούς ερευνητές είναι η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα που διαθέτουν πολλά οργανικά PCM, που οδηγούν σε χαμηλό ρυθμό φόρτισης και εκφόρτισης θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα την υπερψύξη σε κύκλους ψύξης και ανάγκη για δοχεία για την πρόληψη της διαρροής των υλικών αυτών.



Εικόνα 1.5: Κατηγορίες υλικών αλλαγής φάσεων

### 1.3.1.1 Παραφίνη

Μία από τις σημαντικότερες ομάδες οργανικών PCM είναι τα κεριά παραφίνης. Αποτελούνται από ένα μίγμα κατά κύριο λόγο ευθείας αλυσίδας *n*-αλκάνια,  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{CH}_3$ . Έχουν διεξαχθεί διάφορες σειρές ερευνών, με τη χρήση αδιαβατικής θερμιδομετρίας υψηλής ακρίβειας, για τη μέτρηση των θερμικών ιδιοτήτων των γραμμικών *n*-αλκανίων το 1930-1950.

Μελέτες έχουν δείξει ότι τα κεριά παραφίνης απορροφούν, αποθηκεύουν και απελευθερώνουν επανειλημμένα μεγάλη ποσότητα θερμότητας κατά τη διάρκεια μετατροπών φάσεων μεταξύ στερεών και υγρών φάσεων, έχουν σημαντικά υψηλή αποθηκευτική ικανότητα λανθάνουσας θερμότητας μεταξύ  $200 \text{ kJ kg}^{-1}$  και  $250 \text{ kJ kg}^{-1}$  και έχουν ευρύ φάσμα θερμοκρασιών τήξης με θερμική σταθερότητα μέχρι  $250^\circ\text{C}$ .

Δεν εμφανίζουν διαχωρισμό φάσης κατά τη διάρκεια επαναλαμβανόμενων μεταβάσεων φάσης. Είναι χημικώς αδρανείς, μη διαβρωτικά, άοσμα, μακράς διάρκειας, φθηνά υλικά, εύκολα διαθέσιμα, οικολογικά αβλαβή και μη τοξικά. Χάρη σε αυτά τα εξαιρετικά χαρακτηριστικά, τα κεριά παραφίνης και τα μίγματα αυτών έχουν προτιμηθεί ευρέως για πολλές εφαρμογές εμπορικής θερμικής αποθήκευσης [4],[5]. Οι θερμικές ιδιότητες των υλικών αυτών παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

Κερί Παραφίνης	Μοριακή δομή	Μοριακή μάζα ( $\text{g mol}^{-1}$ )	Θερμοκρασία τήξης ( $^\circ\text{C}$ )	Θερμοκρασία Κρυστάλλωσης ( $^\circ\text{C}$ )	$\Delta H_{\text{fus}}$ ( $\text{kJ kg}^{-1}$ )
<i>n</i> -Dodecane	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_3$	170.3	-10	-16	216
<i>n</i> -Tridecane	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{CH}_3$	184.4	-5	-9	160
<i>n</i> -Tetradecane	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{CH}_3$	198.0	5-6	0	227
<i>n</i> -Pentadecane	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{13}\text{CH}_3$	212.0	10	5	205



<i>n</i> -Hexadecane	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>14</sub> CH <sub>3</sub>	226.0	18–19	17	237
<i>n</i> -Heptadecane	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>15</sub> CH <sub>3</sub>	240.0	22	22	171
<i>n</i> -Octadecane	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> CH <sub>3</sub>	254.0	28	25	242
<i>n</i> -Nonadecane	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>17</sub> CH <sub>3</sub>	268.0	32–33	27	222
<i>n</i> -Eicosane	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>18</sub> CH <sub>3</sub>	282.0	36–37	31	247
<i>n</i> -Heneicosane	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>19</sub> CH <sub>3</sub>	296.0	39–41	32	201
<i>n</i> -Docosane	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>20</sub> CH <sub>3</sub>	310.0	42–45	43	157
<i>n</i> -Tricosane	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>21</sub> CH <sub>3</sub>	324.0	48.9	51	142
<i>n</i> -Tetracosane	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>22</sub> CH <sub>3</sub>	338.0	50–51	48–49	160
<i>n</i> -Pentacosane	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>23</sub> CH <sub>3</sub>	352.0	54	47	164
<i>n</i> -Hexacosane	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>24</sub> CH <sub>3</sub>	366.0	56	53–54	255
<i>n</i> -Heptacosane	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>25</sub> CH <sub>3</sub>	380.0	59	53	159
<i>n</i> -Octacosane	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>26</sub> CH <sub>3</sub>	394.0	61	54	202

Εικόνα 1.6: Πίνακας θερμικών ιδιοτήτων κεριών παραφίνης για χρήση σε υλικά αλλαγής φάσης

### 1.3.1.2 Poly(ethylene glycol)s

Οι PEG ή αλλιώς και ως πολύ-αιθυλενογλυκόλες, ερευνηθήκαν ως PCM υλικά σε ποικίλες εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης από κέλυφος σε υφάσματα, αφρούς και ίνες λόγω των επιθυμητών χαρακτηριστικών τους, όπως η υψηλή θερμότητα σύντηξης, τα χαμηλά και μέτρια διαστήματα θερμοκρασίας τήξης, η χαμηλή πίεση ατμών όταν τήκεται, και θερμικά σταθερές, μη εύφλεκτες, βιοδιασπώμενες, μη τοξικές, μη διαβρωτικές και φθηνές [4],[5]. Οι θερμικές ιδιότητες των υλικών αυτών παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

Μέση μοριακή μάζα (g mol <sup>-1</sup> )	Θερμοκρασία Τήξης (°C)	ΔH <sub>fus</sub> (kJ kg <sup>-1</sup> )	Θερμοκρασία κρυστάλλωσης (°C)	ΔH <sub>cryst</sub> (kJ kg <sup>-1</sup> )
400	3.2	91.4	-24	85–86
600	22.2	108.4	-7	116
1000	32.0	149.5	28	140
1500	46.5	176.3	39–40	169
2000	51.0	181.4	35	168
3400	56.6	174.1	29	159
4000	59.7	189.7	22	167
6000	64.8	189.0	33	161
10,000	66.0	189.6	38	167
20,000	68.7	187.8	38	161

Εικόνα 1.7: Πίνακας θερμικών ιδιοτήτων πολύ-αιθυλενογλυκολών για χρήση σε υλικά αλλαγής φάσης





### 1.3.1.3 Λιπαρά οξέα και παράγωγα λιπαρών οξέων

Το επαναφερθέν ενδιαφέρον για τη χρήση λιπών και ελαίων για βιώσιμη χημεία οδήγησε στην αυξανόμενη σημασία των υλικών που παρασκευάζονται από αυτά. Τα λίπη και έλαια με βάση τα ζώα και τα φυτά τυπικά υδρολύονται για να ληφθούν μίγματα λιπαρών οξέων που καθαρίζονται και στη συνέχεια διαχωρίζονται. Τα λιπαρά οξέα συγκαταλέγονται στις λίγες ανανεώσιμες πρώτες ύλες, που έχουν ιδιότητες συγκρίσιμες με αυτές των παραφινικών κηρών σε εφαρμογές PCM.

Διαθέτουν κάποιες ανώτερες ιδιότητες, όπως συνάφεια τήξης, καλή χημική και θερμική σταθερότητα, μη τοξικότητα, βιοδιασπασιμότητα και κατάλληλη κλίμακα θερμοκρασιών τήξης για αρκετές εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας. Είναι ικανά για χιλιάδες κύκλους τήξης και ψύξης χωρίς θερμική υποβάθμιση.

Τα λιπαρά οξέα, τα ευτηκτικά τους μείγματα και ορισμένα παράγωγά τους έχουν πρόσφατα αξιολογηθεί ως πολλά υποσχόμενα PCMs για να λάβουν σύνθετα υλικά αποθήκευσης ενέργειας σε συστήματα ηλιακής ενέργειας και οικοδομικά περιβλήματα λόγω των πολύ καλών θερμικών και φυσικών τους ιδιοτήτων και του εύκολου εμποτισμού τους σε σύνθετες δομές.

Επιπλέον, τα περισσότερα από τα λιπαρά οξέα είναι εμπορικά διαθέσιμα, δεδομένου ότι αρκετές βιομηχανίες παράγουν ήδη μεγάλες ποσότητες λιπαρών οξέων για τα πλαστικά, τα καλλυντικά, την κλωστοϋφαντουργία και άλλες βιομηχανίες [4],[5]. Οι θερμικές ιδιότητες των υλικών αυτών παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

Μοριακή δομή	Διεθνές ονομασία	Ονομασία	Θερμοκρασία τήξης (°C)	$\Delta H_{fus}$ (kJ kg <sup>-1</sup> )
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$	<i>n</i> -Butanoic acid	Butyric acid	-5.6	126
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{COOH}$	<i>n</i> -Hexanoic acid	Caproic acid	-3	131
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOH}$	<i>n</i> -Octanoic acid	Caprylic acid	16–17	148–149
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$	<i>n</i> -Decanoic acid	Capric acid	30–32	153–163
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$	<i>n</i> -Dodecanoic acid	Lauric acid	41–44	178–183
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{COOH}$	<i>n</i> -Tridecanoic acid	Tridecylic acid	41.4	154
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$	<i>n</i> -Tetradecanoic acid	Myristic acid	49–58	167–205
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{13}\text{COOH}$	<i>n</i> -Pentadecanoic acid	Pentadecanoic acid	52–53	178
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	<i>n</i> -Hexadecanoic acid	Palmitic acid	61–64	186–212
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{COOH}$	<i>n</i> -Heptadecanoic acid	Margaric acid	60	172.2
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$	<i>n</i> -Octadecanoic acid	Stearic acid	65–70	196–253
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{17}\text{COOH}$	<i>n</i> -Nonadecanoic acid	Nonadecylic acid	67	192
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{18}\text{COOH}$	<i>n</i> -Eicosanoic acid	Arachidic acid	n.a.	n.a.
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{19}\text{COOH}$	<i>n</i> -Heneicosanoic acid	Heneicosylic acid	73–74	193
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{21}\text{COOH}$	<i>n</i> -Tricosanoic acid	Tricosylic acid	79	212

Εικόνα 1.8: Πίνακας θερμικών ιδιοτήτων λιπαρών οξέων και παραγώγων τους για χρήση σε υλικά αλλαγής φάσης

### 1.3.2 Ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης

Σε σύγκριση με τα οργανικά PCMs (πίνακας εικόνας 1.7), τα ανόργανα PCM έχουν ορισμένα μειονεκτήματα, όπως τη προδιάθεση για διάβρωση και το διαχωρισμό φάσεων. Ωστόσο, υπάρχουν διαθέσιμες τεχνικές για την υπερνίκηση ή την ελαχιστοποίηση αυτών των μειονεκτημάτων.

Από την άλλη πλευρά, τα ανόργανα PCMs έχουν βρεθεί ότι έχουν υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα και ικανότητα αποθήκευσης έναντι των οργανικών PCMs. Ως αποτέλεσμα, τα ανόργανα PCM έχουν



μεγάλο δυναμικό στον τομέα της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, ειδικά σε εφαρμογές μέσης έως υψηλής θερμοκρασίας, όπου τα οργανικά PCMs δεν είναι βιώσιμη επιλογή.

Ιδιότητα	Λογική αποθήκευση		Λανθάνουσα Αποθήκευση	
	Πέτρα	Νερό	Οργανικά PCM	Ανόργανα PCM
Πυκνότητα, kg/m <sup>3</sup>	2240	1000	800	1600
Ειδική θερμότητα, kJ/kg	1	4.2	2	2
Λανθάνουσα θερμότητα, kJ/kg	–	–	190	230
Λανθάνουσα θερμότητα, kJ/kg	–	–	152	368
Αποθήκευση όγκου 106 J, kg	67,000	16,000	5300	4350
Αποθήκευση όγκου for 106 J, m <sup>3</sup>	30	16	6.6	2.7
Μέση αποθήκευση μάζας	15	4	1.25	1
Μέση αποθήκευση όγκου	11	6	2.5	1

Εικόνα 1.9: Πίνακας θερμικών ιδιοτήτων οργανικών και ανόργανων υλικών αλλαγής φάσεων

Γενικά, τα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης έχουν διπλάσια χωρητικότητα αποθήκευσης θερμότητας ανά μονάδα όγκου σε σύγκριση με οργανικά υλικά, τα οποία μπορούν να φανούν από τη σύγκριση στον πίνακα της εικόνας 1.8. Έχουν υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα, υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας και χαμηλότερο κόστος σε σχέση με Υλικά αλλαγής οργανικής φάσης. Από την άλλη πλευρά, τα ανόργανα PCM είναι διαβρωτικά για μέταλλα που οδηγούν σε σύντομη διάρκεια ζωής του συστήματος και έχουν υψηλότερο κόστος.

Τα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο ομάδες: άλατα και ένυδρα άλατα και μέταλλα και τα κράματά τους [6].

### 1.3.2.1 Άλατα και ένυδρα άλατα

Ανόργανο άλας σημαίνει άλας ή / και άλας ενυδατών σε PCMs. Τα ένυδρα άλατα εκφράζονται συνήθως ως AxBy.n (H<sub>2</sub>O), όπου το n αντιπροσωπεύει τον αριθμό των μορίων νερού και το AxBy αντιπροσωπεύει ανθρακικό, θειώδες, φωσφορικό, νιτρώδες, οξικό ή χλωριούχο μέταλλο.

Ο τύπος των δεσμών που μπορούν να βρεθούν στο ένυδρο άλας είναι ιόν-διπολικό δεσμοί, οι οποίοι αποτελούνται από ένα ιόν και ένα πολικό μόριο, ή δεσμούς H-H. Τα μόρια H<sub>2</sub>O συνδέονται χαλαρά με το ανιόν και σε περιπτώσεις με το κατιόν του αλατος. Κατά τη διάρκεια της μετάβασης αλλαγής φάσης, η λανθάνουσα θερμότητα προσροφάται όταν το άλας ενυδατώνει, χάνει περιορισμένο μέρος ή όλα τα μόρια νερού και διαλύεται.

Η λανθάνουσα θερμότητα απελευθερώνεται όταν συμβαίνει μια αντίστροφη αλλαγή. Η αφυδάτωση / ενυδάτωση ενός αλατιού μπορεί να συμβεί στην περίπτωση του μετασχηματισμού στερεού-υγρού. Στη θερμοδυναμική, το φαινόμενο αυτό είναι παρόμοιο με το τήγμα / ψύξη [6].

Αν και τα ανόργανα υλικά παρουσιάζουν πολλά υποσχόμενα και πλεονεκτικά χαρακτηριστικά για τις χρήσεις τους ως PCM, αυτά τα υλικά εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν πολλά προβλήματα για να είναι ένα εμπορικό προϊόν για πρακτικές εφαρμογές. Τα προβλήματα αυτά είναι τα εξής:

1. Μικρή θερμική αγωγιμότητα,
2. Μεγάλες αλλαγές όγκου κατά την αλλαγή φάσης,
3. Υπερψύχονται,
4. Διαβρώνουν εύκολα τα μεταλλικά δοχεία φύλαξής τους,
5. Διαφορετικές ζώνες τήξης,

## 6. Υψηλό κόστος

### 1.3.2.2 Μη ευτηκτικά ανόργανα μείγματα

Η ποσότητα αποθηκευμένης λογικής θερμότητας στα υλικά αποθήκευσης απλώς αυξάνει με τη θερμοκρασία των υλικών, συγκεκριμένα κεραμικά, σκυρόδεμα και τηγμένο αλάτι. Ένας συνδυασμός αισθητού και λανθάνουσου συστήματος αποθήκευσης θερμότητας έχει υψηλή ζήτηση για την αύξηση της πυκνότητας ενέργειας των υλικών αποθήκευσης. Ένα μη-ευτηκτικό διμερές μίγμα άλατος με σύνθεση στερεών και τήγματος μπορεί να λειτουργεί σε ευρεία κλίμακα θερμοκρασιών [6].

### 1.3.2.3 Λιωμένα άλατα

Τα ανόργανα ρευστά έχουν ένα αριθμό ελκυστικών πλεονεκτημάτων, για παράδειγμα, έχουν χαμηλό κόστος, θερμοκρασίες λειτουργίας έως 700 °C, χαμηλές πιέσεις ατμών και επαρκείς φυσικές ιδιότητες. Αυτές οι κατάλληλες ιδιότητες επιτρέπουν περαιτέρω ανάπτυξη της θερμικής απόδοσης των ηλιακών θερμοηλεκτρικών μονάδων. Τα τετηγμένα άλατα όπως το άλας που συνδέεται με ένα πολυατομικό ιόν, δηλαδή τα νιτρικά, τα χλωρίδια, τα ανθρακικά άλατα και τα κράματα μετάλλων, είναι οι καλύτεροι υποψήφιοι για εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες στην περιοχή των 120-1000 °C.

Τα δύο κύρια χαρακτηριστικά μειονεκτήματα των τετηγμένων αλάτων είναι η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και η διαρροή υγρών που περιορίζουν ενεργά την εφαρμογή τους για αποθήκευση θερμότητας. Ένας χημικά αδρανής σταθερός σύνθετος σχηματισμός PCM με διασπορά σε πορώδες υπόστρωμα ήταν πολύ αποτελεσματική απόπειρα διακοπής της διαρροής του υγρού. Υπάρχουν πολλά πορώδη υποστηρίγματα που εφαρμόστηκαν επιτυχώς σε PCMs, όπως μεταλλικοί αφροί, πορώδη υλικά άνθρακα, όπως ο διογκωμένος γραφίτης (EG), οι νανοσωλήνες άνθρακα, οι αφροί γραφίτη, τα πορώδη κεραμικά, ο βερμικουλίτης, ο μοντμοριλλονίτης και ο διατομίτης [6].

### 1.3.3 Ευτηκτικά υλικά αλλαγής φάσης

Τα υλικά αλλαγής φάσης (PCM) στη κατηγορία ευτηκτικών διαλυμάτων, είναι πρακτικά μείγματα δύο ή περισσότερων χημικών ουσιών τα οποία, όταν αναμειγνύονται σε μια συγκεκριμένη αναλογία, έχουν σημείο ψύξης / τήξης κάτω ή πάνω από τη θερμοκρασία ψύξης νερού 0 °C (32 °F) και προσφέρουν θερμική αποθήκευση ενέργειας μεταξύ -114 °C (-173 °F) και +164 °C (327 °F).

Αυτή η κατηγορία υλικών είναι πολύ γνωστή και στη πραγματικότητα οι εφαρμογές της χρονολογούνται από τα τέλη του 18<sup>ου</sup> αιώνα. Ωστόσο ο διαχωρισμός και το προσδόκιμο ζωής αυτών μειγμάτων ήταν απρόβλεπτες μεταβλητές για αυτά τα μείγματα και ως αποτέλεσμα η χρήση τους ήταν περιορισμένη. Δυστυχώς, πολύ λίγες από τις τεκμηριωμένες εφαρμογές PCM είναι πραγματικά ευτηκτικές και σχεδόν όλες οι ευτηκτικές εφαρμογές πρέπει να τροποποιηθούν για να αποκτήσουν ένα υλικό κατάλληλο και ιδιότητες για μακροχρόνια και σταθερή χρήση.

Η βασική απαίτηση για ένα τροποποιημένο διάλυμα ευτηκτικού υλικού αλλαγής φάσης (PCM) μπορεί να ταξινομηθεί σε τρεις κατηγορίες: σταθερό διάλυμα (χωρίς διαχωρισμό ή υποβάθμιση), ελάχιστη υπερψύξη / θέρμανση και τελικά στενή θερμοκρασία κατάψυξης και τήξης.

Υπάρχουν τρία θεμελιώδη πρόσθετα που χρησιμοποιούνται συνήθως για να τροποποιηθούν τα Ευτηκτικά διαλύματα PCM με ενυδατωμένο άλας. Αυτά τα τρία συστατικά είναι αρχικά πυρηνικός παράγοντας που ενθαρρύνει τον σχηματισμό κρυστάλλων και επομένως ελαχιστοποιεί την υπερψύξη, το δεύτερο πρόσθετο είναι ο καταστολέας κατάψυξης για να επιτευχθεί χαμηλότερη θερμοκρασία αλλαγής φάσης και τρίτον ο παράγοντας ζελατινοποίησης / παχύνσεως προκειμένου να ξεπεραστούν τα προβλήματα διαχωρισμού και υποβάθμισης.



Μόλις εφαρμοστούν προσεκτικά τα παραπάνω συστατικά, ένα ικανοποιητικό διάλυμα ευτηκτικού PCM μπορεί να παραχθεί προσφέροντας εμπορικά διαθέσιμα διαλύματα για μία μεγάλη περιοχή θερμοκρασιών από  $-114\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-173\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) και  $+164\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $327\text{ }^{\circ}\text{F}$ ).

### 1.3.4 Σύγκριση των κατηγοριών υλικών αλλαγής φάσης

#### Οργανικά Υλικά Αλλαγής Φάσης (Παραφίνες ( $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ ) και Λιπαρά Οξέα ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$ ))

##### Πλεονεκτήματα

1. Πήξη χωρίς πολύ υπέρψυξη
2. Ικανότητα ομοιογενούς τήξης
3. Συμβατότητα με συμβατικά υλικά κατασκευής
4. Μη-διαχωρισμός
5. Χημικά σταθερά
6. Υψηλή θερμότητα τήξης
7. Ασφαλή και μη-αντιδραστικά
8. Ανακυκλώσιμα

##### Μειονεκτήματα

1. Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα στη στερεά κατάστασή τους. Υψηλά ποσοστά μεταφοράς θερμότητας απαιτούνται κατά τη διάρκεια του κύκλου πήξης.
2. Η ογκομετρική χωρητικότητα για αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας είναι χαμηλή.
3. Εύφλεκτα. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί εύκολα από ένα κατάλληλο δοχείο.
4. Για να λάβουμε αξιόπιστα σημεία αλλαγής φάσης, οι περισσότεροι κατασκευαστές χρησιμοποιούν
5. τις τεχνητές παραφίνες που είναι ουσιαστικά μίγμα παραφίνης (-ών), το οποίο στην ουσία είναι
6. εξευγενισμένο έλαιο οδηγώντας τελικώς σε υψηλά κόστη.

#### Ανόργανα Υλικά Αλλαγής Φάσης (Ενυδρά Άλατα ( $\text{MnH}_2\text{O}$ ))

##### Πλεονεκτήματα

1. Υψηλή ογκομετρική χωρητικότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας
2. Διαθεσιμότητα και χαμηλό κόστος.
3. Αιχμηρό σημείο τήξης
4. Υψηλή θερμότητα τήξης
5. Όχι εύφλεκτα

##### Μειονεκτήματα

1. Μεγάλη αλλαγή του όγκου.
2. Η υπέρψυξη είναι μείζον πρόβλημα στη μετατροπή στερεού-υγρού.
3. Αντιδρώντες παράγοντες χρειάζονται και συχνά γίνονται μη λειτουργικοί έπειτα από πολλές
1. επαναλήψεις.

#### Εύτηκτα μίγματα

##### Πλεονεκτήματα

1. Τα ευτηκτικά έχουν αιχμηρό σημείο τήξης σε σύγκριση με τις αγνές ουσίες.
2. Η ογκομετρική πυκνότητα αποθήκευσης είναι ελαφρώς μεγαλύτερη των οργανικών ενώσεων.

##### Μειονεκτήματα

1. Μόνο περιορισμένα δεδομένα είναι διαθέσιμα σχετικά με τις θερμοφυσικές ιδιότητες τους καθώς



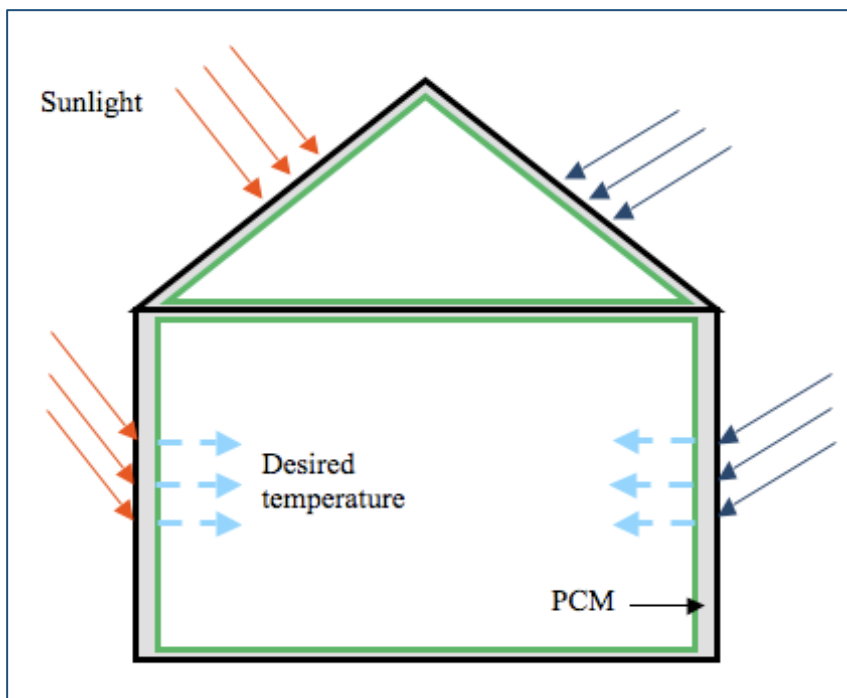
1. η χρήση αυτών των υλικών είναι πολύ πρόσφατη στις εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης.

## 2. Εφαρμογές υλικών αλλαγής φάσης σε κτήρια

Τη σημερινή εποχή ένα μεγάλο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι ιδιοκτήτες ακίνητης περιουσίας και ειδικότερα κτιρίων, είναι το μεγάλο πάγιο κόστος της καταναλισκόμενης ενέργειας που δαπανάται για τη θέρμανση τη ψύξη, το κλιματισμό και ζεστό νερό χρήσης. Είναι προφανές λοιπόν ότι η μείωση αυτών των εξόδων με πρακτικές ενεργειακής αναβάθμισης είναι μονόδρομος για την οικονομία ενέργειας.

Λύση για το ενεργειακό αυτό πρόβλημα αποτελούν τα υλικά αλλαγής φάσης. Ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, που συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωση της θερμικής άνεσης των κτιρίων, είναι οι τοίχοι PCM. Πρόκειται για τοίχους που κατασκευάζονται από δομικά υλικά (γύψος, τσιμέντο κλπ.) στα οποία έχουν προηγουμένως ενσωματωθεί υλικά αλλαγής φάσης (pcm). Τα τελευταία δίνουν τη δυνατότητα στον τοίχο να αποθηκεύσει ενέργεια με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας και να την αποδώσει στο χώρο, όταν η θερμοκρασία του μειωθεί.

Τα PCMs, μολονότι είναι γνωστά από αρκετά χρόνια, δεν είναι ευρέως διαδεδομένα σε εφαρμογές στα κτίρια. Κάποιες ελλείψεις στην τεχνολογία τους, το σχετικά υψηλό κόστος τους και η περιορισμένη πληροφόρηση για τις εφαρμογές τους δικαιολογούν εν μέρει αυτή τη διαπίστωση. Από την άλλη πλευρά, τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν εγγυώνται ότι στο μέλλον η χρήση τους θα διευρύνεται.



Εικόνα 2.1: Βασική εφαρμογή και λειτουργία υλικού αλλαγής φάσης σε κτίριο

Το βασικό πλεονέκτημα της χρήσης υλικών αλλαγής φάσης σε κτίρια είναι ότι προσφέρουν δομές βελτίωσης αποθήκευσης θερμότητας με ελάχιστες αλλαγές στο υπάρχον σχέδιο του κτιρίου. Οι βασικές μέθοδοι ενσωμάτωσης των PCM σε βασικά δομικά υλικά περιλαμβάνουν τη χρήση γυψοσανίδων και άλλων δομικών υλικών σε άμεση ή έμμεση ανάμειξη με PCM θερμομονωτικά και μακρο-συσσκευασίες [4].

Τα σημερινά οικιστικά και εμπορικά κτίρια γίνονται πιο συστημικά ελαφριά και υπάρχουν μεγάλες ανησυχίες σχετικά με την εσωτερική θερμική άνεση που προσφέρουν λόγω μειωμένου δυναμικού

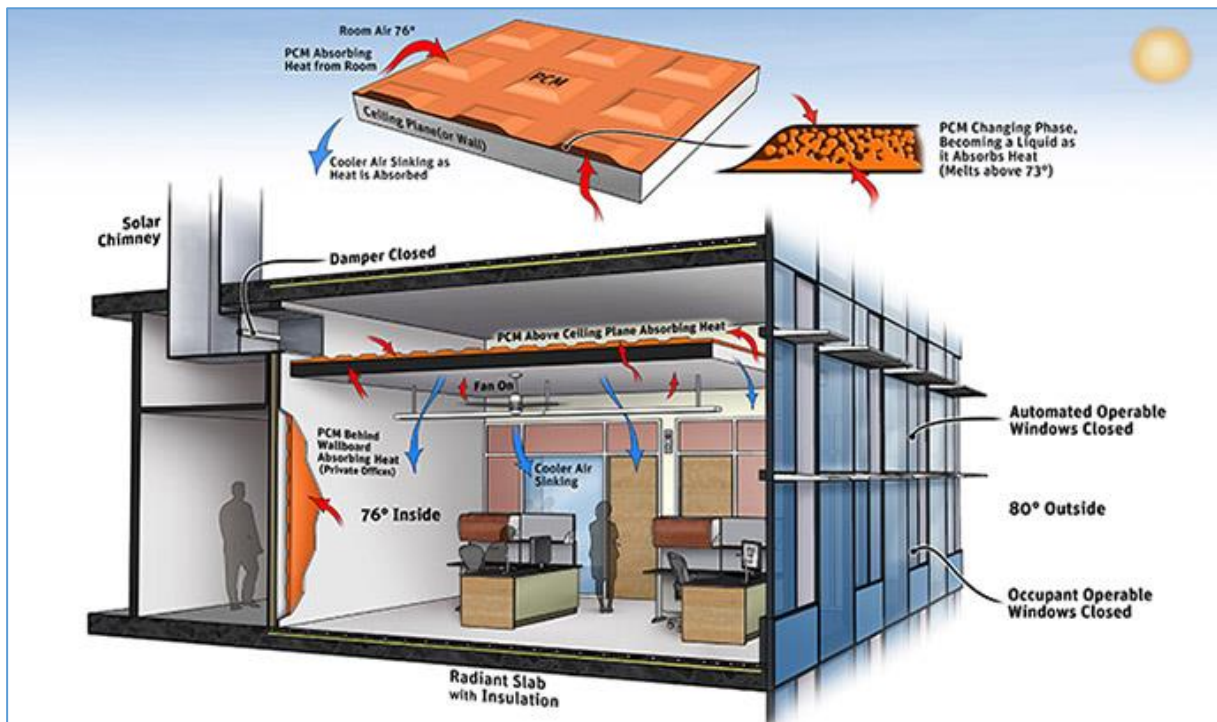


αποθήκευσης θερμότητας. Υπάρχει έντονη ένταση μεταξύ της προσπάθειας για την κατασκευή αποτελεσματικότερων δομών με μικρότερο αντίκτυπο στο περιβάλλον και της τάσης προσθήκης περισσότερης μάζας στη δομή για θερμική αποθήκευση. Αυτά τα θέματα ενισχύονται περαιτέρω από την παγκόσμια αλλαγή του κλίματος και τη συνεχή αύξηση του ενεργειακού κόστους.

Παρόλα αυτά τα υλικά αλλαγής φάσης (ΥΑΦ) δε μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν απευθείας σε πρακτικές εφαρμογές εξαιτίας της αδύναμης θερμικής τους σταθερότητας, του υψηλού φαινομένου υπέρψυξης και της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας. Επομένως βελτιωμένα υλικά αλλαγής φάσης έχουν αναπτυχθεί για να ξεπεραστούν αυτές οι δυσκολίες.

Οι συνεχείς βελτιώσεις στις τεχνολογίες του κελύφους των κτιρίων υποδηλώνουν ότι οι κατοικίες θα κατασκευαστούν σύντομα με συνηθισμένες συνθήκες θέρμανσης και ψύξης. Η χρήση νέων οικοδομικών υλικών που περιέχουν ενεργά θερμικά συστατικά (π.χ. PCM, υποκατάστατα, ακτινοβολούμενα φράγματα και ενσωματωμένα συστήματα υδραυλικών συστημάτων) θα αποτελούσε το τελευταίο βήμα για την επίτευξη σημαντικής εξοικονόμησης ενέργειας θέρμανσης και ψύξης από τις τεχνολογικές βελτιώσεις του κελύφους του κτιρίου.

Το βασικό πλεονέκτημα της χρήσης του PCM είναι ότι παρέχει δομές βελτιωμένων δυνατοτήτων αποθήκευσης θερμότητας με ελάχιστη αλλαγή στον υπάρχοντα σχεδιασμό κτιρίου (Sharma 2013). Οι κύριες μέθοδοι ενσωμάτωσης του PCM σε οικοδομικά υλικά περιλαμβάνουν τη χρήση γυψοσανίδων και άλλων δομικών στοιχείων, όπως η ανάμιξη PCM με θερμομόνωση και η μακρο-συσκευασία.



Εικόνα 2.2: Παράδειγμα εφαρμογής υλικών αλλαγής φάσης σε τοίχους και οροφές

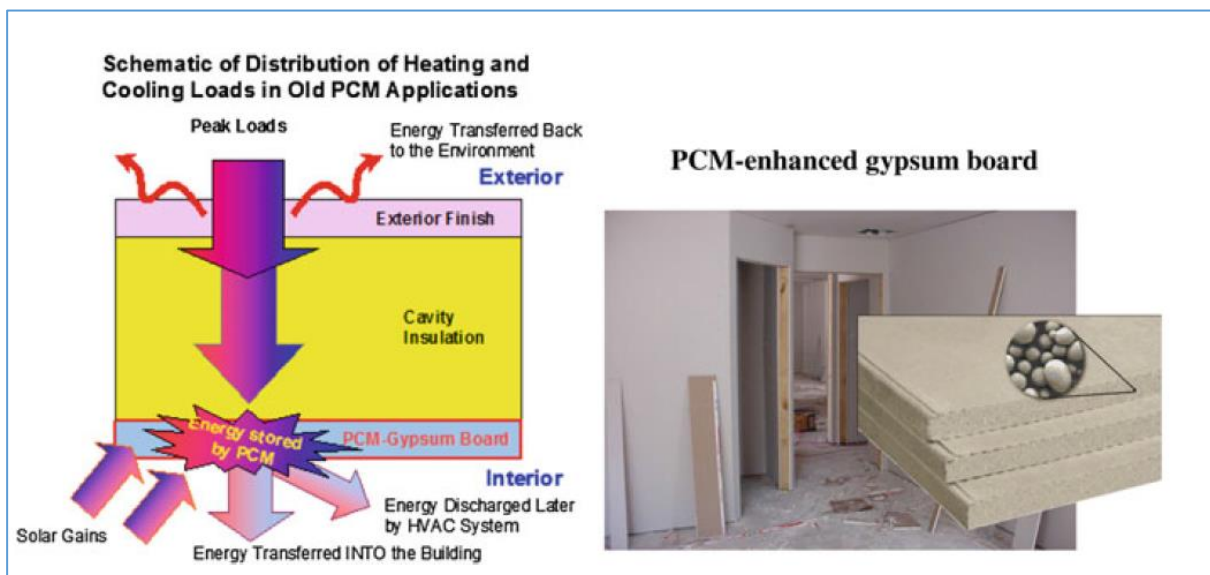
Για εφαρμογές απευθείας στα δομικά υλικά, τα υλικά αλλαγής φάσης απαιτούν ειδικές συσκευές αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας σε διαφορετικά σχήματα ή στοιχεία όπως κελυφωτούς και σωληνοειδής εναλλάκτες θερμότητας υλικών αλλαγής φάσεων.

Αν και η χρήση τέτοιων υλικών λύνει το πρόβλημα της διαρροής των υλικών αυτών κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης τους από στερεό σε υγρό, αυξάνεται όχι μόνο η θερμική αντίσταση αλλά επίσης

και το κόστος των συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Παρόλα αυτά, αυτά τα προβλήματα μπορούν να ξεπεραστούν χρησιμοποιώντας μικρο/νανοκάψουλες – υλικών αλλαγής φάσης, οι οποίες μπορούν να ετοιμαστούν με ενθυλάκωση των υλικών αυτών σε μια δομή πολυμερούς.

Τα ΥΑΦ, ως μέσον αύξησης της ικανότητας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, εφαρμόζονται στα κτίρια στους τοίχους, τα δάπεδα, τις οροφές, ακόμη και στα κουφώματα. Επίσης, χρησιμοποιούνται σε η/μ συστήματα που υποστηρίζουν τις λειτουργίες κτιρίων (θέρμανση, κλιματισμός, ζεστό - κρύο νερό). Χρήση όμως βρίσκουν και σε εφαρμογές που δεν έχουν σχέση με τον κτιριακό τομέα.

Η ιδιότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας του PCM βασίζεται στην ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, δεδομένου ότι μεγάλες ποσότητες ενέργειας μπορούν να αποθηκευτούν σε μικρό όγκο. Ως εκ τούτου, το υλικό που περιέχει PCM μπορεί να απορροφήσει και να απελευθερώσει θερμότητα πιο αποτελεσματικά από τα συμβατικά οικοδομικά υλικά.



Εικόνα 2.3: Εφαρμογή υλικών αλλαγής φάσης σε γυψοσανίδες και δομικά υλικά

Ωστόσο, η επιλογή των θέσεων PCM, η περιοχή θερμοκρασίας μετάβασης PCM και η ποσότητα του χρησιμοποιούμενου PCM είναι απαραίτητες για την αποτελεσματική και διαρκή χρήση των τεχνολογιών που βελτιώνουν το PCM, λαμβάνοντας υπόψη μια σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής των κτιρίων. Τα σημερινά οικιστικά και εμπορικά κτίρια καθίστανται πιο δομικά ελαφριά και δημιουργούνται ανησυχίες σχετικά με την εσωτερική θερμική άνεση λόγω του μειωμένου δυναμικού αποθήκευσης θερμότητας.

Όμως παρόλο που τα ΥΑΦ είναι γνωστά εδώ και αρκετά χρόνια δεν είναι ευρέως διαδεδομένα σε εφαρμογές στα κτίρια. Κάποιες ελλείψεις στην τεχνολογία τους, το σχετικά υψηλό κόστος τους και η περιορισμένη πληροφόρηση για τις εφαρμογές τους δικαιολογούν εν μέρει αυτή τη διαπίστωση. Από την άλλη πλευρά, τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν εγγυώνται ότι στο μέλλον η χρήση τους θα διευρυνθεί.

Συγκεκριμένα για τη κατηγορία των κτιρίων, οι εφαρμογές που έχουν τα υλικά αλλαγής φάσης αναλύονται σε υποκατηγορίες εφαρμογών σε επόμενα κεφάλαια.





## 2.1 Κριτήρια επιλογής υλικών αλλαγής φάσης

Όπως αναλύθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, τα υλικά αλλαγής βάσης βρίσκουν εφαρμογή σε πληθώρα τομέων. Η επιλογή αυτών των υλικών γίνεται βάση των ακόλουθων κύριων και σημαντικών κριτηρίων,

1. Εφαρμογή (Κτιριακή / περιβαντολλογική / ηλεκτρική / και άλλα),
2. Κόστος,
3. Εύρος λειτουργείας απορρόφησης ενέργειας και αλλαγής φάσης,
4. Κλίμα (υγρασία και άλλα)

Πολύ σημαντικοί παράγοντες επιλογής αποτελούν η ένταση θέρμανσης / ψύξης που προσφέρει το κάθε υλικό αλλαγής φάσης, το ποσοστό της θερμικής αδράνειας της αποθηκευμένης θερμότητας αλλά και ο χρόνος απελευθέρωσης της αποθηκευμένης ενέργειας. Αυτά πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τον σκοπό της επιλογής υλικών στην ανάπτυξη των τεχνικών εννοιών και των εμπορικών προϊόντων, ώστε να επιδιώκεται η υψηλή αποδοτικότητα, η ευρωστία και η βιωσιμότητα των προϊόντων.

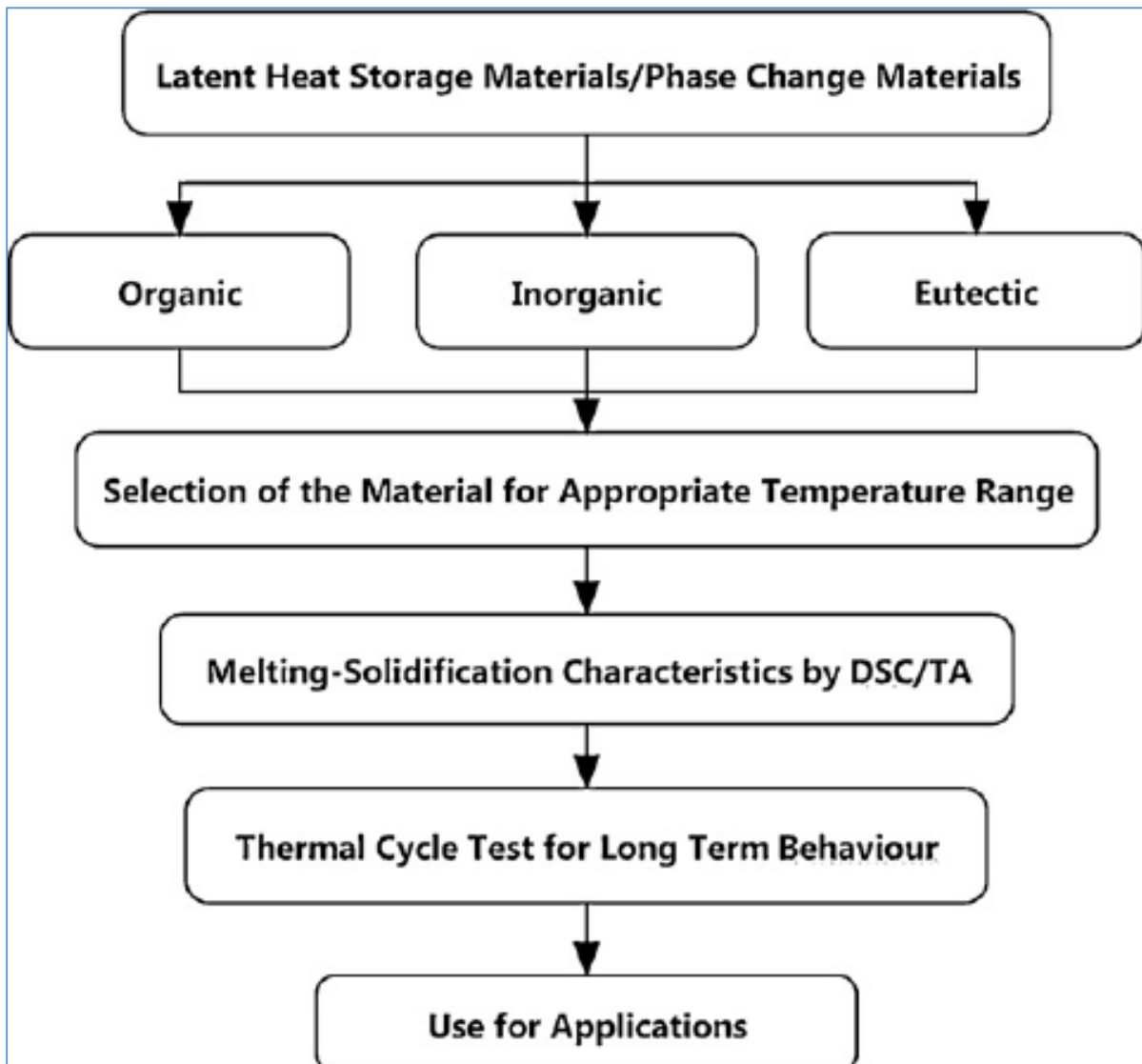
Η επιλογή βασίζεται στην προηγούμενη αναγνώριση των σχετικών θερμοφυσικών ιδιοτήτων που έγινε σε προηγούμενα κεφάλαια, όπως η λανθάνουσα θερμότητα, η θερμική αγωγιμότητα και η θερμοκρασία τήξης, καθώς και οι αλληλεπιδράσεις τους σε αντιπροσωπευτικά κριτήρια ποιότητας.

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες μπορούν επίσης να βελτιστοποιηθούν προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το μέγεθος ή το βάρος των συστημάτων αποθήκευσης και να μειωθούν οι χρόνοι φόρτισης / εκφόρτισης σε συσκευές υψηλής ισχύος. Άλλες εφαρμογές απαιτούν θερμική αδράνεια (π.χ. μεταφορά ευαίσθητων στη θερμοκρασία προϊόντων όπως τρόφιμα και αίμα) ή PCM υλικά για ρύθμιση θερμοκρασίας μετά από προσωρινή αστοχία του κανονικού εξοπλισμού υποστήριξης (π.χ. ψυγεία με συχνές διακοπές ρεύματος).

Η επιλογή των υλικών PCM μπορεί επίσης να επεκταθεί για να ληφθούν υπόψη οι διαφορές στο κόστος μονάδας, η ενσωμάτωση σε κάψουλα και άλλα έξοδα επεξεργασίας, καθώς και άλλα σχετικά ζητήματα αντοχής, ασφάλειας, διάβρωσης, περιβαλλοντικών επιπτώσεων κλπ..

Τα κριτήρια ποιότητας των υλικών αλλαγής φάσης για συγκεκριμένες απαιτήσεις πρέπει επίσης να είναι όσο το δυνατόν απλούστερα για να εξασφαλίζεται η εύκολη εφαρμογή τους. Τα βασικά βήματα για την επιλογή τους, συνοψίζονται στην εικόνα 2.3. Ακόμα, αυτά τα κριτήρια πρέπει να βασίζονται σε σωστές περιγραφές της δυναμικής της στερεοποίησης και της τήξης, όπως είναι γνωστό για την κλασική λύση της αγωγιμότητας.

Αυτή η συμπεριφορά μοντέλου δεν λαμβάνει υπόψη τον αργό σχηματισμό πυρήνων της μετασηματομένης φάσης που προκαλεί υποψύξη κατά την κατάψυξη ή την υπερθέρμανση κατά την τήξη και επίσης δεν περιγράφει την επίδραση της εγκαψούλωσης με ακατάλληλα αγωγίμα υλικά ή περιορισμένους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας στα ρευστά μεταφοράς θερμότητας. Αυτές οι συνθήκες μικτού ελέγχου απαιτούν εναλλακτικές αριθμητικές μεθόδους.



Εικόνα 2.4: Διάγραμμα βημάτων επιλογής υλικών αλλαγής φάσης

Η κινητική του φορτίου / εκφόρτιση λανθάνουσας θερμότητας είναι η βάση για την επιλογή υλικών με βάση τους κατάλληλους συνδυασμούς θερμοφυσικών ιδιοτήτων των υλικών PCM, όπως προτείνεται από τον Ashby [9] και καθοδηγείται από ηχητικά κινητικά μοντέλα λανθάνουσας θερμικής φόρτισης / εκκένωσης για διαφορετικές γεωμετρίες, όπως ως γεωμετρία επίπεδης πλάκας ή σφαιρικού εγκλεισμού.

Πληροφορίες σχετικά με τις σχετικές φυσικές ιδιότητες για μια μεγάλη ποικιλία υλικών PCM είναι διαθέσιμες στο διαδίκτυο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία των απαιτούμενων χαρτών ποιότητας για την επιλογή PCM που προορίζονται για εφαρμογές με ειδικές απαιτήσεις υψηλής πυκνότητας ενέργειας, υψηλής ισχύος ή χρόνου απόκρισης.

Ο κύριος στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι, η ανάδειξη των κριτηρίων για την επιλογή των υλικών PCM. Τα κριτήρια επιλογής βασίζονται σε ηχητικές λύσεις για τη δυναμική της λανθάνουσας θερμικής φόρτισης ή απαλλαγής, υπό συνθήκες που επιβάλλονται από αντιπροσωπευτικούς τύπους εφαρμογών. Αυτά τα κριτήρια αποτελούν τη βάση για την κατάρτιση χαρτών επιδόσεων που περιέχουν μεγάλη ποικιλία υλικών PCM. αυτό είναι αρκετά διαφορετικό από τις πρόσφατες

αναθεωρήσεις, οι οποίες επικεντρώθηκαν στη γενική λήψη αποφάσεων για τη μετατροπή ενέργειας και τη διαχείριση, χωρίς αντίστοιχους χάρτες επιλογής [8].

Συνοψίζοντας, τα υλικά αλλαγής φάσης, προκειμένου να εφαρμοστούν ορθά και να λειτουργήσουν με τη μέγιστη αποδοτικότητά τους, απαιτούν μια σειρά αναλύσεων προκειμένου να διαπιστωθεί ο τύπος του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί, αν τηρούνται οι προϋποθέσεις που τέθηκαν για την εφαρμογή και αν πρακτικά αξίζει από πλευρά κόστους.

## 2.2 Γενικές εφαρμογές για ψύξη / θέρμανση

Τα υλικά αλλαγής φάσης συναντώνται σε παθητικά καθώς επίσης σε ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης. Στις παραπάνω περιπτώσεις είναι αναγκαία η αποθήκευση της θερμότητας ή του ψύχους προκειμένου να εξισορροπηθεί η διαθεσιμότητα και η ζήτηση.

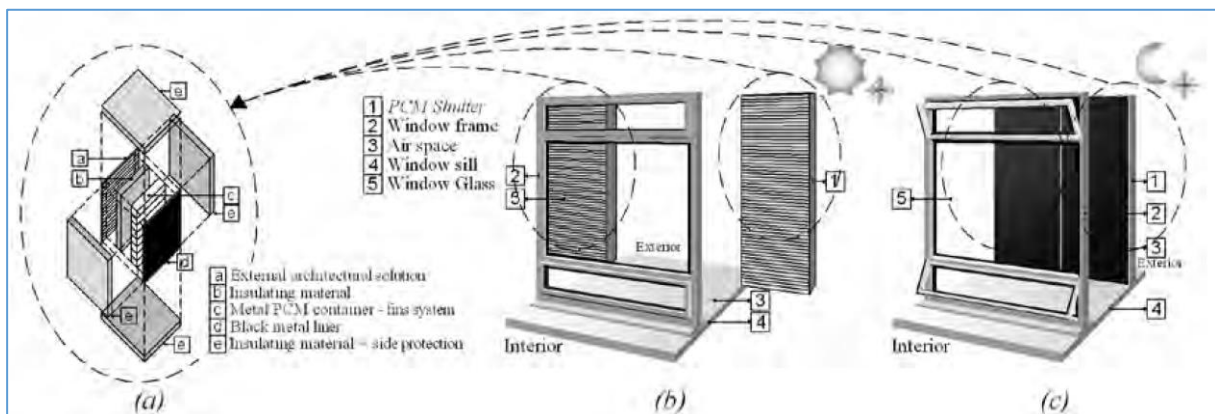
1. PCM πάνω στους τοίχους των κτηρίων
2. PCM σε διαφορετικά στοιχεία κτιρίων εκτός από τοίχους
3. PCM σε μονάδες αποθήκευσης θερμότητας ή του ψύχους

Το πρώτο και το δεύτερο σύστημα είναι παθητικά όπου η αποθηκευμένη θερμότητα ή το ψύχος απελευθερώνονται όταν η θερμοκρασία περάσει το σημείο τήξης. Το τελευταίο σύστημα είναι ενεργητικό, όπου η θερμότητα ή η ψύξη που έχει αποθηκευτεί, βρίσκεται μέσα σε κάποιο μονωμένο κάλυμμα. Με αυτόν τον τρόπο η αποθηκευμένη θερμότητα ή ψύξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν απαιτείται.

Κάποιες εφαρμογές παθητικών συστημάτων υλικών αλλαγής φάσης περιγράφονται παρακάτω.

### • Παραθυρόφυλλα με PCM:

Στην περίπτωση των παραθυρόφυλλων με PCM, τα παντζούρια τοποθετούνται έξω από τα παράθυρα και κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι ανοικτά προς τα έξω, η εσωτερική πλευρά του εκτίθεται στο ηλιακό φως και απορροφά την θερμότητα του και λιώνει το PCM που διαθέτουν. Τη νύχτα τα παραθυρόφυλλα κλείνουν και η θερμότητα αντανακλάται στα δωμάτια. Την θερμική απόδοση ενός στοιχείου δοκιμής 1m x 1m x 1m μελέτησε ο Buddhi, με και χωρίς CPM, χρησιμοποιώντας οξύ CG που έχει σημείο τήξης 49°C. Τα αποτελέσματα ήταν ότι όταν υπήρχε το CPM, η αποθηκευτική του ικανότητα αυξήθηκε 4°C για 4-5 ώρες.



Εικόνα 2.5: (α) Σχέδιο συστήματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. (β) Σχέδιο λειτουργίας παντζουριού την ημέρα. (γ) Σχέδιο λειτουργίας παντζουριού την νύχτα.

- Σοβατεπιά με PCM

Στην περίπτωση των σοβατεπί, δεδομένου της πληθώρας εφαρμογών τους λόγω του χαμηλού κόστους τους, είναι καλά για χρήση PCM. Σοβατεπί γεμάτα με κερί παραφίνης είχαν χρησιμοποιήσει οι Kedl, Stovel, Salyer και Sircar. Το πείραμα γέμισης των σοβατεπί με κερί παραφίνης, τόσο για μικρά δοκίμια όσο και για ελάσματα μεγάλου μεγέθους, ήταν επιτυχής.

Ευρεία χρήση υπάρχει επίσης και στις ασβεστόπλακες, όπου το PCM μπορεί να ενσωματωθεί σε υγρή μορφή στην πλάκα και να γίνει απορρόφηση του στους πόρους της, μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής της, είτε και κατά την κατασκευή της προσθέτοντας το PCM όταν η πλάκα βρίσκεται ακόμη σε υγρή μορφή.

Ο Sharigo πειραματίστηκε πάνω στα σοβατεπί κατασκευασμένα από διάφορα υλικά, σχετικά με τον τρόπο γεμίματος τους με υλικό PCM. Παρατήρησε και απέδειξε ότι πολλά υλικά αλλαγής φάσης όπως μίγματα από μεθυλεστέρες και μίγματα από λιπαρά οξέα ήταν κατάλληλα για το γέμισμα των πλακών για την αποθήκευση θερμότητας στο κλίμα της Φλόριντα.

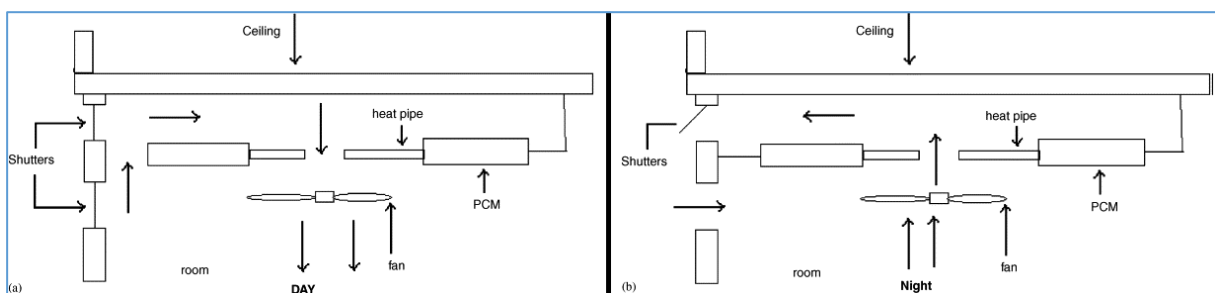
Ο Feldman έκανε εκτενή έρευνα σχετικά με τη σταθερότητα και χρήση οργανικών μιγμάτων για την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας. Χρησιμοποίησε, λιπαρά οξέα, βουτυλεστέρη και γλυκόλη πολυαιθυλενίου. Μαζί με τη μελέτη των ιδιοτήτων τους, έκανε και μία έρευνα σε υλικά που λειτουργούν ως απορροφητές υλικών αλλαγής φάσης.

Ο Nirper εξέτασε επίσης τη συμπεριφορά των εμποτισμένων γυψοσανίδων με υλικά αλλαγής φάσης. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι εμποτισμένες γυψοσανίδες μπορούν να μπου στην θέση των συνηθισμένων σοβατεπίων, αυξάνοντας δραματικά την ικανότητα θερμικής αποθήκευσης του κτιρίου.

- Ταβανοσανίδες

Ο Gutherz και Schiler ανέπτυξαν ένα σύστημα θέρμανσης χώρου οροφής που διαθέτει υλικά αλλαγής φάσης. Για την λειτουργία του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν ανακλαστές για να κατευθύνουν την ηλιακή ενέργεια που ερχόταν από τα παράθυρα, στα υλικά αλλαγής φάσης.

Με αυτόν τον τρόπο, το μεγαλύτερο πλεονέκτημα είναι ότι μπορούν να αποθηκευτούν μεγάλα ποσά θερμότητας χωρίς να απαιτούνται μεγάλοι όγκοι αποθηκευτικού μέσου. Ένα τέτοιο σύστημα έχει την ικανότητα να ανακτήσει θερμικές απώλειες σε θερμικά κέρδη σε ποσοστά 17-36%. Μία μονάδα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας αναπτύχθηκε από τον Turpreddy η οποία ενσωμάτωσε σωλήνες χωμένους σε PCM. Το σύστημα είχε την ικανότητα να αποθηκεύει θερμότητα κατά την διάρκεια της νύχτας και να την απελευθερώνει την ημέρα. Στην παρακάτω εικόνα εμφανίζεται ένα προτεινόμενο σύστημα θέρμανσης χώρου οροφής.



Εικόνα 2.6: Μονάδα θερμικών σωλήνων μόνωσης PCM

- Συστήματα θέρμανσης με βάση τον αέρα

Την απόδοση των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης που βασίζονται στον αέρα μελέτησαν οι Morrison, Khalik και Jurinak, χρησιμοποιώντας μονάδα αποθήκευσης ενέργειας με υλικά αλλαγής φάσης. Στόχος ήταν ο προσδιορισμός της επίδρασης της λανθάνουσας θερμότητας και της θερμοκρασίας τήξης των υλικών αλλαγής φάσης στο ηλιακό σύστημα θερμού αέρα καθώς επίσης να αναπτυχθεί ένα πιλοτικό μοντέλο μονάδων αποθήκευσης ενέργειας με υλικά αλλαγής φάσης.

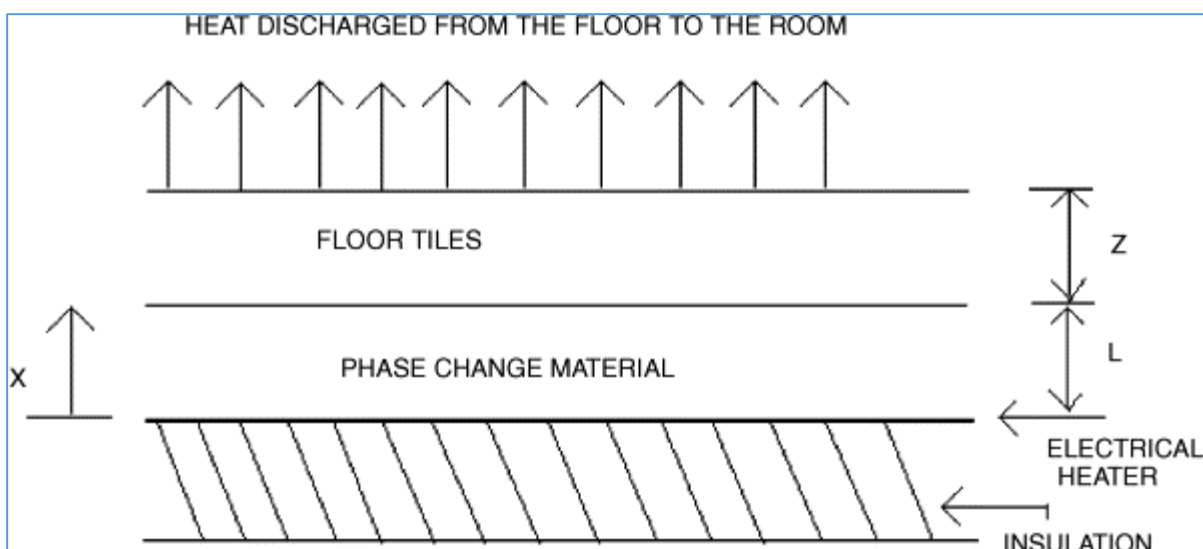
Εξακρίβωσαν ότι τα υλικά αλλαγής φάσης πρέπει να επιλέγονται με βάση το σημείο τήξης της λανθάνουσας θερμότητας καθώς επίσης ότι τα συστήματα θέρμανσης αέρα που χρησιμοποιούν ένυδρο θειώδες νάτριο σαν αποθηκευτικό μέσο, χρειάζονται μόλις το 25% του αποθηκευτικού χώρου μίας μονάδας αποθήκευσης ενέργειας με στρώματα από πέτρες και το 50% μιας αποθηκευτικής δεξαμενής με νερό.

Μερικές εφαρμογές ενεργητικών συστημάτων υλικών αλλαγής φάσης περιγράφονται παρακάτω.

- Υποδαπέδια θέρμανση

Ο Farid και Chen πρότειναν ένα υποδαπέδιο ηλεκτρικό σύστημα αποθήκευσης θερμότητας με κερί παραφίνης όπου αυτό το σύστημα θα ήταν ικανό να αποθηκεύσει θερμική ενέργεια σε περιόδους χαμηλής ζήτησης στα κτήρια και να αποδώσει αυτή τη θερμότητα σε περιόδους αιχμής, π.χ. την νύχτα όπου το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλότερο.

Στην παρακάτω εικόνα εμφανίζεται ένα σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας. Τοποθετήθηκε 30 χιλιοστά υλικό αλλαγής φάσης ανάμεσα στα πλακάκια του δαπέδου και της θερμαινόμενης επιφάνειας. Με την βοήθεια μαθηματικών μοντέλων έγινε προσομοίωση στον υπολογιστή και προέκυψε ότι η θερμότητα που προέρχεται από το έδαφος μπορεί από  $30 \text{ W/m}^2$  να γίνει  $75 \text{ W/m}^2$  όταν τοποθετηθεί υλικό αλλαγής φάσης.



Εικόνα 2.7: Υποδαπέδιο σύστημα θέρμανσης

Ο Nagano παρουσίασε ένα σύστημα πειραματικής μονάδα κλιματισμού που ήταν  $0.5 \text{ m}^2$  η οποία ήταν ικανή να αποθηκεύσει την λανθάνουσα θερμότητα στα κτήρια. Το υλικό αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκε αποτελούταν από αφρώδεις γυάλινες σφαίρες και παραφίνη. Ο συσσωρευτής θερμότητας με τα υλικά αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκε είχε πάχος 3 εκατοστά και

τοποθετήθηκε κάτω από το δάπεδο. Μετρήθηκε η θερμοκρασία του δωματίου και η ποσότητα αποθηκευμένης θερμότητας και τα αποτελέσματα έδειξαν τις ικανότητες του υλικού.

- Ταβανোসανίδες

Οι ταβανোসανίδες χρησιμοποιούνται για θέρμανση και ψύξη των κτηρίων και αποτελούν σημαντικό στοιχείο της σκεπής. Ένα σύστημα ικανό να αποθηκεύσει θερμότητα σε υλικά αλλαγής φάσης ανέπτυξε ο Bruno, όπου το εν λόγω σύστημα αποθηκεύει την θερμότητα όταν δεν υπάρχει ζήτηση και την απελευθερώνει όταν υπάρχει ζήτηση.

Το υλικό αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκε έχει σημείο τήξης 20-30°C που είναι περίπου το ίδιο με την θερμοκρασία του δωματίου. Το φορτίο του συστήματος κλιματισμού σε ώρες αυξημένης ζήτησης προσπάθησαν να μειώσουν οι Kodo και Ibamoto με το να χρησιμοποιήσουν υλικά αλλαγής φάσης στις ταβανোসανίδες.

Η λανθάνουσα θερμότητα του υλικού αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν 174,4 KJ ενώ το σημείο τήξης στους 24,5°C. Κατά τη διάρκεια της περιόδου ψύξης, ο ψυχρός αέρας διέρχεται από τη μονάδα διαχείρισης αέρα μέσω του κενού στο θάλαμο οροφής για να αποθηκεύσει της ψύξη στις ταβανোসανίδες με υλικά αλλαγής φάσης. Η αποθηκευμένη ψύξη αποδόθηκε σε ένα διάστημα 2 ωρών σε περίοδο αιχμής και παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του δωματίου ήταν μόλις 2°C ενώ αν δεν είχαν χρησιμοποιηθεί υλικά αλλαγής φάσης θα υπήρχε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 6°C.



Εικόνα 2.8: Ταβανোসανίδα με υλικά αλλαγής φάσης



## 2.3 Εφαρμογές για θερμική μόνωση

Έναν τοίχο που θα είναι ικανός να διατηρεί την εσωτερική θερμοκρασία του περιβάλλοντος στους 22-26°C προσπάθησε να δημιουργήσει μία ερευνητική ομάδα από το πανεπιστήμιο της Βαρκελώνης και του Μπορντό.

Η λογική του τείχους είναι ότι η θερμότητα του περιβάλλοντος να απορροφάται σε υλικά αλλαγής φάσης και στην συνέχεια με την βοήθεια αεραγωγών, αυτή η θερμότητα να μεταφέρεται έξω από το κτήριο. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με δύο διαφορετικούς τρόπους, α) να πραγματοποιηθεί κατασκευή ενός νέου οικοδομικού υλικού, όπου εμπότισαν οικοδομικά υλικά με υλικό αλλαγής φάσης και β) να τοποθετηθεί στα υπάρχον οικοδομικά υλικά (τούβλα) βιομηχανοποιημένο υλικό αλλαγής φάσης που υπάρχει στο εμπόριο.

Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν μοριακά μείγματα, στα οποία υπάρχει η δυνατότητα να ρυθμιστούν τα χαρακτηριστικά τους, όπως το σημείο τήξης τους. Το μίγμα που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από δεκαεξάνιο, επταδεκάνιο και δεκαοκτάνιο (C16H34, C17H36 και C18H38).

Στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε παραφίνη RT 27 η οποία παράγεται από την Rubitherm GmbH, Germany.

Τα χαρακτηριστικά του πρώτου υλικού φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

C <sub>16</sub>	15.0%
C <sub>17</sub>	15.0%
C <sub>18</sub>	70.0%
T <sub>στερεοποίησης</sub>	21.3°C
T <sub>υγροποίησης</sub>	23.3°C
Θερμότητα τήξης	149 kJ/kg

Εικόνα 2.9: Πίνακας θερμοφυσικών ιδιοτήτων πρώτου υλικού αλλαγής φάσης

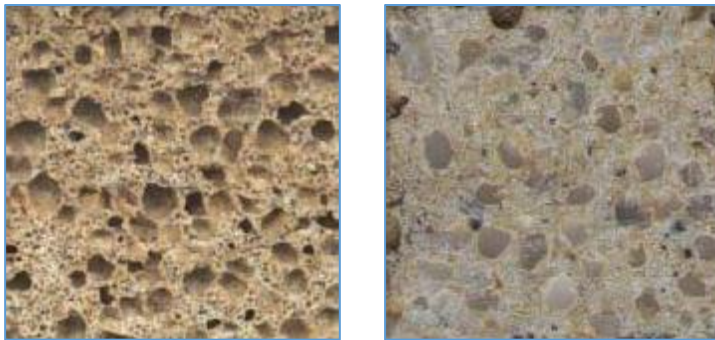
Τα χαρακτηριστικά του δεύτερου υλικού φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

C <sub>17</sub>	3.9%
C <sub>18</sub>	45.8%
C <sub>19</sub>	35.9%
C <sub>20</sub>	12.5%
άλλα	1.9%
T <sub>στερεοποίησης</sub>	23.0°C
T <sub>υγροποίησης</sub>	26.5°C
Θερμότητα τήξης	145 kJ/kg

Εικόνα 2.10: Πίνακας θερμοφυσικών ιδιοτήτων δεύτερου υλικού αλλαγής φάσης

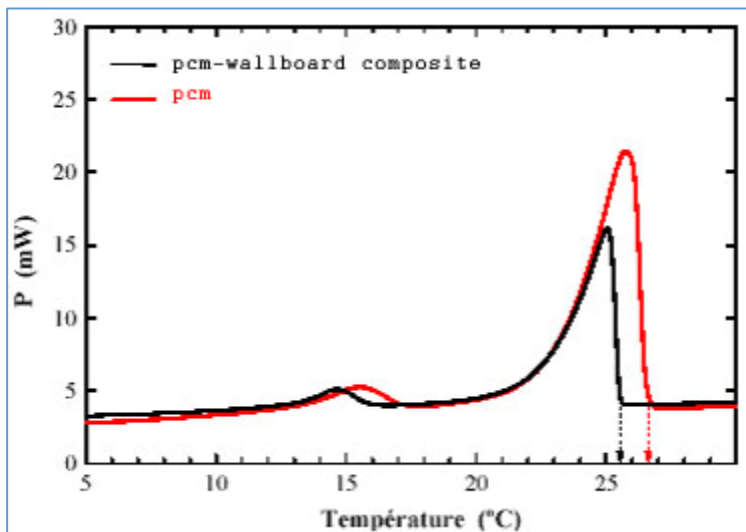
Παρακάτω αναλύεται η πρώτη μέθοδος, εμποτισμού του πορώδους υλικού με υλικά αλλαγής φάσης:

Το πορώδες υλικό που διαλέχθηκε  $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$  / (αργιλικό πυριτικό ασβέστιο) έχει πολύ καλές θερμομονωτικές ιδιότητες, η μορφή του αποτελείται από 50% αέρα κι έτσι είναι κατάλληλο για την απορρόφηση του υλικού αλλαγής φάσης. Η κατασκευή του υλικού πραγματοποιήθηκε από εμβάπτιση του πορώδους υλικού στο υλικό αλλαγής φάσης υπό κενό αέρος. Το τελικό υλικό που κατασκευάστηκε περιέχει υλικό αλλαγής βάσης 20% κατά βάρος.



Εικόνα 2.11: Πορώδες υλικό πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) τον εμπότισμό με υλικό αλλαγής φάσης

Παρακάτω εμφανίζεται το γράφημα που προέκυψε από την ανάλυση στο καλορίμετρο DSC (Differential scanning calorimetry) για το υλικό αλλαγής φάσης καθώς επίσης και για το τελικό υλικό που κατασκευάστηκε.



Εικόνα 2.12: Γράφημα απεικόνισης καμπύλης υλικού αλλαγής φάσης χωρίς (κόκκινη καμπύλη) και μαζί με το οικοδομικό υλικό (μαύρη καμπύλη).

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από την καμπύλη, τα θερμικά χαρακτηριστικά του υλικού που κατασκευάστηκε δεν έχουν μεγάλη απόκλιση από αυτά του υλικού αλλαγής φάσης. Έγιναν πειράματα σε θερμοκρασίες  $-10^{\circ}\text{C}$  έως  $40^{\circ}\text{C}$  όπου έδειξαν ότι ο κύκλος θέρμανσης - ψύξης του υλικού μπορεί να πραγματοποιήσει πλήρη αναστροφή.

Το υλικό αλλαγής φάσης συνεχίζει να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο μετά την εμβάπτιση του στο πορώδες υλικό. Πραγματοποιήθηκε ζύγισμα των δειγμάτων πριν και μετά από κάθε κύκλο και αυτό που προέκυψε είναι ότι υπάρχει απώλεια μάζας. Βάση αυτού, η εξωτερική επένδυση του υλικού αμέσως μόλις απορροφηθεί το υλικό αλλαγής φάσης κρίνεται αναγκαία.





Τέλος, υπολογίστηκε η αποθηκευτική ικανότητα του υλικού αλλαγής φάσης και έγινε σύγκριση με αυτή του υλικού που παράχθηκε. Το υλικό όπου επιλέχθηκε για το πείραμα είχε επιφάνεια  $1\text{m}^2$  και πάχος  $25\text{mm}$ .

Το πλεονέκτημα χρήσης τέτοιου υλικού είναι ότι μπορεί να τοποθετηθεί εξωτερικά σε τοίχους που έχουν ήδη κατασκευαστεί.

Παρακάτω εμφανίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων:

Υλικό	Βάρος (kg)	$C_p$ (J/lgK)	Λανθάνουσα θερμότητα (kJ/kg)	Αισθητή θερμότητα (kJ/kg)
Υλικό αλλαγής φάσης	5.69	1.9	149	32
Τοίχος	28.44	0.57	-	49
Υλικό αλλαγής φάσης μαζί με τον τοίχο	34.13	0.83	30	86

Εικόνα 2.13: Πίνακας ιδιοτήτων υλικών

Παρακάτω αναλύεται η δεύτερη μέθοδος, ενσωμάτωση του βιομηχανοποιημένου υλικού αλλαγής φάσης σε τούβλα:

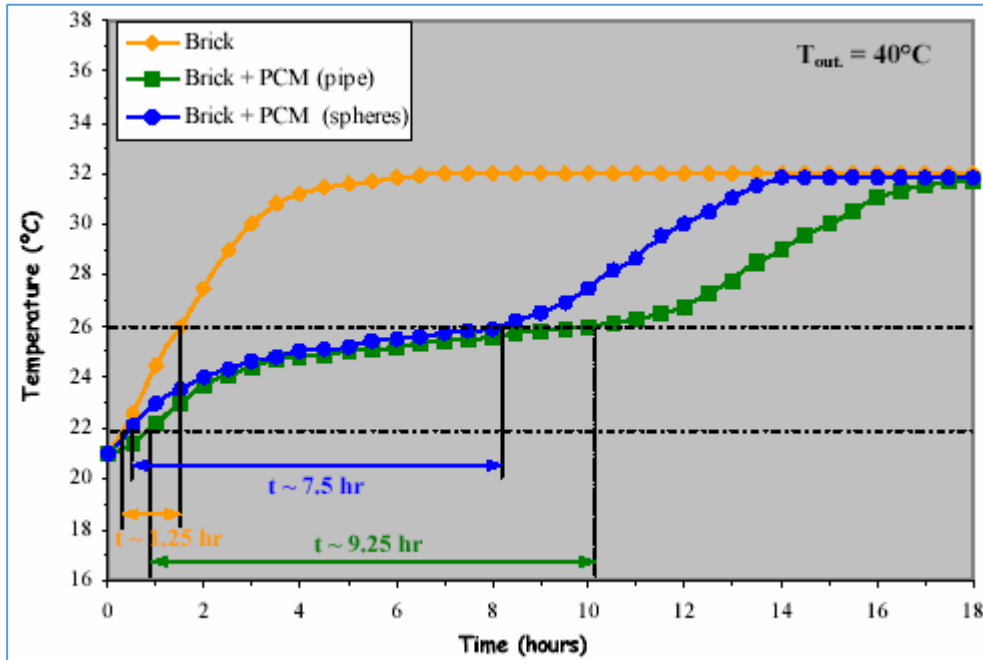
Για την πραγματοποίηση του πειράματος, χρησιμοποιήθηκαν απλά τούβλα που υπάρχουν για οικοδομές, με έξι οπές. Οι διαστάσεις των τούβλων είναι  $130 \times 93 \times 285\text{mm}$ , βάρους  $3\text{kg}$  και χωρητικότητα οπών  $260\text{cm}^3$  έκαστο.



Εικόνα 2.14: Τούβλο 6 οπών, υλικό αλλαγής φάσης και σωλήνες

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, το υλικό αλλαγής φάσης τοποθετείται στο τούβλο είτε με την μορφή σφαιρών είτε σε πλαστικούς σωλήνες. Εφαρμόστηκε σταθερή θερμοκρασία  $40^\circ\text{C}$  στο εξωτερικό μέρος του τούβλου και μετρούταν η θερμοκρασία στο εσωτερικό μέρος του τούβλου. Παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη του υλικού αλλαγής φάσης βελτίωσε την αποθηκευτική ικανότητα του τούβλου, η θερμοκρασία κατάφερε να παραμείνει στην ζώνη άνεσης ( $22\text{-}26^\circ\text{C}$ ) για  $7.5$  όταν χρησιμοποιήθηκε υλικό αλλαγής φάσης με την μορφή σφαιρών και  $9.25$  ώρες όταν χρησιμοποιήθηκε υλικό αλλαγής φάσης σε σωλήνες. Τα αποτελέσματα του πειράματος, όπου εμφανίζονται στις

παρακάτω εικόνες, είναι ικανοποιητικά και μπορούν να βοηθήσουν στην διατήρηση της ζώνης άνεσης για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.



Εικόνα 2.15: Γράφημα απεικόνισης θερμοκρασίας στο εσωτερικό του τούβλου ως προς τον χρόνο, για σταθερή εξωτερική θερμοκρασία 40°C.

$T_{\text{εξωτερική}} = 40^{\circ}\text{C}$	Βάρος υλικού αλλαγής φάσης (gr)	Χρόνος θερμικής άνεσης σε ώρες (22 - 26°C)
Τούβλο	-	1.25
Τούβλο + Υλικό αλλαγής φάσης σε μικροκάψουλες	480	7.5
Τούβλο + Υλικό αλλαγής φάσης σε σωλήνες	720	9.25

Εικόνα 2.16: Πίνακας ιδιοτήτων τούβλου με και χωρίς υλικό αλλαγής φάσης

## 2.4 Εφαρμογές για υποδαπέδια συστήματα θέρμανσης

Δεδομένου ότι η ηλεκτρική ενέργεια είναι φτηνότερη κατά την διάρκεια της νύχτας, μία ερευνητική ομάδα από την Κίνα σκέφτηκε να δημιουργήσουν ένα υποδαπέδιο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας από υλικά αλλαγής φάσης. Σκοπός του συστήματος είναι να αποθηκεύει ενέργεια κατά την διάρκεια της νύχτας όπου το κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος είναι χαμηλό, και να την απελευθερώνει την ημέρα. Για την ελαχιστοποίηση των απωλειών, πραγματοποιήθηκε προσπάθεια να δημιουργηθεί ένα υλικό αλλαγής φάσης το οποίο κατά την αλλαγή φάσης θα διατηρεί το σχήμα του.

Αυτό επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας 75% παραφίνη και 25% πολυαιθυλένιο. Το πολυαιθυλένιο βοηθάει το υλικό να διατηρήσει την μορφή του κατά την αλλαγή φάσης.



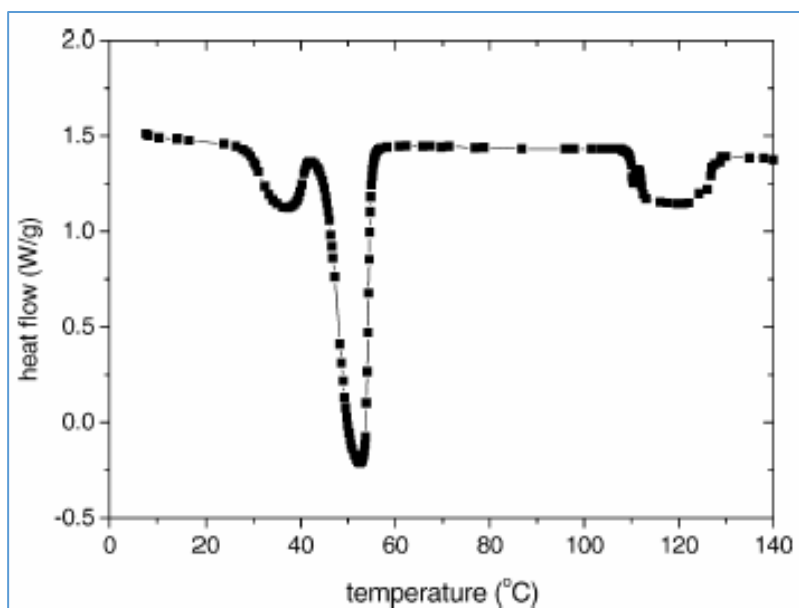
Εικόνα 2.17: Υλικό αλλαγής φάσης κατασκευασμένο από 75% παραφίνη και 25% πολυαιθυλένιο

Παρακάτω εμφανίζονται οι τιμές των χαρακτηριστικών του υλικού αλλαγής φάσης.

Πυκνότητα $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	850
Θερμική αγωγιμότητα $k$ (W/mK)	0.15
Θερμότητα τήξης $H_m$ (kJ/kg)	150
Θερμοχωρητικότητα αισθητής θερμότητας $c_s$ (kJ/kgK)	2

Εικόνα 2.18: Πίνακας υλικού αλλαγής φάσης

Από την ανάλυση του υλικού αλλαγής φάσης στο καλορίμετρο DSC (Differential scanning calorimetry) μπορεί να προσδιοριστεί το σημείο τήξης του όπου είναι 45°C. Η καμπύλη εμφανίζεται στο παρακάτω γράφημα.



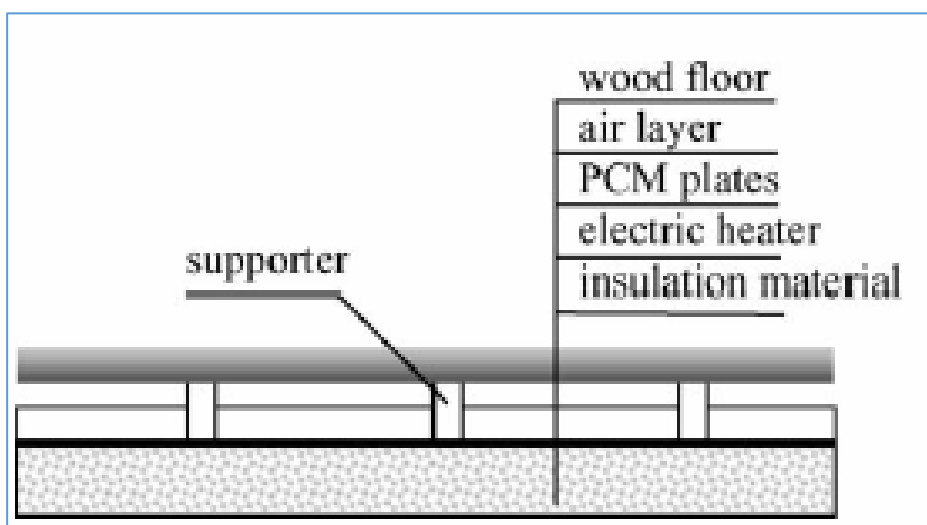
Εικόνα 2.19: Γράφημα απεικόνισης θερμικής ροής συναρτήσει της θερμοκρασίας



Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε ένα πειραματικό δωμάτιο 3m x 2m x 2m όπου στην νότια πλευρά του διαθέτει ένα παράθυρο 1.6 x 1.5m το οποίο είναι καλυμμένο με μία μαύρη κουρτίνα. Το δωμάτιο έχει 100mm πάχος τοίχων και οροφής, ενώ το δάπεδο είναι κατασκευασμένο από 120mm μόνωσης, ηλεκτρικές αντιστάσεις, 15mm από το υλικό αλλαγής φάσης που περιγράφηκε παραπάνω, στρώμα αέρα 10mm και τέλος το ξύλινο πάτωμα πάχους 8mm.



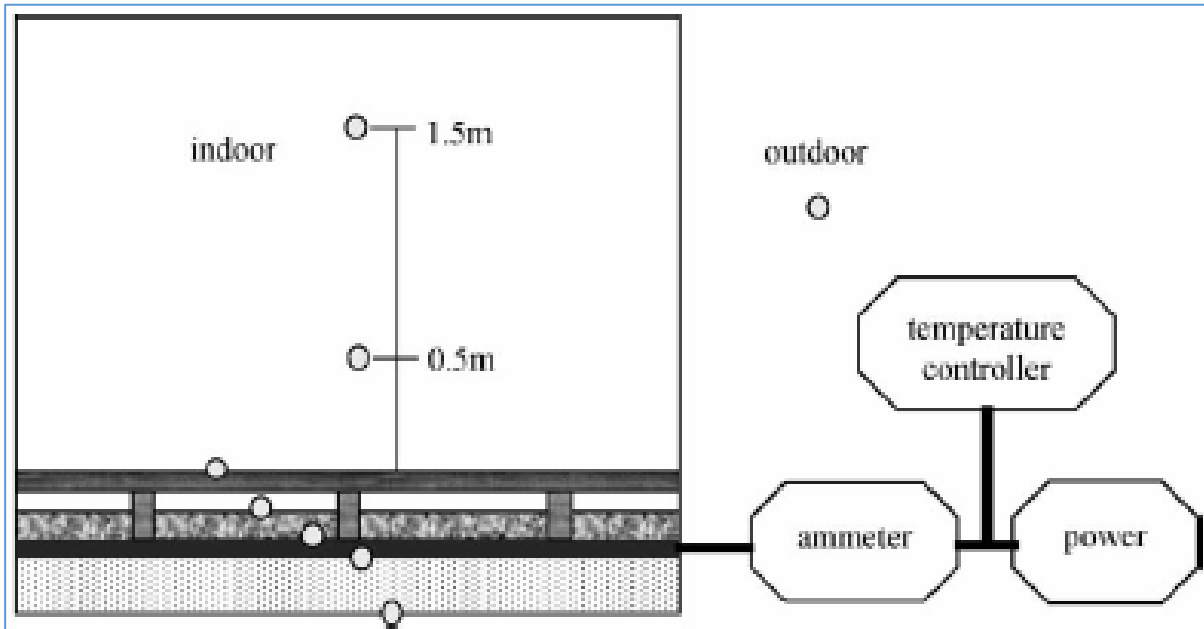
Εικόνα 2.20: Πειραματικό δωμάτιο



Εικόνα 2.21: Στρώματα από το δάπεδο του πειραματικού δωματίου

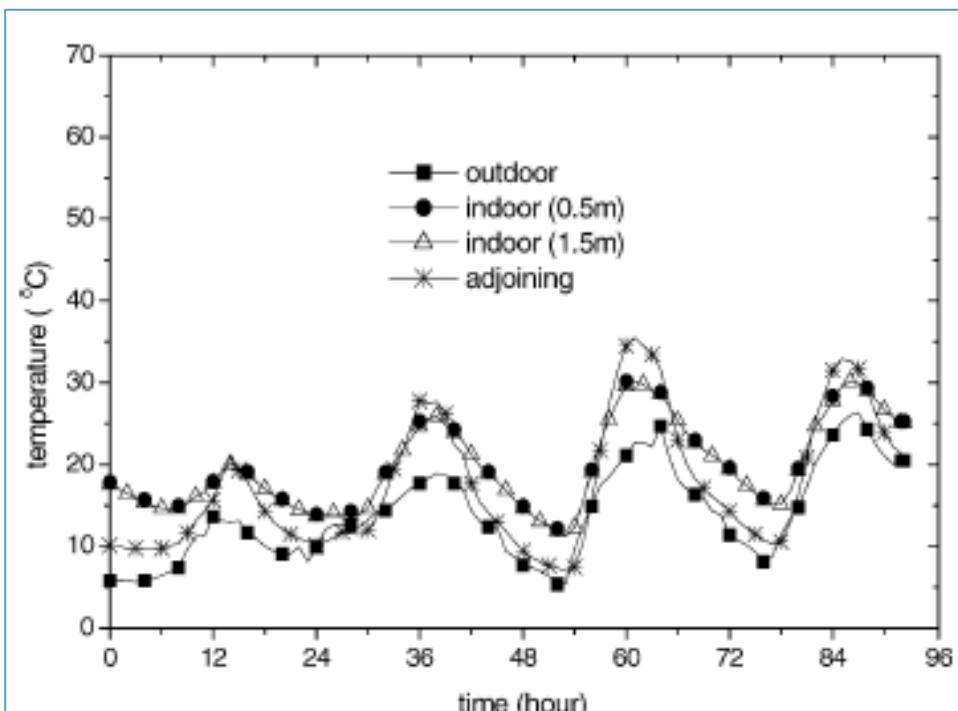
Για να μπορέσει να προσδιοριστεί η κατανομή και ροή της θερμοκρασίας, τοποθετήθηκαν θερμόμετρα σε διάφορα σημεία του πειραματικού δωματίου. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στα

στρώματα του δαπέδου, στον τοίχο σε ύψος 0.5 και 1.5 μέτρο καθώς επίσης και την εξωτερική θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



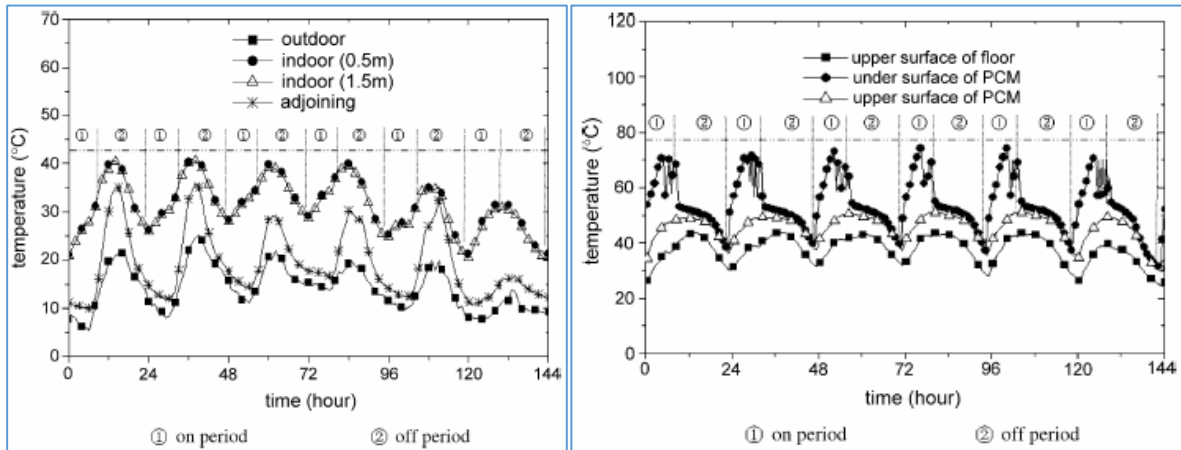
Εικόνα 2.22: Σημεία τοποθέτησης των θερμομέτρων

Η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος την περίοδο που πραγματοποιήθηκε το πείραμα ήταν 13.6°C. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε για 6 ημέρες με χρήση των υλικών αλλαγής φάσης στο δάπεδο, όπου κατά την διάρκεια της νύχτας (23:00 έως 8:00), αντιστάσεις ισχύος 150 Watt ζεστάνουν το δάπεδο έως τους 70°C και ξανά ξεκινούσαν όταν η θερμοκρασία έπεφτε κάτω από τους 55°C. Τέλος, το πείραμα επαναλήφθηκε για 4 ημέρες, χωρίς τα υλικά αλλαγής φάσης. Στα παρακάτω γραφήματα φαίνονται οι θερμοκρασίες στα διάφορα σημεία που είχαν τοποθετηθεί τα θερμομέτρα.



Εικόνα 2.23: Θερμοκρασία πειραματικού δωματίου χωρίς το υλικό αλλαγής φάσης σε διάστημα 4 ημερών

Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ημέρας και νύχτας είναι στους περίπου 12°C ενώ η μέση θερμοκρασία είναι στους περίπου 20°C.



Εικόνα 2.24: Θερμοκρασία πειραματικού δωματίου με το υλικό αλλαγής φάσης σε διάστημα 6 ημερών

Συγκρίνοντας τα δύο παραπάνω συστήματα, η μέση θερμοκρασία

Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ημέρας και νύχτας είναι στους περίπου 12°C όμως η μέση θερμοκρασία πλέον ανέρχεται στους περίπου 31°C. Η θερμοκρασιακή διαφορά στα θερμόμετρα που είχαν τοποθετηθεί στον τοίχο είναι μικρότερη από 0.5°C ενώ παράλληλα υπάρχει μεγάλος βαθμός θερμικής άνεσης. Τέλος, παρατηρείται ότι η θερμοκρασία στο υλικό αλλαγής φάσης μετά την διακοπή της ηλεκτρικής θέρμανσης παραμένει για πάνω από 10 ώρες στην θερμοκρασία των 45°C.

Από τα παραπάνω πειράματα προκύπτουν δύο συμπεράσματα:

1. Το σύστημα με τα υλικά αλλαγής φάσης κατάφερε να αυξήσει την μέση θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου χωρίς να αυξηθεί η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην ημέρα και στην νύχτα.
2. Η θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης παρέμεινε για αρκετή ώρα σε υψηλές θερμοκρασίες, μετά που σταμάτησαν να λειτουργούν οι αντιστάσεις. Με αυτόν τον τρόπο η περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια μετατοπίστηκε που αυτό προσφέρει σπουδαία οικονομικά αποτελέσματα.



## 2.5 Εφαρμογές για γυψοσανίδες

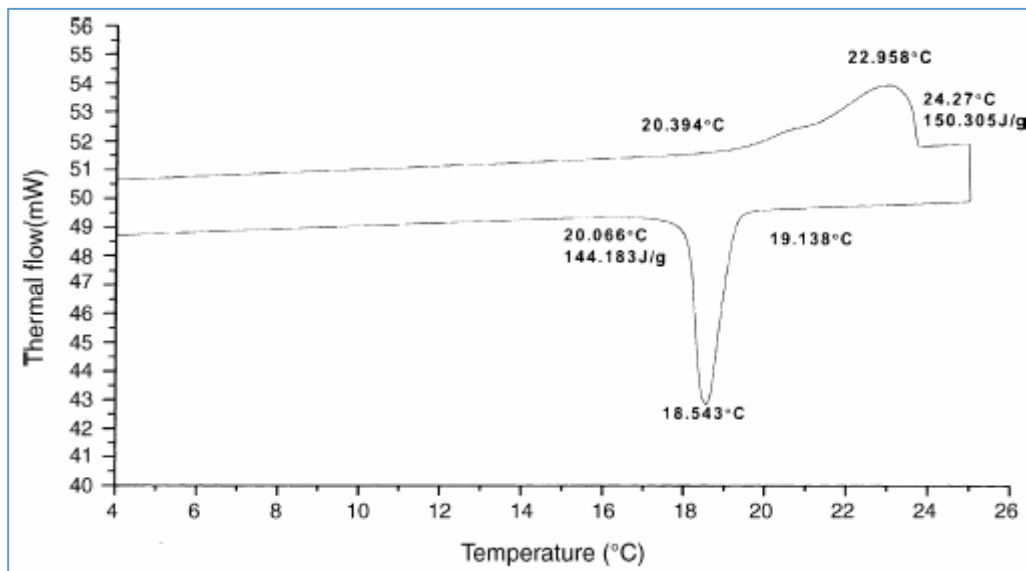
Επιστήμονες από την κίνα ενσωμάτωσαν υλικό αλλαγής φάσης σε γυψοσανίδες και τις τοποθέτησαν εσωτερικά στους τοίχους ενός πειραματικού δωματίου. Με αυτόν τον τρόπο, προσπάθησαν να βελτιώσουν την θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην ημέρα και νύχτα για να επιτύχουν μεγαλύτερο βαθμό θερμικής άνεσης τον χειμώνα. Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζεται η μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για τον κάθε χειμερινό μήνα στην πόλη Shenyang.

	Νοέμβρης	Δεκέμβρης	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος
Μέσος όρος μέγιστων θερμοκρασιών (°C)	5.7	-2.2	-5.2	-1.7	6.4
Μέσος όρος ελάχιστων θερμοκρασιών (°C)	-4.2	-1.25	-16.6	-13.1	-4.4
Μέση θερμοκρασία (°C)	0.3	-7.9	-11.5	-7.8	0.7

Εικόνα 2.25: Πίνακας που εμφανίζει τις θερμοκρασίες για τους χειμερινούς μήνες

Για την αποθήκευση της λανθάνουσας θερμότητας σε χαμηλή θερμοκρασία επιλέχθηκαν λιπαρά οξέα γιατί ικανοποιούν τα θερμοδυναμικά και κινητικά κριτήρια.

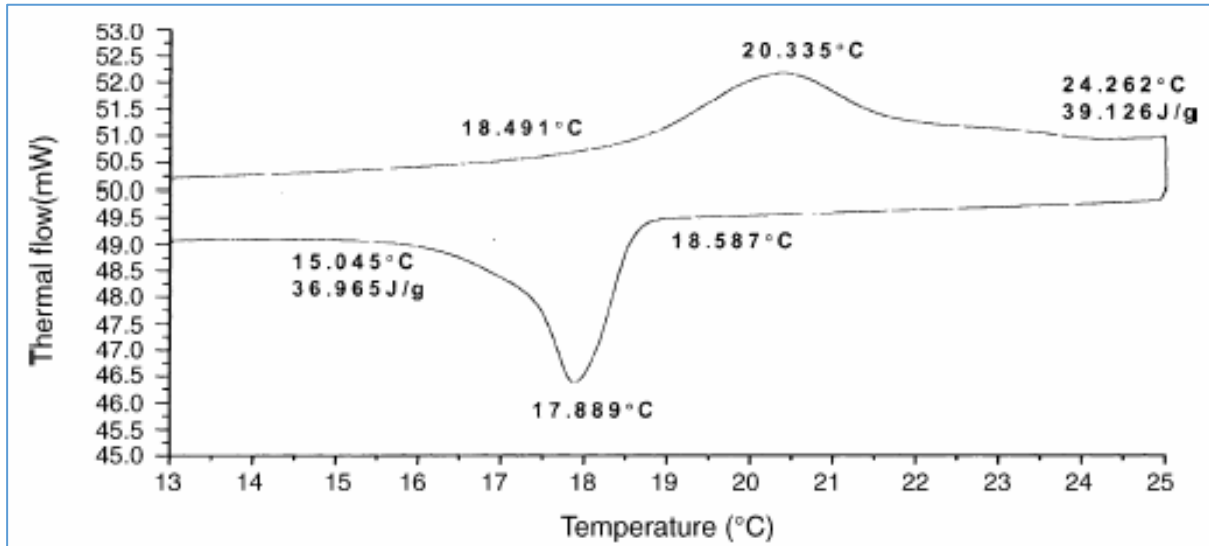
Το υλικό αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκε έχει σημείο τήξης 20.4°C, εύρος ζώνης μετάβασης αλλαγής φάσης 1°C και αποτελείται από καπρικό οξύ ( $C_9H_{19}COOH$ ) 82% κατά βάρος και λαυρικό οξύ ( $C_{12}H_{24}O_2$ ) 18% κατά βάρος. Από την ανάλυση του υλικού αλλαγής φάσης στο καλορίμετρο DSC (Differential scanning calorimetry) μπορεί να προσδιοριστεί το σημείο τήξης του όπου είναι 20.394°C καθώς επίσης και άλλα στοιχεία. Η καμπύλη εμφανίζεται στο παρακάτω γράφημα.



Εικόνα 2.26: Γράφημα απεικόνισης θερμικής ροής συναρτήσει της θερμοκρασίας

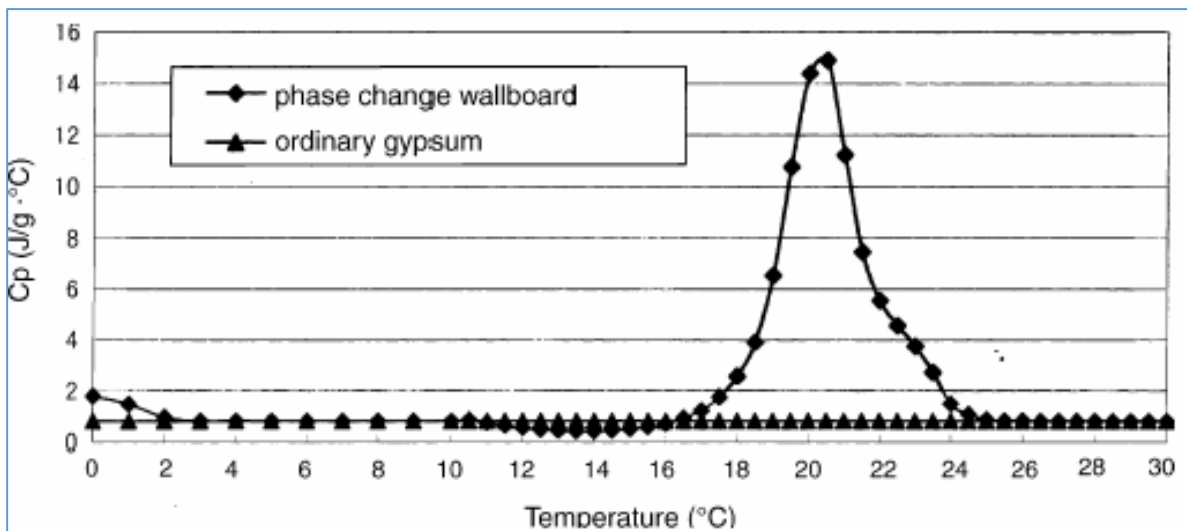
Στην συνέχεια για την δημιουργία της γυψοσανίδας, το υλικό αλλαγής φάσης ενσωματώνεται στον γύψο. Ο γύψος είναι πορώδης, απορροφά εύκολα το υλικό αλλαγής φάσης, είναι καλός μονωτής κι επίσης το κόστος του είναι χαμηλό και η όλη διαδικασία χρειάζεται λίγα λεπτά. Ο συνδυασμός των παραπάνω τον καθιστά ιδανικό για την δημιουργία γυψοσανίδων με υλικό αλλαγής φάσης. Από την ανάλυση του υλικού αλλαγής φάσης στο καλορίμετρο DSC (Differential scanning calorimetry) μπορεί να προσδιοριστεί το σημείο τήξης του όπου είναι 18.5°C καθώς επίσης η θερμοκρασία στερεοποίησης

όπου είναι 18.6°C. Η θερμοκρασία στερεοποίησης είναι κοντά στην επιθυμητή θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου κατά τον χειμώνα. Η καμπύλη εμφανίζεται στο παρακάτω γράφημα.



Εικόνα 2.27: Γράφημα απεικόνισης θερμικής ροής συναρτήσει της θερμοκρασίας

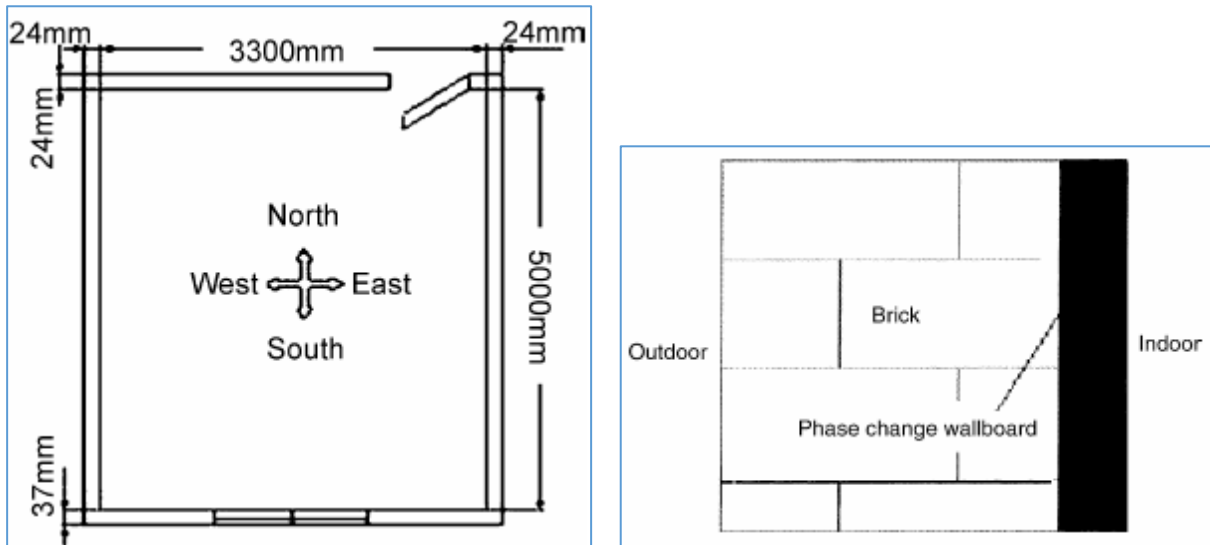
Το παρακάτω διάγραμμα συγκρίνει την ειδική θερμική χωρητικότητα ενός τοίχου με απλή γυψοσανίδα κι ενός άλλου με γυψοσανίδα που περιέχει υλικό αλλαγής φάσης. Παρατηρείται ότι η γυψοσανίδα που περιέχει υλικό αλλαγής φάσης έχει υψηλότερη ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας απ' ότι την απλή γυψοσανίδα.



Εικόνα 2.28: Συγκριτικό γράφημα ειδικής θερμικής χωρητικότητας γυψοσανίδας και γυψοσανίδας με υλικό αλλαγής φάσης

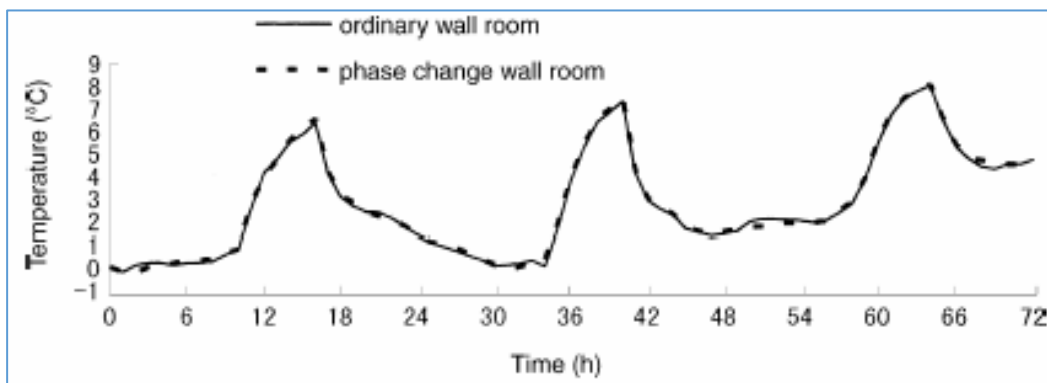
Το πειραματικό δωμάτιο όπου έγινε η εγκατάσταση των γυψοσανίδων με υλικό αλλαγής φάσης έχει διαστάσεις 5m x 3.3m x 2.8m, στον νότιο τοίχο του έχει ένα παράθυρο διαστάσεων 1.5m x 1.5m ενώ στον βόρειο τοίχο υπάρχει μια ξύλινη πόρτα με διαστάσεις 1m x 2m. Εξωτερικός είναι ο ανατολικός και νότιος τοίχος ενώ εσωτερικός είναι ο δυτικός και βόρειος. Το δωμάτιο και οι γυψοσανίδες φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



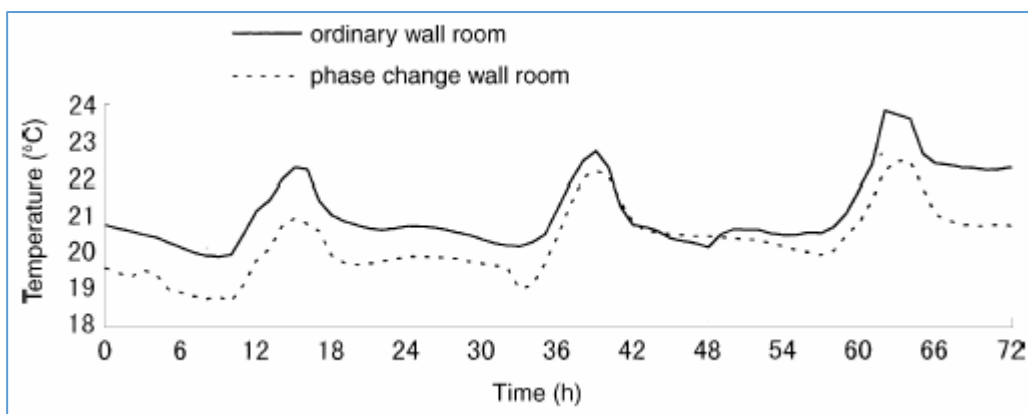


Εικόνα 2.29: Σχέδιο πειραματικού δωματίου

Στο πειραματικό δωμάτιο υπάρχουν ηλεκτρικές αντιστάσεις με συνολική ισχύ 2040 Watt, ενώ σε διάφορα σημεία του δωματίου υπάρχουν θερμομέτρα για να καταγράφονται οι θερμοκρασίες κατά την διάρκεια του πειράματος. Τα πειράματα διήρκεσαν 3 ημέρες και οι τιμές των θερμοκρασιών στο εξωτερικό και εσωτερικό μέρος του δωματίου συγκρίνονται με τις ίδιες τιμές του δωματίου που δεν περιέχει το υλικό αλλαγής φάσης. Τα δεδομένα παρουσιάζονται στα παρακάτω γραφήματα.



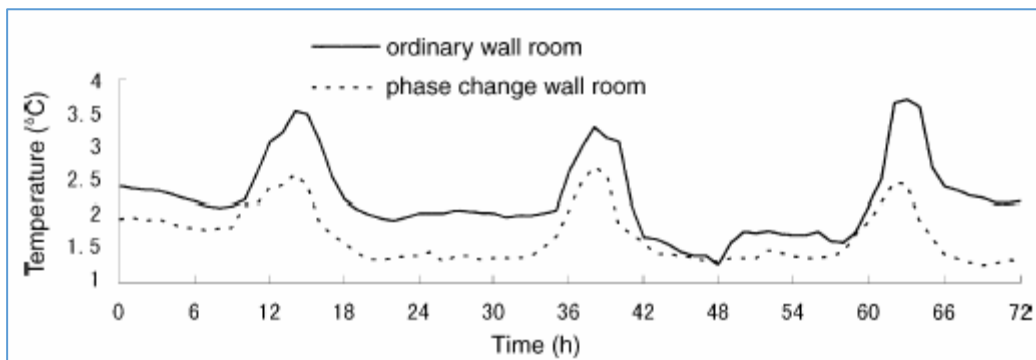
Εικόνα 2.30: Συγκριτικό γράφημα θερμοκρασίας πειραματικού δωματίου με και χωρίς το υλικό αλλαγής φάσης - εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος



Εικόνα 2.31: Συγκριτικό γράφημα θερμοκρασίας πειραματικού δωματίου με και χωρίς το υλικό αλλαγής φάσης - εσωτερική θερμοκρασία δωματίου

Η μέση θερμοκρασία στο εσωτερικό του δωματίου με το υλικό αλλαγής φάσης είναι  $20.18^{\circ}\text{C}$  ενώ για το απλό δωμάτιο  $21.03^{\circ}\text{C}$ , όπου υπάρχει κάποιος βαθμός θερμικής άνεσης. Το σημαντικό όμως είναι ότι το δωμάτιο με το υλικό αλλαγής φάσης παρουσιάζει  $2.59^{\circ}\text{C}$  διακύμανση στην θερμοκρασία ενώ το απλό δωμάτιο  $3.74^{\circ}\text{C}$ , οπότε η προσθήκη του υλικού αλλαγής φάσης μειώνει τις διακυμάνσεις στην θερμοκρασία.

Στο παρακάτω γράφημα εμφανίζεται η διαφορά της θερμοκρασίας ανάμεσα στον εσωτερικό αέρα και στην εσωτερική επιφάνεια του εξωτερικού τοίχου, για το απλό δωμάτιο και για το δωμάτιο με το υλικό αλλαγής φάσης, σε διάστημα 3 ημερών.



Εικόνα 2.32: Συγκριτικό γράφημα διαφοράς θερμοκρασίας αέρα - τοίχου του πειραματικού δωματίου με και χωρίς το υλικό αλλαγής φάσης

Η μέγιστη διαφορά θερμοκρασία στον αέρα - τοίχο του δωματίου με το υλικό αλλαγής φάσης είναι  $2.68^{\circ}\text{C}$  ενώ για το απλό δωμάτιο  $3.7^{\circ}\text{C}$ , όπου αυτό σημαίνει ότι αυτό το κέλυφος από το υλικό αλλαγής φάσης δημιουργεί καλύτερες συνθήκες θερμικής άνεση έναντι του συμβατικού.

## 2.6 Εφαρμογές για οροφές

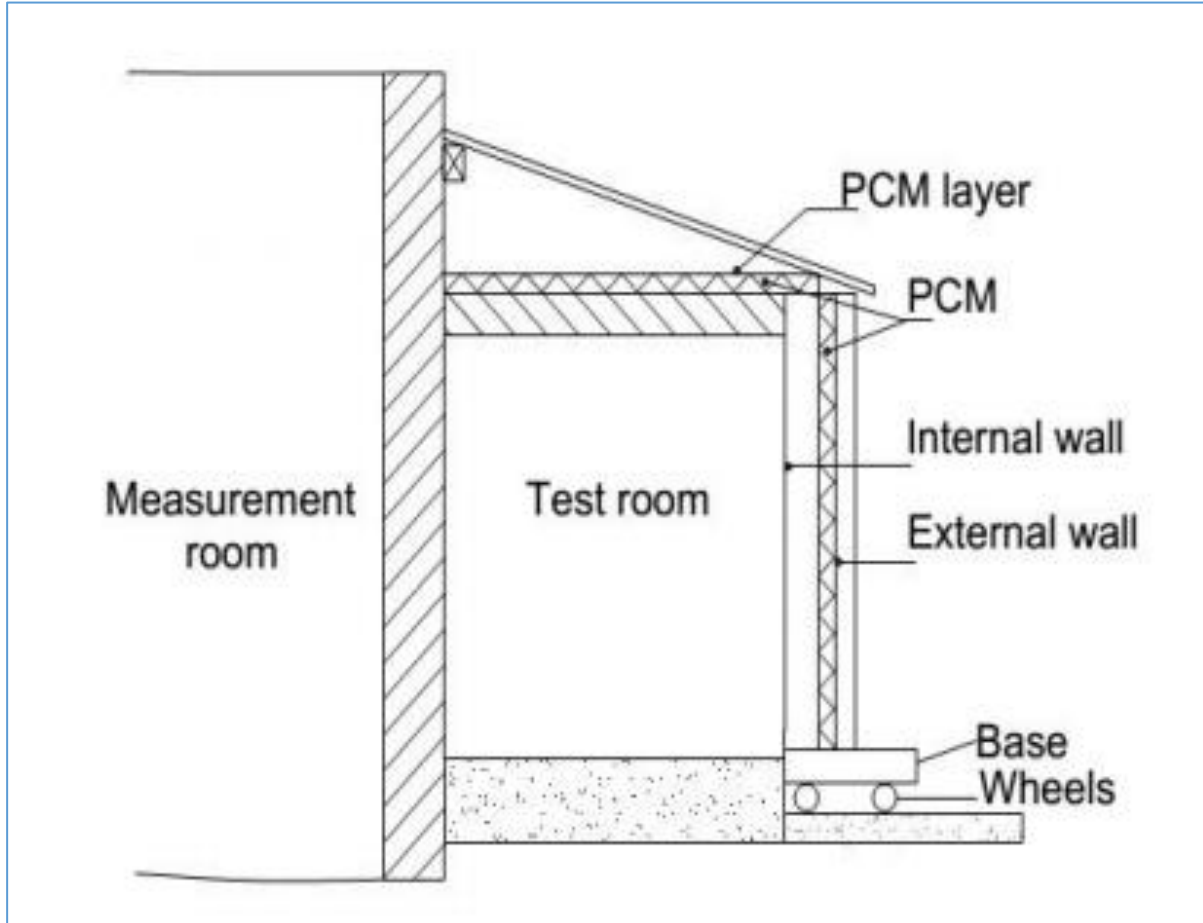
Σε ζεστές και τροπικές χώρες οι εξωτερικοί τοίχοι και οι στέγες λαμβάνουν ηλιακή ακτινοβολία απορροφώντας μέρος της και μεταδίδοντας σημαντικό μέρος της στην εσωτερική ατμόσφαιρα του οικήματος που προκαλεί θερμότητα αυξημένη και δυσφορία. Σε ψυχρό κλίμα η θερμότητα συνήθως χάνεται στο εξωτερικό περιβάλλον και προκαλεί και πάλι θερμική δυσφορία.

Οι οροφές είναι ένα σημαντικό μέρος των κτιριακών κελυφών οι οποίες είναι εκτεθειμένες σε μεγάλο βαθμό στην ηλιακή ακτινοβολία αλλά και σε άλλες περιβαλλοντικές αλλαγές, επηρεάζοντας έτσι τις εσωτερικές συνθήκες άνεσης για τους χρήστες του εκάστοτε χώρου. Οι οροφές ευθύνονται για τις μεγάλες απώλειες ή κέρδη θερμότητας ανάλογα, ειδικά σε κτίρια με μεγάλη επιφάνεια οροφής όπως είναι τα συγκροτήματα άθλησης, τα αμφιθέατρα, οι εκθεσιακοί χώροι κλπ.

Η οροφή είναι η κύρια πηγή θερμικής απώλειας στο περίβλημα του κτιρίου. Ως εκ τούτου, μία από τις πρακτικές για τη βελτίωση της θερμικής απόδοσης των οροφών είναι η αύξηση της θερμικής τους αποθηκευτικής ικανότητας χρησιμοποιώντας υλικά αλλαγής φάσης (PCM). Έχει αναπτυχθεί μια ποικιλία αριθμητικών και πειραματικών επιλογών για την ενσωμάτωση PCM σε στέγες και έχει βρεθεί ότι είναι αποτελεσματική στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας στα κτίρια.

Και στις δύο περιπτώσεις αυξάνεται το θερμικό φορτίο ενέργειας. Για τους λόγους αυτούς, πολλές μελέτες αφιερώθηκαν στη διερεύνηση τεχνικών για τη βελτίωση της θερμικής απόδοσης των τοίχων και των οροφών. Μια από τις πιο βιώσιμες τεχνικές είναι η χρήση του PCM ως θερμομονωτικό πληρωτικό υλικό. Πρακτικά, αυξάνει τη θερμική αδράνεια του συστήματος σε σχετικά χαμηλή τιμή

κόστους και χωρίς σημαντική αύξηση του βάρους της κατασκευής. Στη παρακάτω εικόνα που ακολουθεί, φαίνεται η εφαρμογή, σε πειραματική οικεία, των υλικών αλλαγής φάσης σε τοίχους και οροφές.



Εικόνα 2.33: Εικόνα πειραματικής οικείας με επένδυση υλικού αλλαγής φάσης σε τοίχους και οροφές

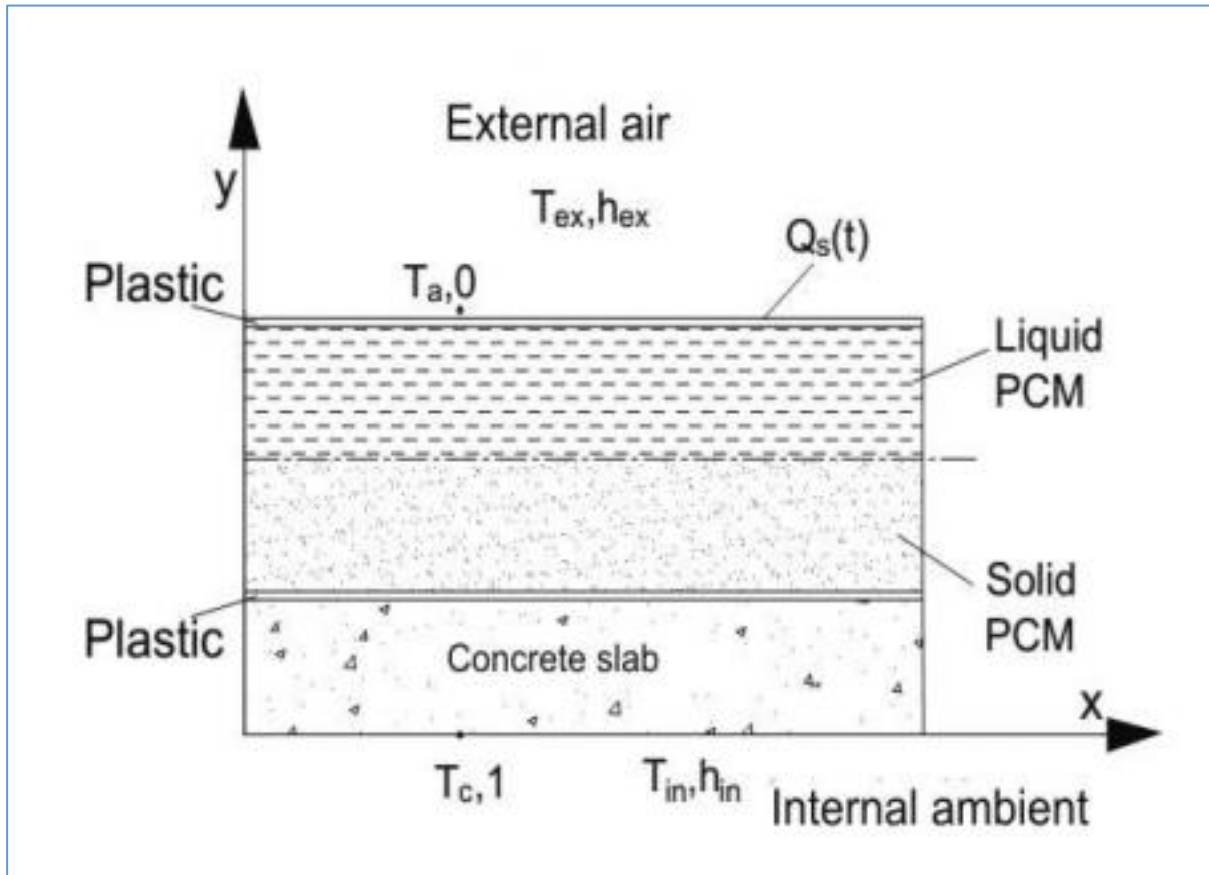
Η θερμική αποθήκευση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της εξοικονόμησης ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται σε μεγάλο βαθμό με την ενσωμάτωση της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας σε κατασκευαστικά στοιχεία. Αυτή η τεχνική είναι πολύ ελκυστική λόγω της υψηλής πυκνότητας αποθήκευσης με μικρή καμπύλη θερμοκρασίας.

Η θερμική αποθήκευση ενέργειας σε τοίχους, οροφές και τα δάπεδα των κτιρίων μπορεί να ενισχυθεί με την ενσωμάτωση PCM μέσα σε αυτά τα κατασκευαστικά στοιχεία. Η αύξηση της θερμικής χωρητικότητας ενός κτιρίου μπορεί να μειώσει τις εσωτερικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.

Η χρήση PCM σε κτίρια παρέχει τη δυνατότητα για καλύτερη εσωτερική θερμική άνεση και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας λόγω της μείωσης / μετατόπισης φορτίου. Ως εκ τούτου, μια καλή γνώση της δυναμικής ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων που χρησιμοποιούν PCM είναι απαραίτητη για τους κατασκευαστές κτιρίων προκειμένου να κατανοήσουν καλύτερα την αντίδραση θερμοκρασίας του κτιρίου, να βελτιώσουν την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος και τη συνολική ενεργειακή απόδοση των κτιρίων.

Σχετικά με τις οροφές και τις στέγες συγκεκριμένα, η στέγη είναι κατασκευασμένη με συμβατικά δομικά υλικά με στρώμα PCM. Η οροφή PCM υπόκειται σε ηλιακή ακτινοβολία στην εξωτερική όψη,

και περιλαμβάνει αγωγιμότητα θερμότητας στο στρώμα του υλικού αλλαγής φάσης και αγωγιμότητα στο σκυρόδεμα με θερμική μεταφορά στην εσωτερική επιφάνεια που βλέπει στο εσωτερικό περιβάλλον όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 2.34: Επεξηγηματική εικόνα στρώσεων υλικού αλλαγής φάσης σε οροφές

Από την άποψη του σχεδιασμού, οι εφαρμογές ψύξης PCM σε οροφές είναι είτε παθητικές (παρόμοιες με PCM-ενισχυμένες σανίδες γύψου τοίχου ή εσωτερικοί σοβάδες) ή ενεργές, οι οποίες συνήθως αποτελούν μέρος πιο περίπλοκων και δυναμικών κλιματιστικών συστημάτων που χρησιμοποιούν προψυχή εξαρτήματα κλιματισμού χώρου (π.χ. υδραυλικά συστήματα, εναλλάκτες θερμότητας μικρο-σωληνώσεων και αγωγοί αέρα).

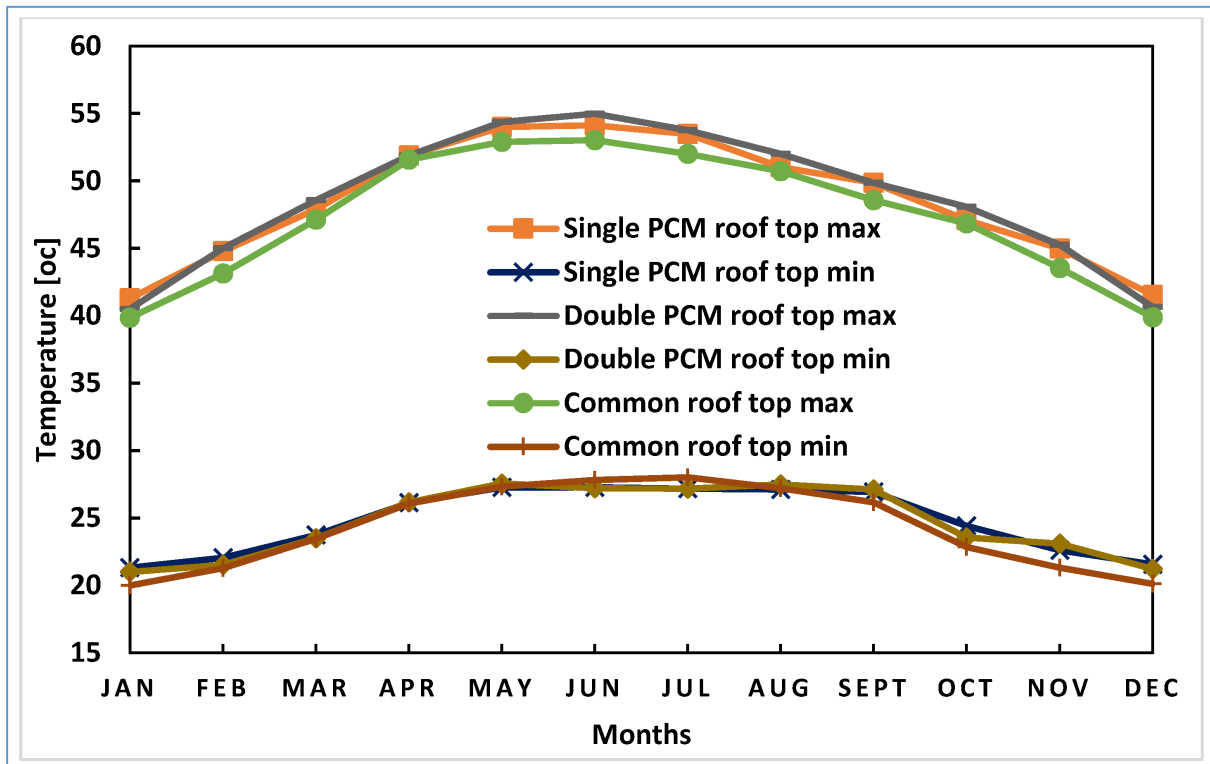
Οι παλαιότερες έρευνες που επικεντρώθηκαν στα συμβατικά συστήματα ψύξης οροφής κατέδειξαν ότι μπορούν να προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες κλιματισμού χώρου.

Εν συντομία, μπορεί να παρατηρηθεί σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, κυρίως επειδή η θερμική άνεση επιτυγχάνεται με υψηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες, τυπικά 28 °C. Επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται λόγω των διαθέσιμων μεγάλων επιφανειών ψύξης, οι οποίες επιτρέπουν υψηλότερες θερμοκρασίες νερού ψύξης.

Η άνεση βελτιώνεται εξαιτίας της ελαχιστοποίησης των διαφορών κίνησης αέρα και θερμοκρασίας επιφάνειας, της εξάλειψης του θορύβου που σχετίζεται με τα πηνία του ανεμιστήρα και της ομοιομορφίας της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα.

Η μετάβαση στην υγρή φάση του PCM, η επαφή η αντίσταση μεταξύ της πλάκας σκυροδέματος και του PCM, και οι επιπτώσεις των άκρων παραμελήθηκαν. Θεωρείται ότι οι φυσικές ιδιότητες και οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας είναι σταθεροί.

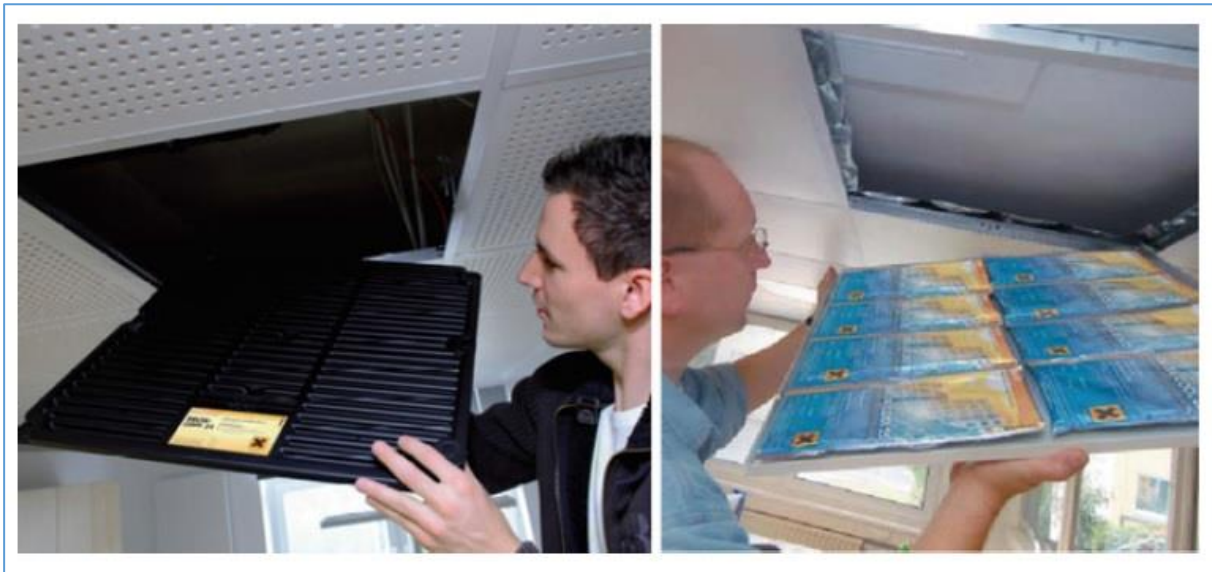
Θεωρείται επίσης ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας εξωτερικού τοιχώματος είναι σύμφωνη με την ενεργειακή ισορροπία μεταξύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και των εμπλεκόμενων μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας, δηλαδή της αγωγιμότητας, της μεταφοράς και της ακτινοβολίας.



Εικόνα 2.35: Αποτελέσματα διακύμανσης θερμοκρασίας για όλο το χρόνο με και χωρίς εφαρμογή υλικών αλλαγής φάσης

Τα αποτελέσματα που συνοψίζονται στη παραπάνω εικόνα δείχνουν πως με τα υλικά αλλαγής φάσης σε οροφές κτηρίων επιτυγχάνεται καλύτερη θερμοκρασιακή συμπεριφορά σε σχέση με τις συμβατικές οροφές. Η βελτίωση της θερμικής απόδοσης μεμονωμένων στοιχείων θα πρέπει να συνοδεύεται βέβαια από ομοιόμορφη θερμομόνωση του κελύφους ώστε να αποφεύγονται οι θερμογέφυρες.

Η θερμομόνωση είναι θεμελιώδης παράμετρος σε κλίματα όπου κυριαρχούν οι ανάγκες θέρμανσης, αλλά αποτελεί πλεονέκτημα και σε κλίματα όπου κυριαρχούν ψυκτικές ανάγκες, παρότι τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με το συνδυασμό θερμομόνωσης και θερμικής ικανότητας και με την εξασφάλιση φυσικού αερισμού και συστημάτων σκιασμού.



Εικόνα 2.36: Εφαρμογή υλικών αλλαγής φάσης σε πλακίδια οροφής

Δεκαετίες δοκιμών και επιδείξεων παγκοσμίως απέδειξαν ότι η προσθήκη PCM στα συστήματα ψύξης οροφής μπορεί να βελτιώσει την ενεργειακή τους απόδοση και να μειώσει τον κίνδυνο συμπύκνωσης υγρασίας. Λόγω της μεγάλης ποικιλίας συστημάτων οροφής που περιέχουν PCM που περιγράφονται στη βιβλιογραφία μηχανικών, η ενότητα αυτή περιορίζεται μόνο σε ένα μικρό αριθμό τυπικών αντιπροσωπευτικών ερευνητικών έργων και εφαρμογών.

Ένα από τα πρώτα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης που ενσωματώνουν ένα PCM που βρίσκεται στην οροφή αναπτύχθηκε από τους Gutherz και Schiler (1991). Μια πρωτότυπη κατοικημένη οροφή που χρησιμοποιεί επιφάνεια ψυχρής οροφής, με φυσική υποβάθμιση και ψύκτη PCM σχεδιάστηκε και δοκιμάστηκε από τον συγγραφέα (Κοσόνη et al., 2007, Miller and Κοσόνη 2008).

Μια πολυστρωματική διαμόρφωση των αφρών πολυουρεθάνης ενισχυμένων με PCM, των υφασμάτων εμποτισμένων με PCM και του πολύ αντανακλαστικού φύλλου αλουμινίου εφαρμόστηκε. Όπως αναφέρθηκε, η οροφή αυτή των υλικών αλλαγής φάσης χρησιμοποίησε επίσης κανάλια αέρα των 10 cm για την εξάτμιση της πλεονάζουσας θερμότητας κατά τη διάρκεια της μέγιστης ακτινοβολίας (υποβιβασμός). Δύο αντανακλαστικές μεμβράνες τοποθετήθηκαν πάνω από τις σανίδες επένδυσης της οροφής με τις αλουμιένιες επιφάνειες να κοιτάζουν το ένα προς το άλλο κατά μήκος του διακένου αέρα των 10 cm.

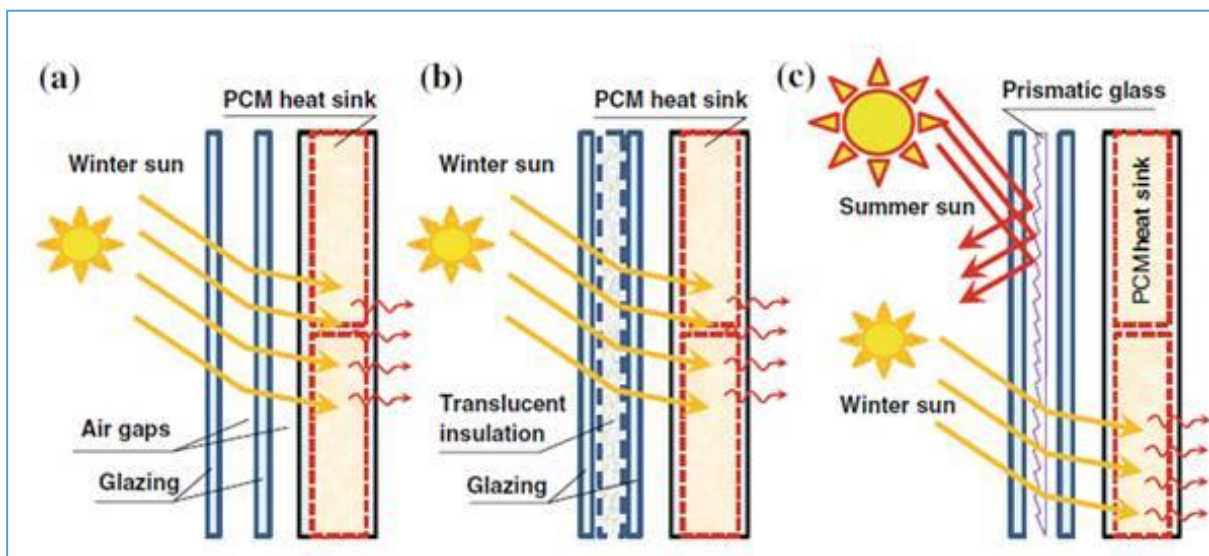
## 2.7 Εφαρμογές για υάλινες επιφάνειες

Όπως παρουσιάζεται σε προηγούμενες ενότητες, μια εφαρμογή PCM είναι μια ενδιαφέρουσα λύση για τη βελτίωση των αδιαφανών φακέλων κτιρίων. Ωστόσο, το PCM μπορεί επίσης να αποτελέσει ελκυστική εναλλακτική λύση για τα προϊόντα φινιρίσματος, καθώς παράγουν σημαντικό μέρος των θερμικών φορτίων κατασκευής. Στις συμβατικές εφαρμογές, η θερμική απόδοση της εξαέρωσης βελτιώνεται συνήθως με τη χρήση απορροφούμενων αερίων που γεμίζουν το διάκενο μεταξύ γυάλινων φύλλων ή με την εφαρμογή θερμομονωμένων γυάλινων παραθύρων.

Όταν απαιτείται μόνο η διαφάνεια, οι άλλες δυνατότητες θερμικής βελτίωσης μπορούν να ενσωματώνουν νέα υλικά πληρώσεως σε γυάλινους υαλοπίνακες, όπως αερόπηγμα πυριτίου ή ημιδιαφανές PCM.

Και οι δύο αυτές επιλογές απαιτούν σοβαρή εξέταση των οπτικών ιδιοτήτων και την ορθή λειτουργία του παραθύρου. Ο στόχος της χρήσης PCM στο παράθυρο όπως οι υαλοπίνακες ή τα παραθυρόφυλλα είναι να χρησιμοποιούν την υψηλή λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης για να μειώσουν τα θερμικά φορτία που παράγονται από το παράθυρο, απορροφώντας το θερμικό κέρδος πριν φτάσει στον εσωτερικό χώρο.

Ο κύκλος αλλαγής φάσης μπορεί να σταθεροποιήσει την εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου και να μειώσει τα φορτία θέρμανσης και ψύξης. Από τη θερμική πλευρά, τα παράθυρα PCM λειτουργούν σαν τους οπτικά διαφανείς ή ημιδιαφανείς τοίχους Trombe. Αυτοί συνήθως αποτελούνται από μονωτικό ή πολυστρωματικό τζάμι από συμβατικό γυαλί, ενσωματωμένο σε ένα στρώμα από διαφανές ή ημιδιαφανές προϊόν PCM.



Εικόνα 2.37: Υλικά αλλαγής φάσης εντός υάλινων επιφανειών και παραθύρων

Στα δυναμικά παράθυρα, το PCM αλλάζει τη φάση από στερεή σε υγρή όταν θερμαίνεται, απορροφώντας έτσι την διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια στην ενδοθερμική διαδικασία. Ταυτόχρονα, η διαφάνεια του PCM αλλάζει επίσης. Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος πέφτει κατά τη διάρκεια της νύχτας, το λιωμένο PCM των απαιτούμενων οπτικών ιδιοτήτων στερεοποιείται σε ένα στερεό υλικό ενώ παράγει την προηγούμενη απορροφούμενη θερμότητα στην εξωτερική διαδικασία.

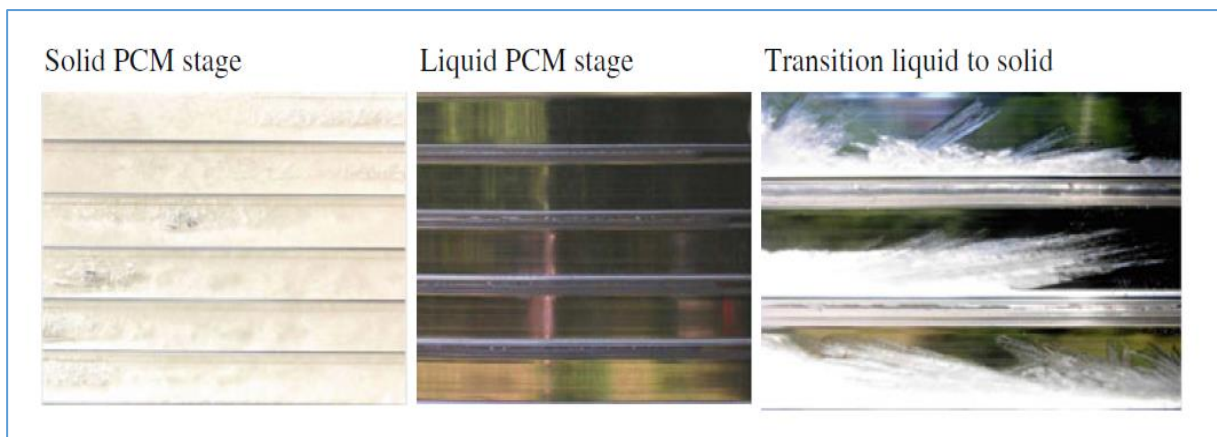
Ένα κατάλληλο εύρος θερμοκρασίας αλλαγής φάσης, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες και τις επιθυμητές θερμοκρασίες άνεσης, καθώς και την ικανότητα απορρόφησης και απελευθέρωσης

μεγάλων ποσοτήτων θερμικής ενέργειας απαιτούνται για την σωστή λειτουργία των παραθύρων PCM. Είναι σημαντικό ότι τόσο η μεταβατική ικανότητα αλλαγής φάσης, όσο και τα οπτικά χαρακτηριστικά του PCM δεν επιδεινώνονται με το χρόνο, γεγονός που αποτελεί κρίσιμη προϋπόθεση κατά την επιλογή του PCM για εφαρμογή σε υάλινες επιφάνειες.

Διάφορες παραφίνες είναι τυπικά παραδείγματα PCM σε δομικά προϊόντα, αλλά η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, η σημαντική μεταβολή όγκου κατά τη διάρκεια της μετάπτωσης φάσης και οι κακές οπτικές ιδιότητες περιορίζουν τις εφαρμογές φινιρίσματος. Χρησιμοποιήθηκε ως πρώτη εφαρμογή ένα πάνελ συλλογής κατασκευασμένο από μια λεπτή πλάκα παραφίνης τοποθετημένη πίσω από το διπλό τζάμι ενός κτιρίου και διαπίστωσε ότι η θερμική απόδοση ήταν συγκρίσιμη με συμβατική επίπεδη πλάκα ηλιακού θερμικού συλλέκτη.

Σε μια επόμενη έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τον Nayak (1987), ένα ηλιακό σύστημα Transwall χρησιμοποιήθηκε ως διαφανές αρθρωτό τοίχο που παρέχει τόσο θέρμανση όσο και φωτισμό του χώρου κατοικίας. Περαιτέρω δυνατότητες σχεδίασης προκύπτουν από τη μεταβλητή διαφάνεια ορισμένων προϊόντων με βάση το PCM. Παρέχουν δυναμικά θερμικά χαρακτηριστικά και πηγή φυσικού φωτισμού στο κτίριο.

Η ενεργειακή κατάσταση αυτών των συγκροτημάτων εμφανίζεται ως διαφανής ή ημιδιαφανής όταν το PCM λιώνει και είναι γαλακτώδες όταν το PCM είναι παγωμένο. Επίσης μελετήθηκε μια ηλιακή πρόσοψη αποτελούμενη από διαφανές μονωτικό υλικό και ημιδιαφανές PCM που χρησιμοποιείται τόσο για αποθήκευση ηλιακής θερμότητας όσο και για φωτισμό ημέρας.



Εικόνα 2.38: Αλλαγή φάσεων σε υλικό αλλαγής φάσης εγκλεισμένο σε υάλινη επιφάνεια

Μια ιδέα των ηλιακών παραθύρων που χρησιμοποιούν ενισχυμένα προϊόντα PCM είναι μια ελκυστική εναλλακτική λύση για τα περιγραφέντα παραπάνω συστήματα εξαερισμού με ψύκτες PCM. Ωστόσο, η τεχνολογία αυτή εξακολουθεί να αναμένει επιτυχή εφαρμογή. Επιπλέον, πολλοί ημι-διαφανείς και ημιδιαφανείς ηλιακοί τοίχοι παρουσιάζουν πολλά μειονεκτήματα. Το ένα είναι η μειωμένη οπτική διαφάνεια.

Η άλλη είναι περιορισμένη θερμική χωρητικότητα αποθήκευσης. Αυτά τα συστήματα πρέπει να έχουν επαρκή θερμική μάζα με αποτέλεσμα σημαντικό πάχος που προέρχεται από τα πρόσθετα εξαρτήματα PCM. Αυτό είναι το σημείο όπου τα PCMenhanced προσαρτήματα παραθύρων (περίοδες, παραθυρόφυλλα ή κουρτίνες) προσφέρουν μια μοναδική λύση: ένα λεπτό, κινητό στρώμα PCM το οποίο μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί "όπως απαιτείται" χωρίς να διακυβεύονται οι οπτικές ιδιότητες των παραθύρων.





## 3. Λοιπές εφαρμογές

### 3.1 Εφαρμογές σε θερμοκήπια

Τα παραδοσιακά θερμοκήπια δεν είναι καθ' όλα αυτά πράσινα. Η κακή μόνωση και τα αναποτελεσματικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης αυξάνουν την κατανάλωση ενέργειας και το κόστος λειτουργίας.

Τα θερμοκήπια παρέχουν ένα προστατευμένο περιβάλλον για τις καλλιέργειες. Χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση των κλιματικών αντιξοοτήτων. Σε γενικές γραμμές δημιουργούνται στο εσωτερικό τους προτιμητέες συνθήκες για την ανάπτυξη των φυτών. Μεταφορά ενέργειας μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού των θερμοκηπίων πραγματοποιείται και ελέγχεται κάθε λεπτό της ημέρας. Επομένως, οι χώροι αυτοί πρέπει να θερμαίνονται, να ψύχονται και να αερίζονται ανάλογα με τις εξωτερικές κλιματολογικές συνθήκες, έτσι ώστε να διατηρούνται οι εσωτερικές συνθήκες κατάλληλες για την ανάπτυξη των φυτών και να προλαμβάνεται η βλάβη των καλλιεργειών.



Εικόνα 3.1: Υλικά αλλαγής φάσης μορφής σωλήνα εφαρμοσμένα σε πραγματικό θερμοκήπιο



Η θέρμανση ενός θερμοκηπίου μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας διαφορετικά συστήματα και πηγές ενέργειας, όπως τα ορυκτά καύσιμα. Κάθε μία από αυτές τις πηγές ενέργειας έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Τα συστήματα θέρμανσης που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα ενδέχεται να έχουν χαμηλό αρχικό κόστος, αλλά το λειτουργικό τους κόστος είναι υψηλό, καθώς και προκαλούν ρύπανση στο περιβάλλον και απαιτούν πολλά έξοδα συντήρησης και μεταφοράς.

Από την άλλη πλευρά, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας όπως τα PCM ενδέχεται να έχουν υψηλό αρχικό κόστος, αλλά να έχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος, είναι απαλλαγμένα από ρύπανση, ασφαλή χρήση και έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, γεγονός που καθιστά τα συστήματα αυτά ιδιαίτερα ελκυστικά για τις αγροτικές εφαρμογές. Ωστόσο, τα μειονεκτήματά τους, περιλαμβάνουν τη χαμηλή αγωγιμότητά τους, η οποία επιβραδύνει τον ρυθμό φόρτισης και εκφόρτισης της αποθηκευμένης ενέργειάς τους.



Εικόνα 3.2: Υλικά αλλαγής φάσης τοίχου, εφαρμοσμένα σε πραγματικό θερμοκήπιο

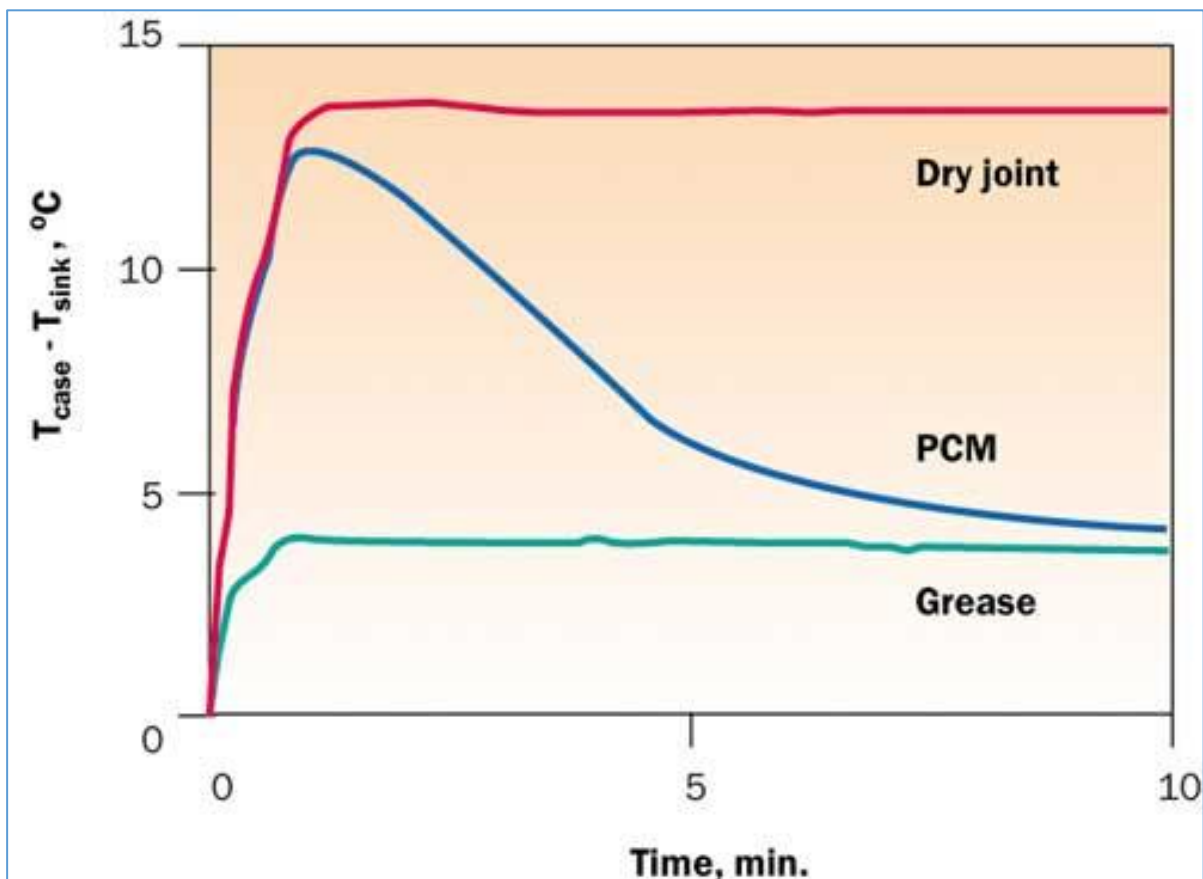
Το πλεονέκτημα της αποθήκευσης PCM σε σύγκριση με συστήματα αισθητής αποθήκευσης θερμότητας, όπως η αποθήκευση νερού ή πετρωμάτων, είναι η δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων θερμότητας κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης της με μικρή μόνο μεταβολή θερμοκρασίας. Επιπλέον, τα PCM διατίθενται σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασίας αλλαγής φάσης, το οποίο μπορεί να ταιριάζει με την ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας σε εφαρμογές θερμοκηπίου [10].

### 3.2 Εφαρμογές σε ηλεκτρονικά

Παρόλο που τα υλικά αλλαγής φάσης (PCM) εισήχθησαν σχεδόν πριν από είκοσι χρόνια, η ανάπτυξη αυτής της κατηγορίας υλικού διεπαφής απέκτησε ευρεία αποδοχή μέχρι την ανάπτυξη του επεξεργαστή Pentium υψηλής ισχύος.

Οι μεγάλες ποσότητες θερμότητας που παράγονται από αυτούς τους επεξεργαστές απαιτούσαν μια προσεκτικά σχεδιασμένη θερμική διαδρομή όπου ελαχιστοποιήθηκαν όλες οι θερμικές αντιστάσεις. Για τη διασύνδεση μεταξύ επεξεργαστή και ψήκτρας, απαιτείται η χρήση θερμικού γράσου ή θερμικής πάστας για την ελαχιστοποίηση της αντίστασης λόγω διεπαφής. Ευτυχώς, τα PCM παρείχαν μια εναλλακτική λύση για την ακατάστατη αυτή εφαρμογή και τα προβλήματα μεταφοράς που σχετίζονται με τις θερμικές πάστες.

Καθώς η τροφοδοσία είναι ενεργοποιημένη και τα εξαρτήματα παραμένουν δροσερά, το σύστημα συμπεριφέρεται σαν ξηρός σύνδεσμος και η διαφορά θερμοκρασίας αυξάνεται ραγδαία σε περίπου 30 C. Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του συστήματος, το PCM τήκεται και η πίεση σύσφιξης που εξασκείται από τα κλιπ ελατηρίου, ωθεί το υγρό να εξαπλωθεί στη θερμική άρθρωση. Καθώς το υγρό εξαπλώνεται, το τετηγμένο PCM μετατοπίζει τον διάμεσο αέρα και μειώνεται η απόσταση μεταξύ των επιφανειών.



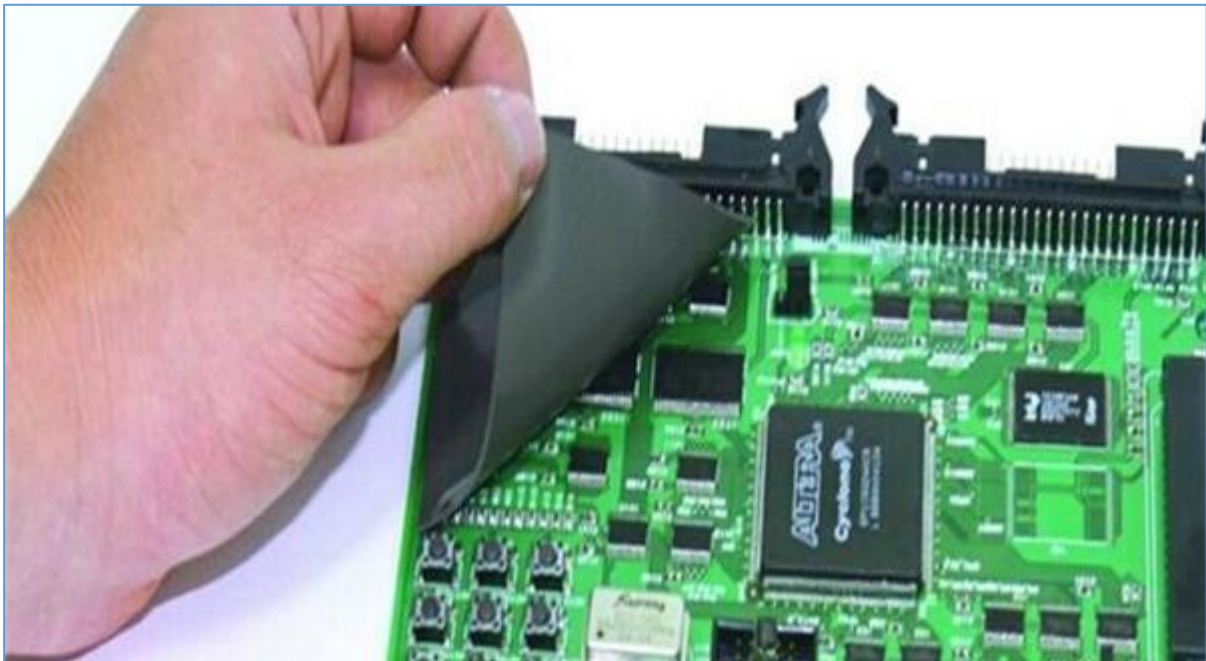
Εικόνα 3.3: Διάγραμμα θερμοκρασιών επεξεργαστή με θερμική πάστα, υλικό αλλαγής φάσης και ξηρή σύνδεση

Αμφότερες αυτές οι διαδικασίες δρουν για να μειώσουν τη θερμική αντίσταση της διασύνδεσης και η διαφορά θερμοκρασίας φαίνεται να μειώνεται αρκετά γρήγορα, επιτυγχάνοντας την απόδοση που παρέχουν οι θερμικές πάστες. Στην πραγματικότητα, το στερεό φιλμ PCM έχει μετατραπεί σε μια θερμική πάστα και έχει σχηματιστεί ένας σύνδεσμος τύπου γράσου μεταξύ επεξεργαστή και ψήκτρας.



Την επόμενη φορά που ο επεξεργαστής είναι ενεργοποιημένος, η διεπαφή δεν θα αντιμετωπίσει τη μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας με τον ίδιο αργό τρόπο και αυτό επειδή έχει ήδη δημιουργηθεί ήδη η θερμική σύνδεση.

Συμπερασματικά, τα υλικά αλλαγής φάσης προσφέρουν την ίδια θερμική απόδοση με το θερμικό γράσο χωρίς το χάος και τη μόλυνση που σχετίζεται με το θερμικό αυτό γράσο. Μπορούν να παρέχονται αυτά τα υλικά αλλαγής φάσης συνδεδεμένα σε μια ψήκτρα ως ξηρό φιλμ. Μόλις θερμαίνονται πάνω από τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης τους, τήκονται και εκτελούν το ίδιο ή και συχνά πολύ καλύτερα από τις θερμικές πάστες. Αφού σχηματιστεί αυτή η διεπαφή, παραμένει σταθερή μέχρι να αφαιρεθεί φυσικά η ψήκτρα από την επιφάνεια του επεξεργαστή.



Εικόνα 3.4: Εμπορική εφαρμογή υλικού φιλμ αλλαγής φάσης για τη ψύξη ηλεκτρονικών κυκλωμάτων

Από την άλλη πλευρά, γενικεύοντας λίγο την εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης στα ηλεκτρονικά, μελετώνται οι μικρές ηλεκτρονικές συσκευές όπως τα κινητά τηλέφωνα.

Με φορτία αιχμής συχνά της τάξης των λεπτών και εργονομικές εκτιμήσεις που περιορίζουν τις επιφανειακές θερμοκρασίες και τον ακουστικό θόρυβο, οι φορητές συσκευές, όπως τα έξυπνα τηλέφωνα ή τα tablets, είναι εξαιρετικοί υποψήφιοι για τη χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCMs).

Τα φορτία επεξεργαστή (ή αλλιώς η επεξεργαστική ισχύ) σε προϊόντα χειρός είναι ακόμα πολύ μεταβλητά. Υπάρχουν πολλές καταστάσεις όπου η προσωρινή ισχύς στο σύστημα σε πακέτα chip (SoC) μπορεί να αυξηθεί λόγω της πολλαπλής λειτουργικότητας (Multitasking – hyperthreading). Για παράδειγμα, η δραστηριότητα των κοινωνικών μέσων μαζικής ενημέρωσης κατά την ακρόαση μουσικής ή ένα σύντομο τηλεφώνημα κατά την αναπαραγωγή παιχνιδιών.

Επιπρόσθετα, τα καταναλωτικά προϊόντα χειρός υπόκεινται σε πολλούς εργονομικούς περιορισμούς ως αποτέλεσμα της εγγύτητάς τους και της άμεσης επαφής με τον χρήστη. Οι θερμοκρασίες της επιφάνειας πρέπει να διατηρούνται σε ένα άνετο και ασφαλές εύρος.

Σε περίπτωση χρήσης ανεμιστήρων, ο ακουστικός θόρυβος πρέπει να παραμείνει κάτω από τα αποδεκτά όρια. Υπάρχουν πολλοί πρόσθετοι φυσικοί περιορισμοί στο μέγεθος και το βάρος που

περιορίζουν την ικανότητα του προϊόντος να απορροφά τη θερμότητα και να περιορίζει τις επιλογές ψύξης.

Λίγα υπάρχοντα ηλεκτρονικά προϊόντα έχουν σχεδιαστεί ειδικά για παροδικά θερμικά φορτία. Προκειμένου να διαχειριστούν τις υψηλές θερμοκρασίες και τα θερμικά φορτία, οι περισσότεροι βασίζονται στον στραγγαλισμό και / ή στην προστιθέμενη μάζα για την αύξηση της θερμικής χωρητικότητας των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή.

Ο σχεδιασμός των προϊόντων χειρός με PCMs μπορεί να επεκτείνει το εύρος λειτουργίας του προϊόντος, να ελαχιστοποιήσει το στραγγαλισμό και να μειώσει την εξάρτηση από τους ανεμιστήρες για περιπτώσεις προσωρινής χρήσης φορτίου για τη μείωση του ακουστικού θορύβου και την παράταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Για τους λόγους αυτούς, οι καταναλωτικές συσκευές είναι εξαιρετικοί υποψήφιοι για την εισαγωγή υλικών αλλαγής φάσης.

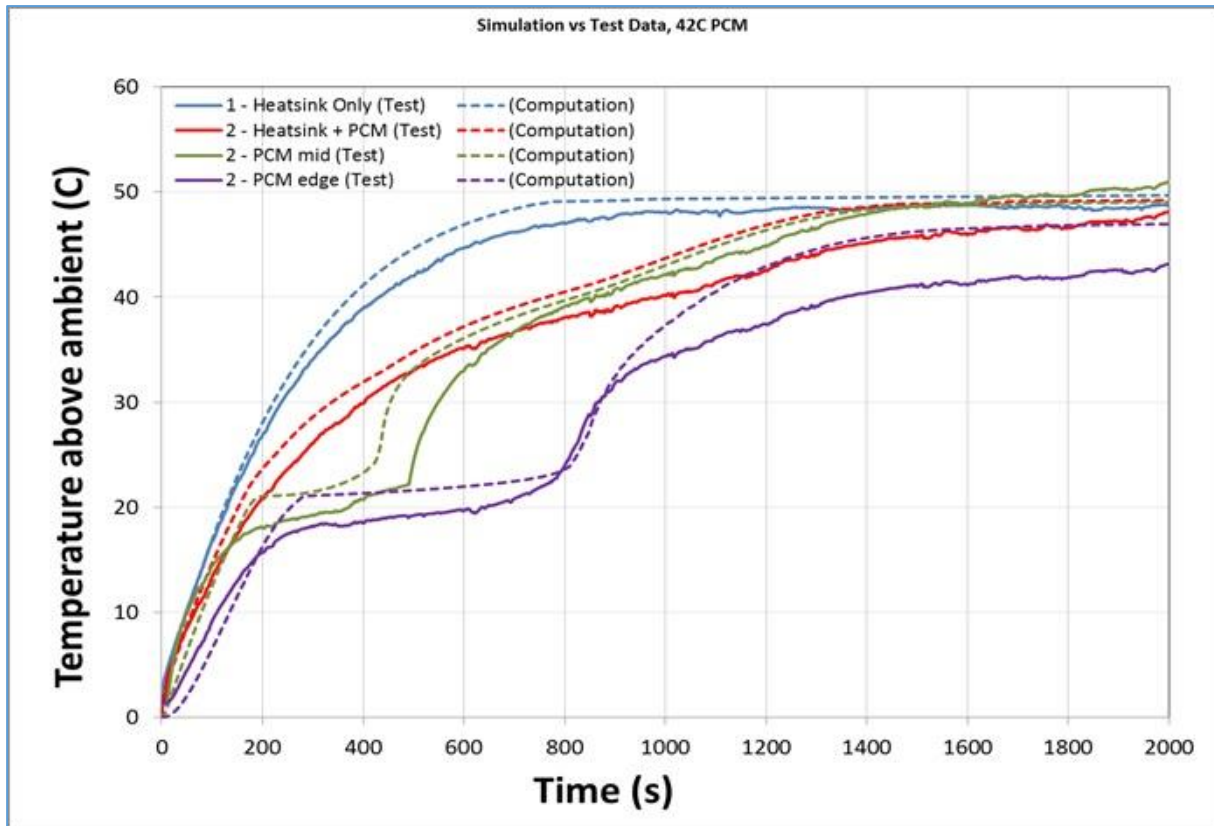


Εικόνα 3.5: Εμπορικό προϊόν της NASA για ψύξη ηλεκτρονικών κυκλωμάτων στο διάστημα με χρήση υλικού αλλαγής φάσης με παραφίνη

Τα PCM με βάση την παραφίνη είναι κατάλληλα για εφαρμογές ηλεκτρονικών, επειδή έχουν υψηλή θερμοκρασία σύντηξης και θερμοκρασίες μετάβασης τυπικά στην περιοχή των 5-70 ° C. Ένα απλό διερευνητικό πείραμα πραγματοποιήθηκε με το PCM πριν από την εφαρμογή του σε ένα πιο περίπλοκο περιβάλλον ταμπλέτας με αναγκαστική μεταφορά, προκειμένου να χαρακτηριστεί η συμπεριφορά του και να επικυρωθεί η υπολογιστική μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για περεταίρω μελέτη.

Η πειραματική συσκευή περιλάμβανε μια ψήκτρα, μια πηγή θερμότητας 10 W, 9,5 g υλικού PCM και θερμοστοιχεία τοποθετημένα σε διάφορα σημεία και στις δύο πλευρές του PCM.

Τα αποτελέσματα στο Σχήμα που ακολουθεί δείχνουν ότι η χρονική περίοδος για το σύστημα να φτάσει σε θερμοκρασία περίπου 40 ° C με την προσθήκη του PCM είναι σχεδόν διπλάσιο από το σύστημα χωρίς PCM. Αυτή η καθυστέρηση, της τάξεως των 400 δευτερολέπτων ή 7 λεπτών, μπορεί να είναι χρήσιμη σε συστήματα με μεταβατικά φορτία που συμβαίνουν εντός αυτής της χρονικής περιόδου.



Εικόνα 3.6: Διάγραμμα απόδοσης θερμοκρασίας σε ηλεκτρονική εφαρμογή με τη χρήση υλικών αλλαγής φάσης.

Τα περισσότερα PCM που έχουν μεταβατικές θερμοκρασίες και ιδιότητες κατάλληλες για χρήση στη θερμική διαχείριση ηλεκτρονικών έχουν πολύ κακές θερμικές αγωγιμότητες. Αυτό ισχύει για όλα τα PCM με βάση την παραφίνη, για τα οποία η θερμική αγωγιμότητα κυμαίνεται κανονικά από 0,1-0,3 W / m-K. Λόγω της χαμηλής αγωγιμότητάς τους, η θερμότητα εξαπλώνεται αργά μέσω του υλικού και η απορρόφηση της ενέργειας μέσω της αλλαγής φάσης συμβαίνει σταδιακά [11].



### 3.3 Εφαρμογές σε συσκευασίες προϊόντων

Τα φαρμακευτικά προϊόντα, οι πρωτεΐνες, τα βιολογικά δείγματα και άλλα ευαίσθητα στη θερμοκρασία προϊόντα, συμπεριλαμβανομένων των ειδών διατροφής, αποστέλλονται τακτικά σε δοχεία όλο το χρόνο και υπόκεινται σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Αν και αποστέλλονται σε μονωμένα δοχεία ή / και περιβάλλοντα ελεγχόμενα από κλιματισμό, η σταθερότητα της θερμοκρασίας των δοχείων μεταφοράς μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά εφαρμόζοντας κατάλληλα υλικά αλλαγής φάσης.

Πλεονεκτήματα της χρήσης υλικών αλλαγής φάσης (PCM) για ελεγχόμενη θερμοκρασία από τη συσκευασία:

- μπορεί εύκολα να αντικαταστήσει πακέτα ξηρού πάγου ή γέλης,
- μείωση του μεγέθους των δοχείων μεταφοράς,
- αύξηση της διάρκειας ελέγχου θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της αποστολής,
- μείωση του κόστους μεταφοράς,
- είναι επαναχρησιμοποιήσιμα,
- εξασφαλίζουν προβλέψιμο και σταθερό έλεγχο της θερμοκρασίας,
- διατίθενται για ευρύ φάσμα θερμοκρασιών

Για να αυξηθεί η διάρκεια του θερμικού ελέγχου εντός ενός δεδομένου εύρους θερμοκρασίας, τα PCM επιλέγονται κανονικά έτσι ώστε η θερμοκρασία αλλαγής φάσης τους να βρίσκεται εντός της επιθυμητής περιοχής θερμοκρασίας του προϊόντος που αποστέλλεται (π.χ. + 5°C PCM χρησιμοποιείται για να καλύψει + 2 °C έως + 8 °C απαιτούμενη θερμοκρασία). Καθώς το PCM αλλάζει τη φάση του (για παράδειγμα, από στερεό σε υγρό, στους 5 °C) επεκτείνει αποτελεσματικά τη διάρκεια του ελέγχου θερμοκρασίας ψύχοντας το προϊόν μέσω της λανθάνουσας θερμότητας.



Εικόνα 3.7: Συσκευασία από υλικό αλλαγής φάσης

Αν και το υγρό νερό θα αντισταθεί στην αλλαγή θερμοκρασίας, δεν θα υποστεί αλλαγή φάσης έως 0 °C. Ως εκ τούτου, για έναν φορτωτή 2 °C έως 8 °C, η χρήση υγρού νερού (μόνο) για την προστασία του προϊόντος από το να θερμανθεί ή πολύ κρύο είναι πολύ λιγότερο αποτελεσματική από τη χρήση ενός PCM.

Τα PCMs είναι ειδικά αντικείμενα και λύσεις, όχι εμπορικά υλικά και ως εκ τούτου είναι πολύ πιο δαπανηρά από ό, τι τα αντίστοιχα με βάση το νερό. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις το πρόσθετο κόστος του PCM αντισταθμίζεται περισσότερο από τη μείωση των εμπορευματικών μεταφορών, με αποτέλεσμα το χαμηλότερο συνολικό κόστος του συστήματος (συσκευασία συν φορτίο).

Τα PCM που χρησιμοποιούνται συνήθως στη θερμική συσκευασία, συνήθως ομαδοποιούνται με τη χημική τους σύνθεση ("οργανική" ή "άνοργανη"), με τα πιο συνηθισμένα να είναι οργανικά. Τα οργανικά PCM, τα οποία βασίζονται στο πετρέλαιο, έχουν την ομάδα (CH<sub>2</sub>) που παρέχει την υψηλή λανθάνουσα θερμότητα. Ορισμένοι τύποι οργανικών PCM χρησιμοποιούνται σήμερα από παρόχους συσκευασίας, όπως: n-αλκάνια, μεθυλεστέρες λιπαρών οξέων ("μεθυλεστέρες"), λιπαρά οξέα και λιπαρές αλκοόλες.



Τα ανόργανα PCMs είναι υδατικά (με βάση το νερό) άλατα υδρίτες (π.χ.  $\text{Salt} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ). Υπάρχουν ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά για ένα PCM που πρέπει να ληφθούν υπόψη βέβαια προκειμένου να εφαρμοστούν σε πακέτα μεταφορών.



Εικόνα 3.8: Συσκευασία από υλικό αλλαγής φάσης με χρήση παραφίνης

Συνολικά, τα χαρακτηριστικά ενός "τέλειου" PCM είναι:

- Θερμοκρασία αλλαγής φάσης στην επιθυμητή περιοχή με μεγάλο σημείο τήξης / ψύξης,
- Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης (στερεό προς υγρό),
- Μη τοξικό (στους ανθρώπους / ζώα) και μη καρκινογόνο,
- Διαθέσιμα στο εμπόριο με χαμηλό κόστος,
- Να μην αντιδρά με ή / και δρα ως διαλύτης για υλικά συσκευασίας,
- Κατάλληλο για χώρους υγειονομικής ταφής,
- Βιοδιασπώμενο,
- Χαμηλό / μη εύφλεκτο (υψηλό σημείο ανάφλεξης, χαμηλή πίεση ατμών),
- Μη διαβρωτικό,
- Καλή σταθερότητα κατά την θερμική μεταφορά (χωρίς υπερθέρμανση),
- Περιορισμένη ογκομετρική επέκταση / συστολή κατά την κατάψυξη / απόψυξη.

Ενώ μπορεί να υπάρξει ένα σημαντικό πλεονέκτημα για τη χρήση PCM σε ορισμένες εφαρμογές θερμικής συσκευασίας (όπως περιγράφεται παραπάνω), υπάρχουν επίσης ορισμένες προκλήσεις όσον αφορά την κατασκευή και τη χρήση τους που πρέπει να κατανοηθούν και που απευθύνεται τόσο στον κατασκευαστή του PCM όσο και στον τελικό χρήστη. Οι βασικές προκλήσεις περιλαμβάνουν:

- Συμβατότητα υλικών,
- Ιδιότητες υλικών και θερμική απόδοση,
- Συσκευασία προς χρήση,
- Κλιματισμός για χρήση,
- Κόστος και Διαθεσιμότητα,
- Υγεία & Ασφάλεια και Απόρριψη.

Οι συσκευασίες υλικών αλλαγής φάσης, χωρίζονται στις κύριες κατηγορίες που ακολουθούν.



### 1. Πακέτα γέλης με βάση το νερό.

Ενώ αυτές οι λύσεις είναι από τις πιο φθηνές διαθέσιμες, ο πάγος μπορεί να λιώσει γρήγορα, και τα πακέτα γέλης μπορούν μερικές φορές να παρέχουν ασυνεπές έλεγχο της θερμοκρασίας. Επίσης, οι συσκευασίες πηκτωμάτων μπορεί να χρειαστούν να ρυθμιστούν ώρες πριν από τη χρήση για να αποφευχθούν τα θερμικά σοκ στο ωφέλιμο φορτίο. Εν τούτοις, είναι μη τοξικά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλές φορές σε πακέτα ζελατίνας.



Εικόνα 3.9: Σύστημα υλικού αλλαγής φάσης για συσκευασίες με χρήση γέλης

### 2. Ξηρός πάγος (κατεψυγμένο CO<sub>2</sub>)

Χαμηλό και εύκολα διαθέσιμο (αλλά όχι επαναχρησιμοποιήσιμο), ο ξηρός πάγος λειτουργεί καλά με βαθιά κατεψυγμένα ωφέλιμα φορτία που ταξιδεύουν σε μικρές αποστάσεις. Η χρήση ξηρού πάγου ως PCM απαιτεί προσεκτική συσκευασία για να διασφαλιστεί ότι τα ωφέλιμα φορτία παραμένουν ασφαλή, ακόμη και όταν ο ξηρός πάγος εξισορροπεί με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

### 3. PCM με βάση το φυτικό έλαιο

Αυτά τα σχετικά PCM μπορούν να επιτύχουν σχεδόν οποιοδήποτε εύρος θερμοκρασιών και να διατηρηθούν για παρατεταμένες χρονικές περιόδους (τα επί του παρόντος διαθέσιμα PCM με βάση φυτικά έλαια υπερβαίνουν τις 120 ώρες διατήρησης). Είναι επίσης βιοδιασπώμενα, μη τοξικά και δεν έχουν θερμική υποβάθμιση μετά από 20.000 χρήσεις.



Εικόνα 3.10: Σύστημα υλικού αλλαγής φάσης για συσκευασίες με χρήση φυτικών ελαίων

#### 4. PCM με βάση πετρέλαιο

Απευθείας από το αργό πετρέλαιο, η τιμή των PCM με βάση το πετρέλαιο κυμαίνεται τόσο συχνά όσο η τιμή της βενζίνης. Ανάλογα με το παράγωγο πετρελαίου που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του PCM, τα περισσότερα είναι τοξικά. Επειδή είναι συνήθως πτητικά, η απόρριψή τους μπορεί να είναι δύσκολη.

#### 5. Βαρύ νερό (οξείδιο του δευτερίου)

Ιδανικό για ψυγεία (2-8 ° C) ωφέλιμα φορτία επειδή πάγωσε στους 3.82 ° C, το βαρύ νερό είναι αποτελεσματικό PCM, αλλά πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή. μπορεί να είναι δύσκολο να επιτευχθεί και να είναι δαπανηρή.

#### 6. Ευτηκτικά άλατα

Ένας γενικός όρος για πολλά υλικά που περιέχουν ένα άλας σε διάλυμα σε συγκέντρωση που αποδίδει το χαμηλότερο σημείο πήξης, τα ευτηκτικά άλατα μπορεί να διαφέρουν ως προς την ασφάλεια, την τιμή και την αποτελεσματικότητα, με βάση τη σύνθεσή τους. Μπορεί επίσης να υπάρχουν ζητήματα τελικής διάθεσης ή τελωνειακών θεμάτων, βάσει του χρησιμοποιούμενου υλικού.



Εικόνα 3.11: Σύστημα υλικού αλλαγής φάσης για συσκευασίες με χρήση Ευτηκτικών αλάτων

### 3.4 Εφαρμογές σε αυτοκίνητα

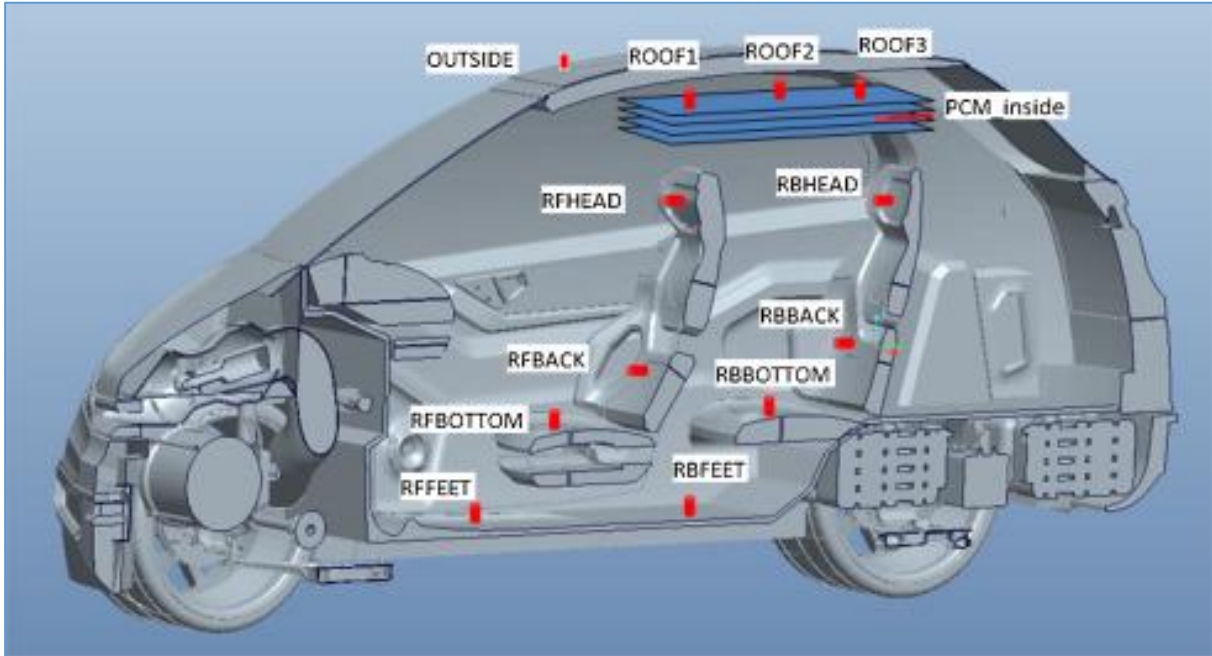
Όταν το καλοκαίρι τα οχήματα, ιδίως τα αυτοκίνητα, είναι σταθμευμένα σε εξωτερικούς χώρους, η εσωτερική τους θερμοκρασία αυξάνεται δραματικά ακόμα και αν η ημέρα είναι συννεφιασμένη. Ως εκ τούτου, η θερμική δυσφορία είναι προφανής για τους επιβάτες όταν μπαίνουν στο όχημα μετά από ένα χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων.

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετάται πειραματικά η βελτίωση των συνθηκών θερμοκρασίας εσωτερικού οχήματος που σταθμεύουν κάτω από τον ήλιο όταν τοποθετείται ένα σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES) μέσα στο αυτοκίνητο. Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να αποδειχθεί το πλεονέκτημα της χρήσης υλικών αλλαγής φάσης (PCM) από την άποψη της εσωτερικής άνεσης για επιβάτες αυτοκινήτων. Η χρήση του PCM έχει ως αποτέλεσμα τη χαμηλότερη θερμοκρασία επιφάνειας του τιμονιού και αύξηση της θερμικής άνεσης των επιβατών.

Το όφελος από την εφαρμογή των PCM μέσα σε αυτοκίνητα αποδείχθηκε, καθώς μετά την εφαρμογή τους, το όχημα διατηρούσε χαμηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες από ότι το ίδιο όχημα χωρίς υλικά αλλαγής φάσης.

Η θερμική άνεση είναι η κατάσταση του πνεύματος που εκφράζει την ικανοποίησή της για το περιβάλλον των επιβαινόντων στο εκάστοτε όχημα ή χώρο που γίνεται όλο ένα και πιο σημαντικό ζήτημα από τη στιγμή που οι άνθρωποι περνούν μεγάλο χρονικό ποσοστό τόσο σε ιδιωτικές όσο και σε δημόσιες συγκοινωνίες έχουν αυξηθεί σημαντικά. Επομένως, το ενδιαφέρον για τη διερεύνηση και την ανάλυση των απαιτήσεων του συστήματος και του σχεδιασμού για καλό περιβάλλον εσωτερικών

χώρων και οχημάτων έχει αυξηθεί. Με αυτή την έννοια, η αξιολόγηση της θερμικής άνεσης έχει διερευνηθεί πολύ τα τελευταία χρόνια.

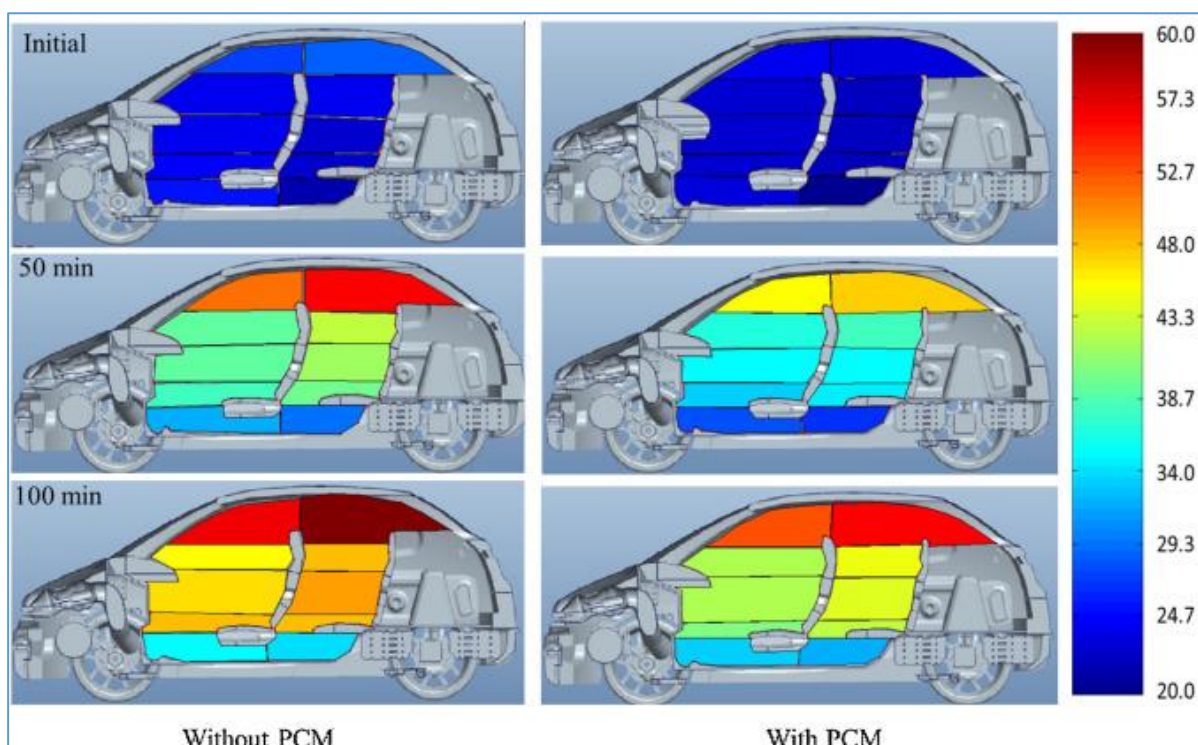


Εικόνα 3.12: Εφαρμογή υλικών αλλαγής φάσης σε πειραματικό στάδιο σε αυτοκίνητο

Οι θερμικές καταστάσεις του οχήματος είναι εξαιρετικά ευαίσθητες στις κλιματολογικές συνθήκες και το εσωτερικό των οχημάτων είναι ένα διαμέρισμα στο οποίο είναι συχνά εμφανής η θερμική δυσφορία. Κατά τη χειμερινή περίοδο, απαιτούνται τουλάχιστον περίπου πέντε λεπτά για να επιτευχθεί μια αποδεκτή θερμοκρασία στο αυτοκίνητο εάν έχει σταθμεύσει σε εξωτερικούς χώρους. Ομοίως, κατά τη θερινή περίοδο, είναι δύσκολο να εγκατασταθεί αυτή η θερμική ισορροπία σε αυτοκίνητο εάν έχει εκτεθεί κάποια στιγμή στην ηλιακή ακτινοβολία.

Μόλις οι επιβάτες εισέλθουν στο όχημα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, μπορούν να αισθανθούν θερμική δυσφορία λόγω των υψηλών θερμοκρασιών στο εσωτερικό τους. Οι φυσικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ανθρώπινη θερμική άνεση εξαρτώνται από τέσσερις φυσικές περιβαλλοντικές μεταβλητές: τη θερμοκρασία του αέρα, τη σχετική υγρασία, τη μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας και τη σχετική ταχύτητα αέρα.

Και για τη θερμική άνεση στα οχήματα, η θερμοκρασία του αέρα είναι η σημαντικότερη περιβαλλοντική μεταβλητή. Ένα άλλο πρόβλημα με την υπερβολική θερμότητα μέσα στα οχήματα είναι τα θερμικά εγκεφαλικά επεισόδια. Αυτό συμβαίνει κυρίως στα μικρά παιδιά και τα κατοικίδια ζώα και οδηγεί σε σοβαρές βλάβες ή ακόμα και θάνατο.



Εικόνα 3.13: Θερμική απόκριση αυτοκινήτου με εφαρμογή υλικών αλλαγής φάσης και χωρίς

Η χρήση της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES) με την προσθήκη υλικών αλλαγής φάσης (PCM) αποτελεί μια πιθανή λύση για τη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα μέσα στα οχήματα, λόγω της ικανότητάς της να διατηρεί υλικά μέσα σε ένα στενό εύρος θερμοκρασιών, απορροφώντας θετικά. Διάφορα πειράματα σε πραγματικές συνθήκες και οχήματα διεξάχθηκαν ώστε να αποδειχθεί η ουσία και η βιωσιμότητα της χρήσης υλικών αλλαγής φάσης.

Στη πειραματική αυτή εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε ένα εμπορικό PCM (RT-27) από την Rubitherm. Το PCM χρησιμοποιήθηκε στην καμπίνα του οχήματος, τοποθετήθηκε κάτω από την οροφή του αυτοκινήτου και στο τιμόνι. Το PCM τοποθετήθηκε κάτω από την οροφή για να αποκτήσει μεγάλη επιφάνεια ανταλλαγής μεταξύ του εσωτερικού αέρα και του PCM και συνεπώς να έχει καλή θερμική ανταλλαγή θερμότητας.

Επιπλέον, είναι πιο πρακτικό, καθώς η οροφή είναι η μεγαλύτερη διαθέσιμη επιφάνεια στα οχήματα. Προκειμένου να κρατηθούν οι πλάκες PCM κάτω από την οροφή του αυτοκινήτου, χτίστηκε μια δομή αλουμινίου που επιτρέπει την εύκολη αλλαγή των πλακών PCM. Το συνολικό PCM που χρησιμοποιήθηκε στην καμπίνα του οχήματος ήταν 4 kg (4,55 λίτρα), καταλαμβάνοντας το 0,22% του εσωτερικού όγκου τους. Το PCM ήταν διαθέσιμο ως υλικό χύδην και επομένως έπρεπε να γίνει κάψουλα χρησιμοποιώντας πλάκες αλουμινίου για την καμπίνα. Από την άλλη πλευρά, το PCM που χρησιμοποιήθηκε στο τιμόνι εγκλωβίστηκε με μια πλαστική σακούλα για να του δώσει το σωστό και πρακτικό σχήμα.

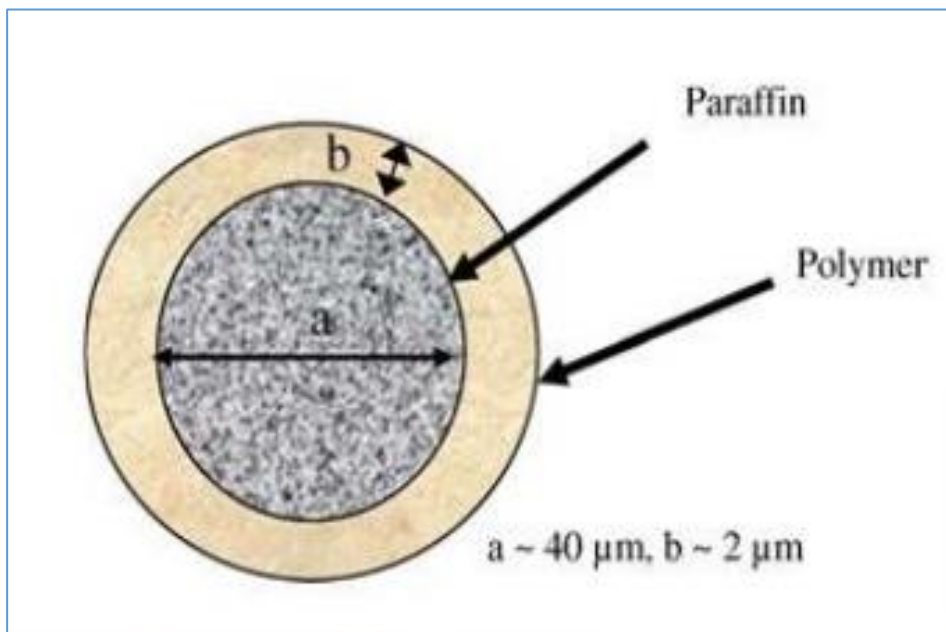
Όταν το PCM προστέθηκε στο αυτοκίνητο, αντιπροσωπεύοντας μόνο το 0,22% του εσωτερικού όγκου, τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντική μείωση της θερμοκρασίας του αέρα μετά από ένα χώρο στάθμευσης 2 ωρών. Ως εκ τούτου, το όφελος από τη χρήση PCM αποδείχθηκε σαφώς. Επιπλέον, η θερμοκρασία επιφάνειας του τιμονιού μπορεί επίσης να μειωθεί σημαντικά (από 5 σε 10 ° C) τοποθετώντας το PCM σε αυτό. Η βέλτιστη ποσότητα PCM σε συνάρτηση με την κλιματική κατάσταση

από την άποψη της θέσης και της περιόδου του έτους και του χρόνου στάθμευσης πρέπει να χαρακτηριστεί χρησιμοποιώντας ένα μαθηματικό μοντέλο [12].

### 3.5 Εφαρμογές σε ρούχα

Μερικοί τύποι υλικών αλλαγής φάσης (PCM) αλλάζουν φάσεις σε ένα εύρος θερμοκρασιών ακριβώς πάνω και κάτω από τη θερμοκρασία του ανθρώπινου δέρματος. Αυτή η ιδιότητα χρησιμοποιείται τώρα σε ύφασμα και αφρό για να αποθηκεύει τη θερμότητα του σώματος και στη συνέχεια να την απελευθερώνει όταν χρειάζεται. Τα PCM με τη μορφή μικρο κάψουλων μπορούν να ενσωματωθούν μέσα σε ίνες ή αφρούς, ή μπορούν να επικαλυφθούν σε υφάσματα.

Η στάθμη των γνώσεων όσο αφορά τα υλικά αλλαγής φάσης σε ρούχα, περιλαμβάνει ειδικά τροποποιημένα υλικά αλλαγής φάσης, εγκλεισμένα μέσα σε ίνες. Οι ίνες μπορεί να είναι πολυεστερικές, νάιλον, ακρυλικά ή και απλό ύφασμα.



Εικόνα 3.14: Υλικό αλλαγής φάσης εντός κάψουλας – θεωρητική προσέγγιση

Για τη παραγωγή τέτοιων όμως ινών, πρέπει να πληρούνται ορισμένα κριτήρια όπως,

- Το μέγεθος των σωματιδίων του υλικού αλλαγής φάσης,
- Η ομοιομορφία του μεγέθους των σωματιδίων,
- Η σταθερότητα στη μηχανική δράση και τις χημικές ουσίες και
- Η αναλογία πυρήνα – κελύφους, με περιεχόμενο PCM όσο το δυνατόν υψηλότερο.

Η θερμική αποθήκευση ή απελευθέρωση από μικροκάψουλες που περιέχουν PCM παρέχει επίδραση ψύξης και θέρμανσης στο επεξεργασμένο ύφασμα και κατά συνέπεια βελτιώνει τη θερμική άνεση του χρήστη. Τα μικροενκαψυλιωμένα υλικά αλλαγής φάσης απορροφούν την περίσσεια θερμότητα και απελευθερώνουν την απορροφημένη θερμότητα καθώς συμβαίνει η αλλαγή φάσης και λαμβάνει χώρα μια προσωρινή επίδραση ψύξης και θέρμανσης στα στρώματα ένδυσης.

Δηλαδή, τα ρούχα που έχουν υποστεί επεξεργασία με PCM αναμένονται να συμβάλλουν στη διατήρηση της θερμικής ισορροπίας από την υπερθέρμανση ή τη θερμότητα ψύχους γρήγορα.



Συνολικά, υπάρχουν τρεις κύριες μέθοδοι εφαρμογής των υλικών αλλαγής φάσης στα ρούχα. Η μέθοδος της ίνας, η μέθοδος της επικάλυψης και η μέθοδος της επίστρωσης σε λεπτά φιλμ. Η κάθε μια μέθοδος διαφέρει σημαντικά από την άλλη και σε θέμα εφαρμογής αλλά και σε θέμα κόστους.



Εικόνα 3.15: Ρούχο φτιαγμένο με υποδοχές για υλικά αλλαγής φάσης

Σε γενικές γραμμές αυτή η εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης είναι ακόμα υπό έρευνα. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχουν διάφορα προβλήματα προς αντιμετώπιση όπως η ελαχιστοποίηση του μεγέθους των μικρο καψουλών, οι μηχανικές ιδιότητες των καψουλών (να είναι εύκαμπτα και την ίδια στιγμή αρκετά γερές ώστε να αντέχουν την παραμόρφωση από τον χρήστη) και φυσικά το κύριο πρόβλημα της γερής και σταθερής ενσωμάτωσης, στερέωσης των υλικών αυτών στο ύφασμα.

### 3.6 Εφαρμογές σε φωτοβολταϊκά

Λόγω του γεγονότος ότι η αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών πλαισίων μειώνεται κατά περίπου 0,5% / Κ, στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται και αναλύονται οι δυνατότητες σταθεροποίησης της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πάνελ. Σκοπός αυτής της έρευνας είναι να προσδιοριστεί η θερμοκρασία μετάπτωσης της στρώσης PCM που επιτρέπει την αποφυγή γρήγορων διακυμάνσεων της θερμοκρασίας στην οπίσθια επιφάνεια της ΦΒ.





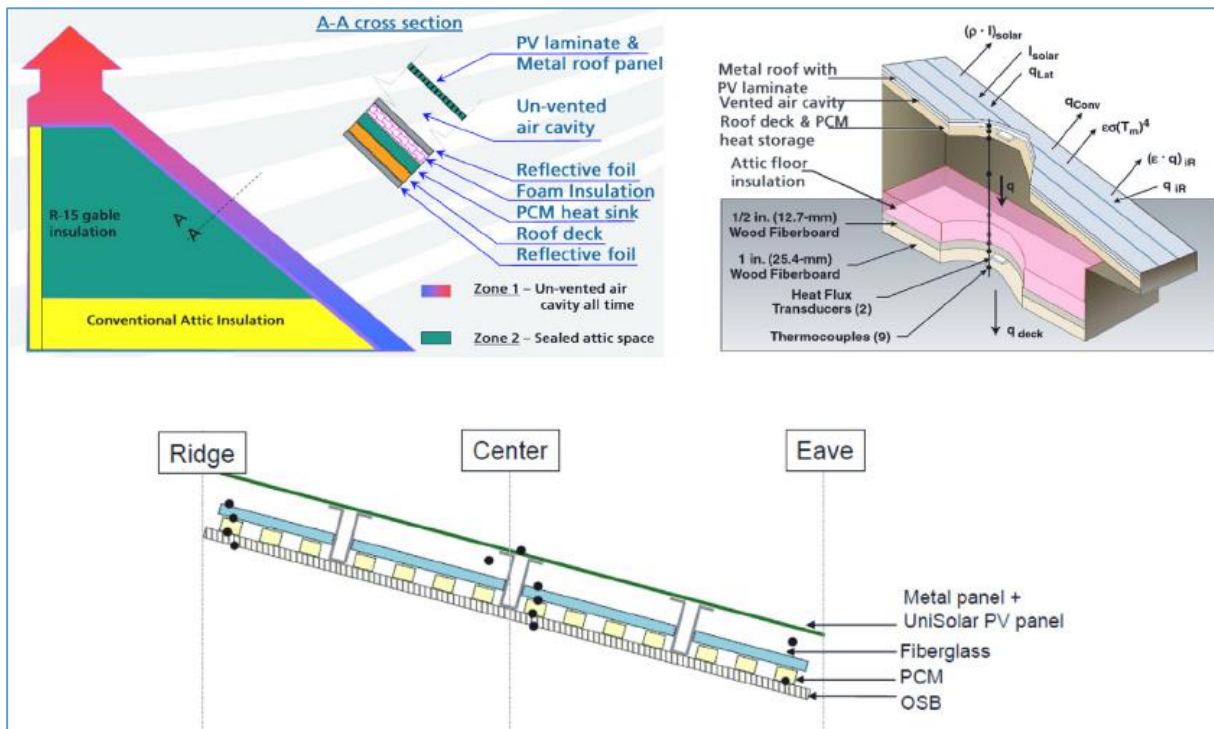
Εικόνα 3.16: Υλικά αλλαγής φάσης τοποθετημένα στο πίσω πλαίσιο φωτοβολταϊκού

Έχει παρατηρηθεί, ότι λόγω των υψηλών θερμοκρασιών σε κτήρια, όπου γίνεται χρήση φωτοβολταϊκών, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται με αρκετές απώλειες. Κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει σχεδιαστεί για να εργάζεται υπό συγκεκριμένες συνθήκες.

Μια χαρακτηριστική τιμή θερμοκρασίας είναι οι 25ο C. Όταν η πραγματική θερμοκρασία ξεπεράσει αυτή την τιμή, η απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μειώνεται κατά 0.5%K-1. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα κρίθηκε απαραίτητη η εισαγωγή PCM.

Ο ενεργειακά αποδοτικός σχεδιασμός και η αειφόρος χρήση των πόρων αποτελούν τρέχουσες και μελλοντικές απαιτήσεις για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών. Στον κτιριακό τομέα, η πιο αποτελεσματική και ευκολότερη εφαρμογή είναι η φωτοβολταϊκή τεχνολογία που μπορεί να υλοποιηθεί ως Οικοδομημένο Φωτοβολταϊκό (BAPV) ή Οικοδομικό Ενσωματωμένο Φωτοβολταϊκό (BIPV).

Η πρώτη κατηγορία είναι κατάλληλη για ήδη υπάρχοντα κτίρια όπου είναι εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά πάνελ στα κατασκευαστικά στοιχεία, όπως στέγες ή προσόψεις. Η δεύτερη τεχνολογία (BIPV) είναι πιο αποδοτική από πλευράς κόστους, δεδομένου ότι τα παραδοσιακά υλικά επικάλυψης και φινιρίσματος μπορούν να αντικατασταθούν από φωτοβολταϊκά πάνελ.



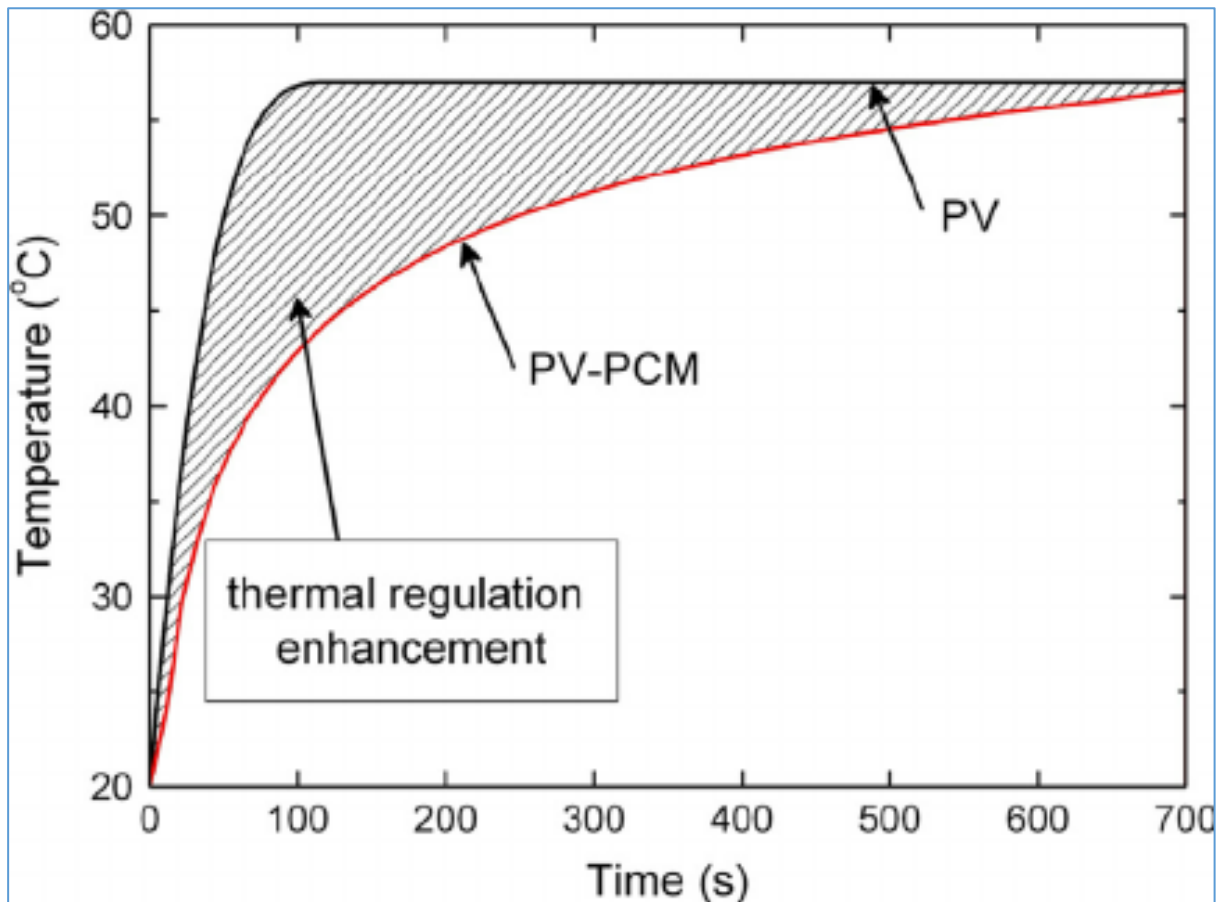
Εικόνα 3.17: Διάγραμμα φωτοβολταϊκών με χρήση PCM στο σκελετό τους

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, μπορούν να διακριθούν έξι βασικές τεχνικές διαχείρισης της θερμικής φωτοβολταϊκής ενέργειας: φυσική ή αναγκαστική κυκλοφορία αέρα, υδραυλική ή θερμοηλεκτρική ψύξη, σωλήνες θερμότητας και εφαρμογή υλικού αλλαγής φάσης (PCM). Η πιο συνηθισμένη τεχνολογία που δεν απαιτεί αρχικό κόστος και συντήρηση είναι η φυσική κυκλοφορία αέρα.

Παρόλα αυτά, ο χαμηλός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας επιφάνειας καθώς και η θερμική χωρητικότητα του αέρα καθιστούν αυτή την τεχνική μειονεκτική στην περίπτωση του BIPV όπου ο χώρος πίσω από τα πάνελ και οι ρυθμοί ροής μάζας αέρα είναι πολύ περιορισμένοι.

Από την άλλη πλευρά, οι ενεργές τεχνικές όπως η αναγκαστική κυκλοφορία του αέρα μπορούν να συμβάλουν στην αποτελεσματικότερη ψύξη, αλλά καταναλώνουν πρόσθετη ενέργεια, χρειάζονται συντήρηση και σε ορισμένες περιπτώσεις θεωρούνται θορυβώδη συστήματα. Η τελευταία τεχνική θερμικής διαχείρισης που χρησιμοποιεί το PCM είναι πολύ ελπιδοφόρα αλλά απαιτεί καλό σχεδιασμό από πολλές απόψεις.

Η θερμική διαχείριση των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματικότητά τους αλλά συμβάλλει επίσης στην αποτροπή της υποβάθμισης των φωτοβολταϊκών κυττάρων. Η αποδοτικότητα που δηλώνεται από τους παραγωγούς μετράται στις Συνθήκες Συνθηκών Δοκιμής  $1 \text{ kw} / \text{m}^2$  και  $25^\circ \text{C}$ , ενώ η επίδραση των πραγματικών καιρικών συνθηκών μπορεί να μεταβάλλει σημαντικά την αποτελεσματική απόδοση.



Εικόνα 3.18: Διάγραμμα θερμοκρασιών φωτοβολταϊκών σταθμών με και χωρίς χρήση υλικών αλλαγής φάσης

Η εφαρμογή του PCM στην πίσω πλευρά του φωτοβολταϊκού πλαισίου βοηθά στη διατήρηση της θερμοκρασίας στο επίπεδο του σημείου τήξης του υλικού. Τα υλικά αλλαγής φάσης είναι σε θέση να αποθηκεύουν συγκεκριμένη ποσότητα θερμότητας κατά τη διάρκεια της αλλαγής της φάσης από στερεό σε υγρό και να απελευθερώνονται κατά την αντίστροφη μετάβαση των φάσεων.

Ο ισοθερμικός χαρακτήρας αυτής της διαδικασίας έχει ως αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας. Ωστόσο, η θερμοκρασία μετάβασης πρέπει να σχεδιάζεται με ταυτόχρονη εξέταση της ποσότητας του υλικού και της περιόδου ανάλυσης.

Η σωστή παραδοχή των ιδιοτήτων των υλικών είναι ένα πολύ περίπλοκο έργο, δεδομένου ότι ολόκληρο το σύστημα υποτίθεται ότι λειτουργεί υπό ανεξέλεγκτες καιρικές συνθήκες. Η θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών πλαισίων και επομένως τα PCM αλλάζουν ταχύτατα ως αποτέλεσμα της μεταβαλλόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, της εξωτερικής θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ανέμου, ωστόσο μπορεί να αποδειχθούν οι βέλτιστες λύσεις.

Η αποτελεσματικότητα του συστήματος PV-PCM εξαρτάται από τις θερμικές, φυσικές και κινητικές ιδιότητες του υλικού αλλαγής φάσης. Οι βασικές ιδιότητες που επηρεάζουν την ποσότητα απορροφούμενης θερμότητας είναι η λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης και θερμικής ικανότητας.



Εικόνα 3.19: Επιλογή υλικού αλλαγής φάσης και τοποθέτησή του στο πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού πάνελ

Οι υψηλές τιμές τους και η καλή θερμική αγωγιμότητα συμβάλλουν στην αποτελεσματική αφαίρεση της θερμότητας και στην απελευθέρωσή της. Η ποσότητα της θερμότητας που μπορεί να απορροφηθεί εξαρτάται επίσης από την πυκνότητα του υλικού και στη συνέχεια από το πάχος και το βάρος του εφαρμοζόμενου στρώματος.

Επιπλέον, το ειδικό υλικό πρέπει να χαρακτηρίζεται από καλό ρυθμό κρυστάλλωσης και αναστρέψιμη αλλαγή φάσης για να εξασφαλίζεται η ημερήσια απόκριση του υλικού. Επιπλέον, ως δομικό υλικό, πρέπει να συμμορφώνεται με τους κανονισμούς ασφαλείας σχετικά με την ευφλεκτότητα, την εκρηκτικότητα και την τοξικότητα.

Ένα άλλο ζήτημα που πρέπει να συζητηθεί στο στάδιο του σχεδιασμού του συστήματος PV-PCM είναι μια μορφή της εφαρμογής PCM. Η πρώτη απόπειρα ανάπτυξης ενός τέτοιου συστήματος έγινε από τον Hausler και την ομάδα του το 1998. Το υλικό αλλαγής φάσης τοποθετήθηκε σε γυάλινη δεξαμενή και συνδέθηκε με φωτοβολταϊκή μονάδα.

Παρόλα αυτά, μια τέτοια λύση δεν ήταν αποτελεσματική λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας ενός δοχείου και της μικρής περιοχής επαφής του με τον πίνακα. Με βάση τις πιο πρόσφατες αναφορές στη βιβλιογραφία, το PCM μπορεί να επηρεάσει αποτελεσματικά τη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου όταν τοποθετηθεί στο πλαστικό πλαίσιο, σε δοχείο από αλουμίνιο με διαφορετικά περύγια ή όταν ενσωματώνεται μέσα στο περίβλημα του κτιρίου ως PCM γυψοσανίδα.

Προκειμένου να ενισχυθεί η ανταλλαγή θερμότητας και η απομάκρυνση θερμότητας από το φωτοβολταϊκό πάνελ, η θερμική αγωγιμότητα του υλικού στο οποίο είναι κλειστό το PCM πρέπει να



μεγιστοποιηθεί. Επιπλέον, για να αποδειχθεί ομοιογενής αλλαγή των φάσεων σε ολόκληρη τη στρώση PCM, ο περιέκτης μπορεί να υποδιαιρεθεί με επιπρόσθετα πτερύγια αλουμινίου ή μπορεί να κατασκευαστεί υπό μορφή κυψελοειδούς αλουμινίου.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι πολύ ευαίσθητη στις καιρικές συνθήκες και είναι αδύνατο να επιλεγούν παράμετροι για τα υλικά αλλαγής φάσης PCM που θα σταθεροποιούν αποτελεσματικά τη θερμοκρασία καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Επομένως, η θερμοκρασία αλλαγής φάσης θα πρέπει να σχεδιάζεται για να μειώνει το φαινόμενο υπερθέρμανσης κατά τους πιο ακραίες καλοκαιρινούς μήνες [13].

## 4. Συμπεράσματα και μελλοντική εξέλιξη

Στη παρούσα εργασία αναφέρθηκαν και αναλύθηκαν τα υλικά αλλαγής φάσης και οι εφαρμογές τους. Από τα παραπάνω κεφάλαια και την ανάλυσή τους συμπεραίνεται πως τα υλικά αυτά μπορούν να βρουν εφαρμογή σε άπειρους τομείς και μπορούν να εξελιχθούν περαιτέρω.

Τα υλικά αυτά είναι διαθέσιμα σε πληθώρα μορφών για όλων των τύπων τις εφαρμογές από τα κτήρια που ήταν η αρχική τους εφαρμογή μέχρι και εφαρμογές σε έξυπνα ρούχα και αυτοκίνητα. Τα υλικά αλλαγής φάσης με τα χρόνια αποκτούν μειωμένο κόστος αγοράς και εφαρμογής εάν και απαιτούν σχετικά μεγάλη εξειδίκευση και έρευνα πρώτου εφαρμοστού.

Τα PCMs, μολοντί είναι γνωστά από αρκετά χρόνια, δεν είναι ευρέως διαδεδομένα σε εφαρμογές στα κτίρια. Κάποιες ελλείψεις στην τεχνολογία τους, το σχετικά υψηλό κόστος τους και η περιορισμένη πληροφόρηση για τις εφαρμογές τους δικαιολογούν εν μέρει αυτή τη διαπίστωση. Από την άλλη πλευρά, τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν εγγυώνται ότι στο μέλλον η χρήση τους θα διευρύνεται.

Είναι χαρακτηριστικό ότι την περίοδο αυτή "τρέχουν" αρκετά προγράμματα με περιεχόμενο τη μελέτη των εφαρμογών των PCMs. Μεταξύ αυτών, σημαντικό είναι το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα COST Action TU0802: Next generation cost effective phase change materials for increased energy efficiency in renewable energy systems in buildings (NeCoE-PCM), όπου, από ελληνικής πλευράς, συμμετέχει το Πολυτεχνείο Κρήτης.

Στόχος του συγκεκριμένου προγράμματος είναι να ενισχύσει τη διάδοση των συστημάτων ΑΠΕ και των εφαρμογών PCMs στην Ευρώπη μέσω του σχεδιασμού, μελέτης, προσομοίωσης και πιστοποίησης νέας γενιάς υλικών αλλαγής φάσης για χρήση σε αποθήκευση θερμότητας για θέρμανση - ψύξη και άλλες εφαρμογές ΑΠΕ στα κτίρια.

Τα PCMs είναι χρήσιμα σε εύκρατα κλίματα, όπου οι ημερήσιες διακυμάνσεις θερμοκρασίας συχνά υπερβαίνουν τα όρια θερμικής άνεσης. Η χρησιμότητά τους είναι πιο έντονη το καλοκαίρι, όταν οι υψηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας προκαλούν υπερθέρμανση των κτιρίων. Είναι συνεπώς υλικά που αξίζει να έχουμε υπόψη και να παρακολουθούμε την εξέλιξή τους. Είναι εξαιρετικά πιθανό ότι σύντομα στο μέλλον θα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον έλεγχο της ενεργειακής και περιβαλλοντικής συμπεριφοράς των κτιρίων μας.

Ως μελλοντική τους εξέλιξη, αναμένεται η δημιουργία και άλλων τύπων υλικών αλλαγής φάσης, που προσφέρουν άλλα, μεγαλύτερα θερμοκρασιακά εύρη και καλύτερες, πιο σταθερές ιδιότητες. Μελλοντικά επίσης αναμένεται να υπάρχουν έτοιμες βιβλιοθήκες μαθηματικών μοντέλων υπολογισμών και εφαρμογής αυτών των υλικών καθώς πριν από κάθε εφαρμογή τους, είναι απαραίτητη η σχεδιομελέτη και η έρευνα συμπεριφοράς των υλικών αυτών.

Κύρια προβλήματα όπως ο όγκος, τα δοχεία συγκράτησης, οι τεχνικές εφαρμογής, η ανάπτυξη των μαθηματικών μοντέλων ακόμα και το κόστος, είναι υπό διερεύνηση και εντός 5 ετών ενδέχεται να έχουν αν όχι εξαλειφθεί τελείως, να έχουν βελτιωθεί.



## Βιβλιογραφία

- [1] Ορισμός υλικών αλλαγής φάσης - [https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-change\\_material](https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-change_material)
- [2] Κοροζή Αντωνία, Διπλωματική εργασία – Βαθμός εκμετάλλευσης υλικών αλλαγής φάσης (PCM) σε κτιριακές εφαρμογές, 2013
- [3] J. Kosny, PCM-Enhanced Building Components, Engineering Materials and processes, Springer 2015
- [4] NihalSarier, Organic phase change materials and their textile applications: An overview, Thermochemica Acta, Vol. 540, Pages 7-60, 2012
- [5] D.Feldman, M.M.Shapiro, D.Banu, Organic phase change materials for thermal energy storage, Solar Energy Materials, Vol 13, Pages 1-10, 1986
- [6] Shamseldin A.Mohamed, Fahad A.Al-Sulaiman, Nasiru I.Ibrahim, A review on current status and challenges of inorganic phase change materials for thermal energy storage systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, Vol. 70 pages 1072-1089, 2017
- [7] Eutectic Thermal Energy Storage - <http://ezinearticles.com/?Phase-Change-Materials---Eutectic-Thermal-Energy-Storage-Products&id=1968752>
- [8] Nuno Vitorino, João C.C. Abrantes, Jorge R. Fradea - Quality criteria for phase change materials, Energy Conversion and Management, Elsevier Vol. 124, Pages 598-606, 2016
- [9] M.F. Ashby - Materials selection in mechanical design, Elsevier 2016
- [10] AtyahNajjar, Afif Hasan, Modeling of greenhouse with PCM energy storage, Elsevier 2008, Energy Conversion and Management
- [11] William Maltz, Darryl Moore, and Arun Raghupathy, Application of Phase Change Materials in Handheld Computing Devices
- [12] Eduard Oró, Erikde Jong, Luisa F.Cabeza, Experimental analysis of a car incorporating phase change material, Elsevier 2016, Journal of Energy Storage
- [13] Anna Machniewicz, Dominika Knera, Dariusz Heim, Effect of Transition Temperature on Efficiency of PV/PCM Panels, Elsevier 2015, Energy Procedia vol. 78, pages 1684-1689



ΤΕΙ Κρήτης

## Πληροφορίες εγγράφου

Αυτό το κείμενο αποτελείται από **73** σελίδες και περιέχει **15957** λέξεις.



