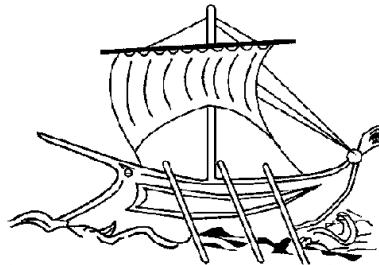


**ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ**



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ  
ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Κτιριακή ενεργειακή αποθήκευση με χρήση PCM**

**«Υλικά αλλαγής φάσης (PCM) και πως χρησιμοποιούνται στη θερμική ενεργειακή αποθήκευση στα κτίρια»**

ΑΝΑΣΤΑΣΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΦΡΑΓΚΟΣ ΠΟΛΥΔΩΡΟΣ

Επιβλέπων : ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΦΟΥΝΤΟΥΚΙΔΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2018

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στα υλικά αλλαγής φάσης (PCM) και επικεντρώνεται στο πως αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να εξασφαλιστεί η ενεργειακή αποθήκευση στα κτίρια.

Αποτελείται από 6 κεφάλαια, τα οποία προσπαθούν να αναλύσουν όσο γίνεται πιο απλά κάθε τυχόν απορία. Στα δύο πρώτα κεφάλαια αναλύεται ο ορισμός των υλικών αλλαγής φάσης, πως ορίζονται, ποιες είναι οι κατηγορίες τους και πως κατηγοριοποιούνται ανάλογα με αυτές.

Στη συνέχεια αναφερόμαστε στο φαινόμενο της ενθυλάκωσης και στις υποκατηγορίες του. Παράλληλα παραθέτουμε κάποιους τρόπους κατασκευής, όπως με το σκυρόδεμα.

Στο 4ο κεφάλαιο θα αναπτύξουμε τα κύρια προβλήματα των υλικών αλλαγής φάσης σε διάφορες εφαρμογές τους και πως μπορούν να περιοριστούν.

Ενώ στο 5ο κεφάλαιο γίνεται η εκτενής αναφορά μας στις εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης στα κτίρια, ξεκινώντας από προγενέστερα χρόνια μέχρι το σήμερα αξιοποιώντας κάθε είδους μέθοδο και πάντα με τη βοήθεια της ενέργειας.

Κλείνοντας αποτυπώνουμε τα συμπεράσματα μας μέσα από όλη αυτή την έρευνα που κάναμε και γίνεται μια καταγραφή δικών μας σχολίων.

ΑΘΗΝΑ 2018

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

1.1 Γενικά.....	1
-----------------	---

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Υλικά**

2.1 Γενικά.....	7
2.2 Ιδιότητες.....	7
2.3 Κατηγοριοποίηση των PCM.....	9
2.4 Οργανικά PCM.....	11
2.4.1 Παραφίνες.....	11
2.4.2 Μη παραφίνες.....	11
2.5 Ανόργανα υλικά φάσης.....	12
2.5.1 Ένυδρα άλατα.....	12
2.5.2 Μέταλλα.....	13
2.5.3 Ευτηκτικά.....	14

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Ενθυλάκωση**

3.1 Γενικά.....	16
3.2 Μικροενθυλάκωση.....	17
3.3 SSPCM (Shape Stabilized PCM).....	17
3.4 Μακροενθυλάκωση.....	18
3.5 Ενισχυμένο σκυρόδεμα με PCM.....	20

3.5.1 Μέθοδοι κατασκευής.....	20
3.5.2 Πειράματα και αποτελέσματα.....	21

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Βασικά προβλήματα των PCM**

4.1 Γενικά.....	23
4.2 Υπέρψυξη/ Υπόψυξη.....	23
4.3 Διαχωρισμός φάσεων.....	24
4.4 Διάβρωση.....	25
4.5 Μηχανική σταθερότητα και θερμική αγωγιμότητα.....	25
4.5.1 Μηχανική σταθερότητα.....	25
4.5.2 Θερμική αγωγιμότητα.....	26
4.6 Καθυστέρηση πυρκαγιάς των PCM .....	27

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Κτιριακές εφαρμογές με PCM**

5.1 Γενικά.....	28
5.2 Ιστορική Αναδρομή.....	28
5.3 Τρόποι χρήσης PCM.....	30
5.3.1 Ηλιακοί παθητικοί θερμικοί αποθηκευτικοί τοίχοι με χρήση PCM.....	31
5.3.2 Δομή ηλιακού θερμικού τοίχου.....	33
5.3.3 Πλεονεκτήματα.....	34
5.3.4 Πειράματα.....	34
5.4 Τοίχοι PCM με εμποτισμένο σκυρόδεμα και κεραμική τοιχοποιία.....	35

5.5 Ενεργειακά αποδοτικά παράθυρα.....	38
5.6 Βελτιωμένα με PCM δάπεδα και οροφές.....	40
5.6.1 Δάπεδα.....	40
5.6.1.1 Ενδοδαπέδιο ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης με PCM.....	41
5.6.2 Οροφές.....	44
5.7 Στέγες και σοφίτες.....	46
5.7.1 Πειράματα.....	47
5.7.2 Ενεργητικό σύστημα στέγης με PCM.....	48
5.8 Διπλό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με PCM.....	49
5.8.1 Σύστημα θέρμανσης με αέρα.....	51
5.9 Ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού με PCM.....	52
5.10 Οικοδομικά υλικά μόνωσης ενισχυμένα με PCM.....	56
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Συμπεράσματα.</b>	
6.1 Συμπεράσματα.....	58
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>60</b>



## **1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

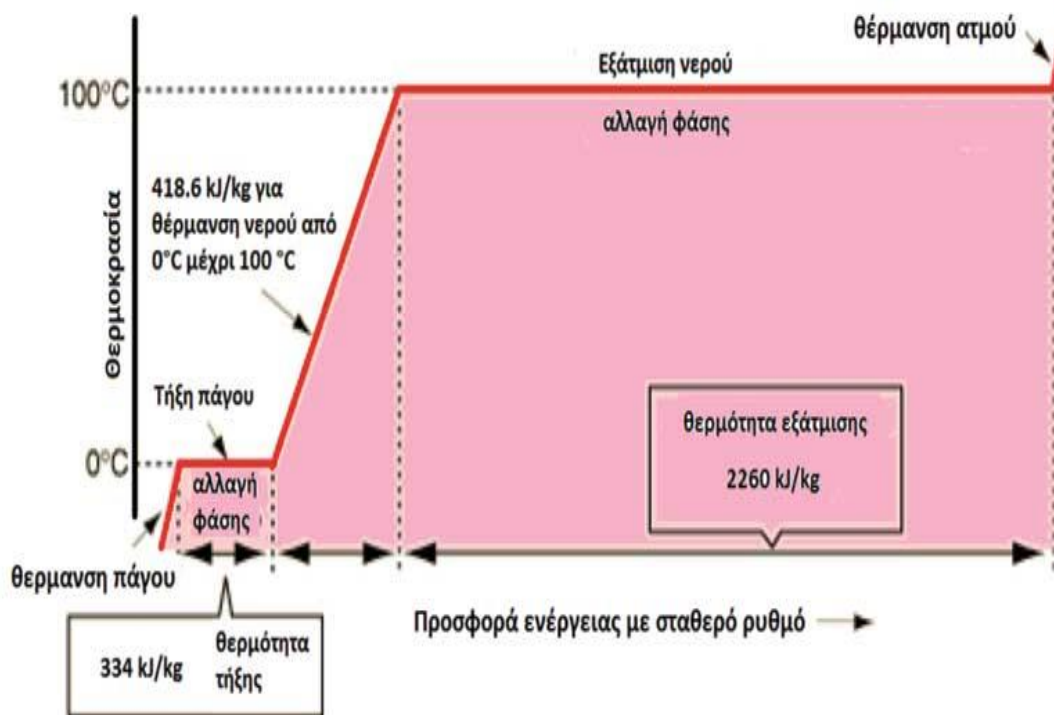
### **1.1.ΓΕΝΙΚΑ**

Τα υλικά αλλαγής φάσης (Phase Change Material ή PCM) είναι ουσίες ή μείγματα ιδιαίτερης φυσικής και χημικής σύστασης, που απορροφούν και απελευθερώνουν θερμική ενέργεια κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αλλαγής φάσης (δηλαδή, κατά τη μεταβολή από στερεό σε υγρό ή από υγρό σε αέριο και αντίστροφα). Όταν ένα υλικό αλλαγής φάσης ψύχεται, απελευθερώνει ένα μεγάλο ποσοστό ενέργειας στη μορφή λανθάνουσας θερμότητας, σε σχετικά σταθερή θερμοκρασία. Αντίθετα όταν ένα υλικό λιώνει, απορροφά ένα μεγάλο ποσοστό θερμότητας από το περιβάλλον. Τα PCM επαναφορτίζονται ενώ οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος κυμαίνονται, κάνοντας τα ιδανικά για μια ποικιλία καθημερινών εφαρμογών, οι οποίες απαιτούν έλεγχο της θερμοκρασίας.[11]

Το πιο σύνηθες PCM είναι το νερό/πάγος. Ο πάγος είναι ένα κατάλληλο PCM για τη διατήρηση της θερμοκρασίας στους 0 °C. Αλλά επειδή το σημείο πήξης του νερού καθορίζεται στους 0°C ( 32°F), το νερό είναι ακατάλληλο για τις περισσότερες θερμικές εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας.[12]

Για την αντιμετώπιση αυτού του περιορισμού τα PCM έχουν αναπτυχθεί για χρήση σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, από -40°C μέχρι περισσότερο από 150 °C. Συνήθως αποθηκεύουν 5 με 14 φορές περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα όγκου από τα υλικά όπως είναι το νερό. Μεταξύ των διαφόρων επιλογών αποθήκευσης θερμότητας, τα PCM είναι ιδιαίτερα ελκυστικά γιατί προσφέρουν υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας και αποθήκευσης θερμότητας ανάμεσα σε ένα μικρό εύρος θερμοκρασιών. [12]

Υπάρχουν 2 είδη θερμικής ενέργειας: η αισθητή και η λανθάνουσα. Τα πιο κοινά συστήματα αποθήκευσης, όπως ένας συμβατικός θερμοσίφωνας χρησιμοποιεί αισθητή θερμότητα, η ενέργεια που απαιτείται για να μεταβάλλει τη θερμοκρασία μιας ουσίας χωρίς καμία αλλαγή φάσης. Η λανθάνουσα θερμότητα είναι το ποσοστό της ενέργειας που απαιτείται για να αλλάξει την ύλη από μια κατάσταση σε μια άλλη, υγρό σε στερεό ή το αντίστροφο. [12]



**Σχήμα 1.1 :** Διάγραμμα μεταβολής φάσης του νερού. [1]

Για παράδειγμα ένα παγάκι χρησιμοποιώντας τη λανθάνουσα θερμότητα απορροφά μεγάλα ποσά θερμικής ενέργειας από ένα υγρό. Όταν όλος ο πάγος λιώσει, το παγάκι έχει ουσιαστικά απορροφήσει όλη τη λανθάνουσα ενέργεια και τότε το υγρό θερμαίνεται σε θερμοκρασία δωματίου. Αντιστρόφως όταν καυτό κερί στάξει στο δέρμα προκαλείται κάψιμο από το κερί που απελευθερώνει όλη την εσωτερική λανθάνουσα θερμική ενέργεια.[12]

Η παγκόσμια αγορά υλικών αλλαγής φάσης αντιμετωπίζει μεγάλη ανάπτυξη ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης ζήτησης για φιλικά προς το περιβάλλον υλικά και υλικά για εξοικονόμηση ενέργειας στις βιομηχανίες που αφορούν τον τομέα των κατασκευών κτιρίων, ψυγείων, υφασμάτων και ηλεκτρονικών. [12]

Τα PCMs ήδη απαντώνται σε πλήθος εφαρμογών. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται:

- Θερμική προστασία ηλεκτρικών μηχανών, ηλεκτρονικών διατάξεων, υπολογιστών. Ψυγεία και καταψύκτες που χρησιμοποιούν λιγότερη ενέργεια.



- Υφάσματα υψηλών επιδόσεων που παρέχουν ανακούφιση από καυτές και κρύες θερμοκρασίες
- Δοχεία μεταφοράς που διατηρούν την επιθυμητή θερμοκρασία για μακροχρόνιες περιόδους, όπως τρόφιμα, φάρμακα κλπ. Μεταφορά αίματος για μετάγγιση, οργάνων για μεταμόσχευση.
- Κατασκευαστικά υλικά, τα οποία κρατούν τους χώρους διαβίωσης άνετους και μειώνουν τα κόστη θέρμανσης και ψύξης.
- Θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας που μετατοπίζουν τα κόστη ψύξης και θέρμανσης ενός κτιρίου, εκτός ωρών αιχμής.[1],[12]

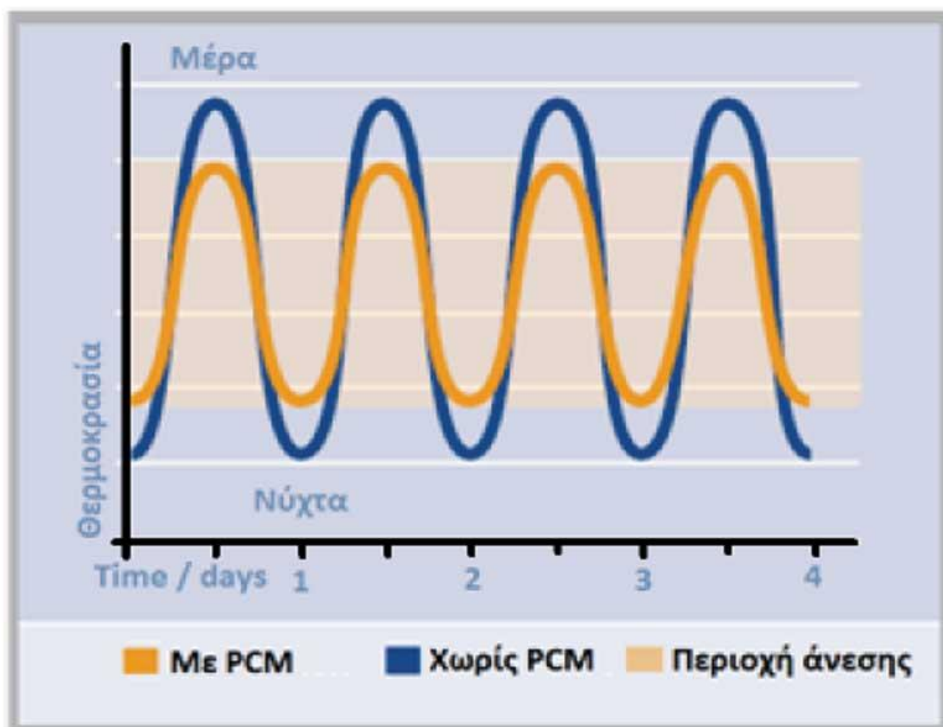


**Σχήμα 1.2:** Παράδειγμα λειτουργίας PCM.[1]

Η κύρια εφαρμογή με την οποία θα ασχοληθούμε είναι αυτή του κατασκευαστικού τομέα και γενικά η χρήση των υλικών αλλαγής φάσης στα κτίρια. Τα PCM μελετώνται πριν από τη δεκαετία του 1980 για την θερμική τους αποθήκευση.

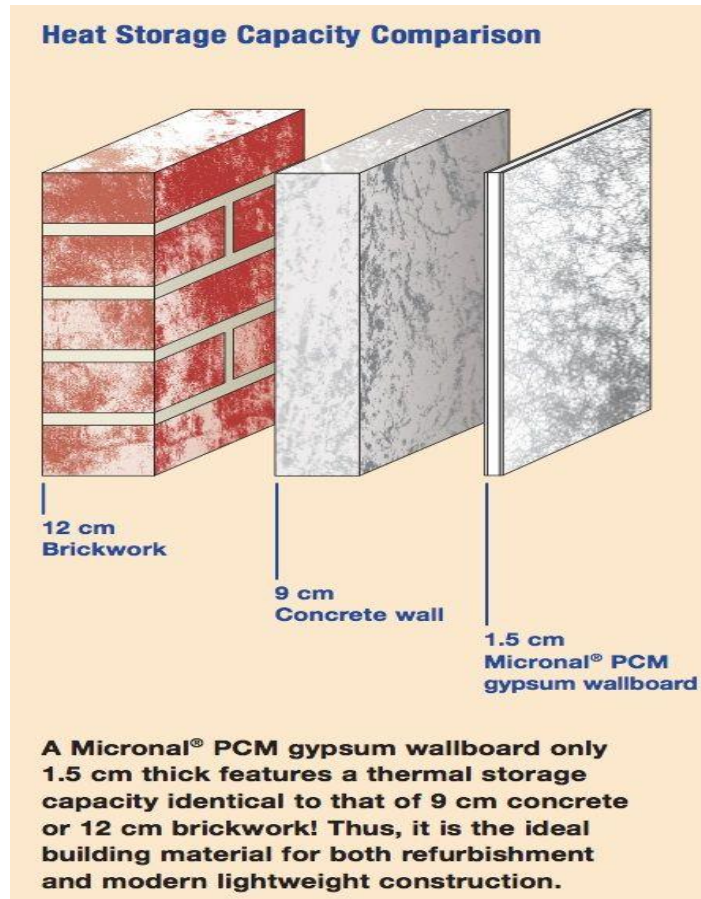
Η θερμική μάζα ή θερμοχωρητικότητα του κελύφους των κτιρίων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον έλεγχο της θερμοκρασίας στο εσωτερικό τους. Σε ένα κτίριο με κέλυφος από υλικά μικρής θερμοχωρητικότητας, οι ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας περιβάλλοντος γίνονται άμεσα αισθητές στο εσωτερικό του. Σε αντίθεση, σε ένα κτίριο με δομικά υλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας, ένα μέρος της θερμότητας κατά τη διάρκεια των υψηλών θερμοκρασιών της ημέρας αποθηκεύεται στο κέλυφος και αυξάνει τη θερμοκρασία τους. Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος πέσει (π.χ. κατά τη διάρκεια της νύχτας), η θερμότητα που έχει αποθηκευτεί στα δομικά υλικά αποδίδεται στο περιβάλλον. Ως αποτέλεσμα, η διακύμανση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου είναι πιο ομαλή σε σύγκριση με την αντίστοιχη στο περιβάλλον. [1]

Τα PCM συμβάλλουν στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων και αυτό εντοπίζεται σε δύο είδη εφαρμογών: α) Με την ενσωμάτωση των PCM στο κτιριακό κέλυφος με σκοπό την βελτίωση της θερμικής αδράνειας του κτιρίου και έλεγχο της θερμοκρασίας, δηλαδή σταθεροποίηση του κλίματος ενός εσωτερικού χώρου και β) η ενσωμάτωση στις συσκευές αποθήκευσης ενεργητικών συστημάτων, βελτιώνοντας την αποδοτικότητά τους. Το πρώτο είδος εφαρμογής γίνεται κατανοητό με το ακόλουθο παράδειγμα : Θεωρούμε ένα κτίριο στο κέλυφος του οποίου υπάρχουν ποσότητες PCM με θερμοκρασία αλλαγής φάσης έστω τους 25°C. Αν (και όταν) η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του κτιρίου υπερβεί τους 25°C, τα PCM θα αρχίσουν να τήκονται απορροφώντας παράλληλα θερμική ενέργεια από το περιβάλλον. Η απορροφούμενη στο στάδιο αυτό θερμότητα είναι λανθάνουσα, δηλαδή, δεν συνεπάγεται αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού. Όμως, αφαιρούμενη από το περιβάλλον, εμποδίζεται από το να προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας άλλων υλικών και του αέρα. Έχουμε με άλλα λόγια συγκράτηση της ανόδου της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Αν (και όταν) ολοκληρωθεί η διαδικασία αλλαγής φάσης (τήξη) του υλικού και η θερμοκρασία περιβάλλοντος εξακολουθεί να παραμένει μεγαλύτερη των 25°C, τότε το (τηγμένο πλέον) υλικό θα συνεχίσει να συμπεριφέρεται συμβατικά, δηλαδή, να απορροφά θερμότητα και να αυξάνει η θερμοκρασία του. Κατά την αντίστροφη διαδικασία, της ψύξης, όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους 25°C, τα PCMs αρχίζουν να στερεοποιούνται και παράλληλα να αποδίδουν την αποθηκευμένη λανθάνουσα θερμότητα στο περιβάλλον. Η απελευθερωμένη ποσότητα θερμικής ενέργειας συγκρατεί την πτώση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.[1]



**Σχήμα 1.3 :** Η επίδραση των PCM στην εσωτερική θερμοκρασία στα κτίρια. [1]

Μολονότι το αποτέλεσμα στο παράδειγμα είναι ποιοτικά παρόμοιο με αυτό που επιτυγχάνεται με συμβατικά υλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας (και στις δύο περιπτώσεις έχουμε εξομάλυνση των θερμοκρασιακών μεταβολών στο εσωτερικό του κτιρίου), η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η λανθάνουσα θερμότητα των PCMs είναι, γενικά, σημαντικά μεγαλύτερη από την ικανότητα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας των συμβατικών δομικών υλικών (π.χ. η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του πάγου ισοδυναμεί με τη θερμότητα που προκαλεί την άνοδο της θερμοκρασίας ίδιας ποσότητας νερού κατά  $80^{\circ}\text{C}$ ). Ως αποτέλεσμα, απαιτούνται μικρότερες ποσότητες PCMs για το ίδιο αποτέλεσμα στον έλεγχο της εσωτερικής θερμοκρασίας σε ένα κτίριο. Έτσι, ενδεικτικά, η απορροφούμενη θερμότητα από γυψοσανίδα πάχους 3 εκ. που περιέχει στη μάζα της PCM σε ποσοστό 30 %, ισοδυναμεί περίπου με τη θερμότητα που αποθηκεύει στα όρια των θερμοκρασιών άνεσης ένας τοίχος 18 εκ. από σκυρόδεμα ή 23 εκ. από τούβλα.[1]



**Σχήμα 1.4.** : Τοίχοι με διαφορετικό πάχος και ίδια θερμοχωρητικότητα. [14]

## 2. ΥΛΙΚΑ

### 2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Πολλές ουσίες έχουν μελετηθεί ως πιθανά PCM, όμως μόνο μερικές από αυτές είναι διαθέσιμες στο εμπόριο. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για PCM πρέπει να έχουν μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα και υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Επίσης θα πρέπει να έχουν θερμοκρασία τήξης, που να βρίσκεται σε πρακτικό εύρος λειτουργίας, να είναι χημικά σταθερά (μη τοξικά), να έχουν χαμηλό κόστος και να μην προκαλούν διάβρωση στις κατασκευές που χρησιμοποιούνται. Σύμφωνα με μελέτη που έγινε κατά τη διάρκεια των τελευταίων 40 ετών, τέτοια υλικά είναι : κεριά παραφίνης, ένυδρα άλατα, λιπαρά οξέα και παράγωγα οργανικών και μη οργανικών ενώσεων. Τα PCM που χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό του θερμικού συστήματος αποθήκευσης πρέπει να έχουν ορισμένες θερμοφυσικές, κινητικές, χημικές, τεχνικές και οικονομικές ιδιότητες.[8]

### 2.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

#### Θερμοφυσικές ιδιότητες

- Θερμοκρασία τήξης στην επιθυμητή θερμοκρασία λειτουργίας, για να διασφαλιστεί η αποθήκευση και η εξαγωγή της θερμότητας σε μια εφαρμογή με σταθερό εύρος θερμοκρασίας.
- Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου για να επιτευχθεί υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης σε σύγκριση με την αισθητή αποθήκευση.
- Υψηλή ειδική θερμότητα για την παροχή πρόσθετης αισθητής θερμότητας αποθήκευσης.
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα τόσο των υγρών όσο και των στερεών φάσεων που θα βοηθήσει στη φόρτιση και εκφόρτιση ενέργειας του συστήματος αποθήκευσης.
- Μικρή αλλαγή όγκου στο μετασχηματισμό φάσης και μικρή πίεση ατμών σε θερμοκρασία λειτουργίας για τον περιορισμό προβλήματος συγκράτησης.
- Συνεπής τήξη του PCM για μια διαρκώς σταθερή χωρητικότητα αποθήκευσης του υλικού για κάθε κύκλο τήξης ή πήξης.
- Αναπαραγωγή αλλαγής φάσης για τη χρησιμοποίηση του υλικού πολλές φορές (σταθερότητα ανακύκλωσης).

### Χημικές ιδιότητες

- Πλήρης αναστρέψιμος κύκλος τήξης / πήξης.
- Δεν υπάρχει υποβάθμιση μετά από μεγάλο αριθμό κύκλων τήξης / πήξης.
- Δεν υπάρχει διάβρωση των δομικών υλικών.
- Μη τοξικά, μη εύφλεκτα και μη εκρηκτικά υλικά για περιβαλλοντικούς λόγους και λόγους ασφαλείας.

### Οικονομικές ιδιότητες

- Αφθονία.
- Διαθεσιμότητα.
- Οικονομικά αποδοτικά για να είναι ανταγωνιστικά με άλλες επιλογές θέρμανσης και ψύξης.

### Τεχνικές

- Εύχρηστα.
- Αποτελεσματικά.
- Αξιόπιστα.
- Εφαρμόσιμα (δυνατότητα εφαρμογής σε κάψουλες).

### Κινητικές

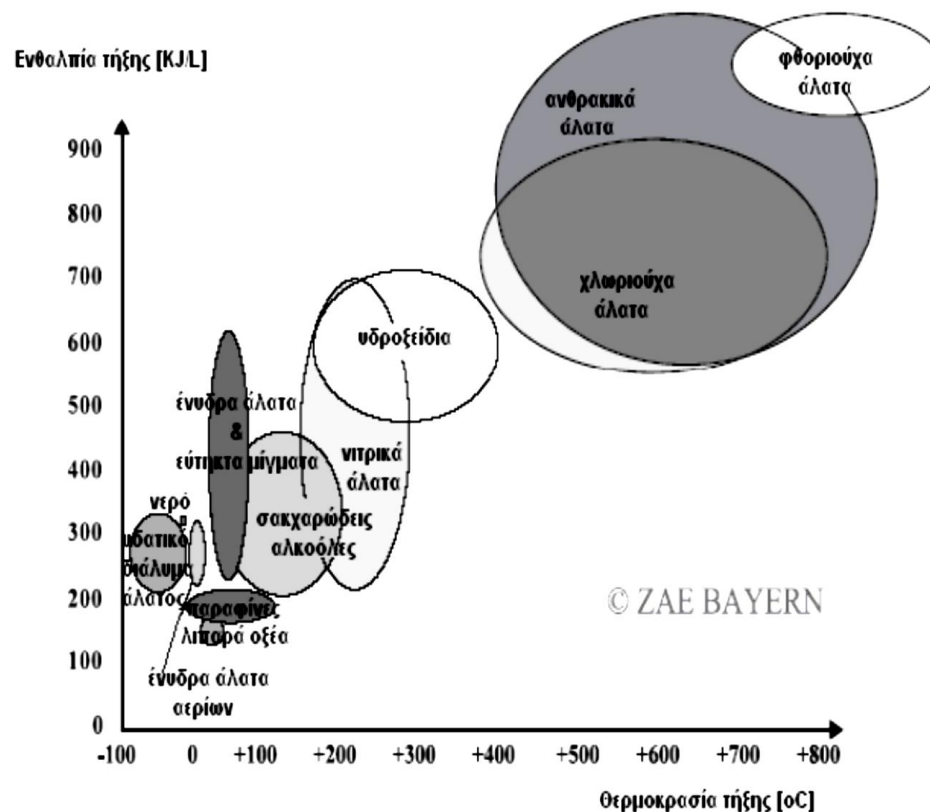
- Ταχύτητα ανάπτυξης κρυστάλλων.
- Ταχύτητα σχηματισμού πυρήνα (για την αποφυγή υπέρψυξης). [8],[9],[7]

Θερμικές ιδιότητες	Φυσικές ιδιότητες	Χημικές ιδιότητες	Οικονομικές ιδιότητες
Αλλαγή Φάσης θερμοκρασίας ταιριάζει στην εφαρμογή	Χαμηλή πυκνότητα παραλλαγής	Σταθερότητα και όχι διαχωρισμός φάσης	Φτηνά και άφθονα
Υψηλή μεταβολή της ενθαλπίας κοντά στη θερμοκρασία χρήσης	Υψηλή πυκνότητα	Συμβατότητα με τα υλικά εμπορευματοκιβωτίων	
Υψηλή θερμική αγωγιμότητα τόσο υγρών και στερεών φάσεις	Χαμηλή η καθόλου υπόψυξη	Μη τοξικά, μη εύφλεκτα, μη ρυπαρόγona	

**Σχήμα 2.1.: Ιδιότητες των PCM.**

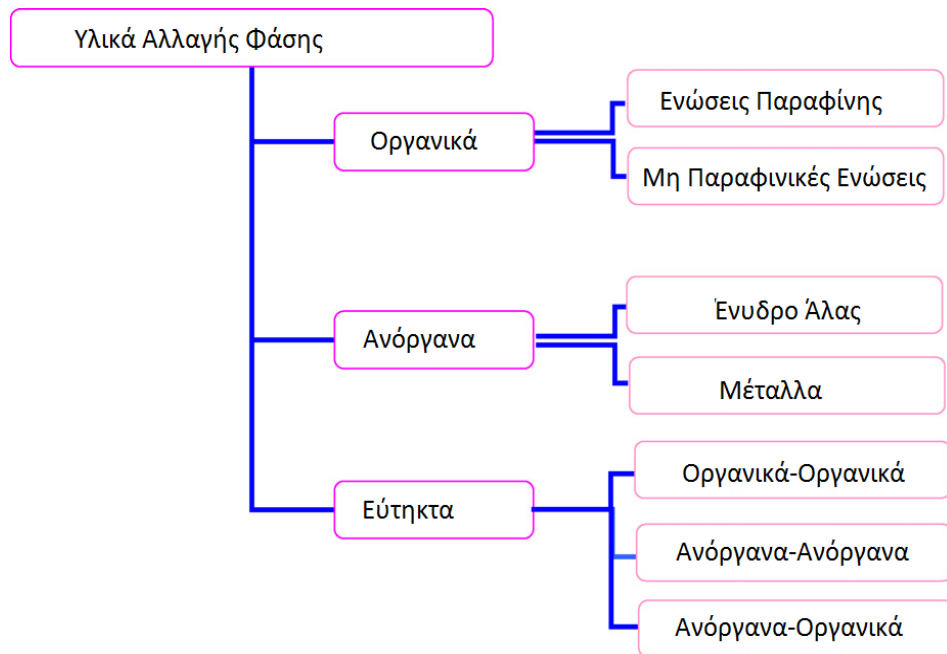
### 2.3 Κατηγοριοποίηση των PCM

Ένας μεγάλος αριθμός υλικών αλλαγής φάσης είναι διαθέσιμος σε όλα τα απαιτούμενα εύρη θερμοκρασίας (η ταξινόμηση των PCM δείχνεται στο Σχ. 2.3). Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός οργανικών και ανόργανων χημικών ουσιών, οι οποίες μπορούν να χαρακτηριστούν ως PCM, από την άποψη της θερμοκρασίας τήξης και της λανθάνουσας θερμοκρασίας τήξης. Ωστόσο, εκτός από τη θερμοκρασία τήξης στο σωστό εύρος λειτουργίας, η πλειοψηφία των υλικών αλλαγής φάσης δεν ικανοποιεί τα κριτήρια για να είναι κατάλληλα μέσα αποθήκευσης. [8],[9]



**Σχήμα 2.2:** Κατηγορίες υλικών που χρησιμοποιούνται ως PCM σύμφωνα με το τυπικό εύρος της θερμοκρασίας και της ενθαλπίας τήξης τους. [9],[1].

Δεδομένου ότι δεν υπάρχει υλικό το οποίο να μπορεί να έχει όλες τις απαιτούμενες ιδιότητες για ένα ιδανικό μέσο θερμικής αποθήκευσης, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα από τα διαθέσιμα υλικά και να προσπαθήσουμε να αντισταθμίσουμε μια ανεπαρκή φυσική του ιδιότητα με τον επαρκή σχεδιασμό του συστήματος. Για παράδειγμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεταλλικά πτερύγια για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των PCM και η υπέρψυξη μπορεί να κατασταλεί με την εισαγωγή ενός παράγοντα πυρήνωσης. Γενικά οι οργανικές ενώσεις έχουν σχεδόν διπλάσια ογκομετρική χωρητικότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας ( $250\text{--}400\text{ kJ/dm}^3$ ) από τις ανόργανες ενώσεις ( $128\text{--}200\text{ kJ/dm}^3$ ), σημαντικές διαφορές οι οποίες θα συζητηθούν παρακάτω.



**Σχήμα 2.3:** Ταξινόμηση των PCM. [16]



## 2.4 Οργανικά PCM.

Τα οργανικά υλικά χωρίζονται σε παραφίνες και μη παραφίνες, αυτά είναι συμπαγή μέσα τήξης, τήκονται και ψύχονται χωρίς διαχωρισμό φάσης και εμφανίζουν συνεχή υποβάθμιση της λανθάνουσας θερμότητας τήξης. Επίσης το χαρακτηριστικό της αυτοδημιουργίας πυρήνων σημαίνει ότι αναπτύσσουν κρυστάλλους με ελάχιστη ή καθόλου υπέρψυξη και συνήθως είναι μη διαβρωτικά.[8]

### 2.4.1. Παραφίνες.

Τα κεριά παραφίνης αποτελούνται κυρίως από ένα μείγμα αλκαλίων  $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_n\text{-CH}_3$ . Η κρυστάλλωση της  $(\text{CH}_3)\text{-}$  αλυσίδας απελευθερώνει μεγάλη ποσότητα λανθάνουσας θερμότητας. Τόσο η τήξη όσο και η λανθάνουσα θερμότητα τήξης αυξάνεται με το μήκος της αλυσίδας. Λόγω της σημασίας του κόστους, μόνο οι ειδικά τεχνικά επεξεργασμένες παραφίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PCMs σε συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Πλεονεκτήματα της παραφίνης είναι η ασφάλεια, αξιοπιστία, είναι ένα προβλέψιμο - φθινό υλικό και μη διαβρωτικό. Επίσης είναι χημικώς αδρανής και σταθερή κάτω των  $500^\circ\text{C}$ , δείχνει ελάχιστες μεταβολές όγκου κατά την τήξη και αρκετά χαμηλή πίεση ατμών σε υγρή μορφή. Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά μας δείχνουν ότι οι παραφίνες έχουν πολύ μεγάλο κύκλο τήξης / ψύξης. Βέβαια εκτός από αυτές τις ευνοϊκές ιδιότητες η παραφίνη παρουσιάζει και κάποιες αρνητικές όπως : χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, δεν είναι συμβατή με πλαστικά δοχεία και είναι εν μέρει εύφλεκτη. Όλες αυτές οι ανεπιθύμητες ενέργειες μπορούν να απαλειφθούν τροποποιώντας το κεριό και το σύστημα αποθήκευσης. [8]

### 2.4.2 Μη Παραφίνες.

Τα υλικά μη παραφίνης είναι τα πιο πολυπληθή, όσο αναφορά την αγορά των PCM, και παρουσιάζουν πολύ ποικίλες ιδιότητες. Καθένα από αυτά τα υλικά έχει τις δικές του ιδιότητες, σε αντίθεση με τα υλικά παραφίνης τα οποία έχουν πολύ παρόμοιες ιδιότητες. Αυτή είναι η μεγαλύτερη κατηγορία υποψήφιων PCM αποθήκευσης. Αυτά τα οργανικά υλικά χωρίζονται σε περαιτέρω υποομάδες ως λιπαρά οξέα και μη οργανικές παραφίνες. Μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτών των

οργανικών υλικών είναι τα ακόλουθα: υψηλή θερμότητα τήξης, εύφλεκτα, χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, χαμηλά σημεία ανάφλεξης, ήπια διαβρωτικά, μεταβαλλόμενο επίπεδο τοξικότητας και αστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα λιπαρά οξέα έχουν υψηλές τιμές θερμοκρασίας τήξης, συγκρίσιμες με αυτές τις παραφίνης. Παρουσιάζουν επίσης αναπαραγωγίσιμη τήξη και πήξη χωρίς προβλήματα υπέρψυξης. Ο γενικός τύπος που περιγράφει το λιπαρό οξύ δίνεται από το  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$ . Ωστόσο το μείζον μειονέκτημά τους είναι το κόστος τους, το οποίο είναι δύο με δύομιση φορές μεγαλύτερο από αυτό των επεξεργασμένων παραφινών.[8]

## 2.5. Ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης.

Τα ανόργανα υλικά ταξινομούνται σε ένυδρα άλατα και μεταλλικά. Αυτά τα PCM δεν παρουσιάζουν πρόβλημα υπέρψυξης και οι θερμοότητες τήξης δεν υποβαθμίζονται.[8]

### 2.5.1 Ένυδρα Άλατα.

Τα ένυδρα άλατα μπορούν να θεωρηθούν ως σύμπλοκα ανόργανων αλάτων και νερού σχηματίζοντας ένα τυπικό κρυσταλλικό στερεό. Ένα ένυδρο άλας συνήθως τήκεται σε ένα ένυδρο άλας με λιγότερα μόρια νερού.[8]

Στο σημείο τήξης οι ενυδατωμένοι κρύσταλλοι διαλύονται σε άνυδρο άλας και νερό ή σε ένα ένυδρο άλας με λιγότερα μόρια νερού και νερό. Ένα πρόβλημα με τα περισσότερα ένυδρα άλατα είναι η δημιουργία ενός μη συμπαγούς μείγματος, το οποίο προκαλείται από το γεγονός ότι το απελευθερωμένο νερό της κρυστάλλωσης δεν επαρκεί για να διαλύσει όλη την παρούσα στερεά φάση.[8]

Τα περισσότερα ένυδρα άλατα έχουν επίσης φτωχές ιδιότητες πυρήνωσης, με αποτέλεσμα την υπέρψυξη του υγρού πριν την κρυστάλλωσή του. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι να προσθέσουμε ένα παράγοντα πυρήνωσης, ο οποίος παρέχει τον αριθμό πυρήνων με τον οποίο ξεκίνησε ο σχηματισμός κρυστάλλων. Μια άλλη λύση είναι να διατηρήσουμε μερικούς κρυστάλλους σε μια κρύα περιοχή για να χρησιμεύσουν ως πυρήνες. [8]

Τα ένυδρα άλατα είναι η πιο σημαντική ομάδα των PCMs, τα οποία έχουν μελετηθεί εκτενώς για τη χρήση τους σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Οι πιο ελκυστικές ιδιότητες των ένυδρων αλάτων είναι: υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης

ανά μονάδα όγκου, σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα (σχεδόν διπλάσια από τη θερμική αγωγιμότητα της παραφίνης), εμφανίζουν μικρές αλλαγές όγκου κατά την τήξη, δεν παρουσιάζουν διάβρωση, είναι συμβατές με πλαστικά δοχεία και τέλος δεν είναι τοξικές. Επίσης σημαντικό πλεονέκτημα των ένυδρων αλάτων είναι ότι πολλά από αυτά είναι φθηνά για ενεργειακή αποθήκευση. [8]

Τρεις τύποι συμπεριφοράς των λιωμένων ένυδρων αλάτων μπορούν να ταυτοποιηθούν ως : συμπαγούς, μη συμπαγούς και ημισυμπαγούς τήξης.

- Η συμπαγής τήξη συμβαίνει όταν το άνυδρο άλας είναι πλήρως διαλυμένο στο νερό της ενυδάτωσης κατά τη θερμοκρασία τήξης.
- Η μη συμπαγής τήξη συμβαίνει όταν το άλας δεν είναι εξ ολοκλήρου διαλυμένο στο νερό της ενυδάτωσης στο σημείο τήξης.
- Η ημι-συμπαγής τήξη των υγρών και στερεών φάσεων στην ισορροπία , κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης είναι διαφορετική στην τήξη λόγω της μετατροπής του ένυδρου σε ένα ένυδρο υλικό με λιγότερα μόρια νερού μέσω της απώλειας νερού.

Τα κύρια προβλήματα χρήσης ένυδρων αλάτων ως PCMs είναι :

- i) Τα περισσότερα ένυδρα άλατα τα οποία κρίνονται κατάλληλα για θερμική αποθήκευση, λιώνουν ακανόνιστα.
- ii) Κοινό πρόβλημα όλων των ένυδρων αλάτων είναι αυτό της υπέρψυξης. [8],[9]

### 2.5.2 Μέταλλα.

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τα μέταλλα χαμηλής τήξης και τα ευτηκτικά μέταλλα. Αυτά δεν έχουν γίνει αποδεκτά για την χρήση τους ως PCMs λόγω του μεγάλου βάρους τους. Ωστόσο, όταν ο όγκος είναι πρόβλημα, είναι πιθανά υποψήφια λόγω της υψηλής θερμοκρασίας τήξης ανά μονάδα όγκου. Μια μεγάλη διαφορά μεταξύ τους και άλλων PCMs είναι η θερμική τους αγωγιμότητα. Μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτών των υλικών είναι τα εξής: χαμηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα βάρους, υψηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου, χαμηλή ειδική θερμότητα και σχετικά χαμηλή πίεση ατμών.[8]

### 2.5.3 Ευτηκτικά

Τα ευτηκτικά υλικά αλλαγής φάσης είναι μείγματα ανόργανων και οργανικών PCM. Έτσι, μπορούν να χωριστούν σε τρεις υποκατηγορίες ανάλογα με τα υλικά από τα οποία συντίθενται: οργανικά-οργανικά, ανόργανα-ανόργανα και οργανικά-ανόργανα ευτηκτικά υλικά. Κάθε ένα από τα συστατικά ενός ευτηκτικού μείγματος, λιώνει και παγώνει με τον ίδιο τρόπο σχηματίζοντας έτσι ένα μείγμα συστατικών κρυστάλλων κατά τη διάρκεια της κρυστάλλωσης. Το ευτηκτικό μείγμα λιώνει και στερεοποιείται χωρίς κάποιο διαχωρισμό, καθώς αυτό ψύχεται σε ένα περιορισμένο μείγμα κρυστάλλων, αφήνοντας ελάχιστες ευκαιρίες για τον διαχωρισμό των συστατικών.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της ομάδας των ευτηκτικών μειγμάτων είναι η δυνατότητά τους να τήκονται – στερεοποιούνται, ταυτόχρονα χωρίς να παρουσιάζουν διαχωρισμό φάσεων. Επίσης, έχουν τα πλεονεκτήματα και των οργανικών και των ανόργανων PCM. Από την άλλη πλευρά, το κόστος παραγωγής μπορεί να είναι διπλάσιο ή ακόμα και τριπλάσιο απ' αυτό των οργανικών και ανόργανων PCM, κάτι που αποτελεί βασικό μειονέκτημα. Γενικά, τα οργανικά ευτηκτικά μείγματα έχουν μικρότερη θερμοκρασία τήξης και μεγαλύτερη θερμότητα τήξης απ' ότι τα ανόργανα ευτηκτικά μείγματα, καθιστώντας τα πρώτα πιο κατάλληλα για κτιριακές εφαρμογές. [8],[9]

Ταξινόμηση	Οργανικά	Ανόργανα
<b>Πλεονεκτήματα</b>	Μη διαβρωτικά Χαμηλή ή καθόλου υπόψυξη Χημική και θερμική σταθερότητα	Μεγαλύτερη αλλαγή φάσης ενθαλπίας
<b>Μειονεκτήματα</b>	Χαμηλότερη αλλαγή φάσης ενθαλπίας Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα Αναφλεξιμότητα	Υπόψυξη Διαβρωτικά Διαχωρισμός φάσης Έλλειψη θερμικής σταθερότητας

Πίνακας σύγκρισης οργανικών και ανόργανων υλικών

Ταξινόμηση	Οργανικά	Ανόργανα
<b>Κατηγορία</b>	Αλειφατικοί υδρογονάνθρακες υψηλού μοριακού βάρους, λιπαρά οξέα ή άλατα, αλκοόλες, αρωματικοί υδρογονάνθρακες, αρωματικές κετόνες, φρέον, πολυ-ανθρακούχα πολυμερή	Κρυσταλλικά ένυδρα άλατα, λιωμένα άλατα, μέταλλο ή κράμα
<b>Πλεονεκτήματα</b>	Φυσική και χημική σταθερότητα, καλή θερμική συμπεριφορά, ρυθμιζόμενη μεταβατική ζώνη	Υψηλότερη πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας, υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα, μη-εύφλεκτα, χαμηλού κόστους
<b>Μειονεκτήματα</b>	Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, χαμηλή πυκνότητα, χαμηλό σημείο τήξης, ιδιαίτερα πτητικά, εύφλεκτα, μεταβάλλουν τον όγκο τους	Υπόψυξη, διαχωρισμός φάσης, διαβρωτικά
<b>Μέθοδοι βελτίωσης-Αντιμετώπισης</b>	Πρόσθετα υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, προσθήκη πυρίμαχων	Αναμιγνύονται με πυρήνωση και πηκτωματογόνα

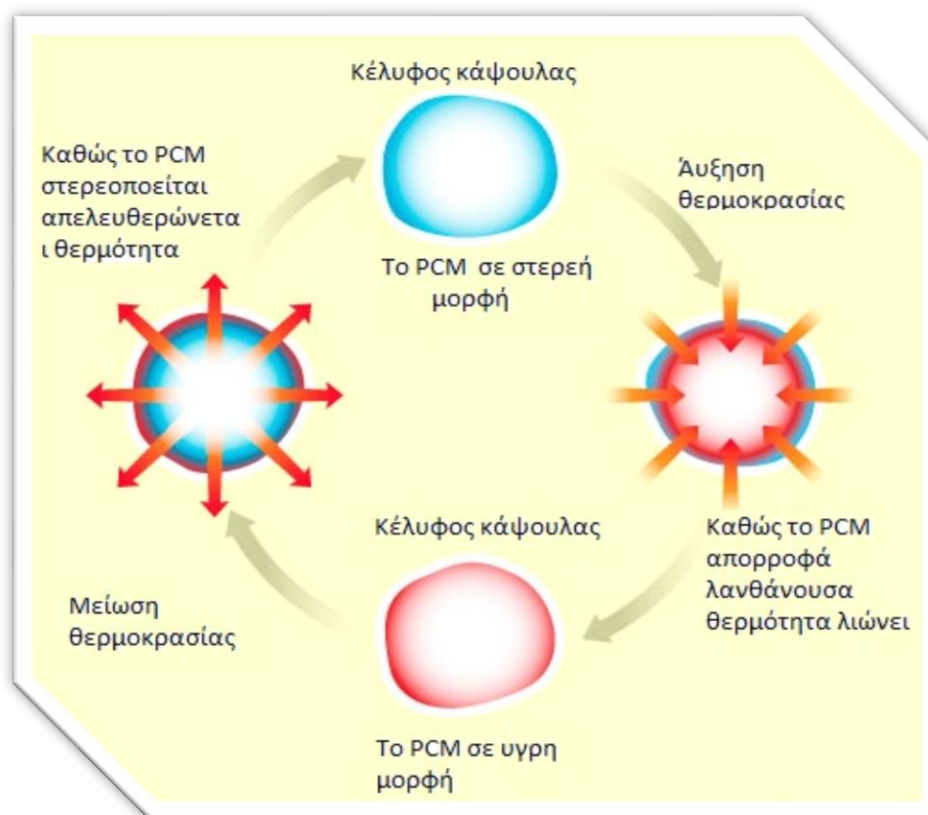
Πίνακας σύγκρισης οργανικών και ανόργανων υλικών και μέθοδοι βελτίωσης



### 3. ΕΝΘΥΛΑΚΩΣΗ

#### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ.

Για να αποφύγουμε όλες αυτές τις δυσμενείς επιπτώσεις των PCM (που αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο) σε ένα κατασκευαστικό υλικό, τα PCM μπορούν να ενθυλακωθούν πριν την ενσωμάτωσή τους. Οι Hawes και Feldman εξέτασαν τα μέσα ενσωμάτωσης PCM και κατέληξαν σε τρεις τρόπους, οι οποίοι είναι άμεση ενσωμάτωση, βύθιση και ενθυλάκωση. Ο τρίτος είναι αυτός ο οποίος χρησιμοποιείται σήμερα και ορίζεται ως : η συγκράτηση του PCM μέσα σε μια κάψουλα διαφόρων υλικών, μορφών και μεγεθών πριν την ενσωμάτωση, έτσι ώστε να μπορεί να εισαχθεί το μείγμα με ένα εύχρηστο και αποτελεσματικό τρόπο. Υπάρχουν δύο είδη ενθυλάκωσης των PCM η μακροενθυλάκωση και η μικροενθυλάκωση. [7]



**Σχήμα 3.1.** Σχηματική απεικόνιση κύκλου λειτουργίας PCM ενσωματωμένου σε σφαιρική κάψουλα. [21]

### 3.2. ΜΙΚΡΟ-ΕΝΘΥΛΑΚΩΣΗ

Η μικροενθυλάκωση πραγματοποιείται με την έγκλειση σωματιδίων σε μια λεπτή πολυμερή μεμβράνη (μικροκάψουλες από  $\mu\text{m}$  έως  $\text{mm}$ ). Τα επικαλυμμένα σωματίδια, με αυτό το τρόπο μπορούν να ενσωματωθούν σε οποιαδήποτε μήτρα που είναι συμβατή με αυτή τη μεμβράνη ενθυλάκωσης. Το μικρο-ενθυλακωμένο υλικό έχει τα πλεονεκτήματα της εύκολης εφαρμογής, καλής μεταφοράς θερμότητας λόγω της αυξημένης θερμότητας επιφάνειας ανταλλαγής και δεν υπάρχει ανάγκη προστασίας. Εντούτοις, μπορεί να επηρεάσει τη μηχανική αντοχή της κατασκευής. [7]

Σύμφωνα με τον Hawlader, ο οποίος διερεύνησε την επίδραση διαφόρων παραμέτρων πάνω στα χαρακτηριστικά και τις επιδόσεις ενός μικρο-ενθυλακωμένου υλικού αλλαγής φάσης, από την άποψη της αποδοτικότητας της ενθυλάκωσης στην ενέργεια αποθήκευσης και αποδέσμευσης, αποδεικνύει ότι οι μικρο-κάψουλες που παρασκευάζονται είτε με συσσωμάτωση είτε με μεθόδους ξήρανσης ψεκασμού έχουν ικανότητα αποθήκευσης-αποδέσμευσης θερμικής ενέργειας περίπου 145-240 kJ/kg. Ως εκ τούτου, το μικρο-ενθυλακωμένο κερί παραφίνης παρουσιάζει πολύ καλές δυνατότητες όπως ένα υλικό αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας. [7]

### 3.3 SSPCM (Shape-Stabilized PCM).

Τα τελευταία χρόνια, ένα νέο είδος σύνθεσης PCM, το λεγόμενο σταθεροποιημένου σχήματος PCM (Shape Stabilized PCM), έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον πολλών μελετητών. Αυτό αποτελείται από παραφίνη (ως διασπασμένο PCM) και πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας ή άλλου υλικού ως υποστηρικτικό υλικό. Δεδομένου ότι το ποσοστό μάζας της παραφίνης μπορεί να είναι το 80% του μείγματος, η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια είναι συγκρίσιμη με αυτή των παραδοσιακών PCM. Σύμφωνα, με πειράματα και προσομοιώσεις που έχουν διεξαχθεί για την θέρμανση χώρου τον χειμώνα, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η εφαρμογή του SSPCM στα κτίρια είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική και θα πρέπει να μελετηθεί περαιτέρω. [7]





**Εικόνα 3.2** SSPCM (Shape Stabilized PCM).[7]

### 3.4. ΜΑΚΡΟ-ΕΝΘΥΛΑΚΩΣΗ

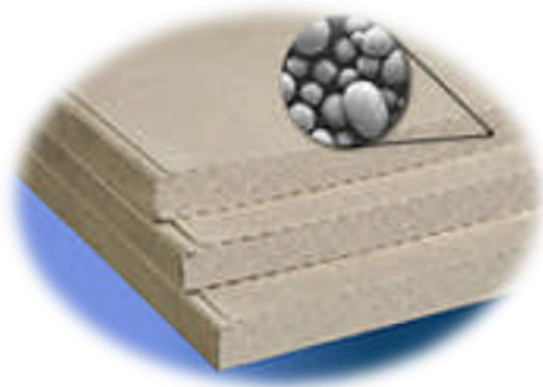
Η δεύτερη μέθοδος είναι αυτή της μακροενθυλάκωσης, η οποία πραγματοποιείται με την έγκλειση του PCM σε κάποια μορφή συσκευασίας όπως, σωλήνες, σφαιρίδια ή πλαίσια. Αυτά τα δοχεία μπορούν να χρησιμεύσουν στην άμεση μεταφορά θερμότητας ή να ενσωματωθούν σε κτιριακές εφαρμογές (δομικά υλικά). Η μεμβράνη βέβαια θα πρέπει να είναι συμβατή τόσο με το PCM όσο και με το πλέγμα ενσωμάτωσής της. Τα πιο συνηθισμένα υλικά κατασκευής, λόγω της κάψουλας, είναι μέταλλα, όπως κασσίτερος και χάλυβας και πλαστικά, όπως το πολυπροπυλένιο και η πολυολεφίνη.[7]

Ένα από τα πλεονεκτήματα της μακροενθυλάκωσης είναι η δυνατότητα ενθυλάκωσης υλικού αλλαγής φάσης τόσο σε υγρή όσο και σε αέρια φάση. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή μπορεί να συμβάλλει στην αποφυγή του φαινομένου διαχωρισμού φάσεων, στην αύξηση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας και στην ενίσχυση της δομής του PCM. [7]

Μέσω της μακροενθυλάκωσης, μελετητές ανέπτυξαν και δοκίμασαν ένα πλαίσιο τοίχου που ενσωματώθηκε με υψηλή κρυσταλλική παραφίνη. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο τοίχος μείωσε τις απώλειες θερμότητας κατά 38%. Ωστόσο, η μακροενθυλάκωση έχει το μειονέκτημα ότι οι μεμβράνες χρειάζονται προστασία για να μην φθαρούν και απαιτείται πολύ περισσότερη εργασία για την ενσωμάτωσή τους στη δομή του κτιρίου, συνεπώς είναι πιο δαπανηρή. Ένα άλλο

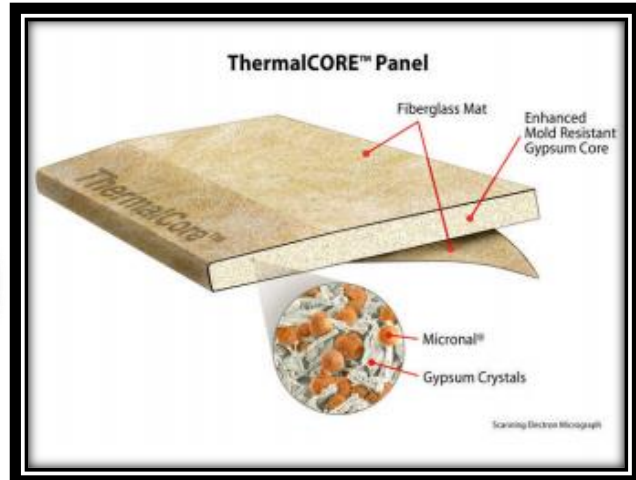
πρόβλημα της, είναι η μείωση ρυθμού μεταφοράς θερμότητας κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης.[7]

Πλάκα από γυψοσανίδα



(από εταιρία Micronal BASF) [23]

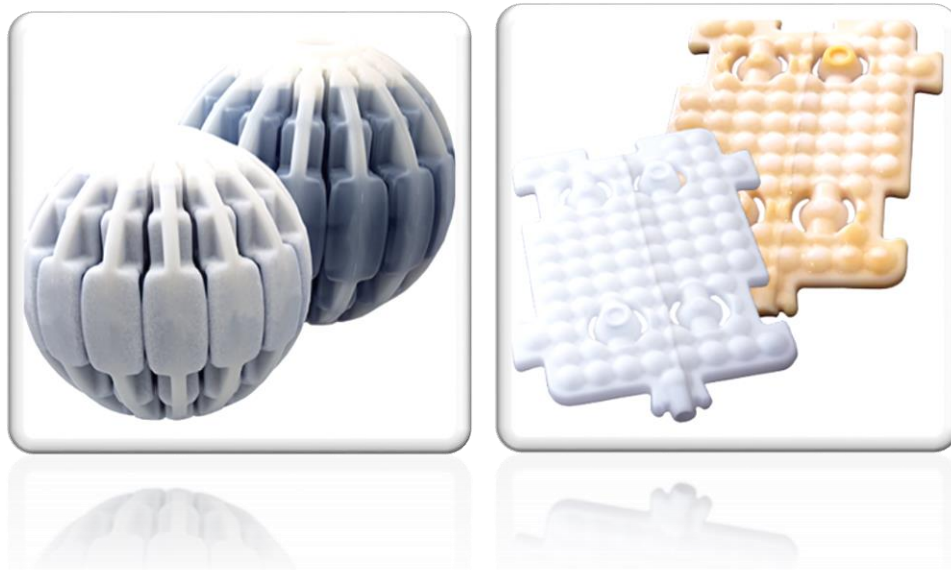
Γυψοσανίδα θερμικής φάσης



(από εταιρία Thermalcore)[24]

### Παραδείγματα μικροενθυλάκωσης.

Δοχεία μακρο-ενθυλάκωσης (από εταιρία PureTemp)[11]





*Παραδείγματα μακρο-ενθυλάκωσης.[25] [4]*

### **3.5 . Ενισχυμένο σκυρόδεμα με PCM**

Μια άλλη δυνατότητα για την εφαρμογή PCM σε κατασκευές κτιρίων είναι το ενισχυμένο με PCM σκυρόδεμα ή το λεγόμενο Thermocrete και ενισχυμένα πήλινα κεραμίδια. Το Thermocrete είναι ένα μέσο αποθήκευσης θερμότητας που συνδυάζει ένα κατάλληλο PCM σκυροδέματος ή τσιμέντα ανοιχτού κυττάρου για την παραγωγή υλικών αποθήκευσης χαμηλού κόστους με δομικές και θερμοστατικές ιδιότητες.[2]

#### **3.5.1. Μέθοδοι κατασκευής**

Μια πρώτη δυνατότητα βελτίωσης του σκυροδέματος με PCM μπορεί να βρεθεί στην εσωτερική σκλήρυνση του σκυροδέματος (Bentz & Turpin 2007, Weber 1996) [20]. Προ-διαβρεγμένα ελαφριά αδρανή χρησιμεύουν ως εσωτερικές δεξαμενές για την παροχή επιπλέον νερού που απαιτείται από το τσιμέντο και τα συστατικά του σκυροδέματος κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ενυδάτωσής του. Λόγω της πορώδους φύσης τους και της λογικά υψηλής απορρόφησης, αυτά τα συσσωματώματα μπορούν επίσης να συμπληρωθούν και με υλικά αλλαγής φάσης. Ένα τέτοιο ελαφρύ

συσσωμάτωμα με ικανότητα απορρόφησης 20% θα μπορούσε να παράσχει 350 kg/m<sup>3</sup> PCM σε ένα τυπικό σκυρόδεμα. Τα πορώδη ελαφρά αδρανή είναι εμποτισμένα με στεατικό βουτύλιο και αυτή η τεχνική έχει κυκλοφορήσει στο εμπόριο σε αφροσκυρόδεμα χρησιμοποιώντας σφαίρες με κερί. [20]

Η εφαρμογή των PCM κατά τη διάρκεια της ωρίμανσης έχει ακόμα ένα πλεονέκτημα : Τα υλικά αλλαγής φάσης θα προκαλέσουν τη μείωση της αύξησης της θερμοκρασίας που παρατηρείται κατά τη διάρκεια της ωρίμανσης των μαζικών κατασκευών από σκυρόδεμα, λόγω της τήξης, το PCM (κερί) απορροφάει την ενέργεια. Ωστόσο, οι αντοχές του σκυροδέματος μειώνονται σε σημαντικό βαθμό με την εφαρμογή του PCM (Bentz & Turpin 2007, Castellon 2006) [20], επειδή οι υψηλότερες θερμοκρασίες ωρίμανσης θα επιταχύνουν την ενυδάτωση και το κέρδος αντοχής σε πρώιμες ηλικίες, ενώ μπορεί ακόμα και να οδηγήσει σε χαμηλότερες μακροχρόνιες αντοχές σκυροδέματος (Schindler & McCullough 2002 [20]). Μια δεύτερη δυνατότητα για ενίσχυση του σκυροδέματος με PCM μπορεί να βρεθεί στους μηχανισμούς απορρόφησης για να επιτευχθεί διάχυση της επιθυμητής ποσότητας PCM σε σκυρόδεμα. [20]

### 3.5.2. Πειράματα και αποτελέσματα

Δοκιμαστικοί θάλαμοι με PCM ενισχυμένο σκυρόδεμα εγκαταστάθηκαν στην Ισπανία. Το PCM είχε σημείο τήξης 26 °C και θερμότητα τήξης 110 kJ/kg και οδηγεί σε χαμηλότερη εσωτερική θερμοκρασία 3° C χαμηλότερη από εκείνη των μη ενισχυμένων με PCM θαλάμων και η θερμοκρασία αιχμής εμφανίστηκε 2 ώρες αργότερα, γεγονός που αποτελεί μια ισχυρή ευκαιρία για πιθανό κλιματισμό εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια. [20]

Επίσης έχουν δοκιμαστεί PCM με ελαφρά αδρανή. Πέντε διαφορετικά υλικά αλλαγής φάσης εφαρμόστηκαν με επιτυχία σε συσσωματώματα και ελέγχθηκαν τρεις διαφορετικοί τύποι πολυαιθυλενογλυκόλης, δεκαοκτάνιου και παραφίνης. [20]

Διάφορα PCM έχουν εφαρμοστεί σε πλακίδια δαπέδου πάχους 19mm με συμπέρασμα ότι το ενθυλακωμένο δεκαοκτάνιο έχει το υψηλότερο δυναμικό ως υλικό αλλαγής φάσης στερεάς κατάστασης. Μία ετήσια εξοικονόμηση θέρμανσης έως 24 % βρέθηκε για δοκιμαστικό κτίριο στο Denver. [20]

Ωστόσο, μπορεί κανείς να αμφισβητήσει το κέρδος του ενισχυμένου με PCM σκυροδέματος. Τα PCM εφαρμόζονται σε κτίρια προκειμένου να αυξηθεί η θερμοχωρητικότητα, ένας σκοπός που επιτυγχάνεται με την εφαρμογή PCM σε γυψοσανίδες τοίχου που χρησιμοποιούνται συνήθως σε ελαφριές κατασκευές όπως

παραδοσιακά κτίρια ξύλινων πλαισίων. Σε σύγκριση με αυτούς τους τοίχους, τα συνολικά οφέλη των PCM σε σκυρόδεμα φαίνονται πιο αμφίβολα, επειδή το σκυρόδεμα των κτιρίων είναι γενικά γνωστό ότι έχει υψηλή θερμοχωρητικότητα.

Το πιθανό κέρδος του ενισχυμένου με PCM σκυροδέματος (Thermocrete) μπορεί να διαπιστωθεί από μια απλή σύγκριση :

- η γυψοσανίδα έχει θερμική ικανότητα  $840 \text{ J}/(\text{kgK})$ , πυκνότητα  $950 \text{ kg}/\text{m}^3$  και τυπικό πάχος  $12,5 \text{ mm}$ , με συνολική χωρητικότητα περίπου  $10 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ . Λαμβάνοντας υπόψη τους αριθμούς που αναφέρθηκαν, η ενίσχυση γυψοσανίδων με PCM έχει ως αποτέλεσμα μια συνολική θερμική χωρητικότητα  $550$  έως  $800 \text{ kJ} / (\text{m}^2\text{K})$  στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης.
- Από την άλλη πλευρά, το σκυρόδεμα έχει θερμική ισχύ  $1000 \text{ J}/(\text{kgK})$ , πυκνότητα  $2300 \text{ kg}/\text{m}^3$ , με αποτέλεσμα συνολική χωρητικότητα  $552 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$  εάν εφαρμοστεί ως πλάκα με τυπικό πάχος  $24 \text{ cm}$ , δηλ. ακόμη ισοδυναμεί με θερμικής δυναμικότητας γυψοσανίδα ενισχυμένη με PCM. Η ενίσχυση του σκυροδέματος με PCM έχει ως αποτέλεσμα μια συνολική θερμική ισχύ περίπου  $8000 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$  στη θερμοκρασία μετάπτωσης, δηλαδή  $10$  φορές την τιμή που επιτυγχάνεται για γυψοσανίδες.[2]

Αυτή η μικρή σύγκριση δείχνει ότι, παρόλο που συγκεκριμένα κτίρια έχουν ακόμη σχετικά υψηλή θερμική μάζα, η ενίσχυση του σκυροδέματος με PCM μπορεί να σημαίνει σημαντική αύξηση της θερμικής ικανότητας του κτιρίου. Αν και το υψηλό κόστος των PCM που εφαρμόζονται σε τόσο μεγάλη ποσότητα είναι κάτι που πρέπει να σκεφτούμε. [2]

## **4. ΒΑΣΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΤΩΝ PCM**

### **4.1. Γενικά**

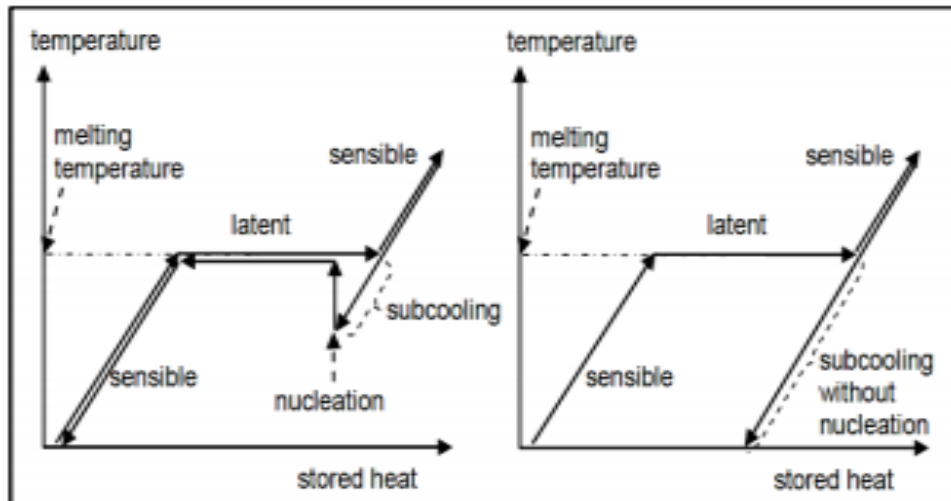
Ένα από τα κυριότερα κριτήρια που έχουν μειώσει τη χρήση υλικών λανθάνουσας θερμότητας είναι η διάρκεια ζωής των PCM και ο αριθμός κύκλων ζωής, χωρίς να υποστούν οποιαδήποτε υποβάθμιση στις θερμοφυσικές και χημικές ιδιότητες τους. Όπως προαναφέραμε κανένα PCM δεν πληροί όλες τις προϋποθέσεις, λόγω του ότι κάθε ένα έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία αποκτούν διαφορετική ισχύ ανάλογα με τη χρήση τους.

### **4.2. Υπέρψυξη / Υπόψυξη**

Η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας της στερεοποίησης και της τήξης του PCM είναι γνωστή ως υπέρψυξη / υπόψυξη. Αυτό γενικά συμβαίνει λόγω κακής πυρήνωσης στο PCM. Αυτό παρεμποδίζει τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και το ποσοστό της θερμότητας που ανακτήθηκε. Μερικές φορές η υπέρψυξη μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την μη απελευθέρωση λανθάνουσας θερμότητας. [6],[4],[7]

Για να αποφευχθούν αυτές οι καταστάσεις, οι ιδιότητες πυρήνωσης του PCM πρέπει να βελτιωθούν με την προσθήκη ενός μέσου πυρήνωσης, το οποίο εξασφαλίζει σχηματισμό στερεής φάσης με ελάχιστη υπέρψυξη. Υπάρχουν δύο είδη πυρήνων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό τον σκοπό :

- Ομογενείς πυρήνες: Δηλαδή πυρήνωση ξεκινώντας αποκλειστικά από το ίδιο το PCM, επίσης περιλαμβάνει πυρήνωση από αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες και μια δεύτερη πιθανότητα ότι τα σωματίδια του στερεού PCM προστίθενται σε αυτό που έχει υποστεί υπέρψυξη, αυτό ονομάζεται δευτερεύουσα πυρήνωση.
- Ετερογενείς πυρήνες: Δηλαδή πυρήνωση από διαφορετικό PCM που η προέλευσή του μπορεί να είναι ειδικά πρόσθετα που προστίθενται στο PCM. [6],[4],[7]



**Σχήμα 4.1.** Επίδραση της υπόψυξης στην αποθήκευση θερμότητας.

#### 4.3. Διαχωρισμός φάσεων.

Αυτό το είδος προβλήματος παρατηρείται στα ανόργανα PCM δηλαδή στα ένυδρα άλατα. Η υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης των ένυδρων αλάτων είναι δύσκολο να διατηρηθεί και συνήθως μειώνεται με κάθε κύκλο τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα περισσότερα ένυδρα άλατα τήκονται με τον σχηματισμό ένυδρων αλάτων με λιγότερα μόρια νερού, καθιστώντας τη διαδικασία μη αναστρέψιμη και οδηγώντας στη συνεχή μείωση της αποδοτικής αποθήκευσης.[6],[4],[7]

Σε μια προσπάθεια να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, ορισμένοι ερευνητές χρησιμοποίησαν ένυδρα άλατα για άμεση μεταφορά θερμότητας μεταξύ ενός ρευστού μείγματος μεταφοράς θερμότητας και του ένυδρου άλατος. Η ανάδευση που προκαλείται από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας απέτρεψε τον διαχωρισμό φάσης αλλά και ελαχιστοποίησε την υπέρψυξη. [6],[4]

Μερικοί τρόποι αντιμετώπισης που πραγματοποιούνται σήμερα είναι οι εξής:

- Μηχανική ανάδευση.
- Ενθυλάκωση PCM για τη μείωση του διαχωρισμού φάσης.
- Προσθήκη πηκτικού .
- Τροποποίηση χημικών στη σύνθεση του συστήματος.

#### **4.4. Διάβρωση.**

Η συμβατότητα είναι η πιο σημαντική πτυχή για τον σχεδιασμό ενός συστήματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Εάν το υλικό δεν είναι συμβατό με το δοχείο, τότε θα έχει ως αποτέλεσμα τη διάβρωση του δοχείου, αλλά και τη διάβρωση, ή ακόμα και καταστροφή του εξωτερικού περιβάλλοντος. Επίσης υπάρχει πιθανότητα αλλοίωσης των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του PCM, με συνέπεια αύξηση του κόστους κατασκευής. Έτσι πριν σχεδιαστεί το σύστημα, η συμβατότητα του PCM και του δοχείου που θα τοποθετηθεί πρέπει να μελετάται με ακρίβεια.[6],[4]

Οι περισσότερες έρευνες σε δοκιμές διάβρωσης που χρησιμοποιούν ένυδρα άλατα πραγματοποιήθηκαν με αραιωμένα ένυδρα άλατα, όπως χρησιμοποιούνται στη χημική βιομηχανία. Πρόσφατα οι Cabeza [25],[26], μελέτησαν την αντοχή πέντε κοινών μετάλλων και κραμάτων (αλουμίνιο, ορείχαλκο, χαλκό, χάλυβα και ανοξείδωτο χάλυβα) σε επαφή με λιωμένα ένυδρα άλατα. [6],[4]

#### **4.5. Μηχανική σταθερότητα και Θερμική αγωγιμότητα**

Ένα PCM μπορεί να συνδυαστεί με άλλα υλικά για να σχηματίσει ένα σύνθετο υλικό με πρόσθετες και τροποποιημένες ιδιότητες. Ένα σύνθετο υλικό μπορεί να σχηματιστεί με διάφορους τρόπους, με τη τοποθέτηση άλλου υλικού στο PCM ή με την ενσωμάτωση του PCM σε μία μήτρα άλλου υλικού.[6],[4],[7]

Για να διατηρηθούν οι ιδιότητες των υλικών, η τάξη μεγέθους των δομών στο σύνθετο υλικό πρέπει να είναι μικροσκοπική. Σε διαφορετική περίπτωση οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού εξαρτώνται από το μέγεθος του δείγματος, επομένως δε μπορεί να αποκαλείται υλικό.

##### **4.5.1. Μηχανική σταθερότητα**

Τα σύνθετα υλικά από PCM και άλλα υλικά, ως μηχανικά σταθερή δομή ονομάζονται "Shape Stabilized PCM". Ανεξάρτητα από τη φάση του PCM, υγρό ή στερεό, το σχήμα διατηρείται από τη δομή στήριξης. Ένα παράδειγμα είναι η σταθεροποιημένη παραφίνη, η οποία μπορεί να παραχθεί με την ενσωμάτωση παραφίνης, σε μικροσκοπικό επίπεδο, σε δομή στήριξης.[6],[4],[7]



Μία άλλη προσέγγιση για τη βελτίωση της μηχανικής σταθερότητας είναι ο εμποτισμός των μηχανικά σταθερών, πορώδων υλικών με το PCM. Για παράδειγμα κεραμικοί κόκκοι έχουν εμποτιστεί με άλατα, σαν PCM, για να αποκτήσουν δυνατότητες αποθήκευσης για θερμοκρασίες αρκετών εκατοντάδων βαθμών κελσίου. Ένα άλλο παράδειγμα είναι ο εμποτισμός των σανίδων ξύλου με παραφίνη. Είναι επίσης δυνατό να συνδυαστούν και οι δύο προσεγγίσεις. Η εταιρεία Rubitherm Technologies ανέπτυξε διάφορα υλικά που αποτελούνται από 3 συστατικά : Μηχανικά πολύ σταθερή και εξαιρετικά πορώδη δομή, οι πόροι των οποίων είναι γεμάτοι με παραφίνη ως PCM και μία πολυμερής δομή για να διατηρηθεί η παραφίνη μέσα στους πόρους. Ως μηχανικά σταθερή και εξαιρετικά πορώδη δομή χρησιμοποιούνται κεραμικά είδη, σκόνες πυριτίου και ξύλινες ινοσανίδες.[6],[4],[7]

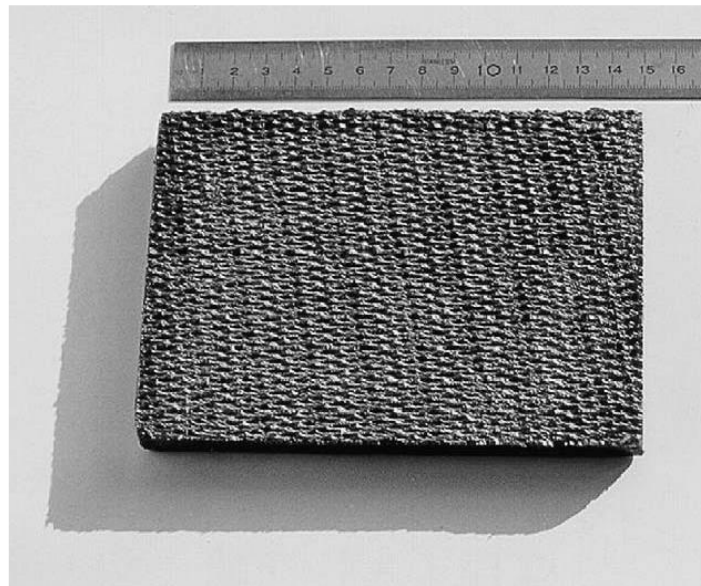
#### 4.5.2. Θερμική αγωγιμότητα

Όλα τα μη μεταλλικά υγρά, συμπεριλαμβανομένου του PCM έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Δεδομένου ότι το PCM αποθηκεύει μεγάλες ποσότητες θερμοκρασίας σε μικρό όγκο και επειδή είναι απαραίτητο να μεταφερθεί αυτή η θερμότητα στο εξωτερικό της αποθήκευσης για να χρησιμοποιηθεί, η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα μπορεί να είναι πρόβλημα. Στην υγρή φάση η διάδοση θερμότητας ενισχύεται σημαντικά, ωστόσο αυτό συχνά δεν επαρκεί. Στη στερεή φάση δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας. Όταν απαιτείται γρήγορη μεταφορά θερμότητας, μπορούμε να αυξήσουμε την θερμική αγωγιμότητα του PCM προσθέτοντας υλικά με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα. Αυτό μπορεί να γίνει σε μικροσκοπική κλίμακα με τη προσθήκη μεταλλικών τεμαχίων-δοχείων ή σε μικροσκοπική κλίμακα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, με σύνθετα υλικά. Ωστόσο, η προσθήκη οποιουδήποτε στοιχείου στο PCM θα μειώσει ή θα εξαλείψει τη μεταφορά στην υγρή του φάση, γι'αυτό είναι απαραίτητο να αποφασίσουμε ποια επιλογή είναι η καλύτερη. Μία προσέγγιση που εξετάζεται για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας είναι η τοποθέτηση του PCM σε μεταλλικούς αφρούς. Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία για την παραγωγή μεταλλικών αφρών διαφορετικού πορώδους και υφής, έχει προχωρήσει σημαντικά. Οι Hackeschmidt έχουν ετοιμάσει και δοκιμάσει συνδυασμούς νερού και παραφίνης ως PCM, με αφρούς αλουμινίου διαφορετικού πορώδους. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι με σχετική πυκνότητα 6% δηλαδή πορώδες 94%, μπορεί να επιτευχθεί θερμική αγωγιμότητα περίπου 6 W/μK. [6],[4],[7]

#### 4.6. Καθυστέρηση πυρκαγιάς των PCM

Τα τελευταία χρόνια, έχουν επιβληθεί αυστηροί κώδικες ασφάλειας στα οικοδομικά υλικά για την προστασία των κτιρίων από τον κίνδυνο πυρκαγιάς. Οι ακόλουθες είναι μερικές προσεγγίσεις που έχουν ερευνηθεί και εφαρμοστεί επιτυχώς σε εργαστηριακά τεστ για να καθυστερούν την πυρκαγιά του PCM σε απορροφητικές γυψοσανίδες :

- Προσθήκη εναλλασσόμενης άφλεκτης επιφάνειας στη γυψοσανίδα ( φύλλο αλουμινίου και άκαμπτη ταινία πολυβινυλικού χλωριδίου).
- Διαδοχική επεξεργασία της γυψοσανίδας, πρώτα στο PCM και έπειτα σε μια αδιάλυτη πυρίμαχη ουσία (π.χ., Fyrol CEF).
- Η χρησιμοποίηση βρωμιούχου δεκαεξανίου και δεκαοκτανίου ως PCM.
- Επιφάνειες επιστρωμένες με επιβραδυντικά φωτιάς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποτρέψουν αποτελεσματικά την υγραντική δράση των γυψοσανίδων που καλύπτονται από χαρτί.[6],[4],[7]



**Σχήμα 4.4.** Σύνθετο υλικό από γραφίτη που χρησιμοποιείται για να αυξήσει τη μεταφορά θερμότητας (κατασκευάστηκε από την ZAE Bayern και εμπορευματοποιήθηκε από τις SGL τεχνολογίες).[27]

## **5. ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ PCM**

### **5.1. Γενικά**

Οι συνεχείς βελτιώσεις στις τεχνολογίες του κελύφους των κτιρίων υποδηλώνουν ότι, στο σύντομο μέλλον όλο και περισσότερα κτίρια θα κατασκευάζονται με χαμηλά φορτία θέρμανσης και ψύξης. Η χρήση καινοτόμων δομικών υλικών που περιέχουν ενεργά θερμικά συστατικά (δηλαδή PCMs), θα είναι ένα σημαντικό βήμα, για την εξοικονόμηση ενέργειας θέρμανσης και ψύξης. Το βασικό πλεονέκτημα της χρήσης PCM είναι ότι προσφέρει βελτίωση στις θερμικές δυνατότητες αποθήκευσης με ελάχιστες αλλαγές στον σχεδιασμό των κτιρίων. Ωστόσο, η επιλογή των θέσεων των PCM, το εύρος θερμοκρασίας μετάβασης και η ποσότητα που θα χρησιμοποιηθεί, είναι απαραίτητα για την αποτελεσματική λειτουργία τους. Οι κύριες μέθοδοι ενσωμάτωσης του PCM σε δομικά υλικά περιλαμβάνουν τη χρήση γυψοσανίδων και άλλων δομικών υλικών, με τους τρόπους που αναφέραμε στο παραπάνω κεφάλαιο.

### **5.2 Ιστορική Αναδρομή**

Τα σημερινά οικιακά και εμπορικά κτίρια κατασκευάζονται ολοένα και πιο ελαφρά και οι ανησυχίες έχουν αυξηθεί σχετικά με την εσωτερική θερμική άνεση λόγω μειωμένου δυναμικού αποθήκευσης θερμότητας. Επικρατεί διαμάχη ανάμεσα στις προσπάθειες για την κατασκευή αποτελεσματικότερων κατασκευών με μικρότερο αντίκτυπο στο περιβάλλον και την χρησιμοποίηση περισσότερης μάζας στην δομή του κτιρίου για θερμική αποθήκευση. Αυτά είναι τα θέματα που ξεχωρίζουν, λόγω των φαινομένων της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής και της συνεχούς αύξησης του ενεργειακού κόστους.[20]

Χωρίς να υπολογίσουμε τις παραδοσιακές κατασκευές πάγου τα λεγόμενα igloo, η πρώτη τεκμηριωμένη χρήση ενός PCM για παθητική θέρμανση κατοικιών, πραγματοποιήθηκε το 1948 από τη Maria Telkes (ερευνήτρια στο ινστιτούτο Μασαχουσέτης MIT-Cambridge). Δίχως να μπορεί να αποκτήσει επιχορήγηση από το MIT συνεργάστηκε με την γλύπτρια Amelia Peabody, η οποία χρηματοδότησε προσωπικά το έργο και την αρχιτέκτονα Eleanor Raymond. Η πρώτη κατοικία κατασκευάστηκε στο Dover της Μασαχουσέτης των Η.Π.Α , από 4 κυβικά θειικό νάτριο, τα οποία ήταν συσκευασμένα σε δοχεία από χάλυβα και τοποθετήθηκαν στους νότιους

υαλοπίνακες, οι οποίοι αερίζονταν από ανεμιστήρες έτσι ώστε να μετακινούν τον ζεστό αέρα στο καθιστικό κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Τους καλοκαιρινούς μήνες η θερμική αποθήκευση ήταν σε θέση να δροσίσει τα γύρω δωμάτια.



*Φωτογραφία του 1948 ( Πρώτη τεκμηριωμένη χρήση PCM, Dr. Maria Telkes) Dover, Massachusetts, USA [20]*

Το σπίτι του Dover λειτούργησε άψογα για δυόμιση χρόνια, ωστόσο το θειικό νάτριο αποικοδομείται σε λίγο χρόνο και χάνει την δυνατότητα διαχωρισμού φάσης του, εάν δεν είναι καλά σφραγισμένο και χημικά επεξεργασμένο. Κατά τη διάρκεια του τρίτου χειμώνα, τα δοχεία του θειικού νατρίου σταμάτησαν να λειτουργούν, με αποτέλεσμα να σταματήσει το πείραμα. Ωστόσο η Dr. Telkes παρέμεινε για αρκετό καιρό αισιόδοξη για την εφαρμογή των PCM σε κτίρια και το 1951 είπε, «Το φως του ήλιου αργά ή γρήγορα θα χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας έτσι κι αλλιώς, οπότε γιατί να περιμένετε; ». [20]

Από το 1948, περισσότεροι πόροι έχουν επενδυθεί στην ανάπτυξη των υλικών αλλαγής φάσης για την αποθήκευση θερμότητας. Τα συστήματα αυτά έχουν μελετηθεί εκτενώς στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και 1990 ( από τους Hawes και Feldman το 1993, Bromley και McKay 1994, Salyer και Sircar 1989). Παρά τα πολυάριθμα πειράματα και τις μελέτες που έχουν διεξαχθεί, είναι γεγονός ότι ένα μεγάλο μέρος

των δυσκολιών που σχετίζονται με τον σχεδιασμό ενισχυμένων συστημάτων με PCM και την μακροπρόθεσμη αντοχή τους έχει ήδη επιλυθεί.[20]

### 5.3 Τρόποι χρήσης PCM.

Η χρήση των PCM στα κτίρια έχει ως τελικό στόχο την παραγωγή θέρμανσης και ψύξης σε αυτά. Υπάρχουν, όμως, δυο διαφορετικοί μέθοδοι επίτευξης του στόχου αυτού. Ο πρώτος είναι η εκμετάλλευση φυσικών πηγών, όπως η ηλιακή ενέργεια και ο νυχτερινός δροσισμός ενώ ο δεύτερος είναι η χρήση τεχνητών πηγών θέρμανσης και ψύξης. Σε κάθε περίπτωση, η αποθήκευση της ενέργειας θα πρέπει να γίνεται έτσι, ώστε να ανταποκρίνεται στην υπάρχουσα ζήτηση και διαθεσιμότητα. Υπάρχουν τρία είδη συστημάτων όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα υλικά αλλαγής φάσης για την θέρμανση ή ψύξη των κτιρίων [8],[20],[6]:

- Παθητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας: είναι εκείνα που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία για θέρμανση ή ψύξη και δεν κάνουν χρήση μηχανικών μέσων για τη μεταφορά της θερμότητας στον χώρο. Βασίζονται στη φυσική ροή της θερμικής ενέργειας, εκμεταλλεύονται τις φυσικές ιδιότητες των υλικών του κτιρίου και χρησιμοποιούν, για τη συλλογή της ηλιακής ενέργειας και την αποθήκευση της θερμότητας, τα δομικά στοιχεία του κελύφους (τοίχους, δάπεδα, οροφές).
- Ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας : απαιτούν τη χρησιμοποίηση μηχανικών μέσων, απλών μέχρι υψηλής τεχνολογίας (αντλίες θερμότητας, εναλλάκτες θερμότητας) προϋποθέτουν σύνθετους μηχανισμούς συλλογής, μεταφοράς και αποθήκευσης της θερμότητας που έχει προέλθει από την ηλιακή ακτινοβολία που δεσμεύτηκε. Ηλιακοί συλλέκτες που θερμαίνουν νερό ή αέρα, το οποίο στη συνέχεια διοχετεύεται στο σύστημα διανομής της θερμότητας στον χώρο με τη μεσολάβηση εναλλάκτη θερμότητας αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα.
- Υβριδικά : είναι συστήματα που συνδυάζουν τη φυσική και τη μηχανική ροή θερμότητας. Βασίζονται στην παθητική εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, παρεμβάλλοντας συγχρόνως μηχανικά συστήματα χαμηλής κατανάλωσης και απλής κατασκευής. Για παράδειγμα, η προσθήκη ενός ανεμιστήρα σε ένα

παθητικό σύστημα, για να υποβοηθήσει τη μεταφορά θερμότητας στους πίσω χώρους του κτιρίου ή ενός θερμοστάτη για να υπάρχει έλεγχος της θερμότητας που αποδίδεται, μετατρέπουν ένα παθητικό ηλιακό σύστημα σε υβριδικό.

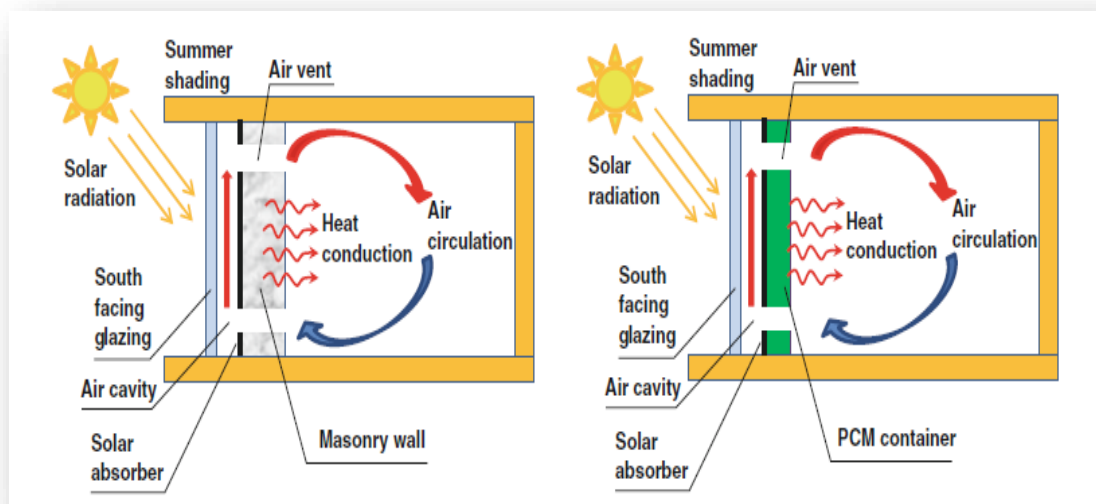
Πιο συγκεκριμένα τα παθητικά συστήματα διακρίνονται σε τρεις τρόπους χρήσης των PCM για θέρμανση και ψύξη: χρήση στην τοιχοποιία, χρήση σε άλλα δομικά υλικά και χρήση σε θερμικές και ψυκτικές αποθηκευτικές μονάδες. Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συγκεκριμένα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με χρήση υλικών αλλαγής φάσης, που έχουν μελετηθεί και πραγματοποιηθεί στον κτιριακό τομέα.[8],[20],[6]

### **5.3.1 Ηλιακοί παθητικοί θερμικοί αποθηκευτικοί τοίχοι με χρήση PCM.**

Η εφαρμογή ενός PCM στην κατασκευή κτιρίων μπορεί να χρησιμοποιήσει τόσο τη θερμότητα από το εξωτερικό (ηλιακή ενέργεια) όσο και τα θερμικά φορτία που παράγονται με συστήματα τεχνητής θέρμανσης ή ψύξης. Επομένως, απαιτείται αποτελεσματική αποθήκευση αυτής της ενέργειας για να ταιριάζει με την ενεργειακή ζήτηση του κτιρίου, την στιγμή που το επιθυμούμε. Οι PCM ηλιακοί τοίχοι χρησιμοποιούνται κυρίως σε ψυχρά κλίματα ή σε κλίματα με πολλές αλλαγές θερμοκρασίας. Ένα βασικό συστατικό αυτών των τοίχων είναι η χωρητικότητα αποθήκευσης θερμότητας. Σε συμβατικές εφαρμογές, χωρίς PCM, η χωρητικότητα αποθήκευσης αυξάνει τον όγκο των παθητικών ηλιακών συστημάτων, γεγονός που δυσχεραίνει τον συνδυασμό τους με, κοινές σήμερα, ελαφριές μεθόδους κατασκευής των ήδη υπάρχων κτιρίων.[8],[6]

Οι ηλιακοί τοίχοι έχουν σχεδιαστεί για να παγιδεύουν και να μεταφέρουν αποτελεσματικά την ηλιακή ενέργεια σε ένα κτίριο. Μονοί είτε διπλοί υαλοπίνακες χρησιμοποιούνται ως εξωτερικό θερμικό φράγμα του τοίχου και του παρέχουν μία κατάσταση, όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Διεξήχθη έρευνα σε διάφορα κτίρια για τον προσδιορισμό της αποτελεσματικότητας ενός PCM στην αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας. Διάφοροι μελετητές και ερευνητές ασχολήθηκαν με μια πρώιμη ιδέα, αυτή των παθητικών ηλιακών τοιχωμάτων, τα οποία αναπτύχθηκαν από τον Γάλλο μηχανικό Felix Trombe και τον αρχιτέκτονα Jacques Michel. Ο τοίχος Trombe είναι ένα παράδειγμα έμμεσων κερδών της παθητικής θέρμανσης που έχει δοκιμαστεί τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά, με την ενσωμάτωση ενός PCM. Η αρχή της

λειτουργίας ενός τοίχου Trombe βασίζεται στην αποθήκευση της αισθητής θερμότητας (Σχήμα 5.3.1.1). Μονό η διπλό τζάμι τοποθετείται συνήθως στην εξωτερική επιφάνεια της μονάδας αποθήκευσης θερμικής μάζας, με λεπτό διάκενο αέρα, ο οποίος χωρίζει αυτά τα δύο υλικά. Η εξωτερική επιφάνεια αποθήκευσης θερμότητας είναι συνήθως βαμμένη με μαύρο χρώμα, έτσι ώστε να απορροφά, όσο το δυνατόν γίνεται, περισσότερη ηλιακή ενέργεια, η οποία στη συνέχεια αποθηκεύεται στον τοίχο. Το χειμώνα και πιο συγκεκριμένα τη νύχτα, η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου πέφτει, έτσι η θερμότητα από την αποθήκευση του τοίχου ακτινοβολεί μέσα στο κτίριο από τον τοίχο Trombe για αρκετές ώρες.[8],[3]



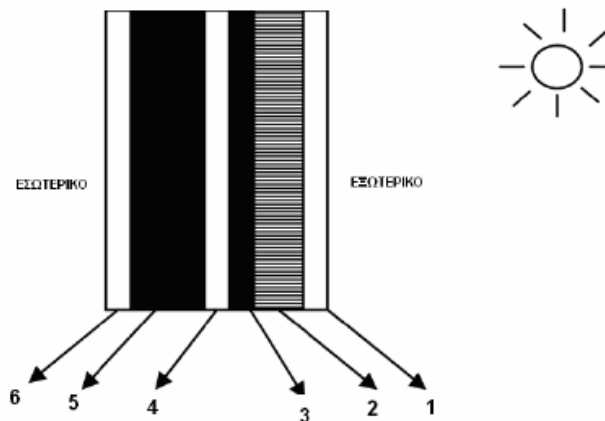
**Σχήμα 5.3.1.1** Λειτουργία ενός κλασσικού τοίχου Trombe (αριστερά) και ενός ειδικά διαμορφωμένου (με PCM) τοίχου Trombe (δεξιά).[8]

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν αναπτυχθεί αρκετές τροποποιήσεις από τον βασικό σχεδιασμό ενός τοίχου κλασσικού και σύνθετου τοίχου Trombe. Αρχικά οι τοίχοι Trombe κατασκευάστηκαν είτε με τοιχοποιία είτε με νερό για να παρέχουν τις κατάλληλες ποσότητες αποθήκευσης θερμότητας. Αυτό όμως απαιτεί μεγάλες εκτάσεις χώρου για να κατασκευαστούν οι τοίχοι. Για τον λόγο αυτό, η μεγαλύτερη αποθήκευση θερμότητας ανά μονάδα μάζας που παρέχεται από το PCM θεωρείται ως η ιδανική ιδιότητα που μπορεί να ενσωματωθεί στα υπάρχοντα συστήματα και να βελτιστοποιήσει τον χώρο για άλλες πρακτικές χρήσεις. Επίσης οι τοίχοι PCM είναι

πολύ λεπτότεροι και ελαφρύτεροι σε σχέση με το παραδοσιακό σκυρόδεμα και τα υλικά τοιχοποιίας. Αυτοί οι παράγοντες προσφέρουν άνεση και ελκυστικές μειώσεις δαπανών, που συνδέονται τόσο με την κατασκευή νέων κτιρίων όσο και με την αναβάθμισή τους.[3]

### 5.3.2 Δομή ηλιακού θερμικού τοίχου.

Οι ηλιακοί τοίχοι αποτελούνται από έξι κύρια τμήματα, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί. Ξεκινώντας από την έξω πλευρά του, ο ηλιακός τοίχος φέρει γυάλινη επιφάνεια (1) ακολουθούμενη από διαφανές μονωτικό υλικό (2). Τα δυο αυτά υλικά επιτρέπουν στην ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος να τα διαπεράσει, αποτρέποντας ταυτόχρονα τη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία. Επόμενο στη σειρά συστατικό είναι το PCM (3). Τοποθετημένο σε διαφανές πλαστικό (πολυεστέρας) δοχείο, απορροφά και αποθηκεύει την ενέργεια ως επί τω πλείστον με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Ακολουθεί ένα διάκενο (4) από το οποίο διέρχεται και θερμαίνεται ο αέρας για τον αερισμό και οδηγείται στον χώρο. Στο τέλος, έχοντας φτάσει στην εσωτερική πλευρά του τοίχου, βρίσκονται δυο ακόμη βασικά δομικά συστατικά του, η μόνωση (5) και ο σοβάς (6). Συχνά χρησιμοποιούμενα PCM στους τοίχους αυτούς είναι τα ένυδρα άλατα και οι υδρογονάνθρακες. Πολλές φορές γίνεται χρήση ειδικών μεταλλικών πρόσθετων για την αύξηση της συνολικής αγωγιμότητας και απόδοσης.[8][28]



**Σχήμα 5.3.2.1** Δομή ηλιακού θερμικού τοίχου.[8]



### 5.3.3 Πλεονεκτήματα.

Οι ηλιακοί τοίχοι παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλα συστήματα:

- Καταλαμβάνουν μικρότερο όγκο και είναι πολύ ελαφρύτεροι για δεδομένη ποσότητα αποθηκευμένης θερμότητας, σε σχέση με άλλους τοίχους αποθήκευσης ενέργειας, λόγω μεγάλης θερμοχωρητικότητας των PCM.
- Χαρακτηρίζονται από υψηλής αποδοτικότητας μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε λανθάνουσα θερμότητα. Αυτό ουσιαστικά οφείλεται στη χρήση του γυαλιού και του διαφανούς μονωτικού υλικού που ακολουθεί. Το πρώτο επιτρέπει την άμεση διέλευση και απορρόφηση της ακτινοβολίας από το PCM, ενώ το δεύτερο εξασφαλίζει μηδενικές απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας στον περιβάλλοντα χώρο.
- Συντελούν στη μείωση των θερμικών απωλειών του χώρου. Μετά από πειράματα διαπιστώθηκε ότι οι απώλειες αγωγής είναι μειωμένες στις επιφάνειες όπου βρίσκεται εγκατεστημένος κάποιος ηλιακός τοίχος. [8],[28]

### 5.3.4 Πειράματα.

Έχει διεξαχθεί ένας μεγάλος αριθμός πειραματικών και θεωρητικών αξιολογήσεων για τη διερεύνηση της ενεργειακής απόδοσης και της μακροπρόθεσμης αξιοπιστίας του PCM, με βάση τα στοιχεία αποθήκευσης θερμότητας του τοίχου Trombe. Πολλοί μελετητές διεξήγαγαν πειράματα, για να επιβεβαιώσουν τη θετική συμβολή των υλικών αλλαγής φάσης (PCM) σε ήδη υπάρχοντα παθητικά ηλιακά συστήματα, όπως ο τοίχος Trombe.[8]

Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν ενυδατωμένα πλαίσια για αυτό τον σκοπό, όπως το πείραμα της Telkes στο Dover. Ο Castellon και άλλοι διερεύνησαν, αν η προσθήκη PCM σε ήδη υπάρχοντα τοίχο Trombe, νότιου προσανατολισμού, θα μπορούσε να μειώσει τις απαιτήσεις θερμικού και ψυκτικού φορτίου στα μεσογειακά κλίματα καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Ο Bourdeau δοκίμασε δυο ηλιακούς τοίχους ως PCM. Τα αποτελέσματα των δοκιμών του έδειξαν ότι ο τοίχος με το PCM, πάχους 8.1 cm, είχε ελαφρώς καλύτερες θερμικές επιδόσεις σε σχέση με έναν απλό πλίνθινο τοίχο, πάχους 40 cm. Ο Knowler με τη σειρά του διεξήγαγε τις δικές του έρευνες χρησιμοποιώντας παραφίνη εμπορίου αναμειγμένη με μεταλλικά πρόσθετα για αύξηση της συνολικής αγωγιμότητας, άρα και απόδοσης, του τοίχου Trombe στον οποίο ενσωματώθηκε. Οι Buddhi και Sharma μελέτησαν την εκπομπή ηλιακής ακτινοβολίας μέσω PCM για

διαφορετικές θερμοκρασίες και ποικίλα πάχη. Ως υλικό αλλαγής φάσης χρησιμοποιήσαν το στεατικό οξύ. Τα αποτελέσματα της μελέτης τους απέδειξαν ότι η εκπομπή ακτινοβολίας είναι υψηλότερη μέσω PCM παρά μέσω γυαλιού του ίδιου πάχους, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά ως μονωτικά υλικά τοίχων ή ακόμη και παραθύρων.[8]

Μια ακόμη εφαρμογή ηλιακού τοίχου σχεδιάστηκε από τους Stiritih και Novak [8]. Οι δυο μελετητές κατασκεύασαν έναν πειραματικό τοίχο, που περιείχε μαύρη παραφίνη ως PCM για την αποθήκευση της θερμότητας. Η αποθηκευμένη ενέργεια χρησιμοποιήθηκε για τη θέρμανση και τον αερισμό μιας κατοικίας. Τα αποτελέσματα, σύμφωνα με τους μελετητές, ήταν πολύ ενθαρρυντικά.[8]

Τέλος, πολλά είναι τα πειράματα και οι θεωρητικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της αξιοπιστίας του θεικού νατρίου ως PCM σε τοίχο Trombe νοτίου προσανατολισμού. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων ήταν ικανοποιητικά, επιβεβαιώνοντας την άποψη ότι η χρήση ηλιακού τοίχου παρέχει αποδοτικότερη ενεργειακή αποθήκευση σε σχέση με τον απλό.[8][3]

#### **5.4 Τοίχοι PCM με εμποτισμένο σκυρόδεμα και κεραμική τοιχοποιία.**

Ακόμα μία μέθοδος εφαρμογής PCM σε κτιριακές κατασκευές είναι η ενσωμάτωση του PCM σε τσιμέντο σκυροδέματος. 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) στα οποία έχουν προηγουμένως ενσωματωθεί υλικά αλλαγής φάσης. Αυτά, δίνουν τη δυνατότητα στον τοίχο να αποθηκεύσει ενέργεια με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας και να την αποδώσει στον χώρο, όταν η θερμοκρασία του μειωθεί. Οι τρόποι ενσωμάτωσης των PCM στα δομικά υλικά, είναι οι εξής:

- άμεση ενσωμάτωση,
- απορρόφηση,
- συσκευασία
- ενσωμάτωση σε πολυστρωματικές σανίδες.

Μερικές εφαρμογές τέτοιων συστημάτων σχεδιάστηκαν από διάφορους μελετητές οι οποίες περιγράφονται παρακάτω. [8],[2]

Ο Peirro [6] ήταν από τους πρώτους που μελέτησαν τη χρήση τοίχων PCM για σύντομης διάρκειας αποθήκευση θερμότητας σε παθητικά ηλιακά συστήματα άμεσου κέρδους. Τα υλικά αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα λιπαρά οξέα. Σκοπός των μελετητών ήταν η εξεύρεση της βέλτιστης θερμοκρασίας αλλαγής φάσης και το βέλτιστο πάχος του τοίχου. Τα αποτελέσματα έδειξαν άμεση εξοικονόμηση ενέργειας 5-20%. [6]

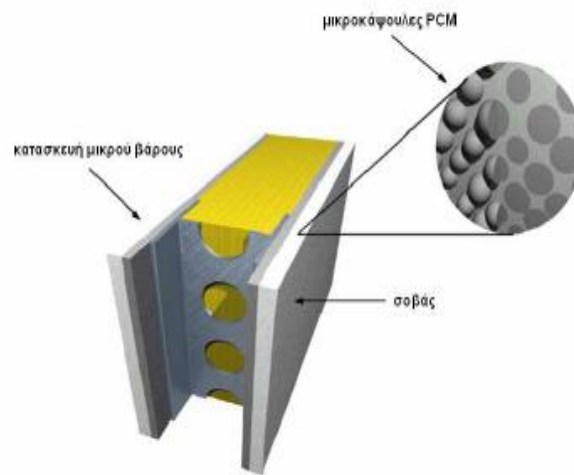
Ο Hawes [6] ανέφερε ότι συγκεκριμένες τροποποιήσεις και τεχνικές ενσωμάτωσης PCM επηρεάζουν σημαντικά τη θερμική ικανότητα αποθήκευσης, μετά από αναλυτική μελέτη της θερμικής απόδοσής του PCM σε διαφορετικούς τύπους σκυροδεμάτων. Ωστόσο, η αντοχή του σκυροδέματος ήταν σημαντικά μειωμένη με τη εφαρμογή του υλικού αλλαγής φάσης. Αργότερα μελετήθηκε ένα καινοτόμο σκυρόδεμα με PCM, με σκοπό να μην επηρεάζεται η μηχανική αντοχή του σκυροδέματος (Cabeza). Μετά από περάματα οι Cabeza [25],[26], διαπίστωσαν ότι το σκυρόδεμα έφτασε θλιπτική αντοχή άνω των 25 MPa και αντοχή σε εφελκυσμό άνω των 6 MPa, επίσης πολύ σημαντικό είναι ότι δεν προέκυψαν διαφορές μετά από 6 μήνες λειτουργίας του.[6]

Μια άλλη μέθοδος εφαρμογής του PCM που ενσωματώνεται στο σκυρόδεμα, επισημαίνεται σε μια πιο πρόσφατη εργασία του Zhang [7] . Σε αυτά τα πειράματα, ελαφριά αδρανή υλικά με υψηλό πορώδες χρησιμοποιήθηκαν ως φορείς του PCM για να επιτευχθεί επαρκής αποθήκευση θερμότητας. Σε ορισμένους τύπους, ενισχυμένων PCM, τοιχοποιίας τοποθετήθηκαν αδρανή υλικά, τα οποία περιβάλλονται από πάστα τσιμέντου, γεγονός που μειώνει την πιθανότητα διαρροής ενός PCM.[7]

Ο Feldman [8] διεξήγαγε εκτενή έρευνα σχετικά με τη χρήση και σταθερότητα των οργανικών υλικών αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, συμπεριλαμβανομένων των λιπαρών οξέων, του βουτυλικού εστέρα, της δωδεκανόλης και της πολυαιθυλικής γλυκόλης. Εκτός από τον έλεγχο των προαναφερθέντων υλικών, η έρευνά του επεκτάθηκε και σε άλλα υλικά που δρουν ως απορροφητές των PCM, παραδείγματος χάρη ο γύψος και κάποια είδη τσιμέντου. Πιο συγκεκριμένα, εξέτασε την ικανότητα ενεργειακής αποθήκευσης ενός τοίχου από γύψο και εμπορικό βουτυλικό εστέρα (BS), σύστασης 21-22%, κατασκευασμένου με άμεση ενσωμάτωση κατά το στάδιο παραγωγής της γυψοσανίδας. Τελικά παρατηρήθηκε δεκαπλάσια

αύξηση της ικανότητας αποθήκευσης ενέργειας αυτού του τοίχου σε σχέση με τους συμβατικούς. [6],[8]

Πολλές ακόμη μελέτες τέτοιων συστημάτων έχουν πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων χρόνων από πλήθος ερευνητών. Οι περισσότερες από αυτές χρησιμοποίησαν τα υλικά αλλαγής φάσης είτε σε μακρο-κάψουλες είτε μέσω άμεσης ενσωμάτωσης στην τοιχοποιία, εμφανίζοντας αρκετές αδυναμίες. Λόγω αυτών των προβλημάτων κανένα από τα παραπάνω προϊόντα δεν καθιερώθηκε επιτυχώς στην ευρύτερη αγορά. Ωστόσο, μια αποτελεσματικότερη επιλογή χωρίς ιδιαίτερα μειονεκτήματα, που άρχισε να μελετάται την τελευταία 5ετία, είναι η χρήση του PCM μικρο-ενθυλάκωσης. Το εγχείρημα αυτό πραγματοποιείται από τη γερμανική εταιρία Fraunhofer ISE με τη βοήθεια κυβερνητικής χρηματοδότησης και επεκτείνει τις προσομοιωτικές κτιριακές μελέτες σε πραγματικές μετρήσεις κανονικών δωματίων εφοδιασμένων με PCM. Τα αποτελέσματα, σύμφωνα με τον ερευνητή Schossig, είναι θετικά δίνοντας κίνητρο για την κατασκευή κατάλληλων προϊόντων διαθέσιμων στην κτιριακή αγορά.[6]



*Σχηματική απεικόνιση τοίχου PCM. Οι μικροκάψουλες του υλικού αλλαγής φάσης βρίσκονται ενσωματωμένες στο εσωτερικό της γύψου[29]*

## 5.5 Ενεργειακά Αποδοτικά Παράθυρα.

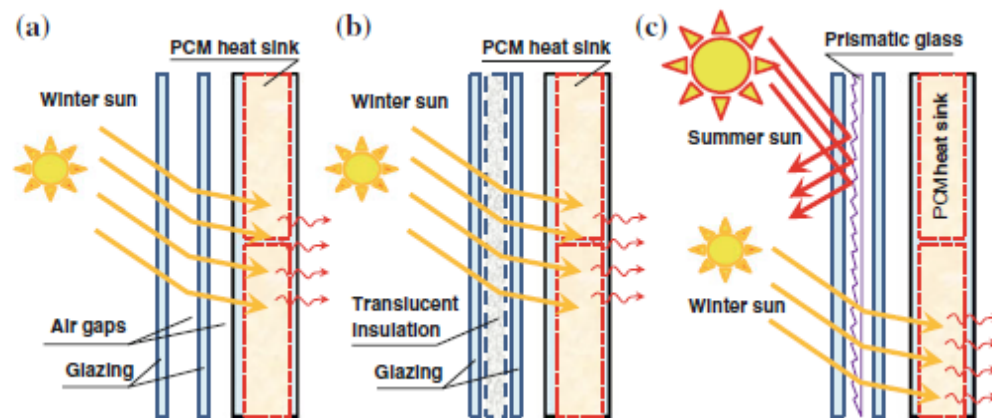
Άλλη μια εφαρμογή του PCM αφορά τα αδιαφανή στοιχεία των κτιρίων. Το PCM επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα προϊόντα περίφραξης, καθώς αποτελούν σημαντικό μέρος του κτιρίου. Στις συμβατικές εφαρμογές, η θερμική απόδοση της εξαέρωσης βελτιώνεται με τη χρήση απορροφητικών αερίων που γεμίζουν το διάκενο μεταξύ του φύλλων γυαλιού ή με την εφαρμογή θερμικά μονωμένων τζαμιών. Όταν μόνο η διαφάνεια είναι σημαντική, μπορούν να ενσωματωθούν νέα υλικά σε γυάλινους υαλοπίνακες, όπως αερόπηγμα πυριτίας ή ημιπερατό PCM. Και οι δύο αυτές εφαρμογές απαιτούν σοβαρή εξέταση των οπτικών ιδιοτήτων και της λειτουργίας του παραθύρου. [4]

Ο στόχος της χρήσης PCM στο παράθυρο, σε υαλοπίνακες ή παραθυρόφυλλα, είναι να χρησιμοποιήσουν την υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τους για να μειώσουν τα παραγόμενα θερμικά φορτία από τα παράθυρα, απορροφώντας τη θερμότητα πριν φτάσει στον εσωτερικό χώρο. Ο κύκλος αλλαγής φάσης μπορεί να σταθεροποιήσει τη θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου και να μειώσει τα θερμαινόμενα και ψυχόμενα φορτία. Τα παράθυρα με PCM θα μπορούσαμε να πούμε ότι λειτουργούν όπως οι οπτικά διαφανείς ή ημιδιαφανείς τοίχοι Trombe. Αυτοί συνήθως αποτελούνται από μονωτικό ή πολυστρωματικό τζάμι, από συμβατικό γυαλί, με ενσωματωμένο ένα στρώμα από ένα διαφανές ή ημιδιαφανές προϊόν PCM. Σε δυναμικά παράθυρα, το PCM αλλάζει τη φάση από στερεή σε υγρή όταν θερμαίνεται, απορροφώντας έτσι τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια στην ενδοθερμική διαδικασία. Συνήθως την ίδια στιγμή αλλάζει και η διαφάνεια του PCM. Όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος μειώνεται κατά τη διάρκεια της νύχτας, το λιωμένο PCM στερεοποιείται, ενώ εκπέμπει την προηγούμενα απορροφούμενη θερμότητα στην εξωθερμική διαδικασία.[4]

Η κατάλληλη περιοχή θερμοκρασίας αλλαγής φάσης, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες και τις επιθυμητές θερμοκρασίες, όπως και η δυνατότητα της απορρόφησης και απελευθέρωσης μεγάλων ποσοστών θερμικής ενέργειας, είναι απαιτούμενα για τη σωστή λειτουργία των ενσωματωμένων παραθύρων με PCM. Επίσης είναι απαραίτητο τόσο η μεταβατική ικανότητα αλλαγής φάσης, όσο και τα οπτικά χαρακτηριστικά να μην υποβαθμίζονται με την πάροδο του χρόνου, πράγμα που αποτελεί κρίσιμη επιλογή για την επιλογή του PCM.[4]

Οι ημιδιαφανείς τοίχοι Trombe κατασκευάζονται κατά τρόπο ώστε να μεταδίδουν το φως και να φωτίζουν το εσωτερικό του κτιρίου. Στα συμβατικά

συστήματα ηλιακής εξαέρωσης, η διακύμανση της θερμοκρασίας μέσα στο σύστημα, έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια θερμότητας από το εσωτερικό του κτιρίου στο εξωτερικό κατά τη χειμερινή περίοδο. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, οι απώλειες θερμότητας μέσω των υαλοπινάκων μπορούν να μειωθούν χρησιμοποιώντας μια διαφανή μόνωση (κενό) ή ημιδιαφανή πληρωτικά υλικά τοποθετημένα μεταξύ των τζαμιών του παραθύρου. Η διαφανής ή ημιδιαφανής θερμομόνωση μεταδίδει την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία τότε απορροφάται από ένα στρώμα PCM, το οποίο είναι συνήθως, εν μέρει διαφανές όταν λιώνει. Προκειμένου να βελτιωθεί περαιτέρω η θερμική απόδοση, τα διαφανή/αδιαφανή τοιχώματα αποθήκευσης μπορούν να χρησιμοποιήσουν επιλεγμένο γυαλί. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το εξωτερικό πρισματικό γυαλί για να αντανάκλα την ηλιακή ακτινοβολία.[4],[8]



*Διάφορες επιλογές διαμόρφωσης ημι-διάφανων ηλιακών περσίδων PCM: Θερμαινόμενο τοίχωμα που περιέχει PCM (αριστερά), διαφανές τοίχωμα Trombe με θέρμανση PCM (μεσαίο), σύστημα ηλιακής εξαέρωσης με ψύκτρα PCM και επιλεκτικό πρισματικό τζάμι (δεξιά).[20]*

Η ιδέα των ηλιακών παραθύρων που χρησιμοποιούν PCM-ενισχυμένα προϊόντα παραθύρων, είναι μια βελτιωμένη εναλλακτική λύση. Ωστόσο, όσο αναφορά την συγκεκριμένη τεχνική, δεν έχει υπάρξει επιτυχημένη εφαρμογή, επιπλέον πολλοί ημιδιαφανείς ηλιακοί τοίχοι παρουσιάζουν πολλά μειονεκτήματα. Το ένα είναι η μειωμένη οπτική επιφάνεια, η άλλη είναι η περιορισμένη θερμική χωρητικότητα αποθήκευσης. Αυτά τα συστήματα πρέπει να έχουν επαρκή θερμική μάζα με σημαντικό αποτέλεσμα να έχουν σημαντική αύξηση πάχους από το ενσωματωμένο PCM. Εδώ είναι που τα προσαρτήματα των παραθύρων με PCM (περσίδες, παντζούρια

ή κουρτίνες) προσφέρουν μια μοναδική λύση : ένα λεπτό, κινητό στρώμα PCM το οποίο μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί όπως απαιτείται, χωρίς να επηρεάζονται οι οπτικές ιδιότητες των παραθύρων. Ένα σύστημα που χρησιμοποιεί κινητές ψύκτρες PCM πρέπει να εγκατασταθεί στη νότια πλευρά των παραθύρων. Όταν χρησιμοποιείται ένα τέτοιου είδους σύστημα, κατά τη διάρκεια της ημέρας το προσάρτημα του παραθύρου θερμαίνεται από την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, λιώνοντας το PCM. Τη νύχτα αυτή η θερμότητα χρησιμοποιείται για να θερμάνει τον εσωτερικό χώρο. Τα παντζούρια και οι περσίδες των παραθύρων είναι συνήθως κατασκευασμένα από πλαστικό ή αφρό αλουμινίου. Τα ίδια υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PCMs, έτσι ώστε να γεμίσουν τις υπάρχουσες κοιλότητες και να αντικατασταθεί ο αφρός ως υλικό πλήρωσης.[4],[8]

## **5.6. Βελτιωμένα με PCM δάπεδα και οροφές.**

### **5.6.1 Δάπεδα**

Τα συμβατικά παθητικά ηλιακά συστήματα βασίζονται εδώ και δεκαετίες στην αισθητή αποθήκευση θερμότητας των εσωτερικών τοίχων και δαπέδων, για εξοικονόμηση ενέργειας. Ωστόσο, πρόσφατες έρευνες διερεύνησαν τα πλεονεκτήματα της αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας για πρόσθετη εξοικονόμηση ενέργειας σε παθητικές ηλιακές εφαρμογές. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την ενσωμάτωση του PCM σε υλικά δαπέδου που χρησιμοποιούνται σε παθητικά ηλιακά σπίτια. Για το σκοπό αυτό οι σανίδες δαπέδου, τα πλακάκια ή τα πάνελ μπορούν να ενισχυθούν με PCM. Η αποθήκευση της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας και η απελευθέρωσή της κατά τη διάρκεια της νύχτας μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του κτιρίου για θερμική άνεση.[8]

Ανάλογα με τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, η οποία πρέπει να βρίσκεται μεταξύ των 21° C και 23° C, το PCM αναμένεται να είναι αποτελεσματικό κατά τη διάρκεια της αρχής και του τέλους της εποχής του χειμώνα, καθώς και κατά τη διάρκεια των εαρινών και φθινοπωρινών εποχών. Σε αυτές τις εποχές, τα ηλιακά κέρδη και οι μεγάλες, σχετικά, θερμοκρασίες περιβάλλοντος μπορεί να είναι επαρκείς για να λιώσει το PCM κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αντίστοιχα, τη νύχτα η θερμοκρασία του περιβάλλοντος μπορεί να είναι ικανοποιητικά χαμηλή για να αποφορτίσει την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο PCM.[8]

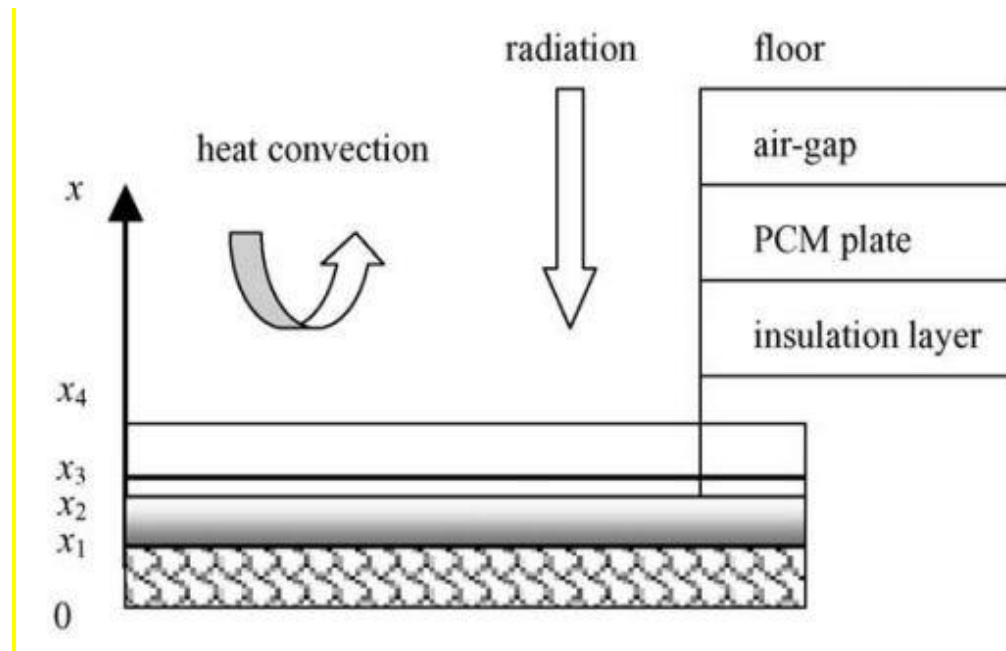
Ένα παράδειγμα παθητικού ηλιακού χώρου σχεδιασμένο με εξαρτήματα δαπέδου ενισχυμένα με PCM, είναι το σύστημα δαπέδου που ερευνήθηκε από την Σταματιάδου (2009) [30] για το κλίμα της Αθήνας, στην Ελλάδα. Απέδειξε ότι η προσθήκη παραφινικού PCM (ειδικής θερμικής ικανότητας 110 kJ/kg) σε συμβατικά πλακάκια που χρησιμοποιούνται για εφαρμογές δαπέδων, έχει θετική επίδραση στη θέρμανση σε περιπτώσεις άμεσης έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία. Τα PCM-πλακάκια δαπέδου για ηλιακό χώρο συγκρίθηκαν με ένα τυπικό μαρμάρينو επίπεδο πλακάκι. Το παθητικό ηλιακό σύστημα θέρμανσης απέδωσε μέγιστη ηλιακή εξοικονόμηση περίπου 4%, η οποία μπορεί να μεταφραστεί άμεσα σε μείωση απαίτησης θέρμανσης του κτιρίου.[30]

#### 5.6.1.1 Ενδοδαπέδιο ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης (με PCM)

Το πάτωμα είναι ένα εξίσου σημαντικό σημείο ενός κτιρίου και επομένως δοκιμάστηκε και η χρήση αυτού για τη θέρμανση και την ψύξη. Οι Ahtienities και Chen [30] ερεύνησαν την μεταφορά θερμότητας στα συστήματα θέρμανσης του πατώματος. Η μελέτη τους επικεντρώθηκε στην επιρροή του καλύμματος και της ηλιακής ακτινοβολίας στην θερμοκρασιακή κατανομή του πατώματος και στην κατανάλωση ενέργειας. Περιοχές καλυμμένες ολόκληρες ή και μερικώς από χαλί, λήφθηκαν υπόψη, όπως επίσης και περιοχές με ξύλινη επικάλυψη του τσιμέντου ή του μείγματος γύψου-τσιμέντου. Πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα από προσομοιώσεις για ένα εξωτερικό δωμάτιο δοκιμών, αποκαλύπτουν ότι η οριζόντια ακτινοβολία μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας της περιοχής του πατώματος που φωτίζεται κατά 8 °C περισσότερο σε σχέση με αυτή που βρίσκεται υπό σκιά. Η μερική κάλυψη δε του πατώματος με χαλί, αυξάνει την θερμοκρασιακή διαφορά του πατώματος στους 15 °C όταν απορροφάται ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία που αποθηκεύεται στην θερμική μάζα του πατώματος αποδείχτηκε ότι μειώνει την κατανάλωση ενέργειας για θερμότητα κατά 30% περίπου, ενώ η αύξηση της θερμικής μάζας από 5 cm σε 10 cm δεν έδειξε να οδηγεί σε μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Παρακάτω δίνεται η σχηματική αναπαράσταση του δωματίου δοκιμών.[3][2]



Με τα υλικά αλλαγής φάσης, μας δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε μια μοναδική εφαρμογή ενδοδαπέδιας θέρμανσης, η οποία μειώνει την κατανάλωση της θέρμανσης σημαντικά. Διαλέγοντας ένα PCM 25 ή 28 βαθμών κελσίου, κάνει πολύ εύκολη την θέρμανση ενός κατοικήσιμου σπιτιού. Το ενδοδαπέδιο PCM πρέπει πρώτα να φορτιστεί. Αυτό συνήθως συμβαίνει τη διάρκεια της νύχτας σε χαμηλή θερμοκρασία νερού , π.χ. 35-30 βαθμούς κελσίου.[3]



Η αποθηκευμένη ενέργεια, με την οποία, έχει φορτιστεί το PCM διαχέεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, ανάλογα με την απαιτούμενη θερμότητα. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα που μπορεί να προσφέρει ένα PCM πάνελ είναι η συσσώρευση θερμότητας. Ένα πάνελ 13 εκ. από PCM μπορεί να συσσωρεύσει όση θερμότητα συσσωρεύουν τα 30 εκ. σκυροδέματος. Από αριθμητική άποψη, εγκαθίσταται ένα πολύ “βαρύ δάπεδο”. Συνδέοντας αυτό με τα παθητικά σχέδια κατασκευής σπιτιών είναι σίγουρα δυνατό, άλλα τα παθητικά σχέδια είναι σίγουρα απαραίτητα. Αυτό έχει το άμεσο πλεονέκτημα ότι αρκεί μόνωση 15 εκ. σε τοίχους, οροφή και δάπεδο, για τη δημιουργία ενός άριστα μονωμένου σπιτιού.



*Ενδοδαπέδιο ηλεκτρικό πάτωμα με PCM[31]*

Με τα ενδοδαπέδια PCM, γίνεται δυνατή η κατασκευή σπιτιών με μόνο ηλεκτρικό περιεχόμενο, δηλαδή χωρίς την εξάρτηση από φυσικό αέριο ή πετρέλαιο. Αυτό κάνει δυνατή τη χρήση, μικρών ατομικών ηλεκτρικών αντλιών θερμότητας από αέρα ή νερό, πολύ ελκυστική. Με αυτό τον τρόπο το σπίτι γίνεται εντελώς αυτόνομο. Αυτό συμβαίνει επειδή η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί, λαμβάνοντας ηλεκτρική ενέργεια από ηλιακά πάνελ. Εάν η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από βιώσιμη πηγή, όπως ηλιακοί συλλέκτες, τότε η αντλία θερμότητας είναι 100% ουδέτερη για το κλίμα. Επομένως το σύστημα προσφέρει τη δυνατότητα ανεξαρτησίας από τα ορυκτά καύσιμα.

Είτε πρόκειται για κατασκευή είτε για εργασίες ανακαίνισης ισχύουν τα εξής: εάν χρησιμοποιηθούν δάπεδα PCM, θα γίνει άμεση εξοικονόμηση ενέργειας.

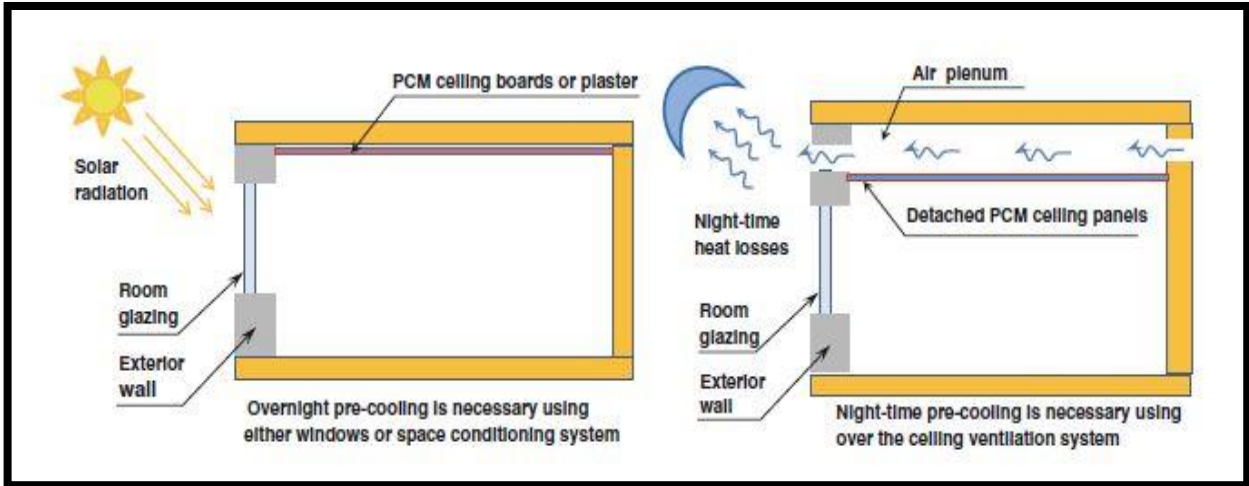
Στην περίπτωση νέων κατοικιών, η χρήση μικρών ηλεκτρικών αντλιών θερμότητας είναι πιο κατάλληλη, καθώς μια σύνδεση αερίου μπορεί να αποφευχθεί εύκολα. Κατά την ανακαίνιση σπιτιών, στα οποία έχει ήδη πραγματοποιηθεί εγκατάσταση αερίου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μικρότερο λέβητα ή μικρή αντλία θερμότητας.

Όσο αναφορά την ψύξη, το ενδοδαπέδιο πάτωμα με PCM έχει ψυκτική επίδραση σε οποιαδήποτε εποχή. Ένα μερικώς φορτισμένο δάπεδο PCM θα απορροφήσει και στη συνέχεια θα αποθηκεύσει αισθητή θερμότητα που προκαλείται

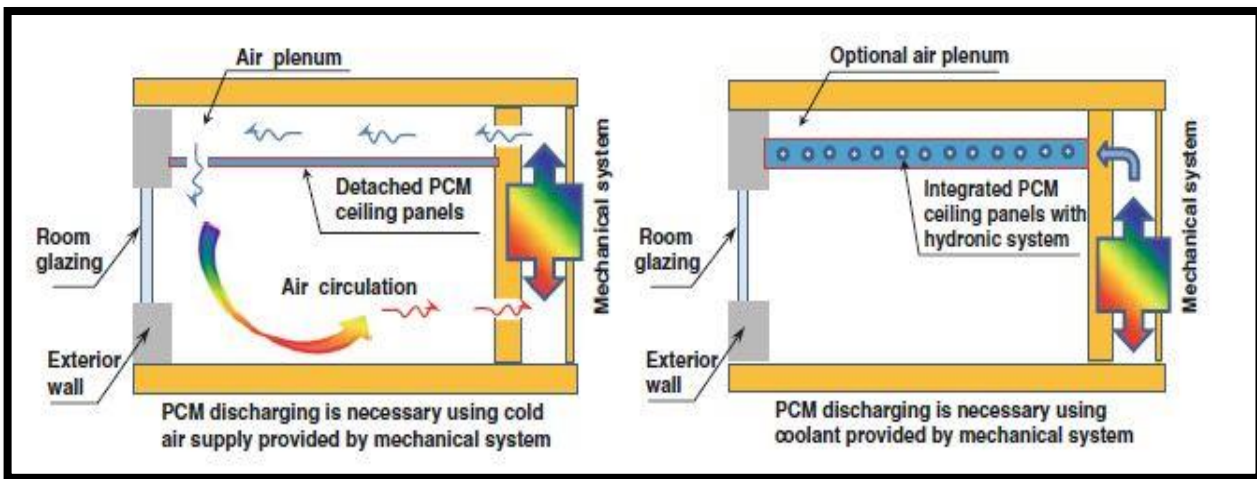
για παράδειγμα από την ηλιακή θερμότητα. Κατά συνέπεια η θερμοκρασία του χώρου δεν θα αυξηθεί παρά το αντιληπτό θερμικό φορτίο του ήλιου. Το καλοκαίρι αυτό οδηγεί σε ψύξη, ενώ το χειμώνα αυτό το φαινόμενο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μερική φόρτιση του δαπέδου με ηλιακή ενέργεια. Η υπερθέρμανση των περιοχών εμποδίζεται σε όλες τις εποχές. Όλα αυτά εξαρτώνται από μια στρατηγική ελέγχου για την οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι ελεγκτές, οι οποίοι συνήθως περιλαμβάνονται σε συσκευές που παράγουν θερμότητα.

### 5.6.2 Οροφές

Από την σχεδιαστική όψη, οι εφαρμογές ψύξης PCM σε οροφές είναι είτε παθητικές (παρόμοιες με γυψοσανίδες τοίχου ενισχυμένες με PCM ή εσωτερικούς σοβάδες) είτε ενεργητικές, οι οποίες συνήθως αποτελούν μέρος πιο περίπλοκων δυναμικών συστημάτων κλιματισμού, που χρησιμοποιούν κατά τη διάρκεια της νύχτας, μια πρόψυξη (δηλαδή υδραυλικά συστήματα, εναλλάκτες θερμότητας μικροσωληνώσεων και κανάλια αέρα). Παλαιότερες έρευνες επικεντρώθηκαν στα συμβατικά συστήματα ψύξης οροφών και έδειξαν ότι μπορούν να προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα παραδοσιακά συστήματα κλιματισμού του χώρου. Εν συντομία, σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να παρατηρηθεί, κυρίως επειδή η θερμική άνεση επιτυγχάνεται με υψηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες, συνήθως 28° C. Επιπρόσθετη εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται λόγω των διαθέσιμων μεγάλων επιφανειών ψύξης, οι οποίες επιτρέπουν υψηλότερες θερμοκρασίες ψύξης του νερού. Η άνεση βελτιώνεται λόγω της ελαχιστοποίησης της κίνησης του αέρα και της θερμοκρασίας της επιφάνειας και της εξάλειψης του θορύβου που μπορεί να δημιουργείται από πηνία ανεμιστήρων εξαερισμού, αλλά και λόγω της ομοιομορφίας της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα. [20]



*Παθητικό σύστημα οροφών με PCM [20]*



*Ενεργητικό σύστημα οροφών με PCM [20]*

Επίσης, τα μέγιστα φορτία ψύξης μπορούν να μειωθούν λόγω της ψυχρής αποθήκευσης μέσα στην οροφή, αλλά και στα παρακείμενα δομικά στοιχεία. Όλες οι μελέτες και έρευνες που έχουν γίνει έχουν αποδείξει ότι η προσθήκη PCM στο σύστημα ψύξης της οροφής μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου και να μειώσουν τον κίνδυνο συμπύκνωσης υγρασίας.

Σε γενικές γραμμές, το συγκεκριμένο σύστημα παρουσιάζει τα επόμενα πλεονεκτήματα:

- Αποτελεσματικότερη αποθήκευση θερμότητας, λόγω της υψηλής πυκνότητας του ψυχρού αέρα που έρχεται σε επαφή με τη σανίδα οροφής PCM.
- Μεγαλύτερη επιφάνεια αποθήκευσης θερμότητας, λόγω της απρόσκοπτης ροής του ψυχρού αέρα στο εσωτερικό του χώρου οροφής, χωρίς την επίδραση οποιασδήποτε ακτινοβολίας.
- Αύξηση του επιπέδου θερμικής άνεσης του δωματίου, καθώς η θερμοκρασία της σανίδας οροφής διατηρείται στο σημείο τήξης του PCM για μια αρκετά εκτεταμένη χρονική περίοδο.[20]

#### 5.7. Στέγες και σοφίτες

Σήμερα οι συμβατικές στέγες και οι σοφίτες είναι θερμικά σχεδιασμένες με βάση τα κριτήρια σταθερότητας θερμικής αντίστασης που χρησιμοποιούνται από τη πλειονότητα των πρότυπων κατασκευής, ως μέτρηση της θερμικής απόδοσης. Ταυτόχρονα τα περισσότερα από τα στοιχεία του κελύφους του κτιρίου επηρεάζονται από περιβαλλοντικές δυναμικές συνθήκες. Τα φορτία των κτιρίων είναι συχνά πολύπλοκοι συνδυασμοί από αγωγίμους και ακτινοβολούμενους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας. Αρχές που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό των στεγών είναι η σταθερότητα και η δυναμική τους λειτουργία, αυτά τα δύο είναι σε μεγάλο βαθμό αντιφατικά. Ως αποτέλεσμα η δυναμική λειτουργία σε συνδυασμό με βραχύτερους θερμικούς σχεδιασμούς αποδίδει σχετικά χαμηλή θερμική αποτελεσματικότητα. Με τον κατάλληλο θερμικό σχεδιασμό, ο οποίος συνδυάζει την αποθήκευση θερμότητας και τον έλεγχο ακτινοβολίας, τα δυναμικά φορτία μπορούν να μειωθούν ή ακόμη να εξαλειφθούν πλήρως, βελτιώνοντας έτσι τη συνολική ενεργειακή απόδοση του κτιρίου. Οι καλά σχεδιασμένες στέγες, όχι μόνο βελτιώνουν τη θερμική αντίσταση, αλλά και ελαχιστοποιούν τις θερμικές δυναμικές διεγέρσεις. Μερικά εξελιγμένα συστήματα θέρμανσης μπορούν επίσης να εξαντλήσουν ή να απορροφήσουν ένα μέρος των φορτίων του δυναμικού περιβάλλοντος ( ανάλογα με τη κλιματική περίοδο).[20]

### 5.7.1 Πειράματα

Το 2006 οι Kissock και Limas [30], διερεύνησαν τη παραφίνη ως PCM που μπορεί να προστεθεί στις εμπορικές στέγες από χάλυβα, για τη μείωση των ημερήσιων, θερμικών και ψυκτικών φορτίων. Το PCM που μελετήθηκε ήταν το οκταδεκάνιο παραφίνης, με μέση θερμοκρασία τήξης 25,6 °C. Η μεταλλική οροφή που αναλύθηκε είχε δύο στρώματα πάχους 1 inch πολυϊσοκυανουρικού αφρού. Το κάτω στρώμα του αφρού ενισχύθηκε με το παραφινικό PCM. Ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα διατηρήθηκε σταθερή και σε σύγκριση με μία συμβατική οροφή η εξοικονόμηση του φορτίου ψύξης ήταν κοντά στο 14%. [20]

Μία διαμόρφωση οροφής που περιέχει μεταλλικά φύλλα με φωτοβολταϊκά και υλικά PCM μελετήθηκε στο Tennessee. Ήταν μια νέα τεχνολογία ηλιακής οροφής, η οποία χρησιμοποιεί μεταλλικά πάνελ με ενσωματωμένο φωτοβολταϊκό πυρίτιο, αεριζόμενη κοιλότητα αέρα, πυκνή μόνωση υαλοβάμβακα και παρατεταγμένα PCM με βάση το βιολογικό περιβάλλον. Η θερμική απόδοση της πειραματικής οροφής συγκρίθηκε με μία συμβατική. Τα δεδομένα των δοκιμών απέδειξαν ότι κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, χωρίς τη συμβολή της αλλαγής φάσης, τα φορτία θέρμανσης που παράγονται από τη στέγη μειώθηκαν κατά 30%. Αντίστροφα κατά την εποχή του χειμώνα τα ψυκτικά φορτία ήταν κατά 55% χαμηλότερα. Οι μέγιστες ροές θερμότητας που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια της ημέρας ήταν 90%. [20]

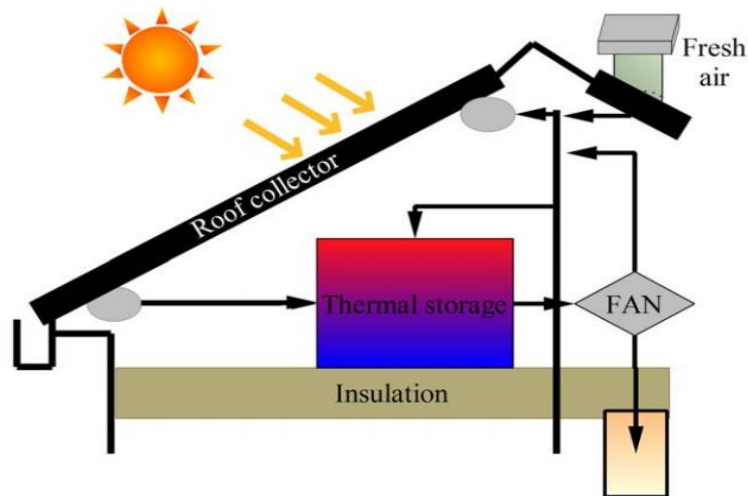


*Κατασκευή πειραματικής οροφής (PCN-PV Tennessee USA)[20]*

### 5.7.2 Ενεργητικό σύστημα στέγης με PCM.

Ένα ενσωματωμένο στην οροφή ηλιακό σύστημα θέρμανσης και αποθήκευσης αέρα χρησιμοποιεί τα ήδη υπάρχοντα μεταλλικά φύλλα, ως ηλιακούς συλλέκτες για τη θέρμανση του αέρα. Το σύστημα θερμικής αποθήκευσης PCM χρησιμοποιείται για την αποθήκευση θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας, έτσι ώστε να μπορεί να μεταφέρεται η θερμότητα τη νύχτα ή όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια. Λειτουργεί με τρεις τρόπους :

- Σε περιόδους ηλιοφάνειας και όταν απαιτείται θέρμανση, ο αέρας περνάει μέσω του συλλέκτη και στη συνέχεια στο υπόλοιπο εσωτερικό του σπιτιού.
- Όταν η θέρμανση δεν είναι απαραίτητη, ο αέρας αντλείται στην εγκατάσταση της θερμικής αποθήκευσης, λιώνει το PCM, και φορτίζεται για μελλοντική χρήση.
- Όταν η ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι διαθέσιμη, ο αέρας του δωματίου διέρχεται μέσω της εγκατάστασης που είναι αποθηκευμένος, θερμαίνεται και στην συνέχεια σπρώχνεται στο σπίτι.



**Σχήμα 5.7.2** Απεικόνιση ενεργητικού συστήματος στέγης

Όταν η εγκατάσταση αποθήκευσης δεν έχει την απαιτούμενη θερμοκρασία χρησιμοποιείται ένας βοηθητικός θερμαντήρας αερίου και ζεσταίνεται το σπίτι. Κατά την εγκατάσταση του συστήματος της ηλιακής θέρμανσης εισάγονται επαρκείς ποσότητες καθαρού αέρα παρέχοντας θερμότητα στο σπίτι όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.[32]

## 5.8 Διπλό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με PCM

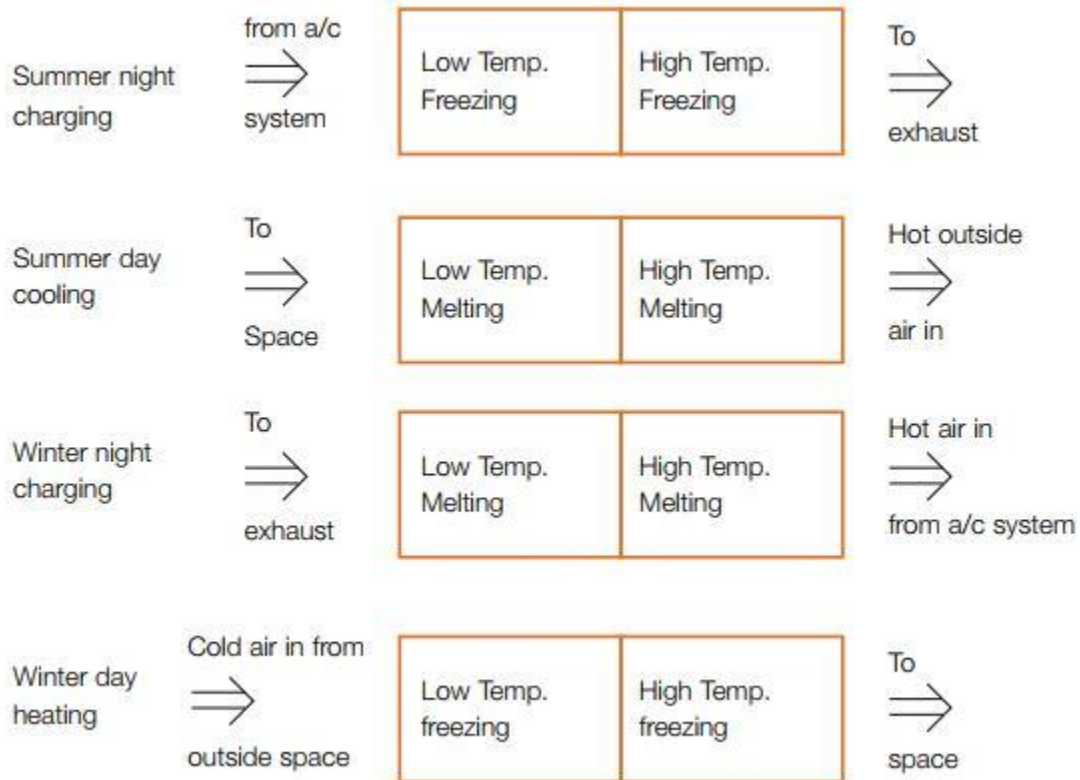
Το Κέντρο Βιώσιμης Ενέργειας (Sustainable Energy Centre, SEC) του Πανεπιστημίου Νότιας Αυστραλίας (University of South Australia) είναι ένα από τα λίγα πανεπιστήμια που εργάζονται πάνω σε σύστημα PCM χρησιμοποιώντας εξαναγκασμένη μεταφορά αέρα για μεταφορά θερμότητας προς και από το PCM. Η μελέτη τους είναι κυρίως για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης χώρων, αν και μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλα συστήματα τα οποία βασίζονται στον αέρα. Το SEC άρχισε να δουλεύει με PCM στα μέσα της δεκαετίας του 1990 με την ανάπτυξη μιας μονάδας αποθήκευσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση και ψύξη ταυτόχρονα. Αυτό ήταν δυνατό χρησιμοποιώντας δύο PCM με διαφορετικά σημεία τήξης και πήξης σε σειρά. Επιλέγοντας PCM με κατάλληλη θερμοκρασία τήξης-πήξης, μπορούν και τα δύο PCM να χρησιμοποιηθούν μαζί για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε δύο επίπεδα θερμοκρασιών. Ο αέρας χρησιμοποιείται απευθείας ως μέσο μεταφοράς θερμότητας σε αυτές τις μονάδες. Χρησιμοποιώντας αέρα σε αντίθεση με το νερό έχει μια σειρά πρακτικών πλεονεκτημάτων στο σύστημα θέρμανσης και ψύξης, συμπεριλαμβανομένης της απαίτησης περισσότερων εξαρτημάτων, μειωμένο βάρος και κόστος. Αυτή η πρώτη πρακτική αρχή αυτής της εφαρμογής προτάθηκε για χρήση σε συνδυασμό με κλιματισμό αντίστροφου κύκλου και PCM των 29 °C και 18 °C τήξης. [33]

Το SEC έχει αναπτύξει ένα μαθηματικό μοντέλο για σύστημα αέρα χρησιμοποιώντας την αποθήκευση θερμότητας των PCM. Το μοντέλο, δεδομένης της τήξης όσο και της πήξης του PCM, προβλέπει με ακρίβεια τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και τη θερμοκρασία εξόδου του αέρα. Αυτό το μοντέλο έχει εκτεταμένα επικυρωθεί με ευρύ φάσμα πειραματικών αποτελεσμάτων. [33]

Το παρακάτω σχήμα περιγράφει τη φόρτιση της νύχτας και τη διαδικασία χρήσης την ημέρα κατά τη διάρκεια των περιόδων θέρμανσης και ψύξης για συστήματα αποθήκευσης, που αποτελείται από δύο διαφορετικά PCM ενσωματωμένα σε αντίστροφο ψυκτικό σύστημα αντλιών θερμότητας, που χρησιμοποιείται εκτός του σημείου αιχμής της ενέργειας. Καθώς ο αέρας ωθείται μέσω του συστήματος, υφίσταται δύο στάδια θέρμανσης ή ψύξης. Πρώτα περνάει από το ένα PCM και στη συνέχεια στο δεύτερο. Το σημείο τήξης - πήξης του πρώτου υλικού είναι κάτω από το επιθυμητό, ενώ το δεύτερο υλικό έχει σημείο τήξης - πήξης πάνω από τη επιθυμητή θερμοκρασία. Κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης, η ροή του αέρα ρυθμίζεται έτσι ώστε το σύστημα να αποθηκεύει θερμότητα και από τα δύο υλικά τη νύχτα και να απελευθερώνει θερμότητα σε θερμοκρασία πάνω από την επιθυμητή την ημέρα. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, η κατεύθυνση της ροής του αέρα αντιστρέφεται και το



σύστημα τροφοδοτεί αέρα κάτω από την επιθυμητή θερμοκρασία, μετά τη φόρτιση κατά τη διάρκεια της νύχτας.[33]



**Σχήμα 5.8.1** Φόρτιση κατά τη διάρκεια της νύχτας και χρήση την ημέρα σε περιόδους θέρμανσης και ψύξης.[33]

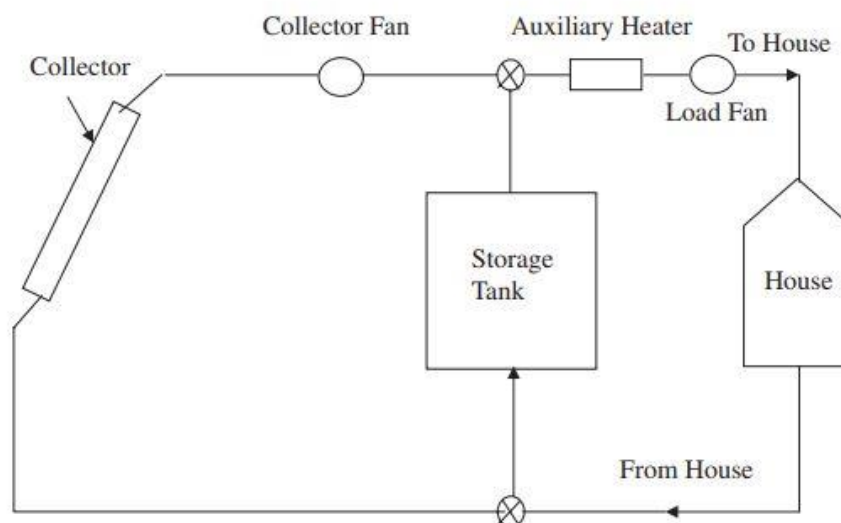
Το ποσό της μείωσης της απαιτούμενης χωρητικότητας για τον κλιματισμό του αέρα και τις ποσότητες των φορτίων θέρμανσης και ψύξης που μεταφέρθηκαν σε ώρες εκτός αιχμής έχουν υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το μοντέλο που αναφέραμε παραπάνω, όπως και το ετήσιο ενεργειακό κόστος. Χρησιμοποιώντας ένα σύστημα θερμικής αποθήκευσης το οποίο περιέχει δύο διαφορετικά υλικά αλλαγής φάσης μπορεί να μειώσει την απαιτούμενη χωρητικότητα και το αρχικό κόστος του κλιματιστικού για οικιακή χρήση. [33]

Οι υπολογισμοί για ένα τυπικό σύστημα στην Αδελαΐδα έδειξαν ότι ένα σύστημα αποθήκευσης αποτελούμενο από 100 kg PCM 29 °C και 80 kg PCM 18 °C,

μείωσε το ποσοστό που απαιτείται κατά 50%. Επίσης, το ετήσιο κόστος του ηλεκτρισμού μειώθηκε κατά 32% λόγω της μετατόπισης του φορτίου την ώρα αιχμής. Η εταιρία κοινής ωφέλειας θα μπορούσε να ωφεληθεί από τη μετατόπιση του 52 % και το 41 % των φορτίων κλιματισμού κατά τη διάρκεια των κρύων και θερμών εποχών, αντίστοιχα με μειωμένη παραγωγή και μετάδοση εάν το προτεινόμενο σύστημα αποθήκευσης χρησιμοποιείται σε μεγάλη κλίμακα.[33]

### 5.8.1 Συστήματα θέρμανσης με αέρα

Οι Morrison, Abdel Khalik και Jurinak [20], μελέτησαν την απόδοση των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης με αέρα χρησιμοποιώντας μια μονάδα αποθήκευσης ενέργειας από την αλλαγή φάσης. Οι κύριοι στόχοι της εργασίας τους ήταν, πρώτον ο προσδιορισμός της επίδρασης της λανθάνουσας θερμότητας και της θερμοκρασίας τήξης του υλικού αλλαγής φάσης στο ηλιακό σύστημα θέρμανσης με αέρα και δεύτερον να αναπτύξουν ένα εμπειρικό μοντέλο σημαντικών μονάδων αποθήκευσης ενέργειας από την αλλαγή φάσης. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το PCM πρέπει να επιλεγεί με βάση το σημείο τήξης και τη λανθάνουσα θερμότητά του και επίσης διαπίστωσαν ότι αν το σύστημα που βασίζεται στον αέρα χρησιμοποιεί δεκάδυρο θειικό νάτριο ως μέσο αποθήκευσης, τότε απαιτείται περίπου το ένα τέταρτο του όγκου αποθήκευσης μιας δεξαμενής νερού. Οι Ghonein και Klein [20] συνέκριναν θεωρητικά την απόδοση της αλλαγής φάσης και της αποθήκευσης αισθητής θερμότητας για ηλιακό σύστημα θέρμανσης αέρα και νερού.[8]

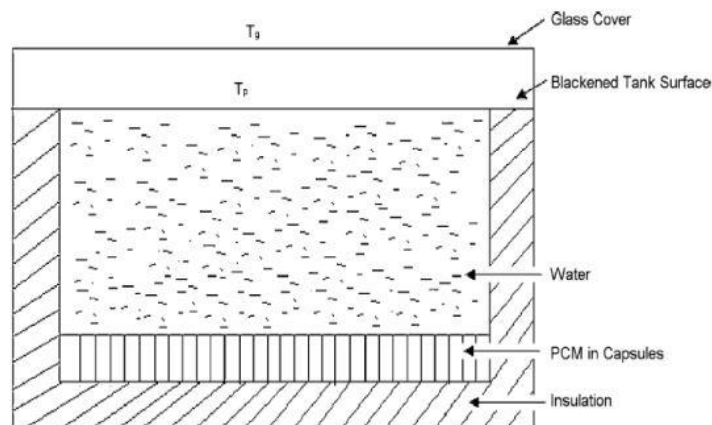


**Σχήμα 5.8.1** Σχηματική απεικόνιση ηλιακού συστήματος με αέρα.[8]

### 5.9 Ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού με PCM.

Η ενσωμάτωση του συστήματος συλλογής ενέργειας στο σύστημα του κελύφους του κτιρίου μπορεί να μειώσει το κόστος των συστημάτων ηλιακής ενέργειας, επίσης μπορεί ακόμη και να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα της συλλογής της. Ως εκ τούτου, η έρευνα πάνω στο σχεδιασμό ηλιακών συστημάτων στα κτίρια ξεκίνησε από τις αρχές τις δεκαετίας του 1940 και συνεχίζεται έως σήμερα.[3]

Ο Bhargava [3] χρησιμοποίησε το PCM για ηλιακή ενέργεια θέρμανσης νερού και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αποτελεσματικότητα του συστήματος και η θερμοκρασία εξόδου του νερού, κατά τη διάρκεια των βραδινών ωρών αυξάνονται με την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των στερεών-υγρών φάσεων των υλικών. Μπορούμε να έχουμε όλη τη διάρκεια της ημέρας ζεστό νερό, εάν οι σωλήνες του νερού τοποθετούνται κοντά στην επιφάνεια του υλικού αποθήκευσης. Η καμπύλη της θερμοκρασίας εξόδου του νερού καθίσταται επίπεδη εάν οι σωλήνες τοποθετούνται κοντά στον πυθμένα του υλικού αποθήκευσης. Ο Prakesh [3] ανέλυσε ένα καινοτόμο τύπο αποθήκευσης θερμοσίφωνα, ο οποίος περιέχει μια στρώση καψουλών, γεμισμένες με PCM, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.[3]

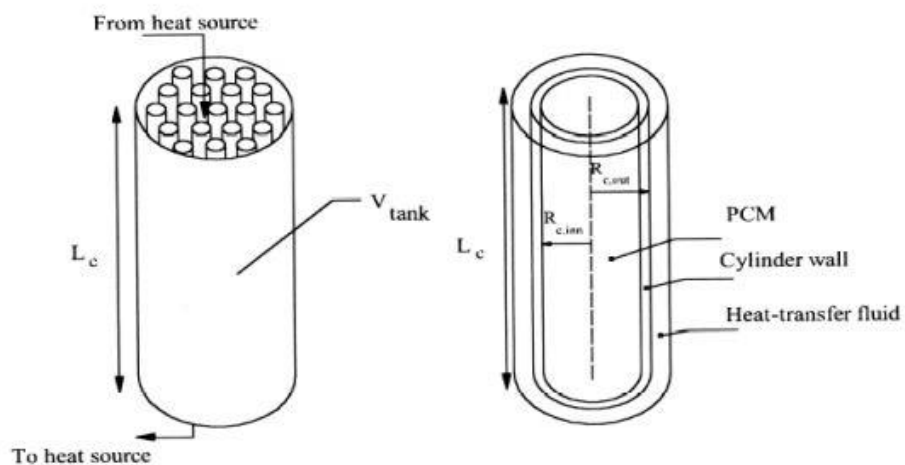


**Σχήμα 5.9.1** Ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού

Κατά τη διάρκεια των ωρών ηλιοφάνειας, το νερό θερμαίνεται και με τη σειρά του μεταφέρει θερμότητα στο PCM, που βρίσκεται από κάτω. Το υλικό αλλαγής φάσης συλλέγει ενέργεια με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας και λιώνει. Κατά τη διάρκεια των περιόδων χωρίς ηλιοφάνεια, το ζεστό νερό αποσύρεται και αντικαθίσταται από

κρύο νερό, το οποίο απορροφά ενέργεια από το PCM. Η ενέργεια απελευθερώνεται από το PCM για την αλλαγή της φάσης από υγρό σε στερεό. Αυτός ο τύπος συστήματος μπορεί να μην είναι άριστα αποτελεσματικός, λόγω της κακής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ PCM και νερού. Ο Tiwari [3] παρουσίασε μια ανάλυση του PCM αποθήκευσης για θερμοσίφωνα ενσωματώνοντας την επίδραση της ροής του νερού μέσω μιας παράλληλης πλάκας τοποθετημένης στην επιφάνεια διασύνδεσης. Προκειμένου να μειωθεί η νυχτερινή απώλεια θερμότητας από την εκτεθειμένη επιφάνεια, πραγματοποιήθηκε πρόβλεψη κάλυψης του συστήματος με κινητή μόνωση. Αυτό κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το ζεστό νερό μπορεί να παραμείνει στην επιθυμητή θερμοκρασία όλη τη διάρκεια της ημέρας / νύχτας και οι διακυμάνσεις στη θερμοκρασία του νερού μειώνονται με την ύπαρξη του υλικού αλλαγής φάσης.[3]

Έχει πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ διαφορετικών μεγεθών δοχείων αποθήκευσης λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας σε μια δεξαμενή νερού με διαφορετικό βαθμό διαστρωμάτωσης. Το δοχείο αποτελείται από έναν αριθμό κλειστών κυλινδρικών σωλήνων, γεμάτων με υλικό αλλαγής φάσης. Αυτοί οι σωλήνες περιβαλλόταν από υγρό μεταφοράς θερμότητας. Μια κυλινδρική μονάδα αποθήκευσης εφαρμόζεται σε ένα κλειστό βρόγχο με επίπεδη πλάκα συλλέκτη, για τη λειτουργία φόρτισης και εκφόρτισης. Οι υπολογισμοί για το όριο μετακίνησης διεπαφής και τη θερμοκρασία υγρού έγινε χρησιμοποιώντας παραφινικό κερί (p-116) και στεατικό οξύ ως PCM.[3]



Σύγκριση δοχείων χωρίς PCM (αριστερά) με PCM (δεξιά)

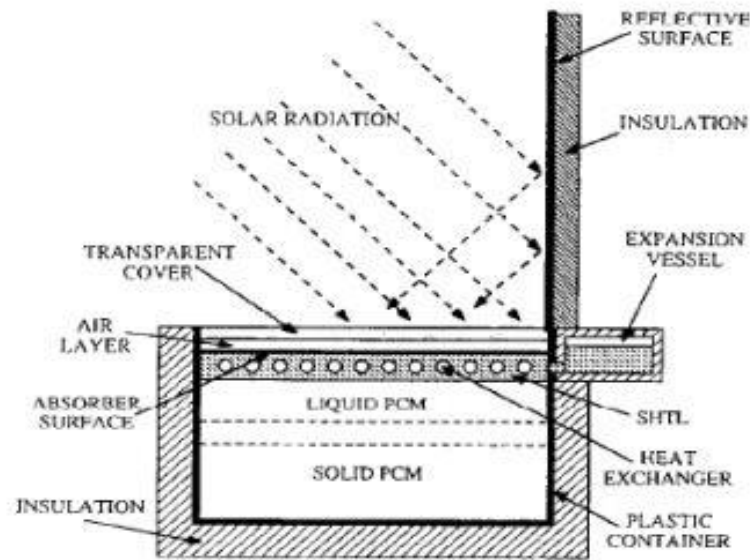
Ο Tayeb [13] ανέπτυξε ένα σύστημα ζεστού νερού οικιακής χρήσης χρησιμοποιώντας  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  ως PCM και την σύγκρινε με το μοντέλο προσομοίωσης που δίνει τον βέλτιστο ρυθμό ροής της τροφοδοσίας του ύδατος που απαιτείται για τη συντήρηση του νερού σε σταθερή θερμοκρασία εξόδου. Αργότερα ο Tayeb διεξήγαγε μελέτη για τα μείγματα οργανικών-ανόργανων ουσιών για την απόδοσή τους ως μέσων αποθήκευσης ενέργειας. Μείγματα και των δύο τύπων PCM, σε διαφορετικές αναλογίες, διερευνήθηκαν με σκοπό τον προσδιορισμό της βέλτιστης σύνθεσης, η οποία αποθηκεύει υψηλότερη ποσότητα ενέργειας και την απελευθερώνει σε σταθερή θερμοκρασία ή ανάμεσα σε ένα στενό εύρος θερμοκρασίας. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το υψηλότερο ποσοστό αποθηκευμένης ενέργειας θα μπορούσε να ληφθεί από ένα μείγμα που περιείχε 40% στεατικό οξύ και 60% θειικό νάτριο. Η προσθήκη ενός παράγοντα πυρήνωσης είναι απαραίτητη στην περίπτωση μειγμάτων που περιέχουν στεατικό οξύ.[3]

Η ιδέα της ενσωματωμένης αποθήκευσης συλλεκτών (intergrated collector storage) είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος για την αύξηση της οικονομικής εφικτότητας των ηλιακών συστημάτων χαμηλής θερμοκρασίας για θέρμανση νερού οικιακής αλλά και βιομηχανικής χρήσης. Ένα σύστημα αυτού του τύπου συνδυάζει τη συλλογή και την αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε ενιαία μονάδα. Σε σύγκριση με το συμβατικό οικιακό σύστημα θέρμανσης νερού, ο ενσωματωμένος συλλέκτης έχει το πλεονέκτημα της απλότητας στην εγκατάσταση αλλά και στη λειτουργία.[3]

Ο Boy [13] πρότεινε ένα ολοκληρωμένο σύστημα αποθήκευσης και συλλογής, το οποίο βασίζεται σε ένυδρο άλας ως συσκευή παροχής άμεσου ζεστού νερού. Έδειξε ότι η θερμική απόδοση τέτοιων συστημάτων μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την ενσωμάτωση μιας κατάλληλης συσκευής PCM. Εντούτοις στο σύστημα του, το ένυδρο άλας εγκλωβίζεται σε ένα κυματοειδές πτερύγιο ειδικής θερμότητας, πράγμα το οποίο αύξησε σημαντικά το κόστος.[3]

Ο Rabin [13] ανέπτυξε νέο ολοκληρωμένο συλλέκτη αποθήκευσης για νερά χαμηλής θερμοκρασίας. Η ηλιακή ενέργεια αποθηκεύτηκε σε ένυδρο άλας που χρησιμοποιήθηκε ως PCM και εκκενώθηκε στο κρύο νερό το οποίο ρέει μέσω επιφανειακού εναλλάκτη θερμότητας που βρίσκεται στο ένα στρώμα από σταθερό υγρό μεταφοράς θερμότητας, που επιπλέει πάνω από ένα μη αναμίξιμο στρώμα PCM. Τα αποτελέσματα των παραμετρικών μελετών σχετικά με τις επιπτώσεις της

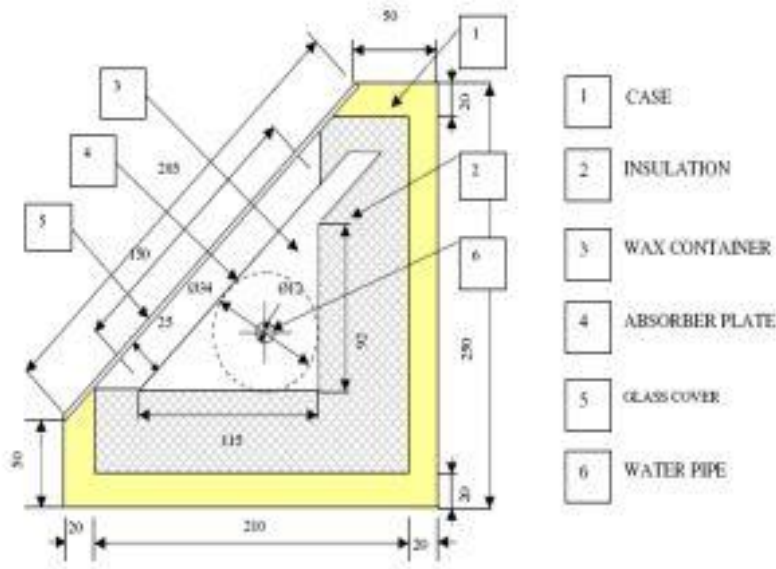
θερμοκρασίας μετάβασης και της στρώσης πάχους του PCM, για τις θερμικές επιδόσεις της διαδικασίας φόρτισης φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.[3]



**Σχήμα 5.9.2** Σχηματική απεικόνιση ηλιακού συλλέκτη βασισμένο σε υλικό αλλαγής φάσης. [3]

Οι Mettawee και Assassa διερεύνησαν τη θερμική απόδοση ενός συμπαγούς ηλιακού συλλέκτη PCM με βάση τη λανθάνουσα αποθήκευση θερμότητας. Σε αυτό τον συλλέκτη ο απορροφητήρας της μονάδας πλάκας-δοχείου εκτελεί τη λειτουργία και των δύο απορροφώντας και αποθηκεύοντας την ηλιακή ενέργεια. Η ηλιακή ενέργεια αποθηκεύεται σε παραφινικό κερί, το οποίο χρησιμοποιείται ως υλικό αλλαγής φάσης και εκκενώνεται σε κρύο νερό που ρέει σε σωλήνες που βρίσκονται μέσα στο κερί. Η πραγματική περιοχή του συλλέκτη είναι 1 τ.μ. και ο συνολικό όγκος του χωρίζεται σε 5 τομείς. Η πειραματική συσκευή σχεδιάστηκε για να προσομοιώσει έναν από τους τομείς του συλλέκτη, με μια συσκευή απορρόφησης σε αποτελεσματική περιοχή των 0,2 τ.μ. Πειράματα εξωτερικού χώρου διεξήχθησαν για την επίδειξη της δυνατότητας χρήσης ενός συμπαγούς ηλιακού συλλέκτη για νερό θέρμανσης. Πειράματα διεξήχθησαν για διαφορετικούς ρυθμούς ροής νερού. Η επίδραση του ρυθμού ροής του νερού για την επιθυμητή θερμοκρασία διερευνήθηκε επίσης. Τα πειραματικά

αποτελέσματα έδειξαν ότι στη διαδικασία φόρτισης, η μέση μεταφορά θερμότητας αυξάνεται απότομα με την αύξηση του πάχους του τηγμένου στρώματος, καθώς η φυσική ροή γίνεται ισχυρή.[3]



**Σχήμα 5.9.3** Σχέδιο της διατομής της πειραματικής συσκευής.[3]

### 5.10 Οικοδομικά υλικά μόνωσης ενισχυμένα με PCM.

Μελέτες σχετικά με ενισχυμένο PCM και κυτταρίνη πραγματοποιήθηκαν κατά την τελευταία δεκαετία. Το ενισχυμένο PCM ανοιχτού κυττάρου εγκαθίσταται συνήθως σε 2 στρώματα των 6 mm μεταξύ τριών φύλλων αλουμινίου και τοποθετούνται στη κορυφή μονωμένων καρφιών.[30]

Ο αφρός PU περιέχει  $0,49 \text{ kg/m}^2$  PCM με σημείο τήξης τους  $25,5$  βαθμούς Κελσίου και μέγιστη ενθαλπία  $140 \text{ KJ/Kg}$ . Μετρήσεις έδειξαν ότι χρειάζονται 3 ώρες για να φορτιστεί πλήρως το PCM και οι θερμικές διεγέρσεις των  $22$  βαθμών Κελσίου μειώνονται κατά  $1,6$  βαθμό. [30]

Η σύγκριση των ροών θερμότητας με τις παραδοσιακές κατασκευές έδειξαν επίσης πιθανή μείωση της τάξης του 40% στην ώρα αιχμής του φορτίου στο τοίχωμα. Η ίδια μέθοδος εφαρμόστηκε και σε κατασκευές σοφитών, από τις οποίες προέκυψε

μειωμένη ατμόσφαιρα θερινής θερμοκρασίας αέρα από 43 έως 32 βαθμών Κελσίου. Τα μικροενθυλακωμένα PCM παραφίνης έχουν αναμιχθεί με συμβατική μόνωση κυτταρίνης με χαμηλή πλήρωση με ρυθμό 22% κατά βάρος και εγκαταστάθηκαν σε κοιλότητες κατοικιών χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις της κατασκευής ή διαδικασίας εγκατάστασης. Τα αποτελέσματα της μέτρησης των πειραματικών έργων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον προσανατολισμό του τοίχου και την τοποθεσία του. Παρόλα αυτά παρατηρούνται σαφείς μειώσεις τόσο των ψυκτικών όσο και των θερμαντικών φορτίων.[30]



## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 6.1 Συμπεράσματα.

Η παρούσα εργασία προβάλλει μια συνολική ανασκόπηση των προηγούμενων μελετών που σχετίζονται με την επιλογή, την τοποθέτηση και τη λειτουργία των PCM σε παθητικά και ενεργητικά συστήματα, αλλά και το πως αυτές οι κατασκευαστικές λύσεις σχετίζονται με την αποτελεσματική ενεργειακή απόδοση του κτιρίου.

Τα συμπεράσματα ήταν ότι τα PCM συστήματα μπορούν να συμβάλλουν:

- ❖ Στην αύξηση της εσωτερικής θερμικής άνεσης (μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας του αέρα, μείωση της ημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας, μεταβολή της θερμοκρασίας της επιφάνειας).
- ❖ Στην αύξηση της αποτελεσματικότητας των ήδη υπαρχόντων συστημάτων (ικανότητα μόνωσης, αλλαγή της ροής θερμότητας μέσω αυτών, ενίσχυση της θερμικής ικανότητας).
- ❖ Στην μείωση της ισχύος του κλιματισμού και στη μείωση των φορτίων αιχμής θέρμανσης και ψύξης.
- ❖ Στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.
- ❖ Στην εκμετάλλευση των φορτίων ενέργειας εκτός ωρών αιχμής.
- ❖ Στην εκμετάλλευση άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή.
- ❖ Στην μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> που συνδέονται με θέρμανση και ψύξη.

Ωστόσο για όλα τα PCM, το κόστος και η διαθεσιμότητα είναι ένα ζήτημα, δεδομένου ότι αυτά τα υλικά δεν είναι συνηθισμένα προϊόντα. Η κατασκευή του PCM είναι μια δαπανηρή διαδικασία, τόσο ως προς το κόστος των πρώτων υλών όσο και προς τη διαδικασία, ακόμη και η τοποθέτηση του αποτελεί ένα παραπάνω κόστος. Βέβαια με τις κατάλληλες τεχνικές θερμικής σχεδίασης, η χρήση τους μπορεί να προσφέρει σχεδόν άμεση απόσβεση χρημάτων.

Συνοψίζοντας, εξακολουθεί να υπάρχει πολύς δρόμος για την γενικευμένη χρήση των ενισχυμένων κατασκευαστικών χρήσεων με PCM στα κτίρια, για την ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης με πιο βιώσιμο τρόπο. Η πραγματική κατάσταση της σημερινής κοινωνίας, η οποία θέτει όλο και μεγαλύτερα όρια στην καθημερινή κατανάλωση ενέργειας με νέους και πιο απαιτητικούς κανονισμούς, οι κλιματικές αλλαγές, η ασφάλεια των προμηθειών και η εξάντληση των ορυκτών καυσίμων, θα ωθήσει σε μια εγγυημένη θέση των PCM στην παγκόσμια επιστημονική, τεχνολογική και οικονομική έρευνα.

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] «[http://www.econ3.gr/readmore.php?article\\_id=51771295788153](http://www.econ3.gr/readmore.php?article_id=51771295788153)»
- [2] Amar M.Khudhair, Mohammed M.Farid, A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials, *Energy Conversion and Management*, Volume 45, Issue 2, January 2004, Pages 263-275.
- [3] Atul Sharma, V.V.Tyagi, C.R.Chen, D.Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 13, Issue 2, February 2009, Pages 318-345.
- [4] N.Soaes, J.J.Costa, A.R.Gaspar, P.Santos, Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency, *Energy and Buildings*, Volume 59, April 2013, Pages 82-103.
- [5] Jan Kosny, *PCM-Enhanced Building Components*, Springer International Publishing, 2015.
- [6] D.Zhou, C.Y.Zhao, Y.Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, *Applied Energy*, Volume 92, April 2012, Pages 593-605.
- [7] Yinping Zhang, Guobing Zhou, Kunping Lin, Qunli Zhang, Hongfa Di, Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook, *Building and Environment*, Volume 42, Issue 6, June 2007, Pages 2197-2209.
- [8] Vineet Veer Tyagi and D. Buddhi, PCM thermal storage in buildings: A state of art, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, Volume 11, Issue 6, 1146-1166.
- [9] Ruben Baetens, Bjørn Petter Jelle, Arild Gustavsen, Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review, *Energy and Buildings*, Volume 42, Issue 9, September 2010, Pages 1361-1368.
- [10] Shazim Ali Memon, Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 31, March 2014, Pages 870-906.

- [11] « [www.puretemp.com](http://www.puretemp.com).»
- [12] «<http://www.puretemp.com/stories/understanding-pcms>».
- [13] Atul Sharma, C. R. Chen, Solar Water Heating System with Phase Change Material, volume 1, N.4, July 2009, Pages 297-307.
- [14] Pascal Biwole, Pierre Eclache, Frederic Kuznik, Improving the performance of solar panels by the use of phase-change materials, Sweden 8-13 May 2011, Pages 2953-2960.
- [15] <http://idsnmow.blogspot.gr/2013/02/phase-change-drywall-ramin-sanjabi.html>.
- [16] M. Mujahid Rafique, Muhammad Khalil Anwar, Experimental Investigation of a Solar Still with and without Phase Change Material (PCM) under Climatic Conditions of Dhahran, Issue 5, volume 2, March-April 2015, Pages 681-697.
- [17] N. Yu, R.Z. Wang, L.W. Wang, Progress in Energy and Combustion Science: Sorption thermal storage for solar energy, Volume 39, May 2013, Pages 489-514.
- [18] A. Pasupathy, R. Velraj, R.V. Seeniraj, Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, volume 12(1), January 2008, Pages 39-64.
- [19] R. Al Shannaq, M. M. Farid, Microencapsulation of phase change materials (PCMs) for thermal energy storage systems, Volume 112, Issue 3, 5 May 2009, Pages 1850-1857.
- [20] Jan Kośny, David Yarbrough, William Miller, Thomas Petrie, Phillip Childs, Azam Mohiuddin Syed, PCM-Enhanced Building Envelopes in Current ORNL Research Projects , ORNL during 2003–2006, Pages 1-14.
- [21] <https://thermtest.com/applications/phase-change-materials-thermal-conductivity/thermal-conductivity-applications-pcm-change-diagram>.
- [22] [http://www.dispersionspigments.basf.com/portal/basf/ien/dt.jsp?setCursor=1\\_290829](http://www.dispersionspigments.basf.com/portal/basf/ien/dt.jsp?setCursor=1_290829) .
- [23] [http://www.construction.basf.com/p05/industry/en/content/building\\_green/energy\\_efficiency/micronal](http://www.construction.basf.com/p05/industry/en/content/building_green/energy_efficiency/micronal) .
- [24] <http://www.greenbuildingadvisor.com/blogs/dept/energy-solutions/storing-heat-walls-phase-change-materials>.
- [25] Alvaro de Gracia, Luisa F. Cabeza, Energy and Buildings: phase change materials and thermal energy storage for buildings, Volume 103, 15 September 2015, Pages 414-419.

[26] H. Mehling, L.F. Cabeza, Heat and cold storage with PCM: an up to date introduction into basics and applications, New York: Springer, 2008, Pages 1-46.

[27] <http://www.pcm-ral.org/pcm/en/quality-association-pcm/monitoring-institutes/bayerisches-zentrum-fuer-angewandte-energieforschung-e-v-zae-bayern/>

[28] I. Mandilaras, M. Stamatiadou, D. Katsourinis, G. Zannis, M. Founti, Experimental thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum board walls, Volume 61, March 2013, Pages 93-103.

[29] Lavinia SOCACIU, Angela PLEȘA, Paula UNGUREȘAN, Oana GIURGIU, Review on phase change materials for building applications, Issue 25, July-December 2014, Pages 179-194.

[30] Jan Kosny, PCM-Enhanced Building Components - An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures: Short History of PCM Applications in Building Envelopes, 2015, Pages 21-59.

[31] Paul Devaux, Mohammed Mehdi Farid, Benefits of PCM underfloor heating with PCM wallboards for space heating in winter, volume 191, issue C, 2017, Pages 593-602.

[32] Lavinia Gabriela SOCACIU, Thermal Energy Storage with Phase Change Material, Issue 20, January-June 2012, Pages 75-98.

[33] Frank Bruno, USING PHASE CHANGE MATERIALS (PCMs) FOR SPACE HEATING AND COOLING IN BUILDINGS, EcoLibrium, March 2005, Pages 26-31.