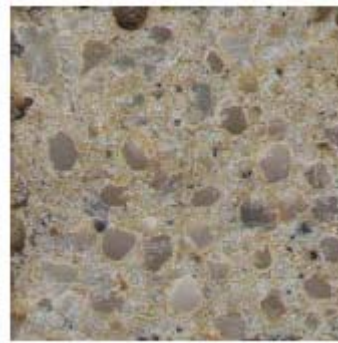
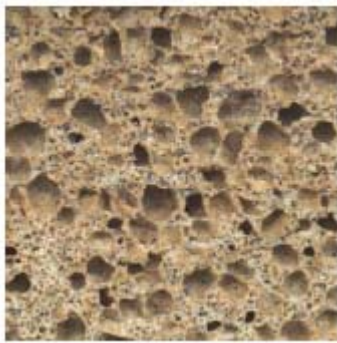


**ΤΕΙ ΣΕΡΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:

«ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM)»



**ΕΚΠΟΝΗΣΗ:
ΧΑΤΖΗΓΟΥΛΑ Λ. ΟΛΓΑ**

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:
ΠΡΟΔΡΟΜΟΥ ΙΩΑΝΝΗΣ**

ΣΕΡΡΕΣ, ...ΜΑΙΟΣ... 2011

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

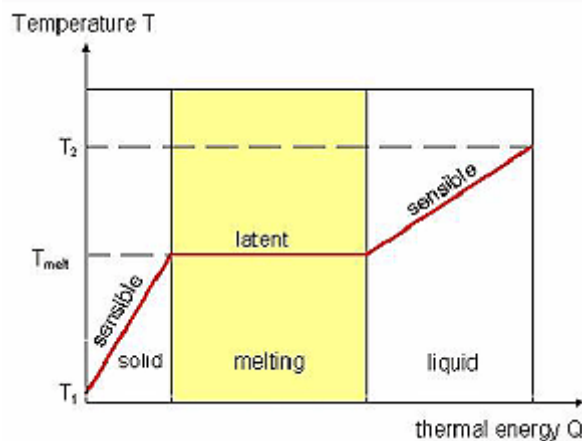
1.Εισαγωγή.....	3
1.1 Τι είναι τα υλικά αλλαγής φάσης;.....	3
1.2 Σύντομη ιστορική αναδρομή.....	4
1.3Ι ιδιότητες των PCM.....	7
1.4 Κατηγοριοποίηση των PCM.....	8
2.Εφαρμογές των PCM στα κτήρια.....	11
2.1 PCM για θέρμανση και ψύξη.....	11
2.2 Πειραματικές μελέτες πάνω στις κυριότερες εφαρμογές των PC στα κτήρια.....	18
2.2.1 Θερμική μόνωση κτηρίων με PCM.....	18
2.2.2 Υποδαπέδιο σύστημα θέρμανσης με PCM.....	22
2.2.3 Υποδαπέδιο σύστημα ψύξης με PCM.....	27
2.2.4 Παθητικό σύστημα ψύξης με PCM.....	29
2.2.5 PCM σε γυψοσανίδες.....	31
2.2.6 PCM σε τοίχωμα πειραματικών κελιών.....	36
2.2.7 PCM σε οροφή χώρων εργασίας.....	40
2.2.8 PCM σε γυάλινες επιφάνειες	44
2.3 Εταιρίες που δραστηριοποιούνται στο χώρο.....	47
3.Εφαρμογές PCM σε θερμοκήπια.....	51
3.1 Εφαρμογές με $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	51
3.2 Εφαρμογές με $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	55
3.3 Εφαρμογές PCM για θέρμανση αέρα.....	58
3.3.1 Α' εφαρμογή.....	58
3.3.2 Β' εφαρμογή.....	61
3.4εφαρμογές PCM για θέρμανση νερού.....	63
4.Εφαρμογές PCM στις συσκευασίες για μεταφορά προϊόντων.....	66
4.1 PCM σε συσκευασίες μεταφοράς τροφίμων.....	66
4.2 PCM σε συσκευασίες μεταφοράς αίματος.....	70
4.3 PCM σε συσκευασίες που κυκλοφορούν στο εμπόριο-Εταιρίες που δραστηριοποιούνται στο χώρο.....	72
5. Εφαρμογές PCM σε ηλεκτρονικές εφαρμογές.....	74
5.1 Εφαρμογή PCM laptop.....	74
6. Λοιπές εφαρμογές.....	81
6.1 Εφαρμογή PCM σε φωτοβολταϊκά πλαίσια.....	81
6.2 Εφαρμογή PCM σε ηλιακό θερμοσίφωνα.....	84
6.3 Εφαρμογές PCM σε αυτοκίνητα.....	87
6.3.1 PCM για προθέρμανση κινητήρα.....	87
6.3.2 PCM σε καταλύτη	89
6.4. Εφαρμογή PCM σε ρούχα.....	92

7. Συμπεράσματα-Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	94
7.1 Καλοκαιρινός μήνας με μέση εξωτερική θερμοκρασία 28.08°C.....	94
7.1.1 Πρώτη περίπτωση: κτηριακό κέλυφος με PCM με σημείο τήξης $T_m=28\text{ }^\circ\text{C}$	94
7.1.2 Δεύτερη περίπτωση: κτηριακό κέλυφος χωρίς PCM.....	96
7.1.3 Σύγκριση κτηριακού κελύφους με και χωρίς PCM	97
7.1.4 Τρίτη περίπτωση: κτηριακό κέλυφος με PCM (σημείο τήξης $T_m=28\text{ }^\circ\text{C}$) και με ψυκτικό φορτίο ($Q = -270\text{W}$).....	99
7.1.5 Τέταρτη περίπτωση: κτηριακό κέλυφος με PCM (σημείο τήξης $T_m=24\text{ }^\circ\text{C}$) και με ψυκτικό φορτίο ($Q= -$ 270W).....	101
7.1.6 Πέμπτη περίπτωση: κτηριακό κέλυφος χωρίς PCM με ψυκτικό φορτίο ($Q= -270\text{W}$).....	103
7.1.7 Σύγκριση των τριών περιπτώσεων με ψυκτικό φορτίο (περίπτωση 3: με PCM $T_m=28\text{ }^\circ\text{C}$, περίπτωση 4: με PCM $T_m=24\text{ }^\circ\text{C}$, περίπτωση 5: χωρίς PCM).....	104
7.2 Χειμερινός μήνας με μέση εξωτερική θερμοκρασία 5°C.....	106
7.2.1 Πρώτη περίπτωση: κτηριακό κέλυφος με PCM με σημείο τήξης $T_m=5\text{ }^\circ\text{C}$	106
7.2.2 Δεύτερη περίπτωση: κτηριακό κέλυφος χωρίς PCM.....	108
7.2.3 Σύγκριση κτηριακού κελύφους με και χωρίς PCM.....	109
7.2.4 Τρίτη περίπτωση: κτηριακό κέλυφος με PCM (σημείο τήξης $T_m=20\text{ }^\circ\text{C}$) και με θερμικό φορτίο ($Q =760\text{W}$).....	110
7.2.5 Τέταρτη περίπτωση: κτηριακό κέλυφος με PCM (σημείο τήξης $T_m=25\text{ }^\circ\text{C}$) και με θερμικό φορτίο ($Q =760\text{W}$).....	112
7.2.6 Πέμπτη περίπτωση: κτηριακό κέλυφος χωρίς PCM με θερμικό φορτίο ($Q =720\text{W}$).....	114
7.2.7 Σύγκριση των τριών περιπτώσεων με θερμικό φορτίο (περίπτωση 3: με PCM $T_m=20\text{ }^\circ\text{C}$, περίπτωση 4: με PCM $T_m=25\text{ }^\circ\text{C}$, περίπτωση 5: χωρίς PCM).....	115
7.3 Ανακεφαλαίωση-Σύνοψη συμπερασμάτων.....	117
8. Βιβλιογραφία.....	118

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Τι είναι τα υλικά αλλαγής φάσης ή PCM (phase change materials);

Τα PCM είναι αποθηκευτικά υλικά λανθάνουσας θερμότητας. Χρησιμοποιούν χημικούς δεσμούς για να αποθηκεύσουν και να απελευθερώσουν θερμότητα. Η αποθήκευση ή η απελευθέρωση θερμότητας συμβαίνει, όταν ένα υλικό μεταπίπτει από στερεό σε υγρό ή από υγρό σε στερεό αντίστοιχα. Όταν θερμαίνεται ένα στερεό PCM, η θερμοκρασία του αρχίζει να αυξάνεται με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αισθητή θερμότητά του. Όταν η θερμοκρασία προσεγγίσει τη θερμοκρασία τήξης του υλικού, το υλικό αρχίζει να λιώνει, αλλάζει δηλαδή φάση από στερεό σε υγρό. Η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή μέχρι το υλικό να λιώσει τελείως και το υλικό αποθηκεύει λανθάνουσα θερμότητα. Λανθάνουσα θερμότητα είναι, λοιπόν, η θερμότητα που δεν ευθύνεται για την ανύψωση της θερμοκρασίας του σώματος, αλλά για την καταστροφή της κρυσταλλικής δομής της στερεάς ή της υγρής φάσης του υλικού. Η αντίστροφη διαδικασία ισχύει, όταν έχουμε πτώση της θερμοκρασίας και αλλαγή της φάσης του υλικού από υγρό σε στερεό. Το παρακάτω διάγραμμα περιγράφει εποπτικά τη διαδικασία.



Διαγρ.1. Μεταβολή της θερμοκρασίας συναρτήσει της ενέργειας σε ένα PCM

Η αισθητή θερμότητα ΔQ που αποκτήθηκε ή χάθηκε από ένα υλικό αλλάζοντας θερμοκρασία από T_1 σε T_2 είναι:

$$\Delta Q = m \int_{T_1}^{T_2} c_p dT = V \int_{T_1}^{T_2} \rho c dT \quad (1)$$

όπου m και V η μάζα και όγκος του υλικού αντίστοιχα.

Η αποθηκευτική ικανότητα ενός υλικού αλλαγής φάσης που θερμαίνεται από θερμοκρασία T_1 σε T_2 , αν υφίσταται αλλαγή φάσης σε θερμοκρασία T^* , είναι το άθροισμα της μεταβολής της αισθητής θερμότητας του στερεού από T_1 σε T^* , της λανθάνουσας θερμότητας σε θερμοκρασία T^* και της μεταβολής της αισθητής θερμότητας του υγρού από T^* σε T_2 :

$$Q_s = m[(T^* - T_1)c_s + \lambda + (T_2 - T^*)c_l] \quad (2)$$

όπου m είναι η μάζα του υλικού, c_s και c_l είναι οι θερμοχωρητικότητες της στερεής και της υγρής φάσης αντίστοιχα και λ είναι η λανθάνουσα θερμότητα.

1.2 Σύντομη ιστορική αναδρομή – οι πρώτες προσπάθειες

Θέρμανση και ψύξη κτηρίων

Οι πρώτες προσπάθειες που έγιναν για να χρησιμοποιηθούν τα PCM στη θέρμανση και ψύξη κτηρίων ξεκινούν το 1920. Στα τέλη της δεκαετίας του 1940 κτίζονται τα πρώτα σπίτια-δείγματα που χρησιμοποιούν PCM.

Ο Δρ. Maria Telkes από τις Η.Π.Α, ήταν από τους πρώτους που προσπάθησε να εισαγάγει τα PCM στα κτήρια. Το 1946 πρότεινε τη κατασκευή ενός δοκιμαστικού σπιτιού, που ονομάστηκε το σπίτι του Ντόβερ και που κατασκευάστηκε με τη βοήθεια του αρχιτέκτονα Eleanor Raymond σε ένα κτήριο κοντά στη Βοστώνη. Το σπίτι αποτελείτο από έναν όροφο 135 m^2 με δύο υπνοδωμάτια, κουζίνα, σαλόνι και γκαράζ. 18 ηλιακοί συλλέκτες συνολικής επιφάνειας 67 m^2 συνέλλεξαν θερμική ενέργεια. Στη συνέχεια, η θερμότητα αυτή μεταφερόταν μέσω ενός αγωγού με τη βοήθεια ενός ανεμιστήρα σε τρία «δοχεία» αποθήκευσης που βρίσκονταν ανάμεσα στα δωμάτια (σχήμα 1.1). Κάθε τέτοιο «δοχείο» είχε χωρητικότητα 1.9 m^3 και περιείχε ως υλικό αλλαγής φάσης το λεγόμενο άλας του Glauber (ένυδρο θειικό άλας, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) με σημείο τήξης τους 32°C . Με 21 τόνους PCM που περιείχαν συνολικά τα «δοχεία» αποθήκευσης το κτήριο μπορούσε να αποθηκεύει θερμότητα ύψους 11 MJ (4.7 εκατομ. Btu). Τα PCM που διέθετε το κτήριο είχαν την ικανότητα να αποθηκεύουν θερμότητα για 12 ημέρες παρέχοντας αισθητή θερμότητα για θερμοκρασίες μέχρι 32°C (σημείο τήξης). Η κατασκευή ολοκληρώθηκε το 1948 με κόστος 20.000 δολάρια εκ των οποίων τα 3.000 δολάρια είχαν δαπανηθεί για την εγκατάσταση των PCM.

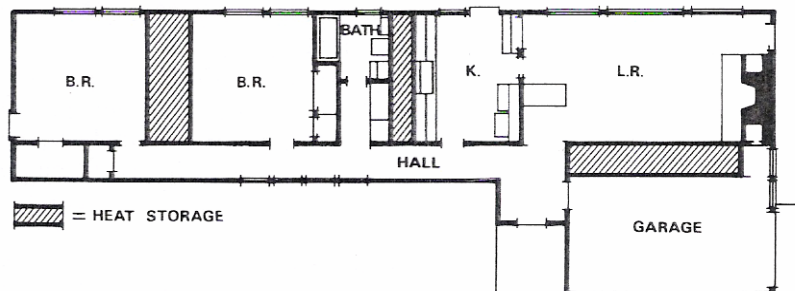
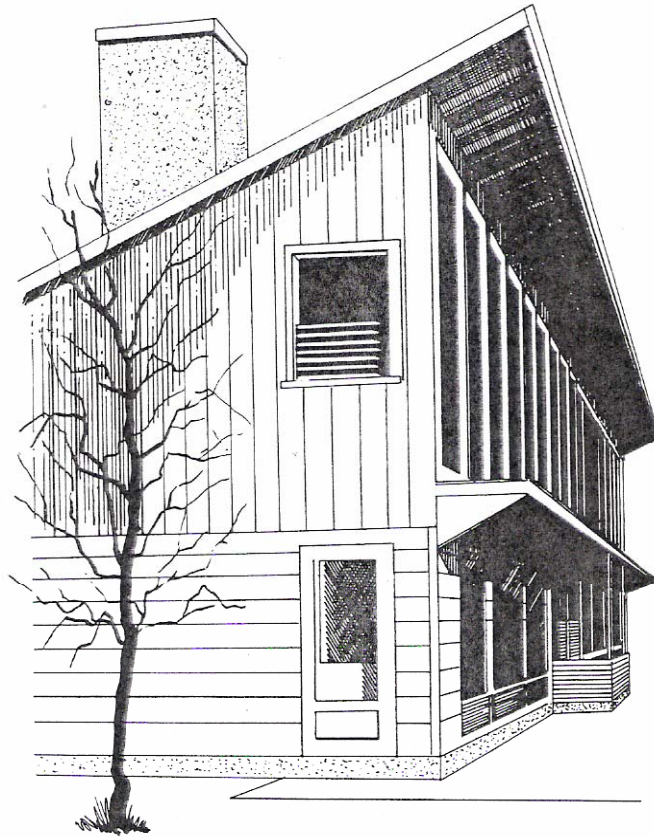
Το σπίτι κατοικήθηκε από τον Dr. Anthony Nemethy και την οικογένειά του, ο οποίος τα πρώτα δύο χρόνια έμεινε απόλυτα ικανοποιημένος. Όπως αναφέρει ο Telkes, τα πρώτα δύο έτη το σύστημα θέρμανσης αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματικό ακόμα και σε περιόδους με επτά ημέρες συνεχόμενης συννεφιάς. Το σύστημα λειτούργησε με επιτυχία παρέχοντας ένα άνετο περιβάλλον γύρω στους 21°C , χωρίς να χρειαστεί οποιοδήποτε συνοδευτικό σύστημα θέρμανσης. Τον τρίτο χρόνο, όμως, το σύστημα απέτυχε. Βρέθηκε ότι η απόδοση του άλατος του Glauber πέφτει μετά από επαναλαμβανόμενους κύκλους. Παρατηρήθηκε ότι το άλας του Glauber είχε διαχωριστεί σε διάλυμα και άνυδρο άλας (Na_2SO_4), χάνοντας έτσι την αποθηκευτική του ιδιότητα. Επίσης τα «δοχεία» αποθήκευσης άρχισαν να διαβρώνονται, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι απώλειες.

Το 1950 ο ηλεκτρολόγος μηχανικός Lawrence Gardenhire ξεκίνησε να κατασκευάζει ένα «ηλιακό σπίτι» με PCM στη περιοχή του New Mexico. Η κατασκευή ολοκληρώθηκε το 1953. Το κτήριο ήταν διώροφο και κάθε

όροφος είχε επιφάνεια 102 m². Και ο Gardenhire, όπως ο Telkes χρησιμοποίησε «δοχεία» αποθήκευσης με PCM χωρητικότητας 1.9 m³, μόνο που αντί να τα εγκαταστήσει ανάμεσα από τα δωμάτια όπως ο Telkes, τα εγκατέστησε στη στέγη δίπλα στους ηλιακούς συλλέκτες. Επίσης πρόσθεσε διφθοριούχο νάτριο στο άλας του Glauber για να αποφύγει το διαχωρισμό.

Δυστυχώς και αυτή η κατασκευή αντιμετώπιζε τα ίδια προβλήματα με την κατασκευή του Telkes.

Την επόμενη προσπάθεια για ένα «ηλιακό σπίτι» με PCM (διόροφο, 111 m²) την έκαναν το 1959 οι αρχιτέκτονες Aladar και Victor Olgyay στη περιοχή του New Jersey. Το σχεδιασμό της αποθήκευσης ενέργειας τον ανέλαβε ο Δρ. Telkes λόγω της προηγούμενης εμπειρίας του. Και σε αυτή τη περίπτωση ο Δρ. Telkes χρησιμοποίησε ως υλικό αλλαγής φάσης το άλας του Glauber (ένυδρο άλας, Na₂SO₄ · 10H₂O, σημείο τήξης τους 32°). Για να ξεπεραστούν τα προηγούμενα προβλήματα, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας εκτός από 12 τόνους PCM που περιελάμβανε, ήταν εμπλουτισμένο με πυριτικό άλας νατρίου και χρώμιο, ουσία που παρεμποδίζει τη διάβρωση. Τα PCM ήταν ενσωματωμένα σε κυλινδρικά δοχεία χάλυβα, διαμέτρου 0.1 m και ύψους 0.6 m, τα οποία ήταν τοποθετημένα κάθετα στους τοίχους. Παρόλο που τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά, οι προσπάθειες δεν συνεχίστηκαν από αυτή την ομάδα επιστημόνων.



Σχ.1 Το σπίτι του Ντόβερ, που σχεδίασε ο M. Telkes

DSP, ένα νέο υλικό

Το 1954 οι εταιρίες Edison Illuminating και Edison Electric (Η.Π.Α) με τη βοήθεια του Δρ. Gordon Wilkes (M.I.T) πειραματίστηκαν γύρω από ένα νέο υλικό αλλαγής φάσης το λεγόμενο DSP ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) με σημείο τήξης τους 36°C . Το νέο αυτό υλικό φιλοδοξούσε να χρησιμοποιηθεί σε αντλίες μεταφοράς θερμότητας. Το σύστημα αντλιών θερμότητας ενσωμάτωσε μια σειρά δοχείων χάλυβα που περιείχαν DSP. Τα δοχεία αυτά βυθίστηκαν στο νερό που αποτελούσε το μέσο μεταφοράς θερμότητας. Τα αποτελέσματα αυτής της εφαρμογής ήταν μη ικανοποιητικά. Ο κύκλος τήξης-ψύξης του νέου PCM αποδείχθηκε ότι δεν ήταν πλήρως αναστρέψιμος και έτσι μειωνόταν εντυπωσιακά η ικανότητα αποθήκευσης του υλικού. Ένα επιπλέον πρόβλημα ήταν η διάβρωση των δοχείων χάλυβα.

Διαστημικό πρόγραμμα της NASA

Το 1960 ήταν περίοδος ραγδαίας ανάπτυξης στον τομέα της διαστημικής τεχνολογίας. Αυτήν τη περίοδο η NASA επιχορήγησε επιστημονικά προγράμματα του M.I.T, που μελετούσαν τα PCM. Στόχος των επιστημόνων ήταν με τη χρήση των PCM να πετύχουν θερμικό έλεγχο σε διάφορα συστήματα. Οι έρευνες απέδωσαν και λίγα χρόνια αργότερα τα PCM χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στο διαστημόπλοιο Apollo 15 Lunar Rover Vehicle. Συγκεκριμένα τα PCM χρησιμοποιήθηκαν για να ελεγχθεί η θερμότητα που απελευθερωνόταν από τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό του Apollo 15. Κατά τη διάρκεια του διαστημικού ταξιδιού τα PCM, που αποτελούνταν από μίγματα παραφίνης, αποθήκευαν τη θερμότητα που απελευθερωνόταν από τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό και την απέβαλλαν με τη μορφή ακτινοβολίας.

Πανεπιστήμιο της Πενσυλβάνιας

Το πρώτο μεγάλο ερευνητικό πρόγραμμα έλαβε χώρα στο πανεπιστήμιο της Πενσυλβάνιας το 1971. Σε αυτό συμμετείχαν οι επιστήμονες Δρ. S. Freedman, Δρ. Telkes, Δρ. M. Altman. Στόχος τους ήταν να μελετήσουν τις ιδιότητες των διάφορων οργανικών και ανόργανων υλικών αλλαγής φάσης και να τα κατηγοριοποιήσουν. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το $K_2HPO_4 \cdot 6H_2O$ (ανόργανο PCM) και ορισμένα μίγματα παραφίνης (οργανικό PCM) είναι κατάλληλα για εφαρμογές κλιματισμού, ενώ για θέρμανση χώρου τα πιο ελπιδοφόρα PCM είναι τα: $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$.

Περαιτέρω κυβερνητικό ενδιαφέρον

Η δεκαετία του 1970 ήταν ορόσημο για τα PCM και γενικότερα για τις εναλλακτικές μορφές ενέργειας. Συγκεκριμένα το 1973 με τον αραβικό αποκλεισμό πετρελαίου εμφανίζεται η πρώτη πετρελαϊκή κρίση. Αυτό ώθησε τις κυβερνήσεις διάφορων χωρών να αναζητήσουν τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας. Έτσι, από το 1973 και μετά ξεκινά η κυβερνητική χρηματοδότηση ερευνητικών προγραμμάτων πάνω στα PCM σε χώρες όπως οι Η.Π.Α, η Αγγλία, η Γερμανία και η Γαλλία.

1.3 Ιδιότητες των PCM

Τα PCM, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι αποθηκευτικά υλικά λανθάνουσας θερμότητας. Χρησιμοποιούν χημικούς δεσμούς για να αποθηκεύσουν και να απελευθερώσουν θερμότητα. Η αποθήκευση της θερμότητας συμβαίνει, όταν ένα υλικό μεταπίπτει από υγρό σε στερεό ή από στερεό σε υγρό, όταν έχουμε δηλαδή μεταβολή της κατάστασης. Τα υλικά αλλαγής φάσης με σημείο τήξης μεταξύ $20^\circ C$ και $32^\circ C$ χρησιμοποιούνται για θέρμανση και ψύξη στα κτήρια. Τα υλικά αυτά πρέπει να διαθέτουν συγκεκριμένες θερμοδυναμικές, κινητικές και χημικές ιδιότητες. Αυτές οι ιδιότητες αναφέρονται στη συνέχεια.

Θερμοδυναμικές ιδιότητες

1. Θερμοκρασία τήξης μέσα στο επιθυμητό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας.
2. Υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα για να παρέχει πρόσθετο απόθεμα αισθητής θερμότητας.
3. Υψηλή θερμική αγωγιμότητα στερεής και υγρής φάσης για να έχουμε αποτελεσματική φόρτιση και αποφόρτιση του συστήματος.
4. Μικρή μεταβολή όγκου κατά την αλλαγή φάσης.
5. Ομοιόμορφη τήξη του υλικού αλλαγής φάσης για σταθερή αποθηκευτική ικανότητα του υλικού σε κάθε κύκλο τήξης/ πήξης.

Κινητικές ιδιότητες

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

Χημικές ιδιότητες

1. Εντελώς αναστρέψιμος κύκλος ψύξης- τήξης.
2. Απουσία χημικής αποικοδόμησης μετά από μεγάλο αριθμό κύκλων τήξης-ψύξης.
3. Απουσία διαβρωτικότητας στα υλικά κατασκευής.
4. Μη τοξικά, μη εύφλεκτα και μη εκρηκτικά υλικά για λόγους ασφαλείας.

1.4 Κατηγοριοποίηση των PCM

Τα υλικά αλλαγής φάσης κατατάσσονται σε οργανικά, ανόργανα και εύτηκτα υλικά.

Οργανικά PCM

Τα οργανικά υλικά αλλαγής φάσης διακρίνονται σε αυτά που περιέχουν παραφίνη και σε αυτά που δεν περιέχουν. Τα οργανικά χαρακτηρίζονται από ομοιόμορφη τήξη. Το σημεία τήξης τους εμπίπτουν στο θερμοκρασιακό εύρος 20-32°C. Συνήθη οργανικά υλικά με τα σημεία τήξης τους και τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πιν 1. Ιδιότητες οργανικών υλικών αλλαγής φάσης

Χημική ένωση	Σημείο τήξης (°C)	Θερμότητα τήξης (kJ/kg)
Butyl stearate	19	140
Paraffin C ₁₆ -C ₁₈	20-22	152
Capric-Lauric acid	21	143
Dimethyl sabacate	21	120
Polyglycol E 600	22	127.2
Paraffin C ₁₃ -C ₂₄	22-24	189
(34% Mistiric acid+66% Capric acid)	24	147.7
1-Dodecanol	26	200
Paraffin C ₁₈ (45-55%)	28	244
Vinyl stearate	27-29	122
Capric acid	32	152.7

Ανόργανα PCM

Τα ανόργανα υλικά κατατάσσονται σε ένυδρα άλατα και σε μεταλλικά στοιχεία. Ανόργανα μίγματα έχουν υψηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα μάζας και είναι πιο φθηνά από ανόργανα μίγματα και από μη ευφλεκτά. Το μειονέκτημά τους είναι ότι υστερούν στην αποσύνθεση και την υπέρψυξη. Συνήθως χρησιμοποιούμενα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης εμπίπτουν στο θερμοκρασιακό εύρος 20-32 °C. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συνήθη ανόργανα PCM:

Πιν 2. Ιδιότητες ανόργανων υλικών αλλαγής φάσης

Χημική ένωση	Σημείο τήξης (°C)	Θερμότητα τήξης (kJ/kg)
KF·4H ₂ O	18.5	231
Mn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	25.8	125.9
CaCl ₂ ·6H ₂ O	29	190.8
LiNO ₃ ·3H ₂ O	30	296
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32	251

Εύτηκτα PCM

Ένα εύτηκτο υλικό είναι μία σύνθεση από δύο ή περισσότερα συστατικά, κάθε ένα από τα οποία λιώνει και παγώνει δημιουργώντας ένα μίγμα κρυστάλλων κατά τη διάρκεια κρυσταλλοποίησης. Συνήθη οργανικά-οργανικά, οργανικά-ανόργανα και ανόργανα-ανόργανα εύτηκτα υλικά που χρησιμοποιούνται για κτηριακές εφαρμογές φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

Πιν 3. Ιδιότητες εύτηκτων υλικών αλλαγής φάσης

Χημική ένωση	Σημείο τήξης (°C)	Θερμότητα τήξης (kJ/kg)
66.6% CaCl ₂ ·6H ₂ O+33.3% MgCl ₂ ·6H ₂ O	25	127
48% CaCl ₂ +4.3% NaCl+0.4% KCl+47.3% H ₂ O	26.8	188
47% Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O+53% Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	30	136
60% Na(CH ₃ COO)·3H ₂ O+40% CO(NH ₂) ₂	30	200.5

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται διάφορα βιομηχανοποιημένα υλικά αλλαγής φάσης. Συνήθως αυτά τα PCM χρησιμοποιούνται για κτηριακές εφαρμογές λόγω της υψηλής διαθεσιμότητας και του χαμηλού κόστους.

Πιν 4. Ιδιότητες βιομηχανοποιημένων υλικών αλλαγής φάσης

PCM	Τύπος προϊόντος	Σημείο τήξης (°C)	Θερμότητα τήξης (kJ/kg)	Εταιρίες που τα παράγουν
RT 20	Paraffin	22	172	Rubitherm GmbH
Climsel C23	Salt hydrate	23	148	Climator
ClimselC24	Salt hydrate	24	216	Climator
RT 26	Paraffin	25	131	Rubitherm GmbH
RT 25	Paraffin	26	232	Rubitherm GmbH
STL 27	Salt hydrate	27	213	Mitsubishi chemical
S27	Salt hydrate	27	207	Cristopia
RT 30	Paraffin	28	206	Rubitherm GmbH
RT 27	Paraffin	28	179	Rubitherm GmbH
TH 29	Salt hydrate	29	188	TEAP

2.ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ PCM ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ

2.1 PCM για θέρμανση και ψύξη χώρων

Κύριες χρήσεις των PCM στα κτήρια

Τα υλικά αλλαγής φάσης βρίσκουν εφαρμογή σε παθητικά καθώς και σε ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης. Σε κάθε περίπτωση είναι απαραίτητη η αποθήκευση της θερμότητας ή του ψύχους, για να υπάρξει ισορροπία μεταξύ διαθεσιμότητας και ζήτησης. Οι βασικοί τρόποι χρήσης των PCM για θέρμανση και ψύξη κτηρίων είναι οι εξής:

- PCM σε τοίχους κτηρίων
- PCM σε άλλα συστατικά κτηρίων εκτός των τοίχων
- PCM σε μονάδες αποθήκευσης θερμότητας και ψύχους.

Τα πρώτα δύο είναι παθητικά συστήματα. Η θερμότητα ή το ψύχος που αποθηκεύονται αυτόματα, απελευθερώνονται όταν η εσωτερική ή εξωτερική θερμοκρασία φθάσει πάνω ή πέσει κάτω από το σημείο τήξης. Το τρίτο είναι ενεργητικό σύστημα, όπου η αποθηκευμένη θερμότητα ή το αποθηκευμένο ψύχος βρίσκεται σε δεξαμενή θερμικά χωρισμένη από το κτήριο με μόνωση. Ως εκ τούτου, η θερμότητα ή η ψύξη χρησιμοποιούνται μόνο μετά από ζήτηση και όχι αυτόματα. Επί του παρόντος υπάρχει έλλειψη βιομηχανικών PCM στο χαμηλό θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 5 °C και 20°C. Ειδικά μεταξύ 15 °C και 20 °C τα διαθέσιμα προϊόντα παρουσιάζουν πολύ μικρές ενθαλπίες. Τα πιο σημαντικά υλικά αλλαγής φάσης βρίσκονται στο θερμοκρασιακό εύρος 22-25 °C, το οποίο είναι και το εύρος για παθητική θέρμανση και ψύξη κτηρίων.

Παθητικά συστήματα αποθήκευσης

Μερικές εφαρμογές υλικών αλλαγής φάσης σε παθητικά συστήματα αποθήκευσης είναι οι εξής:

Τοίχος trombe με PCM

Ένας τοίχος trombe είναι ένα πρωταρχικό παράδειγμα προσέγγισης έμμεσου κέρδους. Αποτελείται από έναν παχύ τοίχο από μπετόν στην νότια πλευρά του σπιτιού. Ένα μονό ή διπλό στρώμα από γυαλί ή πλαστικό τοποθετείται περίπου τέσσερις ίντσες μπροστά από την επιφάνεια του τοίχου. Η ηλιακή θερμότητα συλλέγεται στο χώρο μεταξύ του τοίχου και της υαλοκατασκευής. Η εξωτερική επιφάνεια του τοίχου είναι μαύρου χρώματος για να απορροφά τη θερμότητα, που στη συνέχεια αποθηκεύεται στη μάζα του τοίχου. Η θερμότητα διανέμεται από τον τοίχο trombe στο σπίτι κατά τη διάρκεια μιας περιόδου αρκετών ωρών. Όταν η εσωτερική θερμοκρασία πέσει κάτω από τη θερμοκρασία της επιφάνειας του τοίχου, η θερμότητα αρχίζει να ακτινοβολείται στο δωμάτιο. Η απώλεια θερμότητας από τον τοίχο trombe

μπορεί να ρυθμιστεί με μια μονωτική κουρτίνα που κλείνει τη νύχτα στο χώρο μεταξύ του τοίχου και της υαλοκατασκευής. Οι παραδοσιακοί τοίχοι trombe στηρίζονται στην αποθήκευση αισθητής θερμότητας, αλλά λόγω της δυνατότητας για μεγαλύτερη δυνατότητα αποθήκευσης ανά μονάδα μάζας οι τοίχοι trombe με PCM αποτελούν μια ελκυστική πρόταση, που αναμένεται να έχει θετικά αποτελέσματα. Ένας τοίχος γεμάτος με PCM κατασκευάζεται στη νότια πλευρά του σπιτιού, η οποία περιλαμβάνει και παράθυρο. Ο τοίχος θερμαίνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας με εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, λιώνοντας το PCM. Τη νύχτα η θερμότητα εκλύεται για να θερμάνει το σπίτι. Για μία δεδομένη ποσότητα αποθήκευσης θερμότητας, οι μονάδες αλλαγής φάσης απαιτούν λιγότερο χώρο από τους απλούς τοίχους trombe και είναι πιο ελαφριές. Είναι επομένως πιο εύκολο να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές κτηρίων. Ένυδρα άλατα και υδρογονάνθρακες χρησιμοποιούνται σαν υλικά αλλαγής φάσης σε τοίχους trombe.

Ο Telkes πρότεινε την χρήση PCM σε τοίχους, χωρίσματα, ταβάνια και πατώματα για να λειτουργήσουν σαν ρυθμιστές της θερμοκρασίας. Τα PCM χρησιμοποιήθηκαν προς αντικατάσταση του μπετόν σε ένα τοίχο Trombe. Ο Askew χρησιμοποίησε ένα πλαίσιο - συλλέκτη από λεπτή πλάκα κεριού παραφίνης και το τοποθέτησε πίσω από την διπλή υαλοκατασκευή του κτηρίου και διαπίστωσε ότι οι θερμικές αποδόσεις είναι συγκρίσιμες με αυτές ενός τυπικού επίπεδου πιάτου-συλλέκτη. Οι Farouk και Gucerι μελέτησαν τη χρησιμότητα της εγκατάστασης ενός τοίχου PCM σε ένα κτήριο για νυχτερινή οικιακή θέρμανση χρησιμοποιώντας μίγμα άλατος του Glauber και κεριό SUNOCO P-116. Παρατηρήθηκε ότι εάν ο τοίχος PCM είναι σωστά σχεδιασμένος περιορίζονται κάποιες από τις ανεπιθύμητες επιπτώσεις των τοίχων από μπετόν.

Ο Bordeau εξέτασε δύο τοίχους παθητικής αποθήκευσης χρησιμοποιώντας ένυδρο χλωρίδιο του ασβεστίου (σημείο τήξης 29°C) σαν υλικό αλλαγής φάσης. Κατέληξε ότι ένας PCM τοίχος πάχους 8,1 cm έχει ελαφρώς καλύτερη θερμική απόδοση από έναν τοίχο από μπετόν πάχους 40 cm. Πειραματικές και θεωρητικές δοκιμές διεξήχθησαν προκειμένου να ελεγχθεί η αξιοπιστία των PCM σαν υλικό τοίχων trombe. Οι Swet, Ghoneim και Chandra χρησιμοποίησαν ένυδρο θειικό νάτριο σαν υλικό αλλαγής φάσης σε έναν νοτίως προσανατολισμένο τοίχο trombe. Και αυτοί επισήμαναν ότι ο τοίχος trombe με PCM είχε πιο επιθυμητά αποτελέσματα σε σχέση με έναν συνηθισμένο τοίχο από μπετόν για αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Ο Knowler χρησιμοποίησε κεριό παραφίνης CG με μεταλλικά πρόσθετα για να αυξήσει την ολική αγωγιμότητα και αποδοτικότητα του τοίχου trombe.

Οι Buddhi και Sharma μέτρησαν την εκπομπή ηλιακής ακτινοβολίας μέσα από το υλικό αλλαγής φάσης σε διαφορετικές θερμοκρασίες και σε διαφορετικά πάχη. Σαν υλικό αλλαγής φάσης χρησιμοποιήθηκε στεατικό οξύ. Βρήκαν ότι η εκπομπή από το υλικό αλλαγής φάσης ήταν περισσότερη σε σχέση με το γυαλί για το ίδιο πάχος υλικού και πρότειναν μια νέα εφαρμογή υλικών αλλαγής φάσης σε παράθυρα και τοίχους σαν διαφανή υλικά.

Σοβατεπιά με PCM

Τα σοβατεπιά είναι φθηνά και ευρέως χρησιμοποιούμενα σε μια πληθώρα εφαρμογών, και για αυτό το λόγο καθίστανται κατάλληλα για χρήση PCM. Οι Kedl και Stoval και οι Salyer και Sircar χρησιμοποίησαν σοβατεπιά γεμάτα με κερί παραφίνης για παθητικές ηλιακές εφαρμογές . Η διαδικασία γεμίσματος των σοβατεπιών με κερί παραφίνης ήταν επιτυχής από μικρά δείγματα μέχρι μεγάλου μεγέθους ελάσματα. Έχουν διεξαχθεί επιτυχώς διεργασίες κατά τις οποίες αυτό το PCM ενσωματώνεται σε ασβεστόπλακα είτε με απορρόφηση του υγρού PCM στους πόρους της ασβεστόπλακας μετά την κατασκευή της, είτε με προσθήκη στο υγρό στάδιο της κατασκευής της ασβεστόπλακας.

Ο Shapiro μελέτησε μεθόδους γεμίσματος γύψινων σοβατεπιών και άλλων οικοδομικών υλικών με PCM. Απέδειξε ότι αρκετά υλικά αλλαγής φάσης ήταν κατάλληλα για εισαγωγή σε γύψινα σοβατεπιά για εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας για το κλίμα της Florida. Αυτά τα υλικά ήταν μίγματα από μεθυλεστέρες, δηλαδή μεθυλεστέρες παλμιτικού οξέως και μεθυλεστέρες στετικού οξέως καθώς και μίγματα από λιπαρά οξέα.

Ο Feldman διεξήγαγε μία εκτεταμένη έρευνα πάνω στη χρήση και σταθερότητα των οργανικών μιγμάτων για αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας, περιλαμβανόμενων λιπαρών οξέων, βουτυλεστέρων και γλυκόλης πολυαιθυλενίου. Παράλληλα με τη μελέτη των ιδιοτήτων τους, έρευνα διεξήχθη γύρω από υλικά που λειτουργούν σαν απορροφητές υλικών αλλαγής φάσης. Διάφορα υλικά όπως ο γύψος και το τσιμέντο μελετήθηκαν. Η γυψοσανίδα με PCM περιείχε 25% κατά βάρος βουτυλοεστέρα. Οι θερμικές της ιδιότητες μετρήθηκαν με ένα διαφορικό ηλεκτρονικό θερμιδόμετρο (Digital Scanning Calorimeter).

Ο Neeper μελέτησε και αυτός τη συμπεριφορά των γυψοσανίδων που είναι εμποτισμένες με υλικά αλλαγής φάσης . Κατέληξε ότι τέτοιες γυψοσανίδες μπορούν να τοποθετηθούν στη θέση συνηθισμένων σοβατεπιών σε ένα κτήριο, αυξάνοντας σημαντικά την θερμική αποθηκευτική ικανότητα του κτηρίου. Επίσης δημιουργούν την ευκαιρία για ψύξη μέσω αερισμού και χρονικής μετάθεσης των ψυκτικών φορτίων. Μικρό ή καθόλου κόστος θα συνόδευε την τοποθέτηση σοβατεπιών με υλικά αλλαγής φάσης έναντι συμβατικών σοβατεπιών. Επίσης ο Neeper μελέτησε τη θερμοδυναμική ενός γύψινου σοβατεπιού εμποτισμένο με λιπαρά οξέα και κεριά παραφίνης. Οι θερμοκρασίες τήξης αυτών των υλικών αλλαγής φάσης ρυθμίστηκαν με χρήση μίγματος συστατικών. Ο Neeper εξέτασε τρεις παραμέτρους των σοβατεπιών με PCM που δύνανται να επηρεάσουν την ενέργεια που μπορεί να απορροφηθεί παθητικά και να απελευθερωθεί κατά τη διάρκεια ενός ημερησίου κύκλου: α) τη θερμοκρασία τήξης του PCM β) το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο λαμβάνει χώρα η τήξη και γ) τη λανθάνουσα χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας σοβατεπιού.

Παντζούρια με PCM

Σε αυτή την περίπτωση, παντζούρια που περιέχουν PCM τοποθετούνται εξωτερικά από τα παράθυρα. Κατά τη διάρκεια της ημέρας ανοίγουν προς τα έξω, η εσωτερική πλευρά τους εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία, απορροφάται θερμότητα και το PCM λιώνει. Την νύχτα τα παντζούρια κλείνουν και η θερμότητα από το PCM αντανακλάται μέσα στα δωμάτια. Ο Buddhi μελέτησε τη θερμική απόδοση ενός δοκιμαστικού στοιχείου (1m×1m×1m) με και χωρίς υλικό αλλαγής φάσης. Σαν υλικό αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας χρησιμοποιήθηκε το οξύ CG με σημείο τήξης 49°C. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αποθηκευτική ικανότητα του στοιχείου αυξήθηκε μέχρι και 4 °C για 4-5 ώρες λόγω της παρουσίας του PCM.

Οικοδομικά υλικά με PCM

Οικοδομικά υλικά εμποτισμένα με PCM χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή κτηρίων οδηγώντας σε μία κατασκευή με μεγάλη θερμική αδράνεια χωρίς τη μεγάλη μάζα που συνδέεται με αυτή. Οι Collier και Grimmer έδειξαν ότι ένα υλικό συγκολλημένο μέσα σε μπετόν έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση της απόδοσης του συστήματος σε σχέση με μία ισοδύναμη μάζα τσιμέντου. Ο Lee μελέτησε και παρουσίασε τα αποτελέσματα μακροχρόνιων πειραμάτων που συγκρίνουν τη θερμική απόδοση τυπικών τμημάτων από το τσιμέντο με αυτά που είναι εμποτισμένα με δύο τύπους PCM, βουτηλοεστέρα και εμπορικής παραφίνης.

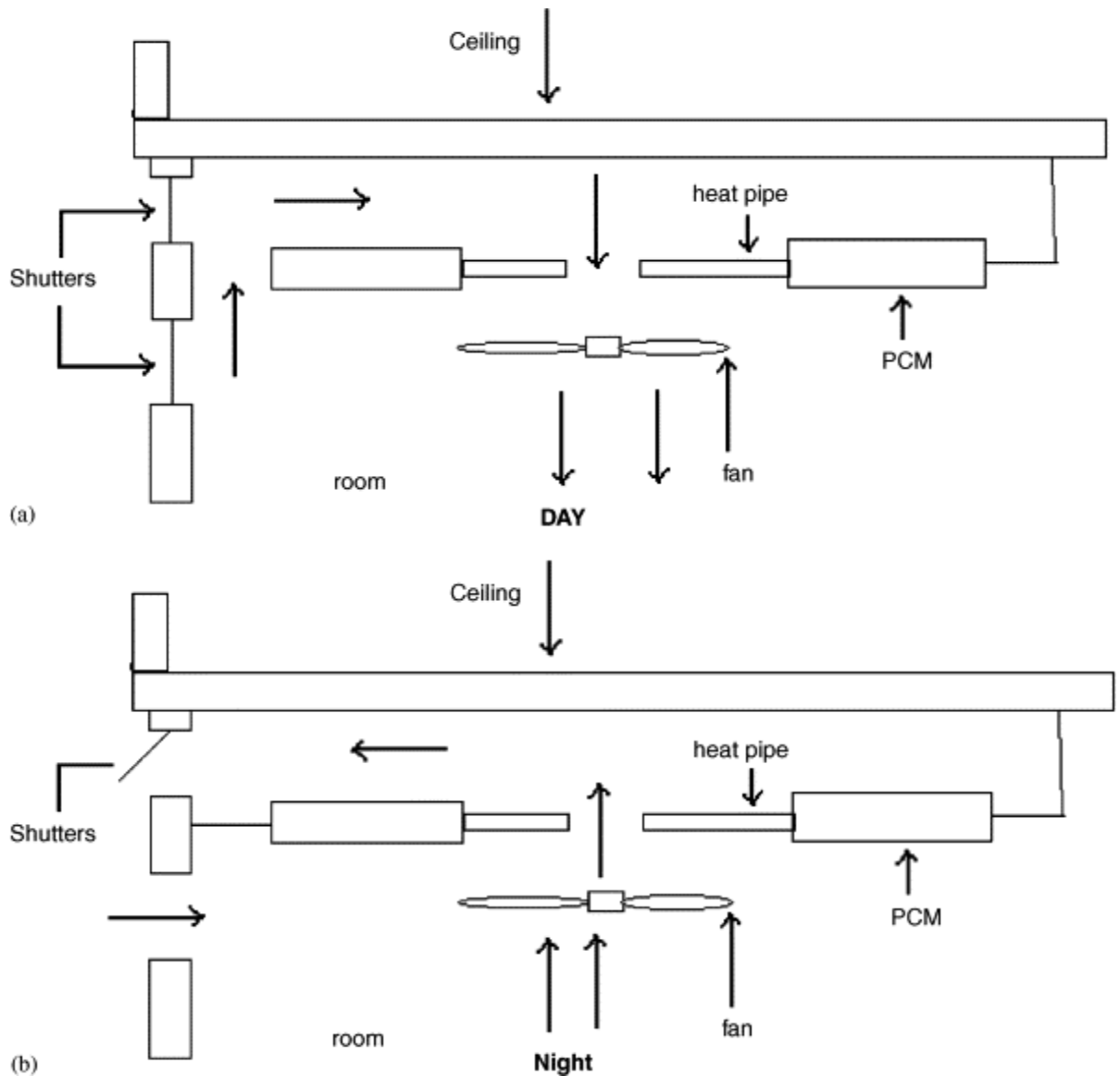
Ο Hadjiena μελέτησε την αποθηκευτική ικανότητα και την κατασκευαστική ευστάθεια για διάφορους θερμικούς κύκλους του σύνθετου συστήματος PCM-τσιμέντου που αποτελείται από ένυδρο θειώδες νάτριο ενσωματωμένο στο τσιμέντο. Κατέληξε ότι η μεγάλη επιφάνεια αποθήκευσης αποστειρωμένου πορώδους τσιμέντου λειτουργεί σαν ένα καλό καλούπι του τηκόμενου $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (σημείο τήξης 48 °C) και βελτιώνει την κατασκευαστική του ευστάθεια κατά τη διάρκεια των θερμικών κύκλων. Το θερμοκρασιακό εύρος της αλλαγής φάσης ήταν περίπου 10 °C για ένα σύνθετο υλικό που λιώνει μερικώς.

Συστήματα θέρμανσης με βάση τον αέρα

Οι Morrison, Khalik και Jurinak μελέτησαν την απόδοση ηλιακών συστημάτων θέρμανσης με βάση τον αέρα χρησιμοποιώντας μονάδα αποθήκευσης ενέργειας με υλικά αλλαγής φάσης. Τα κύρια αντικείμενα της εργασίας τους ήταν: να προσδιορίσουν την επίδραση της λανθάνουσας θερμότητας και της θερμοκρασίας τήξης των υλικών αλλαγής φάσης στο ηλιακό σύστημα θέρμανσης με αέρα και να αναπτύξουν ένα εμπειρικό μοντέλο μονάδων αποθήκευσης ενέργειας με υλικά αλλαγής φάσης. Συμπέραναν ότι τα υλικά αλλαγής φάσης θα έπρεπε να επιλεγούν με βάση το σημείο τήξης και της λανθάνουσας θερμότητας. Διαπίστωσαν επίσης ότι συστήματα θέρμανσης αέρα που χρησιμοποιούν ένυδρο θειώδες νάτριο σαν αποθηκευτικό μέσο, απαιτούν περίπου το $\frac{1}{4}$ του αποθηκευτικού χώρου ενός θερμοσυσσωρευτή με στρώματα από πέτρες και το $\frac{1}{2}$ μιας αποθηκευτικής δεξαμενής με νερό.

Ταβανοσανίδες

Ένα σύστημα θέρμανσης χώρου που ενσωματώνει υλικά αλλαγής φάσης στην οροφή αναπτύχθηκε από τους Guthertz και Schiler. Ηλιακοί ανακλαστήρες χρησιμοποιήθηκαν για να κατευθύνουν την ηλιακή ενέργεια μέσω των παραθύρων στα υλικά αλλαγής φάσης. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του συστήματος ήταν ότι επέτρεπε σε μια μεγάλη επιφάνεια να αποτελέσει αποθηκευτικό μέσο θερμότητας χωρίς να απαιτούνται μεγάλοι όγκοι αποθηκευτικού μέσου, όπως θα απαιτούνταν στην περίπτωση αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Η χρήση ενός τέτοιου συστήματος έχει την δυνατότητα να ανακτήσει 17-36% των θερμικών απωλειών πάνω στα θερμικά κέρδη. Ο Turpreddy ανέπτυξε μία μονάδα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας ενσωματώνοντας σωλήνες χωμένους σε PCM. Ένα μονοδιάστατο μαθηματικό μοντέλο παρουσιάστηκε για την διαστασιολόγηση της πειραματικής μονάδας. Το σύστημα αυτό αποθήκευε θερμότητα κατά τη διάρκεια της νύχτας και την απελευθέρωνε κατά τη διάρκεια της ημέρας. Στο σχήμα 2 φαίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα που αναπαριστά ένα προτεινόμενο σύστημα εγκατάστασης PCM στο ταβάνι.

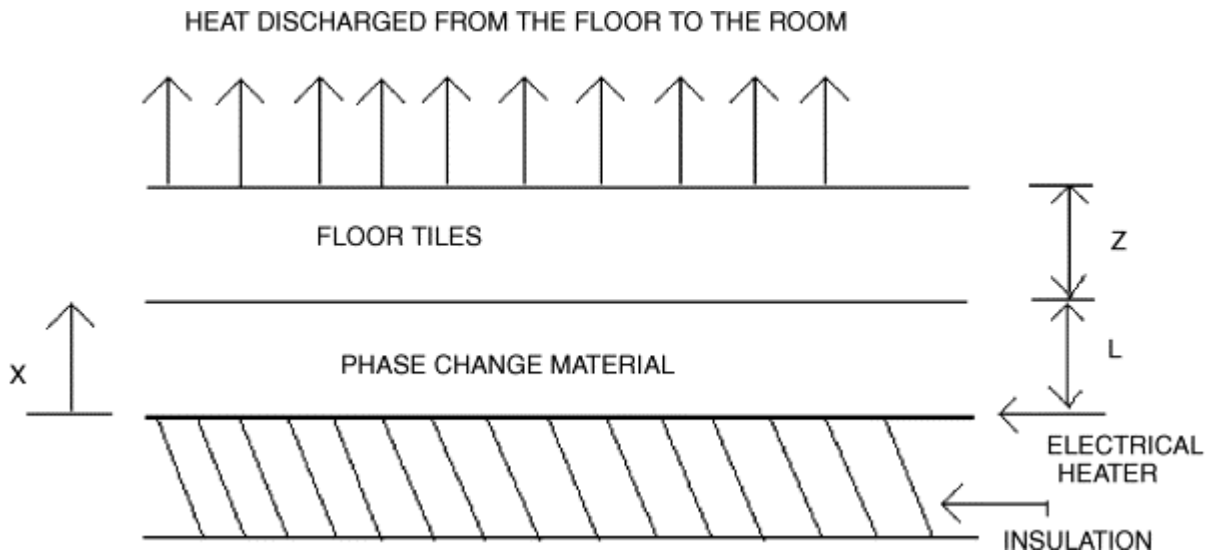


Σχ. 2. Προτεινόμενο σύστημα θερμικών σωλήνων μόνωσης PCM

Ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης

Θέρμανση στο δάπεδο

Τα ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης στο δάπεδο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε περίοδο εκτός αιχμής στα κτήρια. Έτσι, τα φορτία αιχμής μπορούν να καταναλωθούν κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν το κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος είναι χαμηλότερο. Ένα ηλεκτρικό υποδαπέδιο σύστημα αποθήκευσης με κερί παραφίνης με σημείο τήξης προτάθηκε από τους Farid και Chen. Στο σχήμα 3 φαίνεται ένα σύστημα υποδαπέδιας θέρμανσης με θερμική αποθήκευση. Τοποθετήθηκε ένα στρώμα PCM πάχους 30 mm μεταξύ της θερμαινόμενης επιφάνειας και των πλακακιών του δαπέδου. Χρησιμοποιώντας προσομείωση μέσω υπολογιστή βρέθηκε ότι η θερμότητα που προέρχεται από το έδαφος μπορεί να αυξηθεί σημαντικά από 30 σε 75 W/m², όταν γίνεται χρήση υλικού αλλαγής φάσης.



Σχ3. υποδαπέδιο σύστημα θέρμανσης και αποθήκευσης ενέργειας

Ο Nagano παρουσίασε ένα σύστημα κλιματισμού δαπέδου για αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας στα κτήρια. Το μέγεθος του δαπέδου της πειραματικής μονάδας ήταν 0.5 m^2 . Το υλικό αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν σε μορφή κόκκων και κατασκευάστηκε από αφρώδεις σφαίρες από γυαλί και μίγμα παραφίνης. Ο θερμοσυσσωρευτής με PCM με πάχος 3 cm τοποθετήθηκε κάτω από το δάπεδο. Η αλλαγή της θερμοκρασίας του δωματίου και της ποσότητας αποθηκευμένης θερμότητας μετρήθηκαν και τα αποτελέσματα κατέδειξαν τις δυνατότητες αλλαγής του ψυκτικού φορτίου με χρήση κονιοποιημένου PCM.

Ταβανοσανίδες

Οι ταβανοσανίδες αποτελούν σημαντικό στοιχείο της σκεπής και χρησιμοποιούνται για θέρμανση και ψύξη κτηρίων. Ο Bruno ανέπτυξε ένα σύστημα που αποθήκευε θερμότητα σε υλικά αλλαγής φάσης σε περιόδους εκτός αιχμής και απελευθέρωνε αυτή την ενέργεια σε περιόδους αιχμής. Το σημείο τήξης του υλικού αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκε κυμαινόταν στο εύρος $20\text{-}30^\circ\text{C}$ και ήταν σχεδόν ίσο με τη θερμοκρασία δωματίου. Οι Kodo και Ibamoto έκαναν μια προσπάθεια να μειώσουν το φορτίο αιχμής του συστήματος κλιματισμού χρησιμοποιώντας PCM στις ταβανοσανίδες. Το σημείο τήξης και η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του χρησιμοποιούμενου PCM ήταν $24,5^\circ\text{C}$ και $174,4 \text{ KJ}$ αντίστοιχα. Την περίοδο ψύξης, ο ψυχρός αέρας από τη μονάδα διαχείρισης αέρα διέρχεται από το κενό στο θάλαμο οροφής για να αποθηκεύσει την ψύξη στις ταβανοσανίδες με PCM. Η ψύξη ανακτήθηκε κατά τη διάρκεια 2 ωρών αιχμής για να ψύξει το δωμάτιο. Βρέθηκε ότι η αύξηση στη θερμοκρασία δωματίου ήταν μόνο 2°C , ενώ αν δεν γίνονταν χρήση υλικών αλλαγής φάσης η αύξηση στη θερμοκρασία δωματίου θα ήταν 6°C .

Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι πειραματικές μελέτες που εκπονήθηκαν πάνω στις πιο σημαντικές εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης στα κτήρια.

2.2 Πειραματικές μελέτες πάνω στις κύριες εφαρμογές των PCM στα κτήρια

2.2.1 Θερμική μόνωση κτηρίων με χρήση PCM

Η ερευνητική ομάδα του πανεπιστημίου της Βαρκελώνης (Ισπανία) και του Μπορντό (Γαλλία), που αποτελείται από τους επιστήμονες V. Metvaud, L. Ventola, T. Calvet, M.A. Cuervas- Diarte, D. Mondieig, αποπειράθηκε να δημιουργήσει ένα «τοίχο» που θα μπορεί να ενισχύσει την αποθήκευση θερμότητας, ώστε η εσωτερική θερμοκρασία δωματίου κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού να κυμαίνεται μεταξύ 22°C -26°C. Η λογική του «τοίχου» αυτού είναι ότι θα εμποδίζει την θερμότητα του περιβάλλοντος να εισέρχεται εσωτερικά του κτηρίου αποθηκευόντάς την σε PCM. Είναι επόμενο, τέτοιου είδους τοίχοι να συνοδεύονται από αεραγωγούς, οι οποίοι θα μεταφέρουν την αποθηκευμένη θερμότητα μέσω του αέρα εξωτερικά του κτηρίου. Για να πετύχουν, λοιπόν, θερμική άνεση κατά τη θερινή περίοδο, οι επιστήμονες έκαναν πειράματα χρησιμοποιώντας PCM με δύο μεθόδους: α) Στην πρώτη μέθοδο διαπότισαν με PCM πορώδη οικοδομικά υλικά. Στόχευσαν, δηλαδή, στη δημιουργία ενός νέου οικοδομικού υλικού με αποθηκευτικές ικανότητες. β) Στη δεύτερη μέθοδο, ενσωμάτωσαν απευθείας βιομηχανοποιημένα PCM στα τούβλα του τοίχου. Τα αποτελέσματα αναλύονται παρακάτω:

Στην πρώτη μέθοδο που ακολούθησαν, χρησιμοποίησαν «PCM1», ενώ στη δεύτερη «PCM2», όπου:

- **PCM 1:** Μοριακό μίγμα αλκανίων που αποτελείται από: δεκαεξάνιο ($C_{16}H_{34}$), δεκαεπτάνιο ($C_{17}H_{36}$), δεκαοκτάνιο ($C_{18}H_{38}$). Το θετικό με τα μοριακά μίγματα είναι ότι δίνουν τη δυνατότητα στους επιστήμονες να ρυθμίσουν τα χαρακτηριστικά τους, όπως το σημείο τήξης τους.

- **PCM 2:** μία παραφίνη που κυκλοφορεί στο εμπόριο από την γερμανική εταιρία Rubitherm GmbH, την RT 27.

Τα χαρακτηριστικά τους φαίνονται εποπτικά στους παρακάτω πίνακες:

Πιν.5. Θερμοφυσικές ιδιότητες PCM

PCM1	15% C ₁₆ -15% C ₁₇ - 70% C ₁₈
T _{στερεοποίησης}	21.3°C
T _{υγροποίησης}	23.3 °C
Θερμότητα τήξης	149 kJ/kg

PCM2	3.9% C ₁₇ -45.8% C ₁₈ - 35.9% C ₁₉ -12.5% C ₂₀ - 1.9% άλλα
T _{στερεοποίησης}	23.0°C
T _{υγροποίησης}	26.5 °C
Θερμότητα τήξης	145 kJ/kg

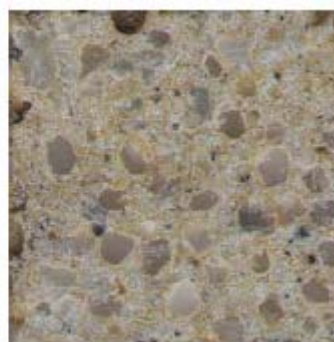
Πρώτη μέθοδος: διαπότιση του πορώδους υλικού με το PCM 1

Το πορώδες υλικό (Σχ. 4) είναι το Ca[Al₂Si₂O₈] (αργιλικό πυριτικό ασβέστιο). Το υλικό από μόνο του έχει πολύ καλές θερμομονωτικές ικανότητες. Επίσης το 50% του υλικού είναι κενό αέρος. Υπάρχουν λοιπόν οι προϋποθέσεις ώστε το υλικό να απορροφήσει το PCM.

Στο εργαστήριο το τελικό προϊόν προήλθε από απλή εμβάπτιση του πορώδους υλικού στο PCM 1 σε κενό αέρος. Το τελικό υλικό- δείγμα, όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα, περιέχει PCM σε ποσοστό 20% κ.β.



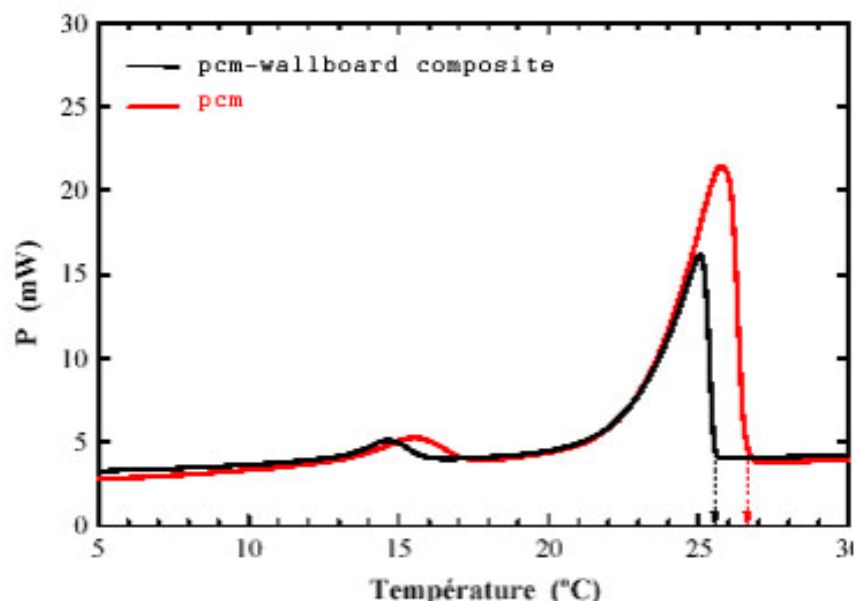
Σχ.4



Σχ.5

Σχ.4,5 Το οικοδομικό υλικό: Σχ.4 μόνο του, Σχ.5 διαποτισμένο με PCM

Στο καλορίμετρο DSC προέκυψαν οι καμπύλες του PCM και του υλικού που προέκυψε από την ανάμιξη του PCM με το πορώδες υλικό.



Διαγρ.2. DSC καμπύλες του PCM και του οικοδομικού υλικού με PCM

Όπως φαίνεται, τα θερμικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος-δείγματος (πορώδους υλικού με PCM) δεν διαφέρουν πολύ από τα θερμικά χαρακτηριστικά του PCM.

Πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασίες μεταξύ -10°C και 40°C έδειξαν ότι υπάρχει πλήρης αναστρεψιμότητα του κύκλου θέρμανσης-ψύξης. Επίσης αποδείχτηκε ότι τα PCM μετά την εμφύσησή τους στο πορώδες υλικό συνεχίζουν να είναι ομοιόμορφα καταμελημένα στο χώρο. Τα δείγματα ζυγίστηκαν πριν και μετά από κάθε κύκλο, με αποτέλεσμα να διαπιστωθεί απώλεια μάζας. Αυτό κάνει αναγκαίο την εξωτερική επένδυση του υλικού αμέσως μόλις απορροφηθεί το PCM.

Στη συνέχεια οι επιστήμονες υπολόγισαν και συνέκριναν την αποθηκευτική ικανότητα του PCM με την αποθηκευτική ικανότητα ενός τοίχου επιφάνειας 1 m^2 και πάχους 2.5 cm που θα περιλαμβάνει αυτό το υλικό. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πιν 6. Ιδιότητες τοίχου PCM

Υλικό	Βάρος (kg)	C_p (J/kgK)	Λανθάνουσα θερμότητα (kJ/kg)	Αισθητή θερμότητα (kJ/kg)
PCM1	5.69	1.90	149	32
Τοίχος	28.44	0.57	-	49
PCM1-Τοίχος	34.13	0.83	30	86

Το θετικό ενός τέτοιου υλικού είναι ότι μπορεί να προσαρμόζεται εξωτερικά, σε ήδη κατασκευασμένους τοίχους.

Δεύτερη μέθοδος: Ενσωμάτωση του PCM2 σε τούβλα

Για το πείραμα οι επιστήμονες χρησιμοποιούν ένα απλό τούβλο οικοδομής με έξι οπές, όπως φαίνεται στην εικόνα με τα εξής χαρακτηριστικά:

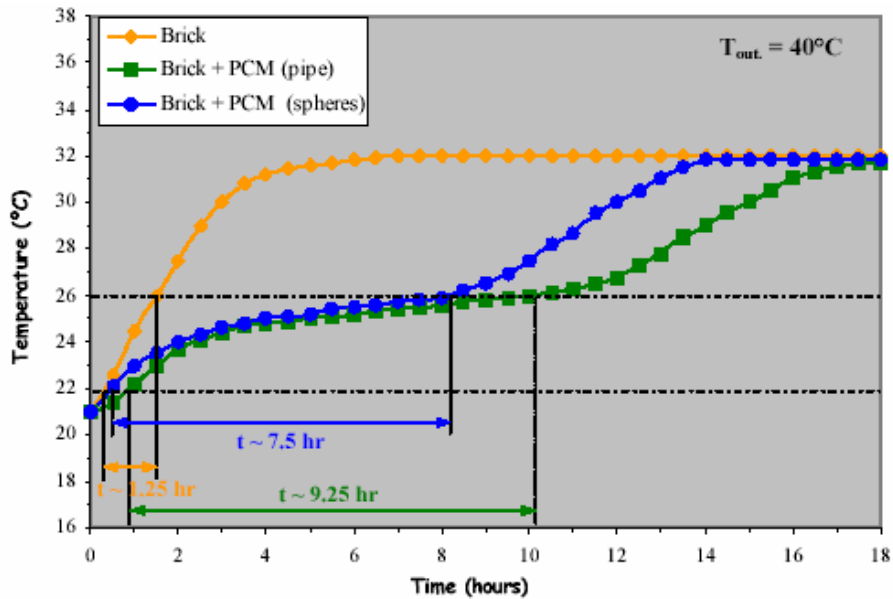
Διαστάσεις: $13.0 \times 9.3 \times 28.5 \text{ cm}^3$, Βάρος: 3.0 kg, Χωρητικότητα οπών: 260 cm^3 η κάθε μία.



Σχ.6 Τούβλο με έξι οπές και PCM σε κάψουλες και σε σωλήνες

Η εγκατάσταση των PCM γίνεται, είτε σε πλαστικές σφαίρες (μικροκάψουλες), είτε σε πλαστικούς σωλήνες, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα.

Στη συνέχεια οι επιστήμονες καθόριζαν την τιμή της θερμοκρασίας στην εξωτερική πλευρά του τούβλου και μετρούσαν την θερμοκρασία στην εσωτερική πλευρά του τούβλου ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα PCM βελτιώνουν την αποθηκευτική ικανότητα του τούβλου. Για μια εξωτερική θερμοκρασία στους 40°C , η εσωτερική θερμοκρασία του τούβλου κυμαίνεται μεταξύ 22°C και 26°C για περίπου 7.5 ώρες όταν χρησιμοποιήθηκαν PCM σε πλαστικές σφαίρες και για 9.25 ώρες όταν χρησιμοποιήθηκαν PCM σε πλαστικούς σωλήνες. Τα αποτελέσματα κρίνονται ικανοποιητικά και φαίνονται εποπτικά στο παρακάτω διάγραμμα:



διαγρ.3. Η μεταβολή της θερμοκρασίας στην εσωτερική πλευρά του τούβλου συναρτήσει του χρόνου

Πιν 7. ιδιότητες τούβλου-PCM

$T_{\text{εξωτερική}} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Βάρος PCM (gr)	Χρόνος θερμικής άνεσης ($22 \text{ }^{\circ}\text{C} < T < 26 \text{ }^{\circ}\text{C}$) σε ώρες
Τούβλο		1,25
Τούβλο+ PCM σε μικροκάψουλες	480	7.50
Τούβλο+ PCM σε σωλήνες	720	9.25

2.2.2 PCM σε υποδαπέδιο σύστημα θέρμανσης

Στην Κίνα η κύρια πηγή θέρμανσης είναι ο γαιάνθρακας, ο οποίος όμως προκαλεί ατμοσφαιρική ρύπανση. Καθώς η Κίνα φιλοξένησε τους ολυμπιακούς αγώνες του 2008, οι αρχές της Κίνας στράφηκαν σε άλλες πηγές θέρμανσης, όπως η ηλεκτρική ενέργεια. Δυστυχώς όμως και εδώ υπάρχουν δυσκολίες, λόγω της υπερβολικής κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας την ημέρα σε σχέση με τη νύχτα. Σε αυτό το πρόβλημα προσπάθησε να δώσει λύση η ερευνητική ομάδα από την Κίνα που αποτελείται από τους εξής επιστήμονες: Kunring Lin και Yinring Zhang. Οι επιστήμονες συνέλαβαν την ιδέα να ενσωματώσουν σε ένα υποδαπέδιο σύστημα θέρμανσης υλικά αλλαγής φάσης. Το σύστημα θα μπορεί να αποθηκεύει θερμότητα κατά τη διάρκεια της νύχτας, όπου η ηλεκτρική ενέργεια είναι φτηνή, και να την απελευθερώνει την ημέρα. Για να περιορίσουν τις απώλειες, οι επιστήμονες επιχείρησαν να δημιουργήσουν ένα PCM, το οποίο κατά την αλλαγή φάσης θα διατηρεί σταθερό το σχήμα του. Το PCM που χρησιμοποιήθηκε περιέχει 75% κατά βάρος παραφίνη και 25% κατά βάρος πολυαιθυλένιο, που λειτουργεί σαν υποστηρικτικό υλικό. Η όψη του φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 7.



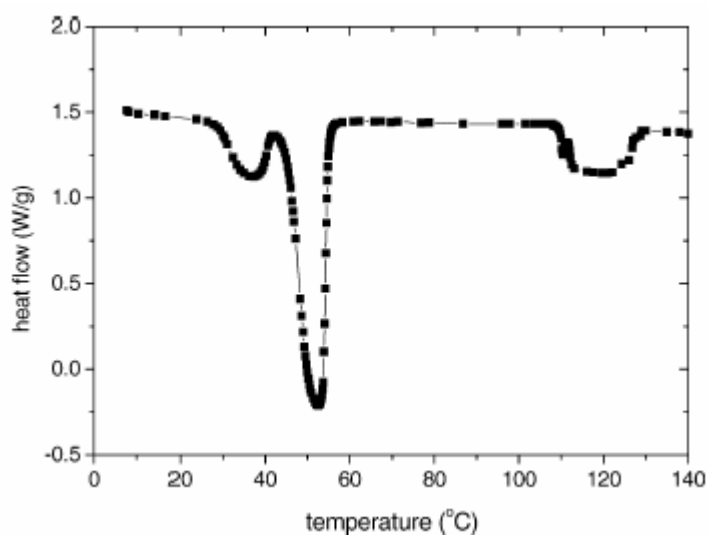
Σχ7. Το τελικό υλικό

Στον παρακάτω πίνακα 8 διακρίνουμε τις τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών του υλικού αλλαγής φάσης:

Πιν.8. Ιδιότητες PCM

Πυκνότητα ρ (kg/m^3)	850
Θερμική αγωγιμότητα k (W/mK)	0.15
Θερμότητα τήξης H_m (kJ/kg)	150
Θερμοχωρητικότητα αισθητής θερμότητας c_s (kJ/kgK)	2.0

Για να προσδιορίσουν οι επιστήμονες το ακριβές σημείο τήξης του μίγματος παραφίνης-πολυαιθλενίου, χρησιμοποίησαν το διαφορικό καλορίμετρο DSC. Η καμπύλη που προκύπτει φαίνεται στο διάγραμμα 4.



διαγρ. 4. Καμπύλη που προκύπτει από το DSC καλορίμετρο

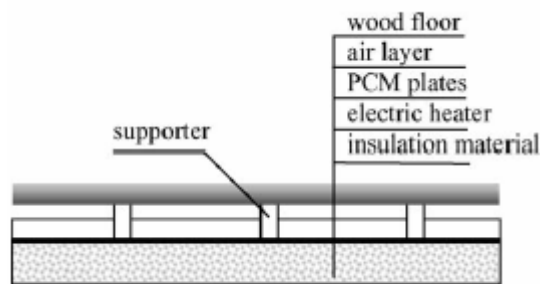
Η θερμοκρασία αλλαγής φάσης προκύπτει περίπου ίση με 45°C.

Περιγραφή πειραματικής διάταξης:

Ουσιαστικά πρόκειται για ένα πειραματικό σπίτι-δωμάτιο 3m×2m×2m. Στον τοίχο νότιου προσανατολισμού υπάρχει ένα παράθυρο διαστάσεων 1.6m×1.5m, καλυμμένο με μια μαύρη κουρτίνα. Οι τοίχοι και η οροφή έχουν πάχος 100 mm και είναι κατασκευασμένοι από πολυστυρόλιο. Το δάπεδο αποτελείται από 120 mm μόνωσης, ηλεκτρικούς θερμαντήρες, στρώμα PCM πάχους 15 mm, ένα στρώμα αέρα 10 mm και ξύλινο πάτωμα πάχους 8 mm. Η δομή του δαπέδου, καθώς και το εξωτερικό του πειραματικού δωματίου φαίνονται στις παρακάτω εικόνες :

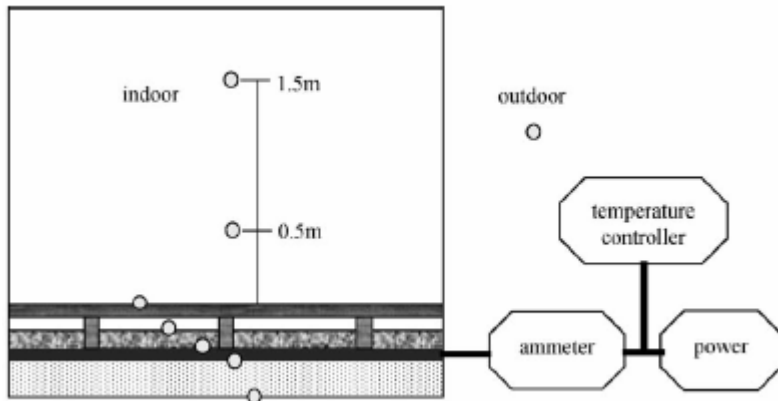


Σχ.8 εξωτερική όψη δωματίου



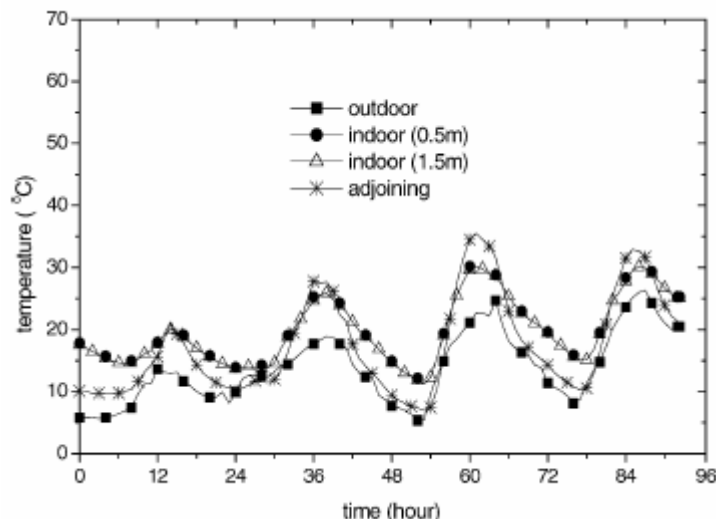
Σχ.9. Στρώματα που αποτελούν το δάπεδο

Αυτό που ενδιαφέρει ιδιαίτερα τους επιστήμονες για να διατυπώσουν συμπεράσματα, είναι να γνωρίζουν την κατανομή της θερμοκρασίας. Για αυτό το λόγο, τοποθέτησαν θερμιδοστοιχεία σε διάφορα σημεία του δωματίου και μέτρησαν τις τιμές της θερμοκρασίας. Εκτός της εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος, μέτρησαν την θερμοκρασία και εσωτερικά του δωματίου στα διάφορα στρώματα του δαπέδου και στον τοίχο σε ύψος 0.5m και 1.5m. Τα σημεία που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις φαίνονται εποπτικά στο παρακάτω σχήμα 10:



Σχ.10. Σημεία που τοποθετήθηκαν θερμιδοστοιχεία

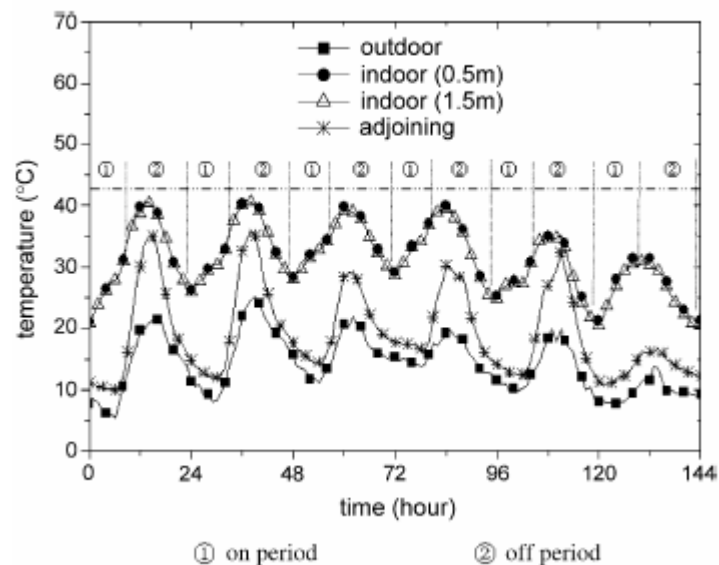
Το πείραμα διεξήχθη στην Κίνα στο πανεπιστήμιο Tsinghua τον Απρίλιο του 2003. Ο μέσος όρος της θερμοκρασίας τον Απρίλη είναι $13.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Οι θερμαντήρες διαθέτουν ισχύ 150W . Το σύστημα δούλεψε 6 ημέρες με χρήση ηλεκτρικής θέρμανσης κατά τη διάρκεια της νύχτας και στη συνέχεια συγκρίθηκε με ένα συμβατικό υποδαπέδιο σύστημα θέρμανσης χωρίς PCM, το οποίο δούλεψε 4 μέρες. Τη νύχτα οι ώρες θέρμανσης ήταν από 23:00-8:00. Στη διάρκεια αυτή, οι θερμαντήρες σταματούσαν να λειτουργούν όταν ξεπερνούσαν τη θερμοκρασία των 70°C και ξανάρχιζαν να λειτουργούν όταν η θερμοκρασία έπεφτε κάτω των $55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Στα παρακάτω διαγράμματα 5 φαίνονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των δύο συστημάτων. Στο πρώτο διάγραμμα φαίνονται οι θερμοκρασίες στα διάφορα σημεία του σπιτιού που έγινε μέτρηση, κατά τη διάρκεια των 4 ημερών συμβατικής θέρμανσης.



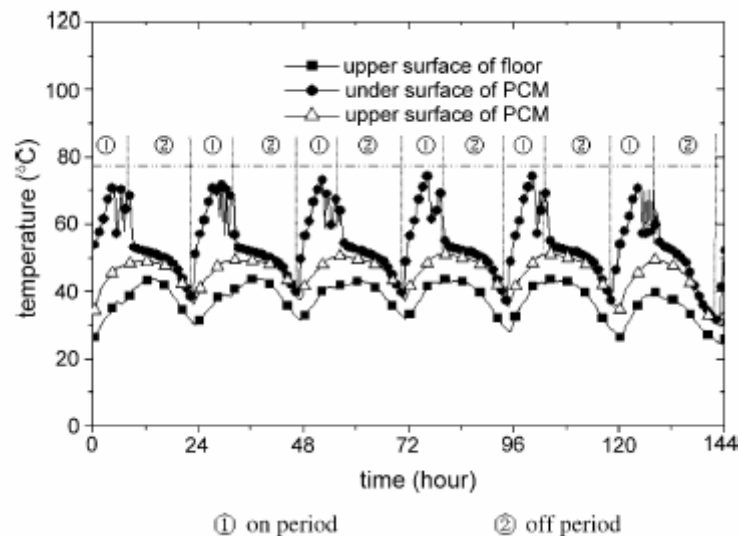
Διαγρ.5. Μεταβολή θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου για δωμάτιο με συμβατική θέρμανση

Η μέση εσωτερική θερμοκρασία κυμαίνεται στους $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ και η μέση θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ ημέρας και νύχτας είναι $12\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται οι θερμοκρασίες στα διάφορα σημεία του δωματίου που έγινε μέτρηση, κατά τη διάρκεια των 6 ημερών θέρμανσης με χρήση PCM.



Διαγρ.6. Μεταβολή θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου για δωμάτιο με υποδαπέδια θέρμανση με PCM



Διαγρ.7. Μεταβολή θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου για δωμάτιο με υποδαπέδια θέρμανση με PCM

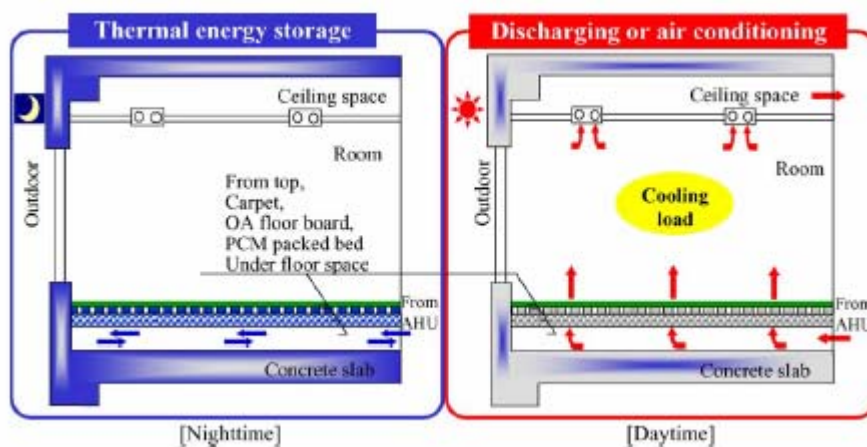
Η μέση εσωτερική θερμοκρασία αυξήθηκε στους 31°C, ενώ η μέση θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ ημέρας και νύχτας παρέμεινε σταθερή στους 12°C. Η θερμοκρασιακή διαφορά των σημείων ύψους 0.5 και 1.5 m είναι μικρότερη των 0.5°C, έχουμε, δηλαδή, υψηλό βαθμό θερμικής άνεσης. Από το δεύτερο διάγραμμα παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία στη στρώση των PCM παραμένει 45°C για τουλάχιστον 10 ώρες μετά την διακοπή της ηλεκτρικής θέρμανσης. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, το πείραμα διεξήχθη στην Κίνα στο πανεπιστήμιο Tsinghua τον Απρίλιο

του 2003. Ο μέσος όρος της θερμοκρασίας τον Απρίλη είναι 13.6 °C. Αυτό εξηγεί τις υψηλές εσωτερικές θερμοκρασίες που προέκυψαν. Ανακεφαλαιώνοντας, τα δύο συμπεράσματα στα οποία κατέληξε ο Lin και η ερευνητική του ομάδα είναι:

1. Το σύστημα υποδαπέδιας θέρμανσης με PCM αύξησε τη μέση εσωτερική θερμοκρασία, χωρίς να αυξήσει την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ ημέρας και νύχτας.
2. Η θερμοκρασία των πλακών PCM διατηρήθηκε στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης για μια μεγάλη περίοδο αφότου οι θερμοαντήρες σταμάτησαν να λειτουργούν. Με αυτόν τον τρόπο, περισσότερη από τη μισή ολική ηλεκτρική θερμική ενέργεια μετατοπίστηκε από την περίοδο αιχμής στην περίοδο εκτός αιχμής, γεγονός το οποίο παρέχει σημαντικά οικονομικά αποτελέσματα.

2.2.3 PCM σε υποδαπέδιο σύστημα ψύξης

Στην Ιαπωνία το καλοκαίρι οι απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας σε κτήρια είναι διπλάσιες κατά την ημέρα σε σχέση με τη νύχτα. Αυτό οφείλεται κυρίως στη χρήση κλιματιστικών. Αυτό όμως θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί αν με τη χρήση PCM γινόταν μεταφορά του φορτίου αιχμής. Για αυτό το λόγο οι επιστήμονες K. Nagano και S.Takeda προσανατολίστηκαν να ενσωματώσουν PCM σε χώρους που η εγκατάσταση κλιματισμού είναι υποδαπέδια. Το μεγάλο πλεονέκτημα μιας υποδαπέδιας εγκατάστασης κλιματισμού είναι ότι φιλτράρει τον αέρα και τον «μετακινεί» δίχως σκόνη και χωρίς να δημιουργεί υπερβολικό ρεύμα αέρα. Στο σχήμα 11 φαίνεται μία εγκατάσταση που συνδυάζει την εγκατάσταση κλιματισμού με τα PCM.



Σχ. 11 συνδυασμός ψυκτικού φορτίου και PCM

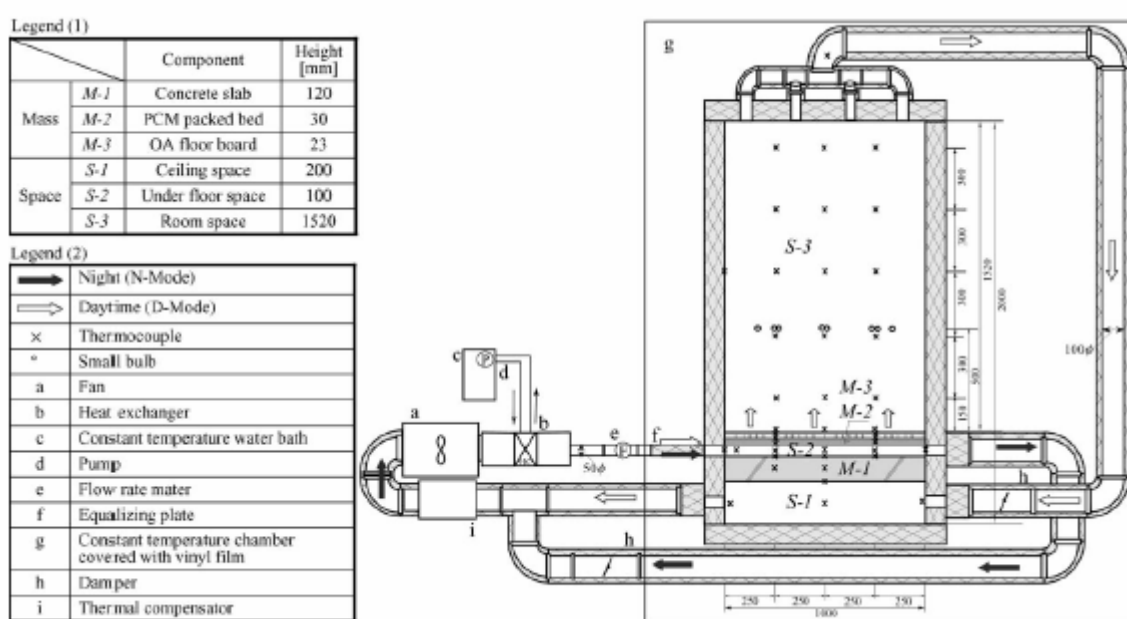
Η λανθάνουσα θερμότητα αποθηκεύεται σε μικροκάψουλες PCM, οι οποίες έχουν διάμετρο 3 mm (σχήμα) και είναι διαπερατές στον αέρα (σχήμα 12). Οι μικροκάψουλες διαμορφώνονται σε πλάκες με επένδυση αλουμινίου και τοποθετούνται κάτω από το δάπεδο.



Σχ.12 Τα PCM σε μικροκάψουλες

Περιγραφή της πειραματικής διάταξης:

Στο σχήμα 13 φαίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε :



Σχ.13 Πειραματική διάταξη

Η ροή του αέρα επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ανεμιστήρα (α). Ο αέρας περνάει μέσα από έναν αεραγωγό και οδηγείται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας (b) όπου ψύχεται. Ο εναλλάκτης συνδέεται μέσω μιας αντλίας (d) με μια γεννήτρια ζεστού και κρύου νερού (c). Με αυτόν τον τρόπο ρυθμίζεται η θερμοκρασία του αέρα. Η ποσότητα του αέρα που κυκλοφορεί, μετρείται από ειδικό μετρητή (e). Το μαύρο και το άσπρο βελάκι δείχνουν την ροή του αέρα τη νύχτα και τη μέρα αντίστοιχα.

Ιδιότητες των PCM:

Το PCM που χρησιμοποιήθηκε (Sample3) αποτελείται από το δεκαεξάνιο (Sample1: $C_{16}H_{34}$) και από το δεκαοχτάνιο (Sample2: $C_{18}H_{38}$) με σημείο τήξης τους $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Οι ιδιότητές τους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πιν.9 Ιδιότητες των PCM

	Τήξης (°C)	Τστεροποίησης (°C)	L (kJ/kg)
Sample 1	13.9	13.2	201
Sample 2	28.2	24.7	202
Sample 3	18.5	20.2	121

Συνθήκες διεξαγωγής πειράματος:

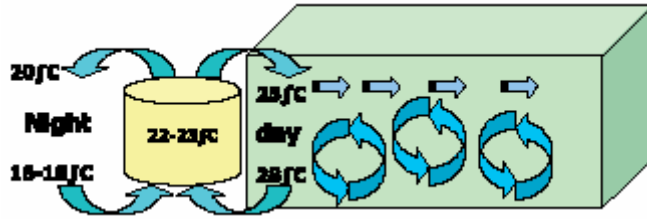
Στο συγκεκριμένο πείραμα οι επιστήμονες προσομοιώνουν τις συνθήκες του χώρου του πειράματος με συνθήκες γραφείου. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, τις ώρες δηλαδή 22.00-8.00, λειτουργεί το κλιματιστικό και ψύχει τον αέρα στους 18.5°C, όσο είναι και η θερμοκρασία τήξης του PCM. Στη συνέχεια αυτός ο ψυχρός αέρας ανακυκλώνεται στους αεραγωγούς κάτω από το δάπεδο. Λανθάνουσα θερμότητα αποθηκεύεται στα PCM, με αποτέλεσμα ο αέρας να διατηρείται ψυχρός. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, τις ώρες δηλαδή 9.00-21.00, ο ψυχρός αέρας απελευθερώνεται στο χώρο. Τα PCM ($T_m = 18.5^\circ\text{C}$) εξαιτίας της λανθάνουσας θερμότητας εμποδίζουν τη θερμοκρασία του αέρα να ανέβει άνω των 18.5°C. Ο κλιματισμός μπαίνει σε λειτουργία μόλις η θερμοκρασία δωματίου αγγίξει τους 26°C, όπου το PCM βρίσκεται σε υγρή μορφή, χαρακτηρίζεται από αισθητή θερμότητα και δεν μπορεί να εμποδίσει την άνοδο της θερμοκρασίας. Τις ώρες 20.00-22.00 δε χρησιμοποιείται καθόλου κλιματισμός. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα θερμικά φορτία που απελευθερώνονται σε χώρο γραφείου (φωτισμός, ηλεκτρονικοί υπολογιστές, ανθρώπινος παράγοντας, ηλιακή ακτινοβολία) το μέγιστο συνολικό θερμικό φορτίο υπολογίζεται 70 W/m².

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν πειράματα για διάφορες τιμές ψυκτικού φορτίου με και χωρίς PCM.

Οι επιστήμονες κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι με τη χρήση του PCM το ψυκτικό φορτίο μπορεί να μειωθεί κατά 15.6%.

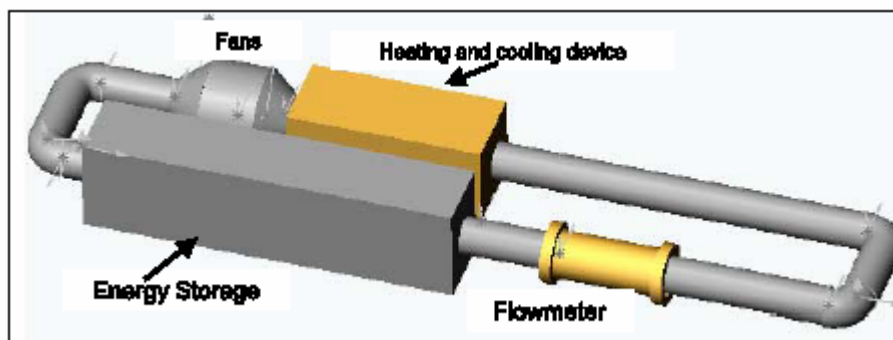
2.2.4 Παθητικό σύστημα ψύξης με PCM

Σε κλίματα που το καλοκαίρι η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ ημέρας και νύχτας είναι γύρω στους 15°C, υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν στα κτήρια PCM. Συγκεκριμένα τα PCM μπορούν να αποθηκεύουν ψύξη κατά τη διάρκεια της νύχτας και να την απελευθερώνουν στο εσωτερικό του κτηρίου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτή η διεργασία αποτυπώνεται σχηματικά στο σχήμα 14.



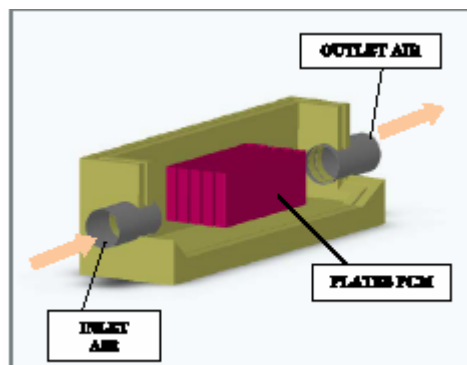
Σχ.14 Η ιδέα της παθητικής ψύξης

Οι επιστήμονες B. Zalba και J. Marin πειραματίστηκαν με το παθητικό σύστημα ψύξης με PCM. Σχεδίασαν μια μικρογραφία μιας πραγματικής εγκατάστασης, μια μικρή πειραματική διάταξη (σχήμα 15).



Σχ. 15 Η πειραματική διάταξη

Όπως φαίνεται και στο σχήμα η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει ανεμιστήρες για να δημιουργούν ροή του αέρα (100-150m³/h), εναλλάκτες θερμότητας για να ρυθμίζουν τη θερμοκρασία κατάλληλα (από 16°C έως 30 °C), αεραγωγούς για να γίνεται η μεταφορά ψύξης μέσω του αέρα και τα υλικά αλλαγής φάσης που θα αποθηκεύουν ψύξη. Η διάταξη των PCM φαίνεται στο σχήμα 16.



Σχ. 16 διάταξη του PCM

Ως υλικό αλλαγής φάσης οι επιστήμονες χρησιμοποίησαν το μοριακό μίγμα που αποτελείται από 34% κ.β. C₁₆ και 66% κ.β. C₁₈ με σημείο τήξης τους 19.5 °C.

Πειραματίστηκαν με διάφορα πάχη PCM και κατέληξαν ότι το πιο αποδοτικό είναι το πάχος των 15 mm.

Ένα παθητικό σύστημα ψύξης με PCM υπερτερεί απέναντι σε ένα συμβατικό σύστημα ψύξης, γιατί μειώνεται σημαντικά η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Βέβαια μια τέτοια εφαρμογή δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί στην Ελλάδα, αφού το καλοκαίρι οι θερμοκρασίες είναι υψηλές όλο το 24-ωρο. Αντίθετα στη βιβλιοθήκη της πόλης Skonde της Σουηδίας η σουηδική εταιρία climator εγκατέστησε ένα τέτοιο σύστημα ψύξης. Το PCM που χρησιμοποίησαν είναι το ClimSel C24 με σημείο τήξης 24°C. Αυτό το PCM πριν από τους 24 °C είναι παγωμένο σε στερεά μορφή. Μόλις η θερμοκρασία αγγίξει και ξεπεράσει τους 24 °C, το υλικό υγροποιείται και απελευθερώνει ψύξη. Έτσι λοιπόν, κατά τη διάρκεια της νύχτας που οι θερμοκρασίες είναι χαμηλές τα 425 kg PCM, που είναι τοποθετημένα σε ειδικές πλακέτες (σχήμα 17) και εγκατεστημένα στην οροφή του κτηρίου, αποθηκεύουν ψύξη την οποία απελευθερώνουν κατά τη διάρκεια της ημέρας, όπου η θερμοκρασία ξεπερνά πολλές φορές τους 30 °C.



Σχ. 17 Πλακέτες στις οποίες τοποθετούνται τα PCM

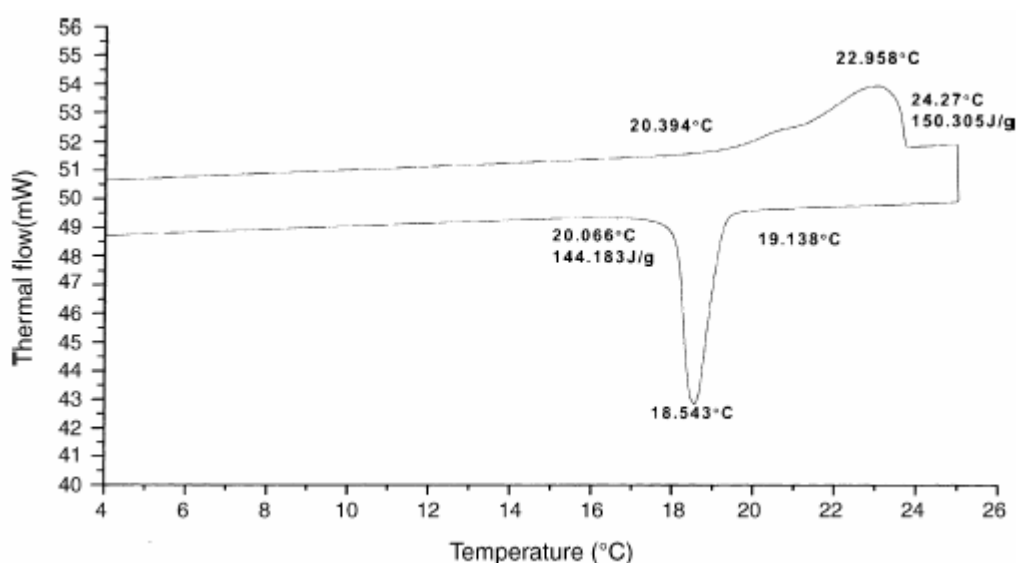
2.2.5 PCM σε γυψοσανίδες

Οι επιστήμονες L. Shilei και Z. Neng από την Κίνα ενσωμάτωσαν PCM σε γυψοσανίδες και τις εγκατέστησαν εσωτερικά στους τοίχους ενός δωματίου. Με αυτό στόχευσαν να βελτιώσουν το εσωτερικό θερμικό περιβάλλον του δωματίου την περίοδο του χειμώνα. Το πείραμα έλαβε χώρα στην πόλη Shenyang της νότιας Κίνας (γεωγραφικό μήκος 41.8° και γεωγραφικό πλάτος 123.4°) Στον πίνακα 10 μπορούμε να διακρίνουμε το μέσο όρο των ελάχιστων και μέγιστων θερμοκρασιών για κάθε μήνα του χειμώνα.

Πιν.10 μέσος όρος ελάχιστων και μέγιστων θερμοκρασιών για κάθε μήνα του χειμώνα

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

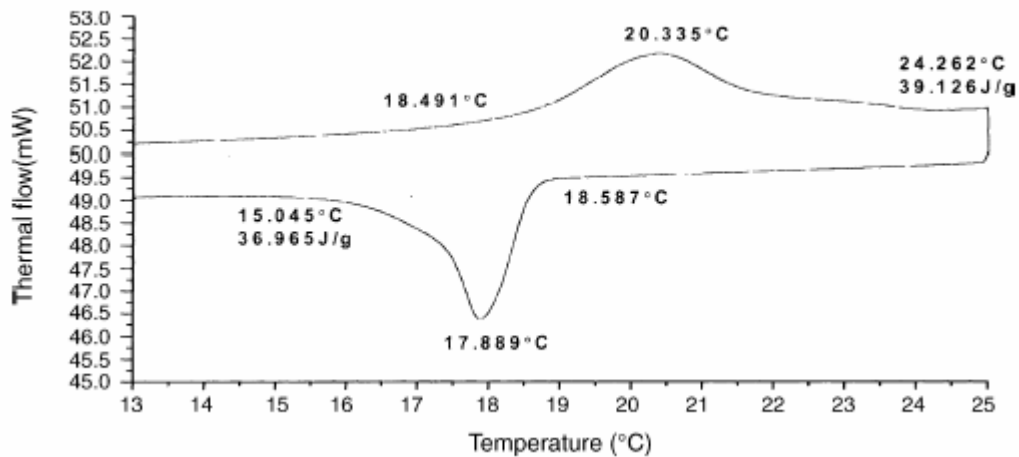
Ως υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιήθηκαν λιπαρά οξέα, αφού αυτά ικανοποιούν τα θερμοδυναμικά και κινητικά κριτήρια για αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας σε χαμηλή θερμοκρασία. Συγκεκριμένα το τελικό PCM προήλθε από ανάμιξη 82% κ.β καπρικού οξέως ($C_9H_{19}COOH$) και 18% κ.β. λαυρικού οξέως ($C_{12}H_{24}O_2$) και έχει σημείο τήξης $20.394\text{ }^{\circ}C$ και εύρος ζώνης μετάβασης αλλαγής φάσης $1\text{ }^{\circ}C$. Το διάγραμμα που προκύπτει από το DSC καλορίμετρο φαίνεται παρακάτω (διάγραμμα 8).



Διαγρ. 8 καμπύλη που προκύπτει από το DSC καλορίμετρο με ρυθμό $0.2\text{ }^{\circ}C/min$

Στη συνέχεια το τελικό υλικό αλλαγής φάσης ενσωματώνεται σε γύψο, για να σχηματιστούν οι γυψοσανίδες. Επιλέγεται ο γύψος, γιατί είναι πορώδες υλικό και έχει την ικανότητα να απορροφήσει εύκολα τα PCM. Επίσης ο γύψος είναι φτηνό υλικό και αποτελεί καλό μονωτικό.

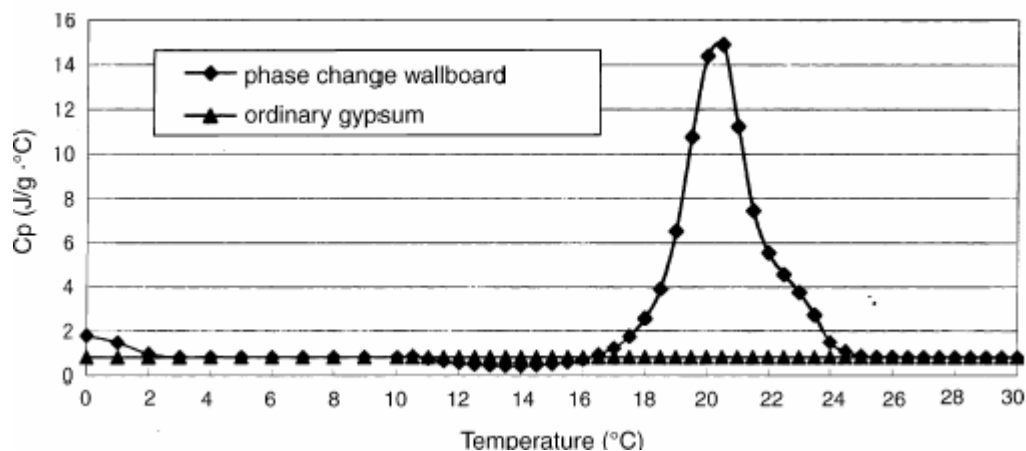
Η ενσωμάτωση των PCM στο γύψο διαρκεί μόλις λίγα λεπτά και η καμπύλη που προκύπτει από το DSC καλορίμετρο, φαίνεται στο διάγραμμα 9.



Διαγρ.9 καμπύλη που προκύπτει από το DSC καλορίμετρο με ρυθμό 0. 2 °C/min για το μίγμα γύψου-PCM

Η θερμοκρασία τήξης προκύπτει 18.491 °C και η θερμοκρασία στερεοποίησης προκύπτει 18.587 °C, οι οποίες είναι επιθυμητές εσωτερικές θερμοκρασίες για το χειμώνα.

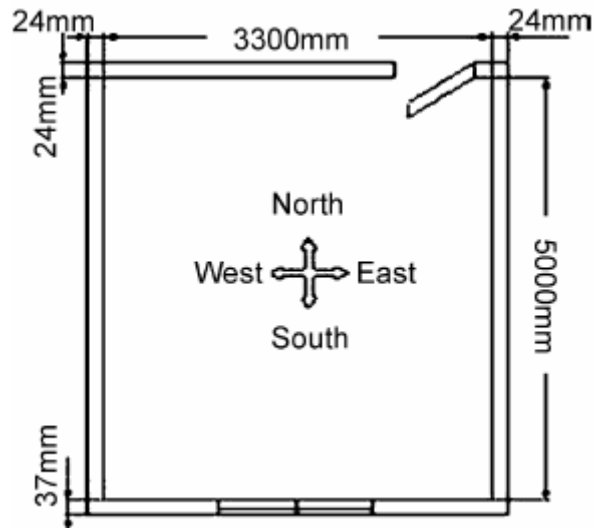
Στο παρακάτω διάγραμμα (διάγραμμα 10) συγκρίνεται η ειδική θερμοχωρητικότητα μιας απλής γυψοσανίδας και μιας γυψοσανίδας εμπλουτισμένης με υλικό αλλαγής φάσης.



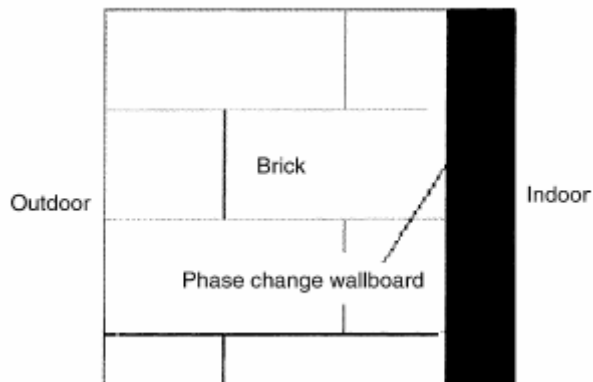
Διαγρ.10 μεταβολή ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας

Είναι φανερό ότι η εμπλουτισμένη με PCM γυψοσανίδα έχει υψηλότερη ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας από την απλή.

Το δωμάτιο στο οποίο έγινε η εγκατάσταση έχει διαστάσεις 5m×3,3m×2,8m. Στον νότιο τοίχο έχει ένα παράθυρο με διαστάσεις 1.5 m×1.5 m και στον τοίχο με βόρειο προσανατολισμό έχει μία ξύλινη πόρτα διαστάσεων 1m×2m.Ο ανατολικός τοίχος και ο νότιος είναι εξωτερικοί, ενώ ο δυτικός και ο βόρειος εσωτερικοί. Το δωμάτιο και ο τρόπος εγκατάστασης της γυψοσανίδας φαίνονται εποπτικά στα σχήματα 18 και 19.

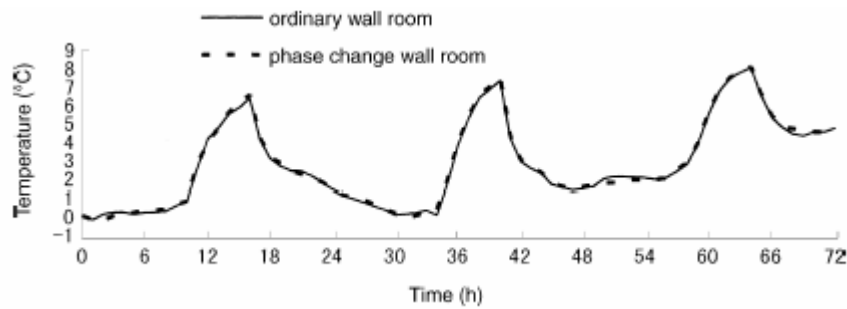


Σχ.18 Σχέδιο πειραματικού δωματίου

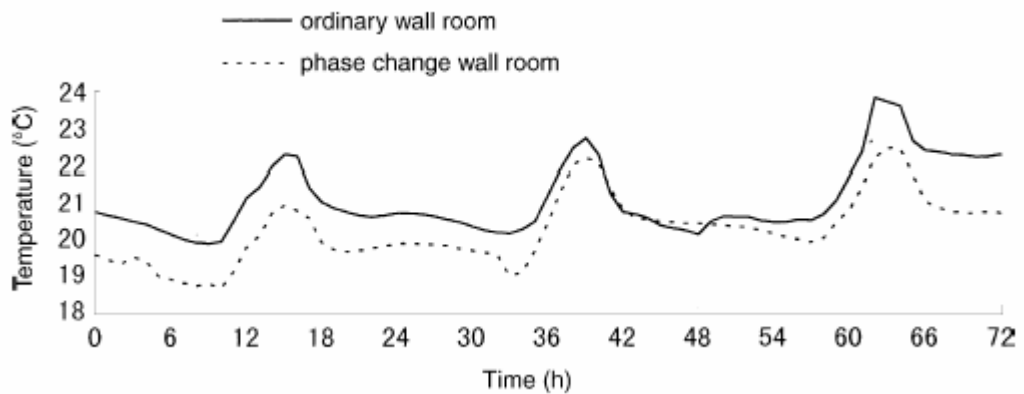


Σχ.19 δομή κτηριακού κελύφους

Στο δωμάτιο υπάρχει σταθερό θερμικό φορτίο (ηλεκτρικές αντιστάσεις) συνολικής ισχύος 2040 W. Σε διάφορα σημεία του τοίχου μετράται και καταγράφεται η εσωτερική θερμοκρασία δωματίου. Στη συνέχεια οι μετρήσεις αυτές, αφού καταγραφούν, συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές στις ίδιες συνθήκες ενός συμβατικού δωματίου. Μετρήσεις έγιναν για τρεις συνεχόμενες ημέρες. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα:



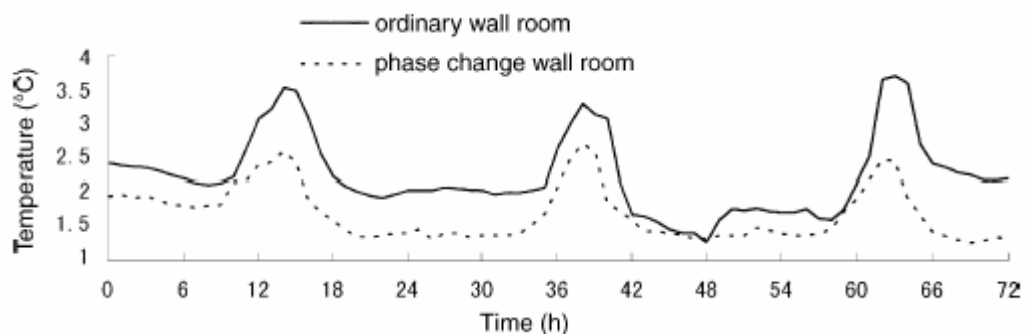
Διαγρ.10 Χρονική μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος



Διαγρ.11 χρονική μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας

Η μέση εσωτερική θερμοκρασία για το συμβατικό δωμάτιο είναι $21.03\text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ για το δωμάτιο με PCM $20.18\text{ }^{\circ}\text{C}$, που αποτελεί μια πολύ καλή τιμή για θερμοκρασία δωματίου. Αυτό που αξίζει να παρατηρήσουμε, είναι ότι η χρήση των υλικών αλλαγής φάσης μειώνει τις μεγάλες δκυμάνσεις της θερμοκρασίας δωματίου. Από το διάγραμμα 11 προκύπτει ότι η μεγαλύτερη θερμοκρασιακή μεταβολή για το συμβατικό δωμάτιο είναι $3.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ (την τρίτη ημέρα), ενώ για το δωμάτιο με PCM είναι μόλις $2.59\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Στο διάγραμμα 12 φαίνεται πώς κυμάνθηκε στη διάρκεια των τριών ημερών η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού τοίχου και της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα για το συμβατικό και το μη συμβατικό δωμάτιο.



Διαγρ.12 θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού τοίχου και της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα συναρτήσευ του χρόνου

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά για το συμβατικό δωμάτιο είναι 3.7 °C, ενώ για το δωμάτιο με PCM είναι 2.68 °C. Από τα παραπάνω οι επιστήμονες συμπέραναν ότι το κτηριακό κέλυφος με PCM δημιουργεί καλύτερες συνθήκες θερμικής άνεση έναντι του συμβατικού.

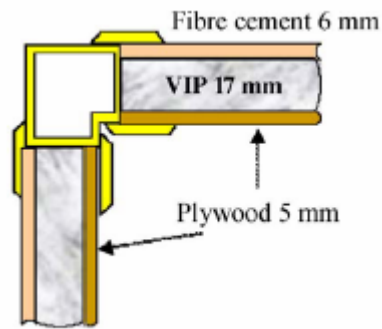
2.2.6 PCM σε τοίχωμα πειραματικών κελιών

Με σκοπό να μελετήσουν τα αποτελέσματα της εγκατάστασης των υλικών αλλαγής φάσης στους εσωτερικούς τοίχους των κτηρίων, οι επιστήμονες M. Ahmad και A. Bontemps [8] κατασκεύασαν δύο κελιά, κάτι σαν μικρογραφία ενός κτηρίου (σχήμα 20). Το πείραμα έλαβε χώρα το Σεπτέμβριο και τον Οκτώβριο, στη πόλη Grenoble της Γαλλίας. Στο ένα κελί εγκατέστησαν PCM, ενώ στο άλλο όχι.

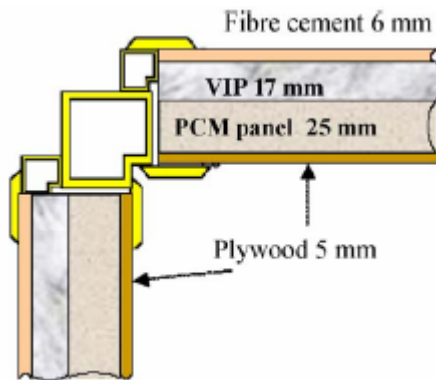


Σχ.20 εξωτερική όψη των κελιών

Τα κελιά αποτελούνται από μία γυάλινη επιφάνεια και από τέσσερις αδιαφανείς επιφάνειες. Ο «τοίχος» στο συμβατικό κελί, δίχως PCM, αποτελείται από κόντρα πλακέ πάχους 5 mm, από μόνωση πάχους 17 mm και από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 6 mm (σχήμα 21 α). Ο «τοίχος» του μη συμβατικού κελιού περιλαμβάνει μια σανίδα πολυβινυλοχλωριδίου (PVC) πάχους 25 mm, που στο εσωτερικό της περιελάμβανε 20 kg PCM (σχήμα 21 β). Το PVC (σχήμα 22) χρησιμοποιήθηκε ως υλικό, γιατί διαθέτει χαμηλό συντελεστή απορρόφησης της υπεριώδους ακτινοβολίας.

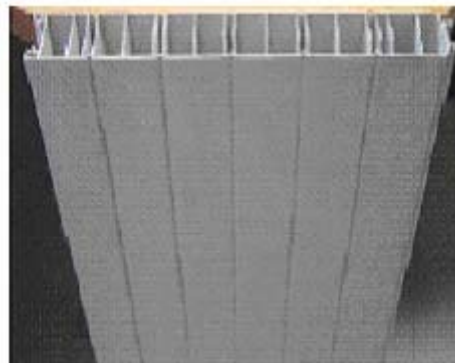


(α)



(β)

Σχ.21 τομή του κελύφους του κελιού



Σχ. 22 Σανίδα PVC που στο εσωτερικό της θα τοποθετηθούν τα PCM

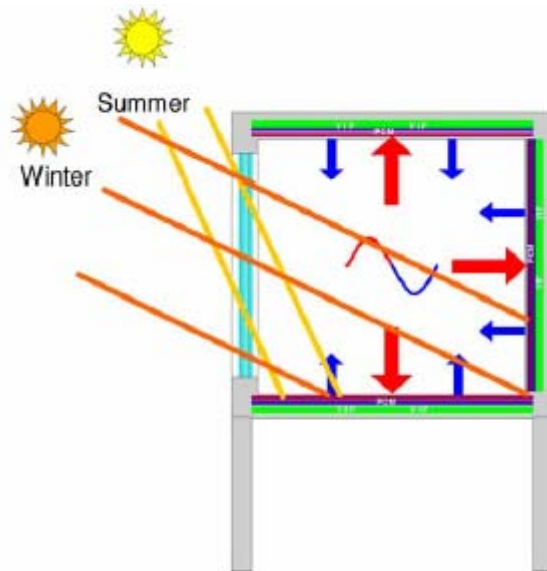
Ως υλικό αλλαγής φάσης χρησιμοποιήθηκε πολυαιθυλενογλυκόλη, γνωστή ως PEG 600, της οποίας οι ιδιότητες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 11.

Πιν.11 ιδιότητες PEG 600

Πυκνότητα στους 20°C σε kg/m ³	1128
Θερμοκρασία τήξης σε °C	21-25
Ειδική θερμοχωρητικότητα σε J/kg K	2490
Λανθάνουσα θερμότητα τήξης KJ/kg	148

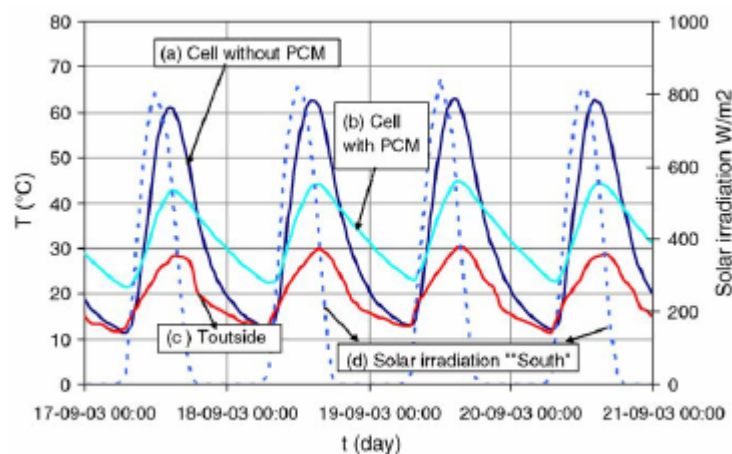
Η γυάλινη επιφάνεια των κελιών αποτελείται από διπλά τζάμια επιφάνειας $40 \times 40 \text{ cm}^2$ και πάχους 4 cm.

Τα κελιά τοποθετήθηκαν σε εξωτερικό χώρο, με την γυάλινη επιφάνεια να έχει νότιο προσανατολισμό, έτσι ώστε να «συλλέγεται» η μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία. Όπως φαίνεται εμποπτικά στο παρακάτω σχήμα 23, τα PCM είναι τοποθετημένα εσωτερικά του τοίχου. Αυτό συμβαίνει για να μπορούν να αποθηκεύουν την θερμότητα από την εισερχόμενη στο κελί ηλιακή ακτινοβολία.



Σχ.23 Αρχή λειτουργίας κελιού

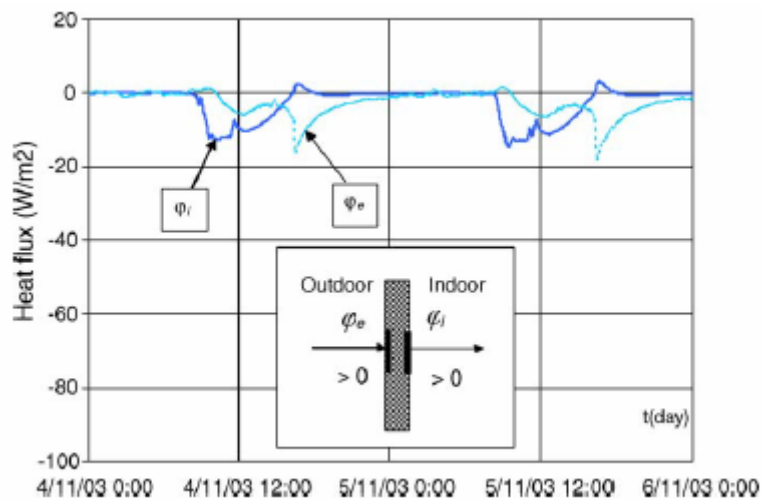
Στη συνέχεια μετράται και στα δύο κελιά (με και χωρίς υλικά αλλαγής φάσης) η ροή θερμότητας, η θερμοκρασία, και γίνεται η μεταξύ τους σύγκριση. Στο διάγραμμα 13 φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό των δύο κελίων, επίσης φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια τεσσάρων ημερών του Σεπτεμβρίου.



Διαγρ.13 Η μεταβολή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό των δύο κελίων. Επίσης φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια τεσσάρων ημερών του Σεπτεμβρίου.

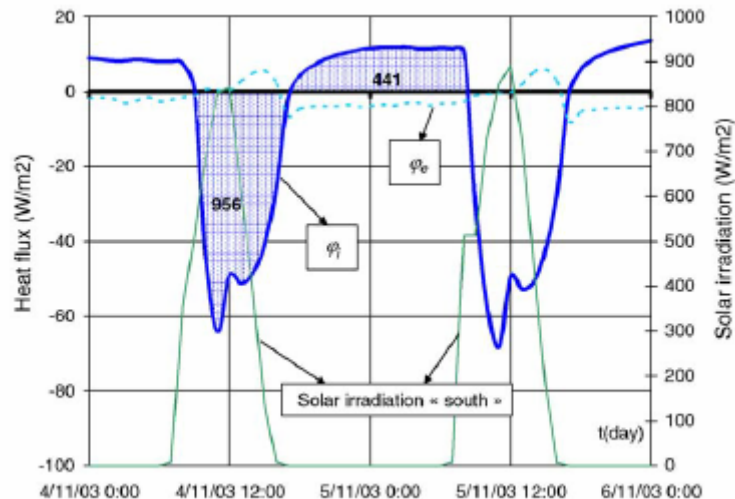
Παρατηρούμε ότι το μεσημέρι, την περίοδο με την υψηλότερη θερμοκρασία, η εσωτερική θερμοκρασία του συμβατικού κελιού αγγίζει τους 60°C. Το κελί που διαθέτει PCM υπερτερεί, αφού την ίδια ώρα η θερμοκρασία του αγγίζει τους 40°C, 20 βαθμούς λιγότερο από το συμβατικό κελί. Επίσης παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια της νύχτας η εσωτερική θερμοκρασία του συμβατικού κελιού φτάνει τους 12 °C, αγγίζει δηλαδή την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Και σε αυτή την περίπτωση υπερτερεί το κελί με τα PCM. Η εσωτερική του θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι 23 °C, μια θερμοκρασία που δημιουργεί θερμική άνεση στο χώρο.

Στη συνέχεια εξετάζεται η ροή θερμότητας στους τοίχους των δύο κελιών. Λαμβάνεται ως θετική φορά η ροή θερμότητας που εισέρχεται στο κελί. Με φ_e συμβολίζεται η ροή θερμότητας που προέρχεται από το περιβάλλον και με φ_i η ροή που προέρχεται από το εσωτερικό των κελιών. Ανάλογα με την ώρα της ημέρας τα φ_e , φ_i μπορεί να είναι θετικά ή αρνητικά (διάγραμμα 14 και 15).



Διαγρ.14 η ροή της θερμότητας στο κέλυφος συμβατικού κελιού κατά τη διάρκεια τριών ημερών του Οκτωβρίου

Το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται και για το κελί με PCM, όπως φαίνεται παρακάτω:



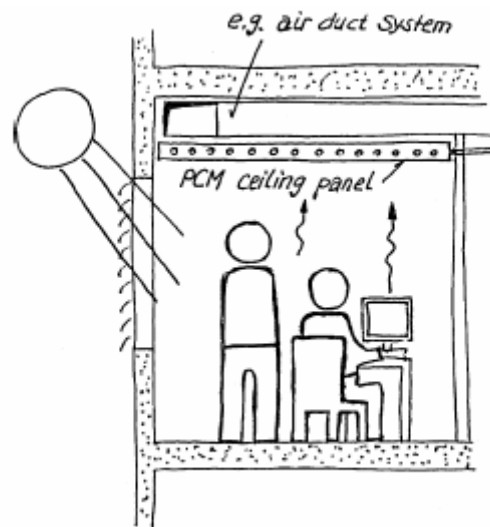
Διαγρ.15 η ροή της θερμότητας στο κέλυφος κελιού με PCM κατά τη διάρκεια τριών ημερών του Οκτωβρίου

Όπως ήταν αναμενόμενο η θερμική ροή στα κελιά με υλικά αλλαγής φάσης παρουσιάζει μεγαλύτερο εύρος, αφού η συναλλαγή θερμότητας είναι πολύ πιο έντονη στους τοίχους που περιλαμβάνουν PCM.

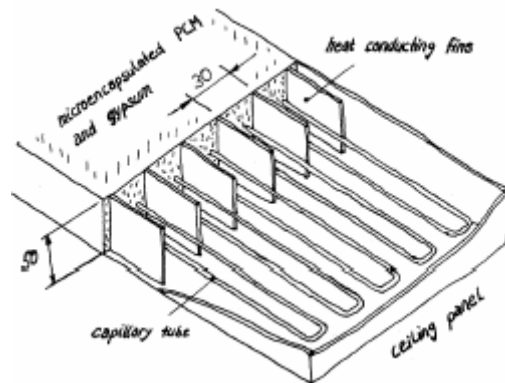
Αυτή η εφαρμογή προορίζεται για κλίματα όπως της Γαλλίας, όπου τη θερινή περίοδο κυριαρχούν θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ ημέρας και νύχτας. Με μια πετυχημένη εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης στα κτήρια θα μπορεί η θερμότητα που δεσμεύεται την ημέρα να απελευθερώνεται την νύχτα, δημιουργώντας ένα εσωτερικό περιβάλλον θερμικής άνεσης.

2.2.7 PCM σε οροφή χώρων εργασίας

Η παρακάτω εφαρμογή προορίζεται για κτήρια, κυρίως γραφεία με μεγάλες γυάλινες προσόψεις, με υψηλό θερμικό φορτίο το καλοκαίρι. Οι επιστήμονες M. Koschenz και B. Lehmann λαμβάνοντας υπόψη τους τις εσωτερικές συνθήκες που κυριαρχούν σε κτήρια που λειτουργούν ως χώροι εργασίας (σχήμα 24 α), δημιούργησαν λεπτές πλάκες με PCM που τοποθετούνται στην οροφή κτηρίων (σχήμα 24 β). Αυτές τις «πλάκες οροφής» τις συνδύασαν με αεραγωγούς για να μπορεί η θερμότητα που αποθηκεύεται στα υλικά αλλαγής φάσης να μεταφέρεται μέσω του αέρα στο εξωτερικό περιβάλλον.



(α)



(β)

Σχ. 24 όψη πλάκα οροφής σε χώρο εργασίας

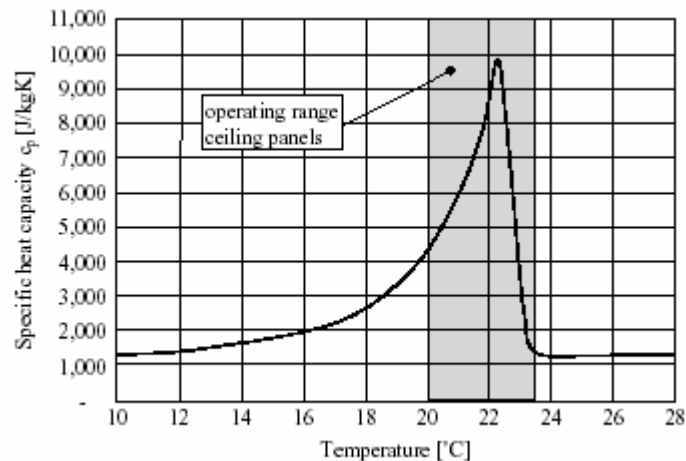
Η επιθυμητή θερμοκρασία δωματίου είναι 21°C - 28°C , οπότε η επιλογή του υλικού αλλαγής φάσης που θα χρησιμοποιηθεί, θα πρέπει να γίνει με κριτήριο το σημείο τήξης που πρέπει να είναι μεταξύ 21°C και 28°C . Οι επιστήμονες προσανατολίζονται στις παραφίνες: δεκαεξάνιο, δεκαεπτάνιο, δεκαοκτάνιο ή σε μίγματά τους με τις εξής θερμοφυσικές ιδιότητες όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 12.

Πιν. 12 θερμοφυσικές ιδιότητες υποψήφιων PCM

ιδιότητες	δεκαεξάνιο	δεκαεπτάνιο	δεκαοκτάνιο
Σημείο τήξης (° C)	18	22	28
Λανθάνουσα θερμότητα (J/kg)	236000	214000	244000
Πυκνότητα στερεού και υγρού (kg/m ³)	780	780	780
Θερμική αγωγιμότητα στερεού και υγρού (W/mK)	0.17	0.20	0.26
Θερμοχωρητικότητα υγρού (J/kg K)	2100	2100	2200
Θερμοχωρητικότητα στερεού (J/kg K)	1650	1700	1750

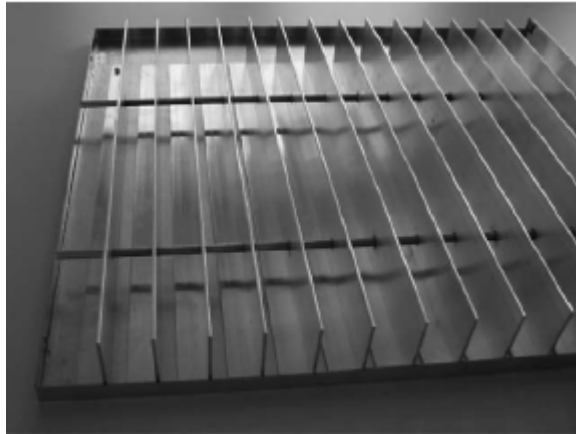
Τελικά, επιλέγεται μείγμα δεκαοκτανίου και δεκαεξανίου. Το μίγμα παραφίνης εμπεριέχεται σε μικροκάψουλες, διαμέτρου 10 μm. Αυτό εμποδίζει τις απώλειες μάζας μετά από αρκετούς κύκλους τήξης-ψύξης.

Η «πλάκα οροφής» αποτελείται από 23% κατά βάρος PCM και περιλαμβάνει 13.3 κιλά ανά τετραγωνικό μέτρο. Τα χαρακτηριστικά της είναι τα εξής: πάχος 5 cm, πυκνότητα 1030 kg/m³, θερμική αγωγιμότητα 1.15 W/mK, σημείο τήξης 22°C. Από το καλορίμετρο προκύπτει η DSC καμπύλη του διαγράμματος 16.



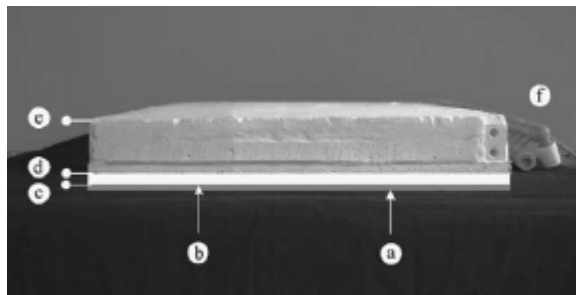
Διαγρ. 16 καμπύλη DSC της πλάκας οροφής με το PCM

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 25 οι πλάκες οροφής περιλαμβάνουν λεπτές στρώσεις αλουμινίου, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν τη θερμική αγωγιμότητα της πλάκας.



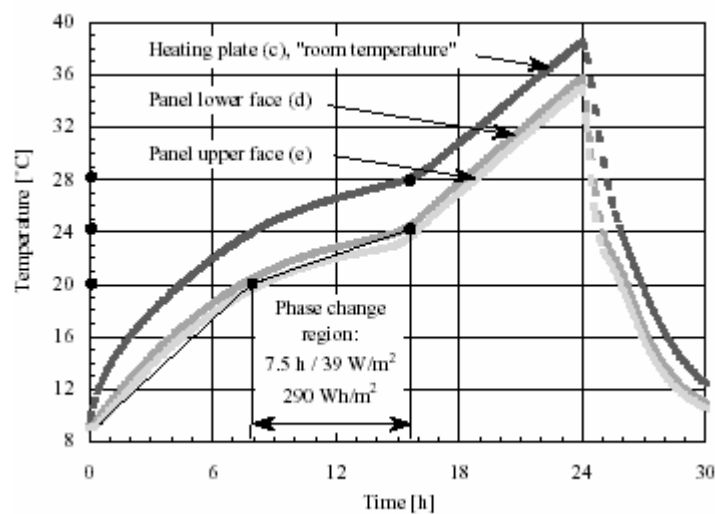
Σχ. 25 οι πλάκες οροφής περιλαμβάνουν λεπτές στρώσεις αλουμινίου

Στη συνέχεια οι επιστήμονες δημιούργησαν εξωτερικές συνθήκες μιας ημέρας του Ιουλίου (μέγιστη θερμοκρασία 32°C και μέση θερμοκρασία 25 °C) και μέτρησαν τη θερμοκρασία στα σημεία (σχήμα 26) e,d και c της πλάκας οροφής.



Σχ. 26 σημεία που έγινε η μέτρηση της θερμοκρασίας

Δεχόμαστε ότι η θερμοκρασία του σημείου c θα είναι πολύ κοντά στη θερμοκρασία δωματίου. Η μεταβολή της θερμοκρασίας στα τρία βασικά σημεία e,d,c σε συνάρτηση με το χρόνο φαίνεται στο διάγραμμα 17.



Διαγρ.17 χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στα σημεία e,d,c

Από τη στιγμή που πρόκειται για εφαρμογή σε γραφείο, μας ενδιαφέρει να κυριαρχεί θερμική άνεση τις ώρες εργασίας, δηλαδή 8.00-17.00. Παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια αυτή η εσωτερική θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 24 °C και 29 °C. Οι θερμοκρασίες αυτές δημιουργούν θερμική άνεση και τα αποτελέσματα κρίνονται ικανοποιητικά.

Αυτόν τον τρόπο χρησιμοποίησε η εταιρία BASF για να δημιουργήσει θερμική άνεση στα γραφεία της γερμανικής εταιρίας «Ludwigshafener Wohnungsunternehmen LUWOG/GEWOG». Μια εικόνα του εσωτερικού χώρου μπορούμε να έχουμε στο σχήμα 27.



Σχ.27 πραγματικός χώρος με πλάκες οροφής με PCM

2.2.8 PCM σε γυάλινες επιφάνειες

Είναι σύνηθες σε κτήρια που οι απαιτήσεις θέρμανσης δεν είναι μεγάλες, στην όψη του κτηρίου με νότιο προσανατολισμό να τοποθετούνται διπλά, γυάλινα τζάμια. Οι γυάλινες αυτές επιφάνειες «παγιδεύουν» την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να θερμαίνεται ο εσωτερικός χώρος. Το μειονέκτημα μιας τέτοιας κατασκευής είναι ότι η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη μόνο τις «φωτεινές» ώρες της ημέρας, με μέγιστο το μεσημέρι. Οι γερμανοί επιστήμονες Weinläder, Beck και Fricke ενσωμάτωσαν στα γυάλινα τζάμια PCM, έτσι ώστε να αποθηκεύεται ηλιακή ενέργεια [10]. Το μεγάλο πλεονέκτημα των PCM είναι ότι επιτρέπουν στο φως (υπεριώδη ακτινοβολία) να τα διαπεράσει, ενώ δεσμεύουν την υπέρυθη ακτινοβολία. Τα υλικά αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκαν και δοκιμάστηκαν είναι τα εξής: το RT25 (παραφίνη) της Rubitherm και τα S27, L30 (σχήμα 28) (ένυδρα άλατα) της Cristopia. Οι ιδιότητές τους φαίνονται στον πίνακα 13.

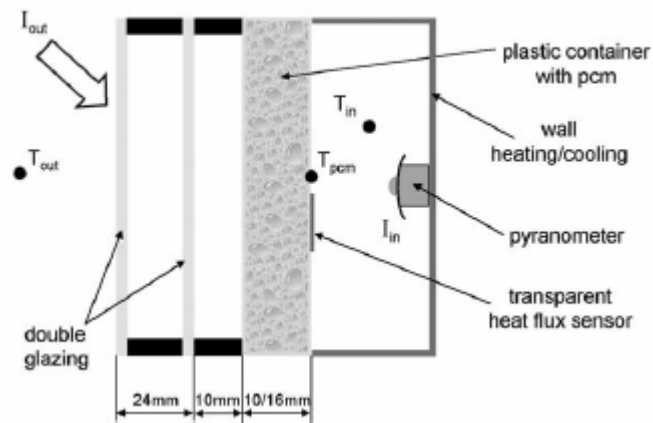
Πιν. 13 ιδιότητες υλικών αλλαγής φάσης

ιδιότητες	RT25	S27	L30
Σημείο τήξης ($^{\circ}$ C)	25	27	30
Λανθάνουσα θερμότητα (J/g)	147	190	270
Πυκνότητα υγρού (kg/m^3)	763	1530	1400
Πυκνότητα στερεού (kg/m^3)	804	1700	1556
Θερμική αγωγιμότητα υγρού (W/mK)	0.17	0.48	0.56
Θερμική αγωγιμότητα στερεού (W/mK)	0.19	0.79	1.02
Θερμοχωρητικότητα υγρού (J/g K)	2.11	2.22	1.79
Θερμοχωρητικότητα στερεού (J/g K)	2.90	1.50	1.23



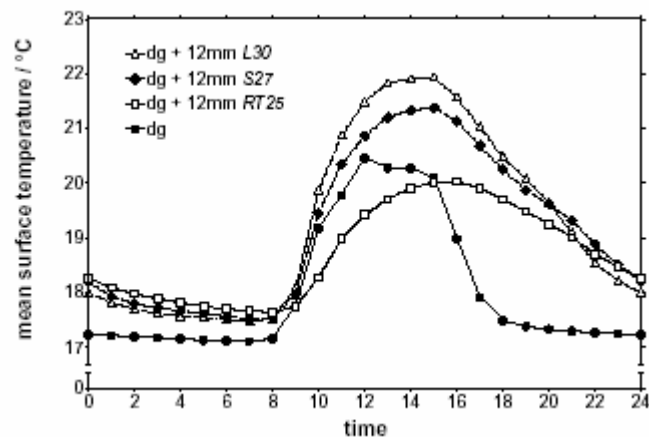
Σχ.28 όψη L30 σε στερεή φάση

Τα PCM τοποθετήθηκαν σε πλαστικά, διαφανή δοχεία. Τα δοχεία αυτά τοποθετήθηκαν πίσω από τα διπλά τζάμια σε απόσταση 10 mm. Έγιναν τέσσερις εφαρμογές: Η πρώτη με RT25 πάχους 16 mm, η δεύτερη με S27 πάχους 16 mm, η τρίτη με L30 πάχους 16 mm, και η τέταρτη χωρίς καθόλου PCM. Η πειραματική διάταξη, ενός κελιού (που παίζει το ρόλο δωματίου) με διπλά τζάμια και PCM, που χρησιμοποιήθηκε, φαίνεται στο σχήμα 29.



Σχ.29 πειραματική διάταξη

Οι εξωτερικές συνθήκες περιβάλλοντος (T_{out} , I_{out}) προσομοιώθηκαν με τις συνθήκες του χειμώνα της πόλης Würzburg της Γερμανίας. Στη συνέχεια μετρήθηκαν οι θερμοκρασίες στην εσωτερική επιφάνεια του κελιού για κάθε μία από τις παραπάνω τέσσερις εφαρμογές. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα 18.

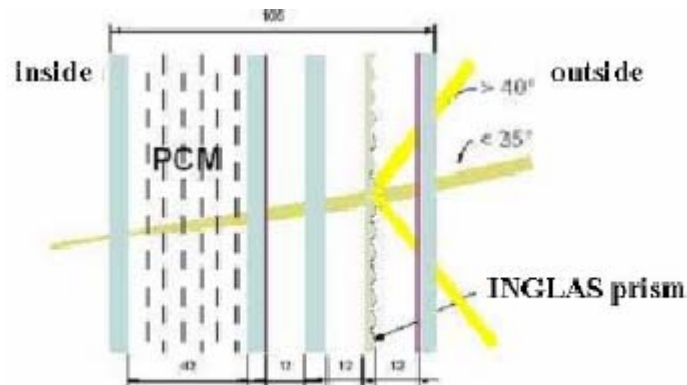


Διαγρ.18 χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στην εσωτερική επιφάνεια του κελιού

Παρατηρούμε, συγκρίνοντας τα διπλά τζάμια με PCM με τα συμβατικά διπλά τζάμια ότι τα αποτελέσματα είναι πιο ικανοποιητικά με τη χρήση των PCM. Η ελάχιστη θερμοκρασία τη νύχτα στην περίπτωση με PCM είναι γύρω στους 18 °C, έναντι των 17 °C χωρίς PCM, και η μέγιστη 22 °C την ημέρα έναντι των 20.5 °C χωρίς PCM. Συγκρίνοντας τα τρία είδη PCM μεταξύ τους, προκύπτει ότι για τη συγκεκριμένη εφαρμογή θετικότερα αποτελέσματα έχει το L30 που πετυχαίνει καλύτερες συνθήκες θερμικής άνεσης.

Η γερμανική εταιρία Inglas ανέπτυξε περαιτέρω τέτοιες γυάλινες επιφάνειες (σχήμα 30) με υλικά αλλαγής φάσης και τις ονόμασε «Power Glass». Τα PCM του Power Glass έχουν πάχος 4 cm και σημείο τήξης 27 °C. Για να αποφευχθεί το καλοκαίρι η υπερθέρμανση, το Power Glass

διαθέτει ένα πρίσμα που αντανακλά την άμεση ακτινοβολία με γωνία πρόσπτωσης μεγαλύτερη των 40°.



Σχ. 30 γυάλινη επιφάνεια Power glass

Η πρώτη εφαρμογή του Power Glass ήταν σε ένα ηλιακό σπίτι στην πόλη Kappel της Σουηδίας.

2.3 Οι εταιρίες που δραστηριοποιούνται στις κτηριακές εφαρμογές των PCM

Οι κυριότερες εταιρίες που δραστηριοποιούνται στις κτηριακές εφαρμογές των PCM είναι οι εξής:

Rubitherm

Η Rubitherm είναι γερμανική εταιρία και ασχολείται με την παρασκευή υλικών αλλαγής με διάφορα σημεία τήξης, από -3°C μέχρι 100 °C. Παρασκευάζει ακατέργαστα υλικά φάσης, όπως παραφίνες και υδρογονάνθρακες και επεξεργασμένα υλικά αλλαγής φάσης σε μορφή κόκκων, πλακών (σχήμα 31) κλπ.

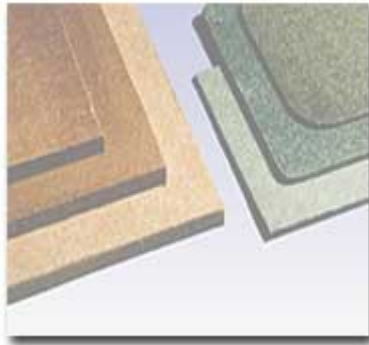
Latentwärmeparaffin - RT



Latentwärmegrnulat - GR



Latentwärmeplatten - FB



Latentwärmepulver - PX



Latentwärmecompound - PK



Salzhydrat - SP



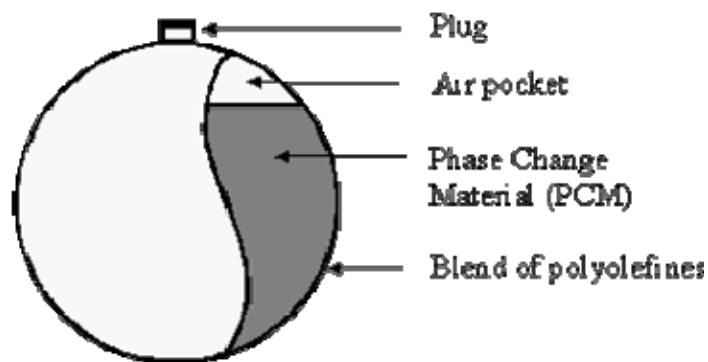
Σχ.31 Οι βασικές κατηγορίες υλικών αλλαγής φάσης που παρασκευάζει η Rubitherm

Climator

Η Climator είναι σουηδική εταιρία και το κυριότερο προϊόν που παρασκευάζει είναι τα λεγόμενα ClimSel σε διάφορα σημεία τήξης, τα οποία είναι PCM, κυρίως εύθηκτα άλατα, τα οποία ενσωματώνονται σε πλάκες αλουμινίου.

Cristopia

Η Cristopia είναι γαλλική εταιρία και παρασκευάζει PCM σε μικροκάψουλες. Συγκεκριμένα οι μικροκάψουλες αποτελούνται από PCM με σημείο τήξης από -33°C έως 27°C , αφήνοντας ένα ποσοστό για την πλήρωσή τους με αέρα. Με τον αέρα αποφεύγονται τα προβλήματα των συστολών και των διαστολών του υλικού, που βρίσκεται στην κάψουλα και επομένως η μηχανική καταπόνηση της κάψουλας. Οι μικροκάψουλες είναι σφαιρικές με διάμετρο 77-98 mm (σχήμα 32).



Σχ.32 η τομή μιας κάψουλας που περιέχει υλικό αλλαγής φάσης

Η Cristopia κατασκευάζει επίσης δεξαμενές «STL», οι οποίες τοποθετούνται σε εγκαταστάσεις κλιματισμού με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας. Η αρχή λειτουργίας στην περίπτωση π.χ κλιματισμού ενός χώρου γραφείου είναι η εξής: Κατά τις νυχτερινές ώρες ή στη λειτουργία εκτός αιχμής γραφείου, διοχετεύεται ψυκτική ισχύς μέσω ενός ψυκτικού ρευστού στη δεξαμενή που περιέχει μικροκάψουλες με PCM. Έτσι στερεοποιείται το υλικό στις κάψουλες. Όταν ανέβει η θερμοκρασία στη δεξαμενή λανθάνουσας θερμότητας, το υλικό στις κάψουλες τήκεται. Η δεξαμενή είναι κατάλληλη συνδεδεμένη με το υπόλοιπο δίκτυο κλιματισμού, ώστε να μπορεί να είναι εκμεταλλεύσιμο το φαινόμενο της απορρόφησης θερμότητας που συμβαίνει κατά την τήξη του PCM. Έτσι η δεξαμενή αυτή συντελεί στην εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Μια αντιπροσωπευτική τέτοια δεξαμενή πραγματοποίησε η Cristopia στο κτηριακό συγκρότημα του υπουργείου οικονομικών της Γαλλίας (σχήμα 33). Το συγκρότημα στεγάζει επίσης τράπεζες και εστιατόρια και είναι 260000 m². Το κτηριακό συγκρότημα κλιματίζεται από 5 ψυκτικές μηχανές ισχύος 1100 KW η κάθε μία και από 8 δεξαμενές STL με ικανότητα αποθήκευσης ψύξης 25 000 KWh.



Σχ. 33 μια δεξαμενή της Cristopia στο κτηριακό συγκρότημα του υπουργείου οικονομικών της Γαλλίας

3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ PCM ΣΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

Οι εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης στα θερμοκήπια ξεκινά από τη δεκαετία του 1980. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά μερικές κύριες εφαρμογές.

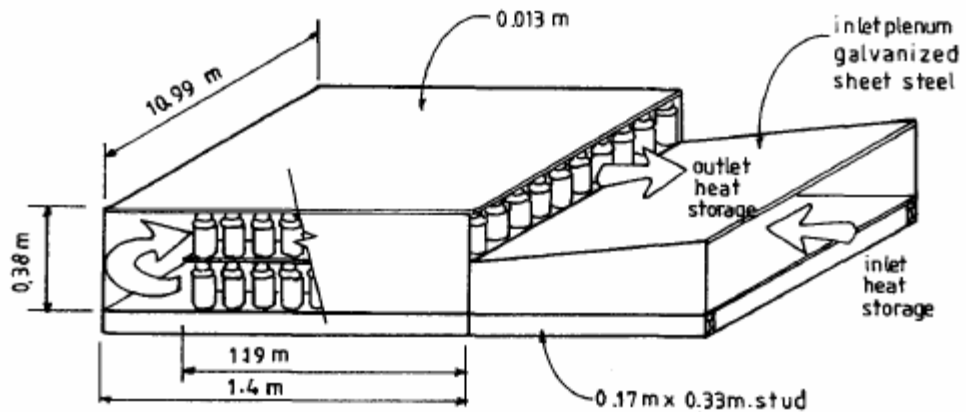
3.1 Εφαρμογές με $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Οι Kern και Aldrich τοποθέτησαν περίπου 1650 kg $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ σε δοχεία αεροζόλ, τα οποία ζύγιζαν 0.74 kg. Τα δοχεία αυτά τοποθετήθηκαν εντός και εκτός ενός θερμοκηπίου επιφάνειας 36 m², με σκοπό να ερευνηθούν οι δυνατότητες για αποθήκευση θερμότητας εσωτερικά και εξωτερικά του θερμοκηπίου. Κατά τη διάρκεια της ημέρας εσωτερικά του θερμοκηπίου γινόταν η αποθήκευση θερμότητας. Το βράδυ η ροή του αέρα αντιστρεφόταν, ώστε να απελευθερωθεί η αποθηκευμένη θερμότητα. Η εγκατάσταση αποθήκευσης θερμότητας εξωτερικά του θερμοκηπίου περιελάμβανε 1375 kg PCM και δύο ηλιακούς συλλέκτες επιφάνειας 8.55 m² με νότιο προσανατολισμό. Επιλέον, στην εγκατάσταση χρησιμοποιήθηκε ένας βοηθητικός θερμαντήρας και ένας εναλλάκτης θερμότητας. Θερμοστάτες χρησιμοποιήθηκαν για να βοηθούν στην ρύθμιση της θερμοκρασίας και ανεμιστήρες για να προκαλούν την ροή του αέρα. Στο εξωτερικό σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, όταν η θερμοκρασία στους ηλιακούς συλλέκτες ήταν μεγαλύτερη κατά 11 °C από την θερμοκρασία στη δεξαμενή αποθήκευσης κινητοποιούνταν ο ανεμιστήρας και ξεκινούσε η αποθήκευση θερμότητας. Ο ανεμιστήρας σταματούσε να λειτουργεί όταν η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ ηλιακών συλλεκτών και δεξαμενής αποθήκευσης πέφτει στους 1.7 °C. Ο πίνακας 14 συγκεντρώνει τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης.

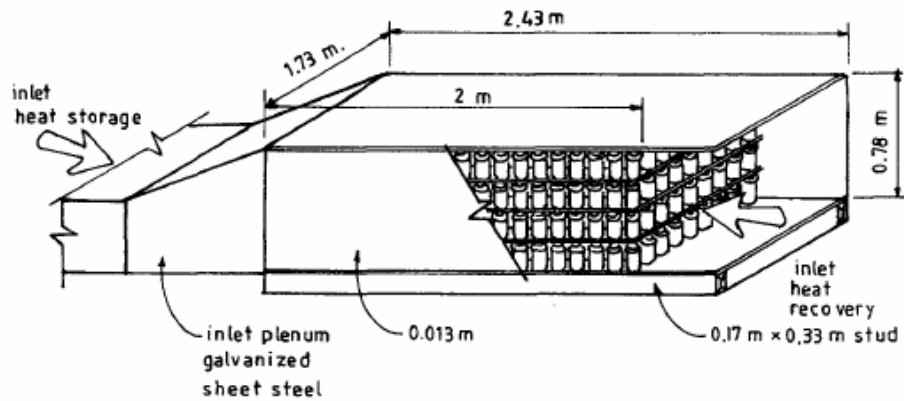
Πιν. 14 χαρακτηριστικά εγκατάστασης

Στοιχείο	χαρακτηριστικά
Θερμοκήπιο	6×6 m ²
Σημείο τήξης CaCl ₂ 6H ₂ O	27 °C
Λανθάνουσα θερμότητα	193 kJ/kg
Εσωτερική αποθηκευτική μονάδα	
Ποσότητα PCM που χρησιμοποιεί	222 kg
Ανεμιστήρας	705m ³ /h
Αποθήκευση ενέργειας	45210 kJ
Θερμοκρασίες θερμοστάτη (μέγιστη, ελάχιστη)	32.2 °C, 26.6 °C
Εξωτερική αποθηκευτική μονάδα	
Ποσότητα PCM που χρησιμοποιεί	1375 kg
Ανεμιστήρας 1	646 m ³ /h
Ανεμιστήρας 2	2210 m ³ /h
Αποθήκευση ενέργειας	293107 kJ
Θερμοκρασίες θερμοστάτη (μέγιστη , ελάχιστη)	18.3 °C , 12.8 °C
Περίοδος έρευνας	Νοέμβρης 1979

Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας έδειξαν ότι η ενέργεια που αποθηκεύτηκε εξωτερικά κυμαινόταν μεταξύ των 105.5 MJ και των 158.25 MJ, ενώ η ενέργεια που αποθηκεύτηκε εσωτερικά ήταν 21.1 και 31.65 MJ. Η εξωτερική μονάδα αποθήκευσης θερμότητας απελευθέρωνε 80-90% της αποθηκευμένης θερμότητας, ενώ η εσωτερική μονάδα 60-80%. Στα σχήματα 34 α και 34 β παρουσιάζονται η εσωτερική και η εξωτερική μονάδα αποθήκευσης.

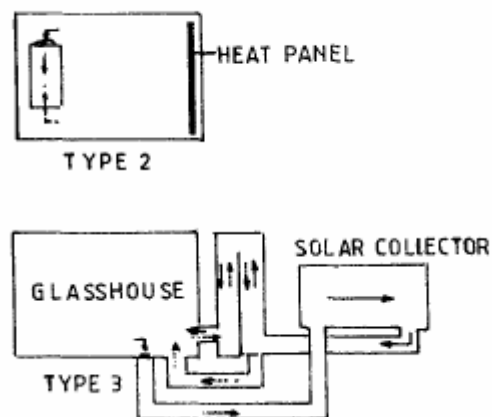


Σχ.34α η εσωτερική μονάδα αποθήκευσης



Σχ.34β η εξωτερική μονάδα αποθήκευσης

Οι Takakura και Nishina [11] ενσωμάτωσαν υλικά αλλαγής φάσης σε ένα θερμοκήπιο 7.2 m². Ανέπτυξαν τρεις τύπους μονάδων αποθήκευσης ενέργειας. Αξίζει να αξιολογηθούν ο τύπος 2 και 3 (τύπος 2: collector-storage type, τύπος 3: active type collector). Στο σχήμα 34 φαίνονται οι δύο τύποι μονάδων αποθήκευσης θερμότητας.



Σχ. 34 οι δύο τύποι μονάδων αποθήκευσης

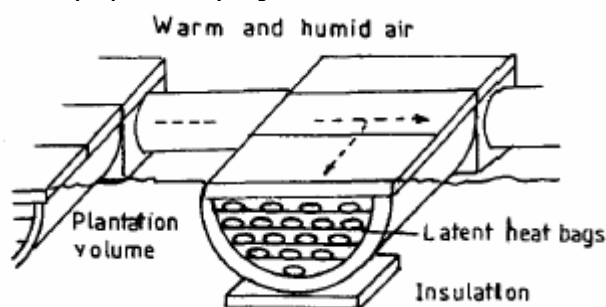
Τα χαρακτηριστικά των μονάδων αποθήκευσης τύπου 2 και 3 φαίνονται πίνακα 15.

Πιν. 15 Χαρακτηριστικά των παραπάνω τύπων αποθήκευσης ενέργειας

Στοιχείο	Χαρακτηριστικά
Θερμοκήπιο: Τύπος 2	7.2m ²
Σημείο τήξης PCM: CaCl ₂ 6H ₂ O + πρόσθετα	29.4 °C
Λανθάνουσα θερμότητα	170 kJ/kg
Ποσότητα PCM που χρησιμοποιείται	56 kg
Εναλλάκτης θερμότητας	πολυπροπυλένιο
Θερμοκήπιο: Τύπος 3	7.2m ²
Σημείο τήξης PCM: CaCl ₂ 6H ₂ O	29.4 °C
Ποσότητα PCM που χρησιμοποιείται	300 kg
Εναλλάκτης θερμότητας	πολυπροπυλένιο
Ηλιακός συλλέκτης	1.6 m ² γωνία κλίσης : 50°

Η απόδοση της αποθήκευσης ενέργειας των μονάδων αποθήκευσης τύπου 2 και 3 ήταν 27% και 59% αντίστοιχα. Οικονομικότερη ήταν η μονάδα 2 και ακριβότερη η μονάδα 3.

Μια ενδιαφέρουσα έρευνα έγινε στη Γαλλία από τους Jaffrin και Cadier . Σε ένα θερμοκήπιο επιφάνειας 500 m² εγκαταστήθηκαν 13.5 τόνοι CaCl₂·6H₂O. Το υλικό αλλαγής φάσης τοποθετήθηκε σε ημικυλινδρικές δεξαμενές κάτω από το έδαφος (σχήμα 36). Ως μέσο μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιήθηκε ο αέρας.



Σχ. 36 εγκατάσταση υλικών αλλαγής φάσης κάτω από το έδαφος

Στον πίνακα 16 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης.

Πιν. 16 Χαρακτηριστικά εγκατάστασης σχήματος 35

Στοιχείο	Χαρακτηριστικά
Θερμοκήπιο σχήματος 4	500 m ²
Σημείο τήξης PCM: CaCl ₂ 6H ₂ O + πρόσθετα	28 °C
Λανθάνουσα θερμότητα	150 kJ/kg
Ποσότητα PCM που χρησιμοποιείται	13.5 τόνοι
Αριθμός εναλλακτών θερμότητας που χρησιμοποιήθηκαν	9000 επίπεδοι
Απαιτήσεις αποθήκευσης ενέργειας	3600 kJ/m ²
Ποσοστό που καλύπτεται από PCM	60%
8 Ανεμιστήρες	1500 m ³ /h ο καθένας

Ενδιαφέρουσες έρευνες για ενσωμάτωση του υλικού αλλαγής φάσης $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ σε θερμοκήπια διεξήγαγε ο Huang καθώς επίσης και οι Baille και Boulard. Οι μελέτες τους περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.

Σε μία άλλη έρευνα οι Levan και Zamir εγκατέστησαν 3000 kg $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ σε ένα θερμοκήπιο 200 m² με δύο διαφορετικούς τρόπους. Τοποθέτησαν το υλικό αλλαγής φάσης μέσα σε σωλήνες και τα τοποθέτησαν την πρώτη φορά στην βόρεια πλευρά του θερμοκηπίου και τη δεύτερη πλευρά κάτω από το έδαφος του θερμοκηπίου. Παρατηρήθηκε ότι, με εξαίρεση λίγες νύχτες, επιτεύχθηκε η επιθυμητή θερμοκρασία. Το μόνο μειονέκτημα του συστήματος ήταν το κόστος του 1.1\$/kg. Υπολογίστηκε ότι η περίοδος αποπληρωμής είναι περίπου 7 χρόνια.

3.2 Εφαρμογές με $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

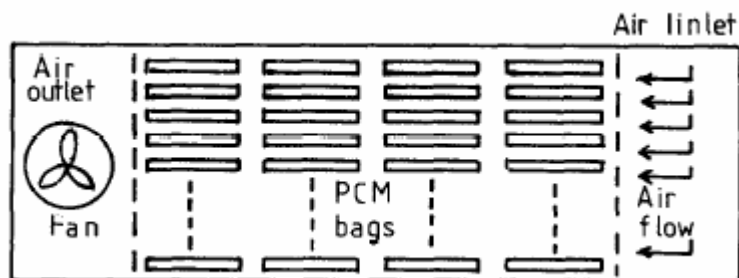
Παρόλο που αρκετές έρευνες υποδείκνυαν ότι το υλικό $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ δεν είναι κατάλληλο για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης, λόγω του ότι μετά από κάποιο αριθμό κύκλων ψύξης-τήξης επέρχεται διαχωρισμός των φάσεων, έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας σε θερμοκήπια.

Οι Takakura και Nishina χρησιμοποίησαν το $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ σε συνδυασμό με πρόσθετα, για να αποφύγουν τον διαχωρισμό των φάσεων, για θέρμανση σε θερμοκήπιο στην Ιαπωνία. Στον πίνακα 17 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του συστήματος.

Πιν. 17 Χαρακτηριστικά εγκατάστασης

Στοιχείο	Χαρακτηριστικά
Θερμοκήπιο	500 m ²
Σημείο τήξης PCM: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ + πρόσθετα	20 °C
Λανθάνουσα θερμότητα	174 kJ/kg
Ποσότητα PCM που χρησιμοποιείται	2500 kg
Αριθμός εναλλακτών θερμότητας που χρησιμοποιήθηκαν	200
2 Ανεμιστήρες	4320 m ³ /h ο καθένας

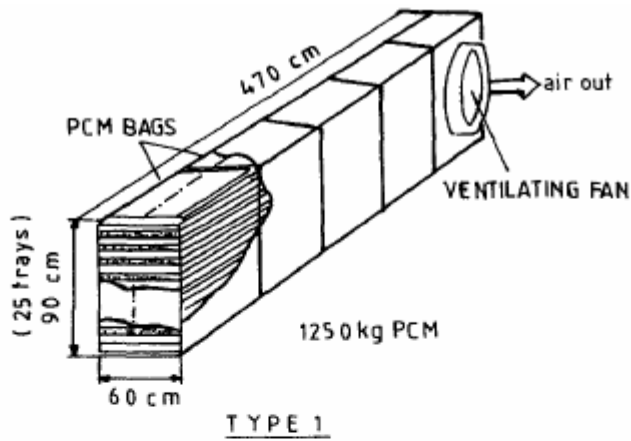
Στο σχήμα 37 φαίνεται η διάταξη του συστήματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας.



Σχ. 37 Εποπτικό σχεδιάγραμμα της εγκατάστασης αποθήκευσης ενέργειας

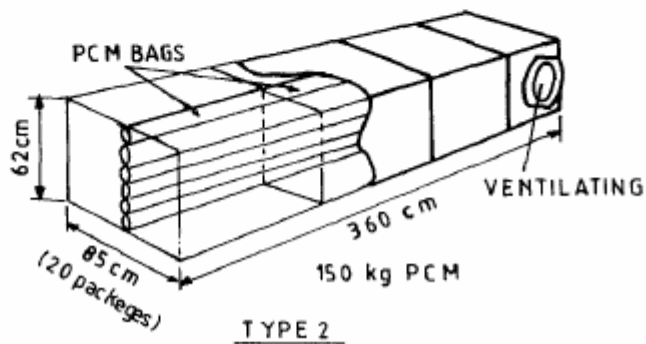
Παρατηρήθηκε ότι, παρόλο που η εσωτερική θερμοκρασία (8°C) επιτεύχθηκε, μόνο το 40-60% της αποθηκευμένης λανθάνουσας θερμότητας χρησιμοποιήθηκε. Αυτό σημαίνει ότι σχεδόν το μισό υλικό αλλαγής φάσης δε χρησιμοποιήθηκε αποδοτικά.

Οι Takakura και Nishina συνέχισαν τις έρευνες χρησιμοποιώντας ως υλικά αλλαγής φάσης δύο διαφορετικά μίγματα. Το πρώτο μίγμα (σημείο τήξης 24°C , λανθάνουσα θερμότητα τήξης 167.2 kJ/Kg) αποτελείται από: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, NaCl , ενώ το δεύτερο μίγμα (σημείο τήξης 24°C , λανθάνουσα θερμότητα τήξης 167.2 kJ/Kg) από $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ και ουρία. Κατασκεύασαν δύο τύπους δεξαμενών αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, οι οποίοι φαίνονται στο σχήμα 38.



TYPE 1

(a)



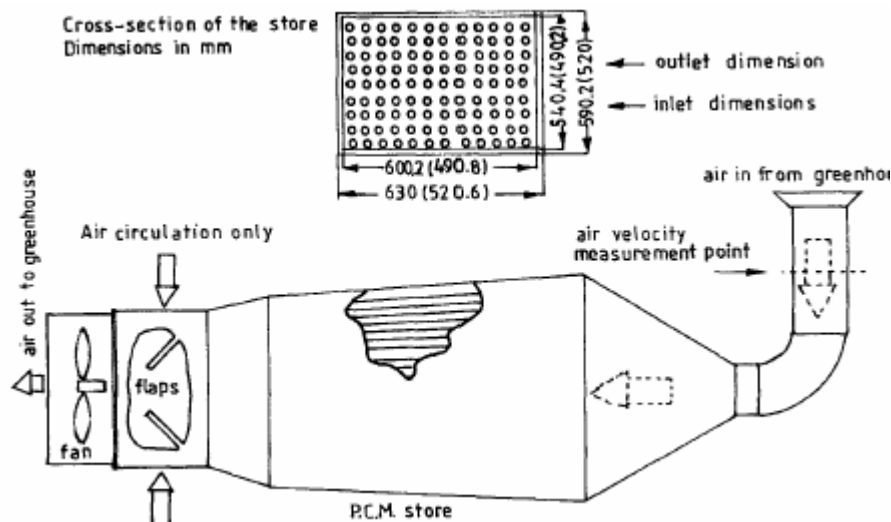
TYPE 2

(b)

Σχ. 38 οι δύο τύποι δεξαμενών αποθήκευσης ενέργειας

Το θερμοκήπιο είχε εμβαδόν 352 m² και η επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία ήταν 8° C. Αυτή όμως η θερμοκρασία σε κρύες καιρικές συνθήκες δεν επιτεύχθηκε για πάνω από τη διάρκεια μισής μέρας. Δεν ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθεί όλη η αποθηκευμένη θερμότητα του υλικού αλλαγής φάσης. Υπεύθυνο για αυτό ήταν το σημείο τήξης των PCM που θεωρήθηκε υψηλό.

Οι πιο πρόσφατες έρευνες πάνω σε εφαρμογές σχετικά με την εγκατάσταση του υλικού αλλαγής φάσης Na₂SO₄·10H₂O σε θερμοκήπια έγινε από τον Kürklü. Συγκεκριμένα, χρησιμοποίησε δύο παρόμοιους τύπους PCM, τον πρώτο με σημείο τήξης 22-25.5° C και το δεύτερο με 8° C. Το πρώτο υλικό αλλαγής φάσης στόχευε στη μείωση των μέγιστων θερμοκρασιών το καλοκαίρι, ενώ το δεύτερο στη δημιουργία πάγου. Στο σχήμα 39 παρουσιάζεται η εγκατάσταση.



Σχ.39 Εγκατάσταση αποθήκευσης ενέργειας με PCM

Στον πίνακα 18 φαίνονται τα χαρακτηριστικά της παραπάνω εγκατάστασης.

Πιν.18 Χαρακτηριστικά εγκατάστασης

Στοιχείο	Χαρακτηριστικά
Θερμοκήπιο	13,5 m ²
Σημείο τήξης PCM: Na ₂ SO ₄ 10H ₂ O + πρόσθετα	22 °C και στους 8 °C
Λανθάνουσα θερμότητα	216 kJ/kg
Αριθμός εναλλακτών θερμότητας που χρησιμοποιήθηκαν	120

Τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά αφού κατά τη διάρκεια της νύχτας η θερμοκρασία του θερμοκηπίου αυξήθηκε κατά 2 °C

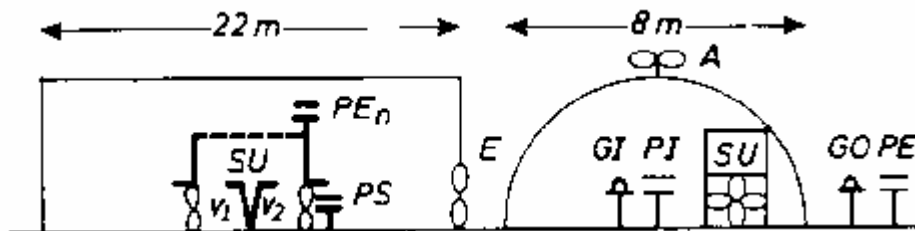
Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά μερικές εφαρμογές PCM σε θερμοκήπια.

3.3 Βασικές εφαρμογές των PCM για τη θέρμανση του αέρα του θερμοκηπίου

3.3.1 Α' Εφαρμογή

Η παρακάτω έρευνα, διεξήχθηκε τη χρονιά 1985-86 και είναι μία από τις πρώτες έρευνες κατά την οποία οι επιστήμονες T. Boulard, A. Baille προσπαθούν να εγκαταστήσουν υλικά αλλαγής φάσης σε θερμοκήπιο . Το θερμοκήπιο βρίσκεται στη νότια Γαλλία. Οι επιστήμονες εγκαθιστούν σε ένα θερμοκήπιο, εμβαδου 176m² (8m×22m), δεξαμενή αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Το θερμοκήπιο είναι ημικυλινδρικό (σχήμα 40), διαθέτει διπλό πολυανθρακικό κάλυμμα και η οροφή του έχει την κατεύθυνση του άξονα ανατολής-δύσης, για να μεγιστοποιείται η ηλιακή

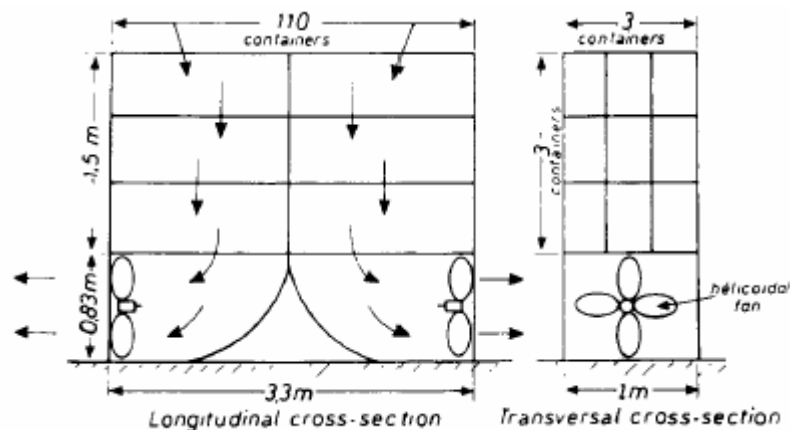
ακτινοβολία κατά την διάρκεια του χειμώνα. Το θερμοκήπιο διαθέτει ένα βοηθητικό σύστημα θέρμανσης του αέρα ισχύος 20 kW, καθώς επίσης και ένα σύστημα εξαερισμού συνδεδεμένο με θερμοστάτες, έτσι ώστε να διατηρείται η εσωτερική θερμοκρασία μέσα στα επιθυμητά όρια. Η μονάδα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας τοποθετείται στο μέσον του βόρειου τοίχου (σχήμα 40).



Σχ. 40 πρόχειρο σχεδιάγραμμα της πρόσοψης και της πλάγιας όψης της εγκατάστασης

SU: μονάδα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (Storage Unit), V_1 , V_2 : ανεμιστήρες

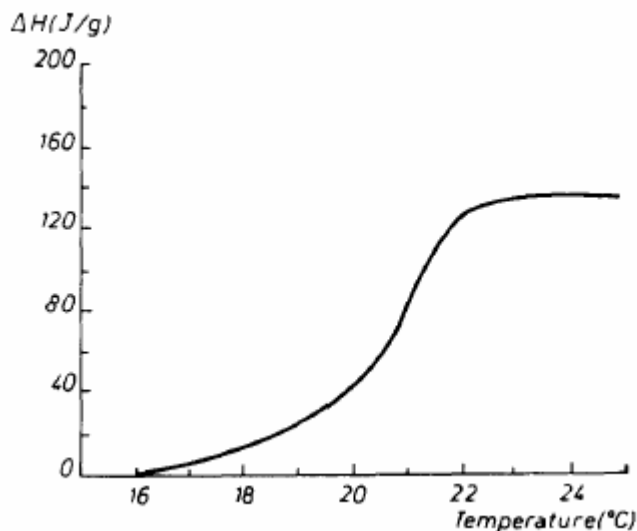
Η δεξαμενή αποθήκευσης (σχήμα 40) έχει σχήμα ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου και έχει διαστάσεις $3.43\text{m} \times 1.03\text{m} \times 1.53\text{m}$. Ο αέρας εισέρχεται στην δεξαμενή από το επάνω μέρος. Στη συνέχεια κυκλοφορεί κάθετα προς το κάτω μέρος της δεξαμενής, όπου και εξέρχεται με τη βοήθεια δύο ελικοειδών ανεμιστήρων, για να κατευθυνθεί προς τα φυτά.



Σχ. 41 η δεξαμενή αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας σε τομή

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 41 η δεξαμενή αποθήκευσης αποτελείται από μικρότερες δεξαμενές που είναι κατασκευασμένες από το υλικό PVC, έχουν όγκο 20 cm^3 και περιλαμβάνουν 2.5 kg PCM .

Το PCM που χρησιμοποιήθηκε είναι το $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ με σημείο τήξης στους $22\text{ }^\circ\text{C}$, λανθάνουσα θερμότητα τήξης 130 kJ/kg και χωρητικότητα αποθήκευσης θερμότητας 1.66 MJ/m^2 . Η καμπύλη του διαγράμματος 19 προκύπτει από το διαφορικό θερμιδόμετρο DSC.



Διαγρ.19 DSC καμπύλη του CaCl₂ · 6H₂O

Κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας, όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 22 °C, οι ανεμιστήρες της δεξαμενής αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας λειτουργούν έτσι ώστε να περάσει αέρας μέσα από τη δεξαμενή και να γίνει η αποθήκευση θερμότητας. Μετά το ηλιοβασίλεμα, όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους 22 °C, οι ανεμιστήρες λειτουργούν ξανά για να πραγματοποιηθεί η μεταφορά θερμότητας, μέσω του αέρα, από τη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας στο θερμοκήπιο.

Στο θερμοκήπιο καλλιεργούνται ντομάτες. Οι ντομάτες απαιτούν κατά την διάρκεια της ημέρας θερμοκρασία μέχρι 22 °C την περίοδο Φεβρουαρίου-Μαρτίου, ενώ την περίοδο Απριλίου μέχρι και Μαΐου απαιτούν θερμοκρασία μέχρι 26 °C. Κατά τη διάρκεια της νύχτας η επιθυμητή θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 12-14 °C. Τα παραπάνω όρια θερμοκρασιών είναι συνακόλουθα με την θερμοκρασία αλλαγής φάσης του PCM. Για τους μήνες Φεβρουάριο μέχρι Απρίλιο για τις χρονιές 1985-1986 παρατίθενται οι μέσες τιμές βασικών μεγεθών στον πίνακα 19.

Πιν.19 μέσες τιμές βασικών μεγεθών

Παράμετρος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος
Μέση εσωτερική θερμοκρασία τη νύχτα (°C)	10.9	13.5	15.1
Μέση εξωτερική θερμοκρασία τη νύχτα (°C)	3.8	6.6	9.3
Μέση ημερήσια ενέργεια που αποθηκεύεται (MJ/m)	0.45	1.10	0.95
Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία (MJ/m ²)	7.9	12.9	16.0

Το Φεβρουάριο παρατηρήθηκε ότι το PCM στο σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, λόγω της χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας άρα και της χαμηλής θερμοκρασίας, έλιωνε από τα μέσα Φεβρουαρίου και μετά. Έτσι, κατά το μήνα Φεβρουάριο χρησιμοποιήθηκε το βοηθητικό σύστημα θέρμανσης, το οποίο κάλυπτε κατά 80% τις απαιτήσεις θέρμανσης του θερμοκηπίου. Αντίθετα τους μήνες Μάρτιο με Απρίλιο το υλικό αλλαγής φάσης έλιωνε σε ποσοστό 70-90% του όγκου του και έτσι μειώθηκαν τα θερμικά φορτία βοηθητικού συστήματος θέρμανσης κατά 40%.

Τους μήνες της Άνοιξης στο θερμοκήπιο παρατηρήθηκε υπερθέρμανση. Το σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας κρίθηκε ανεπαρκές. Οι επιστήμονες αποφάνθηκαν ότι το σημείο τήξης 22 °C είναι υψηλό για την αποτελεσματική αποθήκευση θερμότητας κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Επίσης το μέγεθος (θερμική χωρητικότητα και επιφάνεια ανταλλαγής θερμότητας) της δεξαμενής αποθήκευσης αποδείχτηκε μικρό, αφού την άνοιξη, λόγω της υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας, υπερθερμάνθηκε. Οι επιστήμονες πρότειναν στην συνέχεια, σημείο τήξης του υλικού αλλαγής φάσης τους 20 °C και χωρητικότητα αποθήκευσης θερμότητας 2.50 MJ/m².

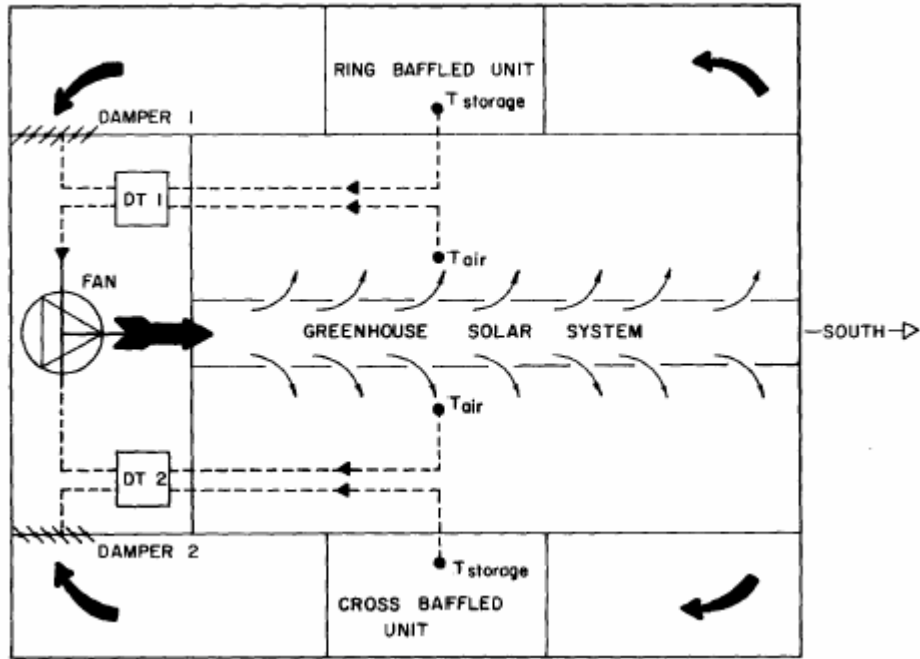
3.3.2 Β' Εφαρμογή

Αυτή η εφαρμογή σχεδιάστηκε από τους B. Huang και M. Toksoy για θέρμανση του αέρα, ο οποίος προορίζεται για στέγνωμα της καλλιέργειας σε θερμοκήπιο. Στο θερμοκήπιο η ηλιακή ενέργεια που δεσμεύεται, συνδυάζεται με ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Το σύστημα αποτελείται από 92 πλαστικούς σωλήνες μήκους 1.83 m και διαμέτρου 10 cm, κάθε ένας εκ των οποίων περιέχει 13 kg PCM. Το υλικό αλλαγής φάσης που χρησιμοποιείται είναι το ένυδρο χλωριούχο ασβέστιο (CaCl₂·6H₂O) με σημείο τήξης 27.22° C. Οι θερμοφυσικές του ιδιότητες φαίνονται στον πίνακα 20.

Πιν. 20 ιδιότητες CaCl₂·6H₂O

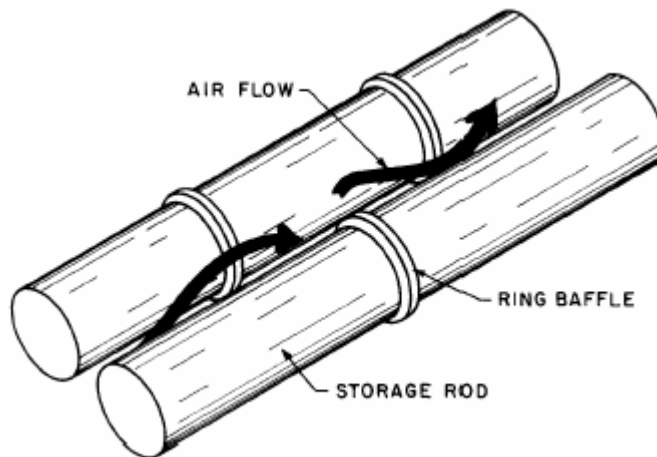
Ιδιότητες	
Θερμοκρασία τήξης	27.2 °C
Λανθάνουσα θερμότητα	190.72 kJ/kg
Ειδικό βάρος στερεού	1.710 kg/l
Ειδικό βάρος υγρού	1.527 kg/l
Θερμοχωρητικότητα στερεού	1.423 kJ/kgK
Θερμοχωρητικότητα υγρού	2.218 kJ/kgK
Θερμική αγωγιμότητα στερεού	1.089 W/mK
Θερμική αγωγιμότητα υγρού	0.56 W/mK

Το σύστημα λειτουργεί ως εξής: Ένα μέρος της ηλιακής ενέργειας που δεσμεύεται από την γυάλινη επιφάνεια του θερμοκηπίου, χρησιμοποιείται για να θερμάνει τον εσωτερικό αέρα, ο οποίος κυκλοφορεί μέσα σε εγκατεστημένους αεραγωγούς. Στη συνέχεια ο θερμός αέρας κατευθύνεται προς τη δεξιά και αριστερή πλευρά του θερμοκηπίου, όπου είναι τοποθετημένοι οι σωλήνες με τα PCM. Στο σχήμα 42 αναπαριστάται η διαδικασία.



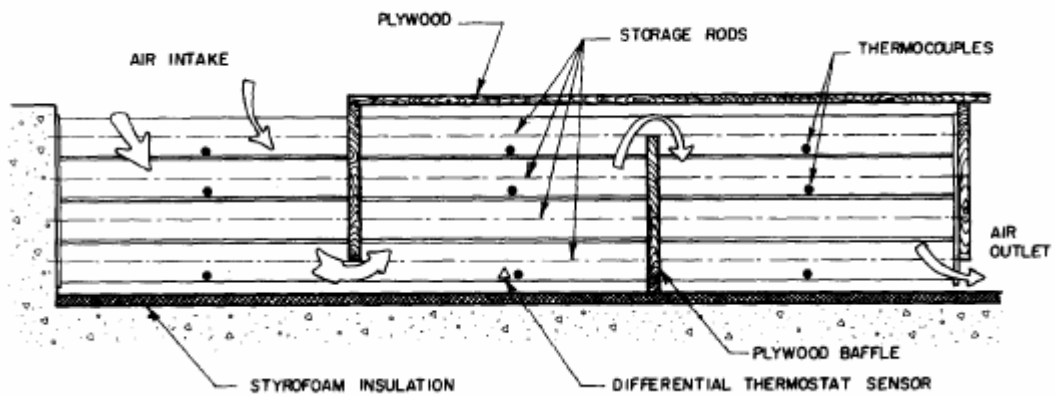
Σχ. 42 Κάτοψη θερμοκηπίου

Με αυτόν τον τρόπο τα PCM φορτίζονται. Για να είναι δυνατή η ανακυκλοφορία του αέρα τοποθετούνται γύρω από τους μισούς σωλήνες δακτύλιοι, όπως φαίνεται στο σχήμα 43.



Σχ.43 ροή αέρα γύρω από σωλήνες

Στους υπόλοιπους σωλήνες τοποθετούνται κάθετα κόντρα πλακέ , όπως φαίνεται και στο σχήμα 44, για να κατευθυνθεί η ροή του αέρα.



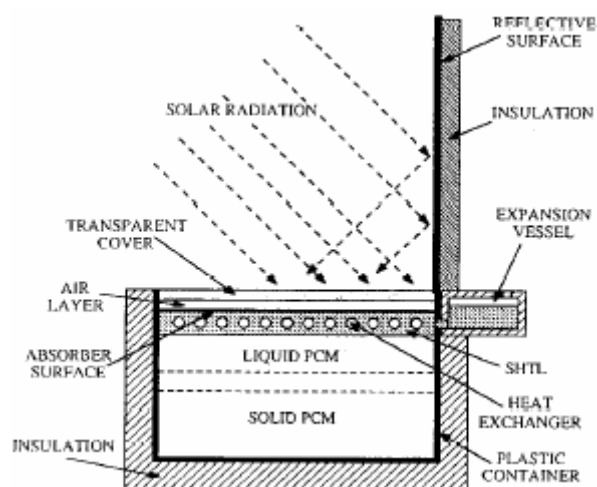
Σχ. 44 ροή αέρα με τη βοήθεια κάθετων πλακών

Στο σύστημα έχει τοποθετηθεί ένας θερμοστάτης, ο οποίος μετράει την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του αέρα που θερμαίνεται από την γυάλινη επιφάνεια του θερμοκηπίου και της θερμοκρασίας στους σωλήνες. Αν αυτή η διαφορά είναι μεγαλύτερη των 5°C , τότε ενεργοποιούνται οι ανεμιστήρες και κυκλοφορεί ο αέρας.

Το σύστημα δούλεψε επιτυχώς: η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα, με τη χρήση του PCM κυμάνθηκε από $24\text{-}44^{\circ}\text{C}$, διακύμανση που θεωρείται ικανοποιητική.

3.4 PCM για θέρμανση νερού σε θερμοκήπιο

Οι επιστήμονες Y. Rabin και Bar- Niv σχεδίασαν μία δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας [14]. Αυτή η δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας προορίζεται κυρίως για τη θέρμανση νερού σε θερμοκήπια. Η δεξαμενή αποτελείται από τα εξής στοιχεία: έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη, ένα στρώμα αέρα, ένα ελαιώδες υγρό μεταφοράς θερμότητας (Station transfer heat liquid SHTL), έναν εναλλάκτη θερμότητας, ένα στρώμα PCM (ένυδρο άλας), μόνωση και από έναν ανακλαστήρα, ο οποίος ενισχύει την ηλιακή ακτινοβολία. Η δεξαμενή φαίνεται στο σχήμα 45.



Σχ.45 δεξαμενή αποθήκευση θερμότητας

Συνοπτικά, η δεξαμενή αποθήκευσης λειτουργεί ως εξής: Ο εναλλάκτης θερμότητας βρίσκεται στο επίπεδο του υγρού μεταφοράς θερμότητας (SHTL). Όταν τα PCM απελευθερώνουν θερμότητα, η θερμότητα αυτή μεταφέρεται μέσω του υγρού SHTL στον εναλλάκτη θερμότητας και θερμαίνεται το κρύο νερό που διαρρέει τον εναλλάκτη.

Αναλυτικά: Η φόρτιση των υλικών αλλαγής φάσης γίνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, που συλλέγεται ηλιακή ακτινοβολία. Μέσω του υγρού- SHTL μεταφέρεται θερμότητα στο PCM, το οποίο λιώνει. Όταν το PCM λιώνει η πυκνότητά του μειώνεται και η μάζα του αυξάνεται. Λόγω της επέκτασης αυτής, εκτοπίζεται το υγρό SHTL και αποθηκεύεται σε ένα δοχείο, στο δεξιό μέρος της δεξαμενής. Κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης (όπου απελευθερώνεται η θερμότητα), όταν το PCM αγγίζει τη θερμοκρασία στερεοποίησης και αρχίζει να στερεοποιείται σταδιακά, σχηματίζονται στερεά κομμάτια PCM, τα οποία λόγω της βαρύτητας πάνε στον πυθμένα της δεξαμενής. Με αυτόν τον τρόπο στο άνω μέρος της δεξαμενής θα βρεθεί ξανά υγρό PCM, το οποίο θα στερεοποιηθεί με την σειρά του και θα κατευθυνθεί στον πυθμένα της δεξαμενής. Αυτός είναι ένας μηχανισμός, ο οποίος επιτρέπει στο υγρό PCM (κατά την διάρκεια της στερεοποίησής του) και στο υγρό-SHTL να βρίσκονται σε άμεση επαφή. Έτσι η θερμότητα που απελευθερώνεται μεταφέρεται μέσω του υγρού- SHTL στον εναλλάκτη θερμότητας, ο οποίος διαρρέεται από κρύο νερό, το οποίο και θερμαίνεται.

Τα βασικά πλεονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος είναι τα εξής: α) Ο εναλλάκτης θερμότητας δεν έρχεται σε επαφή με τα ένυδρα άλατα και έτσι αποφεύγονται τα προβλήματα διάβρωσης, β) το σύστημα είναι απλό στην κατασκευή του, γ) σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες δεν απαιτείται σύστημα προστασίας ενάντια στην ψύξη. Τα βασικά μειονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος είναι: α) το φάσμα υλικών αλλαγής φάσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί περιορίζεται στα ένυδρα άλατα που έχουν μεγάλες διαφορές στα χαρακτηριστικά θερμότητας μεταξύ υγρής και στερεής φάσης, β) η διαδικασία αποφόρτισης εξαρτάται από τις κινητικές ιδιότητες κρυσταλλοποίησης του επιλεγμένου ένυδρου άλατος.

Μια τέτοια δεξαμενή για θέρμανση νερού βρίσκει εφαρμογές σε θερμοκήπια που απαιτούν συγκεκριμένες θερμοκρασίες για την καλλιέργεια των φυτών και που βρίσκονται σε άνυδρες περιοχές. Μια τέτοια περιοχή είναι για παράδειγμα η Beer-Sheva του Ισραήλ, όπου διάρκεια της ημέρας μέσα σε ένα θερμοκήπιο κατά τη διάρκεια του χειμώνα η θερμοκρασία φτάνει τους 35°C ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας η θερμοκρασία πέφτει στους 4°C.

Τα PCM που χρησιμοποιήθηκαν βασίζονται σε μίξη των εξής ένυδρων αλάτων: $\text{CaBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ και $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Το θετικό τους είναι ότι παρέχουν πλήρως αναστρέψιμο κύκλο και ανάλογα με την επί τοις εκατό κατά βάρος δοσολογία μπορούμε να έχουμε θερμοκρασίες τήξης μεταξύ 10-34.2 °C. Σε εφαρμογή σε θερμοκήπια η θερμοκρασία τήξης πρέπει να είναι 20 °C. Στη δεξαμενή χρησιμοποιήθηκαν 14,3 Kg PCM (45% κ.β $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 55% κ.β $\text{CaBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

Πειραματικές μελέτες έδειξαν ότι μία τέτοια δεξαμενή μπορεί να αποθηκεύει τα $2/3$ της συνολικής ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας που πέφτει πάνω στο συλλέκτη στους 28°C .

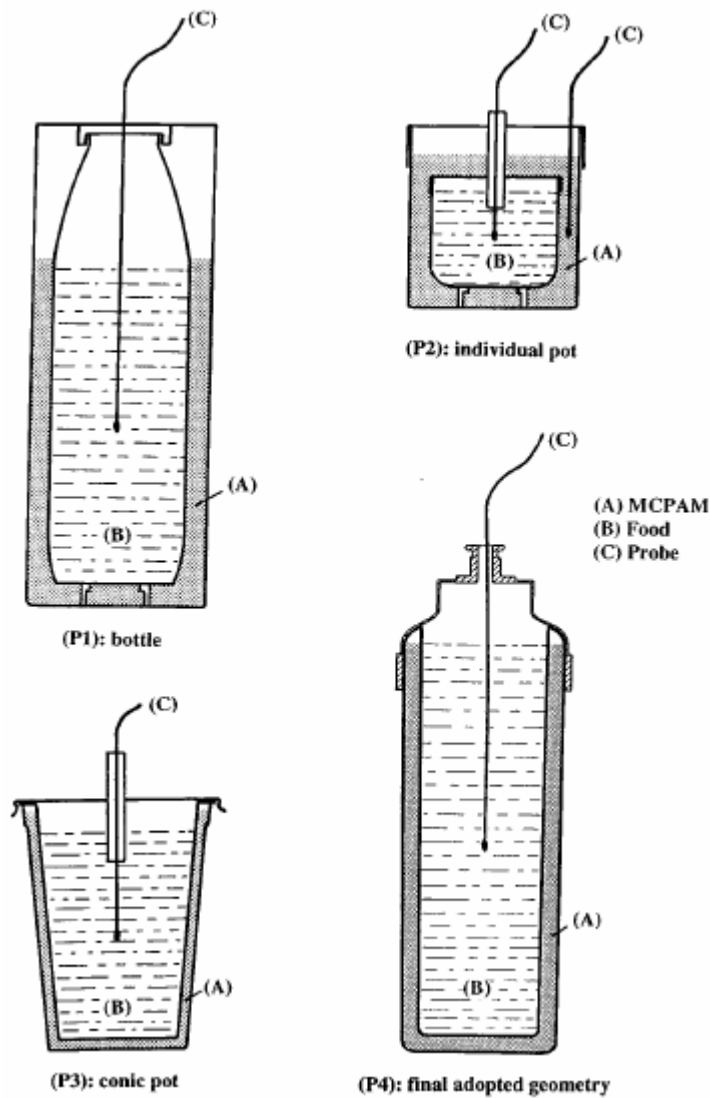
4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ PCM ΣΤΙΣ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Τα υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιούνται εκτός των άλλων και στις συσκευασίες κυρίως για την μεταφορά προϊόντων (π.χ τροφίμων, φαρμάκων, αίματος). Όπως είναι γνωστό τα PCM καθώς μεταπίπτουν από τη στερεή φάση στην υγρή και αντίστροφα, έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν σταθερή τη θερμοκρασία τους. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά κατάλληλη τη χρήση τους στις συσκευασίες. Μπορούν, δηλαδή, να προστατεύουν τα προϊόντα από μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις.

4.1 PCM σε συσκευασίες για μεταφορά τροφίμων

Στην παρακάτω εφαρμογή οι Espeau και Mondieig [15] χρησιμοποιούν ως υλικό αλλαγής φάσης μοριακό μίγμα αλκανίων (molecular alloy phase change materials-MAPCM). Πρόκειται για ένα στερεό διάλυμα, του οποίου τα συστατικά είναι οργανικά. Αυτά τα μοριακά μίγματα έχουν ως βασικό πλεονέκτημα ότι επειδή οι θερμοφυσικές τους ιδιότητες ρυθμίζονται με επιλογή των κατάλληλων συστατικών, το μίγμα αποκτάει τις επιθυμητές ιδιότητες. Τα θερμικά χαρακτηριστικά του μοριακού μίγματος είναι: σημείο τήξης $10.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, ενθαλπία τήξης $\Delta H=155\text{ J/g}$. Παρακάτω παρουσιάζεται μια συσκευασία με διπλό τοίχωμα, που προορίζεται για τη θερμική προστασία υγρών τροφίμων (π.χ χυμών ή υγρού γιαουρτιού). Για να επιτύχει η εφαρμογή θα πρέπει το MAPCM να έχει στερεοποιηθεί πλήρως. Για αυτό το λόγο απαιτείται η συσκευασία να τοποθετηθεί στο ψυγείο για κάποιο χρονικό διάστημα.

Τα σχήματα των συσκευασιών που μελετήθηκαν είναι αυτά που φαίνονται στο σχήμα 46: ένα μπουκάλι, μία ατομική συσκευασία, ένα κωνικό δοχείο και η τελική συσκευασία:



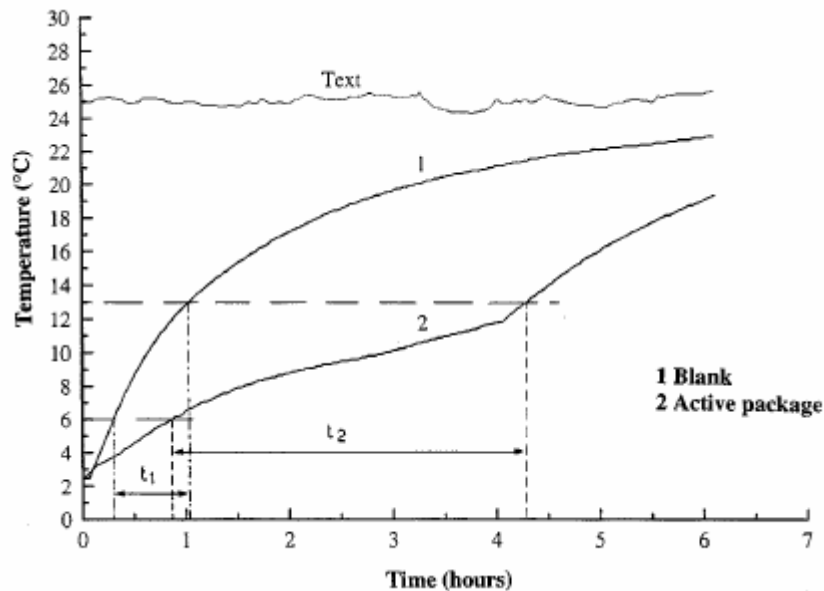
Σχ.46 συσκευασίες P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , που εξετάστηκαν

Όπως φαίνεται στο σχήμα 46 με ειδικά θερμιδοστοιχεία πάρθηκαν μετρήσεις της θερμοκρασίας του τοιχώματος και του τροφίμου. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των τροφίμων και των MAPCM που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον πίνακα 21.

Πιν.21 χαρακτηριστικά μεγέθη των τροφίμων και των MAPCM

Συσκευασία	Χωρητικότητα τροφίμου σε cm^3	Πάχος διπλού τοιχώματος σε cm	Χωρητικότητα του MAPCM σε cm^3
P_1	420	1.0	500
P_2	120	1.0	273
P_3	326	0.5	120
P_4	417	0.7	350

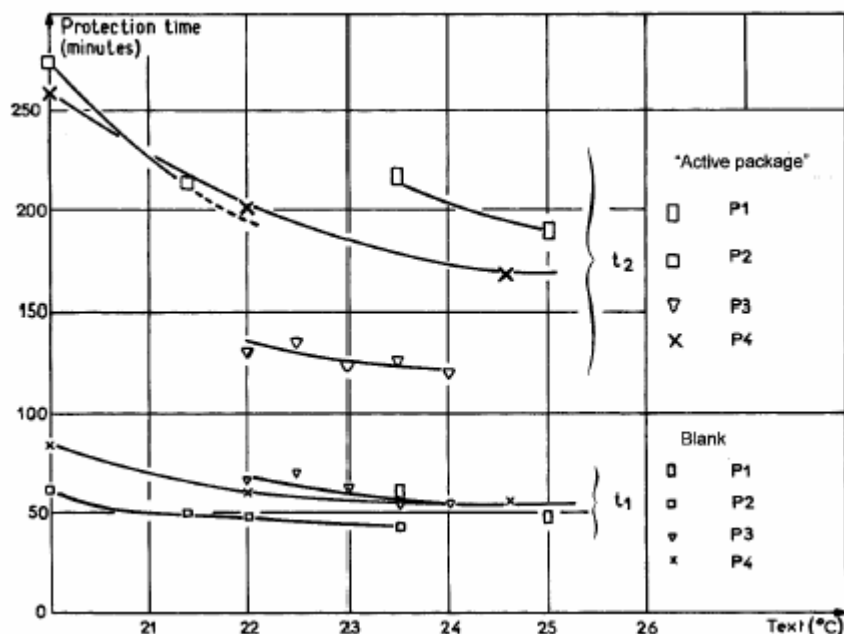
Στη συνέχεια οι επιστήμονες συνέκριναν μεταξύ τους δύο συσκευασίες: Ένα απλό μπουκάλι (1) και ένα μπουκάλι με MAPCM (2). Τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα 20.



Διαγρ. 20 χρονική μεταβολή θερμοκρασίας για συμβατική και μη συμβατική συσκευασία

Με t_1 , t_2 συμβολίζεται ο χρόνος που χρειάζεται η θερμοκρασία του απλού μπουκαλιού και του μπουκαλιού με MAPCM για να φτάσει από τους 6 °C τους 13 °C αντίστοιχα. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι το μπουκάλι με το υλικό αλλαγής φάσης υπερτερεί αφού $t_2 > t_1$.

Στη συνέχεια συγκρίθηκε ο χρόνος t_1 των συσκευασιών P₁-P₄ με MAPCM με τον χρόνο t_2 των αντίστοιχων συσκευασιών χωρίς υλικά αλλαγής φάσης για διάφορες θερμοκρασίες εξωτερικού περιβάλλοντος (διάγραμμα 21).



Διαγρ. 21 χρονική μεταβολή θερμοκρασίας για συσκευασίες P₁-

P₄

Παρατηρούμε ότι όταν η εξωτερική θερμοκρασία αυξάνεται, η συναλλαγή θερμότητας μεταξύ περιβάλλοντος και υλικού αλλαγής φάσης είναι πιο γρήγορη άρα ο χρόνος t_2 πιο σύντομος. Παρατηρούμε ότι πάντα $t_2 > t_1$.

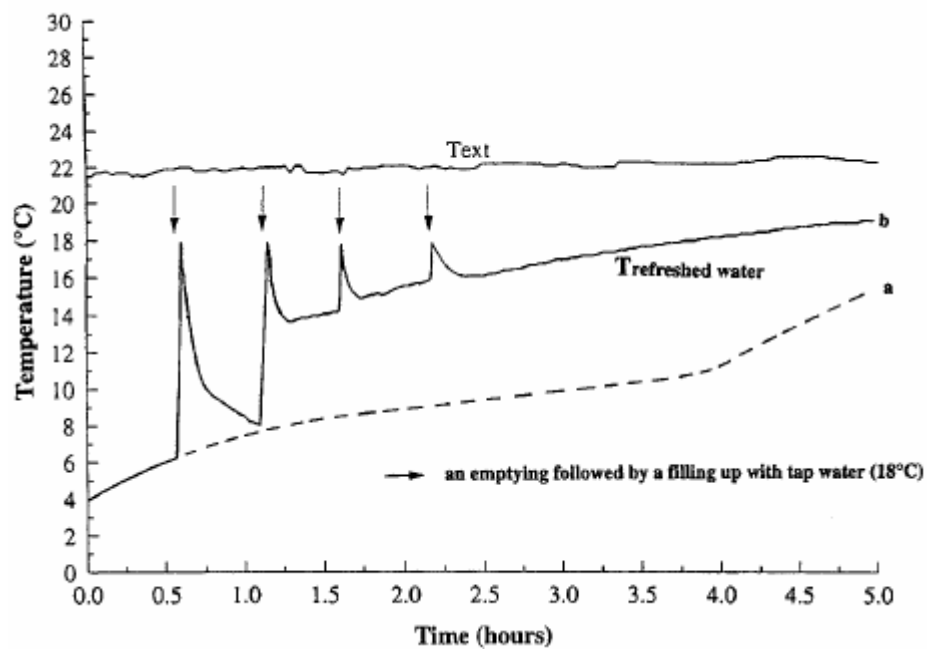
Ο λόγος $G = t_2/t_1$ ενδιαφέρει ιδιαίτερα τους επιστήμονες. Ο λόγος αυτός εξαρτάται από την ποσότητα του υλικού αλλαγής φάσης που περιλαμβάνει η συσκευασία και πιο συγκεκριμένα από το λόγο: όγκος PCM/όγκος τροφίμου (V_{MAPCM}/V_{food}) (πίνακας 22).

Πιν.22 τιμές G , V_{MAPCM}/V_{food} για κάθε συσκευασία

Συσκευασία	$G = t_2/t_1$	V_{MAPCM}/V_{food}
P ₁	$3.6 < G < 3.9$	1.19
P ₂	$3.6 < G < 4.4$	2.27
P ₃	$1.6 < G < 2.4$	0.46
P ₄	$3.0 < G < 3.3$	0.84

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι: όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος V_{MAPCM}/V_{food} , τόσο μεγαλύτερο το G .

Τους επιστήμονες τους ενδιαφέρει ακόμη η συμπεριφορά μιας συσκευασίας με MAPCM, όταν προηγουμένος δεν έχει τοποθετηθεί στο ψυγείο και επομένως το υλικό αλλαγής φάσης δεν έχει στερεοποιηθεί πλήρως. Πειράματα έγιναν με την συσκευασία P₄, η οποία τοποθετήθηκε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος στους 22 °C. Έγιναν το εξής πείραμα με σκοπό να καταγραφεί η θερμοκρασία του περιεχομένου του μπουκαλιού. Κάθε μισή ώρα (πριν προλάβει το υλικό αλλαγής φάσης να τήξει τελείως) το μπουκάλι άδειαζε και ξαναγέμιζε με νερό βρύσης στους 18 °C. Η θερμοκρασία του περιεχομένου του μπουκαλιού (νερό βρύσης) παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα 22 σε συνάρτηση με το χρόνο.

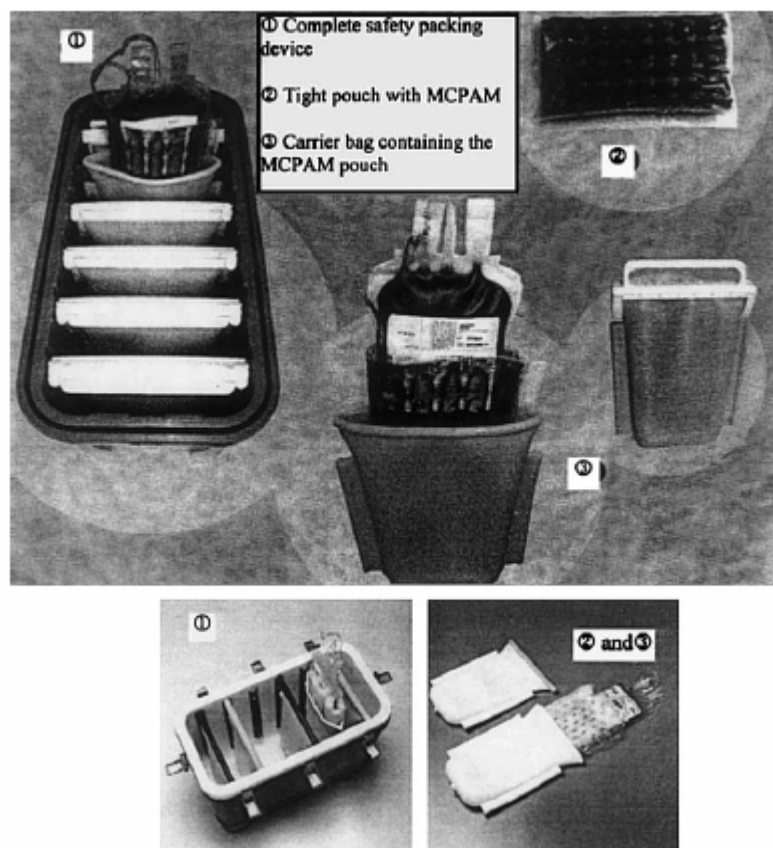


Διαγρ. 22 χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας του νερού

Στην περίπτωση όπου γίνεται το γέμισμα κάθε 30 λεπτά παρατηρήθηκε το εξής: Την πρώτη φορά η εσωτερική θερμοκρασία ανέρχεται στους 8 °C, τη δεύτερη στους 14 °C, την τρίτη τους 15 °C. Με αυτή τη μέθοδο μπορούμε να ζεσάνουμε έως και 2 lt νερού.

4.2 PCM σε συσκευασίες για μεταφορά αίματος

Οι Mondieig και Rajabalee μελέτησαν τη χρήση μοριακών μιγμάτων υλικών αλλαγής φάσης (MAPCM) σε συσκευασίες για τη μεταφορά αίματος. Χρησιμοποίησαν μια «σακούλα» με διπλό τοίχωμα με MAPCM. Η «σακούλα» αυτή τοποθετείται γύρω από τη σακούλα που περιέχει το αίμα και στη συνέχεια τοποθετούνται μαζί μέσα σε ειδικό κουτί, κατάλληλο για τη μεταφορά. (σχήμα 47).



Σχ. 47 η ειδική συσκευασία για μεταφορά αίματος αποτελείται από: (1) το ειδικό κουτί, (2) τη σακούλα που περιλαμβάνει το MAPCM, (3) τη σακούλα με το αίμα, η οποία περιβάλλεται από τη σακούλα με το MAPCM

Οι αρχές λειτουργίας της παραπάνω εφαρμογής είναι απλή. Στην αρχή η σακούλα με το MAPCM τοποθετείται στο ψυγείο, έτσι ώστε το υλικό αλλαγής φάσης να στερεοποιηθεί πλήρως. Στη συνέχεια τοποθετείται στη συσκευασία για τη μεταφορά αίματος, όπως περιγράψαμε παραπάνω.

Τρεις θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται για την προστασία κατά τη μεταφορά αίματος: -30 , 4 και 22 °C. Σε αυτή την εφαρμογή οι Mondieig και Rajabalee στοχεύουν να διατηρήσουν το αίμα στους 4 °C με απόκλιση 2 °C, για παράδειγμα κατά τη μεταφορά του από το νοσοκομείο μέχρι το τελικό του προορισμό. Για αυτό το λόγο, η θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 2 και 6 °C. Ως υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιήθηκαν τα αλκάνια: C_{12} , C_{13} , C_{14} , C_{15} και C_{16} . Κατάλληλα μίγματα αποδείχτηκαν τα εξής: C_{12} - C_{13} - C_{14} , C_{13} - C_{14} - C_{15} , C_{14} - C_{15} - C_{16} και C_{12} - C_{14} - C_{16} . Συγκεκριμένα το μίγμα που αποτελείται από C_{12} - C_{13} - C_{14}

έχει σημείο τήξης τους 4.8 °C και λανθάνουσα θερμότητα 207 J/g.

Χρησιμοποιήθηκαν 330 g του παραπάνω MAPCM και τοποθετήθηκαν στην ειδική σακούλα με το διπλό τοίχωμα. Το αίμα συσκευάστηκε όπως περιγράψαμε παραπάνω. Στη συνέχεια μετρήθηκαν οι θερμοκρασίες σε συνάρτηση με το χρόνο. Παρατηρήθηκε ότι όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 22 °C, η συσκευασία με το MAPCM μπορεί να διατηρήσει το αίμα σε θερμοκρασία κάτω των 10 °C για τουλάχιστον 7 ώρες. Το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό, αφού το αίμα προστατεύεται 8 φορές περισσότερο χρόνο από όταν χρησιμοποιείται συσκευασία χωρίς PCM.

4.3 PCM σε συσκευασίες που κυκλοφορούν στο εμπόριο-Εταιρίες που δραστηριοποιούνται στο χώρο

4.3.1 PCM για διατήρηση ψύξης

Από τα πρώτα υλικά αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκαν σε συσκευασίες μεταφοράς για ψύξη (2-8 °C) των προϊόντων είναι ο πάγος με σημείο τήξης τους 0 °C. Τα προϊόντα πρέπει μεν να διατηρηθούν κρύα, όμως δεν πρέπει να παγώσουν. Έτσι λοιπόν για αποφευχθεί κάτι τέτοιο, το υλικό αλλαγής φάσης, ο πάγος, θα πρέπει να συνδυαστεί με μονωτικά υλικά, όπως ουρεθάνη ή πολυστυρένιο, τα οποία τοποθετούνται ανάμεσα στο προϊόν και στο υλικό αλλαγής φάσης. Αυτό όμως έχει αρνητική επίδραση στο μέγεθος και στο κόστος της συσκευασίας. Το μεγάλο μέγεθος τις καθιστά μη πρακτικές. Για να ξεπεράσει αυτό το μειονέκτημα η εταιρία «Thermal Packaging Solution» (Ocean, Η.Π.Α) ενσωμάτωσε σε ένα είδος παγωμένου ζελέ παραφίνη και κατάφερε να υψώσει το σημείο τήξης του στους 4 °C.

Η εταιρία Polar Tech Industries (Geona, Η.Π.Α) χρησιμοποιεί τον πάγο ως υλικό αλλαγής φάσης. Παρόλα τα μειονεκτήματα θεωρείται κατάλληλο για τη συσκευασία του 2% των φαρμάκων που κυκλοφορούν στη αγορά.

Σήμερα στην αγορά κυκλοφορεί ένα νέο προϊόν το TCP (Thermal Control Panel) της εταιρίας TCP reliable Corp (Edison, Η.Π.Α). Πρόκειται ουσιαστικά για δοχεία με υποδοχές (σχήμα 48), οι οποίες επιτρέπουν στα δοχεία να «συνεργάζονται» μεταξύ τους καθώς επίσης να ενσωματώνονται στις συσκευασίες. Τα δοχεία αυτά περιέχουν στο εσωτερικό τους υλικά αλλαγής φάσης με σημείο τήξης γύρω στους 5 °C και έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν τα προϊόντα κρύα.



Σχ.48 TCP

Το TCP είναι αεροστεγές. «Περικυκλώνει» το προϊόν, στο οποίο θέλουμε να διατηρηθεί η θερμοκρασία, έρχεται δηλαδή σε άμεση επαφή μαζί του. Έτσι, η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται με αγωγή, με αποτέλεσμα να έχουμε λιγότερες απώλειες.

Το TCP έχει τη δυνατότητα να διατηρεί τη θερμοκρασία ενός προϊόντος στους 2-8 °C για τουλάχιστον 48 ώρες. Επιπλέον είναι μικρό σε μέγεθος και ελαφρύ.

Τα TCP μπορούν εκτός από συσκευασίες να ενσωματωθούν και στην καρότσα των φορτηγών που μεταφέρουν προϊόντα.

4.3.2 PCM για διατήρηση θερμότητας

Πολύ πιο εύκολο και πολύ πιο οικονομικό είναι να δημιουργηθούν υλικά αλλαγής φάσης που θα προορίζονται να χρησιμοποιηθούν για συσκευασίες μεταφοράς προϊόντων, τα οποία θα διατηρούν τα προϊόντα ζεστά .

Η εταιρία SCA Thermo Safe Brands (Arlington Heights, Η.Π.Α) κυκλοφορεί στην αγορά πάνω από 20 χρόνια το προϊόν U-tek (σχήμα 49). Πρόκειται ουσιαστικά για ένυδρα άλατα με σημείο τήξης τους 28 °C.



Σχ.49 U-tek

Το προϊόν TCP κυκλοφορεί στην αγορά και με σημείο τήξης στους 22 °C και προορίζεται για αποθήκευση θερμότητας. Η παραπάνω εφαρμογή χρησιμοποιείται για τη διατήρηση της θερμοκρασίας του αίματος στους 20-24 °C κατά τη μεταφορά του στο νοσοκομείο.

Στο χώρο δραστηριοποιείται επίσης και η εταιρία Laminar Medica (Tring, Hertfordshire, Αγγλία), η οποία χρησιμοποιεί ανόργανα ένυδρα άλατα ως υλικά αλλαγής φάσης για αποθήκευση θερμότητας. Τα προϊόντα της κυκλοφορούν στο εμπόριο με την ονομασία Medisorb και Mediphase (σχήμα 50).



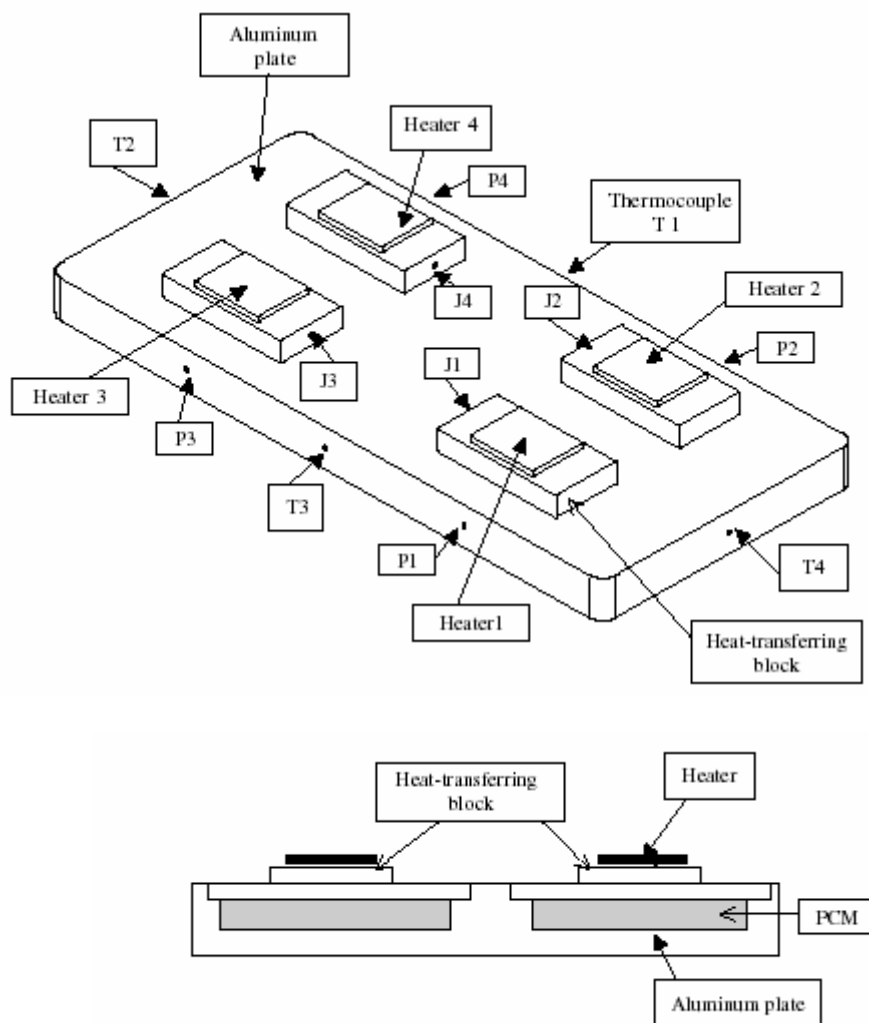
Σχ. 50 Medisorb

5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ PCM ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι ηλεκτρονικές συσκευές, όπως οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, τα laptop, τα κινητά τηλέφωνα, εξελίσσονται όλο και περισσότερο, με αποτέλεσμα από τη μία να μειώνεται το μέγεθός τους αλλά από την άλλη να αυξάνεται η ισχύς τους και οι θερμικές τους απώλειες. Οι ηλεκτρικές αντιστάσεις που συναντά το ρεύμα καθώς διαπερνά τα καλώδια, τα επίπεδα πυριτίου, τα transistor των επιμέρους ηλεκτρονικών εξαρτημάτων των παραπάνω συσκευών, αυξάνουν τη θερμοκρασία τους με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος φθοράς όπως π.χ θραύσης, τήξης, ακόμη και καύσης των εξαρτημάτων. Οι μηχανικοί στοχεύουν να βρουν τρόπους, ώστε να διατηρήσουν τη θερμοκρασία των εξαρτημάτων μέσα στα επιτρεπόμενα όρια (μέχρι 50 °C), χωρίς να χρειαστεί να αυξήσουν το μέγεθος των συσκευών. Για αυτό το λόγο, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι συμβατικές τεχνικές εξαναγκασμένης μεταφοράς θερμότητας, που βασίζεται σε ανεμιστήρες και συναφή εξαρτήματα. Αντιθέτως η χρήση υλικών αλλαγής φάσης φαίνεται κατάλληλη. Όπως είναι γνωστό τα PCM δρουν σε τρεις φάσεις. Κατά την πρώτη φάση η θερμοκρασία του στερεού PCM αυξάνεται μέχρι το σημείο τήξης του, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντός του. Κατά τη δεύτερη φάση, η θερμοκρασία του PCM παραμένει σταθερή καθώς το PCM λιώνει. Κατά τη τρίτη φάση η θερμοκρασία υγρού PCM συνεχίζει να αυξάνεται. Για να εισαχθούν τα PCM επιτυχώς στις ηλεκτρονικές εφαρμογές, θα πρέπει να μην μπουν στην τρίτη φάση, αλλά να παραμείνουν στη δεύτερη, έτσι ώστε να αποφευχθεί η υπερθέρμανση.

5.1 PCM σε laptop

Οι επιστήμονες F.L.Tan και C.P.Tso από το πανεπιστήμιο της Σιγκαπούρης επιχειρούν να εισαγάγουν PCM σε ένα laptop. Οι κύριες πηγές που μπορούν να προκαλέσουν υπερθέρμανση είναι ο κύριος επεξεργαστής καθώς και άλλα ηλεκτρονικά εξαρτήματα εναλλασσόμενου ρεύματος. Στην πειραματική μελέτη που διεξήγαγαν, χρησιμοποίησαν τέσσερις θερμαντήρες μέγιστης ισχύος 30W ο καθένας για να προσομοιώσουν τις βασικές πηγές θερμότητας του laptop. Οι τέσσερις αυτοί θερμαντήρες τοποθετούνται πάνω σε μία λεπτή στρώση αλουμινίου που αποτελεί καλό αγωγό θερμότητας με διαστάσεις 8 mm×47 mm×24 mm. Στη συνέχεια όλα μαζί τοποθετούνται πάνω σε μικρή αλουμινένια πλάκα που διαθέτει κάτω από κάθε θερμαντήρα τέσσερις κοιλότητες με PCM. Ως υλικό αλλαγής φάσης χρησιμοποίησαν το εικοσάνιο με σημείο τήξης τους 35.6 °C. Στο σχήμα 50 μπορούμε να δούμε την πλάκα αλουμινίου σε πρόσοψη και σε τομή. Σε διάφορα σημεία T, P, J της πλάκας τοποθετούνται θερμιδοστοιχεία με σκοπό να μετρηθεί η θερμοκρασία τους. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 51 με το γράμμα T συμβολίζονται οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε διάφορα σημεία της αλουμινένιας πλάκας, με P συμβολίζεται η θερμοκρασία που αναπτύσσει το PCM και με J ή H συμβολίζονται οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο σημείο της λεπτής στρώσης αλουμινίου που βρίσκεται κάτω από τον θερμαντήρα.



Σχ. 51 πλάκα αλουμινίου σε πρόσοψη και σε τομή

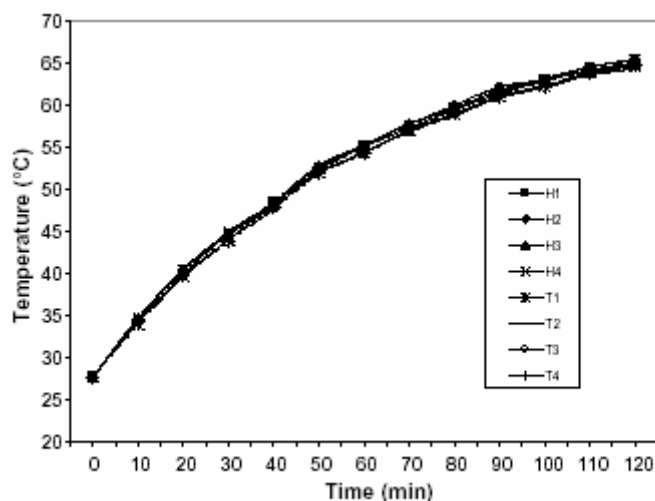
Έγιναν πειράματα για τέσσερις περιπτώσεις λειτουργίας της παραπάνω διάταξης και καταγράφηκαν οι θερμοκρασίες κάθε 10 min. Κάθε πείραμα διήρκησε 2 ώρες. Στον πίνακα 23 φαίνονται τα χαρακτηριστικά της κάθε περίπτωσης.

Πιν.23 χαρακτηριστικά κάθε πειράματος

Case	Type of heating	Experiment No.	Power of heater (W)			
			Heater 1	Heater 2	Heater 3	Heater 4
A	Uniform heat distribution (without PCM)	1	4	4	4	4
B	Uniform heat distribution (with PCM)	2	1	1	1	1
		3	2	2	2	2
		4	4	4	4	4
C	Uniform diagonal heat distribution (with PCM)	5	3	0.75	0.75	3
		6	4	1	1	4
		7	5	1.25	1.25	5
D	Non-uniform heat distribution (with PCM)	8	0.73	0.73	0.73	6.6
		9	0.833	0.833	0.833	7.5
		10	1	1	1	9.5
		11	1.3	1.3	1.3	11.72

A' περίπτωση

Στην πρώτη περίπτωση του πειράματος χρησιμοποιούνται τέσσερις θερμαντήρες ισχύος 4 W ο καθένας, δεν χρησιμοποιούνται όμως PCM. Από το πρώτο πείραμα προέκυψε το διάγραμμα 23 της χρονικής μεταβολής της θερμοκρασίας στα διάφορα σημεία της πειραματικής διάταξης.

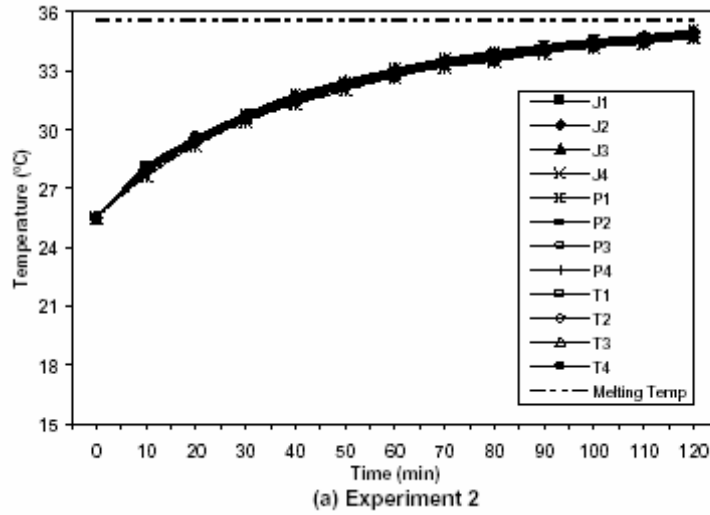


Διαγρ.23 χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στα σημεία H, T της πειραματικής διάταξης

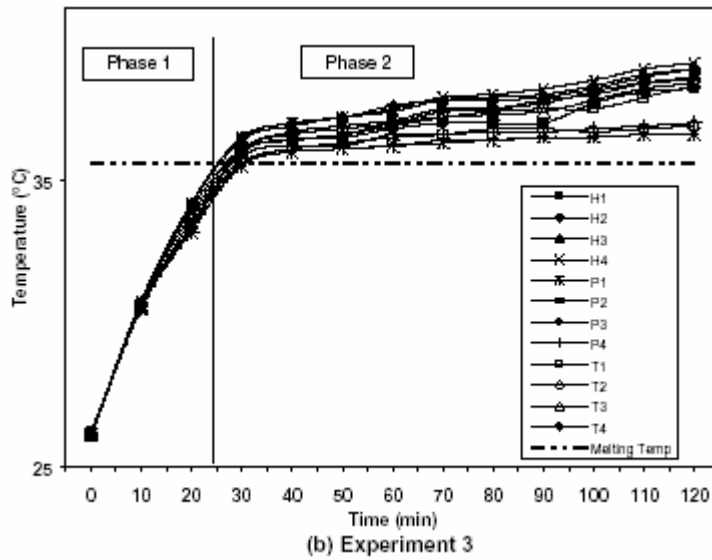
Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία του συστήματος αυξάνεται σταδιακά αγγίζοντας τους 65 °C κατά το τέλος του πειράματος, θερμοκρασία που είναι πολύ μεγαλύτερη από το όριο των 50 °C. Η περίπτωση A' θα χρησιμοποιηθεί κυρίως ως μέτρο σύγκρισης με τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

B' περίπτωση

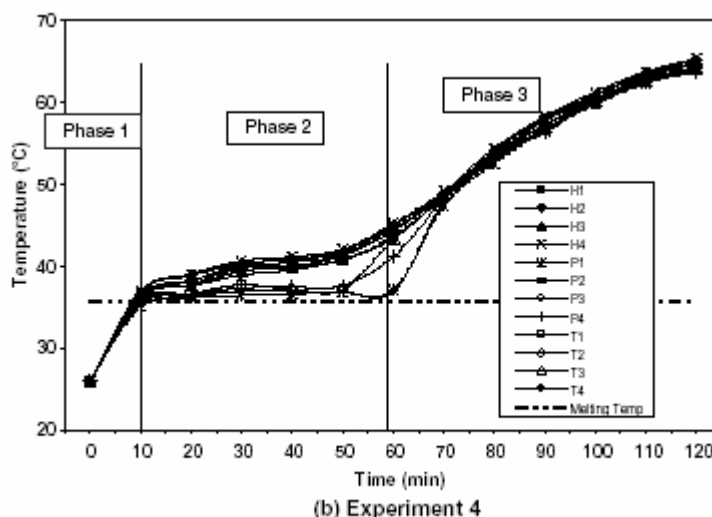
Στη δεύτερη περίπτωση, όπου χρησιμοποιήθηκαν PCM διεξήχθησαν τρία πειράματα (πειράματα 2-4) με θερμαντήρες ισχύος 1, 2 και 4 W αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα της θερμοκρασίας στα διάφορα σημεία της πειραματικής διάταξης σε συνάρτηση με το χρόνο.



Διαγρ.24 χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στα σημεία J, P, T της πειραματικής διάταξης



Διαγρ.25 χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στα σημεία H, P, T της πειραματικής διάταξης

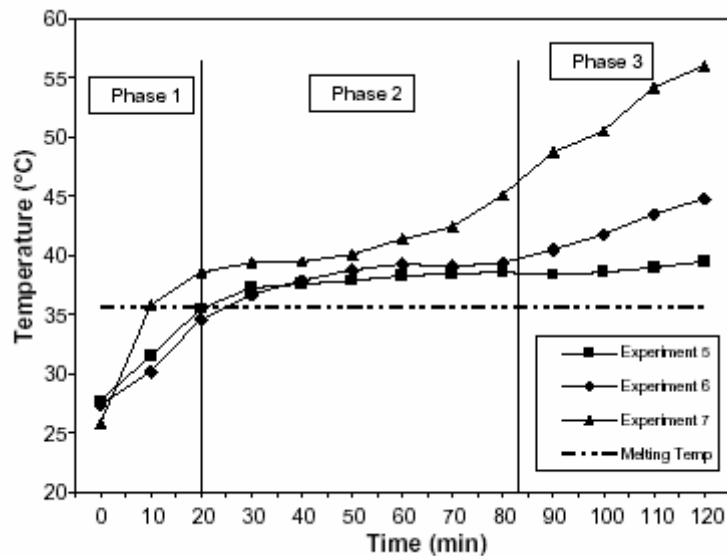


Διαγρ.26 χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στα σημεία H, P, T της πειραματικής διάταξης

Παρατηρούμε ότι στο πείραμα 2 (διαγρ. 24) το PCM δεν αγγίζει μέχρι το τέλος του πειράματος τη θερμοκρασία τήξης και έτσι σε όλη τη διάρκεια του πειράματος το PCM παραμένει στη φάση 1. Στο πείραμα 3 (διαγρ. 25) το PCM χρειάζεται 25 λεπτά για να αγγίξει τη θερμοκρασία τήξης και να περάσει στη φάση 2, ενώ στο πείραμα 4 (διαγρ. 26) χρειάζονται 10 λεπτά. Στο πείραμα 3 παρατηρούμε ότι το PCM δεν εισέρχεται στη φάση τρία. Μόλις περάσουν οι δύο ώρες, κατά το πέρας του πειράματος, η υψηλότερη θερμοκρασία που παρατηρείται στην πειραματική διάταξη αγγίζει τους 40 °C. Στο πείραμα 4 η τήξη του PCM ολοκληρώνεται μετά από μία ώρα. Στη συνέχεια το PCM εισέρχεται στην τρίτη φάση, με αποτέλεσμα να αυξάνεται συνεχώς η θερμοκρασία της πειραματικής διάταξης. Η τελική θερμοκρασία της πειραματικής διάταξης αγγίζει τους 66°C, ξεπερνά, δηλαδή, το όριο των 50 °C. Πιο αποτελεσματικό από τα πειράματα 1,2,3,4 είναι ασφαλώς το πείραμα 3. Σε όλα τα πειράματα οι υψηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζονται στη λεπτή στρώση αλουμινίου κάτω από τους θερμαντήρες. Στο πείραμα 3 οι θερμοκρασίες αυτές παραμένουν εντός των επιτρεπτών ορίων.

Γ' περίπτωση

Τρία πειράματα (τα πειράματα 5,6,7) διεξήχθησαν στην τρίτη περίπτωση. Η τρίτη περίπτωση έχει την ιδιομορφία ότι η ισχύς και των τεσσάρων θερμαντήρων δεν είναι ίση. Σε αυτή την περίπτωση οι διαγώνιοι θερμαντήρες ανά δύο έχουν ίση ισχύ μεταξύ τους. Και στα τρία πειράματα οι θερμαντήρες 1 και 4 έχουν μεγαλύτερη ισχύ από τους θερμαντήρες 2 και 3. Αναλυτικά οι τιμές τους αναφέρονται στον πίνακα 2. Στο διάγραμμα 27 της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου συγκρίνεται η θερμοκρασία του σημείου J1 για τα τρία πειράματα 5,6,7.

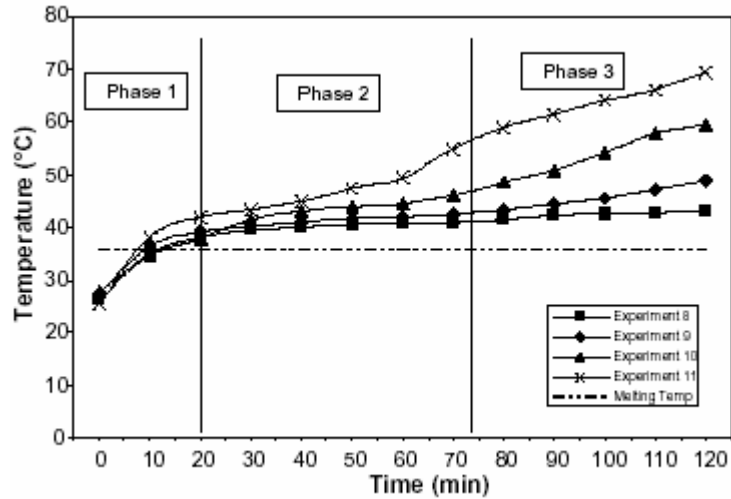


Διαγρ.27 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας του σημείου J1 για τα πειράματα 5, 6, 7

Παρατηρούμε ότι η φάση 1 ολοκληρώνεται για τα πειράματα 5 και 6 στο εικοστό λεπτό του πειράματος, ενώ για το πείραμα 7 στο δέκατο λεπτό. Η φάση 2 για τα πειράματα 5 και 6 διαρκεί 60 λεπτά, ενώ για το πείραμα 7 διαρκεί περίπου 70 λεπτά. Στη συνέχεια αρχίζει η φάση 3. Η τελική θερμοκρασία του σημείου J1 είναι για το πείραμα 5 οι 37°C, για το πείραμα 6 οι 42 °C και για το πείραμα 7 οι 55 °C. Παρατηρούμε ότι μετά από δύο ώρες λειτουργίας των θερμαντήρων στο πείραμα 7 η θερμοκρασία υπερβαίνει τα επιτρεπόμενα όρια.

Δ' περίπτωση

Σε αυτή την περίπτωση η ισχύς των θερμαντήρων 1, 2, 3 είναι ίση μεταξύ τους, ενώ η ισχύς του θερμαντήρα 4 είναι μεγαλύτερη. Σε αυτή την περίπτωση γίνονται τέσσερα πειράματα (πειράματα 8, 9, 10, 11). Στο διάγραμμα 28 παρουσιάζεται για τα τέσσερα πειράματα η διακύμανση της θερμοκρασίας στο σημείο J4.



Διαγρ.28 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας του σημείου J4 για τα πειράματα 8, 9, 10, 11

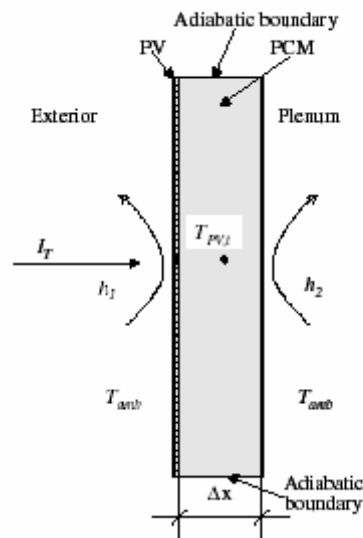
Παρατηρούμε ότι στα πειράματα 10 και 11 ξεπερνάται το όριο της επιτρεπόμενης θερμοκρασίας. Αντίθετα στα πειράματα 8 και 9 η θερμοκρασία παραμένει εντός των επιθυμητών ορίων.

Από τα παραπάνω οι ερευνητές του πανεπιστημίου της Σιγκαπούρης συμπέραναν ότι με την κατάλληλη εισαγωγή υλικών αλλαγής φάσης σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα, μπορεί να διατηρηθεί η θερμοκρασία τους εντός επιτρεπτών ορίων και να αποφευχθεί η υπερθέρμανση.

6. ΛΟΙΠΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

6.1 εφαρμογές PCM σε φωτοβολταϊκά πλαίσια

Έχει παρατηρηθεί, ότι λόγω των υψηλών θερμοκρασιών σε κτήρια, όπου γίνεται χρήση φωτοβολταϊκών, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται με αρκετές απώλειες. Κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει σχεδιαστεί για να εργάζεται υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Μια χαρακτηριστική τιμή θερμοκρασίας είναι οι 25°C. Όταν η πραγματική θερμοκρασία ξεπεράσει αυτή την τιμή, η απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μειώνεται κατά 0.5%K⁻¹. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα κρίθηκε απαραίτητη η εισαγωγή PCM. Οι επιστήμονες M. J. Huang και P.C. Eames ενσωμάτωσαν PCM σε φωτοβολταϊκά στοιχεία PV με τρεις διαφορετικούς τρόπους (σε τρία διαφορετικά πλαίσια αλουμινίου) και στη συνέχεια συνέκριναν τα αποτελέσματα. Στην παρακάτω εικόνα (σχήμα 52) μπορούμε να διακρίνουμε ένα τέτοιο σύστημα.



Σχ. 52 Συνδυασμός PCM και φωτοβολταϊκών

Στον πίνακα 24 εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά των τριών πλαισίων αλουμινίου (EA, EB, EC) που σχεδιάστηκαν για να υποδεχτούν τα PV/PCM. Τα πλαίσια PV/PCM ενισχύθηκαν επιπλέον ενδιάμεσα με πολύ λεπτές στρώσεις αλουμινίου για να αυξηθεί η θερμική αγωγιμότητα.

Πιν. 24 Χαρακτηριστικά τριών πλαισίων

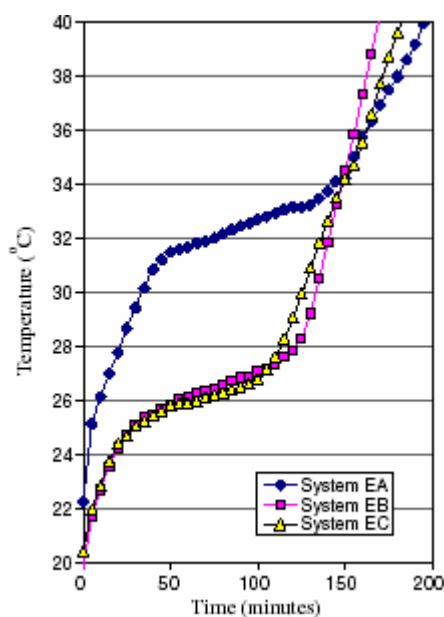
Πλαίσιο	Αριθμός στρώσεων αλουμινίου	Πάχος στρώσης αλουμινίου (m)	Μήκος στρώσης αλουμινίου (m)	Πλάτος στρώσης αλουμινίου (m)
EA	2	0.005	0.3	0.03
EB	32	0.0005	0.3	0.038
EC	26	0.007	0.3	0.04

Τα PCM που χρησιμοποιήθηκαν είναι το RT25 (στερεό-υγρό) ή το GR40 (στερεό-στερεό). Το RT25 είναι παραφίνη (κορεσμένοι υδρογονάνθρακες της μορφής C_nH_{2n+2}) και έχει σημείο τήξης $26.6^{\circ}C$. Το GR40 είναι μίγμα παραφίνης ($C_{20}H_{42}$) και ανόργανου διοξειδίου του θείου (SiO_2) και έχει σημείο τήξης τους $43.3^{\circ}C$. Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πιν.25 Ιδιότητες PCM

Ιδιότητες	RT25	GR 40
Πυκνότητα υγρού (kg/m^3)	785	-
Πυκνότητα στερεού (kg/m^3)	749	710
Θερμοχωρητικότητα υγρού (J/m^3K)	1413000	-
Θερμοχωρητικότητα στερεού (J/m^3K)	1797600	1065000
Θερμική αγωγιμότητα υγρού (W/mK)	0.19	-
Θερμική αγωγιμότητα στερεού (W/mK)	0.18	0.15
Θερμοκρασία τήξης ($^{\circ}C$)	26.6	43
Λανθάνουσα θερμότητα (J/kg)	232000	82000

Από την σύγκριση των τριών συστημάτων EA, EB, EC προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του PV/PCM πλαισίου σε συνάρτηση με το χρόνο (διάγραμμα 29). Η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι $23^{\circ}C$ και το PCM που χρησιμοποιήθηκε είναι το RT25.

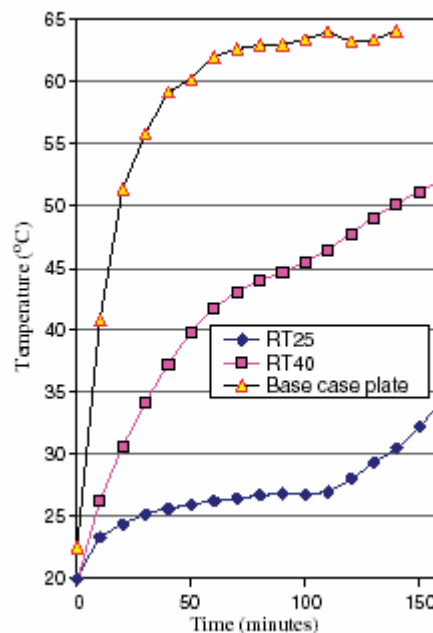


Διαγρ.29 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια των PV/PCM πλαισίων

Το σύστημα EA προσεγγίζει τους 30 °C στα 48 λεπτά λειτουργίας, το EB στα 140 λεπτά λειτουργίας, το EC στα 135 λεπτά λειτουργίας. Το πιο αποτελεσματικό σύμφωνα με το διάγραμμα 1 είναι το σύστημα EB, το οποίο διαθέτει περισσότερες στρώσεις αλουμινίου, άρα και μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα.

Σύγκριση των PCM RT25 και GR40

Από τη σύγκριση των δύο υλικών αλλαγής φάσης προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του PV/PCM πλαισίου-EB σε συνάρτηση με το χρόνο για το RT25 και το GR40 αντίστοιχα. Η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 23 °C.



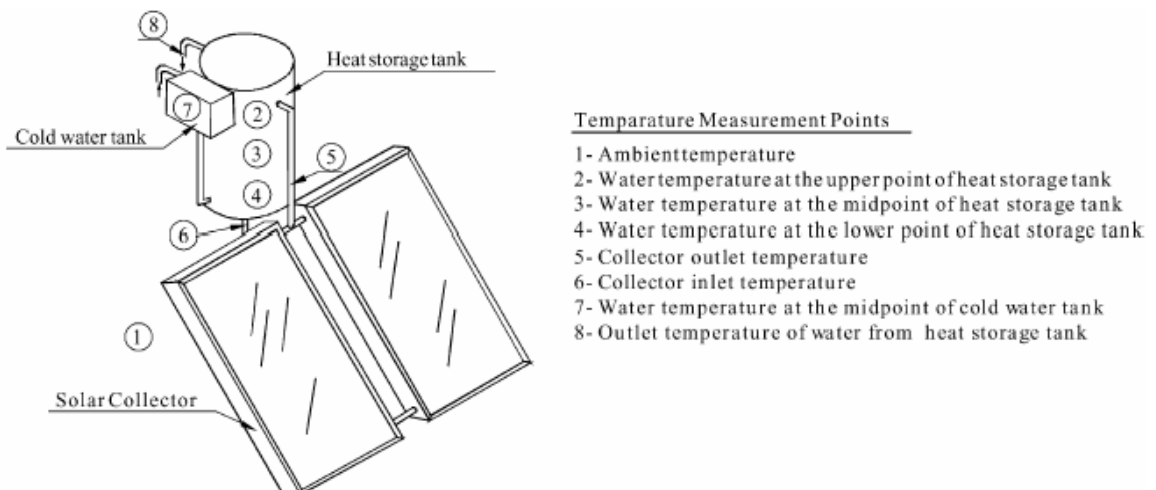
Διαγρ.30 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια PV/PCM πλαισίου-EB

Και τα δύο PV/PCM πλαίσια (EB) υπερτερούν έναντι ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου χωρίς PCM, το οποίο προσεγγίζει τους 30 °C από το πρώτο τέταρτο της λειτουργίας του, όπως φαίνεται από το διάγραμμα 2. Σύμφωνα με το ίδιο διάγραμμα, το RT25 κρίνεται καταλληλότερο για αυτή την εφαρμογή, αφού σε 150 λεπτά λειτουργίας προσεγγίζει τους 35°C, σε αντίθεση με το GR40 που στον ίδιο χρόνο αγγίζει τους 52 °C.

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι τα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν να περιορίσουν την θερμοκρασία στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών έτσι ώστε να βελτιώσουν τον βαθμό απόδοσής τους.

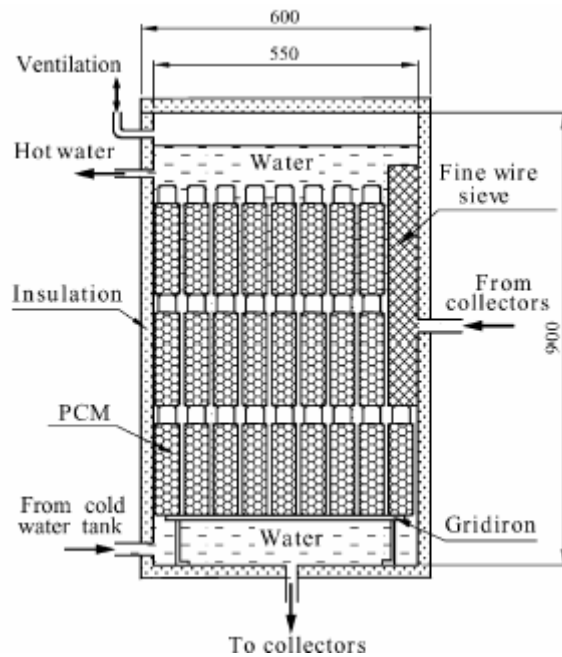
6.2 εφαρμογή PCM σε ηλιακό θερμοσίφωνα

Οι επιστήμονες S. Canbazoglu και F. Akarsu [19] μελετάνε την ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης σε έναν ηλιακό θερμοσίφωνα οικιακής χρήσης. Ο ηλιακός θερμοσίφωνας είναι φυσικής κυκλοφορίας, ανοιχτού βρόγχου και αποτελείται από ηλιακό συλλέκτη, από δεξαμενή αποθήκευσης νερού χωρητικότητας 190 λίτρων και από μία μικρότερη δεξαμενή κρύου νερού χωρητικότητας 18 λίτρων. Οι ηλιακοί συλλέκτες είναι νότιου προσανατολισμού με γωνία κλίσης 30° και έχουν διαστάσεις $1.94\text{m} \times 0.94\text{m} \times 0.10\text{m}$. Στη συνέχεια μετράται και καταγράφεται σε διαφορετικά σημεία του συστήματος η θερμοκρασία. Τα σημεία (σχήμα 53) αυτά είναι τα εξής: Η εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος, η θερμοκρασία του νερού στο άνω, στο μέσω και στο κάτω σημείο της δεξαμενής αποθήκευσης, η θερμοκρασία εξόδου του νερού από τη δεξαμενή αποθήκευσης, η θερμοκρασία του κρύου νερού στο μέσο της δεξαμενής κρύου νερού και η θερμοκρασία του νερού στην είσοδο και έξοδο των ηλιακών συλλεκτών. Η εγκατάσταση φαίνεται στη παρακάτω εικόνα.



Σχ.53 Ο θερμοσίφωνας ,ο ηλιακός συλλέκτης και τα σημεία μέτρησης της θερμοκρασίας

Το πείραμα έλαβε χώρα στην πόλη Malatya της Τουρκίας το μήνα Νοέμβριο, όπου η μέση ηλιακή ακτινοβολία ανά μέρα είναι 8.469 MJ/m^2 . Στη δεξαμενή ζεστού νερού για να επιτευχθεί η μόνωση χρησιμοποιούνται υαλοβάμβακες. Τα PCM ενσωματώνονται σε 245 ειδικά δοχεία χωρητικότητας 0.44 λίτρων και τοποθετούνται σε τρεις σειρές εσωτερικά της δεξαμενής. Κάθε τέτοιο δοχείο περιλαμβάνει PCM μάζας 0.737 kg, ενώ η συνολική μάζα τους είναι 180 kg. Τα υλικά αλλαγής φάσης καταλαμβάνουν συνολικό όγκο 107.8 λίτρων. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η τομή της δεξαμενής ζεστού νερού.



Σχ. 54 τομή δεξαμενής νερού

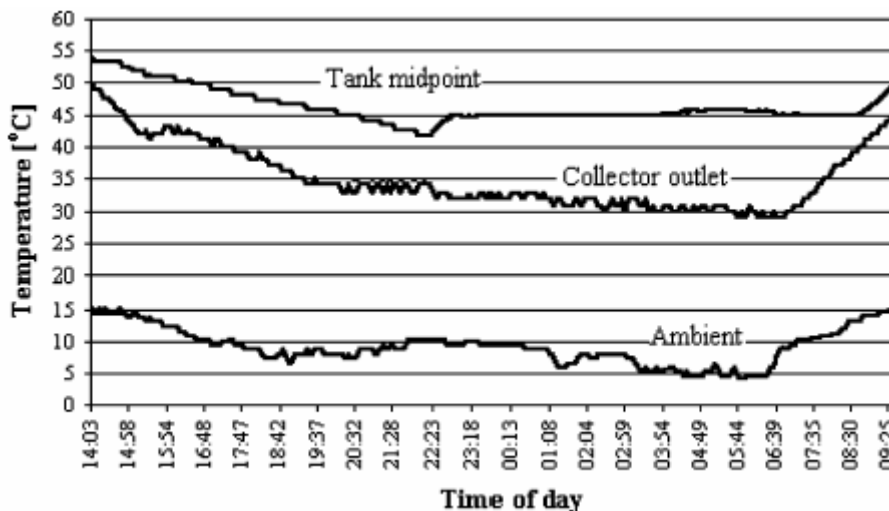
Τα υποψήφια υλικά αλλαγής φάσης είναι τα εξής ένυδρα άλατα:
 $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $Na_2S_2O_3 \cdot 5 H_2O$, $Na_2PO_4 \cdot 12H_2O$, $CaCl_2 \cdot 6H_2O$, $Na_2 SO_4 \cdot 10H_2O$.

Πιν. 26 Ιδιότητες PCM

Ένυδρα άλατα	T_m (°C)	Λανθάνουσα θερμότητα (kJ/kg)	Πυκνότητα (kg/m ³)
$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	36.1	146.95	1954
$Na_2S_2O_3 \cdot 5 H_2O$	48.5	208.80	1666
$Na_2PO_4 \cdot 12H_2O$	35.0	278.84	1522
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	29.7	169.98	1560
$Na_2 SO_4 \cdot 10H_2O$	32.4	254.00	1458

Τελικά επιλέγεται το $Na_2 SO_4 \cdot 10H_2O$, γνωστό ως άλας του Glauber.

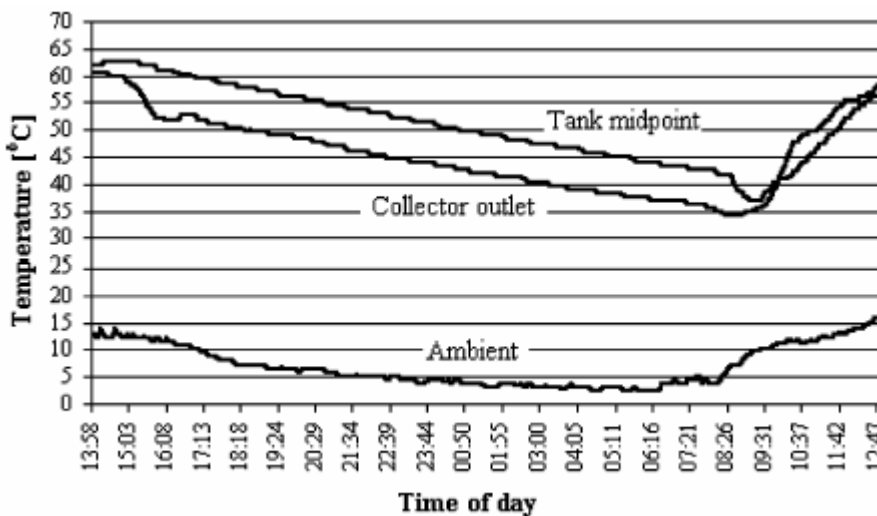
Στη συνέχεια γίνεται η σύγκριση μεταξύ της δεξαμενής αποθήκευσης με PCM και μιας συμβατικής αποθήκευσης. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η μέση ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, της θερμοκρασίας του νερού στο μέσο της δεξαμενής αποθήκευσης και της θερμοκρασίας του νερού στην έξοδο του συλλέκτη κατά το πρώτο δεκαήμερο του Νοεμβρίου για ένα σύστημα που περιλαμβάνει PCM.



διαγρ. 31 Χρονική μεταβολή θερμοκρασίας για θερμοσίφωνα με PCM

Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία του νερού στο μέσον της δεξαμενής αποθήκευσης πέφτει μέχρι να προσεγγίσει τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης του PCM, όπου έχουμε αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας. Μόλις προσεγγίσει τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή για 10 ώρες. Η μέση ημερήσια θερμοκρασία του νερού εξόδου από τον συλλέκτη είναι 32°C.

Το αντίστοιχο διάγραμμα για συμβατική δεξαμενή αποθήκευσης δίχως PCM φαίνεται παρακάτω.



διαγρ. 32 Χρονική μεταβολή θερμοκρασίας για θερμοσίφωνα χωρίς PCM

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε αποθήκευση αισθητής θερμότητας. Στο διάγραμμα φαίνεται ότι η θερμοκρασία του νερού στη δεξαμενή αποθήκευσης, καθώς και στην έξοδο του συλλέκτη μειώνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας μέχρι την ανατολή του ηλίου.

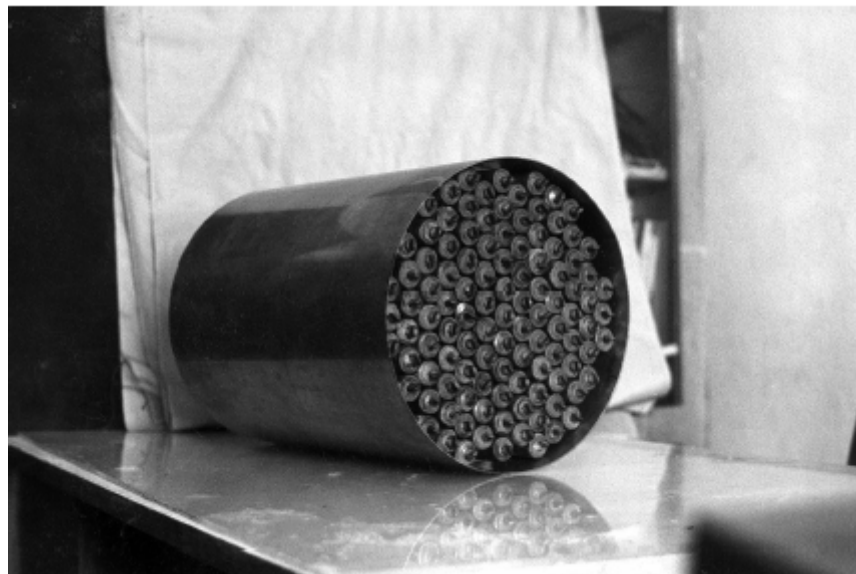
Το βασικό προτέρημα της δεξαμενής με PCM έναντι της συμβατικής είναι ότι μπορεί να διατηρεί τη θερμοκρασία του νερού στο μέσον της δεξαμενής σε σταθερή θερμοκρασία 45°C κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Επίσης παρατηρήθηκε ότι στη δεξαμενή με PCM η συνολική θερμότητα που συσσωρεύεται καθώς και η ποσότητα μάζας ζεστού νερού είναι 2.59-3.45 φορές μεγαλύτερες από συμβατικά συστήματα. Αυτό σημαίνει αυτόματα λιγότερη χρήση μονωτικού υλικού, άρα και μείωση κόστους.

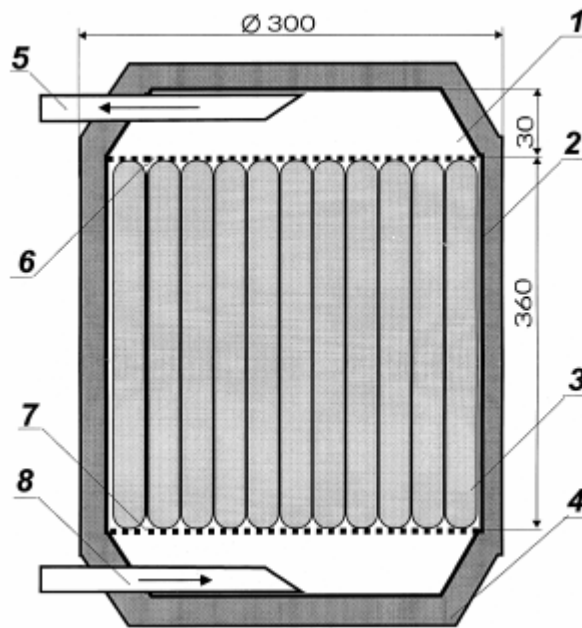
6.3 εφαρμογές PCM σε αυτοκίνητα

6.3.1 PCM για προθέρμανση κινητήρα αυτοκινήτου

Οι επιστήμονες Vasilien και Burak χρησιμοποιούν υλικά αλλαγής φάσης για την προθέρμανση της μηχανής εσωτερικής καύσης ενός αστικού λεωφορείου πριν την ανάφλεξη της. Κάτι που είναι πολύ χρήσιμο, ιδίως σε κρύα κλίματα με θερμοκρασίες υπό το μηδέν. Ύστερα από έρευνες κατέληξαν ότι τα κατάλληλα υλικά αλλαγής φάσης για τη παραπάνω εφαρμογή είναι τα εξής: $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ και το $\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Στην παρακάτω εφαρμογή οι επιστήμονες Vasilien και Burak χρησιμοποίησαν ως υλικά αλλαγής φάσης το $\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ με θερμοκρασία αλλαγής φάσης τους 64°C . Χρησιμοποιήθηκαν 21.8 kg PCM με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας ύψους 14 MJ, τα οποία τοποθετήθηκαν μέσα σε 109 λεπτούς σωλήνες διαμέτρου 25 mm (σχήμα 55) . Στη συνέχεια οι σωλήνες τοποθετήθηκαν μέσα σε κύλινδρο ύψους 470 mm και διαμέτρου 300 mm (σχήμα 56).

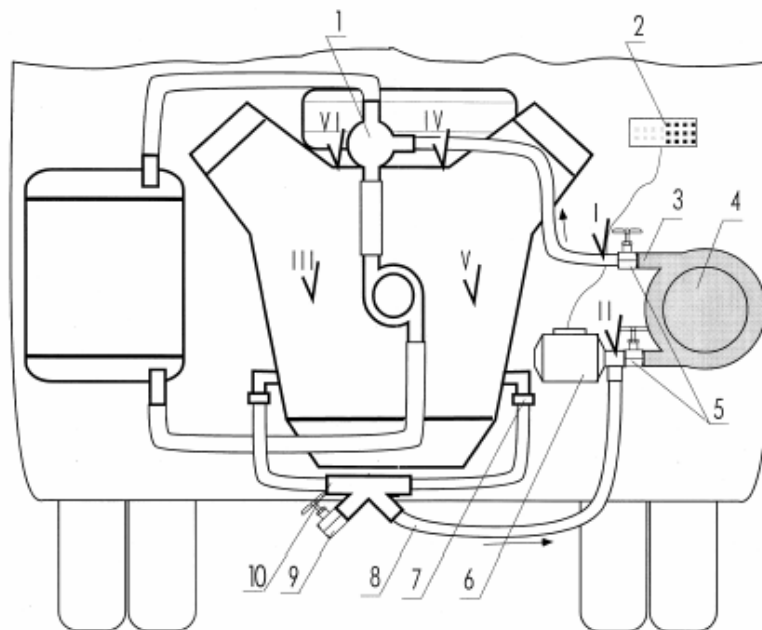


Σχ. 55 κύλινδρος σωλήνες με PCM



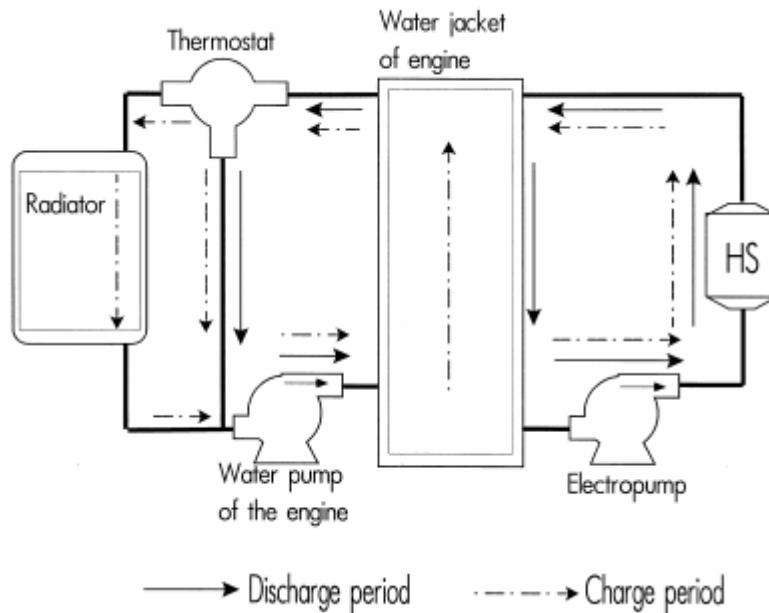
Σχ.56 κύλινδρος αποθήκευσης θερμότητας
 (1) κάλυμμα, (2) κύλινδρος, (3) σωλήνες με το PCM, (4) μόνωση, (5) σωλήνας εξόδου, (6,7) άνοιγμα (8) το σωλήνα εξόδου.

Ο κινητήρας του λεωφορείου με εγκατεστημένο το κύλινδρο με τα υλικά αλλαγής φάσης εικονίζεται στο σχήμα 57.



Σχ.57 κινητήρας αυτοκινήτου (1) θερμοστάτης, (2) πίνακας ελέγχου αντλίας , (3) σωλήνας εξόδου από κύλινδρο αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (4) κύλινδρος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, (5) βαλβίδες, (6) αντλία, (7) ένωση, (8) σωλήνας εισόδου από κύλινδρο αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, (9) σωλήνας εξόδου αποστράγγισης.

Ως μέσο μεταφοράς θερμότητας οι επιστήμονες χρησιμοποίησαν αντίψυκτικό υγρό που ανακυκλώνεται με ρυθμό 15 lt/min. Στο σχήμα 58 φαίνεται η πορεία του μέσου μεταφοράς θερμότητας κατά την φόρτιση και αποφόρτιση του PCM.



Σχ.58 η πορεία του μέσου μεταφοράς θερμότητας κατά την φόρτιση και αποφόρτιση του PCM

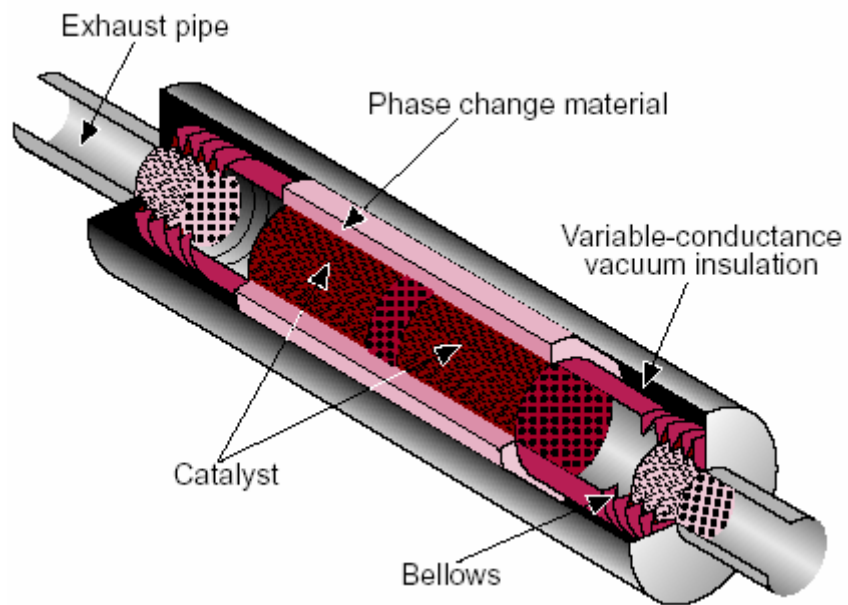
Παρατηρούμε ότι η εισαγωγή υλικών αλλαγής φάσης σε μηχανές εσωτερικής καύσης παίζουν διπλό ρόλο. Κατά τη λειτουργία της μηχανής, όπου αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες, αποθηκεύουν θερμότητα, φορτίζονται δηλαδή, με αποτέλεσμα να συντελούν στην αποφυγή της υπερθέρμανσης της μηχανής. Όταν η μηχανή σταματήσει να λειτουργεί και η θερμοκρασία της μειωθεί, τα υλικά αλλαγής φάσης απελευθερώνουν θερμότητα, αποφορτίζονται δηλαδή, με αποτέλεσμα η μηχανή να διατηρείται ζεστή, έτσι ώστε να μπορεί «ξενατάρει εύκολα εμπρός».

6.3.2 PCM σε καταλύτη αυτοκινήτου

Ο καταλύτης έχει ως στόχο να εξαλείφει τους υδρογονάνθρακες και τους υπόλοιπους ρυπαντές από τα καυσαέρια του αυτοκινήτου. Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει η θερμοκρασία του καταλύτη να είναι πολύ υψηλή, δηλαδή γύρω στους 300 °C. Αυτή όμως η θερμοκρασία δεν αναπτύσσεται αμέσως κατά την εκκίνηση του αυτοκινήτου στον καταλύτη, αλλά μετά από λίγα λεπτά. Έχει παρατηρηθεί ότι κατά την περίοδο της «κρύας εκκίνησης» εκλύεται το 60%-80% των τοξικών καυσερίων.

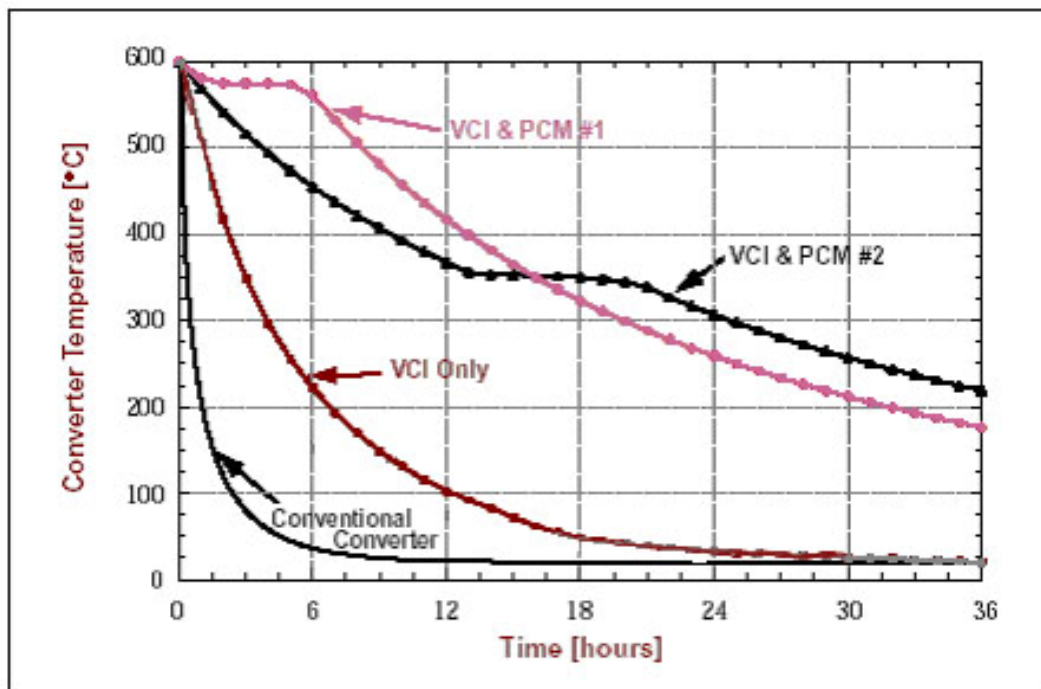
Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, το εθνικό εργαστήριο ανανεώσιμης ενέργειας των Η.Π.Α N.R.E.L (National renewable Energy Laboratory) εισήγαγε στον καταλύτη υλικά αλλαγής φάσης, με σκοπό να αποθηκεύουν θερμότητα κατά την κίνηση του αυτοκινήτου και να την απελευθερώνουν στην επόμενη εκκίνησή του. Για να είναι αποτελεσματικό

το εγχείρημά τους συνδύασαν τα υλικά αλλαγής φάσης με ειδική μόνωση. Ο καταλύτης λειτουργεί αποτελεσματικά με ελάχιστη θερμοκρασία στους 300 °C και μέγιστη στους 900 °C. Η μόνωση που χρησιμοποιήθηκε παίζει διπλό ρόλο: α) προστατεύει το σύστημα από απώλειες θερμότητας και β) εμποδίζει την υπερθέρμανση του συστήματος. Η μόνωση αποτελείται από διπλό μεταλλικό κάλυμμα, εντός του οποίου υπάρχουν ενώσεις υδρογόνου και μετάλλων. Το υδρογόνο αποτελεί καλό αγωγό της θερμότητας. Όταν η θερμοκρασία στον καταλύτη (σχήμα 59) αγγίζει τους 900 °C το υδρογόνο απελευθερώνεται με αποτέλεσμα να διαφεύγει θερμότητα, άρα και να αποφεύγεται η υπερθέρμανση. Η παραπάνω μόνωση ονομάζεται μόνωση μεταβλητής αγωγιμότητας και συμβολίζεται με V.C.I (Variable Conductance Insulation).



Σχ. 59 ο καταλύτης

Χρησιμοποιήθηκαν 2 kg PCM τα οποία, όπως φαίνεται και στην εικόνα, τοποθετούνται γύρω από τη μόνωση. Τα PCM που χρησιμοποιήθηκαν, είναι μίγματα εύτηκτων αλάτων και μετάλλων. Οι επιστήμονες πειραματίστηκαν με δύο PCM, το πρώτο (PCM#1) με σημείο τήξης στους 580 °C και το δεύτερο (PCM #2) τους 350 °C. Στη συνέχεια συνέκριναν τα δύο PCM και μεταξύ τους, και με έναν συμβατικό καταλύτη για να διαπιστώσουν, ποιο σύστημα μπορεί να διατηρήσει τη θερμοκρασία του μέσα στα επιτρεπόμενα όρια για περισσότερη ώρα μετά το «σβήσιμο» της μηχανής του αυτοκινήτου. Προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου:



Διαγρ.33 θερμοκρασίας - χρόνου

Παρατηρούμε ότι ο καταλύτης με τα υλικά αλλαγής φάσης υπερτερεί έναντι του συμβατικού. Ο συμβατικός καταλύτης προσεγγίζει την ελάχιστη θερμοκρασία (300 °C) μετά από μισή ώρα, ενώ ακατάλυτος με το PCM#1 μετά από 19 ώρες. Ακόμα πιο αποτελεσματικός είναι ο καταλύτης με το PCM#2 που προσεγγίζει τους 300 °C μετά από ένα 24ωρο. Ο καταλύτης με το PCM#2 εγκαταστήθηκε σε ένα αυτοκίνητο (Ford Taurus) (σχήμα 60).



Σχ. 60 φωτογραφία καταλύτη ενός Ford Taurus με PCM

Το αυτοκίνητο τέθηκε σε λειτουργία μετά από 24 ώρες από την προηγούμενη εκκίνησή του και μετρήθηκαν οι εκπομπές των καυσαερίων του. Διαπιστώθηκε ότι οι εκπομπές υδρογονανθράκων και μονοξειδίου του άνθρακα ήταν μειωμένες κατά 84% και 91% αντίστοιχα, συγκρινόμενες με τις εκπομπές ενός αυτοκινήτου με συμβατικό καταλύτη.

6.4 εφαρμογές PCM στα ρούχα

Τα υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιούνται και στα ρούχα. Η εισαγωγή τους σε ρούχα ξεκίνησε από διαστημικές εφαρμογές, στις στολές των αστροναυτών για τη προστασία τους από τις απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές. Σήμερα οι εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης στα ρούχα και γενικότερα στα υφάσματα έχουν επεκταθεί. Χρησιμοποιούνται σε στολές που εκτείθονται σε ακραίες θερμοκρασίες, όπως π.χ σε πυροσβεστικές ή ορειβατικές στολές. Η χρήση τους όμως έχει επεκταθεί και σε υφάσματα της καθημερινότητας, όπως κουβέρτες, κάλτσες, παπούτσια κλπ. Η εισαγωγή υλικών αλλαγής φάσης στα ρούχα έχει ως στόχο να παρέχουν θερμική άνεση, ομοιόμορφη κατανεμημένη θερμοκρασία και λιγότερο ιδρώτα. Ένα παράδειγμα για να κατανοήσουμε την αναγκαιότητα χρήσης των PCM στα ρούχα είναι το εξής: Όταν ένας σκιέρ πραγματοποιεί κατάβαση σε μία πλαγιά, το σώμα του θερμαίνεται και ιδρώνει. Όταν στη συνέχεια επιβιβαστεί στο ανσασέρ για να επιστρέψει στη κορυφή της πλαγιάς, βρίσκεται σε ακινησία, με αποτέλεσμα να κρυώνει. Επιπλέον ο ιδρώτας του έχει «παγιδευτεί» κάτω από τα ρούχα του με αποτέλεσμα να παγώνει. Το ίδιο συμβαίνει με έναν ορειβάτη, ο οποίος ανεβαίνει σε μία κορυφή και κάποια στιγμή σταματάει για να κολατσίσει. Το παραπάνω πρόβλημα αντιμετωπίζεται αν στο μπουφάν του σκιέρ ή του ορειβάτη τοποθετηθούν PCM. Όταν ο αθλητής είναι εν κινήσει και από το σώμα του αποβάλλεται θερμότητα μέσω του ιδρώτα, η θερμότητα αυτή μπορεί να αποθηκεύεται από τα υλικά αλλαγής φάσης και να απελευθερώνεται όταν ο αθλητής βρίσκεται σε ακινησία.

Η βασική εταιρία που δραστηριοποιείται στο χώρο των υφασμάτων, είναι η γερμανική εταιρία Outlast [37], που κατασκευάζει υφάσματα (κυρίως ορειβατικά ρούχα σχήμα 71) με ενσωματωμένα PCM και τα αποκαλεί με τον όρο «έξυπνα υφάσματα».



Σχ.71 ρούχα της εταιρίας Outlast

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Ακολουθούν μερικά διαγράμματα για διάφορες περιπτώσεις κτιρίων. Για τον καλοκαιρινό μήνα Ιούλιο με μέση εξωτερική θερμοκρασία 28.08 °C και πλάτος ταλάντωσης 10 °C, εξετάστηκε η συμπεριφορά κτηριακού κελύφους με και χωρίς PCM. Επίσης για δωμάτιο που διαθέτει σταθερό ψυκτικό φορτίο (κλιματισμό) για κτηριακό κέλυφος με και χωρίς PCM.

Αντίστοιχες περιπτώσεις εξετάστηκαν και για έναν υποθετικό χειμερινό μήνα με μέση εξωτερική θερμοκρασία 5 °C και πλάτος ταλάντωσης 5 °C. Εξετάστηκε η συμπεριφορά κτηριακού κελύφους με και χωρίς PCM. Επίσης εξετάστηκε η συμπεριφορά του κτηριακού κελύφους με και χωρίς PCM στην περίπτωση που το δωμάτιο διαθέτει σταθερό θερμικό φορτίο (καλοριφέρ).

Το σταθερό φορτίο Q υπολογίζεται από τη σχέση: $Q = UA(T_{\text{ΤΕΛΙΚΗ}} - T_{\text{ΑΡΧΙΚΗ}})$, όπου U η ολική θερμική διαπερατότης του κτηρίου σε W/m^2K ($U=0.5W/m^2K$), A η ολική επιφάνεια του κτηρίου σε m^2 (για το δωμάτιο που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική, διαστάσεων $4 \times 5 \times 3 m^3$, $A = [2(3 \times 4 + 3 \times 5) + 4 \times 5]m^2 = 74m^2$), $T_{\text{ΤΕΛΙΚΗ}}$, $T_{\text{ΑΡΧΙΚΗ}}$ η τελική και η αρχική θερμοκρασία σε °C αντίστοιχα.

Σε αυτό το σημείο υπενθυμίζεται ότι σε κάθε περίπτωση που εξετάζεται, οι εξωτερικοί τοίχοι αποτελούνται από τα εξής στρώματα: επίχρισμα, τούβλο, θερμομόνωση, PCM, επίχρισμα. Η οροφή αποτελείται από τα εξής στρώματα: επίχρισμα, σκυρόδεμα, θερμομόνωση, PCM, επίχρισμα. Στις περιπτώσεις κτηριακού κελύφους χωρίς PCM, η μόνη διαφορά είναι ότι απουσιάζει η στρώση του PCM από τους εξωτερικούς τοίχους και την οροφή.

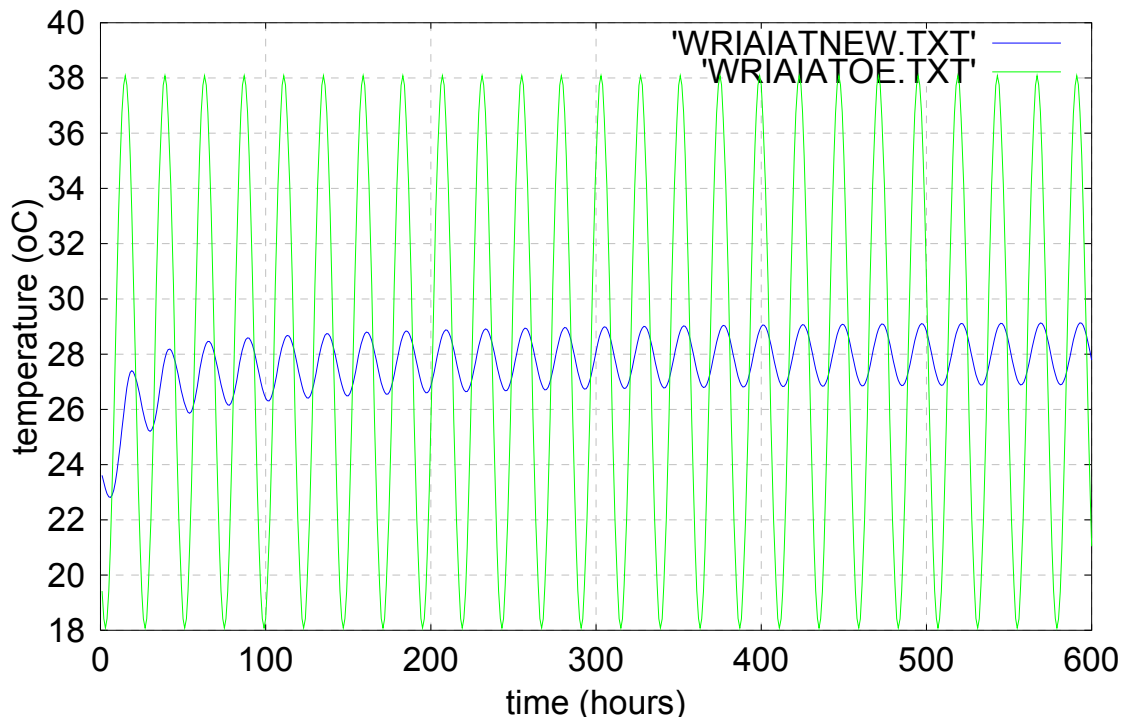
Σημειώνεται ότι για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται δύο διαγράμματα: α) ένα διάγραμμα, στο οποίο παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα και η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του δωματίου συναρτήσει του χρόνου και β) το ίδιο διάγραμμα για χρονική διάρκεια 50 ωρών, με σκοπό να φανεί καλύτερα η διαφορά φάσης εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας.

7.1 Καλοκαιρινός μήνας με μέση εξωτερική θερμοκρασία 28.08 °C

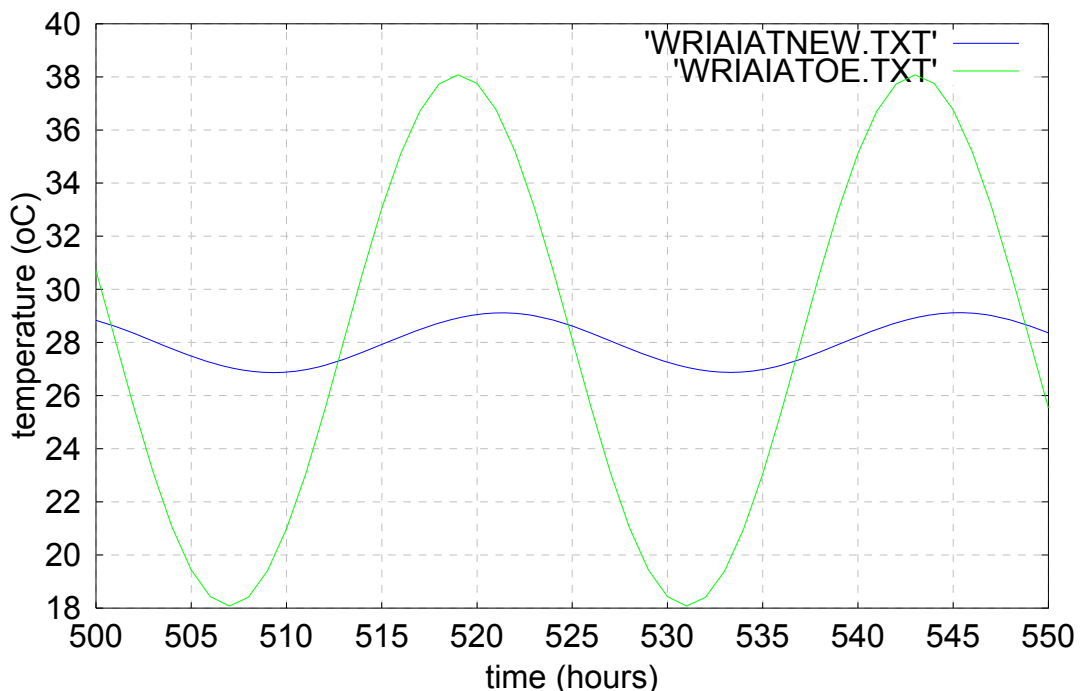
7.1.1 Πρώτη περίπτωση: κτηριακό κέλυφος με PCM με σημείο τήξης $T_m=28^\circ C$:

Από το πρώτο διάγραμμα (διάγραμμα 1) παρατηρούμε ότι η μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι μια ταλάντωση, που ξεκινά από τους 23.7 °C ($T_{\text{ΙΤΟ}}=24$) και αυξάνεται σταδιακά μέχρι την 17^η ώρα, όπου συγκλίνει στη μόνιμη κατάσταση. Η μόνιμη κατάσταση έχει μέση θερμοκρασία 28.01 °C (σχεδόν ίση με τη μέση εξωτερική θερμοκρασία), μέγιστη θερμοκρασία 29.13 °C, ελάχιστη θερμοκρασία 26.89 °C και πλάτος ταλάντωσης 1.12 °C.

Από το δεύτερο διάγραμμα (διάγραμμα 2) παρατηρούμε ότι μεταξύ εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας υπάρχει διαφορά φάσης 2 ωρών.



Διάγραμμα 1. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος με PCM ($T_m=28^{\circ}\text{C}$)

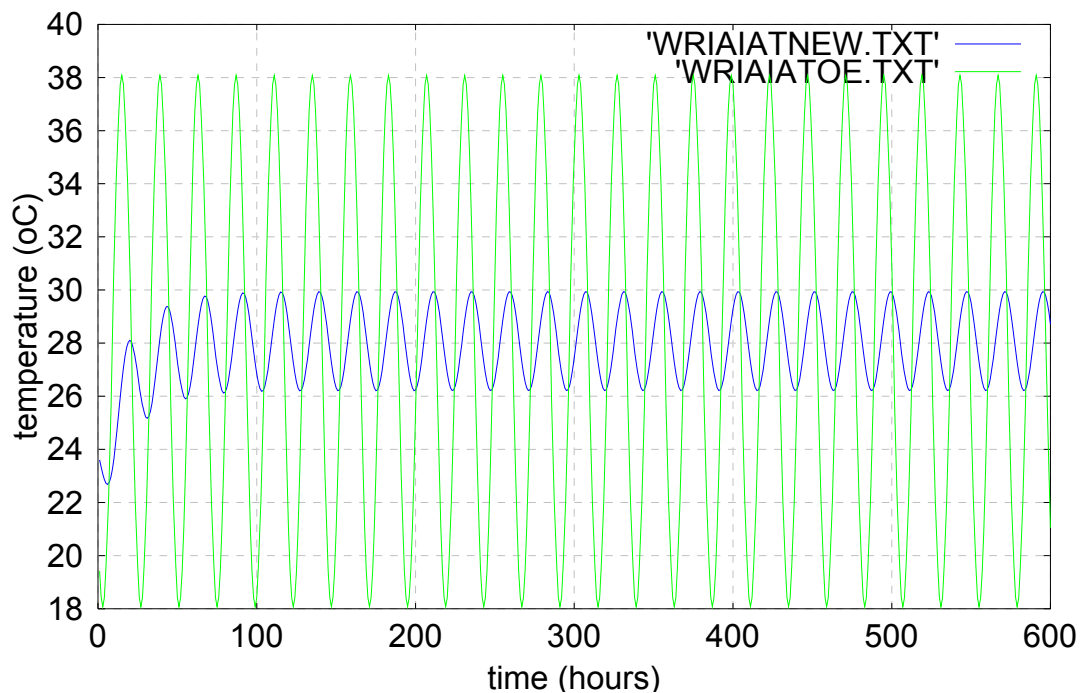


Διάγραμμα 2. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος με PCM ($T_m=28^{\circ}\text{C}$) στη διάρκεια 50 ωρών

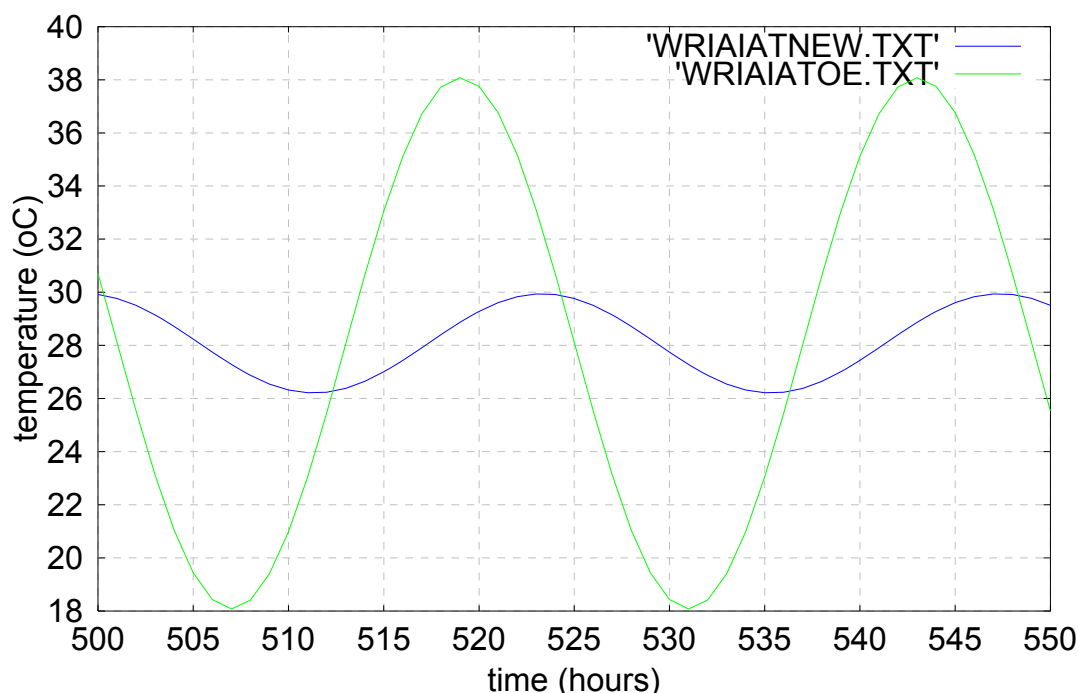
7.1.2 Δεύτερη περίπτωση: κτηριακό κέλυφος χωρίς PCM

Από το διάγραμμα 3 παρατηρούμε ότι η μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι μια ταλάντωση, που ξεκινά από τους 23.7 °C (ΤΙΤΟ=24) και αυξάνεται σταδιακά μέχρι την 79^η ώρα, όπου συγκλίνει στη μόνιμη κατάσταση. Η μόνιμη κατάσταση έχει μέση θερμοκρασία 28.07 °C (σχεδόν ίση με τη μέση εξωτερική θερμοκρασία), μέγιστη θερμοκρασία 29.93 °C, ελάχιστη θερμοκρασία 26.21 °C και πλάτος ταλάντωσης 1.86 °C.

Από το διάγραμμα 4 παρατηρούμε ότι μεταξύ εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας υπάρχει διαφορά φάσης 4 ωρών.



Διάγραμμα 3. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος χωρίς PCM



Διάγραμμα 4. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κελύφος χωρίς PCM στη διάρκεια 50 ωρών

7.1.3 Σύγκριση κτηριακού κελύφους με και χωρίς PCM (διάγραμμα 4α)

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα (διάγραμμα 4α) των παρατηρήσεων για κτηριακό κελύφος με και χωρίς υλικά αλλαγής φάσης, καταλήγουμε στα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Το πλάτος της ταλάντωσης της εσωτερικής θερμοκρασίας στο κτηριακό κελύφος με PCM είναι μικρότερο από το πλάτος της ταλάντωσης της εσωτερικής θερμοκρασίας στο κτηριακό κελύφος χωρίς PCM.

Αυτό είναι λογικό. Καθώς η εσωτερική θερμοκρασία του κτηριακού κελύφους με PCM ανεβαίνει, μόλις αγγίξει τους 28 °C (σημείο τήξης PCM), το υλικό αλλαγής φάσης αποθηκεύει θερμότητα, με αποτέλεσμα να εμποδίζει την άνοδο της θερμοκρασίας. Αντίστοιχα, καθώς η εσωτερική θερμοκρασία του κτηριακού κελύφους με PCM κατεβαίνει, μόλις αγγίξει τους 28 °C, το υλικό αλλαγής φάσης απελευθερώνει θερμότητα, με αποτέλεσμα να εμποδίζει την κάθοδο της θερμοκρασίας. Το κτηριακό κελύφος με PCM διαθέτει, δηλαδή, λανθάνουσα θερμότητα στους 28°C κατά την οποία αποθηκεύεται ή απελευθερώνεται θερμότητα ισοθερμοκρασιακά, με αποτέλεσμα να μην «φαίνεται» μεταβολή στη θερμοκρασία. Αντίθετα, το κτηριακό κελύφος χωρίς PCM διακρίνεται από αισθητή θερμότητα, η οποία «φαίνεται». Συνοπτικά μπορούμε να πούμε ότι το κτηριακό κελύφος με PCM διαθέτει εξαιτίας της λανθάνουσας θερμότητας μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα έναντι του συμβατικού κτηριακού κελύφους και αυτός είναι ο λόγος στον οποίο βασίζεται το πρώτο συμπέρασμα.

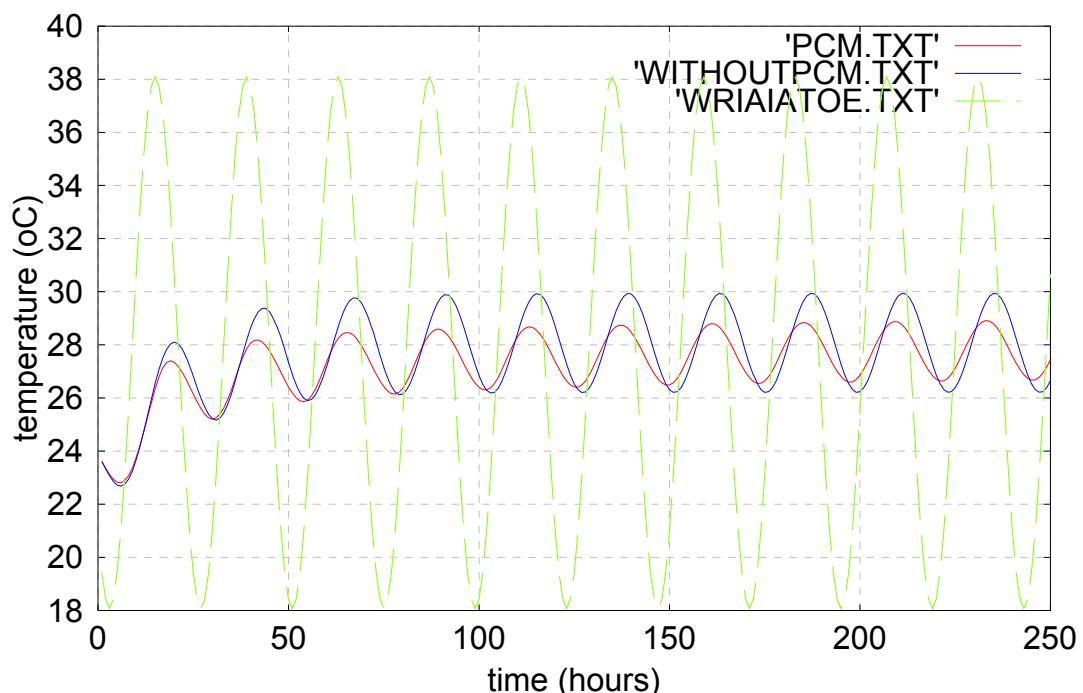
2. Η εσωτερική θερμοκρασία στο κτηριακό κελύφος με PCM συγκλίνει πιο αργά και πιο σταδιακά στη μόνιμη κατάσταση σε σύγκριση με

την εσωτερική θερμοκρασία του κτηριακού κελύφους χωρίς PCM που συγκλίνει πιο γρήγορα και απότομα.

Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη μάζα και στη μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα, δηλαδή στη μεγαλύτερη ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας του κτηρίου με PCM, έναντι του κτηρίου χωρίς PCM. Θα καταλήγαμε σε ανάλογο συμπέρασμα, αν συγκρίναμε ένα συμβατικό κτήριο χωρίς εσωτερικούς τοίχους και επίπλωση με ένα συμβατικό κτήριο με εσωτερικούς τοίχους και επίπλωση. Δηλαδή η εσωτερική θερμοκρασία του κτηρίου με επίπλωση και εσωτερικούς τοίχους θα συνέκλινε πιο αργά.

3. Στο κτηριακό κέλυφος με PCM παρατηρούμε ότι η διαφορά φάσης μεταξύ εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας είναι μικρότερη της διαφοράς φάσης εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας κτηριακού κελύφους χωρίς PCM.

Αυτό συμβαίνει για τον εξής λόγο: Το κτηριακό κέλυφος με PCM διαθέτει μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα από το συμβατικό κτηριακό κέλυφος. Αυτό συνεπάγεται ότι ο ρυθμός με τον οποίο απορροφά ή αποβάλλει θερμότητα το κτηριακό κέλυφος με PCM είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό με τον οποίο απορροφά ή αποβάλλει θερμότητα το συμβατικό κτηριακό κέλυφος. Άρα το κτηριακό κέλυφος με PCM ακολουθεί πιο γρήγορα τις διακυμάνσεις της εξωτερικής θερμοκρασίας.

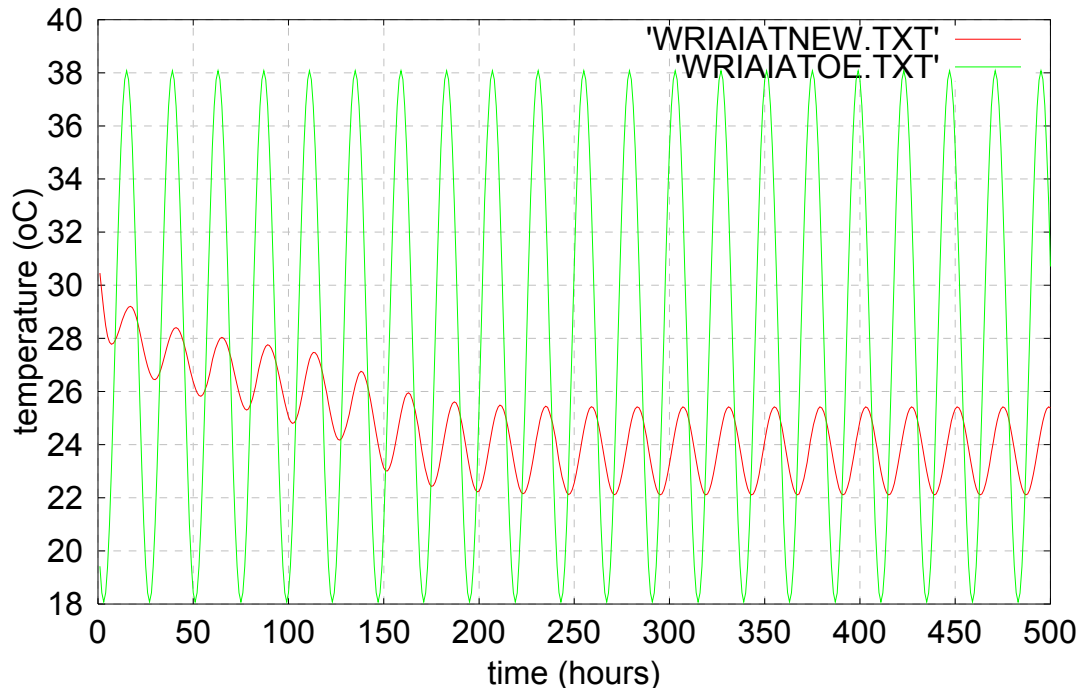


διαγρ.4α Χρονική μεταβολή της εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος με και χωρίς PCM

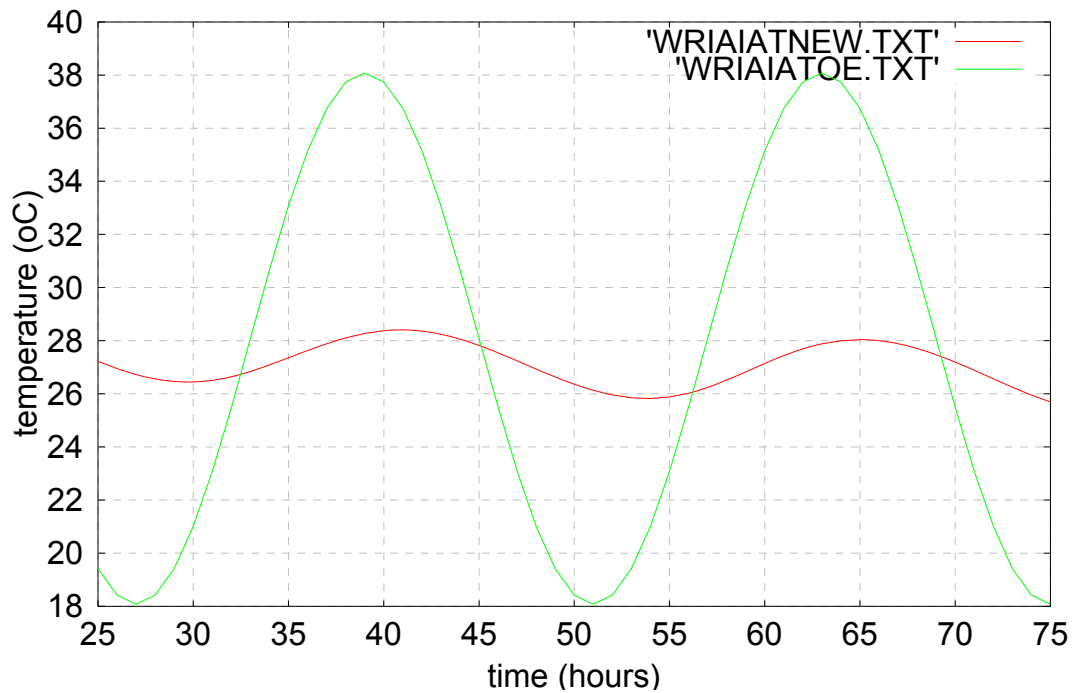
7.1.4 Τρίτη περίπτωση: κτηριακό κέλυφος με PCM (σημείο τήξης $T_m=28$ °C) και με ψυκτικό φορτίο ($Q = -270W$):

Από το διάγραμμα 5 παρατηρούμε ότι η μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι μια ταλάντωση, που ξεκινάει από τους 30.3 °C ($T_{ITO}=32^\circ\text{C}$) και φθίνει σταδιακά. Επίσης παρατηρούμε ότι καθώς η εσωτερική θερμοκρασία μειώνεται και προσεγγίζει τους 28 °C, το πλάτος της ταλάντωσης είναι 0.98 °C, το οποίο όσο απομακρυνόμαστε από τους 28 °C αυξάνει. Την 200^η ώρα, όπου η εσωτερική θερμοκρασία συγκλίνει στη μόνιμη κατάσταση, αποκτά πλάτος ταλάντωσης 1.66 °C. Η μόνιμη κατάσταση έχει μέση θερμοκρασία 23.76°C, μέγιστη θερμοκρασία 25.42°C και ελάχιστη θερμοκρασία 22.10°C. Ο λόγος που το πλάτος ταλάντωσης κοντά στους 28 °C είναι μικρότερο και αυξάνεται σταδιακά καθώς απομακρυνόμαστε, είναι η διαφορετική θερμοχωρητικότητα που χαρακτηρίζει την περιοχή της μη μόνιμης και μόνιμης κατάστασης. Δηλαδή: Στους 28 °C είναι το σημείο τήξης του PCM, άρα σε εκείνο το σημείο το κτηριακό κέλυφος διακρίνεται από μεγάλη θερμοχωρητικότητα εξαιτίας της λανθάνουσας θερμότητας. Όταν η εσωτερική θερμοκρασία προσεγγίσει τη μόνιμη κατάσταση με μέση θερμοκρασία $23.76^\circ\text{C} < 28$ °C, το PCM του κτηριακού κελύφους «δουλεύει» σε στερεό (αισθητή θερμότητα). Άρα διαθέτει μικρότερη θερμοχωρητικότητα.

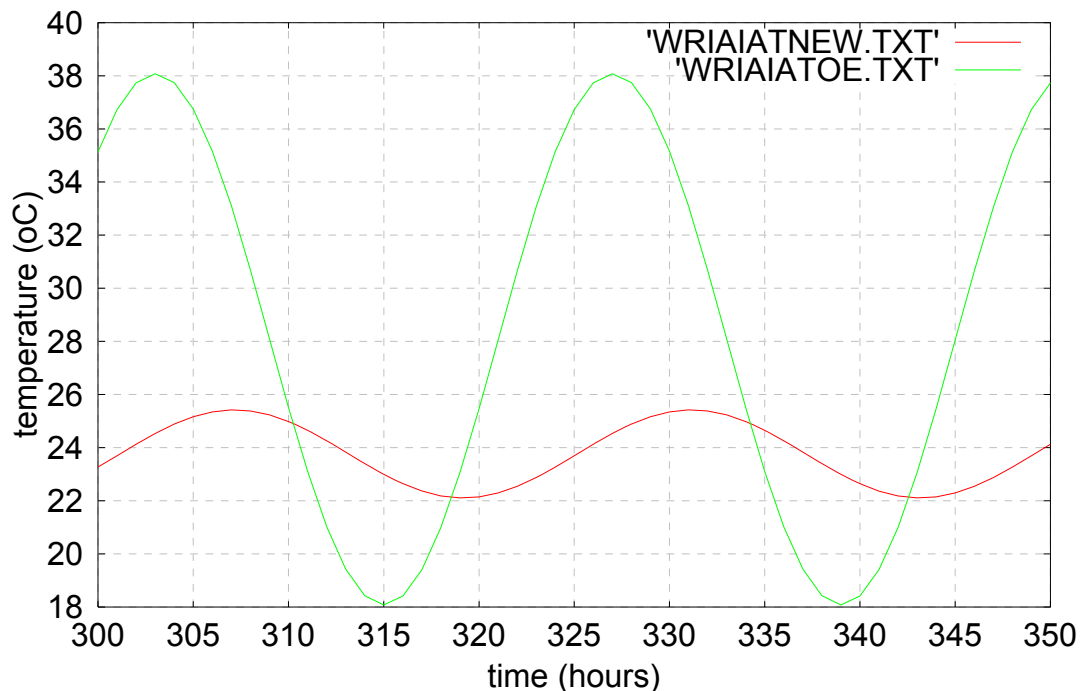
Από το διάγραμμα 6 φαίνεται ότι η διαφορά φάσης εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας τις πρώτες ώρες (25^η-75^η ώρα) είναι 2 ώρες . Αντίστοιχα, από το διάγραμμα 7 φαίνεται ότι η διαφορά φάσης εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας τις ώρες 300-350 (όπου η εσωτερική θερμοκρασία είναι στη μόνιμη κατάσταση) είναι 4 ώρες . Αυτό συμβαίνει για τον εξής λόγο: Τις πρώτες ώρες η εσωτερική θερμοκρασία κυμαίνεται κοντά στη θερμοκρασία τήξης του PCM . Το PCM βρίσκεται στη μεταβατική κατάσταση από υγρό σε στερεό, με αποτέλεσμα να διακρίνεται από μεγάλη θερμοχωρητικότητα. Εξαιτίας της μεγάλης θερμοχωρητικότητας το κτηριακό κέλυφος με PCM αποβάλλει θερμότητα με μεγάλο ρυθμό, με αποτέλεσμα η εσωτερική θερμοκρασία να ακολουθεί πιο γρήγορα τις διακυμάνσεις της εξωτερικής θερμοκρασίας. Αντίθετα τις ώρες 300-350, όπου η εσωτερική θερμοκρασία είναι στη μόνιμη κατάσταση, το PCM έχει στερεοποιηθεί και το κτηριακό κέλυφος με PCM διακρίνεται από μικρότερη θερμοχωρητικότητα με αποτέλεσμα να ακολουθεί πιο αργά τις διακυμάνσεις της εξωτερικής θερμοκρασίας.



Διάγραμμα 5. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος με PCM ($T_m=28\text{ }^\circ\text{C}$) και ψυκτικό φορτίο.



Διάγραμμα 6. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος με PCM ($T_m=28\text{ }^\circ\text{C}$) και με ψυκτικό φορτίο στη διάρκεια των ωρών 25-75

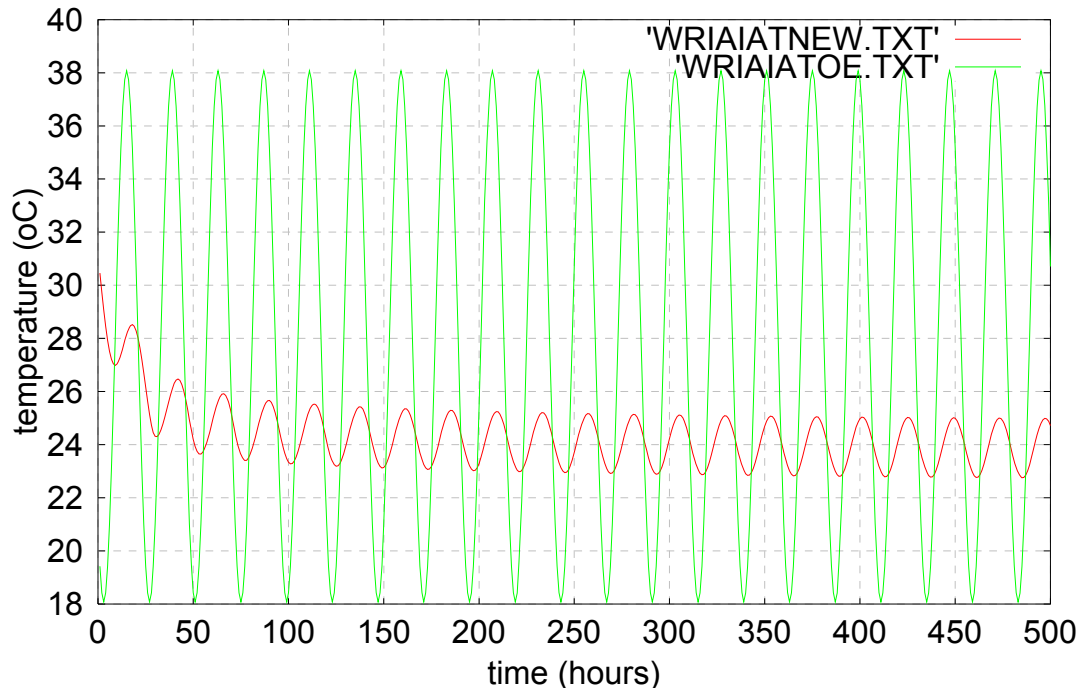


Διάγραμμα 7. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος με PCM ($T_m=28\text{ }^\circ\text{C}$) και με ψυκτικό φορτίο στη διάρκεια των ωρών 300-350

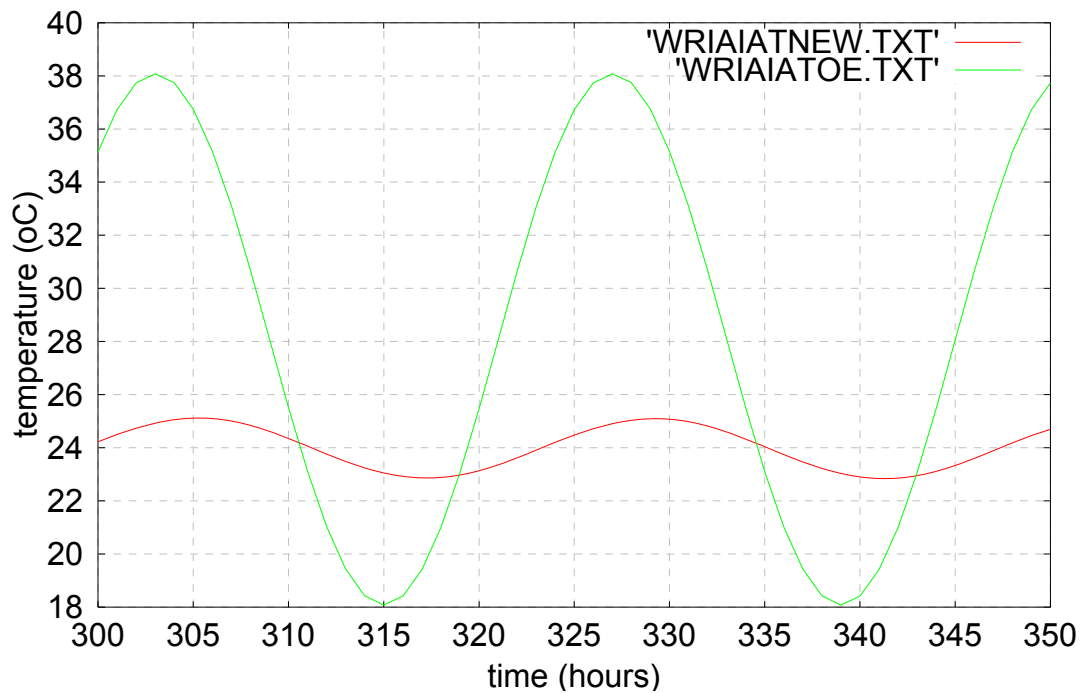
7.1.5 Τέταρτη περίπτωση: κτηριακό κέλυφος με PCM (σημείο τήξης $T_m=24\text{ }^\circ\text{C}$) και με ψυκτικό φορτίο ($Q=-270\text{W}$):

Από το διάγραμμα 8 παρατηρούμε ότι η μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι μια ταλάντωση, που ξεκινάει από τους $30.3\text{ }^\circ\text{C}$ ($T_{ITO}=32\text{ }^\circ\text{C}$) και φθίνει σταδιακά μέχρι την 126^η ώρα, όπου συγκλίνει στη μόνιμη κατάσταση. Η μόνιμη κατάσταση έχει μέση θερμοκρασία $23.63\text{ }^\circ\text{C}$, μέγιστη θερμοκρασία $25.05\text{ }^\circ\text{C}$, ελάχιστη θερμοκρασία $22.22\text{ }^\circ\text{C}$ και πλάτος ταλάντωσης $1.12\text{ }^\circ\text{C}$.

Από το διάγραμμα 9 φαίνεται ότι η διαφορά φάσης εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας τις ώρες 300-350 (όπου η εσωτερική θερμοκρασία είναι στη μόνιμη κατάσταση) είναι 2 ώρες .



Διάγραμμα 8. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος με PCM ($T_m=24\text{ }^\circ\text{C}$) και ψυκτικό φορτίο

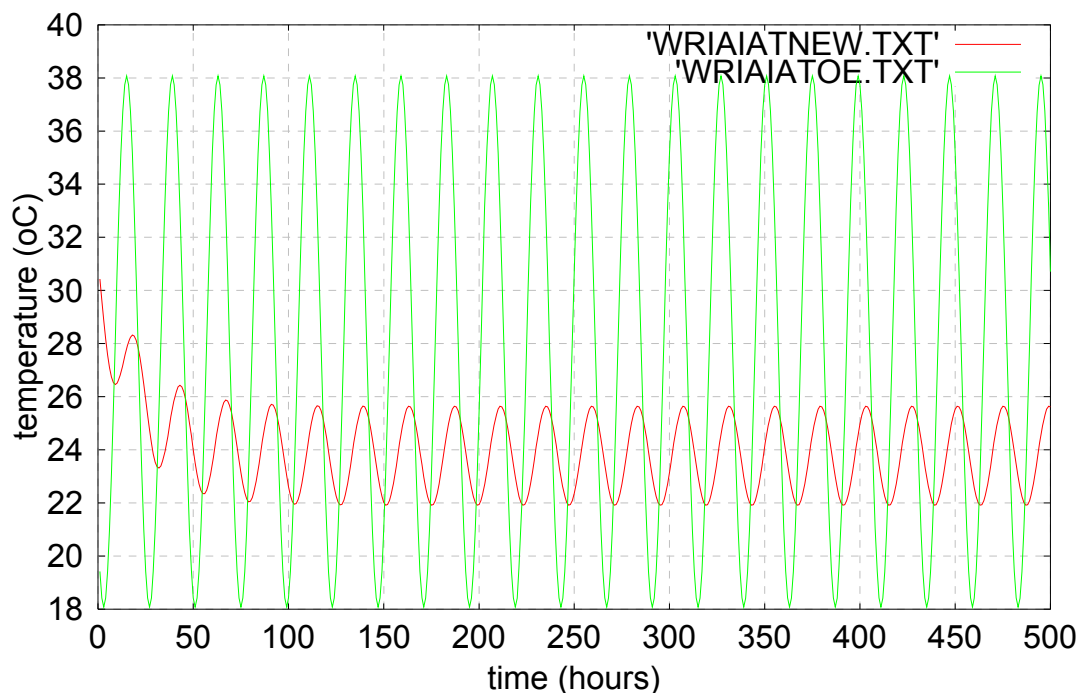


Διάγραμμα 9. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος με PCM ($T_m=24\text{ }^\circ\text{C}$) και με ψυκτικό φορτίο στη διάρκεια των ωρών 300-350

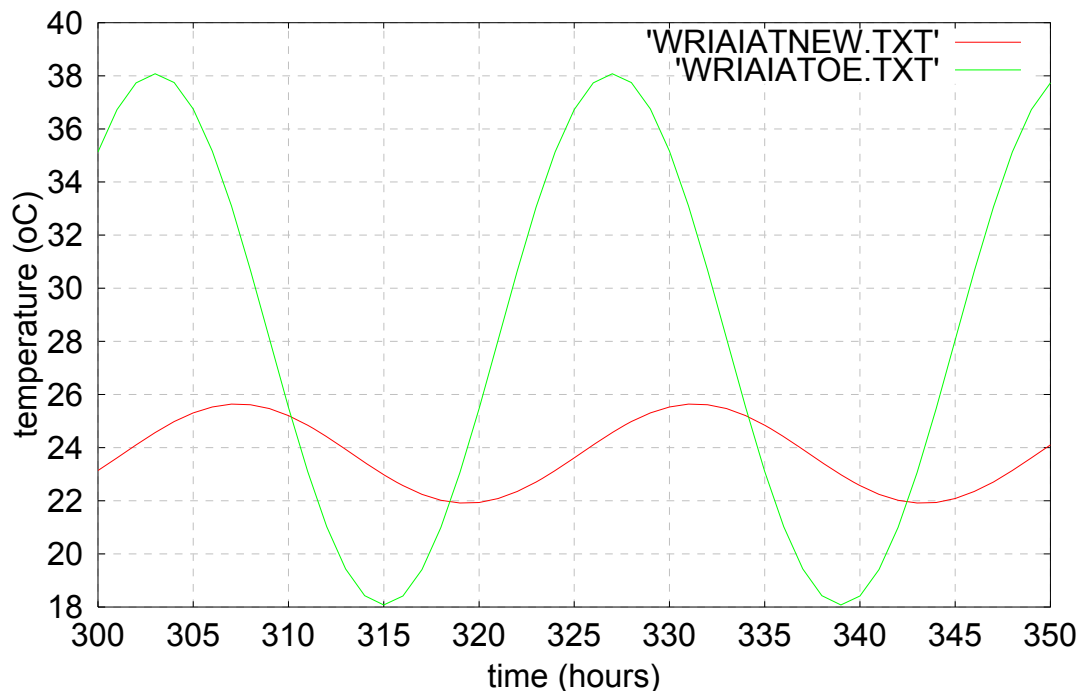
7.1.6 Πέμπτη περίπτωση: κτηριακό κέλυφος χωρίς PCM με ψυκτικό φορτίο ($Q = -270W$):

Από το διάγραμμα 10 παρατηρούμε ότι η μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι μια ταλάντωση, που ξεκινάει από τους $30.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{ITO}}=32^{\circ}\text{C}$) και φθίνει σταδιακά μέχρι την $78^{\text{η}}$ ώρα, όπου συγκλίνει στη μόνιμη κατάσταση. Η μόνιμη κατάσταση έχει μέση θερμοκρασία $23.77\text{ }^{\circ}\text{C}$, μέγιστη θερμοκρασία $25.63\text{ }^{\circ}\text{C}$, ελάχιστη θερμοκρασία $21.91\text{ }^{\circ}\text{C}$ και πλάτος ταλάντωσης $1.86\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Από το διάγραμμα 11 φαίνεται ότι η διαφορά φάσης εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας τις ώρες 300-350 (όπου η εσωτερική θερμοκρασία είναι στη μόνιμη κατάσταση) είναι 4 ώρες.



Διάγραμμα 10. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος χωρίς PCM με ψυκτικό φορτίο



Διάγραμμα 11. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος χωρίς PCM με ψυκτικό φορτίο στη διάρκεια των ωρών 300-350

7.1.7 Σύγκριση των τριών περιπτώσεων με ψυκτικό φορτίο (περίπτωση 3: με PCM $T_m=28^{\circ}\text{C}$, περίπτωση 4: με PCM $T_m=24^{\circ}\text{C}$, περίπτωση 5: χωρίς PCM) (διάγραμμα 11α)

Παρατηρούμε ότι:

1. Το μικρότερο πλάτος ταλάντωσης εσωτερικής θερμοκρασίας (1.12°C) στη μόνιμη κατάσταση το διαθέτει το κτηριακό κέλυφος με PCM με σημείο τήξης τους 24°C , το αμέσως μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης (1.66°C) στη μόνιμη κατάσταση το διαθέτει το κτηριακό κέλυφος με PCM με σημείο τήξης στους 28°C και τέλος το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης (1.86°C) το παρουσιάζει το κτηριακό κέλυφος χωρίς PCM.

Οι διαφορές που παρατηρούνται στο πλάτος (διάγραμμα 11 α) της ταλάντωσης της εσωτερικής θερμοκρασίας στη μόνιμη κατάσταση για κάθε περίπτωση, οφείλονται στη διαφορετική θερμοχωρητικότητα που χαρακτηρίζει κάθε κτηριακό κέλυφος. Στη μόνιμη κατάσταση μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα έχει το κτηριακό κέλυφος με PCM με σημείο τήξης στους 24°C , αφού η θερμοκρασιακή περιοχή της μόνιμης κατάστασης χαρακτηρίζεται από λανθάνουσα θερμότητα. Αμέσως μικρότερη θερμοχωρητικότητα διαθέτει το κτηριακό κέλυφος με PCM με σημείο τήξης στους 28°C . Αυτό το κτηριακό κέλυφος στη μόνιμη κατάσταση διακρίνεται από αισθητή θερμότητα (το PCM είναι στερεό), παρόλα αυτά εξαιτίας του ενός

στρώματος παράπλω που περιέχει, διακρίνεται από μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα από το κτηριακό κελύφος χωρίς PCM.

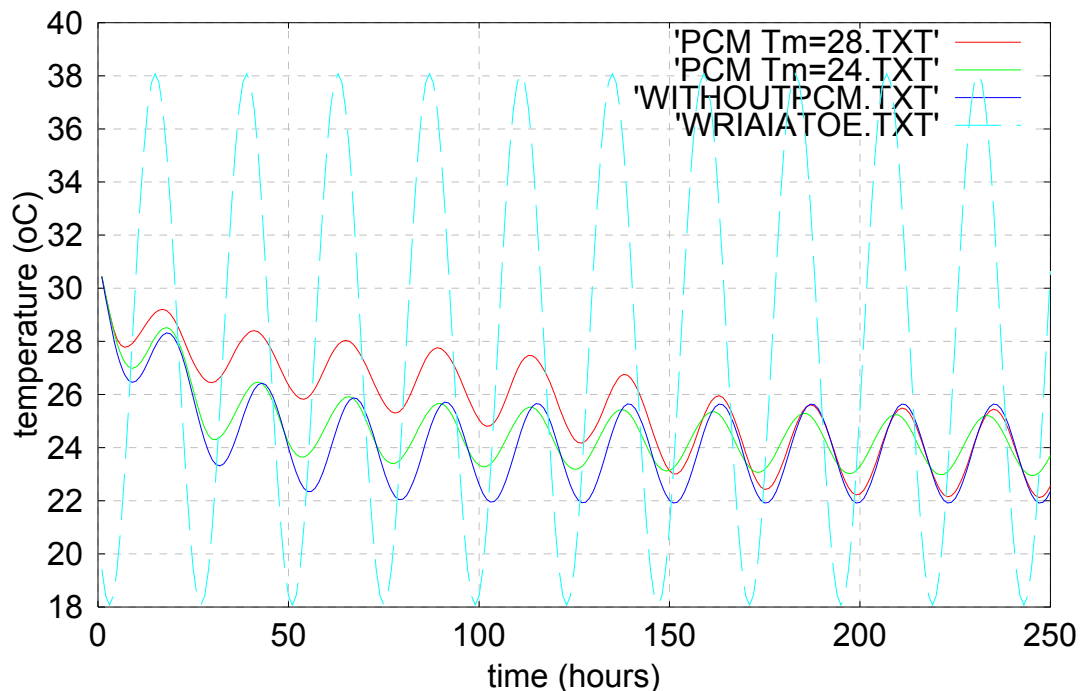
Συνοψίζοντας κατλήγουμε σε έναν γενικό κανόνα: όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοχωρητικότητα του κτηριακού κελύφους στη μόνιμη κατάσταση, τόσο μικρότερο είναι το πλάτος ταλάντωσης της εσωτερικής θερμοκρασίας στη μόνιμη κατάσταση.

2. Ο ρυθμός με τον οποίο συγκλίνει η εσωτερική θερμοκρασία των παραπάνω κτηριακών κελύφων είναι ο εξής: Πρώτη (78 ώρες) συγκλίνει η εσωτερική θερμοκρασία του κτηριακού κελύφους χωρίς PCM, δεύτερη (126 ώρες) συγκλίνει η εσωτερική θερμοκρασία του κτηριακού κελύφους με PCM με σημείο τήξης στους 24 °C και τελευταία (200 ώρες) συγκλίνει η εσωτερική θερμοκρασία του κτηριακού κελύφους με PCM με σημείο τήξης στους 28 °C.

Οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των παραπάνω περιπτώσεων οφείλονται πρωτίστως στη διαφορετική θερμοχωρητικότητα που χαρακτηρίζει κάθε περίπτωση πριν από τη μόνιμη κατάσταση και δευτερευόντως στη διαφορετική μάζα που χαρακτηρίζει κάθε κτηριακό κελύφος. Είναι λογικό που πρώτη συγκλίνει η εσωτερική θερμοκρασία του κτηριακού κελύφους χωρίς PCM, αφού διαθέτει ένα στρώμα λιγότερο, άρα χαρακτηρίζεται από μικρότερη πυκνότητα (άρα και από μικρότερη μάζα) και θερμοχωρητικότητα. Το γεγονός ότι δεύτερη συγκλίνει η θερμοκρασία του κτηριακού κελύφους με PCM με σημείο τήξης στους 24 °C είναι λογικό. Πριν από τη μόνιμη κατάσταση το PCM με σημείο τήξης στους 24 °C βρίσκεται σε υγρή κατάσταση και διακρίνεται από αισθητή θερμότητα. Αντίθετα, το κτηριακό κελύφος με PCM με σημείο τήξης στους 28 °C πριν από τη μόνιμη κατάσταση διακρίνεται από λανθάνουσα θερμότητα, άρα μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα και για αυτό αργεί στη σύγκλιση. Συνοψίζοντας καταλήγουμε: όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοχωρητικότητα (και η μάζα) του κτηριακού κελύφους πριν από τη μόνιμη κατάσταση, τόσο πιο αργά συγκλίνει η εσωτερική θερμοκρασία.

3. Στην περίπτωση κτηριακού κελύφους με PCM με σημείο τήξης στους 24 °C παρατηρείται μικρότερη διαφορά φάσης (2 ώρες) μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας στη μόνιμη κατάσταση σε σύγκριση με τις δύο άλλες περιπτώσεις κτηριακού κελύφους (4 ώρες) .

Αυτό οφείλεται και πάλι στη μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα του κτηριακού κελύφους με PCM με σημείο τήξης στους 24 °C. Όπως αναφέραμε και παραπάνω, όσο μεγαλύτερη η θερμοχωρητικότητα τόσο μικρότερη είναι η διαφορά φάσης μεταξύ εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας.



Διαγρ. 11α Χρονική μεταβολή της εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας των περιπτώσεων 3, 4, 5

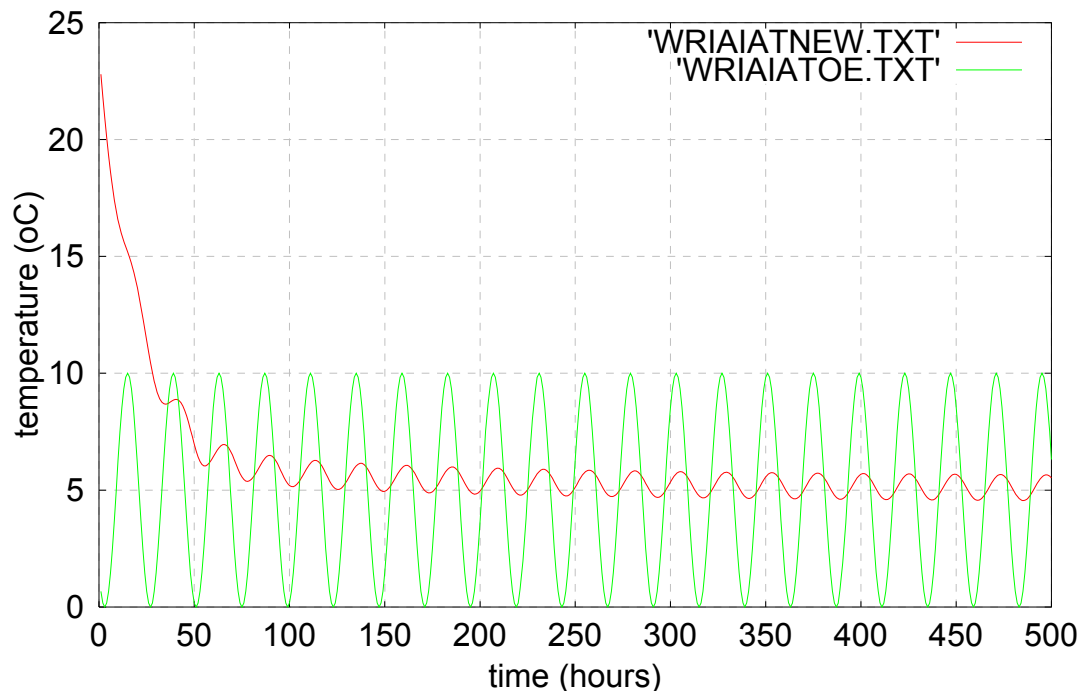
7.2 Χειμερινός μήνας με μέση εξωτερική θερμοκρασία 5°C

Κατά την εξέταση των διάφορων περιπτώσεων κατά τον χειμερινό μήνα, προκύπτουν αντίστοιχα συμπεράσματα με αυτά που προέκυψαν για τον καλοκαιρινό μήνα. Επειδή τα συμπεράσματα αναλύθηκαν λεπτομερώς παραπάνω, εδώ παρουσιάζονται συνοπτικά.

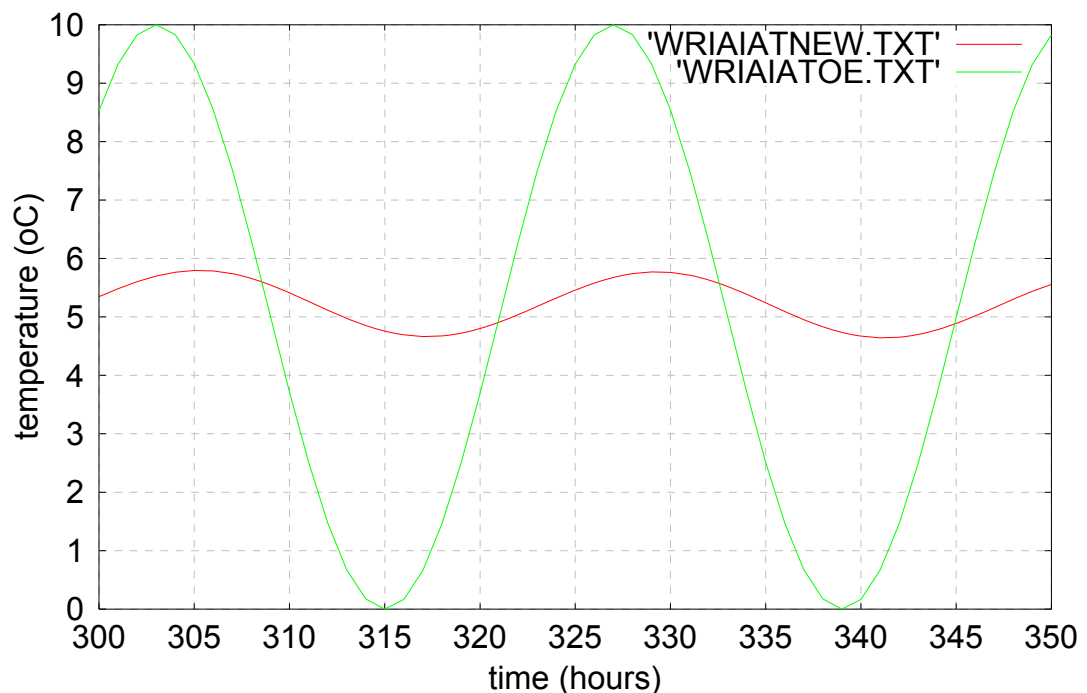
7.2.1 Πρώτη περίπτωση: κτηριακό κέλυφος με PCM με σημείο τήξης $T_m=5$ °C :

Από το διάγραμμα 12 παρατηρούμε ότι η μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι μια ταλάντωση, που ξεκινάει από τους 22.7 °C ($T_{ITO}=25$ °C) και μειώνεται σταδιακά μέχρι την 221^η ώρα, όπου συγκλίνει στη μόνιμη κατάσταση. Η μόνιμη κατάσταση έχει μέση θερμοκρασία 5.06 °C (σχεδόν ίση με τη μέση εξωτερική θερμοκρασία), μέγιστη θερμοκρασία 5.66 °C, ελάχιστη θερμοκρασία 4.55 °C και πλάτος ταλάντωσης 0.555 °C.

Από το 13 διάγραμμα παρατηρούμε ότι μεταξύ εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας υπάρχει διαφορά φάσης 2 ωρών.



Διάγραμμα 12. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος με PCM με σημείο τήξης τους 5°C

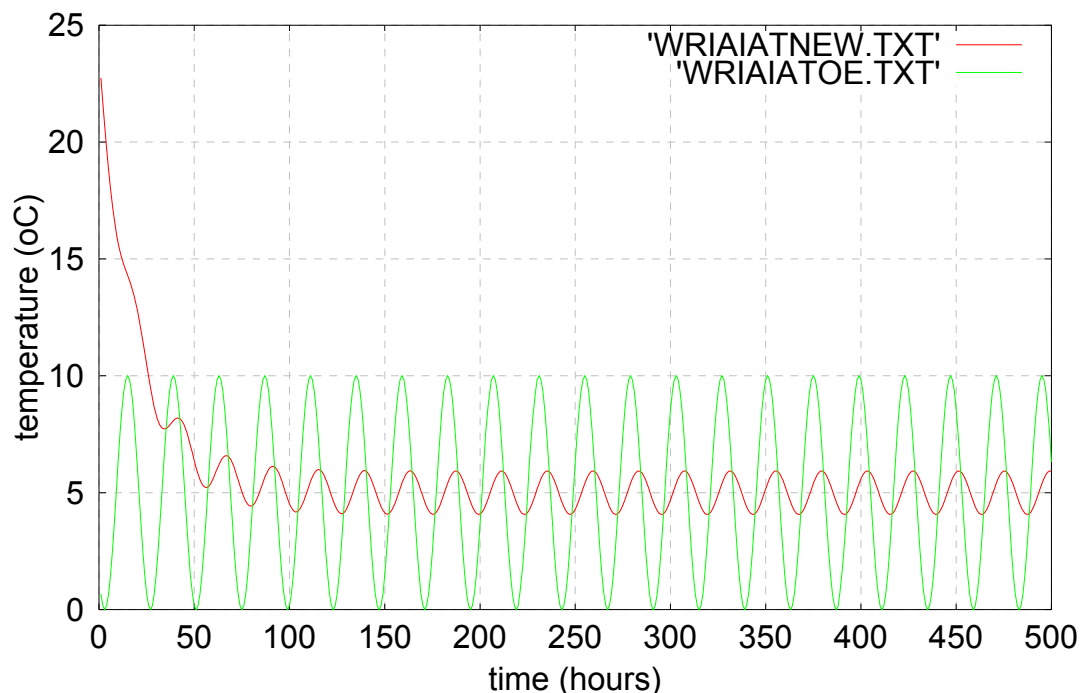


Διάγραμμα 13. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος με PCM με σημείο τήξης τους 5°C στη διάρκεια 50 ωρών

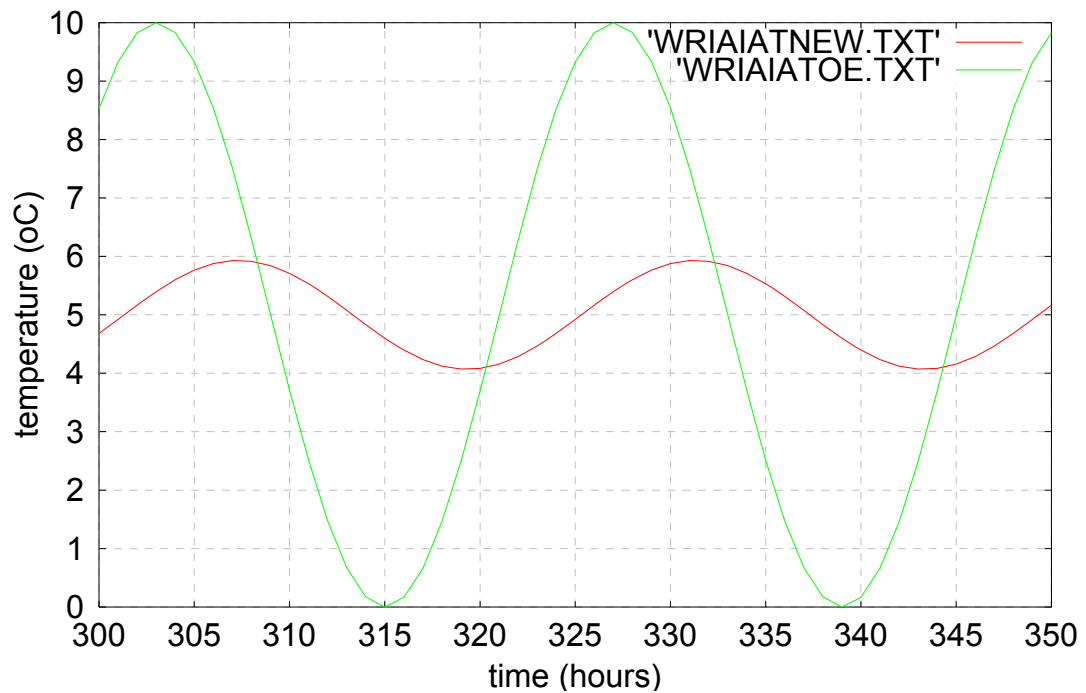
7.2.2 Δεύτερη περίπτωση: κτηριακό κέλυφος χωρίς PCM

Από το διάγραμμα 14 παρατηρούμε ότι η μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι μια ταλάντωση, που ξεκινάει από τους 22.7 °C (TITO=25 °C) και μειώνεται σταδιακά μέχρι την 103^η ώρα, όπου συγκλίνει στη μόνιμη κατάσταση. Η μόνιμη κατάσταση έχει μέση θερμοκρασία 4.995 °C (σχεδόν ίση με τη μέση εξωτερική θερμοκρασία), μέγιστη θερμοκρασία 5.92 °C, ελάχιστη θερμοκρασία 4.07 °C και πλάτος ταλάντωσης 0.925 °C.

Από το διάγραμμα 15 παρατηρούμε ότι μεταξύ εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας υπάρχει διαφορά φάσης 4 ωρών.



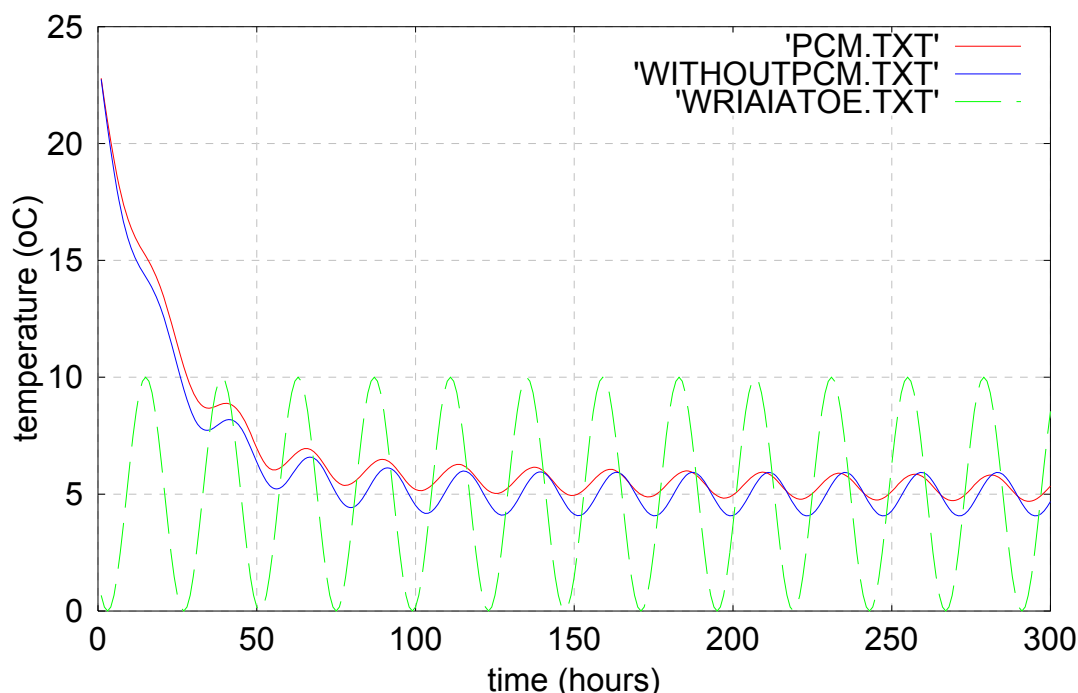
Διάγραμμα 14. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος χωρίς PCM



Διάγραμμα 15. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος χωρίς PCM στη διάρκεια 50 ωρών

7.2.3 Σύγκριση κτηριακού κελύφους με και χωρίς PCM (Διαγραμμα 15α)

Το κτηριακό κέλυφος με PCM, διακρίνεται από μικρότερο πλάτος ταλάντωσης στη μόνιμη κατάσταση, από πιο αργή και σταδιακή σύγκλιση και από μικρότερη διαφορά φάσης εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας. Όπως αναλύθηκε και παραπάνω για την αντίστοιχη περίπτωση του καλοκαιρινού μήνα, υπεύθυνη για αυτές τις διαφορές είναι η μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα που χαρακτηρίζει το κτηριακό κέλυφος με PCM.

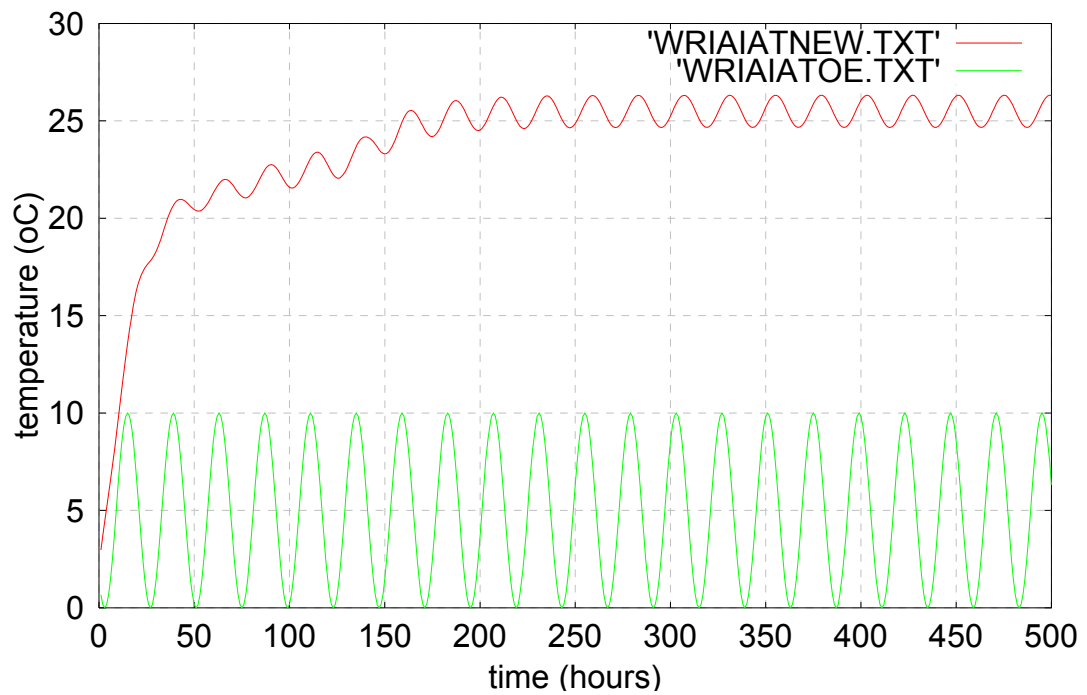


Διαγρ.15α Χρονική μεταβολή της εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος με και χωρίς PCM.

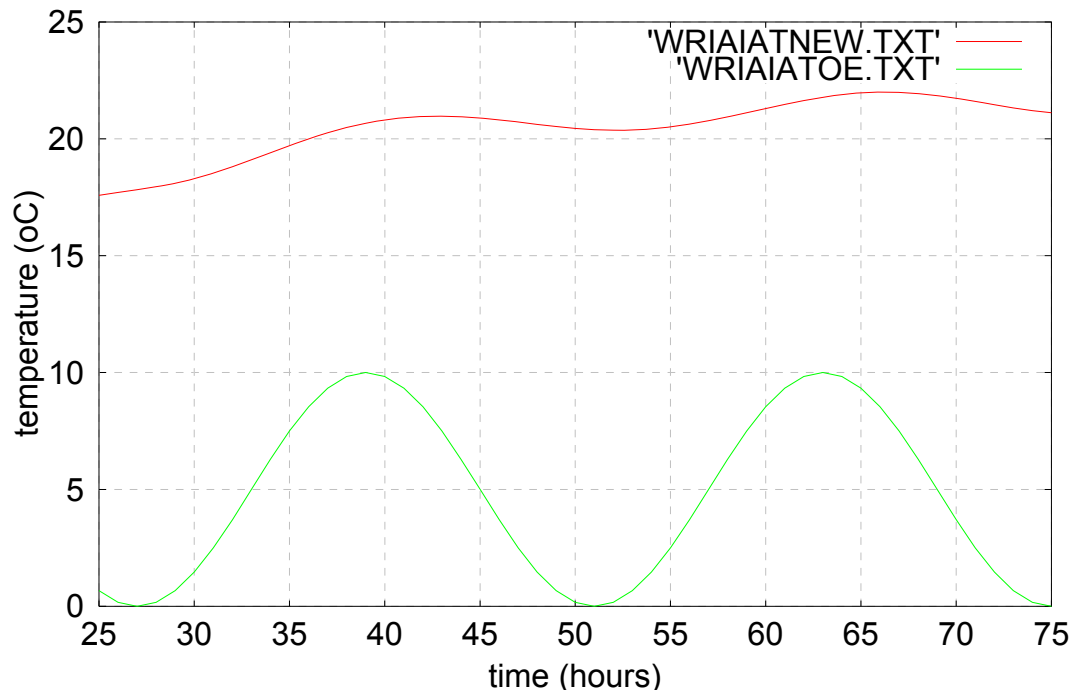
7.2.4 Τρίτη περίπτωση: κτηριακό κέλυφος με PCM (σημείο τήξης $T_m=20$ °C) και με θερμικό φορτίο ($Q = 760W$):

Από το διάγραμμα 16 παρατηρούμε ότι η μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι μια ταλάντωση, που ξεκινάει από τους 2.7 °C ($T_{ITO}=1$ °C) και αυξάνεται σταδιακά. Επίσης παρατηρούμε ότι καθώς η εσωτερική θερμοκρασία αυξάνεται και προσεγγίζει τους 20 °C, το πλάτος της ταλάντωσης είναι 0.62 °C μέχρι την 199^η ώρα, όπου συγκλίνει στη μόνιμη κατάσταση και αποκτά πλάτος ταλάντωσης 0.83 °C. Η μόνιμη κατάσταση έχει μέση θερμοκρασία 25.48 °C, μέγιστη θερμοκρασία 26.31 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 24.65 °C. Ο λόγος που το πλάτος ταλάντωσης κοντά στους 20 °C είναι μικρότερο και αυξάνεται σταδιακά καθώς απομακρυνόμαστε από τους 20 °C, είναι η διαφορετική θερμοχωρητικότητα που χαρακτηρίζει την περιοχή της μη μόνιμης και μόνιμης κατάστασης. Δηλαδή: Στους 20 °C είναι το σημείο τήξης του PCM, άρα σε εκείνο το σημείο το κτηριακό κέλυφος διακρίνεται από μεγάλη θερμοχωρητικότητα εξαιτίας της λανθάνουσας θερμότητας. Όταν η εσωτερική θερμοκρασία προσεγγίσει τη μόνιμη κατάσταση με μέση θερμοκρασία $25.48^{\circ}C > 20$ °C, το PCM του κτηριακού κελύφους «δουλεύει» σαν υγρό (αισθητή θερμότητα). Άρα διαθέτει μικρότερη θερμοχωρητικότητα.

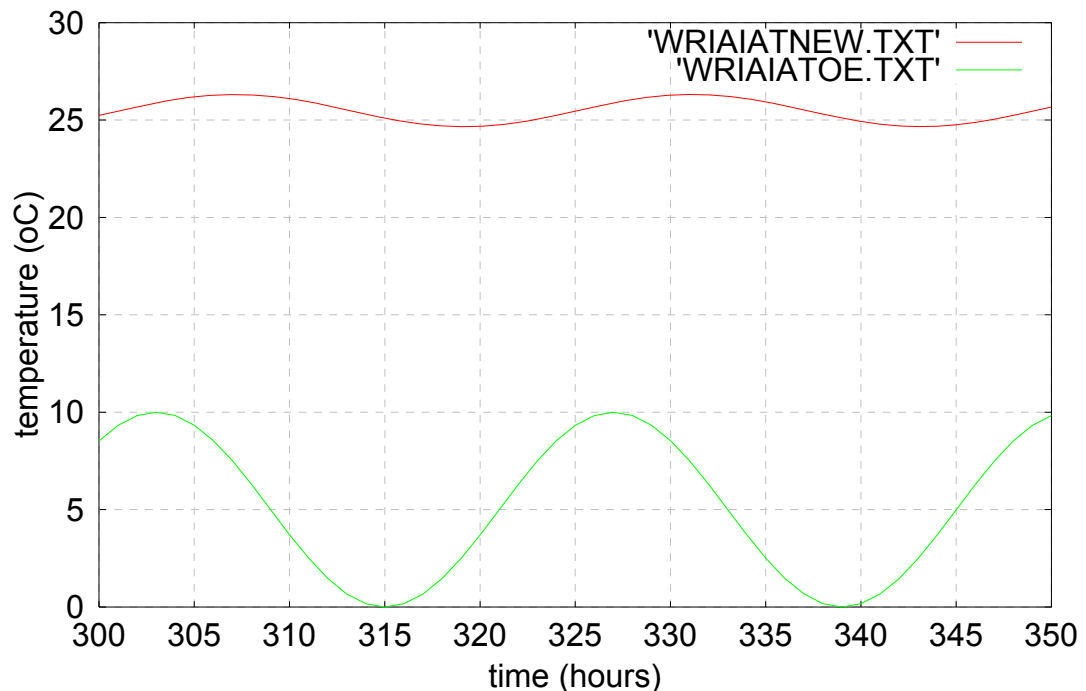
Από το διάγραμμα 17 φαίνεται ότι η διαφορά φάσης εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας τις πρώτες ώρες (25^η-75^η ώρα) είναι 3 ώρες. Αντίστοιχα, από το διάγραμμα 18 φαίνεται ότι η διαφορά φάσης εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας τις ώρες 300-350 (όπου η εσωτερική θερμοκρασία είναι στη μόνιμη κατάσταση) είναι 4 ώρες. Αυτό οφείλεται και πάλι στη διαφορετική θερμοχωρητικότητα που χαρακτηρίζει την περιοχή της μη μόνιμης και της μόνιμης κατάστασης.



Διάγραμμα 16. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος με PCM ($T_m=20\text{ }^\circ\text{C}$) και θερμικό φορτίο.



Διάγραμμα 17. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος με PCM ($T_m=20\text{ }^\circ\text{C}$) και με θερμικό φορτίο στη διάρκεια των ωρών 25-75

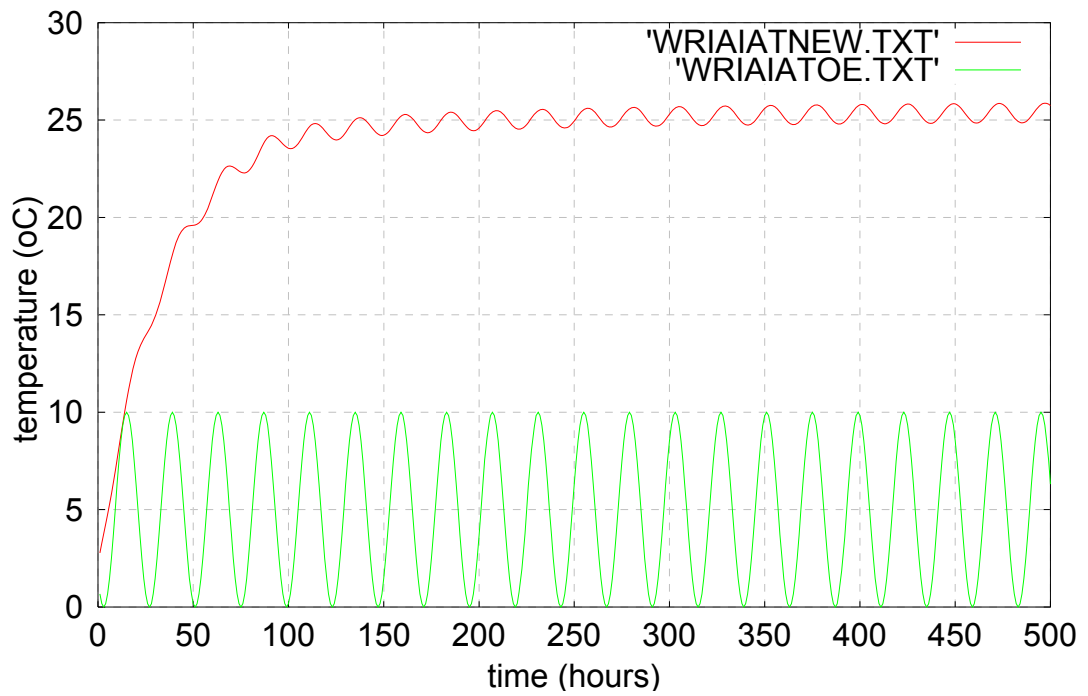


Διάγραμμα 18. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος με PCM ($T_m=20\text{ }^\circ\text{C}$) και με θερμικό φορτίο στη διάρκεια των ωρών 300-350

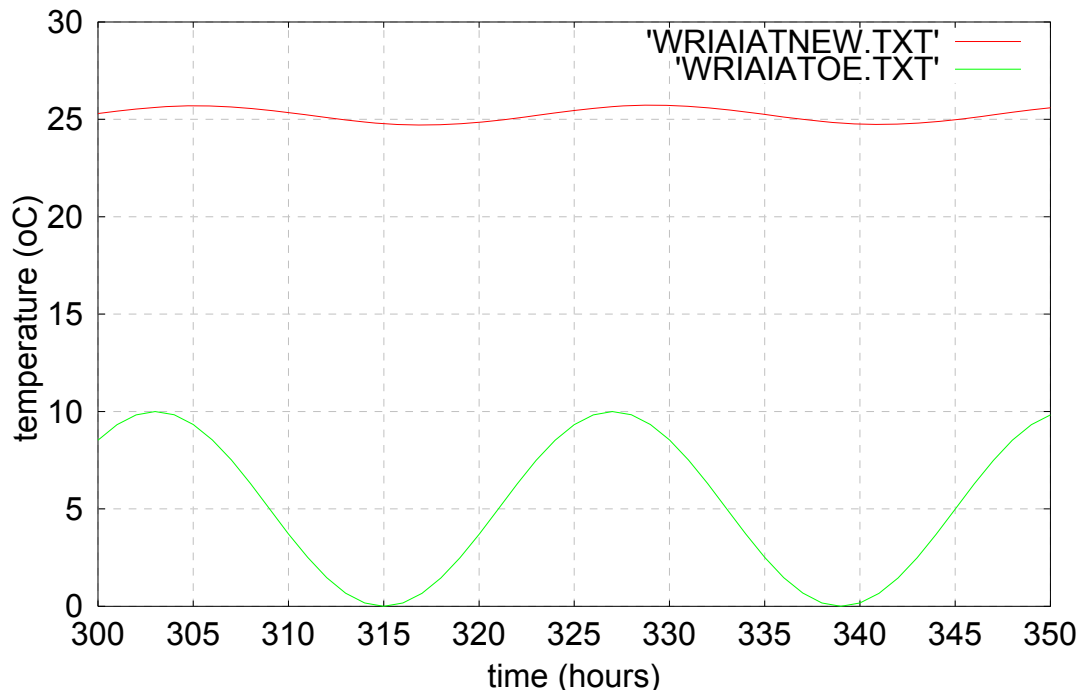
7.2.5 Τέταρτη περίπτωση: κτηριακό κέλυφος με PCM (σημείο τήξης $T_m=25\text{ }^\circ\text{C}$) και με θερμικό φορτίο ($Q = 760\text{W}$):

Από το διάγραμμα 19 παρατηρούμε ότι η μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι μια ταλάντωση, που ξεκινάει από τους $2.7\text{ }^\circ\text{C}$ ($T_{\text{ITO}}=1\text{ }^\circ\text{C}$) και αυξάνεται σταδιακά μέχρι την 130^η ώρα, όπου συγκλίνει στη μόνιμη κατάσταση. Η μόνιμη κατάσταση έχει μέση θερμοκρασία $25\text{ }^\circ\text{C}$, μέγιστη θερμοκρασία $25.48\text{ }^\circ\text{C}$, ελάχιστη θερμοκρασία $24.52\text{ }^\circ\text{C}$ και πλάτος ταλάντωσης $0.48\text{ }^\circ\text{C}$.

Από τα διαγράμματα 20 φαίνεται ότι η διαφορά φάσης εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας τις ώρες 300-350 (όπου η εσωτερική θερμοκρασία είναι στη μόνιμη κατάσταση) είναι 2 ώρες .



Διάγραμμα 20. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος με PCM ($T_m=25\text{ }^\circ\text{C}$) και θερμικό φορτίο.

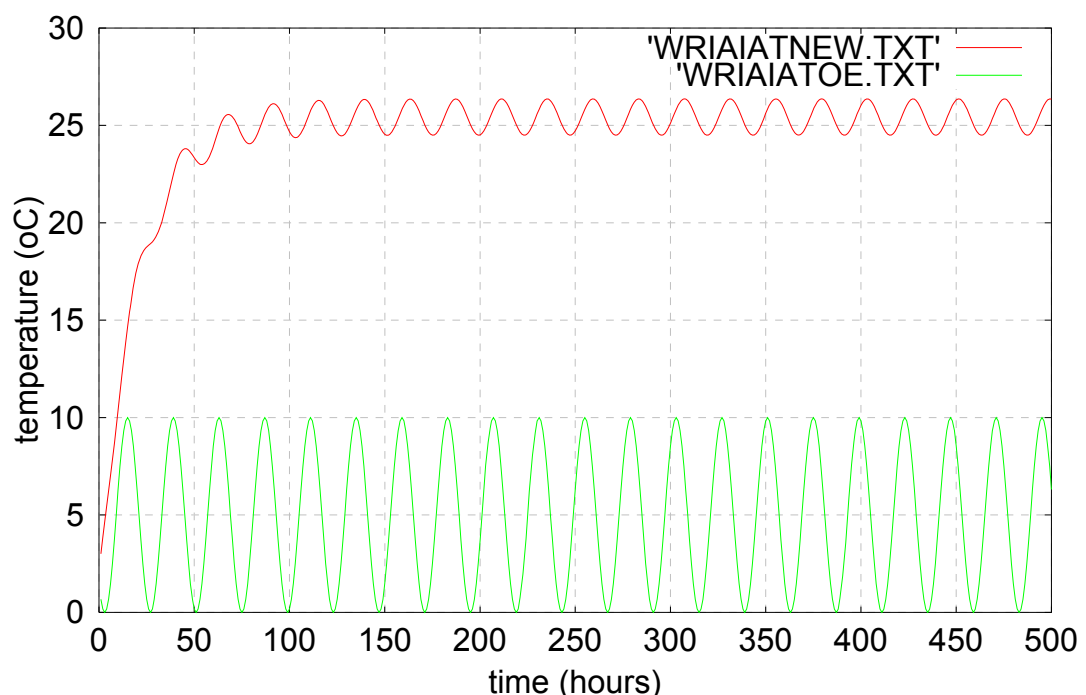


Διάγραμμα 21. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος με PCM ($T_m=25\text{ }^\circ\text{C}$) και με θερμικό φορτίο στη διάρκεια των ωρών 300-350

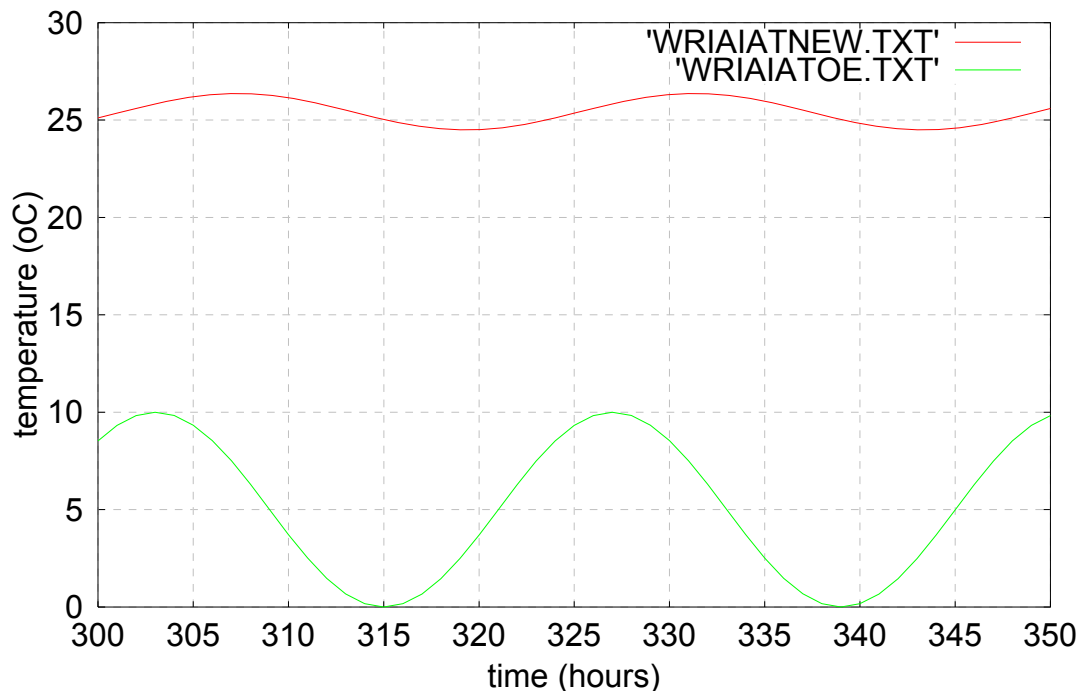
7.2.6 Πέμπτη περίπτωση: κτηριακό κέλυφος χωρίς PCM με θερμικό φορτίο ($Q = 720W$):

Από το διάγραμμα 22 παρατηρούμε ότι η μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι μια ταλάντωση, που ξεκινάει από τους $2.7^{\circ}C$ ($T_{i0}=1^{\circ}C$) και αυξάνει σταδιακά μέχρι την 79^η ώρα, όπου συγκλίνει στη μόνιμη κατάσταση. Η μόνιμη κατάσταση έχει μέση θερμοκρασία $25.42^{\circ}C$, μέγιστη θερμοκρασία $26.35^{\circ}C$, ελάχιστη θερμοκρασία $24.50^{\circ}C$ και πλάτος ταλάντωσης $0.925^{\circ}C$.

Από το διάγραμμα 23 φαίνεται ότι η διαφορά φάσης εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας τις ώρες 300-350 (όπου η εσωτερική θερμοκρασία είναι στη μόνιμη κατάσταση) είναι 4 ώρες.



Διάγραμμα 22. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κέλυφος χωρίς PCM με θερμικό φορτίο.



Διάγραμμα 23. Χρονική μεταβολή εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας για κτηριακό κελύφος χωρίς PCM με θερμικό φορτίο στη διάρκεια των ωρών 300-350

7.2.7 Σύγκριση των τριών περιπτώσεων με θερμικό φορτίο (περίπτωση 3: με PCM $T_m=20^{\circ}\text{C}$, περίπτωση 4: με PCM $T_m=25^{\circ}\text{C}$, περίπτωση 5: χωρίς PCM) (διάγραμμα 23α)

Παρατηρούμε ότι:

1. Το μικρότερο πλάτος ταλάντωσης εσωτερικής θερμοκρασίας (0.48°C) στη μόνιμη κατάσταση το διαθέτει το κτηριακό κελύφος με PCM με σημείο τήξης στους 25°C , το αμέσως μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης (0.83°C) στη μόνιμη κατάσταση το διαθέτει το κτηριακό κελύφος με PCM με σημείο τήξης στους 20°C και τέλος το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης (0.925°C) το παρουσιάζει το κτηριακό κελύφος χωρίς PCM.

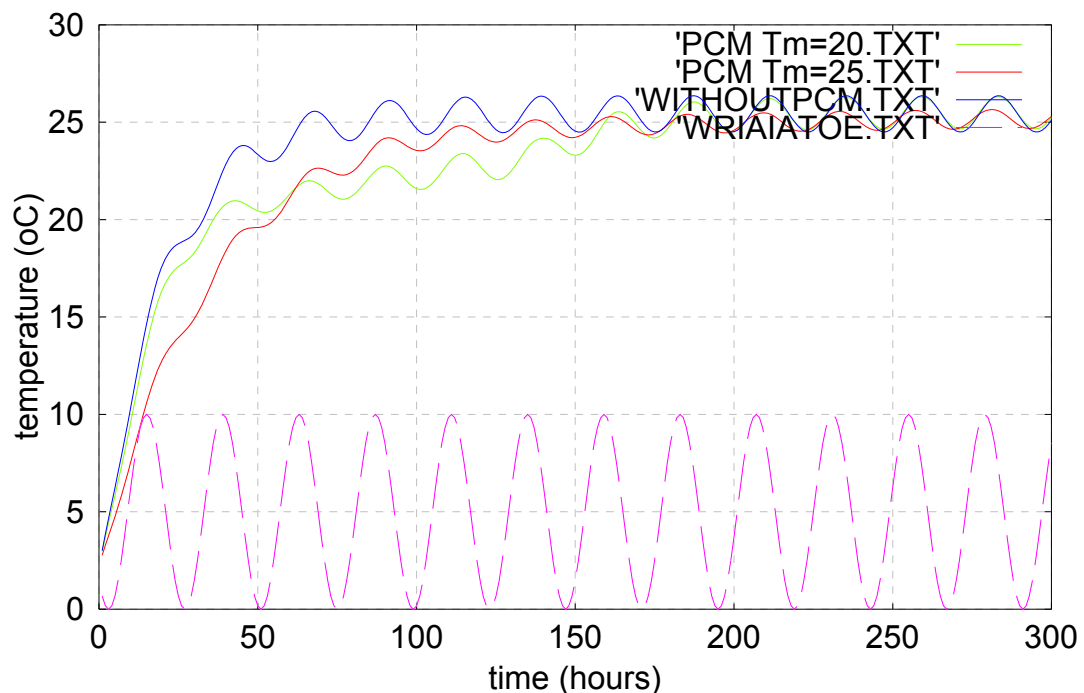
Τα συμπεράσματα είναι λογικά και επιβεβαιώνουν τον κανόνα: όσο μεγαλύτερη η θερμοχωρητικότητα του κτηριακού κελύφους στη μόνιμη κατάσταση, τόσο μικρότερο το πλάτος ταλάντωσης της εσωτερικής θερμοκρασίας στη μόνιμη κατάσταση.

2. Ο ρυθμός με τον οποίο συγκλίνει η εσωτερική θερμοκρασία των παραπάνω κτηριακών κελύφων είναι ο εξής: Πρώτη (79 ώρες) συγκλίνει η εσωτερική θερμοκρασία του κτηριακού κελύφους χωρίς PCM, δεύτερη (130 ώρες) συγκλίνει η εσωτερική θερμοκρασία του κτηριακού κελύφους με PCM με σημείο τήξης τους 25°C και τελευταία (199 ώρες) συγκλίνει η εσωτερική θερμοκρασία του κτηριακού κελύφους με PCM με σημείο τήξης τους 20°C .

Και αυτά τα συμπεράσματα είναι λογικά και επιβεβαιώνουν τον κανόνα: όσο μεγαλύτερη η θερμοχωρητικότητα του κτηριακού κελύφους πριν από τη μόνιμη κατάσταση, τόσο αργεί να συγκλίνει η εσωτερική θερμοκρασία.

3. Στην περίπτωση κτηριακού κελύφους με PCM με σημείο τήξης στους 25 °C παρατηρείται μικρότερη διαφορά φάσης (2 ώρες) μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας στη μόνιμη κατάσταση, σε σύγκριση με τις δύο άλλες περιπτώσεις (4 ώρες) κτηριακού κελύφους, λόγω της μεγαλύτερης θερμοχωρητικότητας.

Και αυτή η παρατήρηση είναι λογική και επιβεβαιώνει τον κανόνα: Όσο μεγαλύτερη η θερμοχωρητικότητα στη μόνιμη κατάσταση, τόσο μικρότερη η διαφορά φάσης εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας στη μόνιμη κατάσταση.



Διαγρ. 23α Χρονική μεταβολή της εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας των περιπτώσεων 3, 4, 5

7.3 Ανακεφαλαίωση-Σύνοψη συμπερασμάτων

Παρατηρούμε ότι οι πέντε περιπτώσεις για το χειμώνα μας επιβεβαιώνουν τα εξής συμπεράσματα:

Στη μόνιμη κατάσταση:

1. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοχωρητικότητα του κτηριακού κελύφους, τόσο μικρότερο είναι το πλάτος της ταλάντωσης της εσωτερικής θερμοκρασίας.
2. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοχωρητικότητα του κτηριακού κελύφους, τόσο μικρότερη είναι η διαφορά φάσης μεταξύ εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας.

Πριν τη μόνιμη κατάσταση:

3. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοχωρητικότητα του κτηριακού κελύφους, τόσο πιο αργά συγκλίνει η εσωτερική θερμοκρασία.

Πριν κλείσουμε αυτό το κεφάλαιο αξίζει να κάνουμε μια ακόμη παρατήρηση:

Σε όλα τα προηγούμενα διαγράμματα παρατηρείται το πλάτος της εσωτερικής θερμοκρασίας ότι είναι πολύ μικρότερο από το πλάτος της εξωτερικής θερμοκρασίας.

Αυτό οφείλεται στην θερμόνωση, που χαρακτηρίζεται από χαμηλή θερμική αγωγιμότητα ($0.038 \text{ W/m}^2\text{K}$) και εμποδίζει τη μεταφορά θερμότητας.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) G. LANE, Solar Heat Storage: Latent heat material, Vol 1
- 2) V. Metivaud, L. Ventola, Thermal Insulation of Buildings using Phase Change Materials, Energy and Buildings, Vol 36, pp 132-38
- 3) K. Lin, Y. Zhang, Experimental study of under-floor electric heating system, with shape- stabilized PCM plates, Energy and Buildings, Vol 37, pp 215-220
- 4) K. Nagano, S. Tadeka, study of a floor supply air conditioning system using granular phase change material to augment building thermal storage, Energy and Buildings, Vol 38, pp 436-446
- 5) B. Zalba. J. Martin, Free-cooling of buildings with phase change materials, International journal of refrigeration, Vol 27, 839-849
- 6) L. Shiley, Z. Neng, Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter, Energy and Buildings, Vol 38, pp 18-24
- 7) M. Ahad, A. Bontemps, Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change materials, Energy and Buildings, Vol 38, pp 637-681
- 8) M. Koschenz, B. Lehman, Development of a thermally activated ceiling panel with PCM, Energy and Buildings, Vol 36, pp 567-578
- 9) A. Kürlü, Technical Note: application of PCM in greenhouses, Renewable Energy, Vol 13,pp 83-103
- 10) T. Boulard, A. Baile, Performance of a greenhouse heating system with pcm, Agricultural and Forest Meteorology, Vol 57,pp 303-318
- 11) B. Huang, M. Toskoy, Transient response of latent heat storage in greenhouse solar system, Solar Energy, Vol 37,PP 279-292
- 12) Y. Rabin, B.Niv, Integrated Solar Collector storage system based on PCM, Solar Energy, Vol 55, pp 435-444
- 13) M. Huang, P. Eames, Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaic, solar Energy
- 14) D. Buddhi, S. Sharma, Design, development and performance of solar cooker using pcm, Energy conversion and management, Vol 41,pp 1497-1508

- 15)S. Enibe, performance of solar air heating system using pcm, renewable Energy, Vol 27,pp 69-89
- 16)S. Riffat, S. Omer, A novel thermoelectric refrigeration system employing heat pipes and phase change materials, Renewable Energy, Vol 23,pp 313-323
- 17)S. Riffat, S. Omer, Experimental investigation of a thermoelectric refrigeration system employing pcm, Applied thermal Energy, Vol 21,pp1265-1271
- 18)K. Darkwa, P. Callaghan, Simulation of phase change drywalls in a passive solar building, Applied Thermal Engineering, Vol 26, pp 853-858
- 19)K. Darkwa, P. Callaghan, phase-change drywalls in a passive solar building, Applied Thermal Engineering, Vol 83, pp 425-435

ΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ

- 20)www.rubitherm.de
- 21)www.climator.com
- 22)www.outlast.de
- 23)www.cristopia.com
- 24)www.N.R.E.L.com