



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“Φόρτιση υλικών αλλαγής φάσης (PCMs) με ηλιακούς  
συλλέκτες για εφαρμογές θέρμανσης κτιρίων στην Αθήνα, με  
ή χωρίς απομάστευση θερμού νερού χρήσης”**

“Phase Change Materials (PCMs) for building heating in Athens,  
loaded by solar collectors, with or without domestic hot water  
applications”

**ΔΗΜΗΤΡΑ - ΤΖΕΜΑ ΣΤΕΦΗ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ κ. Κ.Α. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ

Αθήνα , Ιούλιος 2016





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“Φόρτιση υλικών αλλαγής φάσης (PCMs) με ηλιακούς  
συλλέκτες για εφαρμογές θέρμανσης κτιρίων στην Αθήνα, με  
ή χωρίς απομάστευση θερμού νερού χρήσης”**

“Phase Change Materials (PCMs) for building heating in Athens,  
loaded by solar collectors, with or without domestic hot water  
applications”

**ΔΗΜΗΤΡΑ - ΤΖΕΜΑ ΣΤΕΦΗ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ κ. Κ.Α. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ

Αθήνα , Ιούλιος 2016

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους εκείνους που με τη σειρά τους βοήθησαν στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή και επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής κ. Κίμωνα Αντωνόπουλο, καθηγητή του Τομέα Θερμότητας στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Οι συμβουλές και η καθοδήγησή του πάνω στο αντικείμενο της έρευνας συνετέλεσαν καθοριστικά στην εκπόνηση και ολοκλήρωση της διπλωματικής και με βοήθησαν να διευρύνω τις γνώσεις μου πάνω σε έναν πολύ ενδιαφέρον τομέα της Σχολής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την ευκαιρία που μου προσέφερε και την υποστήριξή τους σε όλη τη διάρκεια της ακαδημαϊκής μου πορείας, καθώς και τους φίλους μου με τους οποίους μοιράστηκα την εμπειρία των σπουδών μου και την διαδικασία εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την μελέτη των υλικών αλλαγής φάσης (ΥΑΦ-PCMs), τόσο σε θεωρητικό, όσο και σε πειραματικό επίπεδο.

Στο πρώτο μέρος, πραγματοποιείται μία θεωρητική προσέγγιση των υλικών. Επισημαίνεται η αναγκαιότητα συστημάτων βασιζόμενων σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση ενέργειας και περιβαλλοντικά φιλική λειτουργία. Στην συνέχεια, επεξηγείται η αρχή λειτουργίας των ΥΑΦ, τα χαρακτηριστικά τους, μέθοδοι προσομοίωσης της λειτουργίας τους, ενώ παρατίθεται και αναλυτική κατηγοριοποίηση των υλικών. Η προσέγγιση ολοκληρώνεται με παραδείγματα εκμετάλλευσης των ιδιοτήτων των ΥΑΦ σε ευρύ φάσμα εφαρμογών, με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται στις κτιριακές εγκαταστάσεις.

Στο δεύτερο μέρος, μελετάται ιδανικό σύστημα θέρμανσης με PCM, ενσωματωμένων σε τοίχο, η φόρτιση των οποίων επιτυγχάνεται με σερπαντίνα κυκλοφορίας θερμού νερού συστοιχίας ηλιακών συλλεκτών. Το σύστημα αποβλέπει στην θέρμανση εσωτερικού χώρου (δωμάτιο 12m<sup>2</sup>) καθορισμένης θερμοκρασίας. Με την παράθεση της υπολογιστικής διαδικασίας που ακολουθείται, πραγματοποιούνται δοκιμές παραμέτρων για την μελέτη της συμπεριφοράς συγκεκριμένων ΥΑΦ της εταιρίας Rubitherm, με τελική επιλογή του υλικού SP25A8. Η εξέταση των υλικών γίνεται ως προς τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες και τον βαθμό εκμετάλλευσης του ΥΑΦ, εστιάζοντας στην αποδιδόμενη θερμότητα του υλικού προς τον εσωτερικό χώρο. Συνεχίζοντας, στις λειτουργίες της εγκατάστασης προστίθεται η θέρμανση νερού χρήσης, σε δεξαμενή με εναλλάκτη θερμότητας (boiler), χρησιμοποιώντας απομάστευση του θερμού νερού κυκλοφορίας των ηλιακών συλλεκτών. Η λειτουργία του εναλλάκτη πραγματοποιείται, αρχικά, σε ιδανικό επίπεδο, ενώ ακολουθεί προσπάθεια προσέγγισης των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας.

Μέσω δοκιμών μεταβολής και συνδυασμού παραμέτρων της εγκατάστασης, επιτυγχάνεται μία σαφής εικόνα της απόδοσης και συμπεριφοράς του συστήματος θέρμανσης με ΥΑΦ. Μελετάται η επιρροή μεταβολής των παραμέτρων και πραγματοποιούνται συγκρίσεις αποτελεσμάτων, για την ορθή εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την αποδοτικότητα του συστήματος.



# SYMMARY

The primary purpose of this thesis is the study of phase change materials (PCMs), on both a theoretical and experimental level.

In the first part, a theoretical approach of the materials is carried out. The need for systems based on renewable energy sources is highlighted, as a way to achieve energy saving and environmentally friendly operations. Afterwards, a thorough analysis is provided, concerning the operation principle of PCMs, their characteristics, operation simulation methods and a detailed classification of the materials. The approach concludes with utilization examples of PCM properties in a wide range of applications, with particular emphasis given on building installations.

The second part is constituted by the study of a heating system with PCMs, embedded in the wall structure. The thermal charge of the materials is achieved with a serpentine tube of hot water, provided by solar collectors. The system is designed for interior heating (room of 12m<sup>2</sup>), which has a set temperature. By analyzing the calculation procedure that was followed, tests are conducted for behavioral study of specific PCMs of the Rubitherm Company, leading to the final selection of the material SP25A8. The examination of the materials concerns the developing temperatures and the exploitation coefficient of the PCMs, focusing on the heat output of the material towards the interior space. Subsequently, the feature of domestic water heating is added to the installation. By using a water tank with a heat exchanger (boiler), part of the hot water provided by the solar collectors is extracted to the heat exchanger for heating the domestic water. The heat exchange is initially considered to have no losses, but further into the experiment an attempt is made to simulate realistic operating conditions.

Through the testing of alterations and combinations of the installation parameters, a clear picture of the performance and conduct of the heating system with PCMs, is achieved. The influence of parameter alterations are studied, result comparisons are made, all towards drawing correct conclusions regarding the system's efficiency.





# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ</b>	<b>14</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>15</b>
1.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΡΙΣΗ	15
1.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	16
1.2.1 ΝΕΦΟΣ ΑΙΘΑΛΟΜΙΧΛΗΣ	16
1.2.2 ΦΩΤΟΧΗΜΙΚΟ ΝΕΦΟΣ	16
1.2.3 ΟΞΙΝΗ ΒΡΟΧΗ	16
1.2.4 ΤΡΥΠΑ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ	17
1.2.5 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	17
1.3 ΠΟΛΙΤΙΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	18
1.4 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	18
1.4.1 ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΠΕ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ	20
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1 <sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	21
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b>	<b>22</b>
2.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	22
2.1.1 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΜΕ ΜΕΣΟ ΤΟ ΝΕΡΟ	22
2.1.2 ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (CRYOGENIC ENERGY STORAGE)	22
2.1.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕ ΤΗΤΗΓΜΕΝΑ ΑΛΑΤΑ (MOLTEN SALTS)	22
2.1.4 ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PHASE CHANGE MATERIALS-PCMs)	23
2.2 ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ	23
2.2.1 ΑΙΣΘΗΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ (SENSIBLE HEAT)	23
2.2.2 ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ (LATENT HEAT)	24
2.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	24
2.3.1 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΓΩΓΗ (CONDUCTION)	24
2.3.2 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΣΥΝΑΓΩΓΗ (CONVECTION)	25
2.3.3 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (RADIATION)	25
2.4 ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΥΛΗΣ	26
2.4.1 ΤΗΞΗ ↔ ΠΗΞΗ	26
2.4.2 ΕΞΑΤΜΙΣΗ ↔ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ	26
2.4.3 ΕΞΑΧΝΩΣΗ ↔ ΑΠΟΘΕΣΗ	26
2.5 ΜΟΡΦΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	26

2.5.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (SENSIBLE HEAT STORAGE SYSTEMS-SHS) .....	26
2.5.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (LATENT HEAT STORAGE SYSTEMS-LHS).....	29
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2 <sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ .....	30
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM) .....</b>	<b>31</b>
3.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	31
3.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ .....	32
3.2.1 ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ .....	32
3.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ PCM .....	33
3.3.1 ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ .....	33
3.3.2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	33
3.3.3 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ .....	34
3.4 ΜΕΤΡΗΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ PCM .....	34
3.4.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ T-HISTORY .....	35
3.5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ .....	36
3.5.1 ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΟΥΣΙΕΣ.....	37
3.5.2 ΑΝΟΡΓΑΝΕΣ ΟΥΣΙΕΣ.....	39
3.5.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ .....	40
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3 <sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ .....	41
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ .....</b>	<b>42</b>
4.1 ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ .....	42
4.1.1 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΦΑΣΕΩΝ .....	42
4.1.2 ΥΠΟΨΥΞΗ-ΥΠΕΡΨΥΞΗ.....	43
4.1.3 ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ PCM ΜΕ ΑΛΛΑ ΥΛΙΚΑ .....	44
4.2 ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ-ΕΝΘΥΛΑΚΩΣΗ PCM .....	45
4.2.1 ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ PCM ΣΕ ΜΑΚΡΟΚΑΨΟΥΛΕΣ .....	45
4.2.2 ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ PCM ΣΕ ΜΙΚΡΟΚΑΨΟΥΛΕΣ.....	46
4.2.3 ΕΜΒΑΠΤΙΣΗ PCM ΣΕ ΠΟΡΩΔΕΣ ΥΛΙΚΟ .....	47
4.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΥΑΦ ΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΕΠΑΦΗΣ ΘΕΡΜΟΥ ΜΕΣΟΥ .....	48
4.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΥΑΦ ΑΜΕΣΗΣ ΕΠΑΦΗΣ ΘΕΡΜΟΥ ΜΕΣΟΥ .....	49
4.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ .....	50
4.5.1 ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ Ή ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ PCM ΣΤΑ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ .....	50
4.5.2 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ PCM ΣΤΟΥΣ ΤΟΙΧΟΥΣ .....	51
4.5.3 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ PCM ΣΤΟ ΔΑΠΕΔΟ ΚΤΙΡΙΟΥ .....	53
4.5.4 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ PCM ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΡΟΣΙΣΜΟΥ-ΨΥΞΗΣ .....	55

4.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	57
4.7 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ .....	57
4.8 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ .....	57
4.9 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ .....	59
4.10 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΣΩΜΑ .....	60
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 4 <sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ .....	64
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ .....</b>	<b>67</b>
5.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ .....	67
5.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥΣ ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ .....	68
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 5 <sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ .....	70
<b>ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ .....</b>	<b>71</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM) ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΣΕ ΤΟΙΧΟ, ΦΟΡΤΙΖΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΗΛΙΑΚΟΥΣ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ .....</b>	<b>72</b>
6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ .....	72
6.2 ΗΛΙΑΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ .....	75
6.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ .....	75
6.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ .....	80
6.5 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ .....	81
6.5.1 ΧΡΗΣΗ ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ .....	81
6.5.2 ΑΠΟΔΙΔΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ .....	81
6.5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΝΕΡΓΟΥΣ ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ .....	82
6.5.4 ΙΣΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΑΛΛΑΣΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ .....	85
6.5.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΡΟΣΔΙΣΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ .....	86
6.5.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ-ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ .....	87
6.6 1 <sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΑΡΧΙΚΟΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ .....	88
6.7 2 <sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΑΥΞΗΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ $A_c = 3 \text{ m}^2$ .....	99
6.8 3 <sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΑΥΞΗΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ $A_c = 4 \text{ m}^2$ .....	97
6.9 4 <sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΑΥΞΗΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ PCM $l_{PCM} = 0,02 \text{ m}$ .....	112
6.10 5 <sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΑΥΞΗΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ PCM $l_{PCM} = 0,04 \text{ m}$ .....	119
6.11 6 <sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΑΥΞΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ $T_{\Delta} = 21^{\circ}\text{C}$ .....	127
6.12 7 <sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΑΥΞΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ $T_{\Delta} = 22^{\circ}\text{C}$ .....	133
6.13 8 <sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΑΥΞΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ $T_{\Delta} = 23^{\circ}\text{C}$ .....	140
6.14 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΗΣ ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	147
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 6 <sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ .....	158

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup> ΜΕΛΕΤΗ ΙΔΑΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCMs) ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΣΕ ΤΟΙΧΟ, ΦΟΡΤΙΖΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΗΛΙΑΚΟΥΣ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ, ΜΕ ΑΠΟΜΑΣΤΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΥ ΝΕΡΟΥ ΧΡΗΣΗΣ</b> .....	<b>159</b>
7.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ .....	159
7.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....	162
7.3 1 <sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ $A_c = 4 \text{ m}^2$ .....	166
7.4 2 <sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ $A_c = 10 \text{ m}^2$ .....	169
7.5 3 <sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ $A_c = 15 \text{ m}^2$ .....	172
7.6 4 <sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ $A_c = 20 \text{ m}^2$ .....	175
7.7 5 <sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ $A_c = 25 \text{ m}^2$ .....	179
7.8 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	182
7.9 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ PCM ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ .....	183
7.10 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΗΣ ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ .....	186
7.11 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΠΟΜΑΣΤΕΥΣΗΣ .....	191
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 7 <sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ .....	196
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup> ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ PCM-ΖΕΣΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΧΡΗΣΗΣ ΜΕ ΙΔΑΝΙΚΟ ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ</b> .....	<b>197</b>
8.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ .....	197
8.2 ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ .....	198
8.2.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 1 <sup>ης</sup> ΔΟΚΙΜΗΣ- ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ $A_c = 4\text{m}^2$ .....	199
8.2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 3 <sup>ης</sup> ΔΟΚΙΜΗΣ- ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ $A_c = 15\text{m}^2$ .....	200
8.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 5 <sup>ης</sup> ΔΟΚΙΜΗΣ- ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ $A_c = 25\text{m}^2$ .....	201
8.2.4 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	202
8.3 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΠΟΜΑΣΤΕΥΣΗΣ .....	202
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9<sup>ο</sup> ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ</b> .....	<b>207</b>
9.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	207
9.2 ΕΠΙΛΟΓΟΣ .....	208



# 1

## ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΡΙΣΗ

Αναμφισβήτητο γεγονός της σημερινής εποχής αποτελεί η παγκόσμια ενεργειακή κρίση. Η ραγδαία τεχνολογική εξέλιξη των τελευταίων ετών μέσα στην δομή, λειτουργία και καθημερινότητα κάθε κοινωνίας, έχει καταστήσει απαραίτητη την αδιάκοπη κατανάλωση ενέργειας. Η χρήση δεκάδων ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών συσκευών σε ατομικό επίπεδο και μόνο, σε συνδυασμό με την πληθυσμιακή αύξηση, οξύνει σημαντικά το πρόβλημα. Συνεχής, λοιπόν, αύξηση της κατανάλωσης, οδηγεί σε αυξημένη παραγωγή και ως φυσικό επακόλουθο, σε έλλειψη προσφοράς.

Με την είσοδο στον 20<sup>ο</sup> αιώνα, η παραγωγή ενέργειας στις βιομηχανικές χώρες προερχόταν σχεδόν αποκλειστικά από τον άνθρακα. Ωστόσο, με την ανάπτυξη των μέσων μεταφοράς εισήχθησαν στην παραγωγή ενέργειας πρώτα το πετρέλαιο και αργότερα το φυσικό αέριο.

Η αποκλειστική και συνεχής κατανάλωση των ορυκτών αυτών καυσίμων οδήγησε σε σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις αλλά και δραματική μείωση των αποθεμάτων παγκοσμίως. Οι κύριοι εκπεμπόμενοι ρύποι εξαιτίας της χρόνιας καύσης των υδρογονανθράκων είναι το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), το μονοξείδιο ( $\text{CO}$ ), πτητικές οργανικές ενώσεις ( $\text{VOCs}$ ), τα οξείδια του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) και του θείου ( $\text{SO}_x$ ). Οι υψηλές συγκεντρώσεις και τα προϊόντα των αντιδράσεων των παραπάνω αερίων στην ατμόσφαιρα, έχουν ως αποτέλεσμα σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα, τα οποία θα αναλυθούν στην συνέχεια.

Σαν αποτέλεσμα, η αναζήτηση για περιβαλλοντικά φιλικές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) αποτέλεσε την μόνη επιλογή. Με την στροφή στην εκμετάλλευση των φυσικών φαινομένων, σε συνδυασμό με τις νέες τεχνολογικές δυνατότητες, δημιουργήθηκαν εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρισμού, βασιζόμενες στην ηλιακή, αιολική ενέργεια, βιομάζα κλπ, προσφέροντας έτσι μία νέα κατεύθυνση στα ενεργειακά δεδομένα.



## 1.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ [βιβλ. 1, 2, 3, 4]

### 1.2.1 ΝΕΦΟΣ ΑΙΘΑΛΟΜΙΧΛΗΣ

Το νέφος αιθαλομίχλης παρατηρείται κατά την διάρκεια του χειμώνα με χαμηλές θερμοκρασίες και αυξημένο ποσοστό υγρασίας. Αποτελείται κυρίως από καπνώ-αιωρούμενα σωματίδια, μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>), παραγόμενα από εγκαταστάσεις κεντρικής θέρμανσης, μέσα μεταφοράς και την βιομηχανία. Με την συσσώρευση των παραπάνω ενώσεων σε χαμηλό υψόμετρο, δημιουργείται νέφος με μειωμένη ορατότητα και σοβαρή ατμοσφαιρική ρύπανση, επιβλαβής για την υγεία. Οι παραγόμενοι από την οξείδωση του SO<sub>2</sub>, ατμοί SO<sub>3</sub>, απορροφούν ταχύτατα υγρασία από την ατμόσφαιρα και σχηματίζουν σταγονίδια θειικού οξέος (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Η παρουσία των σταγονιδίων αυτών προκαλεί σοβαρά αναπνευστικά προβλήματα και αποτελεί κύριο συστατικό της όξινη βροχής. Αντιθέτως, σε μεγαλύτερο υψόμετρο το θειικό οξύ παίζει σημαντικό ρόλο στον σχηματισμό συννέφων, άρα και στην ανάκλαση ηλιακών ακτίνων, μετριάζοντας την υπερθέρμανση του πλανήτη λόγω της κλιματικής αλλαγής.

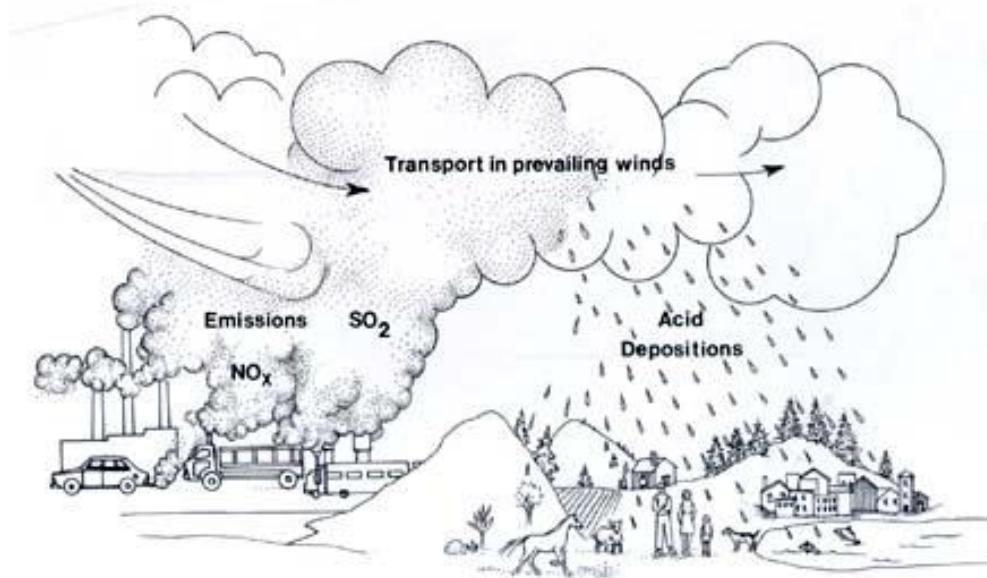
### 1.2.2 ΦΩΤΟΧΗΜΙΚΟ ΝΕΦΟΣ

Το φωτοχημικό νέφος παρατηρείται κατά την διάρκεια του καλοκαιριού εξαιτίας των αυξημένων εξατμίσεων των μέσων μεταφοράς. Οι πρωτογενείς ρύποι, το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα οξείδια του αζώτου (NO<sub>2</sub>, NO) και οι υδρογονάνθρακες διασπώνται υπό την επίδραση της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας (UV), πραγματοποιώντας φωτοχημικές αντιδράσεις. Η καφέ όψη του ουρανού οφείλεται στο καφέ χρώμα του διοξειδίου του αζώτου (NO<sub>2</sub>) σε υψηλή συγκέντρωση. Ο σημαντικότερος δευτερογενής ρύπος που παράγεται από την φωτοχημική αντίδραση των πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) με το διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>) είναι το όζον (O<sub>3</sub>). Η περιεκτικότητα του όζοντος παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ατμόσφαιρα, όπως θα αναφερθεί παρακάτω.

### 1.2.3 ΟΞΙΝΗ ΒΡΟΧΗ

Το φαινόμενο της όξινης βροχής παρατηρείται κυρίως σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές. Το καθαρό νερό έχει ουδέτερο pH ίσο με 7, ενώ η όξινη βροχή συνήθως χαμηλότερο του 5,6, αγγίζοντας το 3,5-2,6 σε τοποθεσίες υψηλής συγκέντρωσης ρύπων. Η οξύτητα αυτή οφείλεται στα σταγονίδια θειικού (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) και νιτρικού οξέος (HNO<sub>3</sub>) της ατμόσφαιρας που παρασύρονται από την βροχή καταλήγοντας στο έδαφος. Τα διοξείδια του θείου και του νατρίου, που βρίσκονται σε αφθονία λόγω της καύσης ορυκτών καυσίμων, οξειδώνονται σε τριοξείδια (SO<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub>), τα οποία απορροφώντας υδρατμούς σχηματίζουν με την σειρά τους τα δύο οξέα. Οι βασικότερες επιπτώσεις της όξινης βροχής αφορούν τόσο την χλωρίδα και την πανίδα, όσο και τα κτίρια. Η αύξηση της οξύτητας του εδάφους και του νερού φθείρει τα δάση, τα φυτά, τους υδρόβιους οργανισμούς, ενώ εμφανής είναι και η διάβρωση των μνημείων από την συνεχή έκθεσή τους στα οξέα.





Σχήμα 1.2.3/1 : Ο κύκλος της όξινης βροχής

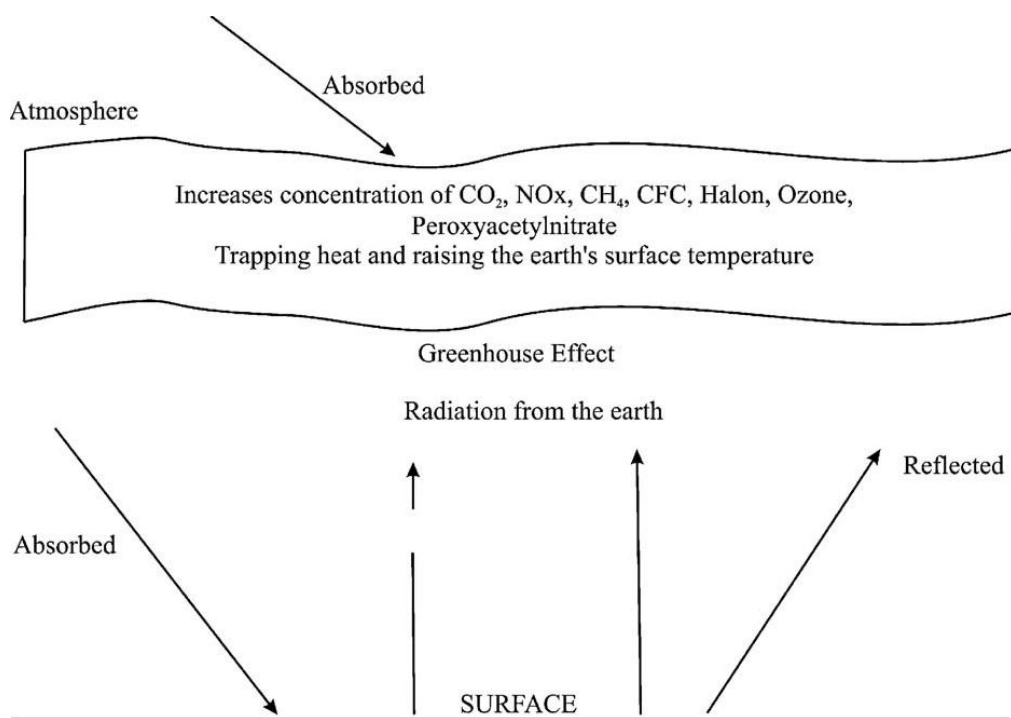
#### 1.2.4 ΤΡΥΠΑ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ

Το όζον ( $O_3$ ) κατέχει διπλό ρόλο, λειτουργώντας ως ρύπος αλλά και ως προστασία για το περιβάλλον. Στην στρατόσφαιρα σχηματίζει μια προστατευτική αραιή στιβάδα που απορροφά την υπεριώδη ακτινοβολία (UV) του ηλίου, η οποία είναι επιβλαβής για τον άνθρωπο και κάθε ζωντανό οργανισμό. Αντιθέτως, το όζον χαμηλότερα, στην τροπόσφαιρα, δρα ως επικίνδυνος ρύπος προκαλώντας πνευμονολογικές ασθένειες, βλάβες σε φυτά, δάση και υλικά. Η τρύπα του όζοντος παρατηρήθηκε αρχικά στην Ανταρκτική, όπου λόγω της περιορισμένης ηλιακής ακτινοβολίας η παραγωγή του όζοντος στην στρατόσφαιρα είναι μειωμένη. Στην επιδείνωση της κατάστασης συμβάλλουν οι αυξημένες συγκεντρώσεις μονοξειδίου του αζώτου (NO), υδροξειδίου (OH) και των χλωροφθορανθράκων, σε συνδυασμό με την υπεριώδη ακτινοβολία, οι οποίες αντιδρούν καταστρέφοντας μόρια όζοντος. Σαν αποτέλεσμα, με την απώλεια του στρατοσφαιρικού όζοντος αυξάνεται ο κίνδυνος για καρκίνο του δέρματος, οφθαλμολογικές παθήσεις και καταστροφή χλωρίδας και πανίδας.

#### 1.2.5 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Πρόκειται για μία φυσική διεργασία κατά την οποία τα αέρια του θερμοκηπίου δεσμεύουν μέρος της ανακλώμενης, από την Γη, ακτινοβολίας, θερμαίνοντας την ατμόσφαιρα και διατηρώντας έτσι την μέση θερμοκρασία της Γης στους  $15^\circ C$ . Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη περιεκτικότητα αερίου αντιστοιχεί στο διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ), με ακόλουθα το μεθάνιο ( $CH_4$ ) και το υποξείδιο του αζώτου ( $N_2O$ ), ενώ σε μειωμένη περιεκτικότητα βρίσκονται οι υδρογονάνθρακες (HFCs), οι υπερφθοράνθρακες (PFCs) και το εξαφθοριούχο θείο ( $SF_6$ ). Εξαιτίας της καύσης ορυκτών καυσίμων, η αυξημένη συγκέντρωση των παραπάνω αερίων έχει προκαλέσει παγκόσμια άνοδο της μέσης θερμοκρασίας της Γης, οδηγώντας σε

κλιματικές αλλαγές (λιώσιμο των πολικών πάγων, αύξηση της στάθμης της θάλασσας, ανισορροπία οικολογικού συστήματος).



Σχήμα 1.2.5/1 : Σχηματική Απεικόνιση Φαινομένου του Θερμοκηπίου

### 1.3 ΠΟΛΙΤΙΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ [βιβλ. 5]

Η ανάγκη για αλλαγή πορείας στην παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας κρίθηκε επιτακτική. Την πρώτη, νομοθετικά, κίνηση για μια περιβαλλοντική πολιτική, αποτέλεσε το Πρωτόκολλο του Κιότο. Οι συμμετέχουσες, στο πρωτόκολλο, χώρες δεσμεύθηκαν στην μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μέσω ποσοτικών και χρονικών περιορισμών, έχοντας όμως την δυνατότητα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών. Ωστόσο, μία τέτοια παγκόσμια κίνηση για την ελαχιστοποίηση ρύπων και αποβλήτων προϋποθέτει την κατανομή της παραγωγής ενέργειας σε νέες, περιβαλλοντικά φιλικές, πηγές. Με αυτόν τον τρόπο η διείδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην παραγωγή ήταν αναπόφευκτη.

### 1.4 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ [βιβλ. 6, 7, 8, 9]

Οι αυξανόμενες εκπομπές καυσαερίων και η άνοδος στις τιμές ορυκτών καυσίμων, αποτέλεσαν τους δύο κυριότερους λόγους για την προσπάθεια ενσωμάτωσης εναλλακτικών μορφών ενέργειας. Οι ΑΠΕ αποτελούν ανεξάντλητες πηγές ενέργειας, βρίσκονται σε αφθονία και είναι περιβαλλοντικά καθαρές, αφού παράγουν ελάχιστους δευτερογενείς ρύπους.

Οι κυριότερες μορφές είναι :

#### ❖ **Ηλιακή Ενέργεια**

Πρόκειται για το ακτινοβολούμενο φως και την ακτινοβολούμενη θερμότητα από τον Ήλιο. Είναι εκμεταλλεύσιμη για την παραγωγή ηλεκτρισμού (θερμική ενέργεια → ηλεκτρική ενέργεια) με φωτοβολταϊκά πάνελ, ηλιακούς συλλέκτες, παραβολικά κάτοπτρα και πιάτα, αλλά και ηλιακούς πύργους. Επιπλέον, βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην θέρμανση νερού, οικιακών χώρων και βιομηχανικών εγκαταστάσεων (ενεργητικά ηλιακά συστήματα).

#### ❖ **Αιολική Ενέργεια**

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας με αιολικά πάρκα αποτελεί την 2<sup>η</sup> πιο αποδοτική ΑΠΕ μετά τα υδροηλεκτρικά έργα. Σε συνεχή εξέλιξη και άνοδο βρίσκονται τα υπεράκτια (offshore) αιολικά πάρκα που εκμεταλλεύονται μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου. Αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες εγκατάστασης των ανεμογεννητριών στην θάλασσα, ενώ χώρες όπως η Μ.Βρετανία και η Γερμανία, επενδύουν σοβαρά, αυξάνοντας την εγκατεστημένη ισχύ κάθε χρόνο.

#### ❖ **Υδροηλεκτρική Ενέργεια**

Αποτελεί την ΑΠΕ με το μεγαλύτερο ποσοστό συμμετοχής και αξιοπιστίας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με την πτώση νερού, ορισμένης παροχής, από συγκεκριμένο ύψος και την είσοδό του σε στρόβιλο, πραγματοποιείται μετατροπή της κινητικής ενέργειας του στροβίλου σε ηλεκτρική, εκμεταλλευόμενοι την δυναμική ενέργεια του ρευστού. Η απόδοση του υδροηλεκτρικού σταθμού είναι μέγεθος ανάλογο του ύψος του ταμιευτήρα του νερού από το έδαφος αλλά και της παροχής. Η ροή ελέγχεται με την κατασκευή φραγμάτων κατά την ροή ποταμών δημιουργώντας τεχνητές λίμνες (ταμιευτήρας).

#### ❖ **Βιομάζα**

Πρόκειται για απόβλητα της φύσης, παραπροϊόντα και κατάλοιπα βιομηχανικών επεξεργασιών και ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Πιο συγκεκριμένα, κτηνοτροφικά απόβλητα προσφέρονται για την παραγωγή βιοαερίου προς την εξασφάλιση θέρμανσης και ηλεκτρισμού. Παραπροϊόντα γεωργικών βιομηχανιών όπως φλοιοί, πυρήνες κλπ., με καλύτερο παράδειγμα το ελαιοπυρηνόξυλο, χρησιμοποιούνται ως καύσιμη ύλη για εγκαταστάσεις θέρμανσης. Σημειώνεται ότι η δασική βιομάζα και τα αστικά απόβλητα μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν μέσω καύσης ή αεριοποίησης.

#### ❖ **Γεωθερμία**

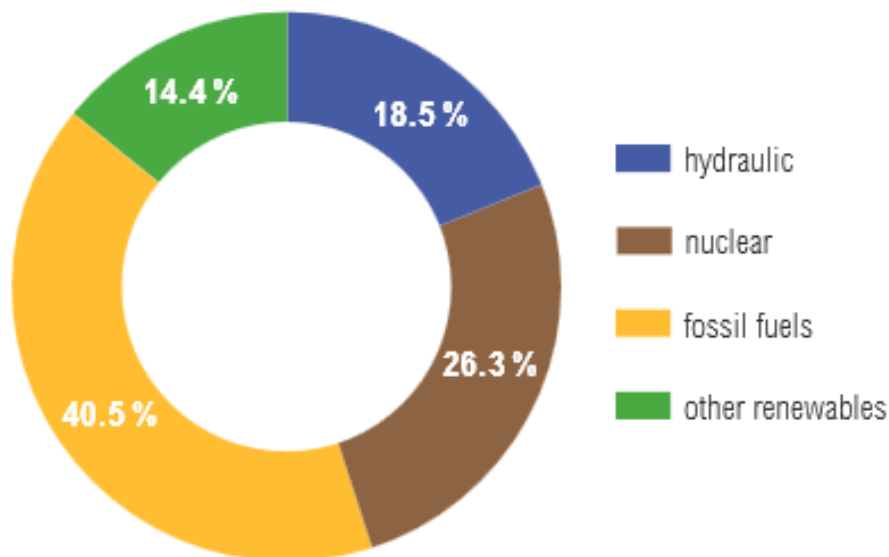
Η θερμική ενέργεια ρευμάτων θερμού νερού ή ατμών προερχόμενων από το υπέδαφος, αξιοποιείται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (εισαγωγή ατμών σε στρόβιλο) και την θέρμανση οικιακών χώρων, ακόμα και ολόκληρων οικισμών (τηλεθέρμανση).

## ❖ Ενέργεια της θάλασσας

Η συγκεκριμένη κατηγορία ΑΠΕ περιλαμβάνει την εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας των κυμάτων και της παλίρροιας, αλλά και της πιθανής θερμικής ενέργειας των ωκεανών. Με την τοποθέτηση υποβρύχιων στροβίλων αξιοποιείται η κίνηση των υδάτων της παλίρροιας, επιτυγχάνοντας έτσι συνέχεια στην παραγωγή λόγω της περιοδικότητας του φαινομένου. Η συγκεκριμένη όμως ΑΠΕ δεν αποτελεί βιώσιμη λύση λόγω των αντίξωων υποθαλάσσιων συνθηκών που κρατούν το κόστος της επένδυσης (εξοπλισμού κλπ) σε πολύ υψηλό επίπεδο.

### 1.4.1 ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΠΕ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με πρόσφατα στατιστικά δεδομένα του Ευρωπαϊκού Δικτύου Διαχειριστών Συστημάτων Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (European Network of Transmission System Operators for Electricity) για το 2014, οι ΑΠΕ αποτέλεσαν το 33% της συνολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη :



Σχήμα 1.4.1/1 : Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια στην Ευρώπη το 2014

Παγκοσμίως βέβαια, άγγιξαν το 50% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο έτος 2014, όπως αναφέρει ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA-International Energy Agency).

Το γεγονός ότι υπάρχει ασυνέχεια στην παραγωγή των ΑΠΕ λόγω της εξάρτησής τους από τα καιρικά φαινόμενα, τις καθιστούσε ως εφεδρικές πηγές ενέργειας. Για παράδειγμα, συνήθως υπάρχει χαμηλή ροή αξιοποιήσιμης αιολικής ισχύος, ανεβάζοντας έτσι και το κόστος. Η ανάγκη για ρυθμιστές τάσεως και συχνότητας, για συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αλλά και την συντήρηση αυτών, σε συνδυασμό με τον εξοπλισμό της ΑΠΕ, διατηρούσε το κόστος επενδύσεων σε

υψηλά επίπεδα. Ωστόσο, με την μελέτη και εξέλιξη της τεχνολογίας των ΑΠΕ παρατηρείται κάθοδος στην τιμή τους. Αποτελούν βιώσιμη πλέον λύση και για απομακρυσμένες περιοχές με προβλήματα ενέργειας ή ύδρευσης (έρημος, ορεινές και αγροτικές περιοχές), προσφέροντας ανάπτυξη και θέσεις εργασίας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1<sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- 
- <sup>1</sup> F.Barbir, T.N. Veziroglu and H.J. Plass JR , “**Environmental Damage due to fossil fuels use**”, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 15, Issue 10, 1990, Pages 739-749
  - <sup>2</sup> Γιάννης Ζιώμας, “**Ατμόσφαιρα-Ατμοσφαιρική Ρύπανση**”, ΕΜΠ Σχολή Χημικών Μηχανικών, Αθήνα 2007
  - <sup>3</sup> <http://lap.physics.auth.gr/atmdiasp/simeiwseis/chapter2.pdf>
  - <sup>4</sup> [http://www.chem.uoa.gr/courses/organiki\\_1/oikotoxikologia/oikt\\_x\\_K03.pdf](http://www.chem.uoa.gr/courses/organiki_1/oikotoxikologia/oikt_x_K03.pdf)
  - <sup>5</sup> <http://www.ypeka.gr/?tabid=443>
  - <sup>6</sup> N.L. Panwar, S.C. Kaushik, Surendra Kothari, “**Role of renewable energy sources in environmental protection: A review**”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 3, April 2011, Pages 1513–1524
  - <sup>7</sup> <http://environ.survey.ntua.gr/files/mathimata/6420/APE-kef1-6.pdf>
  - <sup>8</sup> [https://www.entsoe.eu/Documents/Publications/Statistics/electricity\\_in\\_europe/entsoe\\_electricity\\_in\\_europe\\_2014.pdf](https://www.entsoe.eu/Documents/Publications/Statistics/electricity_in_europe/entsoe_electricity_in_europe_2014.pdf)
  - <sup>9</sup> <https://www.iea.org/Textbase/npsum/WEO2015SUM.pdf>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η περιβαλλοντική διάσταση της ενεργειακής πολιτικής έχει εισάγει ποικίλες μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μη αστικές και απομακρυσμένες, από την πηγή κατανάλωσης, περιοχές. Για τον λόγο αυτόν, υπάρχει δυσκολία στην μεταφορά και διανομή της ενέργειας όσον αφορά την συνεχώς μεταβαλλόμενη κατανομή της ζήτησης, αλλά και την αντίστοιχη τοποθεσία της. Λαμβάνοντας υπόψη και την αδυναμία άμεσης ανταπόκρισης των ΑΠΕ σε πιθανές ελλείψεις, δημιουργείται η ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας. Η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας αποθηκεύεται ή χρησιμοποιείται για διεργασίες μετατροπής της σε άλλες μορφές που μπορούν αντίστοιχα να παράξουν πάλι ηλεκτρισμό. Χρησιμοποιούνται τεχνολογίες συσσώρευσης ενέργειας υπό την μορφή χημικής ενέργειας, ηλεκτρικής, ηλεκτροχημικής, μηχανικής αλλά και θερμικής ενέργειας (θερμότητα).

#### 2.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ [βιβλ. 1, 2, 3, 4, 5]

##### 2.1.1 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΜΕ ΜΕΣΟ ΤΟ ΝΕΡΟ

Η ψύξη ή θέρμανση του νερού σε ώρες χαμηλής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας εξοικονομεί ενέργεια τις ώρες αιχμής. Συγκεκριμένα, η χρήση νερού ψύξης διευκολύνει την λειτουργία εναλλακτών θερμότητας και μειώνει το κόστος λειτουργίας κλιματιστικών συσκευών.

##### 2.1.2 ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (CRYOGENIC ENERGY STORAGE)

Πρόκειται για σύστημα βασιζόμενο στην χρήση υγρού αέρα ή υγρού αζώτου (κρυογενικά υγρά). Με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε ώρες μη αιχμής, ο αέρας ή το άζωτο ψύχονται στην θερμοκρασία υγροποίησης και αποθηκεύονται σε υγρή μορφή (αποθήκευση ενέργειας). Αντίθετα, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το κρυογενικό υγρό θερμαίνεται, επανέρχεται σε αέρια μορφή και τροφοδοτείται σε στρόβιλο που συνδέεται με γεννήτρια. Η θέρμανση του υγρού μπορεί να γίνει με έκθεση σε αέρα συνθηκών περιβάλλοντος ή και με θέρμανση από καυσαέρια (waste heat). Εναλλακτικοί τρόποι εκμετάλλευσης του κρυογενικού υγρού είναι ο δροσισμός, η ψύξη, η χρήση σε κλιματιστικές μονάδες αλλά και ως καύσιμο για οχήματα.

##### 2.1.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕ ΤΗΤΗΓΜΕΝΑ ΑΛΑΤΑ (MOLTEN SALTS)

Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται κυρίως στο ηλιοθερμικό σύστημα των ηλιακών πύργων. Η θερμοκρασία τήξης των αλάτων είναι περίπου 131 °C και αποτελούν συνήθως μίγμα νιτρικού νατρίου, νιτρικού καλίου και νιτρικού ασβεστίου. Για τον λόγο αυτόν τα άλατα παραμένουν σε υγρή μορφή στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας του ηλιακού πύργου (566 °C). Το εργαζόμενο μέσο (άλατα) διατηρείται σε θερμοκρασία 288 °C στην ψυχρή δεξαμενή και τροφοδοτείται στον πύργο όπου θερμαίνεται στους 566 °C, για να αποθηκευτεί

στην συνέχεια στην θερμή δεξαμενή (αποθήκευση θερμικής ενέργειας). Στην περίπτωση ζήτησης ενέργειας, οδηγείται σε εναλλάκτη θερμότητας ρευμάτων αλάτων και νερού, με αποτέλεσμα την παραγωγή ατμού. Ο ατμός περιστρέφει τον στρόβιλο και μέσω γεννήτριας παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Το ψυχρό πλέον τετηγμένο άλας επιστρέφει στην ψυχρή δεξαμενή και οι υγροποιημένοι πλέον ατμοί στην δεξαμενή νερού. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται κάθε μέρα και πρόκειται ουσιαστικά για κλειστό κύκλωμα τετηγμένων αλάτων και νερού. Το θερμό μίγμα μπορεί να αποθηκευτεί το μέγιστο μία εβδομάδα με απώλειες 1 °F (17,22 °C) την ημέρα και είναι διαθέσιμο ανά πάσα στιγμή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

#### 2.1.4 ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PHASE CHANGE MATERIALS-PCMs)

Πρόκειται για υλικά που αποθηκεύουν λανθάνουσα θερμότητα μέσω της αλλαγής φάσης από στερεό σε υγρό. Με την επαναφορά τους στην στερεή μορφή απελευθερώνουν την θερμότητα στο περιβάλλον τους. Παρουσιάζονται αναλυτικά σε επόμενα κεφάλαια.

Σύμφωνα με την βάση δεδομένων του Ευρωπαϊκού Συνδέσμου για την Αποθήκευση Ενέργειας (European Association for Storage of Energy-EASE) οι τεχνολογίες που παρουσιάζουν μεγαλύτερη αξιοπιστία και απόδοση, δεν αφορούν την αποθήκευση θερμότητας, αλλά την αποθήκευση διαφορετικών μορφών ενέργειας.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται κυρίως συστήματα αντλησιοταμίευσης (αποθήκευση μηχανικής ενέργειας), κλασσικές μπαταρίες ιόντων λιθίου (Lithium Ion-αποθήκευση ηλεκτροχημικής ενέργειας) και μπαταρίες ροής (αποθήκευση ηλεκτροχημικής ενέργειας).

## 2.2 ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ [βιβλ. 6]

Η θερμότητα (θερμική ενέργεια) ορίζεται ως η μορφή ενέργειας που μεταδίδεται από ένα σύστημα υψηλότερης θερμοκρασίας σε ένα σύστημα χαμηλότερης θερμοκρασίας και παύει όταν τα δύο συστήματα επέλθουν σε θερμοκρασιακή ισορροπία. Διακρίνεται σε δύο μορφές, την αισθητή και την λανθάνουσα θερμότητα.

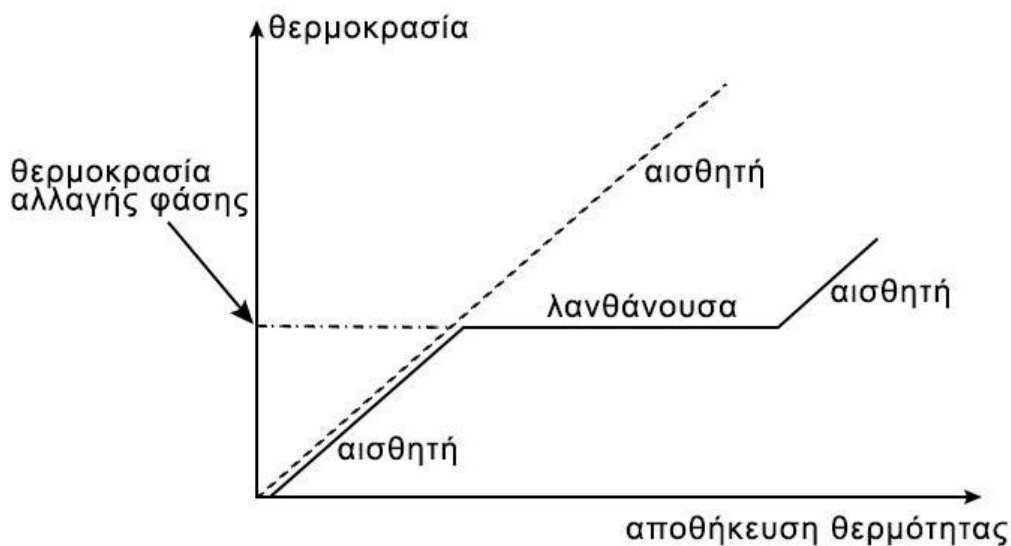
### 2.2.1 ΑΙΣΘΗΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ (SENSIBLE HEAT)

Ορίζεται ως το ποσό θερμότητας που απορροφά ή αποβάλλει ένα υλικό αυξάνοντας ή μειώνοντας την θερμοκρασία του, αντίστοιχα, **πριν και μετά** την αλλαγή φάσης (στερεό → υγρό, υγρό → αέριο, στερεό → αέριο και αντίστροφα). Η θερμοκρασία αυξάνεται έως το σημείο τήξης ή βρασμού (εξάτμιση), ενώ μειώνεται έως το σημείο πήξης ή υγροποίησης. Η μεταβολή της θερμοκρασίας του μέσου πρόκειται ουσιαστικά για μεταβολή της κινητικής ενέργειας των μορίων, με αποτέλεσμα την αύξηση ή μείωση της μέσης απόστασης μεταξύ τους (διαστολή ή συστολή αντίστοιχα).

### 2.2.2 ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ (LATENT HEAT)

Ορίζεται ως το ποσό θερμότητας που απορροφά ή αποβάλλει ένα υλικό **μόνο** κατά την αλλαγή φάσης υπό σταθερή θερμοκρασία (τήξης, βρασμού, πήξης, υγροποίησης αντίστοιχα) και πίεση. Αποτελεί στην ουσία την εσωτερική ενέργεια (δυναμική) που απαιτείται ή απελευθερώνεται για την δημιουργία ή διάσπαση, αντίστοιχα, των δεσμών μεταξύ των μορίων του υλικού.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η μορφή με την οποία αποθηκεύεται η θερμική ενέργεια που προσφέρεται στο μέσο σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του :



Σχήμα 2.2.2/1 : Διάγραμμα Αποθήκευσης Θερμότητας-Θερμοκρασίας του υλικού

Στο σημείο αυτό, πρέπει να ορισθεί η **Θερμοχωρητικότητα (Heat Capacity)** ενός υλικού, συστήματος ή σώματος. Πρόκειται για το ποσό της θερμότητας που απαιτείται για την μεταβολή της θερμοκρασίας του κατά ένα βαθμό Kelvin ή Celsius.

### 2.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ [βιβλ. 7, 8]

#### 2.3.1 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΓΩΓΗ (CONDUCTION)

Αγωγή πραγματοποιείται με την επαφή ακίνητων σωμάτων, εννοώντας στερεά και ρευστά (υγρά, αέρια) σε ηρεμία, ενώ δεν συνοδεύεται από αλλαγή φάσης των μέσων. Η συναλλαγή της θερμικής ενέργειας γίνεται μέσω της κινητικής ενέργειας σε μοριακό επίπεδο, δηλαδή η διαφορά κινητικής ενέργειας των μορίων αντιστοιχεί στην θερμοκρασιακή τους διαφορά. Στα στερεά σώματα η θερμότητα μεταδίδεται με ταλαντώσεις των μορίων του πλέγματος, αλλά και με την ελεύθερη κίνηση των ηλεκτρονίων που διαχέουν την θερμική ενέργεια στον όγκο του στερεού από τις περιοχές μεγαλύτερης θερμοκρασίας σε αυτές με μικρότερη. Στην περίπτωση των ρευστών η συναλλαγή θερμότητας επιτυγχάνεται με την διάχυση, δηλαδή τις



τυχαίες ελαστικές κρούσεις των μορίων κατά την κίνηση του ρευστού. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (ειδική αγωγιμότητα)  $k$  ενός υλικού, με μονάδες  $[W/m K]$ , εκφράζει την ευκολία ή δυσκολία διάδοσης της θερμότητας σε αυτό. Συνεπώς εξαρτάται από το υλικό και μεταβάλλεται ανάλογα με την θερμοκρασία του σώματος.

### 2.3.2 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΣΥΝΑΓΩΓΗ (CONVECTION)

Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή πραγματοποιείται μεταξύ στερεού σώματος και κινούμενου ρευστού. Αρχικά υπάρχει αγωγή θερμότητας από το στερεό στα μόρια του ρευστού που βρίσκονται σε επαφή με αυτό και στην συνέχεια, μέσω διάχυσης, η θερμική ενέργεια μεταφέρεται και αποθηκεύεται σε όλα τα μόρια της μάζας του ρευστού. Συγκεκριμένα, στην περιοχή του ρευστού κοντά στο στερεό τοίχωμα, η ταχύτητα της ροής έχει μικρές τιμές οπότε επικρατεί η μετάδοση με διάχυση. Αντίθετα, μακριά από το τοίχωμα η ταχύτητα της ροής είναι αυξημένη, άρα η θερμότητα μεταδίδεται με την κίνηση-μεταφορά των μορίων του ρευστού. Η ροή της θερμότητας με συναγωγή είναι μέγεθος ανάλογο της κινητικής ενέργειας του ρευστού, ενώ εμφανίζεται σε δύο μορφές, την εξαναγκασμένη και την ελεύθερη ή φυσική συναγωγή. Στην περίπτωση της εξαναγκασμένης συναγωγής το ρευστό τίθεται σε κίνηση στην επιφάνεια του στερεού σώματος λόγω εξωτερικού παράγοντα-μηχανισμού, πχ ενός ανεμιστήρα. Ωστόσο, στην ελεύθερη συναγωγή η κίνηση του ρευστού προκαλείται από τις μεταβολές πυκνότητας λόγω θερμοκρασιακών διαφορών στην μάζα του ρευστού. Σε αντίθεση με την αγωγή, στον μηχανισμό της συναγωγής υπάρχουν περιπτώσεις με αλλαγή φάσης του υλικού, απορροφώντας λανθάνουσα θερμότητα, όπως θα επεξηγηθεί παρακάτω. Τέλος, ο συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας (ειδική συναγωγιμότητα)  $h$  ενός υλικού, με μονάδες  $[W/m^2 K]$ , εξαρτάται από το είδος της ροής, την μορφή της στερεής επιφάνειας και τα χαρακτηριστικά του ρευστού. Ειδικότερα, την ταχύτητα, το δυναμικό ιξώδες και την πυκνότητα του ρευστού, τις γεωμετρικές συνθήκες αλλά και την ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού υπό σταθερή πίεση  $C_p$ .

### 2.3.3 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (RADIATION)

Στον μηχανισμό της ακτινοβολίας η μεταφορά της θερμότητας γίνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μήκους κύματος  $\lambda=0,1 - 100 \mu m$ , που δημιουργούνται με μεταβολές της ενεργειακής κατάστασης των ηλεκτρονίων των ατόμων στο σώμα. Η συναλλαγή αυτή δεν απαιτεί την ύπαρξη ύλης, ενώ ενισχύεται σημαντικά στο κενό. Κάθε σώμα στερεό, υγρό ή αέριο, με θερμοκρασία μεγαλύτερη του απολύτου μηδέν ( $0 \text{ Kelvin}$ ), εκπέμπει θερμική ακτινοβολία, ωστόσο ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το μέλαν σώμα. Μέλαν σώμα (blackbody) θεωρείται εκείνο που σε συγκεκριμένη θερμοκρασία  $T$  απορροφά όλη την προσπίπτουσα θερμική ακτινοβολία για όλα τα μήκη κύματος, εκλύοντας έτσι το μέγιστο ποσό θερμικής ενέργειας ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις στο χώρο. Αξίζει να σημειωθεί ότι η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα σώμα, κατά ένα ποσοστό απορροφάται, ένα μέρος της ανακλάται από το σώμα και η υπόλοιπη το διαπερνά και διαφεύγει στο περιβάλλον του. Κάθε σώμα παρουσιάζει διαφορετικές ιδιότητες με τα ποσοστά απορρόφησης, ανάκλασης και διάβασης να ποικίλουν.

## 2.4 ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΥΛΗΣ [βιβλ. 9, 10]

### 2.4.1 ΤΗΞΗ ↔ ΠΗΞΗ

Η μετατροπή στερεού σε υγρό ονομάζεται τήξη, ενώ η αντίστροφη διαδικασία ονομάζεται πήξη. Το μέσο απορροφά ή απελευθερώνει θερμότητα παραμένοντας σταθερά στην θερμοκρασία τήξης ή πήξης, οι οποίες ταυτίζονται και αποτελούν χαρακτηριστικό του υλικού. Το σημείο τήξης αντιστοιχεί σε συγκεκριμένες συνθήκες, ενώ μεταβάλλεται ανάλογα με την εξωτερική πίεση που ασκείται στο υλικό. Η αναλογία αυτή αποτελεί κανόνα για όλα τα υλικά, εκτός από το νερό και το βισμούθιο, στα οποία το σημείο τήξης μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα της πίεσης. Κατά την διάρκεια της αλλαγής φάσης η πίεση διαφοροποιείται ελάχιστα, ενώ υπάρχει αύξηση του όγκου του μέσου (λιγότερο από 10%) κατά την τήξη, εκτός από την περίπτωση του νερού, στην οποία υπάρχει μείωση.

### 2.4.2 ΕΞΑΤΜΙΣΗ ↔ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ

Η αλλαγή φάσης ενός υγρού σε αέριο ονομάζεται εξάτμιση, ενώ η αντίστροφη διαδικασία ονομάζεται συμπύκνωση. Κατά την μεταβολή κατάστασης ενός υγρού, σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, συνυπάρχουν παραγόμενοι ατμοί και ποσότητα υγρού, με το σύστημα να οδηγείται σε κατάσταση ισορροπίας, όταν η ταχύτητα εξάτμισης εξισωθεί με την ταχύτητα συμπύκνωσης. Η πίεση των ατμών σε αυτές τις συνθήκες ονομάζεται τάση ατμών και αποτελεί χαρακτηριστικό κάθε υγρού, ενώ μεταβάλλεται ανάλογα με την θερμοκρασία. Συνεχίζοντας, η θερμοκρασία στην οποία, η τάση ατμών αποκτά ίδια τιμή με την εξωτερική πίεση που ασκείται στο υγρό, ονομάζεται σημείο βρασμού (εξάτμισης) ή συμπύκνωσης του υγρού και παραμένει σταθερή για την ολοκλήρωση της μετατροπής κατάστασης.

### 2.4.3 ΕΞΑΧΝΩΣΗ ↔ ΑΠΟΘΕΣΗ

Το φαινόμενο της μετατροπής στερεού σε αέριο χωρίς την ενδιάμεση φάση του υγρού, ονομάζεται εξάχνωση, ενώ η αντίστροφη διαδικασία ονομάζεται απόθεση. Παρατηρείται σε στερεά με μεγάλη τάση ατμών ή αλλιώς τάση εξάχνωσης, η οποία από την στιγμή που εξισώνεται με την πίεση περιβάλλοντος του μέσου, ολοκληρώνεται η ισοθερμοκρασιακή μετατροπή σε αέριο. Η θερμοκρασία που αντιστοιχεί σε αυτή την τιμή της τάσης εξάχνωσης αποτελεί το σημείο εξάχνωσης του στερεού. Όσο μικρότερη είναι η απαιτούμενη λανθάνουσα θερμότητα εξάχνωσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση ατμών, ενώ η προδιάθεση του υλικού για εξάχνωση αυξάνεται ανάλογα με την θερμοκρασία του.

Αξίζει να αναφερθεί και η πιθανότητα μεταβολής κατάστασης στερεού σε στερεό, ωστόσο οι σημαντικότερες μεταβολές παρατέθηκαν αναλυτικά παραπάνω.

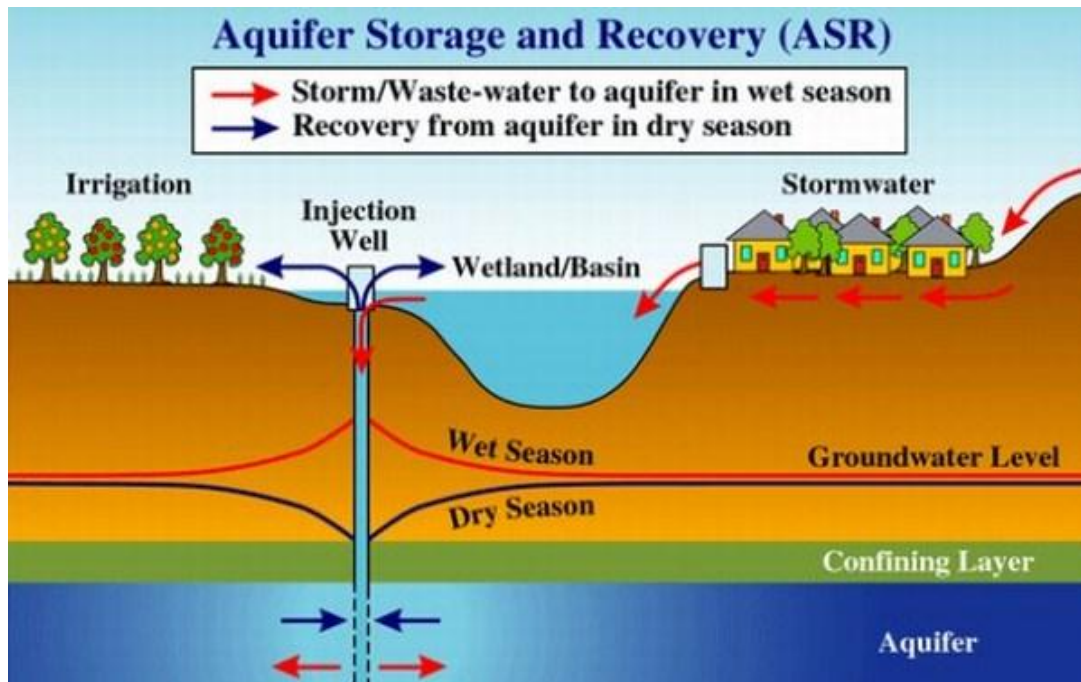
## 2.5 ΜΟΡΦΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ [βιβλ. 11, 12, 13, 14, 15, 16]

### 2.5.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (SENSIBLE HEAT STORAGE SYSTEMS-SHS)

Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται για βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη αποθήκευση, ενώ επειδή αποθηκεύεται αισθητή θερμότητα πραγματοποιείται

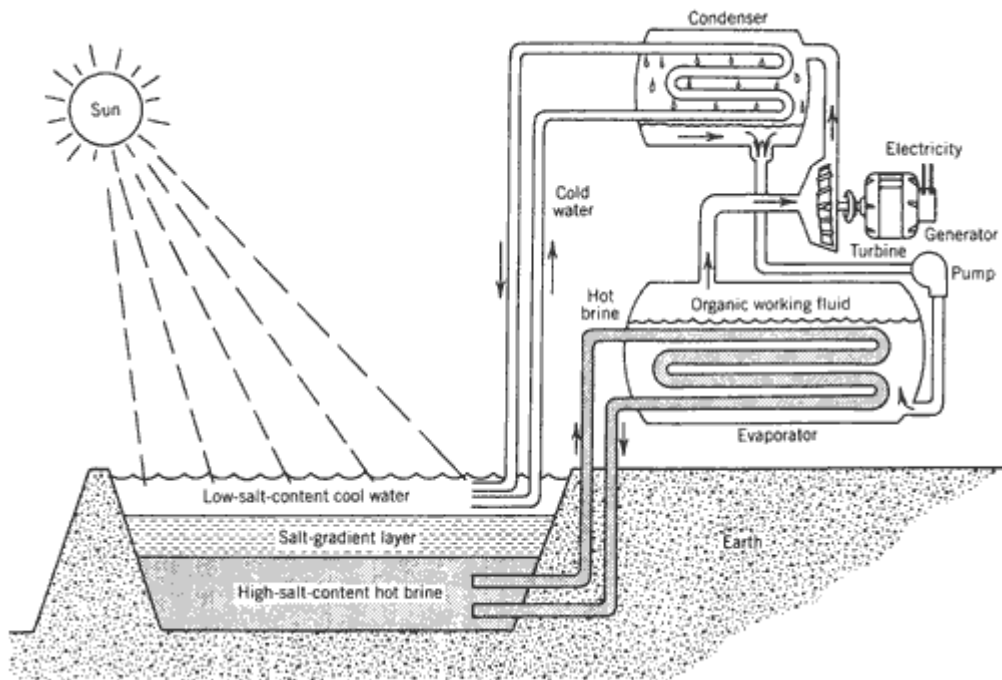
μεταβολή της θερμοκρασίας του μέσου. Η ποσότητα της θερμότητας που αποθηκεύεται εξαρτάται από την διαφορά θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου του συστήματος, την θερμοχωρητικότητα του μέσου αλλά και την μάζα του. Τα μέσα που ανταποκρίνονται στις ανάγκες του συστήματος είναι κυρίως το νερό, τα σκύρα (χαλίκια), το χώμα (έδαφος) και λιγότερο το τσιμέντο και τα ορυκτέλαια. Το νερό λόγω της υψηλής του θερμοχωρητικότητας, σχεδόν διπλάσιας της πέτρας και του χώματος, προτιμάται για την θέρμανση και τον δροσισμό χώρων και βρίσκει εφαρμογή σε δεξαμενές θερμού νερού οικιακής και βιομηχανικής χρήσης, υπόγειους υδροφορείς και ηλιακές λίμνες. Η πέτρα και το έδαφος χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα θέρμανσης αέρα και στην ευρύτερη κατηγορία στρωμάτων συσσωρευμένων σκύρων υλικού (rock beds). Τα αέρια παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλή θερμοχωρητικότητα, γεγονός που τα αποκλείει ως μέσα αποθήκευσης θερμότητας. Παρακάτω αναλύονται δύο βασικά συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, των υπόγειων υδροφορέων και της ηλιακής λίμνης.

Οι **υπόγειοι υδροφορείς** (aquifers) αποτελούν ουσιαστικά υπόγειους ταμειευτήρες μεγάλης διάρκειας, που συγκεντρώνουν νερά από υπόγειες λίμνες και ποτάμια, την βροχή και επιφανειακά ύδατα. Το έδαφος δρα ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας για την διατήρηση της επιθυμητής θερμοκρασίας του νερού. Η άντληση του νερού γίνεται με γεωτρήσεις και χρήση πηγαδιών για την αποθήκευση θερμού και κρύου νερού. Το κρύο νερό του υδροφορέα βρίσκει εφαρμογή στον δροσισμό κτιρίων το καλοκαίρι αλλά και στην ψύξη βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Παράλληλα, το θερμό πλέον νερό που επιστρέφει από τις εγκαταστάσεις ή από εναλλάκτες θερμότητας (εκμετάλλευση θερμότητας καυσαερίων) αποθηκεύεται μακροπρόθεσμα στα πηγάδια θερμού νερού και διατίθεται για άμεση θέρμανση χώρων κλπ. Η συγκεκριμένη εφαρμογή χρήσης των υδροφορέων αποτελεί σχετικά νέα τεχνολογία και αποκαλείται Aquifer Storage and Recovery (ASR).



Σχήμα 2.5.1/1 : Σχηματική Απεικόνιση Λειτουργίας Υπόγειων Υδροφορέων (Aquifers)

Συνεχίζοντας, ένα σύστημα **ηλιακής λίμνης** (solar pond) έχει μεγάλη επιφάνεια για την συσσώρευση ηλιακής ενέργειας και μέγιστο βάθος 2 μέτρα. Περιέχει νερό με διαλυμένα άλατα, για την αύξηση της πυκνότητας του μέσου, με την περιεκτικότητα των αλάτων να αυξάνεται ανάλογα με το βάθος. Η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από τον όγκο του διαλύματος αυξάνοντας την θερμοκρασία του, ενώ μέρος της απορροφάται από τον μαύρο πυθμένα της λίμνης. Στην υποθετική περίπτωση απουσίας των αλάτων, με την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού θα πραγματοποιούνταν παράλληλα μείωση της πυκνότητας και αύξηση του όγκου, με αποτέλεσμα την ανύψωση του θερμού νερού στην επιφάνεια της λίμνης. Συνεπώς, η θερμότητα του νερού θα αποβαλλόταν στο περιβάλλον και το κρύο νερό θα συγκεντρωνόταν στον πυθμένα. Ωστόσο, με την παρουσία αλάτων στην λίμνη, λόγω της αυξανόμενης περιεκτικότητάς τους με το βάθος, αυξάνεται ανάλογα και η πυκνότητα του μέσου, κρατώντας το θερμό μέσο στον πυθμένα και πετυχαίνοντας μέχρι και θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 90° C. Το θερμό διάλυμα αντλείται από τον πυθμένα για χρήση (θέρμανση, βιομηχανική χρήση κ.ά.) και επανατροφοδοτείται πλέον κρύο στην επιφάνεια της λίμνης, για την επανάληψη της διαδικασίας.



Σχήμα 2.5.1/2 : Σχηματική Απεικόνιση Λειτουργίας Ηλιακής Λίμνης (Solar Pond)

Τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας αποτελούν σημαντικά οικονομική επιλογή, ωστόσο, η χαμηλή ενεργειακή τους πυκνότητα τα καθιστά υποδεέστερα των συστημάτων λανθάνουσας θερμότητας. Χρησιμοποιούνται για οικιακές ανάγκες (ηλιακά παθητικά συστήματα για θέρμανση, δροσισμό, ζεστό νερό χρήσης), στην τηλεθέρμανση και σε βιομηχανίες.

### 2.5.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (LATENT HEAT STORAGE SYSTEMS-LHS)

Τα Υλικά Αλλαγής Φάσης-PCM (Phase Changing Materials) απελευθερώνουν θερμότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην θέρμανση χώρων, νερού χρήσης, σε ενδύματα κ.ά. όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Με την επιλογή, λοιπόν, κατάλληλου υλικού, επιτυγχάνεται η φόρτιση και αποφόρτιση θερμότητας με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, σε συγκεκριμένο και μικρό εύρος θερμοκρασιών.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2<sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

---

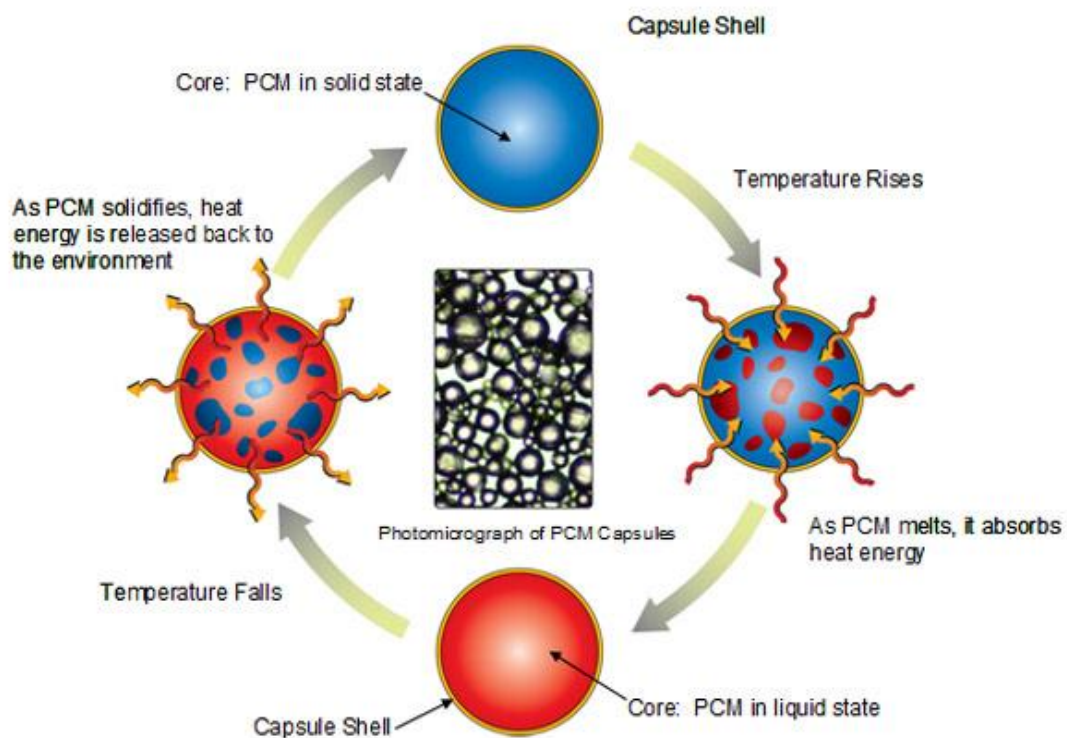
- <sup>1</sup> Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, Yulong Ding , **“Progress in electrical energy storage system: A critical review”**, Progress in Natural Science, Volume 19, Issue 3, 10 March 2009, Pages 291–312
- <sup>2</sup> Xing Luo, Jihong Wang, Mark Dooner, Jonathan Clarke , **“Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation”**, Applied Energy, Volume 137, 1 January 2015, Pages 511–536
- <sup>3</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Themis\\_\(solar\\_power\\_plant\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Themis_(solar_power_plant))
- <sup>4</sup> H. Ibrahima, A. Ilincaa, J. Perronb , **“Energy storage systems—Characteristics and comparisons”**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 12, Issue 4, June 2008, Pages 1221-1250
- <sup>5</sup> <http://energystorage.org/energy-storage/technologies/liquid-air-energy-storage-laes>
- <sup>6</sup> Harald Mehling, Luisa F. Cabeza , **“Heat and cold storage with PCM : An up to date introduction into basics and applications”** , Springer Science & Business Media, 15 Aug 2008
- <sup>7</sup> [http://ikaros.teipir.gr/heattransfer/deigma\\_book\\_A.pdf](http://ikaros.teipir.gr/heattransfer/deigma_book_A.pdf)
- <sup>8</sup> [http://users.uoi.gr/vkalpak/files/Notes\\_Heat-Transfer\\_Nikolos.pdf](http://users.uoi.gr/vkalpak/files/Notes_Heat-Transfer_Nikolos.pdf)
- <sup>9</sup> <http://www.chemeng.ntua.gr/content/ebooks/fysikoxhmeia/3-ygra.pdf>
- <sup>10</sup> <http://www.chemeng.ntua.gr/content/ebooks/fysikoxhmeia/5-sterea.pdf>
- <sup>11</sup> Ibrahim Dincer, Sadik Dost and Xianguo Li , **“Performance analysis of sensible heat storage systems for thermal applications”** , International Journal of Energy Research, Volume 21, Issue 12, 10 October 1997, Pages 1157–1171
- <sup>12</sup> <http://www.mechanizer.info/what-is-solar-pond/>
- <sup>13</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_pond](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_pond)
- <sup>14</sup> <http://www.bigreddog.com/aquifer-storage-a-promising-part-of-texas-water-solutions/>
- <sup>15</sup> [http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/PDF/XYTA\\_1.pdf](http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/PDF/XYTA_1.pdf)
- <sup>16</sup> [http://web.cecs.pdx.edu/~fishw/ESR320\\_LatentHeat.pdf](http://web.cecs.pdx.edu/~fishw/ESR320_LatentHeat.pdf)

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

## ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM)

### 3.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ [βιβλ. 1]

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η λανθάνουσα θερμότητα αποθηκεύεται ως εσωτερική ενέργεια των μορίων ενός υλικού που υπόκειται σε αλλαγή φάσης, υπό σταθερή θερμοκρασία. Ωστόσο, όταν αναφερόμαστε σε Υλικά Αλλαγής Φάσης (PCM), αναφερόμαστε συγκεκριμένα στην μεταβολή της κατάστασής τους από **στερεό σε υγρό** (τήξη ↔ πήξη), πάνω στην οποία στηρίζεται και η λειτουργία τους. Τα PCM αποτελούν υλικά ή μίγματα υλικών που χρησιμοποιούνται για την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του εξωτερικού τους περιβάλλοντος. Απορροφώντας ή απελευθερώνοντας θερμότητα στο περιβάλλον, υπόκεινται σε αλλαγή φάσης με μικρή μόνο διακύμανση της θερμοκρασίας τους. Επιτυγχάνουν, δηλαδή, έλεγχο της θερμοκρασίας συστημάτων, όπως εσωτερικούς χώρους κτιρίων, προϊόντα, ηλεκτρικές συσκευές κ.ά.



Σχήμα 3.1/1 : Σχηματική Απεικόνιση Κύκλου Μεταβολών Κατάστασης ΥΑΦ (Φόρτιση ↔ Αποφόρτιση)

Η μεταβολή υγρού ↔ αερίου δεν προτιμάται αφού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες του συστήματος, δίνοντας έτσι αρκετές παραμέτρους για εξέταση και ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, σε κλειστά συστήματα, διατηρώντας σταθερό τον όγκο, αυξάνεται η τάση ατμών, μεταβάλλοντας ανάλογα

και την θερμοκρασία εξάτμισης-υγροποίησης. Διατηρώντας σταθερή την πίεση του συστήματος, η ατμοποίηση του υλικού πραγματοποιείται με μεγάλη μεταβολή του όγκου, καθιστώντας το ακατάλληλο για χρήση.

### 3.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ [βιβλ. 2]

Τα υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιούνταν από το παρελθόν στην καθημερινότητα, χωρίς να έχουν αποτελέσει αντικείμενο μελέτης ή έρευνας ως προς τις λειτουργίες τους. Για παράδειγμα, η εκμετάλλευση του πάγου για την διατήρηση χαμηλών θερμοκρασιών σε τρόφιμα, αποτελεί διαχρονικό φαινόμενο. Ωστόσο, η δημιουργία μιγμάτων και ενώσεων ΥΑΦ επιτρέπει την ανταπόκριση σε ευρύ φάσμα εφαρμογών (κτίρια, μεταφορές προϊόντων, ένδυση, συσκευές κλπ), λόγω επιλογής του κατάλληλου θερμοκρασιακού εύρους λειτουργίας.

#### 3.2.1 ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

Οι πρώτες απόπειρες χρησιμοποίησης των PCM για την θέρμανση και τον δροσισμό κτιρίων ξεκίνησαν το 1920. Η σημαντικότερη μελέτη, στα αρχικά στάδια της τεχνολογίας αυτής, πραγματοποιήθηκε από την Δρ. Maria Telkes στο διάστημα του 1945-1951. Σε συνεργασία με τον αρχιτέκτονα Eleanor Raymond, κατασκευάστηκε σπίτι σε κτήμα στην Βοστώνη, ΗΠΑ, με μοναδική πηγή θερμότητας τα ΥΑΦ. Το κτίριο ενός ορόφου 135 m<sup>2</sup> με δύο υπνοδωμάτια, κουζίνα, σαλόνι και γκαράζ, ονομάστηκε σπίτι του Dover (Dover's House) και περιείχε τρία δοχεία αποθήκευσης PCM. Η θερμική ενέργεια τροφοδοσίας των δοχείων εξασφαλιζόταν από 18 ηλιακούς συλλέκτες συνολικής επιφάνειας 67 m<sup>2</sup>, ενώ η θέρμανση του κτιρίου επιτυγχανόταν με σύστημα μεταφοράς αγωγών-ανεμιστήρα. Το άλας του Glauber (ένυδροθειικό άλας με τύπο Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O) αποτέλεσε το χρησιμοποιούμενο ΥΑΦ, με σημείο τήξης 32 °C και συνολική μάζα 21 τόνων, διαμοιρασμένη στα δοχεία. Η ικανότητα αποθήκευσης των PCM πλησίαζε τα 11 MJ, ποσότητα θεωρητικά αρκετή για 12 ημέρες παροχής θερμότητας στον χώρο.

Η προς μελέτη εγκατάσταση κατοικήθηκε από τον Δρ. Anthony Nemethy και την οικογένειά του, μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, το 1948. Με μοναδικό σύστημα θέρμανσης τα PCM και θερμική άνεση της κατοικίας στους 21 °C, ακόμα και σε διαστήματα επτά ημερών συνεχόμενης συννεφιάς, η μελέτη όδευε επιτυχώς. Ωστόσο, τον τρίτο χρόνο λειτουργίας, η απόδοση του συστήματος μειώθηκε αισθητά. Λόγω των επαναλαμβανόμενων κύκλων μεταβολών κατάστασης, το ΥΑΦ διαχωρίστηκε σε διάλυμα και άνυδρο άλας (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), χάνοντας την αποθηκευτική του ικανότητα. Αξιοσημείωτη ήταν και η διάβρωση των δοχείων αποθήκευσης από την επαφή τους με το υλικό.

Οι μελέτες συνεχίστηκαν για μερικά χρόνια, παρουσιάζοντας όμως παρόμοια αποτελέσματα αποτυχίας του συστήματος. Η τελευταία προσπάθεια έγινε από δύο αρχιτέκτονες, Aladar και Victor Olgyay, με την συμβολή της Δρ. Telkes, καταλήγοντας σε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η εγκατάσταση χρησιμοποιούσε 12 τόνους άλατος Glauber, αποθηκευμένου, αυτήν την φορά, σε χαλύβδινους



κυλίνδρους διαμέτρου 0,1 m και ύψους 0,6 m. Για την περαιτέρω αποφυγή της διαβρωτικής συμπεριφοράς του ΥΑΦ, πραγματοποιήθηκε εμπλουτισμός με πυριτικό άλας νατρίου και χρωμίου.

### 3.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ PCM [βιβλ. 3]

Η επιλογή του υλικού αλλαγής φάσης για ένα σύστημα βασίζεται κυρίως στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του υλικού και στο μέγεθος της ενθαλπίας αλλαγής φάσης. Ωστόσο, το κατάλληλο υλικό οφείλει να παρουσιάζει την πλειονότητα των παρακάτω χαρακτηριστικών :

#### 3.3.1 ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- ❖ Θερμοκρασία αλλαγής φάσης (τήξης-πήξης) στο επιθυμητό εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης ή δροσισμού.
- ❖ Μεγάλη ενθαλπία αλλαγής φάσης, δηλαδή αυξημένο ποσό απορροφώμενης λανθάνουσας θερμότητας, επιτρέποντας την χρήση λιγότερης ποσότητας υλικού για την αποθήκευση της απαιτούμενης ενέργειας.
- ❖ Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα που επιτρέπει την αποθήκευση μεγάλων ποσών θερμότητας σε μειωμένο όγκο υλικού.
- ❖ Υψηλή θερμοχωρητικότητα για την περαιτέρω αποθήκευση αισθητής θερμότητας.
- ❖ Χημική σταθερότητα μετά από επαναλαμβανόμενους κύκλους μεταβολής κατάστασης (στερεό-υγρό-στερεό), με ομοιόμορφη τήξη-πήξη, αφού ο διαχωρισμός στερεής και υγρής φάσης ενδέχεται να προκαλέσει μεταβολή στη χημική σύσταση του υλικού (διαχωρισμός των φάσεων). Επίσης, απαιτείται χημική σταθερότητα για την αποφυγή αποσύνθεσης του υλικού (αυξημένη διάρκεια ζωής) σε περιπτώσεις έκθεσής του σε υψηλές θερμοκρασίες, ακτινοβολία και αέρια.
- ❖ Μικρή ή μηδαμινή υπόψυξη κατά την στερεοποίηση του υλικού στην θερμοκρασία πήξης.
- ❖ Υψηλή θερμική αγωγιμότητα, για μικρές μεταβολές θερμοκρασίας του υλικού κατά την φόρτιση και αποφόρτιση θερμότητας, υπό τον περιορισμό όγκου της συσκευασίας αλλά και τον χρόνο συναλλαγής της θερμότητας.

#### 3.3.2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- ❖ Χαμηλή τάση ατμών για την μηχανική σταθερότητα του συστήματος και την αντοχή της συσκευασίας του PCM.
- ❖ Μικρή μεταβολή όγκου κατά τις αλλαγές φάσης για διευκόλυνση στην επιλογή συσκευασίας του υλικού αλλά και στην γεωμετρία του συστήματος συναλλαγής θερμότητας.
- ❖ Συμβατότητα με άλλα υλικά και μη διαβρωτική συμπεριφορά για την μεγιστοποίηση της αντοχής της συσκευασίας του PCM αλλά και των υλικών που το περιβάλλουν, σε περίπτωση διαρροής.
- ❖ Μη τοξικά, μη εύφλεκτα, μη εκρηκτικά και μη δηλητηριώδη υλικά, για λόγους ασφαλείας.

### 3.3.3 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- ❖ Χαμηλή τιμή πώλησης για ανταγωνιστικότητα με άλλα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας.
- ❖ Διαθεσιμότητα σε μεγάλες ποσότητες.
- ❖ Ανακυκλώσιμα υλικά για οικονομικούς και περιβαλλοντικούς λόγους.

### 3.4 ΜΕΤΡΗΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ PCM [βιβλ. 4, 5, 6, 7]

Η επιλογή του κατάλληλου PCM για μία εφαρμογή/εγκατάσταση επηρεάζει άμεσα την επιτυχή λειτουργία της, συνιστά λοιπόν κρίσιμη διαδικασία. Βασίζεται στον υπολογισμό και την εξέταση των παρακάτω βασικών ιδιοτήτων του υλικού :

- ❖ Σημείο τήξης/στερεοποίησης (πήξης)
- ❖ Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
- ❖ Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ( $C_p$ )
- ❖ Λανθάνουσα θερμότητα τήξης-στερεοποίησης
- ❖ Βαθμός υπόψυξης ή υπέρψυξης (ποσό θερμότητας subcooling/supercooling)
- ❖ Βαθμός διάβρωσης σε συνήθη υλικά
- ❖ Βαθμός διαχωρισμού των φάσεων

Η εξέταση των υλικών οφείλει να γίνεται τόσο σε βραχυπρόθεσμο όσο και σε μακροπρόθεσμο πλαίσιο. Αναλυτικότερα, οι ιδιότητές τους πρέπει να παρακολουθούνται και να υπολογίζονται για έναν κύκλο φόρτισης, ενδεικτικά, αλλά και για περισσότερους με την πάροδο του χρόνου, ώστε να προκύπτουν αντιπροσωπευτικά και αληθή αποτελέσματα.

Οι πιο διαδεδομένοι μέθοδοι μέτρησης του σημείου τήξης, της λανθάνουσας θερμότητας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας είναι :

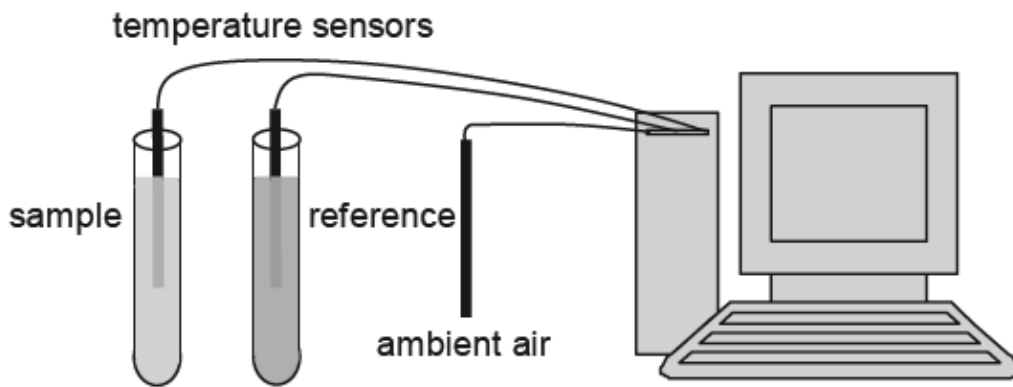
- ❖ Συμβατική Θερμιδομετρική Μέθοδος (Conventional Calorimetry Method)
- ❖ Ψηφιακό Θερμιδόμετρο (Differential Calorimetry)
- ❖ Διαφορική Θερμική Ανάλυση (Differential Thermal Analysis)
- ❖ Μέθοδος T-History
- ❖ Μέθοδος Double-Cell

Η ακρίβεια των μετρήσεων των παραπάνω μεθόδων είναι αρκετά ικανοποιητική, ωστόσο εξαρτάται από το μέγεθος του δείγματος, την ομοιογένεια του υλικού αλλά και την μορφή του, υπό χύδην μορφή ή συσκευασμένο. Το γεγονός αυτό λοιπόν, επηρεάζει την αξιοπιστία των μετρήσεων και προστίθεται στα μειονεκτήματα, παράλληλα με τον δαπανηρό εξοπλισμό για την διεξαγωγή των μετρήσεων. Επιπλέον, στην πλειονότητα των μεθόδων δεν είναι εφικτή η ταυτόχρονη μέτρηση παραπάνω από δύο δειγμάτων, καθιστώντας υποχρεωτική την επανάληψη της πειραματικής διαδικασίας για κάθε δείγμα.

### 3.4.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ T-HISTORY

Η μέθοδος T-History αναπτύχθηκε από τους Zhang Yinping και Jiang Yi, με αντικείμενο την μέτρηση λανθάνουσας θερμότητας τήξεως ενός ΥΑΦ σε αεροστεγείς σωλήνες. Βασίζεται στην μέθοδο διερεύνησης της ικανότητας συσσώρευσης θερμότητας (Lumped Heat Capacity Method), για την αξιοπιστία της οποίας, είναι απαραίτητες οι εξής παραδοχές, ως προς τις πειραματικές συνθήκες :

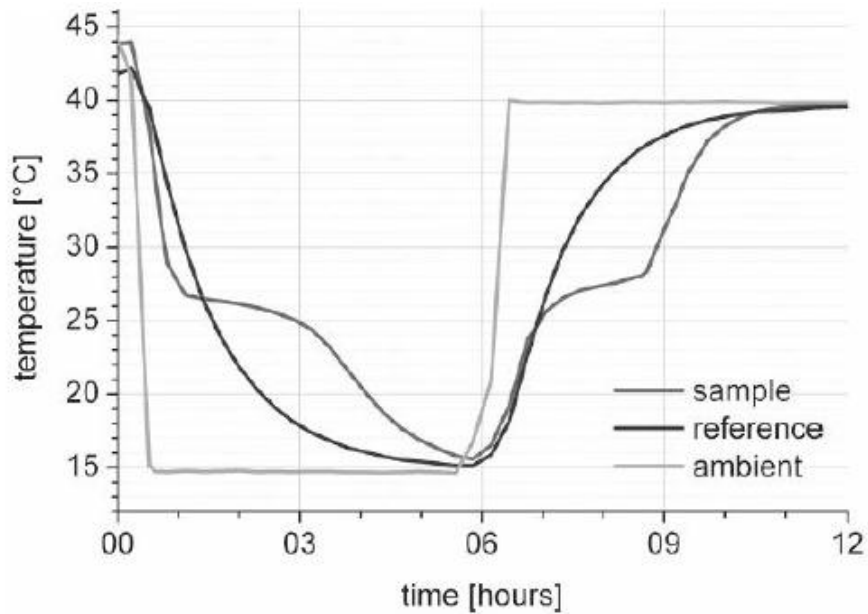
- ❖ Αριθμός Biot μικρότερος του 0,1. Πρόκειται για αδιάστατο αριθμό που συσχετίζει την αντίσταση στην μεταφορά θερμότητας μεταξύ του εσωτερικού και της επιφάνειας ενός σώματος.
- ❖ Η θερμοκρασία του συστήματος σωλήνα-PCM είναι ομοιόμορφη, σταθερή και χρονικά εξαρτώμενη μόνο κατά την αποφόρτιση του συστήματος.
- ❖ Η εσωτερική αντίσταση στην μεταφορά θερμότητας είναι συγκριτικά μικρότερη από την εξωτερική αντίσταση.



Σχήμα 3.4.1/1 : Πειραματική Διάταξη Μεθόδου T-History

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από δύο δοκιμαστικούς σωλήνες, οι συνθήκες των οποίων καταγράφονται γραφικά σε υπολογιστή. Ο ένας σωλήνας πληρείται από ΥΑΦ, ενώ ο άλλος από το υγρό αναφοράς (συνήθως καθαρό νερό) και διατηρούνται σε λουτρό σταθερής θερμοκρασίας, υψηλότερης του σημείου τήξεως του ΥΑΦ. Με την απότομη αφαίρεση των σωλήνων από το λουτρό και την έκθεσή τους στην ατμόσφαιρα, ξεκινά η καταγραφή των θερμοκρασιών τους σε σχέση με τον χρόνο έκθεσης στην θερμοκρασία περιβάλλοντος, η οποία και δίνει δύο καμπύλες T-History (μεταβολής θερμοκρασίας).

Οι ζητούμενες ιδιότητες, όπως η θερμοκρασία τήξης και η ειδική θερμοχωρητικότητα του ΥΑΦ, υπολογίζονται από τα δεδομένα της πειραματικής διάταξης και την αντίστοιχη καμπύλη που προέκυψε.



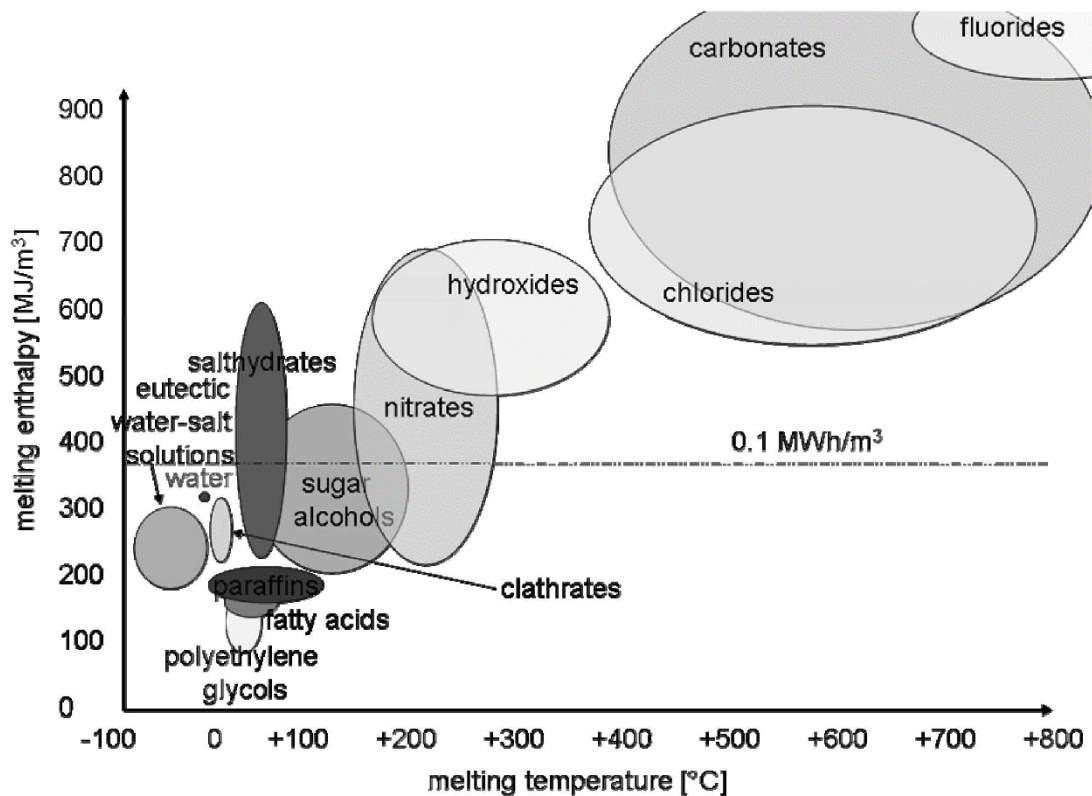
Σχήμα 3.4.1/2 : Τυπικό Διάγραμμα Θερμοκρασίας-Χρόνου μέτρησης T-History

Πλεονεκτήματα της μεθόδου T-History είναι το χαμηλό κόστος του εξοπλισμού, η μεγάλη ποσότητα του δείγματος που μελετάται καθώς και η δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης πολλών δειγμάτων. Επίσης, η οπτική παρατήρηση των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων επιτρέπει καλύτερο έλεγχο και κατανόηση της διαδικασίας. Ωστόσο, σοβαρό μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι η αξιοπιστία των μετρήσεων και η ορθή διεξαγωγή τους, επηρεάζεται σημαντικά από την ακρίβεια της κατασκευής/συναρμολόγησης της πειραματικής διάταξης.

### 3.5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ [βιβλ. 8, 9]

Το πλέον διαδεδομένο υλικό αλλαγής φάσης είναι το νερό ( $H_2O$ ), που χρησιμοποιείται για χιλιάδες χρόνια, λόγω της υψηλής του θερμοχωρητικότητας και βρίσκει εφαρμογή κυρίως για δροσισμό (πάγος, χιόνι).

Στο επόμενο σχήμα δίνεται μία συνολική κατηγοριοποίηση των PCM με το διάγραμμα ενθαλπίας αλλαγής φάσης συναρτήσεως της θερμοκρασίας τήξης του υλικού, με τις σημαντικότερες κατηγορίες να αναλύονται παρακάτω.



Σχήμα 3.5/1 : Κατηγορίες PCM

### 3.5.1 ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΟΥΣΙΕΣ

Πρόκειται για μία ευρεία κατηγορία υλικών με βασικότερα τις παραφίνες, τα λιπαρά οξέα και τελευταίες τις αλκοόλες σακχάρων. Λειτουργούν στο θερμοκρασιακό εύρος 0-200° C, ενώ κατά την πλειονότητά τους παρουσιάζουν αστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες.

- ❖ **Παραφίνες (Paraffins)** : Πρόκειται για αλκάνια με γενικό χημικό τύπο  $C_nH_{2n+2}$  και κρυσταλλική δομή. Χαρακτηρίζονται από καλή ενεργειακή πυκνότητα, αλλά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, ενώ η τήξη ή πήξη τους πραγματοποιείται με μικρή ή μηδαμινή υπόψυξη. Παρουσιάζουν αμελητέα τάση ατμών και μεταβολή όγκου της τάξης του 10 %, ωστόσο συγκριτικά με πολλές ανόργανες ουσίες, είναι μαλακά υλικά, συνεπώς ασκούν σημαντικά μικρότερες δυνάμεις στην συσκευασία τους κατά την διαστολή. Οι παραφίνες είναι αδιάλυτες στο νερό, συμβατές με μέταλλα, εντούτοις μπορούν να προκαλέσουν μαλάκωμα των πλαστικών υλικών κατά την επαφή μαζί τους. Επίσης, σημειώνεται ότι η αύξηση των ατόμων άνθρακα του αλκανίου συνεπάγεται την αύξηση της θερμοκρασίας τήξης, δίνοντας με αυτόν τον τρόπο την δυνατότητα επιλογής της επιθυμητής θερμοκρασίας, η οποία ελέγχεται και με την δημιουργία μιγμάτων. Οι παραφίνες του εμπορίου αποτελούν μίγματα υδρογονανθράκων από απόσταξη πετρελαίου με εύρος θερμοκρασιών τήξης και χαμηλότερη ενθαλπία αλλαγής φάσης, συγκριτικά με τα καθαρά αλκάνια, τα οποία έχουν υψηλή τιμή πώλησης.

Στον επόμενο πίνακα δίνονται παραδείγματα παραφινών με τις ιδιότητές τους.

Υλικό	Θερμοκρασία Τήξης [°C]	Ενθαλπία Αλλαγής Φάσης [KJ/Kg]
C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	6	230
C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	10	212
C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	18	210, 238
C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	19	240
C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	28	200, 245
C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	38	283
C <sub>30</sub> H <sub>62</sub>	66	-
C <sub>40</sub> H <sub>82</sub>	82	-
C <sub>50</sub> H <sub>102</sub>	95	-
Πολυαιθυλένιο C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub> (n έως 100.000)	110-135	200

Πίνακας 3.5.1/1 : Παραδείγματα παραφινών για χρήση ως PCM

- ❖ **Λιπαρά Οξέα (Fatty Acids)** : Με γενικό χημικό τύπο CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>2n</sub>COOH, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η θερμοκρασία τήξης αυξάνεται ανάλογα με τον αριθμό των ατόμων του άνθρακα, ενώ ελέγχεται και με την δημιουργία μιγμάτων. Τα λιπαρά οξέα παρουσιάζουν χημική σταθερότητα στους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης, αφού ως υλικά ενός συστατικού αποκλείουν την περίπτωση διαχωρισμού των φάσεων. Η συμπεριφορά τους είναι όμοια των αλκανίων, με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, μικρή ή μηδαμινή υπόψυξη, ωστόσο τα λιπαρά οξέα αντιδρούν με μέταλλα. Στον επόμενο πίνακα δίνονται παραδείγματα λιπαρών οξέων.

Υλικό	Θερμοκρασία Τήξης [°C]	Ενθαλπία Αλλαγής Φάσης [KJ/Kg]
CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> COOH	16	149
CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> COOH	32	153
CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> COOH	42-44	178
CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> COOH	58	186, 204
CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>14</sub> COOH	61, 64	185, 203

Πίνακας 3.5.1/2 : Παραδείγματα λιπαρών οξέων για χρήση ως PCM

- ❖ **Αλκοόλες Σακχάρων (Sugar Alcohols)** : Αποτελούν μία σχετικά καινούργια κατηγορία υλικών με γενικό χημικό τύπο HOCH<sub>2</sub>[CH(OH)]<sub>n</sub>CH<sub>2</sub>OH. Έχουν εύρος θερμοκρασιών τήξης 90-200° C, υψηλή ενθαλπία τήξης στις περισσότερες περιπτώσεις, αλλά μερική υπόψυξη, σε αντίθεση με την

πλειοψηφία οργανικών υλικών. Δίνονται παραδείγματα αλκοολών στον επόμενο πίνακα.

Υλικό	Θερμοκρασία Τήξης [°C]	Ενθαλπία Αλλαγής Φάσης [KJ/Kg]
Ξιλιτόλη-C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> (OH) <sub>5</sub>	94	263
D-Σορβιτόλη C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> (OH) <sub>6</sub>	97	185
Ερυθριτόλη-C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> (OH) <sub>4</sub>	120	340
D-Μαννιτόλη C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> (OH) <sub>6</sub>	167	316
Λακτιτόλη-C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> (OH) <sub>6</sub>	188	351

Πίνακας 3.5.1/3 : Παραδείγματα αλκοολών σακχάρων για χρήση ως PCM

### 3.5.2 ΑΝΟΡΓΑΝΕΣ ΟΥΣΙΕΣ

Αποτελούν κυρίως ουσίες βασιζόμενες στο νερό και καλύπτουν ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Κύριο μειονέκτημα είναι η μη συμβατότητα με μέταλλα, αφού υπάρχει σοβαρή πιθανότητα διάβρωσης στην περίπτωση επαφής των δύο υλικών.

- ❖ **Ένυδρα Άλατα (Salt Hydrates)** : Βρίσκουν εφαρμογή στο θερμοκρασιακό εύρος 5–130 °C. Τα μόρια του νερού συνδέονται με ιόντα του άλατος, σχηματίζοντας μία σταθερή κρυσταλλική δομή, η παρουσία όμως των δύο συστατικών αυξάνει την πιθανότητα διαχωρισμού των φάσεων. Έχουν παρόμοια συμπεριφορά με το νερό, ως προς την θερμική αγωγιμότητα, την υπόψυξη και την σημαντική μεταβολή όγκου κατά την μεταβολή φάσεων (< 10%), ενώ η τάση ατμών είναι μειωμένη στην θερμοκρασία τήξης. Όντας ανόργανες ουσίες, εμφανίζουν διαβρωτική συμπεριφορά, κυρίως σε μέταλλα, ωστόσο δεν αποτελούν κίνδυνο σε μικρές ποσότητες. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται ορισμένα παραδείγματα ένυδρων αλάτων.

Υλικό	Θερμοκρασία Τήξης [°C]	Ενθαλπία Αλλαγής Φάσης [KJ/Kg]
LiClO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	8	155
KF·3H <sub>2</sub> O	18,5	231
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	29, 30	171, 190
LiNO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	30	296
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O	32	254
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	35-44	280
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O	48-55	187, 209
Na(CH <sub>3</sub> COO)·3H <sub>2</sub> O	58	226, 264
Ba(OH <sub>2</sub> )·8H <sub>2</sub> O	78	265, 280
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	89, 90	149, 163
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	117	165, 169

Πίνακας 3.5.2/1 : Παραδείγματα ένυδρων αλάτων για χρήση ως PCM

- ❖ **Εύτηκτα Διαλύματα Νερού-Άλατος (Eutectic Water-Salt Solutions) :**  
 Παρουσιάζουν σημεία τήξης χαμηλότερα των 0°C, λόγω της παρουσίας των αλάτων, ενώ χαρακτηρίζονται από καλή ενεργειακή πυκνότητα. Μειονέκτημά τους αποτελεί η πιθανότητα διαχωρισμού των φάσεων, ωστόσο αποτελούν ασφαλέστερη επιλογή από τα ένυδρα άλατα όσον αφορά το φαινόμενο αυτό. Η σχετικά χαμηλή τιμή της εύτηκτης σύνθεσης, 1 €/Kg, την καθιστά συνήθη βάση PCM του εμπορίου για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές. Δίνονται μερικά παραδείγματα στον παρακάτω πίνακα.

Υλικό	Θερμοκρασία Τήξης [°C]	Ενθαλπία Αλλαγής Φάσης [KJ/Kg]
Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (30,5 wt.)/H <sub>2</sub> O	-30,6	131
NaCl (22,4 wt.)/H <sub>2</sub> O	-21,2	222
KCl (19,5 wt.)/H <sub>2</sub> O	-10,7	283

Πίνακας 3.5.2/2 : Παραδείγματα εύτηκτων διαλυμάτων νερού-άλατος για χρήση ως PCM

### 3.5.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

Στον παρακάτω πίνακα δίνεται μία σύντομη σύγκριση των δύο κύριων κατηγοριών ΥΑΦ, οργανικών και ανόργανων υλικών αλλαγής φάσης.

	<b>ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΥΑΦ</b>	<b>ΑΝΟΡΓΑΝΑ ΥΑΦ</b>
<b>ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Διαθεσιμότητα σε μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος</li> <li>• Ομοιόμορφη τήξη</li> <li>• Μη διαβρωτικά και συμβατά με δομικά υλικά</li> <li>• Μη διαχωρισμός φάσεων</li> <li>• Ελάχιστη ή μηδαμινή υπόψυξη</li> <li>• Χημική σταθερότητα</li> <li>• Δυνατότητα ομοιογενούς πυρηνοποίησης</li> <li>• Ανακυκλώσιμα</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Υψηλή ογκομετρική θερμοχωρητικότητα</li> <li>• Υψηλή ενθαλπία αλλαγής φάσης</li> <li>• Εύκολη διαθεσιμότητα</li> <li>• Υψηλή θερμική αγωγιμότητα</li> <li>• Μη εύφλεκτα</li> <li>• Γρήγορη και εμφανής μεταβολή κατάστασης</li> <li>• Χαμηλό κόστος</li> </ul>
<b>ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Χαμηλή ενθαλπία αλλαγής φάσης</li> <li>• Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα</li> <li>• Χαμηλή ογκομετρική θερμοχωρητικότητα</li> <li>• Εύφλεκτα</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μεγάλη μεταβολή όγκου</li> <li>• Παρουσία υπόψυξης</li> <li>• Ενδεχόμενο διαχωρισμού φάσεων</li> <li>• Διαβρωτική συμπεριφορά</li> </ul>

Πίνακας 3.5.3/1 : Σύγκριση Οργανικών και Ανόργανων Υλικών Αλλαγής Φάσης



## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3<sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

---

- <sup>1</sup> Harald Mehling, Luisa F. Cabeza , **“Heat and cold storage with PCM : An up to date introduction into basics and applications”**, Springer Science & Business Media, 15 Aug 2008
- <sup>2</sup> G.A. Lane, Solar Heat Storage: **“Latent Heat Materials Volume I: Background and Scientific Principles. Vol. I.”**, 1983, Florida, CRC Press, Inc.
- <sup>3</sup> Harald Mehling, Luisa F. Cabeza , **“Heat and cold storage with PCM : An up to date introduction into basics and applications”**, Springer Science & Business Media, 15 Aug 2008
- <sup>4</sup> Harald Mehling, Luisa F. Cabeza , **“Heat and cold storage with PCM : An up to date introduction into basics and applications”**, Springer Science & Business Media, 15 Aug 2008
- <sup>5</sup> Z. Liu, D.D.L. Chung **“Calorimetric evaluation of phase change materials for use as thermal interface materials”**, Thermochemica Acta, Volume 366, Issue 2, 2001, Pages 135-147
- <sup>6</sup> Zhang Yinping, Jiang Yi and Jiang Yi, **“A simple method, the T –history method, of determining the heat of fusion ,specific heat and thermal conductivity of phase-change materials”**, Measurement and Science Technology, Volume 10, Number 3, 1999
- <sup>7</sup> Jong Hyeon Peck, Jae-Jun Kim, Chaedong Kang, Hiki Hong, **“A study of accurate latent heat measurement for a PCM with a low melting temperature using T-history method”**, International Journal of Refrigeration, Volume 29, Issue 7, November 2006, Pages 1225–1232
- <sup>8</sup> Harald Mehling, Luisa F. Cabeza , **“Heat and cold storage with PCM : An up to date introduction into basics and applications”** , Springer Science & Business Media, 15 Aug 2008
- <sup>9</sup> <http://www.slideshare.net/ahmadalshaghe15/phase-change-materials-pcm-review>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

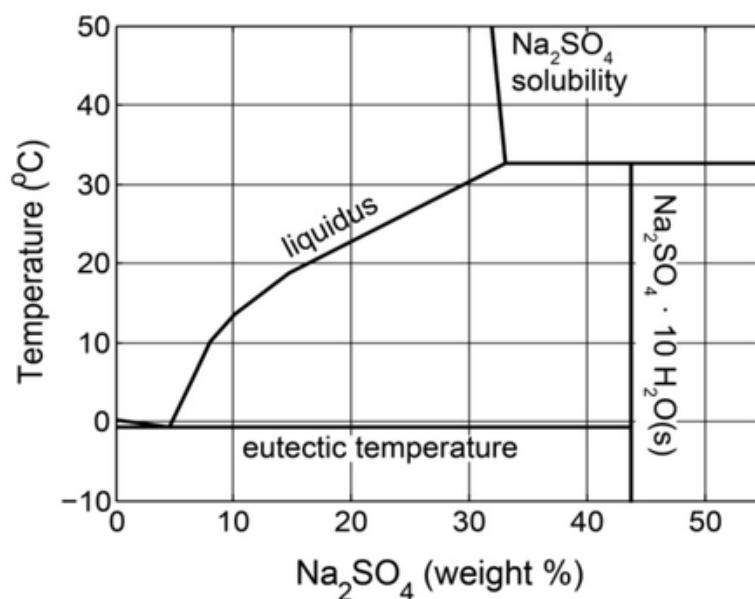
### 4.1 ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ [βιβλ. 1, 2, 3, 4]

Η φύση των ΥΑΦ, δηλαδή το γεγονός ότι αποτελούν μίγματα χημικών ενώσεων, καθώς και οι κύκλοι μεταβολών κατάστασης στους οποίους υπόκεινται, επιφέρουν περιορισμούς ως προς την λειτουργία των υλικών. Οι περιορισμοί αυτοί αναλύονται παρακάτω και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην κατασκευή ενός συστήματος.

#### 4.1.1 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΦΑΣΕΩΝ

Κατά την στερεοποίηση (πήξη) ενός υλικού δύο ή περισσότερων συστατικών, ενδέχεται φάσεις με διαφορετική σύνθεση να διαχωριστούν από τις υπόλοιπες μακροσκοπικά, λόγω διαφοράς πυκνοτήτων. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διαχωρισμός φάσεων και αποτελεί βασικό πρόβλημα των ΥΑΦ. Οι επαναλαμβανόμενοι κύκλοι μεταβολών κατάστασης του υλικού καταπονούν την δομή του μίγματος και το υλικό σταδιακά διαχωρίζεται χωρίς να επανέλθει στην αρχική ομοιογενή του κατάσταση.

Η ενθαλπία αλλαγής φάσης και η θερμοκρασία τήξης παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές για τα διάφορα σημεία στον όγκο του υλικού, ανάλογα με την σύσταση του καθενός. Η συμπεριφορά ενός υλικού πολλαπλών συστατικών μπορεί να προσεγγιστεί με το διάγραμμα φάσεων του μίγματος, σε περίπτωση που είναι διαθέσιμο. Πρόκειται για ένα διάγραμμα θερμοκρασίας-περιεκτικότητας στο οποίο απεικονίζεται ο σχηματισμός των μιγμάτων των συστατικών, με χαρακτηριστικές συστάσεις και θερμοκρασίες (ευτηκτικό σημείο κλπ). Στο παρακάτω σχήμα, για παράδειγμα, δίνεται το διάγραμμα φάσης του ένυδρου θειικού άλατος με τύπο  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (άλας του Glauber).



Σχήμα 4.1.1/1 : Διάγραμμα Φάσεων  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (άλας του Glauber)

Η αντιμετώπιση του φαινομένου πραγματοποιείται κυρίως με την χρήση κολλοειδών προσθετικών (gelling additives) για την δημιουργία τρισδιάστατης προστατευτικής δομής (gelling), η οποία αποτρέπει τον διαχωρισμό φάσεων μέσα στο υλικό, σε μικροσκοπικό επίπεδο, μειώνοντας τις αποστάσεις τους. Ωστόσο, χρησιμοποιούνται και άλλες λύσεις για το πρόβλημα, όπως η ανάδευση (mixing) και η πύκνωση (thickening). Η γρήγορη ανάδευση του υλικού επιταχύνει την διαδικασία ομοιογενοποίησης, αντί για την διάχυση, μικρής κλίμακας, μεταξύ των συστατικών και βρίσκει συχνά εφαρμογή στα ένυδρα άλατα. Η πύκνωση του ΥΑΦ πραγματοποιείται με την προσθήκη κατάλληλου υλικού για την αύξηση του ιξώδους. Υψηλό μέγεθος ιξώδους καθυστερεί τον διαχωρισμό των φάσεων, επιτρέποντας μόνο μικρές αποστάσεις, μέχρι την πλήρη στερεοποίηση του ΥΑΦ.

#### 4.1.2 ΥΠΟΨΥΞΗ-ΥΠΕΡΨΥΞΗ

Η υπόψυξη (subcooling) ή υπέρψυξη (supercooling) αφορά το φαινόμενο κατά το οποίο ένα ΥΑΦ στερεοποιείται σε θερμοκρασία μικρότερη της θερμοκρασίας τήξης/στερεοποίησής του, απαιτεί δηλαδή περαιτέρω ψύξη για την μετάβαση σε άλλη κατάσταση (φάση).

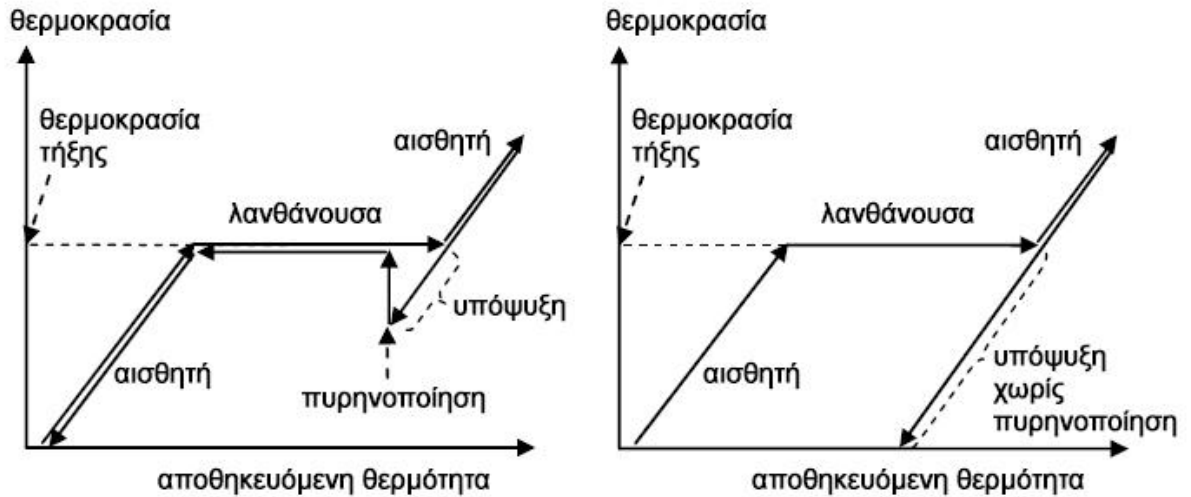
Με την έναρξη της στερεοποίησης στην θερμοκρασία τήξης, ξεκινά ο σχηματισμός στερεού PCM, μικρής διαμέτρου, που ονομάζεται πυρήνας. Για την ανάπτυξη του πυρήνα, μέσω της στερεοποίησης της υγρής επιφάνειας που το περιβάλλει, απαιτείται η αποφόρτιση του συστήματος, απελευθερώνοντας θερμότητα, ώστε να καταλήξει στο ενεργειακό του ελάχιστο. Η συνέχιση και ολοκλήρωση της πήξης προϋποθέτει τον σχηματισμό πυρήνα με διάμετρο ικανοποιητικά μεγάλη. Σε αντίθετη περίπτωση, πραγματοποιείται υπόψυξη για τον σχηματισμό της απαραίτητης διαμέτρου του πυρήνα.

Με την προσθήκη πυρήνων (πυρηνοποίηση-nucleation) η υπόψυξη μειώνεται κατά μερικούς βαθμούς Kelvin, αφού επιταχύνουν τον σχηματισμό της στερεάς φάσης, επιτρέποντας την ανάπτυξή της στην επιφάνειά τους, λόγω όμοιας κρυσταλλικής δομής με το ΥΑΦ. Παρουσιάζουν όμως σημείο τήξης υψηλότερο του ΥΑΦ για την αποφυγή ακύρωσης της λειτουργίας τους μετά την τήξη του υλικού. Η πυρηνοποίηση χωρίζεται σε :

- ❖ **Ομοιογενής** (homogeneous) : Πραγματοποιείται με εγγενείς πυρήνες (intrinsic nucleators), δηλαδή ίδιας ακριβώς σύστασης με αυτή του ΥΑΦ. Αυτό επιτυγχάνεται με την τοπική ψύξη μέρους του υλικού από το περιβάλλον (επιτηδευμένα κακή μόνωση κ.ά.), διατηρώντας έτσι μόνιμα μέρος στερεού PCM για την ταχεία εκκίνηση στερεοποίησης.
- ❖ **Ετερογενής** (heterogeneous) : Πραγματοποιείται με συμβατούς πυρήνες (extrinsic nucleators), δηλαδή προσθετικά με παρόμοια δομή και θερμοκρασία τήξης. Πρόκειται ουσιαστικά για προσμίξεις στο ΥΑΦ, ενώ την

ίδια λειτουργία μπορούν να έχουν και ρωγμές στην συσκευασία του ΥΑΦ οι οποίες συγκεντρώνουν στερεό υλικό (τοπική ψύξη).

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η δράση των πυρήνων κατά του φαινομένου της υπόψυξης, με την προσθήκη τους σε ΥΑΦ.



Σχήμα 4.1.2/1 : Γραφική απεικόνιση μεταβολών παρουσία υπόψυξης με ή χωρίς πυρηνοποίηση

#### 4.1.3 ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ PCM ΜΕ ΆΛΛΑ ΥΛΙΚΑ

Για την αξιόπιστη και μακροχρόνια λειτουργία ενός συστήματος ΥΑΦ απαιτείται η συμβατότητα των υλικών. Αρχικά, κρίνεται απαραίτητη η χημική και δομική σταθερότητα του κελύφους κατά την επαφή με το διαβρωτικό περιεχόμενο ΥΑΦ, ενώ δεύτερη έρχεται η συμβατότητα του ΥΑΦ με το εξωτερικό του περιβάλλον, για την ενδεχόμενη περίπτωση διαρροής. Συνεχίζοντας, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η στεγανότητα του υλικού συσκευασίας ως προς το PCM, ώστε να αποφευχθεί η διαφυγή συστατικών του ΥΑΦ, που θα οδηγούσε στην μεταβολή σύστασης και την μείωση της αποθηκευτικής ικανότητας του συστήματος.

Σε αντίθετη περίπτωση, οι απώλειες υλικών αυξάνουν το κόστος λειτουργίας ή την διακόπτουν πλήρως, αφού απαιτείται αντικατάσταση των αποθηκευτικών δοχείων/καψουλών, ενώ τυχόν διαρροή PCM επιφέρει καταστροφές στην εγκατάσταση (έντονη διαβρωτική συμπεριφορά). Συνήθεις περιπτώσεις ασυμβατότητας των ΥΑΦ με υλικά είναι η διάβρωση των μετάλλων στην επαφή με ανόργανα PCM και η ασταθής δομή (μαλάκωμα) των πλαστικών στην επαφή με οργανικά PCM. Σημειώνεται, επίσης, το ενδεχόμενο διαρροής μορίων νερού ή ΥΑΦ μέσα από ορισμένα πλαστικά, λόγω της μικροσκοπικής τους δομής.

## 4.2 ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ-ΕΝΘΥΛΑΚΩΣΗ PCM [βιβλ. 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]

Η ενσωμάτωση των υλικών αλλαγής φάσης σε προστατευτικά κελύφη (συσκευασία) προσφέρει ασφάλεια, λειτουργικότητα και ευκολία στην χρησιμοποίησή τους.

Μέσω της αποτροπής της επαφής του υλικού με το περιβάλλον, προστατεύεται τόσο το περιβάλλον από την διαβρωτική συμπεριφορά του ΥΑΦ, όσο και η σύσταση του υλικού. Επιπροσθέτως, η ενθυλάκωση (encapsulation) των ΥΑΦ, δηλαδή η ενσωμάτωσή τους σε κάψουλες, αποφέρει μηχανική σταθερότητα, σε περιπτώσεις κατασκευών και λειτουργεί ως επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας μεταξύ του υλικού και του περιβάλλοντος.

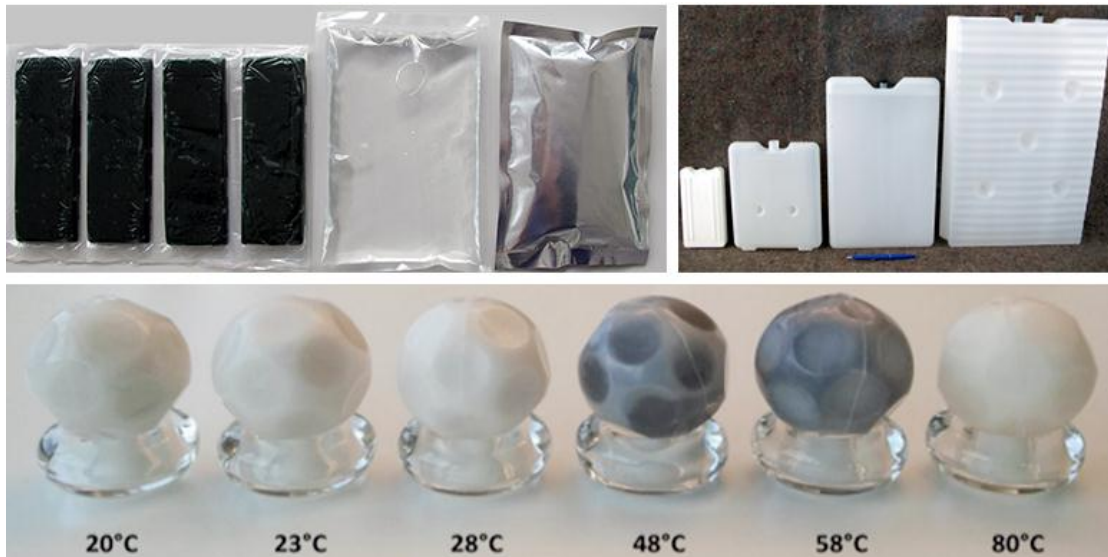
Κριτήρια για την επιλογή του υλικού του κελύφους είναι η συμβατότητα με το ΥΑΦ και το κατάλληλο πάχος του για την κάλυψη της απαραίτητης στεγανότητας διάχυσης (diffusion tightness). Ο σχεδιασμός του οφείλει να ανταποκρίνεται στην μηχανική καταπόνηση που υπόκειται από τις μεταβολές όγκου του PCM. Με κριτήριο το μέγεθος του κελύφους, υπάρχουν μακροκάψουλες, με ευρεία χρήση και μικροκάψουλες, με αυξανόμενη εφαρμογή με το πέρασμα του χρόνου, ενώ υπάρχουν και τα συστήματα με κριτήριο την επαφή ή μη του ΥΑΦ με το μέσο φόρτισης.

### 4.2.1 ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ PCM ΣΕ ΜΑΚΡΟΚΑΨΟΥΛΕΣ

Το PCM εισάγεται σε μακροκάψουλες περιεκτικότητας μερικών ml έως μερικών λίτρων. Μακροκάψουλες θεωρούνται δοχεία και σακούλες αποθήκευσης από μέταλλο ή πλαστικό, τα οποία έχουν ευρεία χρήση και καταλληλότητα για εφαρμογές περαιτέρω των PCM. Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγεται η αλληλεπίδραση του υλικού με το περιβάλλον, ενώ στην περίπτωση στιβαρού δοχείου, η μακροκάψουλα μπορεί να προσφέρει και μηχανική σταθερότητα στο σύστημα. Στην επόμενη εικόνα φαίνονται μερικά παραδείγματα μακροκαψουλών, διαφόρων εταιριών, σε μορφή μπάλας (balls), σωληνώσεων (tubes), σακούλες, μπλοκ/πάνελ (blocks/panels).



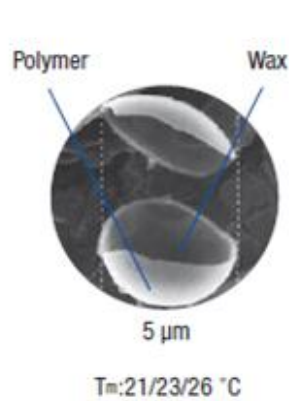
Σχήμα 4.2.1/1 : Παραδείγματα μακροκαψουλών



Σχήμα 4.2.1/2 : Παραδείγματα μακροκαψουλών

#### 4.2.2 ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ PCM ΣΕ ΜΙΚΡΟΚΑΨΟΥΛΕΣ

Το PCM εισάγεται σε μικροκάψουλες, σφαιρικά κελύφη, διαμέτρου μικρότερης του 1 mm, συνήθως κατασκευασμένες από πλαστικό (πολυμερή) ή συνθετικές ρητίνες. Υπό την μορφή αυτή βρίσκονται σε θέση να αντικαταστήσουν ποσότητες δομικών υλικών κ.ά., προσφέροντας την επιλογή αποθήκευσης μεγάλων ποσών ενέργειας. Ένα τυπικό εύρος διαμέτρου είναι 2-20 μm, ενώ μπορεί να βρίσκονται υπό την μορφή υγρού διαλύματος ή ξηρής σκόνης. Με αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται προστασία των αποθηκευτικών δοχείων ή τοποθεσιών αποθήκευσης των PCM και έλεγχος του υλικού ως προς την μεταβολή όγκου και κατάστασης. Επίσης, προσφέρεται μεγαλύτερη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας του υλικού με το περιβάλλον με κάθε κάψουλα, δηλαδή καλύτερη αξιοποίηση του συστήματος. Σοβαρό μειονέκτημα αυτής της μορφής PCM είναι η σημαντική ποσότητα υλικού που απαιτείται για το κέλυφος, η οποία αυξάνει το κόστος και ταυτόχρονα μειώνει την ενεργειακή πυκνότητα του ΥΑΦ. Ακόμα, λόγω της μειωμένης περιεκτικότητας των καψουλών, αυξάνεται η πιθανότητα υπόψυξης, δυσκολεύοντας την λειτουργία του υλικού. Οι μικροκάψουλες PCM του εμπορίου χρησιμοποιούνται μόνο για υλικά μη διαλυτά στο νερό, διότι η στεγανότητα της κάψουλας ως προς τα μόρια του νερού δεν είναι αρκετή ώστε να μην την διαπερνούν, μεταβάλλοντας έτσι την σύσταση του υλικού. Για τον λόγο αυτόν, βρίσκουν εφαρμογή μόνο για οργανικά υλικά και συγκεκριμένα παραφίνες. Τέλος, η καταλληλότητα των μικροκαψουλών ποικίλει ανάλογα με το ΥΑΦ λόγω του φαινομένου της υπόψυξης και του μειωμένου όγκου τους.



Σχήμα 4.2.2/1 : Παραδείγματα μικροκαψουλών

#### 4.2.3 ΕΜΒΑΠΤΙΣΗ PCM ΣΕ ΠΟΡΩΔΕΣ ΥΛΙΚΟ

Αποτελεί την πιο εύκολη διαδικασία ενσωμάτωσης PCM σε υλικό, αφού πραγματοποιείται απλά πρόσμιξη στο πορώδες υλικό, που μπορεί να είναι γυψοσανίδα, τούβλο, κεραμικά, τσιμέντο, σκόνη πυριτίου, μορισσανίδες (fiberboards) κ.ά., δηλαδή υλικά δόμησης και κατασκευών. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται βέβαια στην επιλογή των δύο υλικών, ώστε να μην αλληλοεπιδρούν και να απαλείφεται η πιθανότητα διαρροής του PCM κατά την υγρή κατάσταση.



Σχήμα 4.2.3/1 : Εμβάπτιση PCM σε τοιμέντο, σανίδες, πλάκες

#### 4.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΥΑΦ ΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΕΠΑΦΗΣ ΘΕΡΜΟΥ ΜΕΣΟΥ

[βιβλ. 15, 16, 17]

Τα συστήματα μη άμεσης επαφής βασίζονται στην λειτουργία και διάταξη των γνωστών εναλλακτών θερμότητας (heat exchanger), με το ΥΑΦ και το μέσο φόρτισης να αποτελούν τα δύο συναλασσόμενα ρεύματα. Η απόδοση του συστήματος είναι άμεσα εξαρτώμενη της συναλλαγής θερμότητας/φόρτισης του ΥΑΦ από το θερμό μέσο, δηλαδή του ποσού θερμότητας που αποθηκεύεται. Συνεπώς, επιλέγεται η βέλτιστη διάταξη της συναλλαγής με τις πιο συνήθεις περιπτώσεις εναλλακτών να δίνονται παρακάτω :

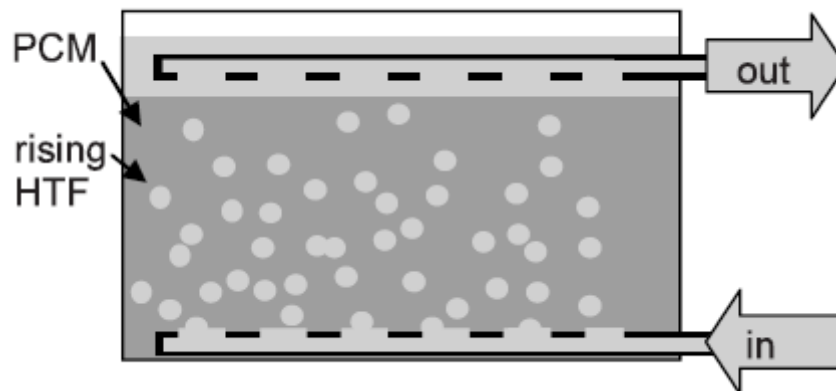
- ❖ **Σωληνώσεις** : Το PCM πληρεί σωληνώσεις μικρής διαμέτρου και πάχους, τις οποίες διαρρέει εξωτερικά το θερμό μέσο για την συναλλαγή θερμότητας.
- ❖ **Δοχείο Διπλού κελύφους** : Το PCM τοποθετείται στο κέντρο δοχείου αποθήκευσης διπλού κελύφους, το οποίο διαρρέεται από το θερμό μέσο. Το διπλό κέλυφος ελαττώνει αισθητά τις θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον, για την μέγιστη εκμετάλλευση της θερμικής ενέργειας του μέσου.
- ❖ **Πλακοειδής εναλλάκτης** : Η συναλλαγή θερμότητας του PCM και του μέσου πραγματοποιείται μέσω διαδοχικών μεταλλικών πλακών ανάμεσα στα δύο υλικά, εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερη επιφάνεια συναλλαγής.



- ❖ **Πτερυγιοφόροι σωλήνες :** Το PCM πληρεί δοχείο που διαπερνάται από πτερυγιοφόρους σωλήνες του θερμού μέσου. Η διάταξη αυτή είναι πιο αποδοτική για υγρό θερμό μέσο παρά για αέριο.
- ❖ **Σφαιρικά κελύφη :** Το PCM βρίσκεται σε πλαστικά σφαιρίδια που πληρούν το δοχείο αποθήκευσης, ενώ το θερμό μέσο αποφορτίζεται μέσω σωληνώσεων που διαπερνούν το δοχείο.

#### 4.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΥΑΦ ΑΜΕΣΗΣ ΕΠΑΦΗΣ ΘΕΡΜΟΥ ΜΕΣΟΥ [βιβλ. 18]

Στο σύστημα άμεσης επαφής ΥΑΦ-μέσου, ο θύλακας του ΥΑΦ (συσκευασία) πληρείται κατά 90% από το ΥΑΦ και η τροφοδοσία του μέσου πραγματοποιείται από τον πυθμένα του. Υπό την μορφή σταγονιδίων, το μέσο, λόγω μικρότερης πυκνότητας αναδύεται προς την επιφάνεια, φορτίζοντας άμεσα και ομοιόμορφα το ΥΑΦ, όπου και συλλέγεται για την επανάληψη της διαδικασίας. Η διάταξη αυτή, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και βρίσκει εφαρμογή για ένυδρα άλατα, με μέσο μετάδοσης θερμότητας το λάδι. Ωστόσο, για παραφίνες το μέσο που χρησιμοποιείται είναι το νερό, το οποίο λόγω μεγαλύτερης πυκνότητας από το ΥΑΦ, επιβάλλει την τροφοδοσία του από το πάνω μέρος του θύλακα (αντίστροφη διάταξη).



Σχήμα 4.4/1 : Σύστημα Φόρτισης Άμεσης Επαφής Θερμού Μέσου

Η χρήση αυτού του συστήματος επιτυγχάνει ομοιόμορφη φόρτιση του ΥΑΦ, με σημαντικά μειωμένες απώλειες και ελάττωση των φαινομένων υπέρψυξης και διαχωρισμού φάσεων, λόγω των αναταράξεων που δημιουργεί η διέλευση των σταγονιδίων, στην δομή του ΥΑΦ.

#### 4.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ [βιβλ. 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29]

##### 4.5.1 ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ Ή ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ PCM ΣΤΑ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

Τα συνήθη δομικά υλικά, πέτρα, σκυρόδεμα, τούβλα, παρουσιάζουν αποθηκευτική συμπεριφορά θερμότητας, λειτουργώντας σαν μόνωση του κτιρίου, με περιορισμένη όμως ικανότητα και υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Συγκεκριμένα, η πέτρα, ανάλογα του πάχους του τοίχου, προκαλεί καθυστέρηση στην μετάδοση της θερμότητας μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, επιτυγχάνοντας μερικό δροσισμό το καλοκαίρι και μερική θερμική μόνωση τον χειμώνα, σε συνδυασμό με σύστημα θέρμανσης. Ωστόσο, τα συμβατικά δομικά υλικά αποθηκεύουν μόνο αισθητή θερμότητα, η οποία συνοδεύεται από την ανάλογη και συνεχή αύξηση της θερμοκρασίας τους. Δηλαδή για την αποθήκευση μεγάλων ποσών θερμότητας απαιτείται μεγάλη ποσότητα δομικού υλικού, με την θερμότητα όμως να απελευθερώνεται σχεδόν παράλληλα, χρονικά, με την καθοδική πορεία της θερμοκρασίας. Επιπλέον, χρησιμοποιείται μόνωση μεταξύ των στρωμάτων δομικού υλικού, για την αντίσταση και καθυστέρηση της διάβασης της θερμότητας προς ή από το εσωτερικό περιβάλλον των τοίχων, διατηρώντας σχετικά σταθερές τις συνθήκες που επικρατούν.

Στόχος, λοιπόν, της δημιουργίας και χρησιμοποίησης δομικών υλικών με εμποτισμένο ή ενσωματωμένο ΥΑΦ, είναι η μεγιστοποίηση της αποθηκευόμενης ενέργειας και η απόδοσή της στον επιθυμητό χώρο, με χρονική καθυστέρηση. Σύμφωνα με ερευνητικά και πειραματικά δεδομένα, εφαρμογές δομικών υλικών με PCM, αποθηκεύουν από 5 έως 14 φορές περισσότερη ενέργεια συγκριτικά με εφαρμογές συμβατικών δομικών υλικών.

Με την χρήση εφαρμογών PCM επιτυγχάνονται :

- ❖ Η εξοικονόμηση ενέργειας, τόσο με την μονωτική λειτουργία των PCM αλλά και με την αποδοχή της αποθηκευόμενης θερμότητας (πρόσδοση θερμότητας).
- ❖ Η μετατόπιση των μέγιστων ενεργειακών απαιτήσεων του κτιρίου σε ώρες μη αιχμής της ενεργειακής ζήτησης του δικτύου.
- ❖ Η εξομάλυνση των ενεργειακών απαιτήσεων της εγκατάστασης κατά την διάρκεια του 24ώρου, για την απουσία ωρών αιχμής.

Η τοποθέτηση των ΥΑΦ σε κτιριακές εγκαταστάσεις πραγματοποιείται είτε με εμποτισμό στα δομικά υλικά είτε σε συσκευασία/κάψουλες. Ο εμποτισμός συνήθως γίνεται σε γύψο ή τσιμέντο, υλικά στα οποία επιτυγχάνεται συγκράτηση υλικού κατά την τήξη και σχεδόν μηδαμινή πρόσληψη υγρασίας από το περιβάλλον. Συγκεκριμένα, τα οργανικά PCM, συνδυάζονται πάντα με υλικά υψηλής πυραντίστασης, για την αποφυγή ανάφλεξης του PCM σε περίπτωση πυρκαγιάς. Η πιο συνήθης επιλογή εμποτισμού των παραπάνω υλικών είναι οι παραφίνες. Με την τοποθέτηση του PCM σε συσκευασία εξασφαλίζεται η συμβατότητά του με οποιοδήποτε άλλο υλικό, εφόσον δεν έρχονται σε επαφή. Οι σημαντικότερες εφαρμογές αυτής της μορφής, είναι η ενσωμάτωση του PCM στο δομικό υλικό μέσα

σε κάψουλες και η διαστρωμάτωση των συσκευασμένων PCM μεταξύ των στρώσεων δομικών υλικών. Για παράδειγμα, τοποθετούνται στρώματα PCM ανάμεσα στο σκυρόδεμα και την μόνωση ενός τοίχου.

Συνολικά, τα δυο ΥΑΦ που έχουν ευρεία χρήση σε εφαρμογές δομικών υλικών, είναι οι παραφίνες και τα ένυδρα άλατα. Ωστόσο, συγκριτικά, την βέλτιστη επιλογή αποτελούν τα ένυδρα άλατα, με υψηλότερη θερμοχωρητικότητα, θερμική αγωγιμότητα και μη εύφλεκτη ή τοξική συμπεριφορά, σε αντίθεση με τις παραφίνες.

#### 4.5.2 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ PCM ΣΤΟΥΣ ΤΟΙΧΟΥΣ

Ο κυριότερος παράγοντας που χαρακτηρίζει την τοιχοποιία είναι τα δομικά υλικά, που αναλύθηκαν στο παραπάνω υποκεφάλαιο. Παράλληλα όμως με τα δομικά υλικά, η λειτουργία μιας εφαρμογής PCM σε τοίχο, εξαρτάται από τις προδιαγραφές του, την τοποθεσία του στο κτίριο, τις εξωτερικές συνθήκες και βασικότερα, την διαμόρφωση της εγκατάστασης. Ένας τοίχος με νότιο προσανατολισμό και ενσωματωμένα PCM έχει καλή προοπτική για την αποθήκευση θερμότητας, ικανότητα όμως η οποία εξαρτάται από τις ιδιότητες του PCM.

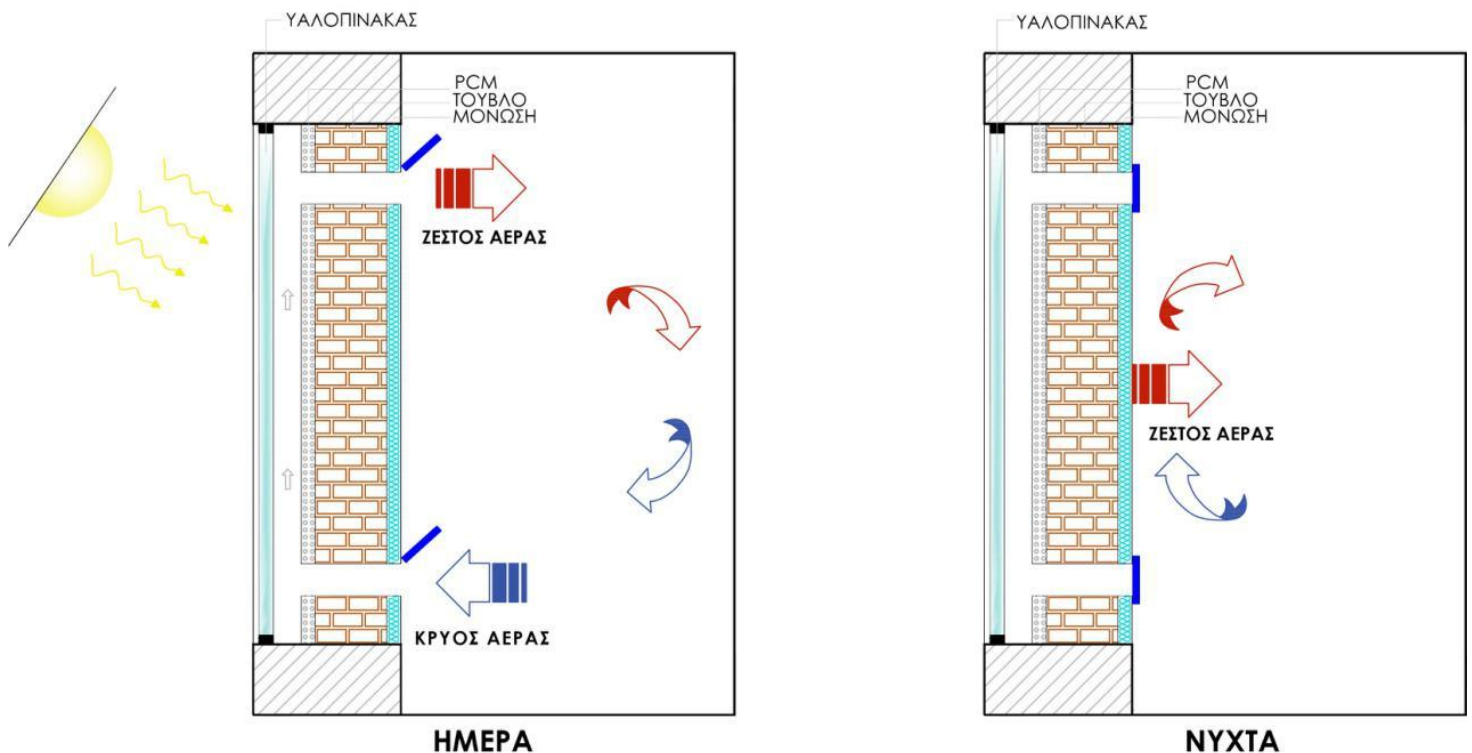
Για την βέλτιστη αποθηκευτική ικανότητα και απόδοση του τοίχου, επιλέγεται ΥΑΦ με θερμοκρασία τήξης/στερεοποίησης, όσο πλησιέστερη γίνεται στην μέση ημερήσια θερμοκρασία του τοίχου. Η θερμοκρασία αυτή υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την μέση ημερήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος και την σχέση μεταβολής της θερμοκρασίας του τοίχου συναρτήσει του πάχους του. Με αυτόν τον τρόπο, για μεγάλο χρονικό διάστημα της ημέρας το ΥΑΦ βρίσκεται σε υγρή κατάσταση απορροφώντας λανθάνουσα και στην συνέχεια αισθητή θερμότητα, αποδίδοντάς την στον εσωτερικό χώρο με την στερεοποίηση κατά την διάρκεια της νύχτας ή συννεφιασμένων ημερών. Το αποθηκευόμενο θερμικό φορτίο μεγιστοποιείται, ενώ η διακύμανση της θερμοκρασίας στον εσωτερικό χώρο εξομαλύνεται.

Ο συνδυασμός συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας με παθητικά ηλιακά συστήματα έχει ως αποτέλεσμα αισθητά βελτιωμένη απόδοση ενέργειας και αποθηκευτική ικανότητα αλλά και εξοικονόμηση δομικών υλικών.

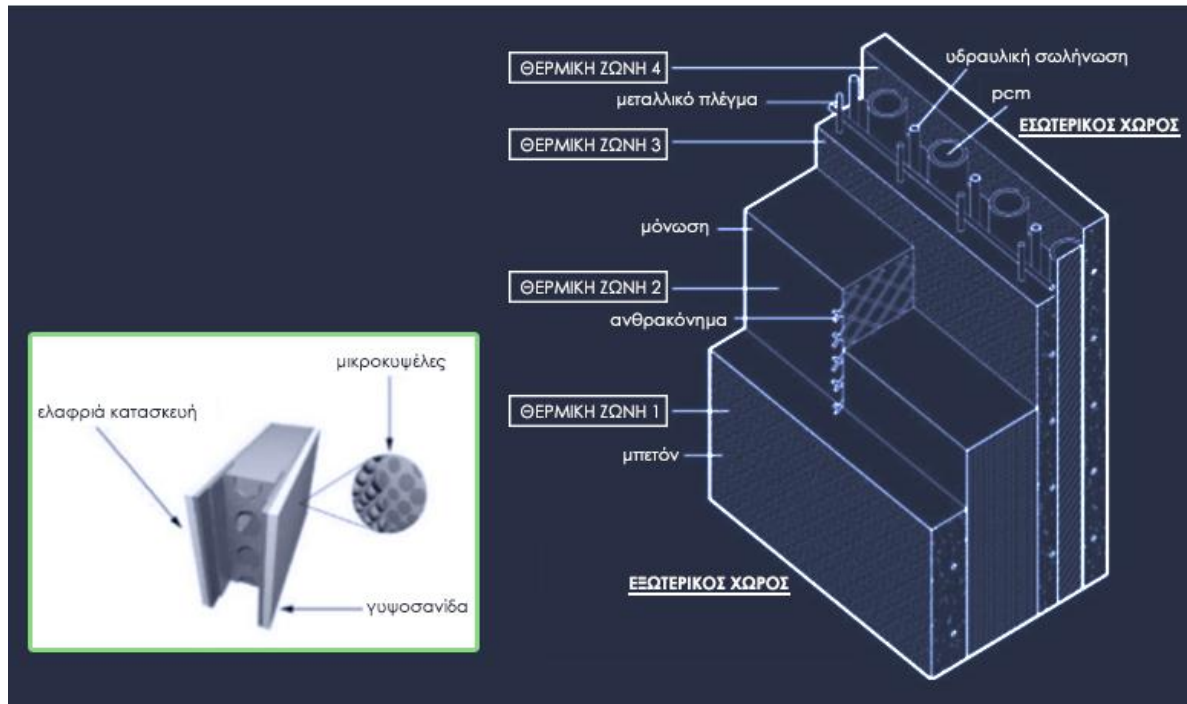
Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα ηλιακού παθητικού συστήματος με τοιχοποιία, αποτελεί ο τοίχος Trombe. Πρόκειται για συμπαγή τοίχο από σκυρόδεμα 30-40 cm, με βαμμένη εξωτερική επιφάνεια σε σκούρο χρώμα, συνήθως μαύρο. Σε απόσταση 3cm υπάρχει υαλοπίνακας μονής ή διπλής επιφάνειας, που επιτρέπει την διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία απορροφάται από τον τοίχο και θερμαίνει τον αέρα του διακένου. Ο αέρας διακινείται μέσω θυρίδων, στο πάνω και στο κάτω μέρος του τοίχου, προς τον εσωτερικό χώρο χαμηλότερης θερμοκρασίας. Ο θερμός αέρας εξέρχεται από την πάνω θυρίδα ενώ ανανεώνεται από την κάτω, αφού λόγω της διαφοράς θερμοκρασιών δημιουργούνται διαφορές πυκνοτήτων, με αποτέλεσμα τον φυσικό ελκυσμό της ροής του αέρα. Αποδίδεται, λοιπόν, θερμότητα στο εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια της ημέρας, κυρίως από τις θυρίδες και κατά την διάρκεια της νύχτας, μόνο από τον τοίχο, στον οποίο οι

θυρίδες παραμένουν κλειστές. Η αποθηκευτική ικανότητα του τοίχου εξαρτάται από το πάχος του και ανάλογα επηρεάζεται και η χρονική περίοδος απόδοσης της θερμότητάς του στον χώρο. Κατά την διάρκεια της νύχτας ενδείκνυται η χρήση μονωτικής κουρτίνας στο διάκενο τοίχου-υαλοπίνακα για την μείωση των θερμικών απωλειών προς το ψυχρότερο εξωτερικό περιβάλλον και την εκπομπή θερμότητας μόνο **προς** το εσωτερικό. Για τον ίδιο λόγο, παραμένουν κλειστές οι θυρίδες και δεν υπάρχει επιστροφή του θερμού αέρα από το εσωτερικό προς το ψυχρό διάκενο. Η λειτουργία του συστήματος πραγματοποιείται όπως περιγράφηκε μόνο υπό την προϋπόθεση ότι ο εσωτερικός χώρος βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από το διάκενο και τον τοίχο, ώστε να υπάρχει ροή θερμότητας μόνο προς αυτόν.

Συνεπώς, η χρήση του τοίχου Trombe με ενσωματωμένα PCM, ανεξαρτήτου μορφής, αυξάνει την θερμοχωρητικότητα του τοίχου και την χρονική απόδοση του συστήματος, σε διάρκεια ολόκληρου 24ώρου και παραπάνω, σε περίπτωση συννεφιάς. Πραγματοποιείται αποθήκευση αισθητής αλλά και λανθάνουσας θερμότητας, πλέον, λόγω των PCM. Επίσης, για δεδομένη ποσότητα αποθηκευόμενης θερμότητας, απαιτείται λιγότερη ποσότητα PCM με μικρότερο βάρος και όγκο, σε σχέση με την αντίστοιχη απαιτούμενη ποσότητα σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, μια τέτοια αντιστοιχία σκυροδέματος-PCM είναι τοίχος 40cm σκυροδέματος και τοίχος 8,1 cm PCM, με την θερμική απόδοση του δεύτερου ελαφρώς καλύτερη. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται εφαρμογές των ΥΑΦ στην δομή του τοίχου.



Σχήμα 4.5.2/1 : Απεικόνιση λειτουργίας τοίχου Trombe με ενσωματωμένα PCM



Σχήμα 4.5.2/2 : Παραδείγματα ενσωμάτωσης PCM στην δομή του τοίχου

#### 4.5.3 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ PCM ΣΤΟ ΔΑΠΕΔΟ ΚΤΙΡΙΟΥ

Η ενδοδαπέδια θέρμανση περιλαμβάνεται στις βέλτιστες επιλογές συστημάτων θέρμανσης. Αρχικά, βασικότερο προτέρημα του συστήματος είναι η ομοιομορφία της θέρμανσης, που εξασφαλίζει την θερμική άνεση του χώρου, αφού η θέρμανση του αέρα πραγματοποιείται από το δάπεδο, δηλαδή στην θέση συγκέντρωσης του ψυχρού αέρα, ο οποίος στην συνέχεια κινείται ανοδικά. Το εύρος θέρμανσης του χώρου είναι συνήθως 25-28 °C, ενώ αξίζει να σημειωθεί η πλήρης διακριτικότητα της εγκατάστασης ως προς τον εσωτερικό χώρο, χωρίς καμία απολύτως παρέμβαση αισθητικά.

Το σύστημα συναντάται κυρίως σε δύο μορφές, τα συστήματα ύδατος (υγρά) και τα ηλεκτρικά συστήματα (ξηρά). Στην πρώτη περίπτωση, η θέρμανση του δαπέδου πραγματοποιείται με σύστημα σωληνώσεων θερμού νερού που διακλαδώνεται σε αυτό, ενώ στην δεύτερη, με σύστημα ηλεκτρικών αντιστάσεων που εκπέμπουν θερμότητα στο δάπεδο. Ο συνδυασμός των συστημάτων αυτών με το σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας των PCM, αποδίδει τόσο σε θερμική ενέργεια προσφερόμενη στο εσωτερικό περιβάλλον, όσο και σε εξοικονόμηση καταναλισκόμενης ενέργειας για την λειτουργία του συστήματος θέρμανσης.

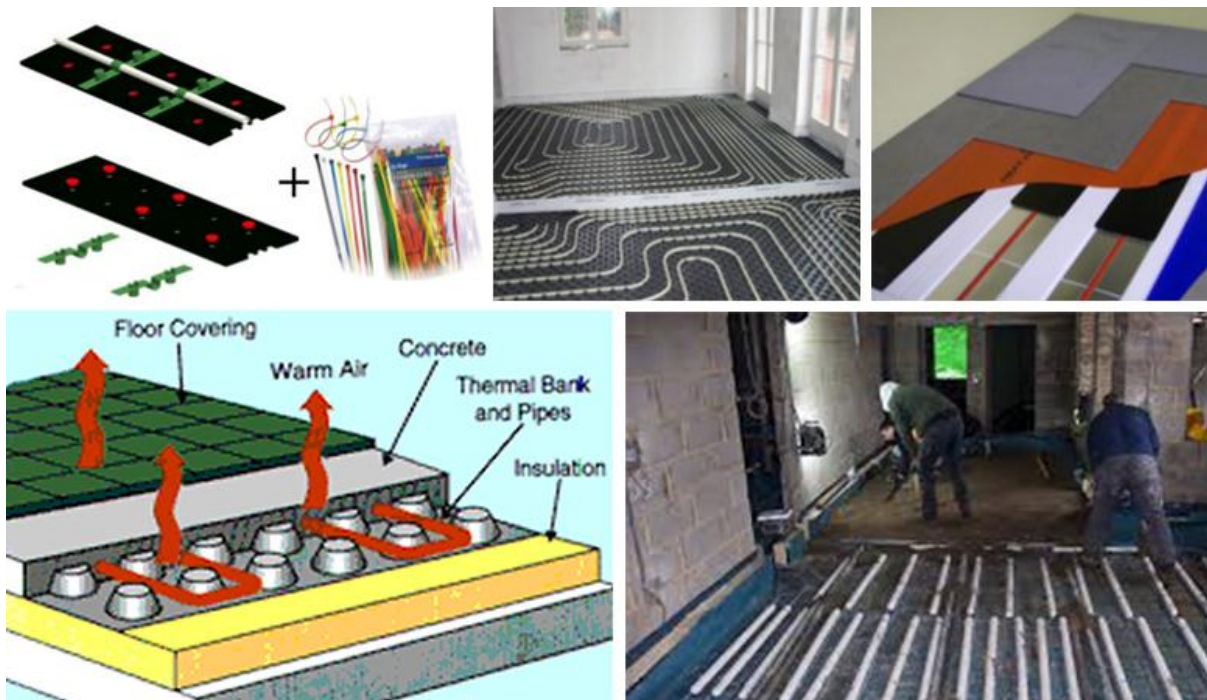
Στα συστήματα ύδατος, η θέρμανση του νερού κυκλοφορίας γίνεται με την χρήση λέβητα συμβατικών καυσίμων ή με ηλιακούς συλλέκτες. Στην περίπτωση χρήσης καυσίμων δεν συνηθίζεται η χρήση PCM αφού η θέρμανση πραγματοποιείται άμεσα, την στιγμή που προκύπτει ζήτηση, το κόστος λειτουργίας παραμένει σταθερό καθόλη την διάρκεια του 24ώρου και δεν απαιτείται η αποθήκευση

θερμότητας. Αντίθετα, στην περίπτωση χρήσης ηλιακής ακτινοβολίας, η απορροφώμενη από το νερό θερμότητα πρέπει να αποθηκευτεί έως ότου υπάρξει ζήτηση, ενδεχομένως την νύχτα, αλλά και για την πιθανότητα συννεφιασμένων ημερών, που θα υπάρχει αδυναμία προσφοράς θερμικού φορτίου από τους συλλέκτες.

Στα ηλεκτρικά συστήματα, παρόλο που η ανταπόκριση στην ζήτηση μπορεί να γίνει άμεσα, τις ώρες μη αιχμής για το δίκτυο, κυρίως την νύχτα, το ηλεκτρικό ρεύμα έχει μειωμένο κόστος, δίνοντας την ευκαιρία εξοικονόμησης. Συνεπώς και σε αυτήν την περίπτωση συνιστάται η αποθήκευση θερμότητας σε PCM για διαθεσιμότητα χρήσης τις ώρες που απαιτείται.

Σε όλα τα συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με PCM, η πηγή θερμότητας, δηλαδή οι σωλήνες θερμού νερού ή οι ηλεκτρικές αντιστάσεις, περιβάλλονται από την ποσότητα PCM και φορτίζουν το υλικό. Σε οποιαδήποτε περίπτωση, το σύστημα ξεκινά να αποδίδει με μία χρονική καθυστέρηση, η οποία οφείλεται στο χρονικό διάστημα που απαιτείται για την πλήρη φόρτιση του PCM (χρόνος φόρτισης) με λανθάνουσα θερμότητα. Συγκεκριμένα, το υλικό απορροφά αισθητή θερμότητα για να φτάσει την θερμοκρασία τήξης του, στην οποία ξεκινά η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας με την μεταβολή κατάστασης του υλικού. Από την στιγμή πλήρωσης του ΥΑΦ με θερμότητα, η ενδοδαπέδια εγκατάσταση ξεκινά να την απελευθερώνει στον χώρο μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας του δαπέδου, από την αισθητή θερμότητα του ΥΑΦ και του νερού ή των ηλεκτρικών αντιστάσεων. Όταν το σύστημα απενεργοποιηθεί, για ορισμένο χρονικό διάστημα πραγματοποιείται αποφόρτιση του PCM (χρόνος αποφόρτισης) για την εξασφάλιση σταθερής θερμοκρασίας δαπέδου και εσωτερικού περιβάλλοντος.

Σημειώνεται ότι λαμβάνοντας υπόψη τον χρόνο φόρτισης του PCM, είναι δυνατή η μείωση του λειτουργικού κόστους του συστήματος, με την επιλογή ρύθμισης λειτουργίας σε ώρες μη αιχμής. Επίσης, πρέπει να αναφερθούν οι θερμικές απώλειες της εγκατάστασης από την πηγή θερμότητας προς το έδαφος, όπου βρίσκει εφαρμογή η θερμομόνωση και εμποδίζει την διέλευση μεγάλου ποσοστού των απωλειών.

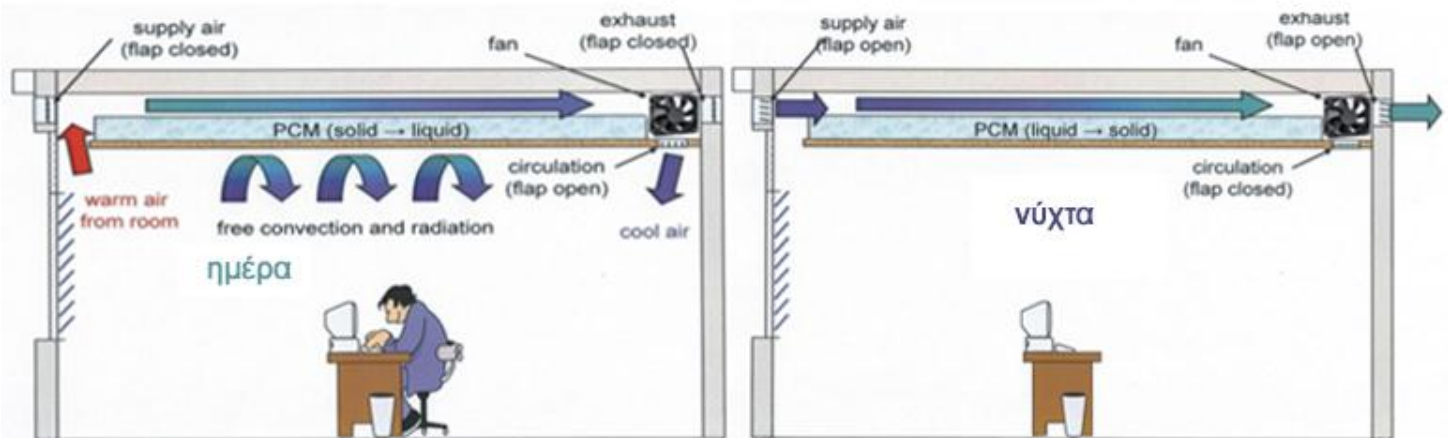


Σχήμα 4.5.3/1 : Εφαρμογές PCM σε ενδοδαπέδια συστήματα θέρμανσης

Με την πάροδο του χρόνου, η χρήση PCM στην ενδοδαπέδια θέρμανση ενδεχομένως να αντικαταστήσει την χρήση του θερμομπετόν, πετυχαίνοντας εξοικονόμηση ενέργειας, χωρίς σημαντική επιβάρυνση εγκατάστασης του υλικού, λόγω χρήσης των παραφινών υπό χύδην μορφή, που έχουν μειωμένο κόστος. Για παράδειγμα, σε ενδοδαπέδιο σύστημα με στρώματα κεριού παραφίνης, πάχους 30 mm, μεταξύ των ηλεκτρικών αντιστάσεων και του δαπέδου, η προσφερόμενη στον χώρο θερμότητα αυξήθηκε σε  $75 \text{ W/m}^2$ , από την αρχική τιμή των  $30 \text{ W/m}^2$  του συστήματος απουσία των PCM.

#### 4.5.4 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ PCM ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΡΟΣΙΣΜΟΥ-ΨΥΞΗΣ

Τα συστήματα δροσίσιμου και ψύξης διαστασιοποιούνται σύμφωνα με το μέγιστο θερμικό φορτίο της εγκατάστασης (κατοικία, γραφεία, θάλαμος ψύξης κλπ), ώστε να υπάρχει πλήρης κάλυψη των αναγκών κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες. Η υποβοήθηση ενός τέτοιου συστήματος με την ενσωμάτωση κατάλληλου ΥΑΦ επιτυγχάνει την αισθητή μείωση του θερμικού φορτίου, άρα και την μείωση του ολικού κόστους του συστήματος. Το υλικό συνήθως υπό την μορφή μακροκαψουλών (σακούλες, πανέλα αλουμινίου κ.ά.) τοποθετείται στην οροφή, δηλαδή την περιοχή συγκέντρωσης του θερμού αέρα. Επιλέγεται ΥΑΦ ώστε να απορροφά θερμότητα από τον επιθυμητό χώρο (φόρτιση) και να παραμένει στην υγρή κατάσταση κατά την διάρκεια της ημέρας (ώρες χρήσης), ενώ κατά την διάρκεια της νύχτας ψύχεται αποβάλλοντας την αποθηκευμένη θερμότητα (αποφόρτιση). Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η διατήρηση των εσωτερικών συνθηκών του χώρου, με περιβαλλοντικά φιλικό και οικονομικό σύστημα.



Σχήμα 4.5.4/1 : Λειτουργία Συστήματος Δροσισμού με PCM, κατά την διάρκεια του 24ώρου

#### 4.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ [βιβλ. 30, 31, 32]

Η εξάρτηση των ηλιακών συστημάτων από τα καιρικά φαινόμενα επιτάσσει την αποθήκευση ενέργειας κατά την διάρκεια της ημέρας, για την κάλυψη της ζήτησης τόσο του 24ώρου, όσο και των επομένων, σε περίπτωση συννεφιάς. Η ενσωμάτωση των ΥΑΦ σε ένα ηλιακό σύστημα συνήθως συναντάται με την μορφή στρωμάτων ΥΑΦ στην δομή του τοίχου ή με δεξαμενές αποθήκευσης ΥΑΦ, που αποτελούν μέρος του ηλιακού κυκλώματος. Το μικρό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του υλικού επιτρέπει την άμεση και γρήγορη αποθήκευση/πρόσδοση θερμικής ενέργειας στις θερμοκρασίες κυκλοφορίας του θερμού μέσου, διευκολύνοντας και αυξάνοντας έτσι την απόδοση του ηλιακού συστήματος. Επίσης, η χρήση των ΥΑΦ επιφέρει μείωση του συνολικού όγκου της εγκατάστασης.

Το ηλιακό σύστημα με PCM βασίζεται γενικά στην απλή διαδικασία φόρτισης του ΥΑΦ από το θερμό μέσο κυκλοφορίας και αποφόρτισής του στο περιβάλλον της αντίστοιχης κάθε φορά εφαρμογής. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των ΥΑΦ σε τοίχο, η συναλλαγή θερμότητας πραγματοποιείται με σύστημα σωληνώσεων (σερπαντίνα) που διαπερνά τις στρώσεις ΥΑΦ, εσωτερικά του τοίχου. Με αυτόν τον τρόπο, πραγματοποιείται πλήρης φόρτιση, ενώ από την στιγμή διακοπής της λειτουργίας του ηλιακού συλλέκτη, η θερμοκρασία του άμεσου περιβάλλοντος του PCM θα αρχίσει να μειώνεται, το υλικό θα αποφορτιστεί σταδιακά, με την θερμότητα να αποδίδεται προς τις εξωτερικές επιφάνειες και το περιβάλλον του τοίχου.

Κατά την εφαρμογή των PCM σε δεξαμενές αποθήκευσης, το θερμό μέσο κυκλοφορίας, προερχόμενο από τον ηλιακό συλλέκτη, πληρεί την δεξαμενή, περιβάλλοντας το PCM και φορτίζοντάς το. Η αποφόρτιση του υλικού πραγματοποιείται για την θέρμανση του μέσου κυκλοφορίας στις περιπτώσεις αδυναμίας και διακοπής της λειτουργίας του ηλιακού συλλέκτη, δηλαδή απουσία ηλιοφάνειας. Τις ίδιες αρχές λειτουργίας παρουσιάζει και η περίπτωση δεξαμενής του θερμού μέσου, περιβαλλόμενης εξωτερικά από PCM.



Η προς μελέτη εγκατάσταση στην παρούσα διπλωματική, αποτελεί μία περίπτωση ηλιακού συστήματος με PCM.

#### 4.7 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ [βιβλ. 33, 34]

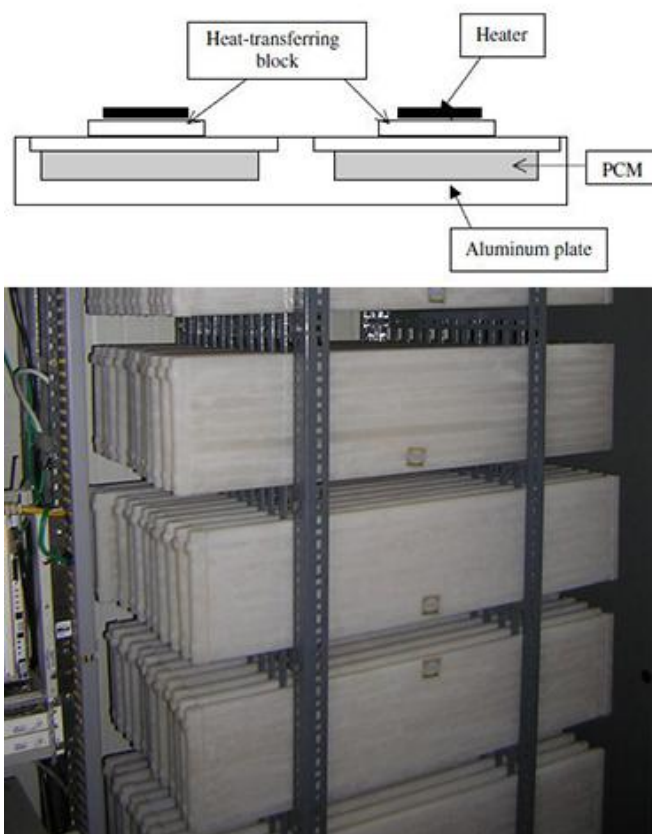
Οι προδιαγραφές των φωτοβολταϊκών πλαισίων ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες συνθήκες, με αποτέλεσμα την εμφάνιση απωλειών κατά την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, σε περίπτωση μεταβολής των συνθηκών. Συγκεκριμένα, μία συνήθης θερμοκρασία λειτουργίας είναι οι 25 °C, η οποία αποτελεί ανώτατο όριο πέραν του οποίου παρουσιάζεται μείωση της απόδοσης του συστήματος κατά 0,5 % για κάθε βαθμό Κελνίν. Ο περιορισμός του φαινομένου πραγματοποιείται με την τοποθέτηση PCM στο πίσω μέρος των φωτοβολταϊκών πλαισίων, σε συσκευασία εξωτερικής επιφάνειας αδιαβατικής προς το περιβάλλον. Η εσωτερική τους επιφάνεια έρχεται σε επαφή με τα πάνελ, απορροφώντας θερμότητα για την διατήρηση της θερμοκρασίας και της απόδοσης του συστήματος στα επιθυμητά πλαίσια.

#### 4.8 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ [βιβλ. 35, 36, 37]

Η συνεχής εξέλιξη των τεχνολογικών δεδομένων όσον αφορά τις ηλεκτρονικές συσκευές, επιτρέπει την δημιουργία και χρησιμοποίηση όλο και μικρότερων σε μέγεθος εξαρτημάτων. Με την παράλληλη αύξηση των δυνατοτήτων τους, έρχεται η αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος, άρα και η εμφάνιση μεγαλύτερων θερμικών απωλειών. Συνεπώς, σε περιπτώσεις αδυναμίας χρήσης των συμβατικών μέσων ψύξης (ανεμιστήρες κλπ) των εξαρτημάτων και κινητών συσκευών, τα PCM αποτελούν μία αποτελεσματική λύση. Η τοποθέτηση PCM στο άμεσο περιβάλλον των εξαρτημάτων (με ή χωρίς άμεση επαφή) βελτιώνει τις συνθήκες λειτουργίας, διατηρώντας την θερμοκρασία σε επιθυμητά επίπεδα, συνήθως μέχρι 50°C. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η περίπτωση βλάβης (υπερθέρμανση, τήξη, ανάφλεξη) των εξαρτημάτων και επιτυγχάνεται η ομαλή λειτουργία της συσκευής. Τα ΥΑΦ επιλέγονται κατάλληλα ώστε να διατηρούνται σε θερμοκρασίες εντός του εύρους λειτουργίας τους, για την συνεχή απορρόφηση λανθάνουσας θερμότητας και όχι αισθητής, αφού συνοδεύεται από την αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού, φαινόμενο ανεπιθύμητο. Βρίσκουν εφαρμογή σε ηλεκτρονικές συσκευές και χώρους αποθήκευσης ηλεκτρονικών συσκευών για έλεγχο της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν οι εφαρμογές PCM σε φορητούς και 'φορετούς' υπολογιστές (στον καρπό κ.ά.).

Οι πειραματικές διατάξεις που εξετάστηκαν αποτελούν εφαρμογές συνδυασμού των ΥΑΦ, για την απορρόφηση θερμότητας και του αλουμινίου, ως καλό αγωγό θερμότητας για την φόρτιση των συστημάτων απαγωγής θερμότητας. Στην πρώτη περίπτωση, το σύστημα αποτελεί μία λεπτή πλάκα αλουμινίου, με κοιλότητες διαμέτρου 1,5 mm που πληρούνται με PCM, η οποία τοποθετείται στην επιθυμητή περιοχή υπερθέρμανσης του υπολογιστή. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη του συστήματος φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

Στην επόμενη περίπτωση, η ενθυλάκωση 80 cm<sup>3</sup> PCM σε αφρό αλουμινίου και η ενσωμάτωσή του σε 'φορετό' υπολογιστή, απέφερε έλεγχο της θερμοκρασίας της συσκευής και αποφυγή της υπερθέρμανσης.



Σχήμα 4.8/1 : Παραδείγματα εφαρμογών PCM σε ηλεκτρονικές συσκευές

Συνεχίζοντας, σε δωμάτια/container (ηλεκτρικούς υποσταθμούς, control rooms κ.ά.) που περιλαμβάνουν ηλεκτρονικούς πίνακες, επεξεργαστές κλπ, κρίνεται απαραίτητος ο δροσισμός και η διατήρηση της θερμοκρασίας σε ασφαλή λειτουργικά επίπεδα. Η χρήση PCM μπορεί να αντικαταστήσει μερικώς τις συμβατικές μεθόδους ψύξης (ανεμιστήρες, κλιματισμός κλπ) με την τοποθέτηση ποσοτήτων του υλικού (πάνελ, σωλήνες κ.ά.) στον περιβάλλοντα χώρο, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, ή και σε επαφή με τις συσκευές.

Συνοψίζοντας, τα ΥΑΦ έχουν την ικανότητα απαγωγής της παραγόμενης θερμότητας από τις ηλεκτρονικές συσκευές, προσφέροντας εξοικονόμηση ενέργειας, βελτίωση των συνθηκών λειτουργίας και ως επακόλουθο, αύξηση της απόδοσης και διάρκειας ζωής των συσκευών.

#### 4.9 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ [βιβλ. 38]

Η ανάγκη μεταφοράς προϊόντων σε περιβάλλον ελεγχόμενης θερμοκρασίας βρίσκει ανταπόκριση σε ποικίλους τομείς, όπως την διανομή φαρμάκων, τροφίμων αλλά και σε ιατρικές εφαρμογές. Για τον λόγο αυτόν, έχουν δημιουργηθεί από διάφορες εταιρείες συσκευασίες/κιβώτια και container, πολλαπλών μεγεθών, επενδυμένα με ΥΑΦ για μόνωση και διατήρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Όπως θα αναφερθεί παρακάτω με συγκεκριμένα παραδείγματα, ένα ενδεικτικό θερμοκρασιακό εύρος των εφαρμογών των ΥΑΦ είναι  $-20^{\circ}\text{C} \pm 65^{\circ}\text{C}$ . Με την εκλογή κατάλληλου PCM πραγματοποιείται φόρτισή του σε καταψύκτες/ψυγεία ή φούρνους, θέτοντας έτσι τις συνθήκες λειτουργίας και θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μεταφοράς των προϊόντων. Το υλικό, ανάλογα, απορροφά ή αποδίδει θερμότητα στο άμεσο περιβάλλον, προστατεύοντας τα προϊόντα από τις εξωτερικές συνθήκες (ambient), για διάρκεια ωρών έως ημερών. Στην συνέχεια, παρατίθενται παραδείγματα συστημάτων μεταφοράς προϊόντων σε περιβάλλον ελεγχόμενο από PCM.



Σχήμα 4.9/1 : Παραδείγματα εφαρμογών PCM σε συστήματα μεταφοράς προϊόντων

Ξεκινώντας από την εικόνα πάνω αριστερά, φαίνεται το κιβώτιο της εταιρείας va-Q-tec AG, υψηλής απόδοσης, κενού και βέλτιστης μόνωσης PCM, με θερμική αγωγιμότητα 7 έως 8 φορές καλύτερη από συμβατικά υλικά μόνωσης. Για θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος  $\geq 30^{\circ}\text{C}$ , η εσωτερική θερμοκρασία του κιβωτίου μπορεί να διατηρηθεί στους  $-20^{\circ}\text{C}$  για 4 ημέρες (96 ώρες). Στην περίπτωση μεταφοράς φαρμακευτικών προϊόντων, η θερμοκρασία διατηρείται στους  $2 \pm 8^{\circ}\text{C}$  για 3,5 ημέρες (84 ώρες), με εξωτερική θερμοκρασία  $\geq 20^{\circ}\text{C}$ .

Συνεχίζοντας προς τα δεξιά, κιβώτιο μεταφοράς της εταιρείας PCM Energy R.Ltd και δίπλα, σύστημα μεταφοράς αίματος, φτιαγμένο από PCM, της Delta T, για την

διατήρηση της θερμοκρασίας στους  $2 \pm 10^{\circ}\text{C}$  για 12 ώρες, χωρίς βοηθητική πηγή ψύξης.

Στην εικόνα κάτω αριστερά, φαίνεται πλάκα αλουμινίου με ενσωματωμένα PCM, της εταιρείας Rubitherm Technologies GmbH, για την διατήρηση πίτσας σε θερμοκρασία  $\geq 65^{\circ}\text{C}$  κατά την μεταφορά παραγγελιών.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται τρόλεϊ, επενδυμένο με PCM, για την διανομή φαγητού σε νοσοκομεία, σχολεία κλπ, της va-Q-tec, το οποίο προσφέρει αποθήκευση μέχρι και  $-10^{\circ}\text{C}$  για διάρκεια 35 ωρών, σε εξωτερική θερμοκρασία  $25^{\circ}\text{C}$ .

Οι δύο τελευταίες εικόνες αποτελούν λύσεις PCM για την μεταφορά προϊόντων, σε μεγαλύτερη κλίμακα (φορτηγά, πλοία, αεροπλάνα). Το container της va-Q-tec, επιτρέπει την αποθήκευση 500 Kg προϊόντος σε θερμοκρασίες μέχρι και  $-18^{\circ}\text{C}$ , για διάρκεια 4 ημερών (96 ώρες), σε εξωτερική θερμοκρασία  $20^{\circ}\text{C}$ .

Τέλος, η συσκευή εξαναγκασμένης συναγωγής, με πλάκες PCM και ανεμιστήρα στην κορυφή, αποτελεί φορητό σύστημα σταθεροποίησης της θερμοκρασίας, που αναπτύχθηκε από την ACME. Αποτελεί οικονομική και αποδοτική λύση, έναντι των φορτηγών ψυγείων και παρέχει δροσισμό/ψύξη για διάρκεια έως και 48 ώρες.

#### 4.10 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΣΩΜΑ [βιβλ. 39, 40, 41, 42, 43, 44]

Η διασφάλιση της θερμοκρασίας του ανθρωπίνου σώματος σε φυσιολογικά επίπεδα κρίνεται κρίσιμη για την υγεία και την θερμική άνεση ενός ατόμου. Η έκθεση σε ακραίες θερμοκρασιακές συνθήκες επιβαρύνει τον οργανισμό και μπορεί να οδηγήσει ακόμα και στον θάνατο. Για τις περιπτώσεις αυτές, αλλά και πιο ομαλών συνθηκών, όπως της σωματικής άσκησης ή των χειμερινών θερμοκρασιών περιβάλλοντος, η εκμετάλλευση των ιδιοτήτων των PCM αποτελεί λύση. Δύναται η ενσωμάτωση των υλικών σε προϊόντα ένδυσης (ρούχα, γάντια κλπ), υφάσματα ευρείας εφαρμογής αλλά και απλές σακούλες/επιθέματα (rouches) άμεσης χρήσης. Η έρευνα στον συγκεκριμένο τομέα ξεκίνησε από την ανάγκη προστασίας των αστροναυτών από τις ακραίες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, ενώ προχώρησε στην συνέχεια, στην προστασία πυροσβεστών, ορειβατών, οδηγών κλπ και γενικά, περιβάλλοντα επικίνδυνων θερμοκρασιών. Η επιτυχής αυτή τεχνολογία των PCM εφαρμόστηκε σταδιακά σε ενδύματα, υφάσματα κ.ά. καθημερινής χρήσης, προσφέροντας ανάλογα δροσισμό ή θέρμανση με στόχο την διατήρηση του μικροκλίματος του σώματος.

Στην κατηγορία των **μακροκαψουλών**, η κύρια μορφή χρησιμοποίησης των ΥΑΦ είναι οι σακούλες (rouches), διαφόρων μεγεθών, για την άμεση τοποθέτηση σε επαφή με το σώμα, είτε σαν μονάδες, είτε ενσωματωμένες σε ενδύματα. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ένα θερμαντικό τσέπης (rocket heater/warmer), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε σημείο του σώματος για παροχή θερμότητας και αύξηση της θερμοκρασίας. Η φόρτιση του θερμαντικού

επιτυγχάνεται μέσω της τήξης του υλικού με βραστό νερό, κατά την οποία απορροφά λανθάνουσα θερμότητα. Στην συνέχεια, το υλικό αφήνεται να επανέλθει στην θερμοκρασία περιβάλλοντος, αλλά δεν πραγματοποιείται στερεοποίηση. Το φαινόμενο οφείλεται στην σύσταση του ένυδρου άλατος με προσθετικά, η οποία εμφανίζει υψηλή και σταθερή υπόψυξη. Με αυτόν τον τρόπο, το θερμαντικό διατηρεί την αποθηκευμένη θερμότητα για διάρκεια ημερών, ενώ η απελευθέρωσή της πραγματοποιείται με ένα μηχανικό εξάρτημα ενσωματωμένο στο υλικό, το οποίο ξεκινά στην διαδικασία στερεοποίησης.



Σχήμα 4.10/1 : Εφαρμογές μακροκαψουλών PCM

Μία ακόμα εφαρμογή μακροκαψουλών, αποτελεί το γιλέκο της παραπάνω εικόνας, στην εσωτερική επιφάνεια του οποίου έχουν ενσωματωθεί σακούλες PCM. Ανάλογα το θερμοκρασιακό εύρος του ΥΑΦ, το συγκεκριμένο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δροσισμό τους καλοκαιρινούς μήνες ή περιστάσεις έντονης σωματικής άσκησης, αλλά και ως προστασία πυροσβεστών, επιτρέποντας μεγαλύτερη αντοχή στην εκπεμπόμενη, από τις πυρκαγιές, θερμότητα. Για παράδειγμα, στο παραπάνω γιλέκο, της εταιρείας Actiragmr, η φόρτιση του ΥΑΦ από το σώμα ξεκινά στους 28°C και διαρκεί μέχρι και 4 ώρες, ενώ η αποφόρτιση της λανθάνουσας θερμότητας πραγματοποιείται για θερμοκρασίες  $\leq 20^{\circ}\text{C}$ . Αξίζει να αναφερθεί και η εφαρμογή των PCM στην δομή αλεξίσφαιρων γιλέκων.

Οι **μικροκάψουλες**, λόγω μεγέθους αποτελούν εμφανώς, καλύτερη επιλογή για την ενσωμάτωση σε είδη ένδυσης κλπ, συγκριτικά με τις μακροκάψουλες. Οι κάψουλες της τάξης μικρομέτρων (μm) εμποτίζονται στις ίνες υφασμάτων, δημιουργώντας μία νέα σύνθεση υψηλής θερμοχωρητικότητας με την ικανότητα σταθεροποίησης της θερμοκρασίας του σώματος. Τα αναβαθμισμένα αυτά υφάσματα ανταποκρίνονται στις ανάγκες ποικίλων προϊόντων, τόσο για δροσισμό, όσο και για θέρμανση. Για παράδειγμα, τοποθετούνται ως εξωτερική ή εσωτερική επένδυση σε μπουφάν, γάντια, κάλτσες, πάτους παπουτσιών, παπλώματα, στρώματα, στολές αστροναυτών κ.ά., για την εξομάλυνση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων. Παρακάτω δίνονται εικόνες της δομής των υφασμάτων και παραδείγματα εφαρμογών τους στο εμπόριο.



Σχήμα 4.10/2 : Δομή υφασμάτων με ενσωματωμένες μικροκάψουλες PCM

Το μπουφάν της επόμενης εικόνας πρόκειται για το BMW PCM-Jacket με ύφασμα της εταιρείας Schoeller Textiles AG, ενισχυμένο με μικροκάψουλες, το οποίο φοριέται εσωτερικά του εξοπλισμού μηχανής για προφύλαξη από την μεταβαλλόμενη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ένα ακόμα είδος ένδυσης για μηχανές, τα αδιάβροχα χειμερινά γάντια της εταιρείας REV'IT!, με εσωτερική μόνωση PCM της Schoeller. Τέλος, οι χειμερινοί πάτοι παπουτσιών της εταιρείας Superfeet, με επένδυση, εμπλουτισμένου με PCM, υφάσματος της Outlast, για έλεγχο της θερμοκρασίας του ποδιού.



Σχήμα 4.10/3 : Εφαρμογές υφασμάτων με μικροκάψουλες PCM

Η ανάπτυξη καλυμμάτων και επιθεμάτων με ενσωματωμένα PCM, θερμοκρασίας τήξης της τάξης των 50°C, για την παραϊατρική εφαρμογή της θερμοθεραπείας, αποτελεί αντικείμενο της εταιρείας Spitzner. Χρησιμοποιώντας μικροκάψουλες παραφίνης (PCM) της εταιρείας Rubitherm, σε μορφή σκόνης, με την αποφόρτιση και στερεοποίηση του υλικού, η πρόσδοση θερμότητας στο σώμα βελτιώνει την κυκλοφορία του αίματος και ανακουφίζει το μυϊκό και σκελετικό σύστημα. Η δομή της σκόνης επιτρέπει την ευελιξία της συσκευασίας προσφέροντας εύκολη εφαρμογή σε οποιοδήποτε πάσχον σημείο του σώματος.



Σχήμα 4.10/4 : Εφαρμογές μικροκαψουλών PCM σε μορφή σκόνης

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 4<sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- 
- <sup>1</sup> Harald Mehling, Luisa F. Cabeza , **“Heat and cold storage with PCM : An up to date introduction into basics and applications”**, Springer Science & Business Media, 15 Aug 2008
  - <sup>2</sup> Halime O Paksoy, **“Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption, Fundamentals, Case Studies and Design”**, Nato Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, Volume 234, 2007
  - <sup>3</sup> Jean Paris, Michel Falardeau, Cécile Villeneuve, **“Thermal Storage by Latent Heat: A Viable Option for Energy Conservation in Buildings”**, Energy Sources, Volume 15, Issue 1, 1993, Pages 85-93
  - <sup>4</sup> <http://www.mdpi.com/2076-3263/3/1/63/htm>
  - <sup>5</sup> Harald Mehling, Luisa F. Cabeza , **“Heat and cold storage with PCM : An up to date introduction into basics and applications”**, Springer Science & Business Media, 15 Aug 2008
  - <sup>6</sup> Jean Paris, Michel Falardeau, Cécile Villeneuve, **“Thermal Storage by Latent Heat: A Viable Option for Energy Conservation in Buildings”**, Energy Sources, Volume 15, Issue 1, 1993, Pages 85-93
  - <sup>7</sup> D.W. Hawes, D. Banu, D. Feldman **“Latent Heat Storage in Concrete”**, Solar Energy Materials, Volume 19, Issues 3–5, November 1989, Pages 335-348
  - <sup>8</sup> Syukri Himran, Aryadi Suwono, G. Ali Mansoori, **“Characterization of Alkanes and Paraffin Waxes for Application as Phase Change Energy Storage Medium”**, Energy Sources, Volume 16, Issue 1, 1994, Pages 117-128
  - <sup>9</sup> A. Felix Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, **“Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review”**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 12, Issue 9, December 2008, Pages 2438–2458
  - <sup>10</sup> [http://www.pcmproducts.net/Encapsulated\\_PCMs.htm](http://www.pcmproducts.net/Encapsulated_PCMs.htm)
  - <sup>11</sup> <https://www.basf.com/en/company/news-and-media/science-around-us/wax-in-the-wall-for-a-pleasant-indoor-climate.html>
  - <sup>12</sup> [http://www.micronal.de/portal/load/fid443847/BASF\\_Micronal\\_PCM\\_Brochure%202009-English.pdf](http://www.micronal.de/portal/load/fid443847/BASF_Micronal_PCM_Brochure%202009-English.pdf)
  - <sup>13</sup> <http://www.slideshare.net/RCCKL/praktijkcase-koelen-zonder-koudemiddel>
  - <sup>14</sup> <http://www.rubitherm.eu/en/productCategories.html>
  - <sup>15</sup> Harald Mehling, Luisa F. Cabeza , **“Heat and cold storage with PCM : An up to date introduction into basics and applications”**, Springer Science & Business Media, 15 Aug 2008



- 
- <sup>16</sup> M.M. Farid, M.A. Khudhair, S.A.K. Razack, S. Al-Hallaj, “**A review on phase change energy storage: materials and applications**”, *Energy Conversion and Management*, Volume 45, Issues 9–10, June 2004, Pages 1597–1615
- <sup>17</sup> <http://www.pcm-solutions.com/consulting.html>
- <sup>18</sup> Harald Mehling, Luisa F. Cabeza , “**Heat and cold storage with PCM : An up to date introduction into basics and applications**”, Springer Science & Business Media, 15 Aug 2008
- <sup>19</sup> Harald Mehling, Luisa F. Cabeza , “**Heat and cold storage with PCM : An up to date introduction into basics and applications**”, Springer Science & Business Media, 15 Aug 2008
- <sup>20</sup> <http://www.slideshare.net/RCCCL/praktijkcase-koelen-zonder-koudemiddel>
- <sup>21</sup> V.V. Tyagi, D. Buddhi, “**PCM thermal storage in buildings: A state of art**”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 11, Issue 6, August 2007, Pages 1146–1166
- <sup>22</sup> V. Metivaud, L. Ventola, “**Thermal Insulation of Buildings using Phase Change Materials**”, *Energy and Buildings*, Vol 36
- <sup>23</sup> D.W. Hawes, D. Feldman, D. Banu, “**Latent Heat Storage in Building Materials**”, *Energy and Building*, Volume 20, Issue 1, 1993, Pages 77-86
- <sup>24</sup> 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*, Volume 38, Issue 5, May 2006, Pages 436-446
- <sup>25</sup> K. Lin, Y. Zhang, “**Experimental study of under-floor electric heating system,with shape- stabilized PCM plates**”, *Energy and Buildings*, Volume 37, Issue 3, March 2005, Pages 215-220
- <sup>26</sup> B. Zalba. J. Martin, “**Free-cooling of buildings with phase change materials, International journal of refrigeration**”, *International Journal of Refrigeration*, Volume 27, Issue 8, December 2004, Pages 839-849
- <sup>27</sup> <http://content.honeywell.com/uk/homes/underfloor.htm>
- <sup>28</sup> <http://www.slideshare.net/ahmadalshaghe15/phase-change-materials-pcm-review>
- <sup>29</sup> <http://www.pcmenergy.com/products.htm>
- <sup>30</sup> Y. Rabin, I. Bar-Niv, E. Korin, B. Mikic, “**Integrated solar collector storage system based on a salt-hydrate phase-change material**”, *Solar Energy*, Volume 55, Issue 6, December 1995, Pages 435-444
- <sup>31</sup> S. Canbazoglu, A. Sahinaslan, A. Ekmekyapar, Y.G. Aksoy, F. Akarsu, “**Enhancement of solar thermal energy storage performance using sodium thiosulfate pentahydrate of a conventional solar water-heating system**”, *Energy and Buildings*, Volume 37, Issue 3, March 2005, Pages 235-242
- <sup>32</sup> <http://www.eren.doe.gov/solarbuildings/techdescr.html>

- 
- <sup>33</sup> M.J. Huang, P.C. Eames, B. Norton, “**Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics**”, Solar Energy, Volume 80, Issue 9, September 2006, Pages 1121-1130
- <sup>34</sup> [http://www.epia.org/documents/NL\\_0604\\_018.pdf](http://www.epia.org/documents/NL_0604_018.pdf)
- <sup>35</sup> F.L. Tan, C.P. Tso, “**Cooling of mobile electronic devices using phase change materials**”, Applied Thermal Engineering, Volume 24, 2004, Pages 159-169
- <sup>36</sup> <http://www.heatmanagement.com/kunze/00english/products/frameset.html>
- <sup>37</sup> <http://www.pcmenergy.com/products.htm>
- <sup>38</sup> Harald Mehling, Luisa F. Cabeza , “**Heat and cold storage with PCM : An up to date introduction into basics and applications**”, Springer Science & Business Media, 15 Aug 2008
- <sup>39</sup> Harald Mehling, Luisa F. Cabeza , “**Heat and cold storage with PCM : An up to date introduction into basics and applications**” , Springer Science & Business Media, 15 Aug 2008
- <sup>40</sup> <http://www.rubitherm.eu/en/productCategories.html>
- <sup>41</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Heating\\_pad](https://en.wikipedia.org/wiki/Heating_pad)
- <sup>42</sup> <http://www.rubitherm.eu/en/index.php/applications/healthcare-and-medical>
- <sup>43</sup> <http://www.xtreme-workwear.solutions/activarmr-pcm-cooling-vest-3602-p.asp#>
- <sup>44</sup> <http://www.outlast.com/en/applications/>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

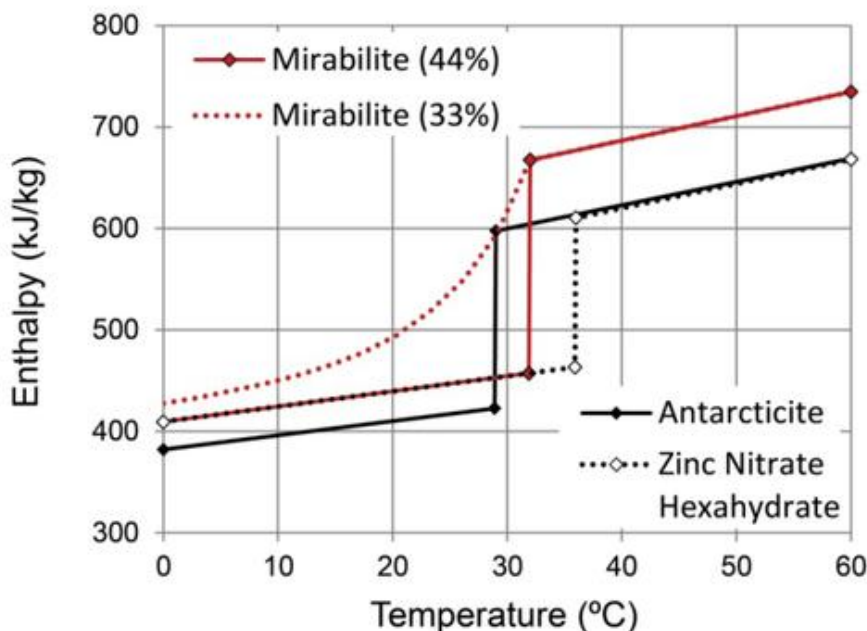
### ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

Ανεξάρτητα της εφαρμογής ή της εγκατάστασης του PCM, η φόρτιση και η αποφόρτιση της θερμότητας, συναρτήσει του χρόνου, αποτελεί ένα μη γραμμικά μεταβαλλόμενο μέγεθος. Το χαρακτηριστικό αυτό οφείλεται στο λεγόμενο πρόβλημα “κινούμενου ορίου”, δηλαδή την οριακή επιφάνεια διαχωρισμού στερεού-υγρού του ΥΑΦ κατά την μεταβολή κατάστασης, η οποία εξαρτάται από την ταχύτητα απορρόφησης ή πρόσδοσης της θερμότητας.

Για την προσέγγιση του κύκλου λειτουργίας του ΥΑΦ έχουν αναπτυχθεί αριθμητικές μέθοδοι που δίνουν λύσεις κυρίως για τις περιπτώσεις απλής γεωμετρίας και οριακών συνθηκών. Συνήθως χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων, ενώ η προσομοίωση της αλλαγής φάσης πραγματοποιείται με τις δυο μεθόδους που αναπτύσσονται παρακάτω.

#### 5.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ [βιβλ. 1, 2]

Για την διατύπωση της λειτουργίας ενός ΥΑΦ σε μορφή εξισώσεων πραγματοποιείται μοντελοποίηση με χρήση παραδοχών και της συνάρτησης ενθαλπίας-θερμοκρασίας του υλικού, από την οποία καθορίζονται τα ποσά αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας που απαιτούνται για την αλλαγή φάσης. Η μέθοδος της ενθαλπίας βασίζεται στην αδύναμη επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων, μέσω της οποίας προκύπτουν καμπύλες της παρακάτω μορφής :



Σχήμα 5.1/1 : Διάγραμμα Ενθαλπίας-Θερμοκρασίας των PCM-ένυδρων αλάτων Antarcticite ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), Mirabilite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) σε 33 wt% και 44 wt%, Zinc Nitrate Hexahydrate ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )

Οι βασικότερες παραδοχές που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση της μεθόδου ενθαλπίας, αφορούν την μεταβολή κατάστασης (τήξης/στερεοποίησης) του ΥΑΦ και παρουσιάζονται παρακάτω :

- ❖ Το ΥΑΦ θεωρείται συνεχές μέσο, μακροσκοπικά, σε όλη την μάζα του.
- ❖ Η συναλλαγή θερμότητας εσωτερικά του υλικού θεωρείται αμελητέα.
- ❖ Οι θερμικές ιδιότητες, θερμοχωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα, θεωρούνται σταθερές ανεξαρτήτως της φάσης του υλικού. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφερθεί ότι υπό κανονικές συνθήκες η θερμοχωρητικότητα μεταβάλλεται ανάλογα με την κατάσταση του υλικού, στερεό ή υγρό, ενώ η θερμική αγωγιμότητα δεν επηρεάζεται.
- ❖ Η αλλαγή φάσης πραγματοποιείται υπό σταθερή πίεση.
- ❖ Η υπόψυξη του υλικού θεωρείται αμελητέα.
- ❖ Για ΥΑΦ, συγκεκριμένου εύρους θερμοκρασιών, πολλών συστατικών, θεωρείται μεταβολή στερεοποίησης απουσία φαινομένων διαχωρισμού.

Σύμφωνα με μελετητές, από την μελέτη και εκτέλεση πειραμάτων βασιζόμενων στην μέθοδο, παρατηρήθηκε η αναλογία μεταξύ των μεταβολών της ενθαλπίας, της προσδιδόμενης ενέργειας, της μέγιστης ισχύος και της ολικής διάρκειας του κύκλου μεταβολών κατάστασης του ΥΑΦ. Δηλαδή με την αύξηση της ενθαλπίας του υλικού αυξάνονται ανάλογα και τα τρία παραπάνω μεγέθη. Συνεχίζοντας, κατά την μεταβολή τήξης διαφοροποιείται η μορφή της καμπύλης ενθαλπίας-θερμοκρασίας, φαινόμενο το οποίο δεν παρατηρείται κατά την στερεοποίηση. Η χρονική διάρκεια του κύκλου μεταβολών του ΥΑΦ είναι μέγεθος αντιστρόφως ανάλογο της διαφοράς θερμοκρασιών του θερμού μέσου εισαγωγής και της μέσης θερμοκρασίας του εύρους λειτουργίας του υλικού. Συνεπώς, για την ελαχιστοποίηση της διάρκειας κύκλου, συνιστάται η μεγιστοποίηση της διαφοράς των θερμοκρασιών.

Οι καμπύλες ενθαλπίας-θερμοκρασίας που προκύπτουν, επιτρέπουν τον υπολογισμό της μέσης τιμής των θερμικών ιδιοτήτων του υλικού και την μελέτη του συσχετισμού τους με την θερμοκρασία. Τέλος, η μέθοδος της ενθαλπίας βρίσκει εφαρμογή σε οποιοδήποτε υλικό και όχι αποκλειστικά στα ΥΑΦ.

## 5.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥΣ ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ [βιβλ. 3, 4]

Υψηλό ποσοστό των υλικών αλλαγής φάσης αποτελείται από συστατικά που υπόκεινται σε χημικές αντιδράσεις, τόσο κατά την σύνθεση του ΥΑΦ, όσο και κατά την ενσωμάτωσή του σε δομικά στοιχεία κτιρίων. Οι χημικές αντιδράσεις είναι ενδόθερμες ή εξώθερμες, δηλαδή απορροφούν ή αποβάλλουν θερμότητα, ενδεχομένως επηρεάζοντας την θερμική συμπεριφορά του υλικού. Όπως είναι φυσικό, με την αύξηση της θερμοκρασίας υπάρχει αύξηση της ταχύτητας των αντιδράσεων, οπότε και αυξημένος κίνδυνος πυρκαγιάς σε περιπτώσεις εμφάνισης των κατάλληλων συνθηκών.

Για την προσομοίωση και μελέτη του κύκλου λειτουργίας των ΥΑΦ, σε δομικά υλικά κτιρίων, λαμβάνονται υπόψη τόσο οι χημικές αντιδράσεις των συστατικών, όσο και

οι μεταβολές κατάστασης του υλικού. Με αυτόν τον τρόπο, αναπτύχθηκε μια μαθηματική προσέγγιση του προβλήματος θερμοδυναμικής και μηχανικής του υλικού, βασιζόμενη σε διαφορικές εξισώσεις και δεδομένα των χημικών αντιδράσεων. Ωστόσο, η προσομοίωση αυτή δεν είχε ευρεία χρήση, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη της μεθόδου ενεργούς θερμοχωρητικότητας.

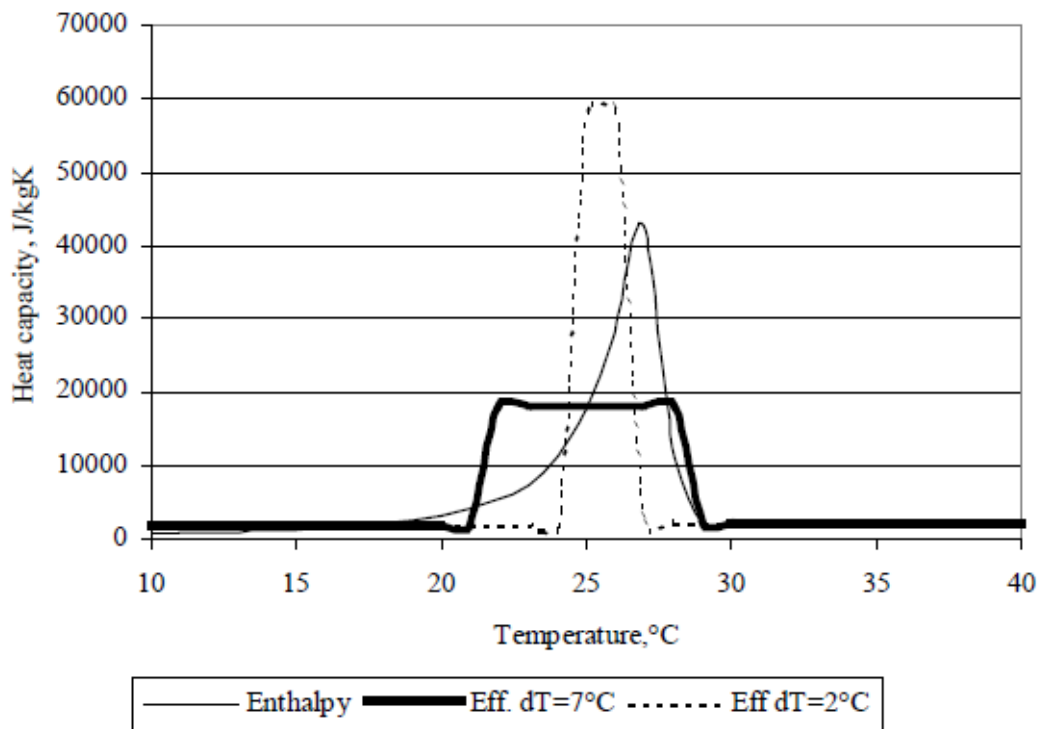
Η μέθοδος της ενεργούς θερμοχωρητικότητας περιγράφει την μη ισοθερμική μεταβολή κατάστασης του ΥΑΦ. Μέσω της μελέτης της ενεργούς θερμοχωρητικότητας  $C_{p,eff}$  (Specific Effective Heat Capacity) συναρτήσει της θερμοκρασίας, συνάγονται συμπεράσματα για την αποθηκευτική ικανότητα του υλικού, την ενέργεια δηλαδή που απορροφά ή απελευθερώνει κατά την αλλαγή φάσης, καθώς και για την ειδική θερμότητα. Τα δυο αυτά μεγέθη είναι ανάλογα της  $C_{p,eff}$ , ενώ η  $C_{p,eff}$  είναι αντιστρόφως ανάλογη του θερμοκρασιακού εύρους λειτουργίας του υλικού.

Με την εκτέλεση της μεθόδου προκύπτει η αντίστοιχη καμπύλη  $C_{p,eff}$ -θερμοκρασίας και ορισμένα συμπεράσματα που αφορούν το υλικό :

- ❖ Το είδος και η ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Για παράδειγμα, τα τοπικά ελάχιστα που παρουσιάζει η καμπύλη  $C_{p,eff}$ -θερμοκρασίας αντιστοιχούν σε εξώθερμες αντιδράσεις, δηλαδή πιθανή καύση ενός συστατικού, γεγονός επικίνδυνο για το περιβάλλον εφαρμογής του PCM.
- ❖ Η συμπεριφορά των συστατικών και συνολικά του υλικού, σε ακραίες θερμοκρασίες, όπως περιπτώσεις πυρκαγιάς.
- ❖ Η κατηγοριοποίηση του υλικού, δηλαδή αν ανήκει στα ΥΑΦ ή στα συμβατικά υλικά. Η μορφή της καμπύλης  $C_{p,eff}$ -θερμοκρασίας διαφοροποιείται ανάλογα το είδος του υλικού. Συγκεκριμένα, στα συμβατικά υλικά η ενεργός θερμοχωρητικότητα είναι μέγεθος ανάλογο της θερμοκρασίας, αφού η θερμοκρασία τους συνεχώς αυξάνεται με την απορρόφηση αισθητής θερμότητας. Αντιθέτως, στα ΥΑΦ η  $C_{p,eff}$  αυξάνεται μέχρι ενός ορίου (μέγιστη θερμοχωρητικότητα-διφασική περιοχή) και στην συνέχεια μειώνεται, μεταβολές οι οποίες πραγματοποιούνται σε μικρό εύρος θερμοκρασίας.

Συνεπώς, η συγκεκριμένη μέθοδος παρέχει μια γενική εικόνα της θερμικής συμπεριφοράς και σταθερότητας του υλικού. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων δεν επιτυγχάνεται πάντα, λόγω της αδυναμίας να ληφθούν υπόψη όλες οι παράμετροι των χημικών αντιδράσεων και της συμπεριφοράς του υλικού, μέσω των διαγραμμάτων φάσης, όταν αυτά είναι διαθέσιμα. Για τον λόγο αυτόν, δεν είναι πλήρως αντικειμενικό και το θερμοκρασιακό εύρος κρισιμότητας των χημικών αντιδράσεων που αφορά την συμπεριφορά του υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες.

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται ένα διάγραμμα σύγκρισης των δύο μεθόδων προσομοίωσης που αναλύθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 5.2/1 : Μέθοδος Ενθαλπίας και Μέθοδος Ενεργούς Θερμοχωρητικότητας για διαφορετικά θερμοκρασιακά εύρη  $\Delta T$

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η πειραματική μελέτη που ακολουθεί, πραγματοποιείται βασιζόμενη στην μέθοδο της ενεργούς θερμοχωρητικότητας.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 5<sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

<sup>1</sup> Y. Dutil, D.R. Rousse, N.B. Salah, S. Lassue, L. Zalewski, “**A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations**”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 1, January 2011, Pages 112 – 130

<sup>2</sup> <http://www.mdpi.com/2076-3263/3/1/63/htm>

<sup>3</sup> H. Yang, Y.He, “**Solving heat transfer problems with phase change via smoothed effective heat capacity and element-free Galerkin methods**”, International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 37, Issue 4, April 2010, Pages 385–392

<sup>4</sup> P.Lamberg , R. Lehtiniemi, A.M. Henell, “**Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage**”, International Journal of Thermal Sciences, Volume 43, Issue 3, March 2004, Pages 277-287

# 2

## ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>

### ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM) ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΣΕ ΤΟΙΧΟ, ΦΟΡΤΙΖΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΗΛΙΑΚΟΥΣ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

#### 6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Στόχος και αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η μελέτη της θερμικής απόδοσης υλικών αλλαγής φάσης ως σύστημα θέρμανσης δώματος, χωρίς βοηθητική πηγή. Το σύστημα βρίσκεται στην περιοχή της **Αθήνας** και βασίζεται στην φόρτιση των ΥΑΦ από ηλιακούς συλλέκτες, εκ των οποίων μέρος της παροχής (απομάστευση) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την θέρμανση ζεστού νερού χρήσης.

Η εγκατάσταση αποτελείται από το κύκλωμα θερμού νερού του ηλιακού συλλέκτη, το οποίο τροφοδοτεί στρώσεις υλικού αλλαγής φάσης ενσωματωμένων σε τοίχο. Το θερμό νερό που εξέρχεται από τον ηλιακό συλλέκτη οδηγείται εσωτερικά του τοίχου με σερπαντίνα, η οποία διαπερνά το υλικό αλλαγής φάσης, επιτυγχάνοντας την θερμική του φόρτιση με αγωγή. Το νερό, με μειωμένη πλέον θερμοκρασία, εξέρχεται από τον τοίχο και επανέρχεται στον ηλιακό συλλέκτη για την επανάληψη της διαδικασίας.

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

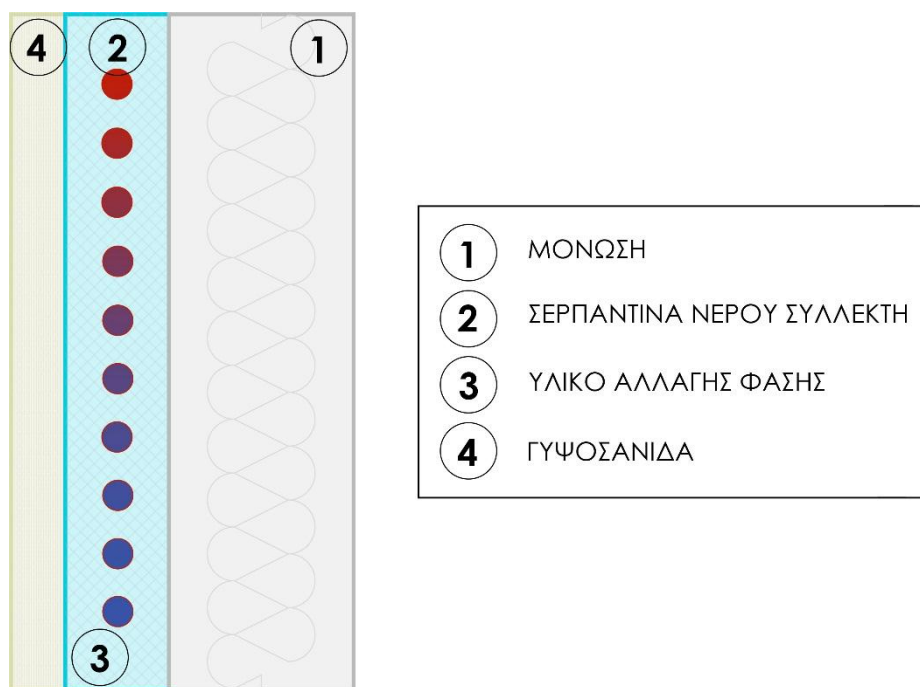
Η διαστρωμάτωση του τοίχου φαίνεται στα παρακάτω σχήματα και είναι η εξής :

- ❖ **Μόνωση** : Η εξωτερική επιφάνεια του τοίχου είναι μονωμένη, με θεωρητικά μηδενική συναλλαγή θερμότητας με το εξωτερικό περιβάλλον, για την αποφόρτιση του ΥΑΦ μόνο προς το εσωτερικό περιβάλλον.
- ❖ **Στρώμα ΥΑΦ** : Το πάχος του στρώματος  $l_{PCM}$  αποτελεί παράμετρο της μελέτης, ενώ επιλέγεται μία τυπική τιμή πυκνότητας του ΥΑΦ



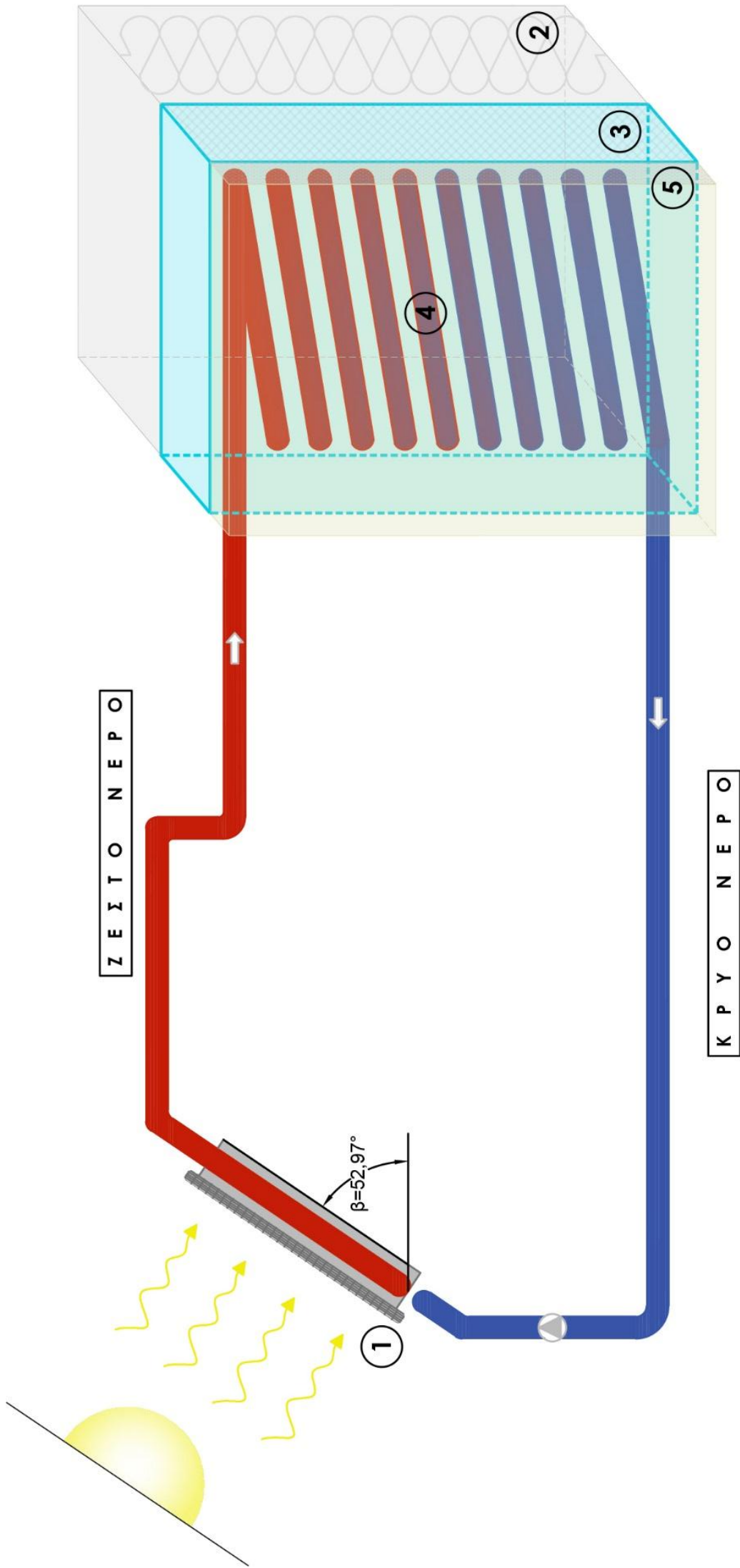
$\rho_{PCM}=790 \text{ Kg/m}^3$ . Το υλικό διαπερνάται καθόλη την επιφάνεια του τοίχου από σερπαντίνα κυκλοφορίας του θερμού νερού.

- ❖ **Γυψοσανίδα** : Η γυψοσανίδα τυπικού πάχους  $l_{ΓΓ\psi} = 0,01 \text{ m}$  και θερμικής αγωγιμότητας  $k_{ΓΓ\psi} = 0,21 \text{ W/mK}$  , αποτελεί την εσωτερική επιφάνεια του τοίχου στο δωμάτιο.



Σχήμα 6.1/1 : Τομή τοίχου εγκατάστασης

Στην συγκεκριμένη εκδοχή της εγκατάστασης σημειώνεται η απουσία δεξαμενής αποθήκευσης θερμού νερού, η οποία αντικαθίσταται ουσιαστικά από την μάζα του ΥΑΦ, αφού εξυπηρετεί τον ίδιο σκοπό, την αποθήκευση θερμικής ενέργειας προσφερόμενης από τον ηλιακό συλλέκτη.



Σχήμα 6.1/2 : Σχηματική απεικόνιση εγκατάστασης

- 1 ΗΛΙΑΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ
- 2 ΜΟΝΩΣΗ
- 3 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ
- 4 ΣΕΡΠΑΝΤΙΝΑ ΝΕΡΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ
- 5 ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑ

## 6.2 ΗΛΙΑΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ [βιβλ. 1, 2]

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

<b>A<sub>c</sub> [m<sup>2</sup>]</b>	2.464
<b>F<sub>R</sub>(τα)</b>	0,640
<b>F<sub>R</sub>U<sub>L</sub></b>	4,23

**A<sub>c</sub>** : η συλλεκτική επιφάνεια του συλλέκτη.

**F<sub>R</sub>(τα)** : το γινόμενο του παράγοντα θερμικής απολαβής του συλλέκτη **F<sub>R</sub>**, της διαπερατότητας του καλύμματος **τ** και της απορροφητικότητας του απορροφητήρα του συλλέκτη **α**.

**F<sub>R</sub>U<sub>L</sub>** : το γινόμενο του παράγοντα θερμικής απολαβής του συλλέκτη **F<sub>R</sub>** και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας **U<sub>L</sub>** [W/m<sup>2</sup> K], που εκφράζει τις θερμικές απώλειες από τον συλλέκτη στο περιβάλλον δι' αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας.

Η συλλεκτική επιφάνεια **A<sub>c</sub>** θα αποτελέσει παράμετρο της μελέτης, αλλά η αρχική τιμή που παρέχεται από τον κατασκευαστή αξίζει να σημειωθεί ότι άτυπα και από εμπειρική αντιστοιχία συλλεκτικής επιφάνειας και τετραγωνικών μέτρων κτιρίου, μπορεί να ανταπεξέλθει στην θέρμανση ενός δωματίου 12 m<sup>2</sup>, σε σύστημα σωμάτων καλοριφέρ. Συνεπώς, στην περίπτωση χρήσης υλικών αλλαγής φάσης για θέρμανση, είναι πολύ πιθανόν να υπάρξει απαίτηση μεγαλύτερης συλλεκτικής επιφάνειας. Ωστόσο, οι δοκιμές της μελέτης θα ξεκινήσουν με την συλλεκτική επιφάνεια του κατασκευαστή, ενδεικτικά.

## 6.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ [βιβλ. 3]

Αρχικά, τονίζεται ότι η μελέτη για τους μήνες Νοέμβρη έως και Μάρτιο, αναφέρεται στην 21<sup>η</sup> ημέρα κάθε μήνα, εφόσον ερευνητικά δεδομένα αποδεικνύουν τις συνθήκες της ημέρας αντιπροσωπευτικές για ολόκληρο τον μήνα.

Οι απαραίτητοι, για την μελέτη, υπολογισμοί, ξεκινούν με την εύρεση της ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου, την οποία απορροφά ο ηλιακός συλλέκτης της εγκατάστασης. Παρακάτω παρατίθενται οι απαραίτητοι ορισμοί και η αλληλουχία των υπολογισμών για το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Το **γεωγραφικό πλάτος φ** (latitude lat) είναι ένα από τα δύο μεγέθη των γεωγραφικών συντεταγμένων με τα οποία προσδιορίζεται η θέση στην επιφάνεια της γης. Συγκεκριμένα, προσδιορίζει την γωνιακή απόσταση των διαφόρων τόπων από τον Ισημερινό, του οποίου το γεωγραφικό πλάτος είναι 0. Αποδίδεται σε μοίρες, πρώτα και δεύτερα της μοίρας ή ως δεκαδικός αριθμός των παραπάνω, ενώ αποτελεί πάντα διψήφιο αριθμό από 00°-90° Β (Βόρειο-North N) ή 00°-90° Ν

(Νότιο-South S). Για την περιοχή της Αθήνας, στην οποία βρίσκεται εφαρμογή η εγκατάσταση της παρούσας μελέτης, το γεωγραφικό πλάτος έχει τιμή  $\phi=37,97^\circ$  B.

**Κλίση επιπέδου  $\beta$**  είναι η γωνία που σχηματίζει μια επίπεδη επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο, με τιμές  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ . Για το οριζόντιο επίπεδο ορίζεται  $\beta=0^\circ$ , για το κατακόρυφο  $\beta=90^\circ$ , ενώ για  $\beta > 90^\circ$  το επίπεδο βλέπει προς τα κάτω.

Για τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη της εγκατάστασης επιλέγεται η βέλτιστη κλίση για την χειμερινή περίοδο, η οποία πρόκειται για το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής προσαυξημένο κατά  $15^\circ$ , δηλαδή  $\beta=37,97^\circ+15^\circ \Rightarrow \beta=52,97^\circ$ .

**Αζιμούθιο επιφανείας  $\gamma$**  είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και την νότια κατεύθυνση, με τιμές  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ . Ορίζονται  $\gamma=0^\circ$  στον Νότο,  $\gamma=90^\circ$  στην Δύση,  $\gamma=180^\circ$  στον Βορρά και  $\gamma=-90^\circ$  στην Ανατολή.

Για τον νότιο προσανατολισμό του ηλιακού συλλέκτη της εγκατάστασης, λοιπόν, θα είναι  $\gamma=0^\circ$ .

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

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

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

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

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

Μήνας	n (# 21ης ημέρας)	$\delta$ [rad]
Νοέμβριος	325	-0,35677
Δεκέμβριος	355	-0,40928
Ιανουάριος	21	-0,35147
Φεβρουάριος	52	-0,19594
Μάρτιος	80	-0,00705

Ο λόγος  $R_b$  της άμεσου στιγμιαίας ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου  $G_{bT}$  προς την άμεσο στιγμιαία οριζοντίου επιπέδου  $G_b$ , για κεκλιμένες επιφάνειες που βρίσκονται

στο βόρειο ημισφαίριο και είναι στραμμένες προς τον νότο ( $\gamma=0^\circ$ ), υπολογίζεται από την σχέση :

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

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

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

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

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

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

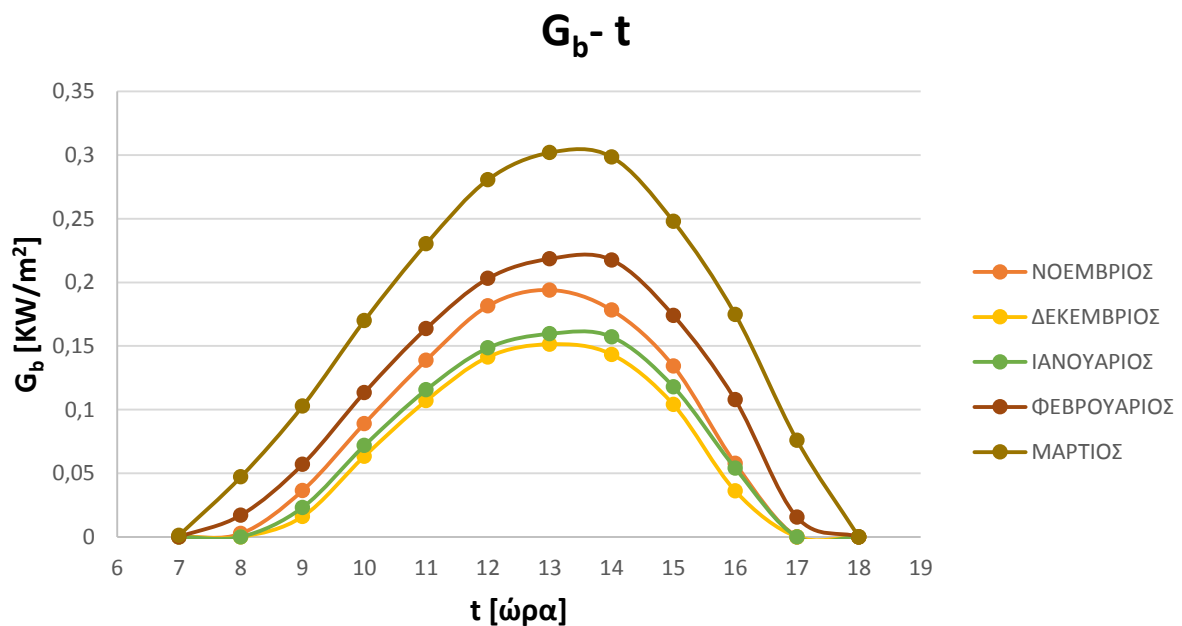
Ώρα ημέρας	$M_t$ [KW/m <sup>2</sup> ]	$A_t$ [KW/m <sup>2</sup> ]	$P_t$ [rad]	$m_t$ [KW/m <sup>2</sup> ]	$a_t$ [KW/m <sup>2</sup> ]	$p_t$ [rad]
7	0,007	0,046	1,504125	0,048	0,111	1,417731
8	0,057	0,068	1,523847	0,134	0,127	1,439024
9	0,119	0,104	1,534843	0,208	0,133	1,465029
10	0,191	0,129	1,5413	0,261	0,129	1,494002
11	0,258	0,153	1,559452	0,283	0,117	1,501856
12	0,319	-0,181	-1,55125	0,271	0,095	1,443562
13	0,342	-0,194	-1,55648	0,243	0,081	1,430297
14	0,325	0,183	1,522102	0,21	0,083	1,522451
15	0,269	0,166	1,504823	0,176	0,087	1,562593
16	0,183	0,147	1,432915	0,141	-0,085	-1,53921
17	0,078	0,131	1,393645	0,104	-0,079	-1,55282
18	-0,025	0,114	1,350187	0,051	0,091	1,514771

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

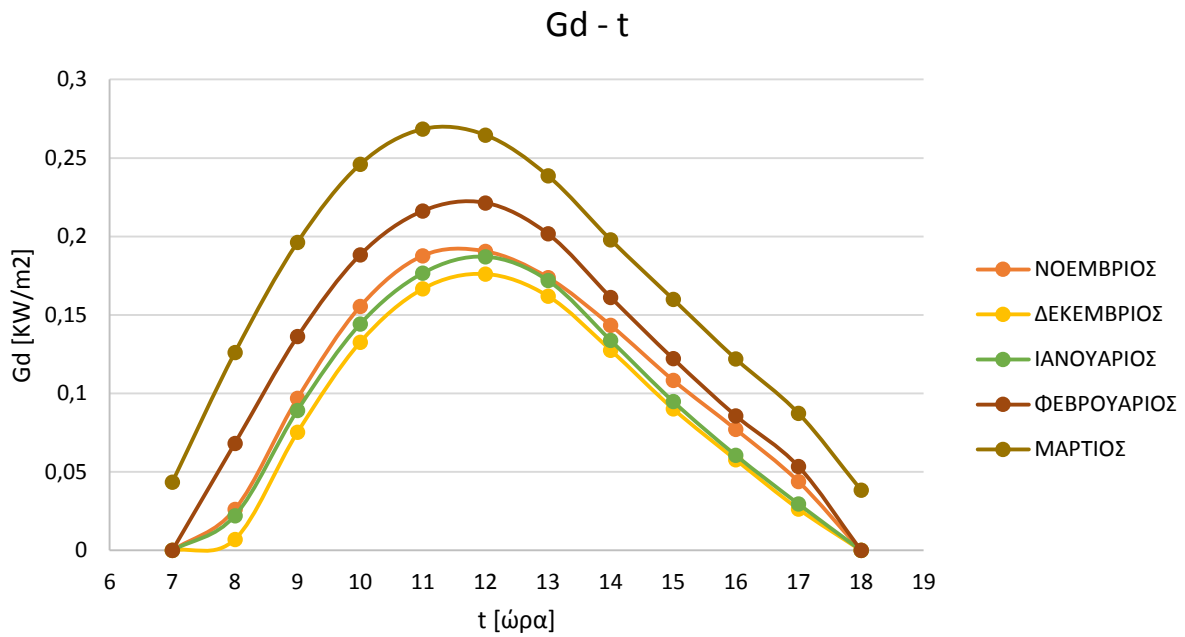
$$G_T = G_b * R_b + G_d * \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + (G_b + G_d) * \rho * \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \text{ [KW/m}^2\text{]} \quad \{6\}$$

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

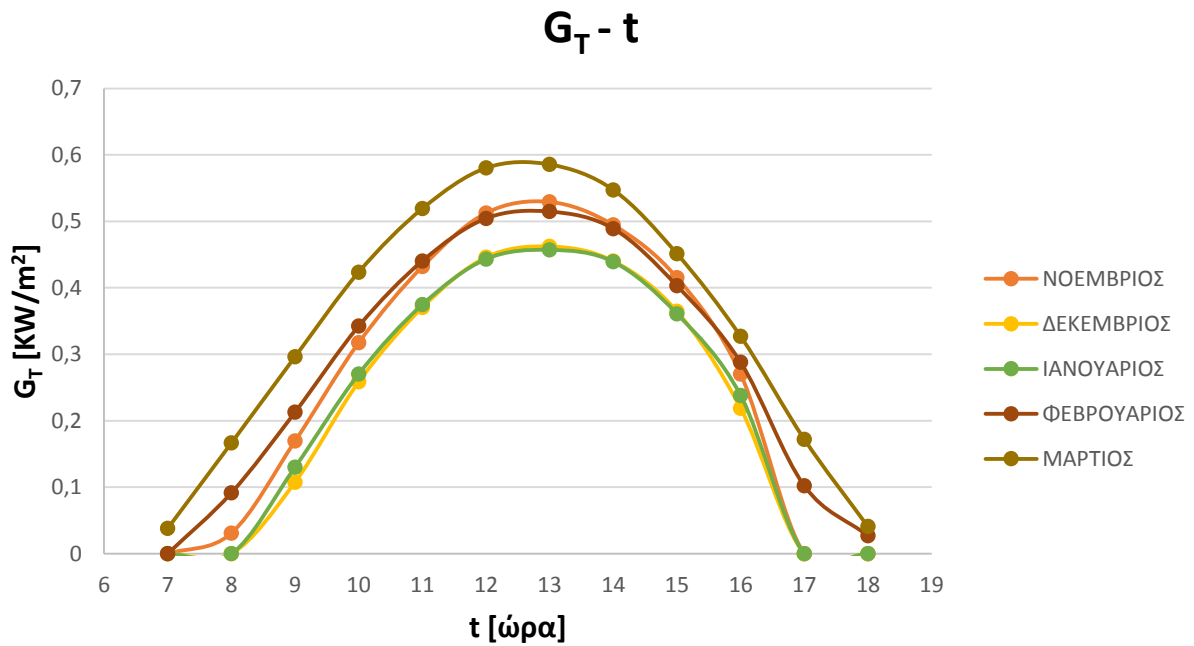
Υπολογίζοντας τα μεγέθη των εξισώσεων {1} έως {6} με χρήση του Excel, για τις ώρες  $t=7\div 18$ , την 21<sup>η</sup> ημέρα των μηνών Νοέμβριο έως και Μάρτιο, προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα των  $G_b$ ,  $G_d$  και  $G_T$  συναρτήσεων του χρόνου :



Σχήμα 6.3/1 : Στιγμιαία άμεσος ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου συναρτήσεων του χρόνου, την 21η ημέρα των μηνών Νοέμβριο – Μάρτιο, για την περιοχή της Αθήνας



Σχήμα 6.3/2 : Στιγμαία διάχυτος ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου συναρτήσει του χρόνου, την 21η ημέρα των μηνών Νοέμβριο – Μάρτιο, για την περιοχή της Αθήνας



Σχήμα 6.3/3 : Στιγμαία ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου συναρτήσει του χρόνου, την 21η ημέρα των μηνών Νοέμβριο – Μάρτιο, για την περιοχή της Αθήνας.

#### 6.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ [βιβλ. 4]

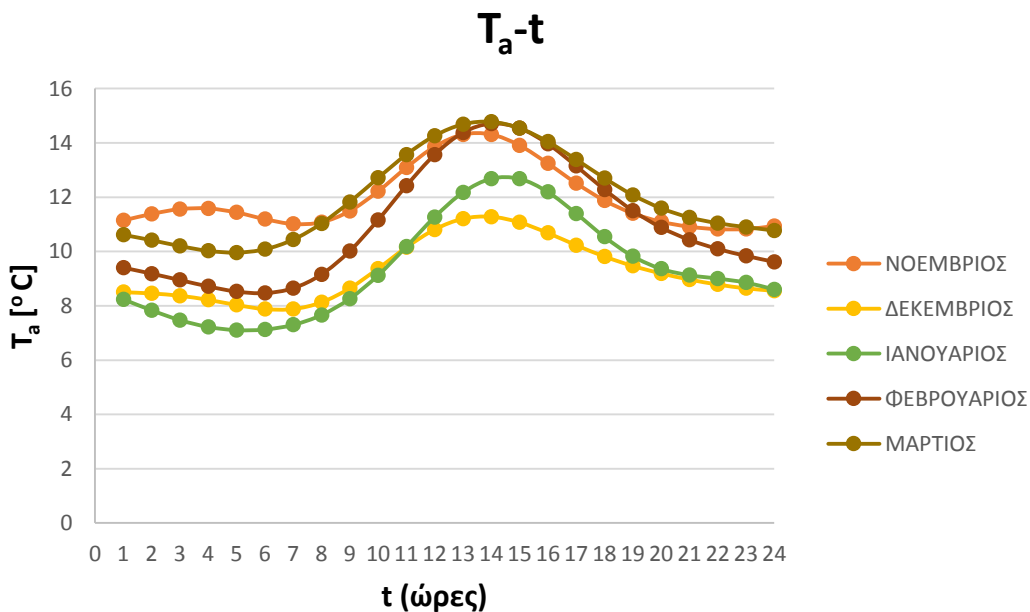
Για τον υπολογισμό της ωφέλιμης ισχύος του ηλιακού συλλέκτη ανά ώρα είναι απαραίτητες οι αντίστοιχες τιμές της θερμοκρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος την 21<sup>η</sup> ημέρα κάθε εξεταζόμενου μήνα. Μία προσεγγιστική σχέση υπολογισμού της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στην περιοχή της Αθήνας, προέκυψε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

$$T_a(H) = M + \sum_{i=1}^3 C_i \cos\left[i \frac{360}{24} (H - 0,5)\right] + \sum_{i=1}^3 S_i \sin\left[i \frac{360}{24} (H - 0,5)\right] \quad \{7\}$$

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

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

Υπολογίζοντας τα μεγέθη της εξίσωσης {7} με χρήση του Excel, για κάθε ώρα του 24ώρου την 21<sup>η</sup> ημέρα κάθε μήνα, προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα της  $T_a$  συναρτήσεως του χρόνου :



Σχήμα 6.4/1 : Ωριαία θερμοκρασία περιβάλλοντος συναρτήσεως του χρόνου, την 21η ημέρα των μηνών Νοέμβριο – Μάρτιο, για την περιοχή της Αθήνας



## 6.5 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ [βιβλ. 5, 6, 7]

### 6.5.1 ΧΡΗΣΗ ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Η μελέτη της εγκατάστασης στηρίζεται στην συλλογή δεδομένων και αποτελεσμάτων που προκύπτουν μέσω της επαναληπτικής επίλυσης παραμετρικών εξισώσεων, οι οποίες παρατίθενται παρακάτω. Στόχο αποτελεί η προσέγγιση του θερμοκρασιακού προφίλ του υλικού αλλαγής φάσης, μέσω του οποίου δύναται η εκτίμηση της ροής θερμότητας από το υλικό προς τον εσωτερικό περιβάλλον (δωμάτιο). Για την αντικειμενικότητα των αποτελεσμάτων απαιτείται ο υπολογισμός των μεγεθών για κάθε ώρα του 24ώρου και η επανάληψη της διαδικασίας για 4 ημέρες, ώστε να επιτευχθεί η απαραίτητη σύγκλιση των αποτελεσμάτων της επαναληπτικής επίλυσης, με σταθερό θερμοκρασιακό προφίλ. Συνεπώς, το χρονικό βήμα των υπολογισμών αποτελεί η μία ώρα ( $\Delta t=1h$ ).

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

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

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

### 6.5.2 ΑΠΟΔΙΔΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

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

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

$A_c$  : η συλλεκτική επιφάνεια του συλλέκτη [ $m^2$ ]

$F_R(\tau\alpha)$  : το γινόμενο του παράγοντα θερμικής απολαβής του συλλέκτη  $F_R$ , της διαπερατότητας του καλύμματος  $\tau$  και της απορροφητικότητας του απορροφητήρα του συλλέκτη  $\alpha$ .

$G_T$  : ολική στιγμιαία ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου [ $KW/m^2$ ]

$F_R U_L$  : το γινόμενο του παράγοντα θερμικής απολαβής του συλλέκτη  $F_R$  και του

συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $U_L$  [ $W/m^2 K$ ], που εκφράζει τις θερμικές απώλειες από τον συλλέκτη στο περιβάλλον δι' αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας.

$T_{fi}$  : θερμοκρασία εισόδου του νερού κυκλοφορίας στον συλλέκτη [ $^{\circ}C$ ]

$T_a$  : θερμοκρασία περιβάλλοντος [ $^{\circ}C$ ]

Για την επίλυση της εξίσωσης {8} για κάθε ώρα, κατά την επαναληπτική διαδικασία στο Excel, απαιτείται η υπόθεση μίας αρχικής τιμής για την θερμοκρασία εισόδου του νερού στον συλλέκτη, η οποία βέβαια θα ταυτίζεται με την αρχική θερμοκρασία του ΥΑΦ. Υποθέτοντας  $T_{fi \text{ ΑΡΧΙΚΗ}} = 20^{\circ}C$ , υπολογίζεται η πρώτη τιμή της αποδιδόμενης ισχύος για την συνέχεια των υπολογισμών που θα αναλυθούν παρακάτω. Για την διεκπεραίωση της μελέτης θα θεωρηθεί ότι κάθε τιμή της θερμοκρασίας  $T_{fi}$  θα ισούται με την θερμοκρασία του ΥΑΦ στο τέλος της προηγούμενης ώρας. Δηλαδή, η έξοδος του νερού από τον τοίχο στο τέλος της ώρας θα έχει θερμοκρασία  $T_{PCM}^{META}$ , η οποία βέβαια ταυτίζεται με την είσοδο του νερού στον συλλέκτη στην αρχή της επόμενης ώρας.

### 6.5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΝΕΡΓΟΥΣ ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

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

Η μέθοδος ενεργούς θερμοχωρητικότητας χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της  $C_{p \text{ eff}}$  του υλικού αλλαγής φάσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του υλικού. Ωστόσο, στους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται οι ιδιότητες του υλικού που αναφέρονται παρακάτω :

❖  $T_s$  : θερμοκρασία πλήρους στερεοποίησης του ΥΑΦ (έναρξη στερεής κατάστασης-solid) [ $^{\circ}C$ ]

❖  $T_l$  : θερμοκρασία πλήρους υγροποίησης του ΥΑΦ (έναρξη υγρής κατάστασης-liquid) [ $^{\circ}C$ ]

❖  $T_c$  : θερμοκρασία στο μέσο της διφασικής περιοχής [ $^{\circ}C$ ]

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

❖  $C_{ps}$  : ειδική θερμοχωρητικότητα στερεής κατάστασης [ $KJ/Kg K$ ]

❖  $C_{pl}$  : ειδική θερμοχωρητικότητα υγρής κατάστασης [ $KJ/Kg K$ ]

❖  $C_{p \text{ max}}$  : μέγιστη θερμοχωρητικότητα υλικού για θερμοκρασία  $T_c$  [ $KJ/Kg K$ ]

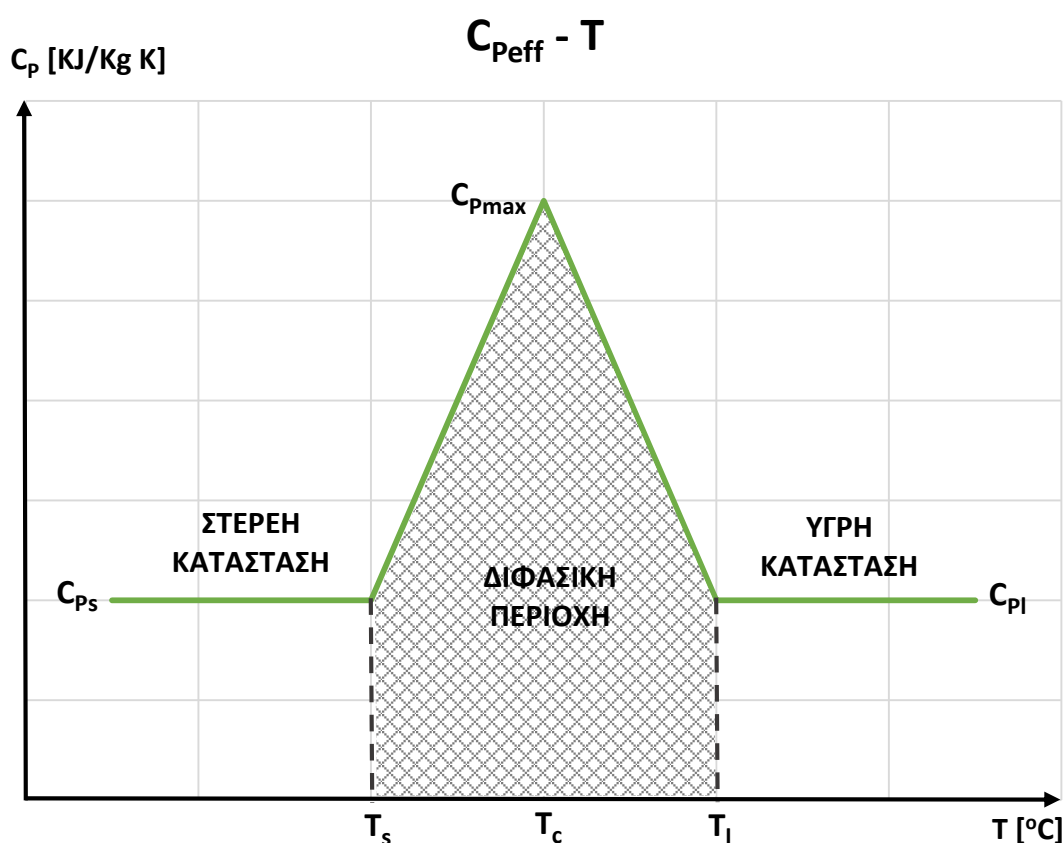
❖  $b$  : θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης του υλικού

$$b = T_l - T_s$$

❖  $C_{p \text{ eff}}(T)$  : ενεργός θερμοχωρητικότητα, συνάρτηση της θερμοκρασίας του υλικού [ $KJ/Kg K$ ]

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

$$\frac{|C_{P_{eff}}(T) - C_{P_s}|}{T - T_s} = \frac{C_{P_{max}} - C_{P_s}}{T_c - T_s} \quad \{9\}$$



Σχήμα 6.5.3/1 : Καμπύλη προσέγγισης πλήρους κύκλου μεταβολών κατάστασης του ΥΑΦ

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

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

$$H = (T_c - T_s) * (C_{P_{max}} + C_{P_s}) \quad \{10\}$$

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

Για τον υπολογισμό της ενεργούς θερμοχωρητικότητας του υλικού αλλαγής φάσης, γίνεται χρήση των δύο παρακάτω σχέσεων, ανάλογα το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο βρίσκεται η αντίστοιχη θερμοκρασία του υλικού.

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

$$C_{P_{eff}} = 4(H - b * C_{P_s}) * \frac{(T - T_s)}{b^2} + C_{P_s} \quad \{11\}$$

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

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

Συνεπώς, για κάθε τιμή της θερμοκρασίας του υλικού στην αρχή της ώρας,  $T_{PCM}^{PPIN}$ , υπολογίζεται η αντίστοιχη ενεργός θερμοχωρητικότητα, μέγεθος απαραίτητο για την συνέχιση των υπολογισμών. Η χρήση της  $T_{PCM}^{PPIN}$ , αντί για την μέση θερμοκρασία της ώρας (ημιάθροισμα των  $T_{PCM}^{PPIN}$  και  $T_{PCM}^{META}$ ), γίνεται για λόγους ευκολίας στην υπολογιστική διαδικασία, αφού αποφέρει σφάλμα μικρής τάξης. Με την ολοκλήρωση της επαναληπτικής διαδικασίας των τεσσάρων 24ώρων, το θερμοκρασιακό προφίλ του υλικού υποδεικνύει το θερμοκρασιακό εύρος μέσα στο οποίο λειτούργησε το ΥΑΦ. Δύναται, με αυτόν τον τρόπο, η απεικόνιση του κύκλου φόρτισης και αποφόρτισης του υλικού στην εγκατάσταση, σε διάγραμμα όμοιο του σχήματος 6.5.3/1, που δόθηκε παραπάνω. Μέσω της 'τροχιάς' του υλικού πάνω στην καμπύλη πλήρους μεταβολής κατάστασης, φαίνεται το ποσοστό εκμετάλλευσής του στην συγκεκριμένη εφαρμογή. Σημειώνεται ότι σε πραγματικές συνθήκες και εγκαταστάσεις τα υλικά αλλαγής φάσης του εμπορίου δεν καταφέρνουν να πραγματοποιήσουν τον πλήρη κύκλο φόρτισης και αποφόρτισης.

Συνεχίζοντας, με τον υπολογισμό του εμβαδού  $H_o$  της καμπύλης που διαγράφει ο κύκλος του ΥΑΦ σε κάθε ολοκλήρωση της επαναληπτικής διαδικασίας (τέσσερα 24ωρα), ορίζεται ο **βαθμός εκμετάλλευσης  $\varepsilon$**  του υλικού από την παρακάτω σχέση :

$$\varepsilon = \frac{H_o}{H} = \frac{\text{εμβαδόν πραγματικού κύκλου φόρτισης}}{\text{εμβαδόν ιδανικού κύκλου φόρτισης}} \quad \{13\}$$

#### 6.5.4 ΙΣΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΑΛΛΑΣΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Οι συναλλαγές θερμότητας που λαμβάνουν χώρα στο στρώμα του ΥΑΦ μέσα στον τοίχο, είναι η συναλλαγή με το θερμό νερό κυκλοφορίας του ηλιακού συλλέκτη και η συναλλαγή με το εσωτερικό περιβάλλον του δωματίου. Συνεπώς, η σχέση ισολογισμού ενέργειας στο υλικό είναι η εξής :

$$m_{PCM} * C_{p_{eff}} * (T_{PCM}^{META} - T_{PCM}^{PPIN}) = [Q_u + U * A_T * (T_{\Delta} - T_{PCM}^{PPIN})] * 3600 \quad \{14\}$$

$m_{PCM}$  : η μάζα του υλικού αλλαγής φάσης [Kg].

$U$  : ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας για την συναλλαγή ΥΑΦ-Δωματίου.

$T_{\Delta}$  : η θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος του δωματίου.

$A_T$  : το εμβαδόν επιφάνειας του τοίχου συναλλαγής  $A_T = 3 \times 3 \text{ m}^2$ .

Η μάζα του υλικού αλλαγής φάσης υπολογίζεται από την σχέση :

$$m_{PCM} = V_{PCM} * \rho_{PCM} = l_{PCM} * A_T * \rho_{PCM} \quad \{15\}$$

$l_{PCM}$  : το πάχος του στρώματος ΥΑΦ στην δομή του τοίχου, το οποίο αποτελεί παράμετρο της μελέτης, στην συνέχεια.

$\rho_{PCM}$  : η πυκνότητα του ΥΑΦ, με τυπική τιμή  $\rho_{PCM} = 790 \text{ Kg/m}^3$ .

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

$$\frac{1}{U} = \frac{l_{\Gamma\gamma\psi}}{k_{\Gamma\gamma\psi}} + \frac{1}{h_{in}} \quad \{16\}$$

$l_{\Gamma\gamma\psi}$  : το πάχος της γυψοσανίδας, με τυπική τιμή  $l_{\Gamma\gamma\psi} = 0,01 \text{ m}$ .

$k_{\Gamma\gamma\psi}$  : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας της γυψοσανίδας, με τυπική τιμή  $k_{\Gamma\gamma\psi} = 0,21 \text{ [W/mK]}$ .

$h_{in}$  : ο συντελεστής συναγωγής του αέρα (ρευστού) εσωτερικού περιβάλλοντος σε συνθήκες θερμικής άνεσης, με τυπική τιμή  $h_{in} = 8 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ .

Με τον μετασχηματισμό της εξίσωσης {14}, προκύπτει η σχέση υπολογισμού της θερμοκρασίας του ΥΑΦ στο τέλος κάθε ώρας, η οποία αποτελεί το ζητούμενο για την δημιουργία του θερμοκρασιακού προφίλ λειτουργίας του υλικού :

$$T_{PCM}^{META} = T_{PCM}^{PPIN} + \frac{[Q_u + U * A_T * (T_{\Delta} - T_{PCM}^{PPIN})] * 3600}{m_{PCM} * C_{P_{eff}}} \quad \{17\}$$

Για την εκκίνηση της επαναληπτικής διαδικασίας πρέπει να θεωρηθεί μία **αρχική** θερμοκρασία, η οποία, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 6.5.2, είναι η θερμοκρασία εισόδου του νερού στον συλλέκτη  $T_{fi \text{ ΑΡΧΙΚΗ}} = 20^{\circ}\text{C}$ , που θα ταυτίζεται με την θερμοκρασία του PCM στην αρχή της πρώτης ώρας του πρώτου 24ώρου, άρα και  $T_{PCM}^{PPIN \text{ ΑΡΧΙΚΗ}} = 20^{\circ}\text{C}$ . Με δεδομένες τις δύο θερμοκρασίες, ξεκινούν οι υπολογισμοί, με την αποδιδόμενη ισχύ του ηλιακού συλλέκτη  $Q_u$  από την σχέση {8} και επόμενη την ενεργό θερμοχωρητικότητα  $C_{P_{eff}}$ , μέσω των σχέσεων {11}, {12}, ανάλογα την θερμοκρασία  $T_{PCM}^{PPIN}$ . Τέλος, προκύπτει η θερμοκρασία του υλικού στο τέλος της ώρας,  $T_{PCM}^{META}$ , από την σχέση {17}. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για μερικά 24ωρα, έως ότου σταθεροποιηθεί το προφίλ της θερμοκρασίας του υλικού αλλαγής φάσης, ώστε να αποτελεί αντικειμενικό αποτέλεσμα.

#### 6.5.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΡΟΣΔΙΣΘΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Με την ολοκλήρωση κάθε επαναληπτικής διαδικασίας/δοκιμής του υλικού, χρησιμοποιώντας τις τελικές τιμές των θερμοκρασιών  $T_{PCM}^{META}$ , υπολογίζεται η θερμότητα ( $q$  [W]) που προσδίδεται από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον του δωματίου.

$$q = U * A_T * (T_{PCM}^{META} - T_{\Delta}) \quad [W] \quad \{18\}$$

Το μελετούμενο σύστημα θέρμανσης με PCM, θεωρείται αποδοτικό και επιτυχές **μόνο** στην περίπτωση που υπερκαλύπτει τις θερμικές απώλειες του δωματίου. Τυπική τιμή θερμικών απωλειών ενός δωματίου σύγχρονου κτιρίου, με επιφάνεια δαπέδου  $A_{\Delta} = 12 \text{ m}^2$ , είναι **15-35 W/m<sup>2</sup> δαπέδου**. Οι θερμικές απώλειες του δωματίου οφείλονται στο κέλυφος, δηλαδή τους τοίχους, τα κουφώματα, το δάπεδο, την οροφή και εξαρτώνται από την μόνωση του κτιρίου.

Συνεπώς, υπολογίζοντας τον μέσο όρο της θερμικής παροχής/  $\text{m}^2$  δαπέδου ( $q/\text{m}^2$ ) ολόκληρου του 24ώρου, δύναται μία προσέγγιση ως προς την θερμική κάλυψη που επιτυγχάνει το σύστημα θέρμανσης με PCM.

$$q/\text{m}^2 \text{ δαπέδου} = q/A_{\Delta} = q/12\text{m}^2 \quad [W/\text{m}^2] \quad \{19\}$$

Σημειώνεται η περίπτωση θερμοροής  $q/\text{m}^2$  δαπέδου, **αρνητικού προσήμου**, η οποία αποδεικνύει απλά την απορρόφηση θερμότητας του υλικού από το δωμάτιο για την συγκεκριμένη ώρα. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται με την πτώση της θερμοκρασίας του PCM χαμηλότερα της θερμοκρασίας δωματίου, ωστόσο αντιστοιχεί σε μικρή απορρόφηση θερμότητας αφού η ελάχιστη θερμοκρασία του υλικού προσεγγίζει την θερμοκρασία δωματίου.

### 6.5.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ-ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης αποτελεί η ανταπόκριση των υλικών αλλαγής φάσης ως συστήματα θέρμανσης. Συνεπώς, επιλέγονται ΥΑΦ του εμπορίου, με καθορισμένα χαρακτηριστικά τα οποία παραμένουν σταθερά καθόλη την μελέτη. Ωστόσο, οι παράμετροι, των οποίων η μεταβολή, θα χρησιμοποιηθεί για την παρατήρηση της συμπεριφοράς του συστήματος, είναι οι παρακάτω :

Παράμετροι Μελέτης
Συλλεκτική Επιφάνεια Ηλιακού Συλλέκτη $A_c$ [m <sup>2</sup> ]
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος (δωματίου) $T_{\Delta}$ [°C]
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης $I_{PCM}$ [m]

Πίνακας 6.5.6/1 : Ορισμός Παραμέτρων Μελέτης

Σε αυτό το σημείο, κρίνεται απαραίτητη η σημείωση ότι η διαδικασία των υπολογισμών αντιστοιχεί στην μόνιμη κατάσταση εσωτερικού περιβάλλοντος, δηλαδή σε θερμοκρασία δωματίου σταθερή καθόλη την διάρκεια του 24ώρου. Η κατάσταση αυτή δεν ανταποκρίνεται σε πραγματικές συνθήκες δωματίου, ωστόσο το σφάλμα των υπολογισμών θεωρείται μικρό λόγω του χρονικού βήματος της μίας ώρας, με το οποίο προκύπτει μία αντικειμενική προσέγγιση της πραγματικότητας.

Η εξέταση των παραμέτρων πραγματοποιείται αρχικά για 4 υλικά αλλαγής φάσης της εταιρείας Rubitherm, των οποίων όμως οι ιδιότητες δεν λαμβάνονται από τον κατασκευαστή, εφόσον οι παρεχόμενες χαρακτηριστικές θερμοκρασίες αφορούν ένα ευρύτερο θερμοκρασιακό εύρος εφαρμογής των υλικών. Σε κτιριακές εφαρμογές συνήθως χρησιμοποιούνται παραφίνες ή μίγματα παραφινών, όπως και τα υλικά που επιλέχθηκαν για την μελέτη. Τα ακριβή θερμοκρασιακά εύρη λειτουργίας των υλικών έχουν προσδιοριστεί πειραματικά από το Εργαστήριο Ψύξης και Κλιματισμού της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, σε δημοσίευση της συνεργασίας του υποψηφίου Διδάκτορα Ε.Κραββαρίτη με τον Καθηγητή Κ.Αντωνόπουλο και Λέκτορα Χ.Τζιβανίδη. Στην συνέχεια, παρατίθενται πίνακες με τις ιδιότητες των εξεταζόμενων υλικών αλλαγής φάσης.

RT21 - Παραφίνη	
Πραγματικό Θερμοκρασιακό Εύρος Λειτουργίας [°C]	$T_s - T_l = 15 - 26$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [J/KgK]	$C_{p_s} = 1900$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [J/KgK]	$C_{p_l} = 2500$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [J/KgK]	$H = 132100$

Πίνακας 6.5.6/2 : Θερμικές ιδιότητες υλικού RT21

<b>RT27 - Παραφίνη</b>	
Πραγματικό Θερμοκρασιακό Εύρος Λειτουργίας [°C]	$T_s - T_l = 22 - 31$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [J/KgK]	$C_{Ps} = 2000$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [J/KgK]	$C_{Pl} = 2300$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [J/KgK]	$H = 167400$

Πίνακας 6.5.6/3 : Θερμικές ιδιότητες υλικού RT27

<b>RT58 - Παραφίνη</b>	
Πραγματικό Θερμοκρασιακό Εύρος Λειτουργίας [°C]	$T_s - T_l = 53 - 62$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [J/KgK]	$C_{Ps} = 1900$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [J/KgK]	$C_{Pl} = 2600$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [J/KgK]	$H = 166100$

Πίνακας 6.5.6/3 : Θερμικές ιδιότητες υλικού RT27

<b>SP25A8 – Μίγμα Παραφίνης-Ένυδρου Άλατος</b>	
Πραγματικό Θερμοκρασιακό Εύρος Λειτουργίας [°C]	$T_s - T_l = 22 - 32$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [J/KgK]	$C_{Ps} = 2600$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [J/KgK]	$C_{Pl} = 2700$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [J/KgK]	$H = 141500$

Πίνακας 6.5.6/5 : Θερμικές ιδιότητες υλικού SP25A8

### 6.6 1<sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΑΡΧΙΚΟΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ [βιβλ. 8]

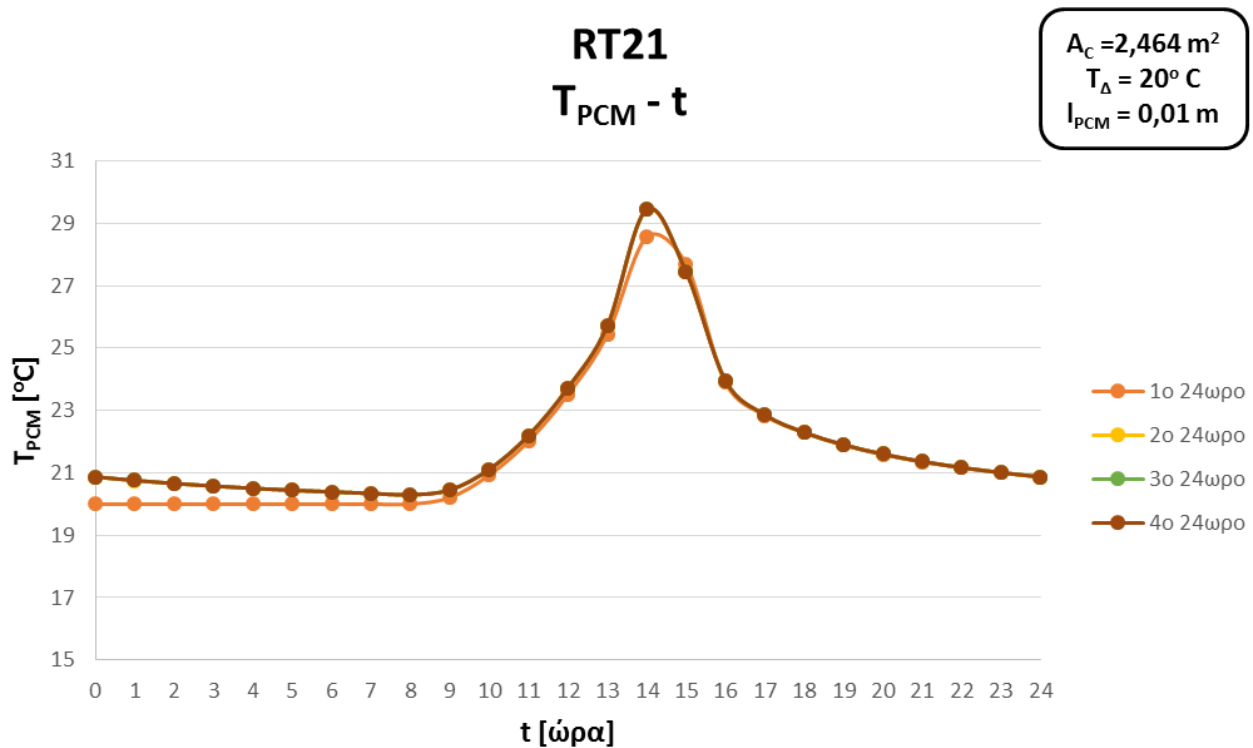
Ο αρχικός συνδυασμός παραμέτρων αποτελεί κυρίως δοκιμή της επαναληπτικής διαδικασίας και μία πρώτη προσέγγιση της συμπεριφοράς των υλικών. Με αυτόν τον τρόπο, η επιρροή κάθε μεταβολής των παραμέτρων θα είναι εμφανής και συγκρίσιμη με τα αποτελέσματα της αρχικής δοκιμής. Για κάθε υλικό παρατίθενται τα διαγράμματα του θερμοκρασιακού προφίλ, του κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης (εκμεταλλευσιμότητα του υλικού) και της προσφερόμενης θερμότητας στο δωμάτιο (θερμοροή  $q/m^2$  δαπέδου). Στα διαγράμματα της θερμοκρασίας του PCM συναρτήσει του χρόνου, φαίνεται η σύγκλιση των επαναλήψεων κάθε 24ώρου. Η περίπτωση μη εμφάνισης κάποιας καμπύλης (χρώμα) οφείλεται στην απόλυτη σύγκλιση του 24ώρου με τα υπόλοιπα. Συνήθως, επιτυγχάνεται σύγκλιση από το 2<sup>ο</sup> 24ωρο, άρα οι καμπύλες 2<sup>ου</sup> και 3<sup>ου</sup> εφάπτονται πλήρως και υπερκαλύπτονται από την καμπύλη του 4<sup>ου</sup> 24ώρου.



### 6.6.1 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ RT21

Παράμετροι 1 <sup>ης</sup> Δοκιμής με RT21	
Συλλεκτική Επιφάνεια [m <sup>2</sup> ]	$A_c = 2,464$
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [°C]	$T_{\Delta} = 20$
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [°C]	$T_s = 15$
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [°C]	$T_l = 26$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [J/KgK]	$C_{p_s} = 1900$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [J/KgK]	$C_{p_l} = 2500$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [J/KgK]	$H = 132100$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [m]	$l_{PCM} = 0,01$

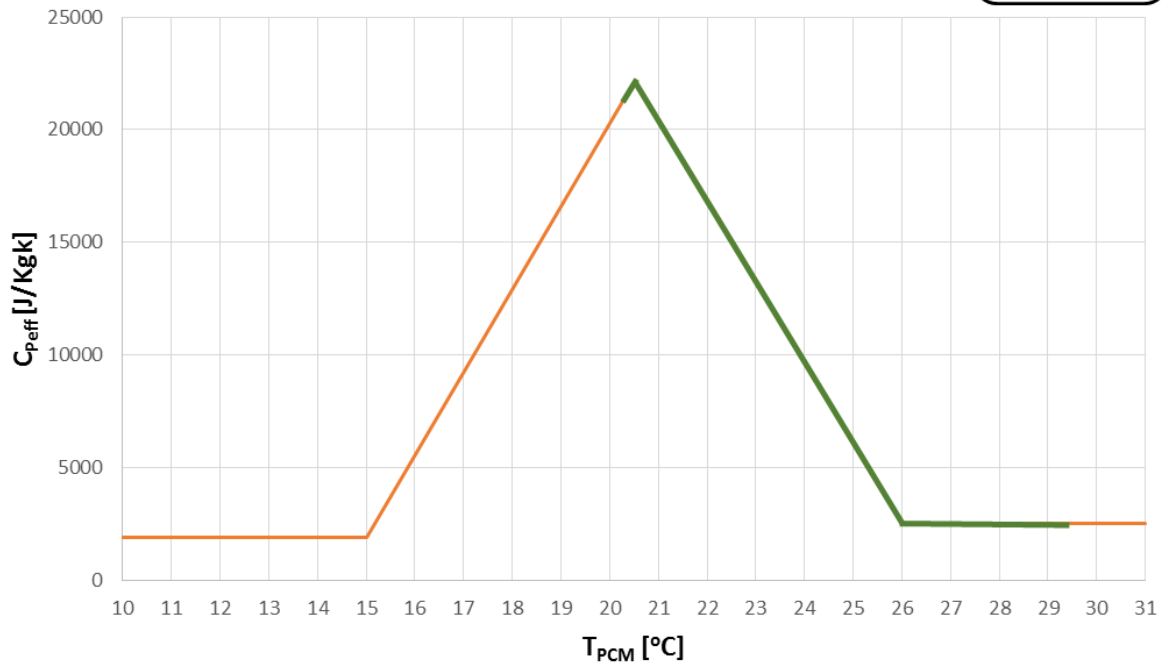
Πίνακας 6.6.1/1 : Παράμετροι 1ης Δοκιμής RT21



Σχήμα 6.6.1/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου

**RT21**  
 $C_{\text{Peff}} - T_{\text{PCM}}$

$A_c = 2,464 \text{ m}^2$   
 $T_{\Delta} = 20^\circ \text{ C}$   
 $l_{\text{PCM}} = 0,01 \text{ m}$



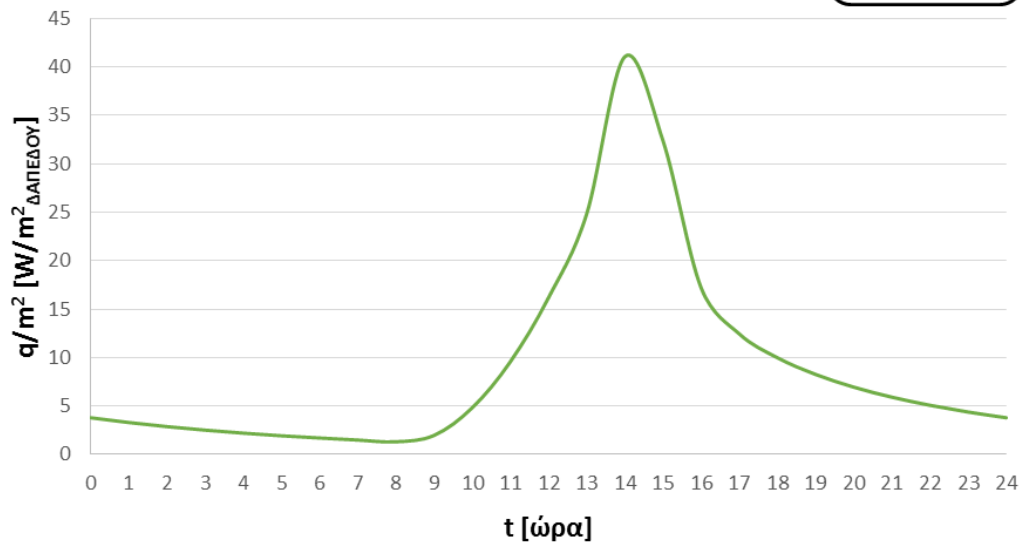
Σχήμα 6.6.1/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 1<sup>ης</sup> Δοκιμής RT21 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{70371,06}{132100} = 0,533$$

**RT21**  
 $q/\text{m}^2 - t$

$A_c = 2,464 \text{ m}^2$   
 $T_{\Delta} = 20^\circ \text{ C}$   
 $l_{\text{PCM}} = 0,01 \text{ m}$



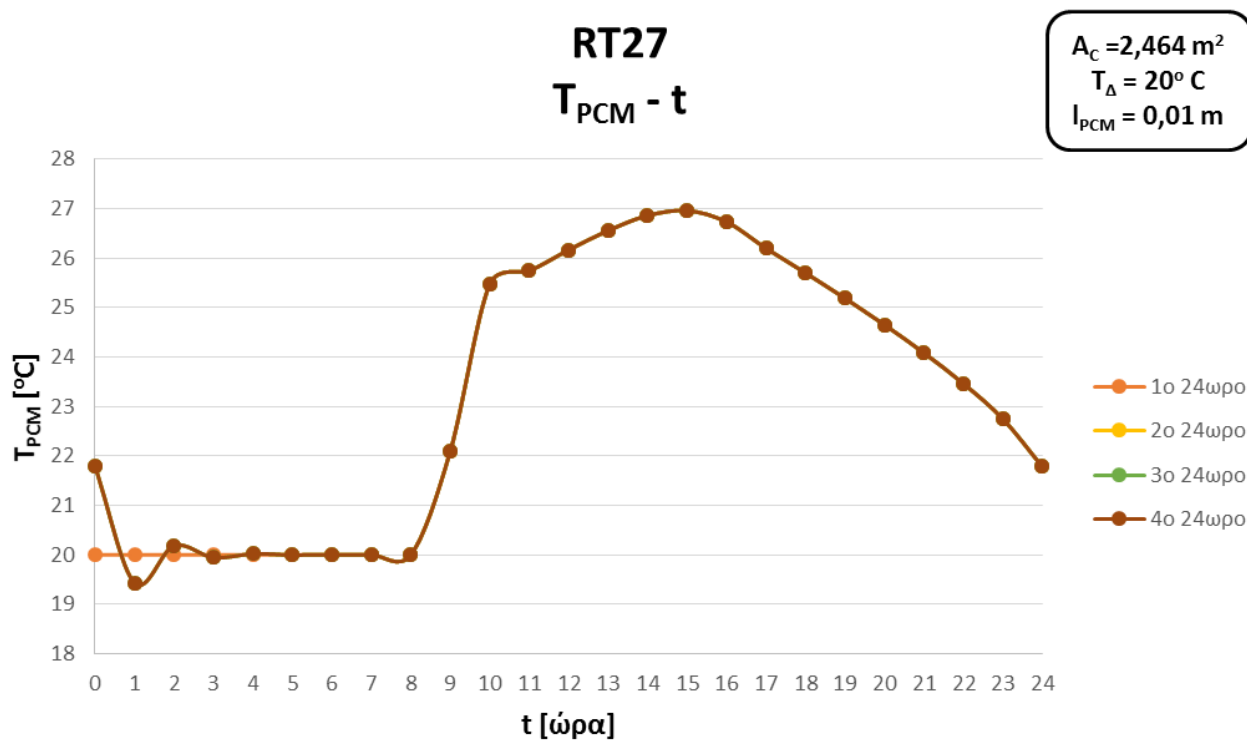
Σχήμα 6.6.1/3 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [ $\text{W}/\text{m}^2$  δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **9,04  $\text{W}/\text{m}^2$** .

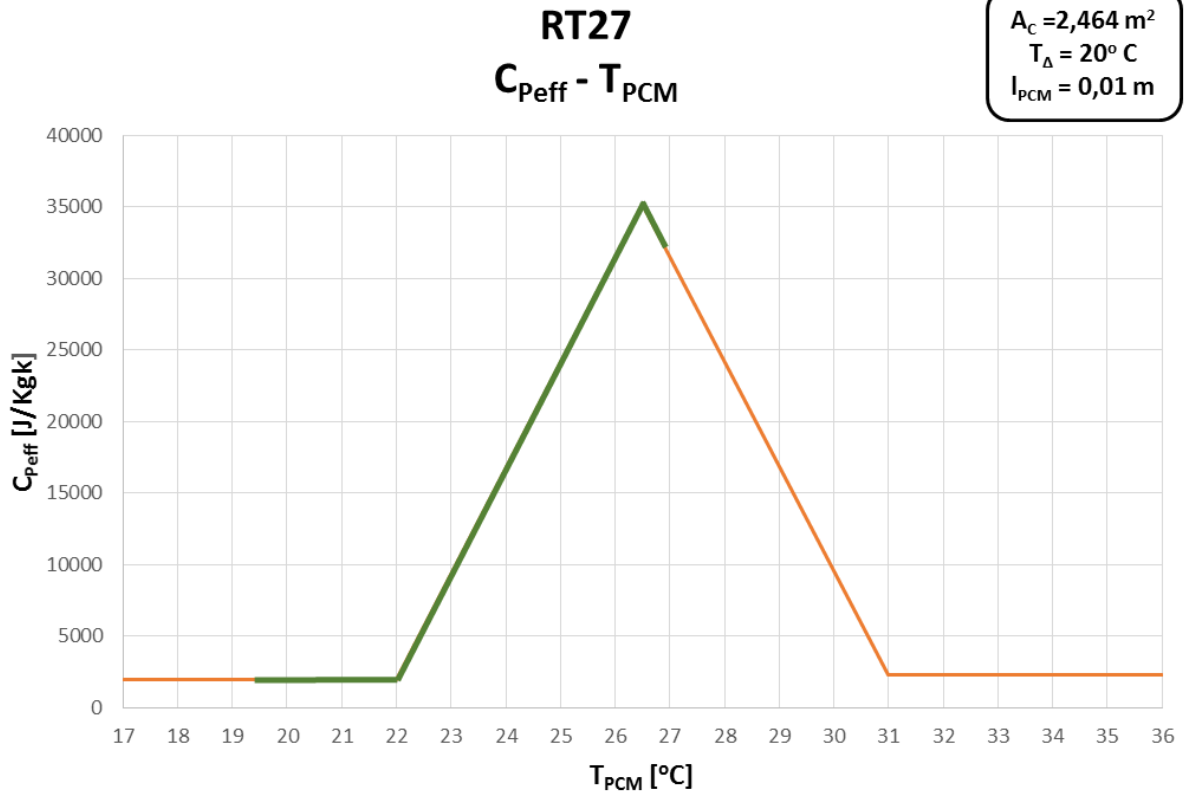
### 6.6.2 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ RT27

Παράμετροι 1 <sup>ης</sup> Δοκιμής με RT27	
Συλλεκτική Επιφάνεια [ $\text{m}^2$ ]	$A_c = 2,464$
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\Delta} = 20$
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_s = 22$
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_l = 31$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$C_{p_s} = 2000$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$C_{p_l} = 2300$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$H = 167400$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [ $\text{m}$ ]	$l_{\text{PCM}} = 0,01$

Πίνακας 6.6.2/1 : Παράμετροι 1ης Δοκιμής RT27



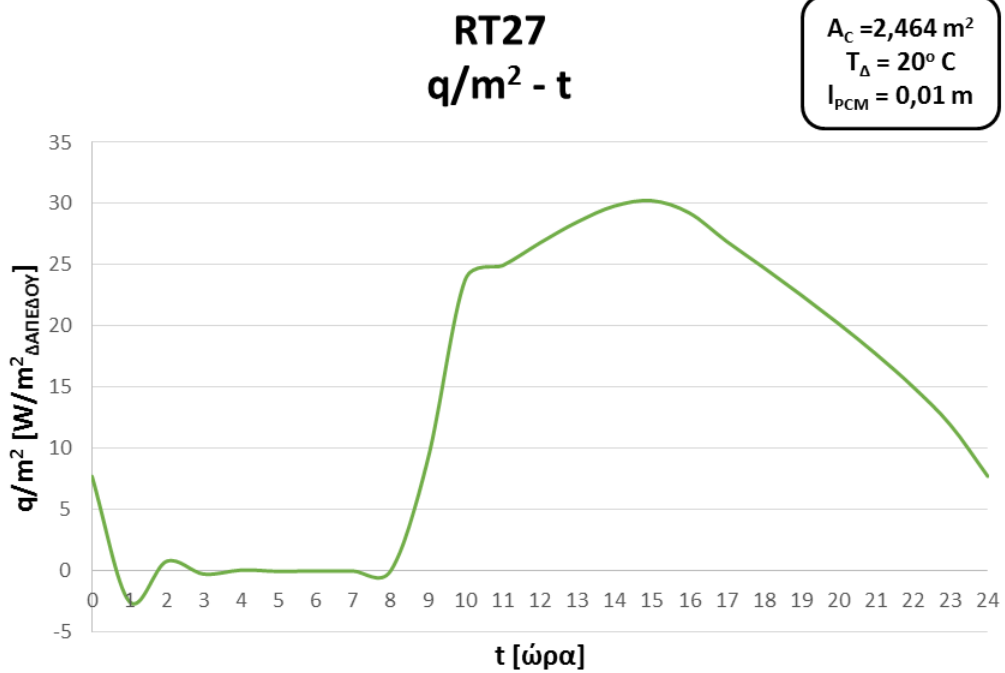
Σχήμα 6.6.2/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου



Σχήμα 6.6.2/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 1<sup>ης</sup> Δοκιμής RT27 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{99606,55}{167400} = 0,595$$



Σχήμα 6.6.2/3 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

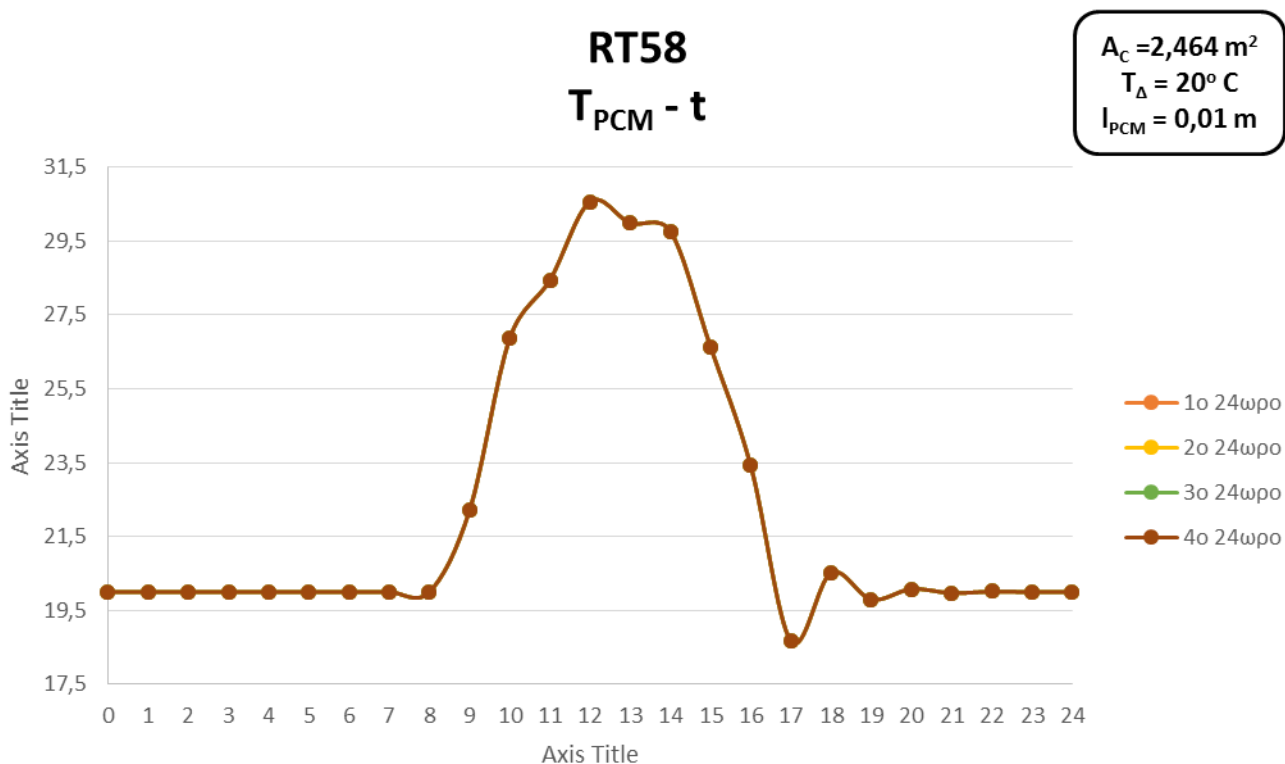
Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [ $\text{W}/\text{m}^2$  δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **14,21  $\text{W}/\text{m}^2$** .

Η μικρή ανωμαλία της καμπύλης, στα σχήματα 6.6.2/1 και 6.6.2/3 , στη 1:00 οφείλεται καθαρά στην υπολογιστική διαδικασία, αφού πραγματοποιείται έξοδος από τον θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του υλικού, που προκαλεί απότομη αλλαγή των δεδομένων, η οποία όμως εξομαλύνεται και επιτυγχάνεται σταθεροποίηση στην θερμοκρασία δωματίου. Για αυτόν τον λόγο και απορροφά μικρό ποσό θερμότητας από το δωμάτιο.

### 6.6.3 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ RT58

Παράμετροι 1 <sup>ης</sup> Δοκιμής με RT58	
Συλλεκτική Επιφάνεια [ $\text{m}^2$ ]	$A_c=2,464$
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\Delta}=20$
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_s=53$
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_l=62$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$C_{p_s}=1900$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$C_{p_l}=2600$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$H=166100$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [m]	$I_{PCM}=0,01$

Πίνακας 6.6.3/1 : Παράμετροι 1ης Δοκιμής RT58



Σχήμα 6.6.3/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου

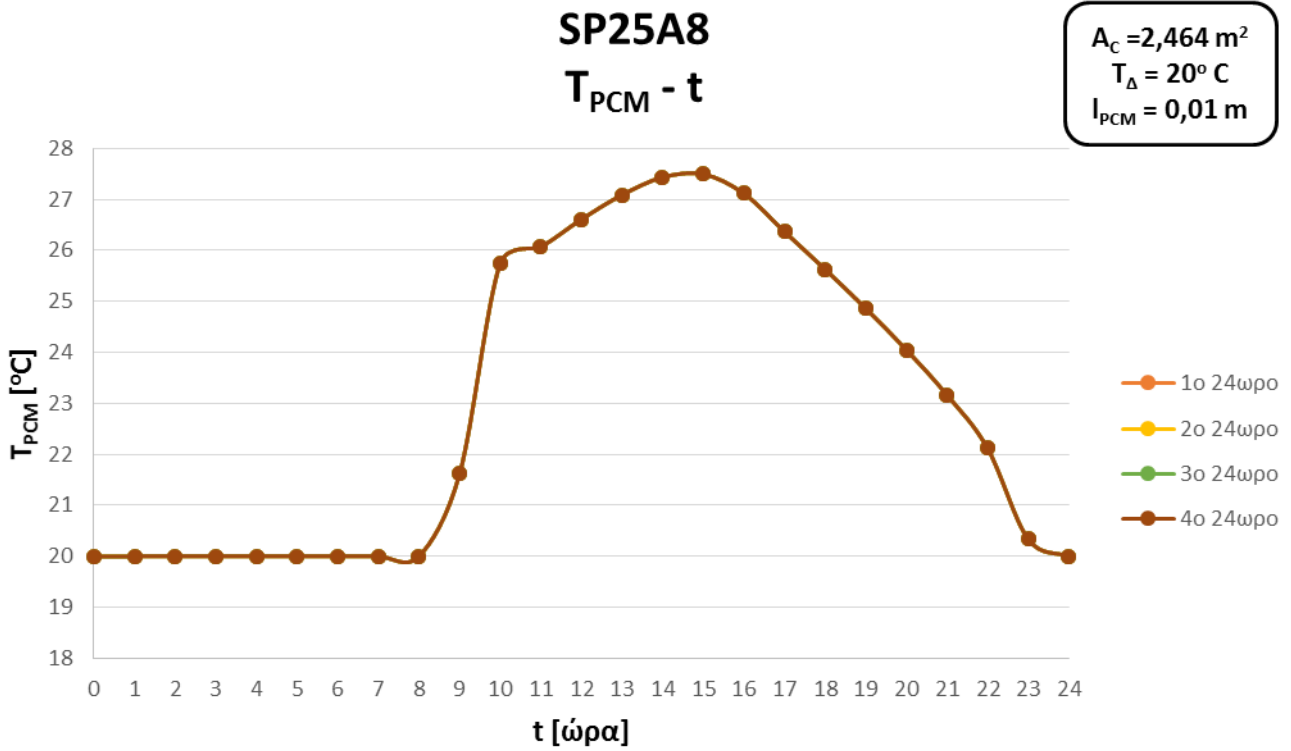
Στο παραπάνω σχήμα, η ανομοιομορφία της καμπύλης στις 17:00 εξηγείται με την πλήρη απουσία της ηλιακής ακτινοβολίας, άρα την διακοπή παροχής ισχύος από τον ηλιακό συλλέκτη, έχοντας ως αποτέλεσμα την απότομη μείωση της θερμοκρασίας με την τελική σταθεροποίησή της στην θερμοκρασία δωματίου.

Το διάγραμμα της ενεργούς θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του ΥΑΦ δεν έχει νόημα στην περίπτωση του RT58, αφού οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες βρίσκονται τελείως εκτός του θερμοκρασιακού εύρους λειτουργίας του υλικού, άρα και ο βαθμός εκμετάλλευσης είναι μηδενικός. Συνεπώς, στο διάγραμμα θερμοκρασίας του PCM συναρτήσει του χρόνου, φαίνεται η απορρόφηση μόνο αισθητής θερμότητας από το υλικό, με ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας του, χωρίς καμία αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας. Το υλικό δηλαδή φορτίζεται και αποφορτίζεται μέσα στο 24ωρο χωρίς καμία χρονική καθυστέρηση. Για τον ίδιο λόγο δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον και το διάγραμμα θερμοροής.

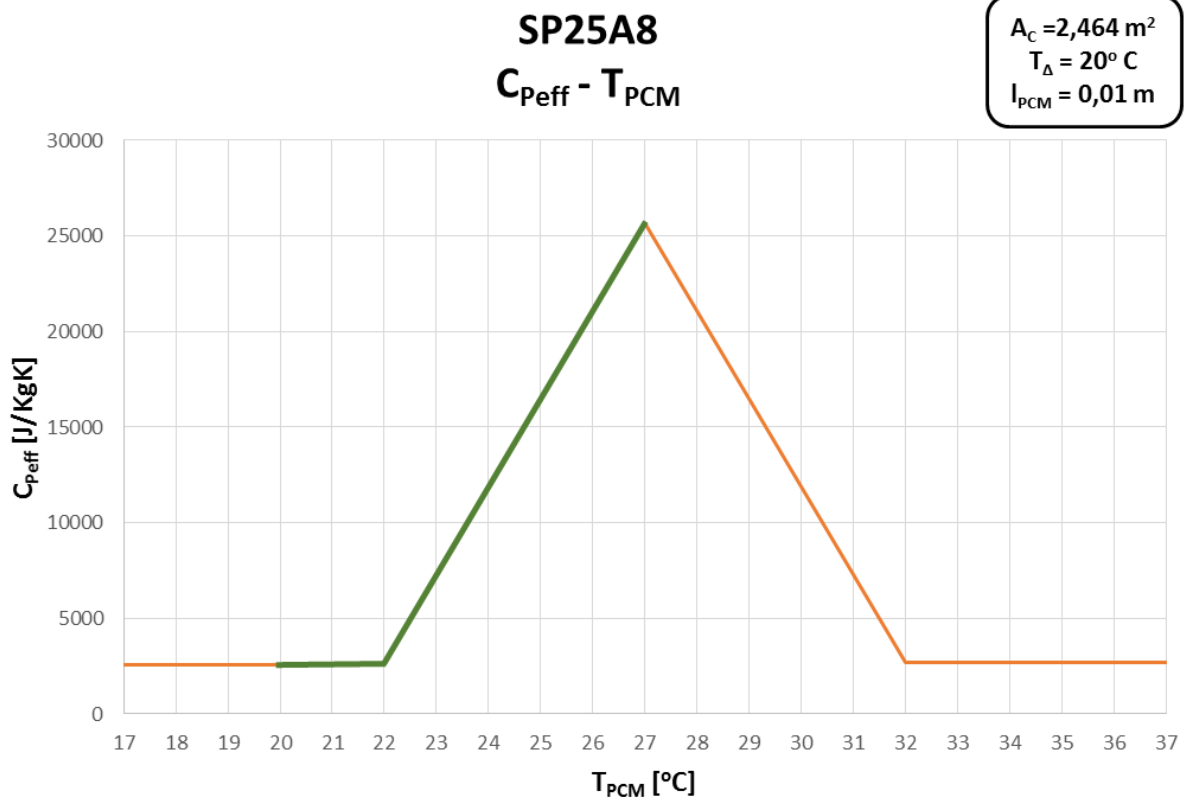
#### 6.6.4 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ SP25A8

<b>Παράμετροι 1<sup>ης</sup> Δοκιμής με SP25A8</b>	
Συλλεκτική Επιφάνεια [m <sup>2</sup> ]	<b>A<sub>c</sub> = 2,464</b>
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [°C]	<b>T<sub>Δ</sub> = 20</b>
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [°C]	<b>T<sub>s</sub> = 22</b>
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [°C]	<b>T<sub>l</sub> = 32</b>
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [J/KgK]	<b>C<sub>p s</sub> = 2600</b>
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [J/KgK]	<b>C<sub>p l</sub> = 2700</b>
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [J/KgK]	<b>H = 141500</b>
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [m]	<b>l<sub>PCM</sub> = 0,01</b>

Πίνακας 6.6.4/1 : Παράμετροι 1ης Δοκιμής SP25A8



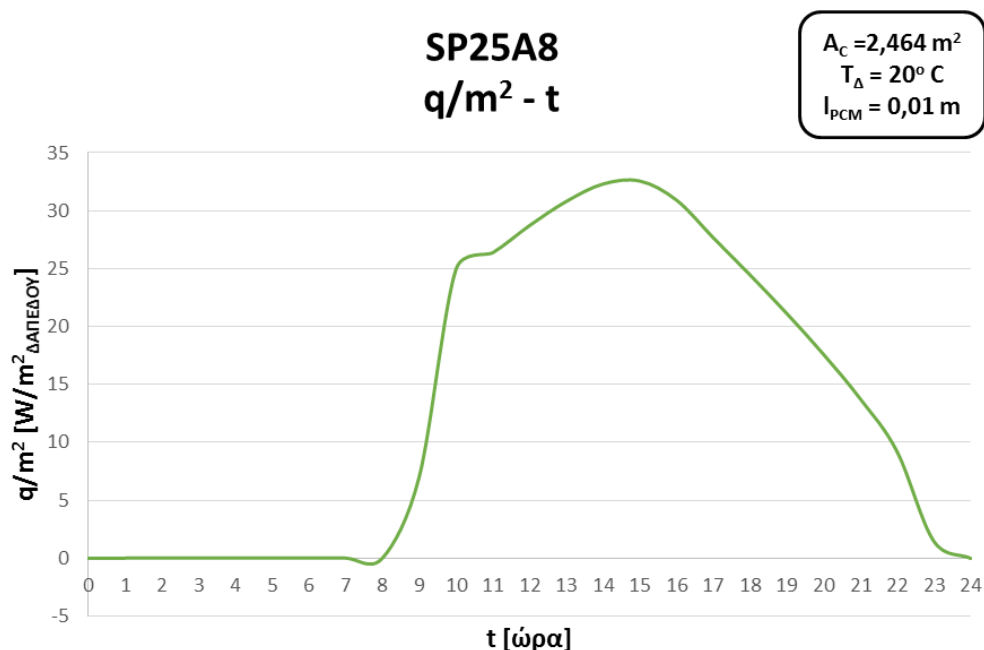
Σχήμα 6.6.4/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου



Σχήμα 6.6.4/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 1<sup>ης</sup> Δοκιμής SP25A8 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{83071,13}{141500} = 0,587$$



Σχήμα 6.6.4/3 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [W/m<sup>2</sup> δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **13,15 W/m<sup>2</sup>**.

### 6.6.5 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

	<b>RT21</b>	<b>RT27</b>	<b>SP25A8</b>
T <sub>min</sub> [°C]	20,3	19,43	19,99
T <sub>max</sub> [°C]	29,45	26,96	27,49
η	0,533	0,595	0,587
q/m <sup>2</sup> <sub>Δ</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	9,04	14,21	13,15

Πίνακας 6.6.5/1 : Συνολικός Πίνακας Αποτελεσμάτων

Το υλικό RT21 είναι εντός του θερμοκρασιακού εύρους λειτουργίας του, ωστόσο με αρχική θερμοκρασία αρκετά υψηλότερη της θερμοκρασίας στερεοποίησης και μέγιστη μεγαλύτερη της θερμοκρασίας πλήρους υγροποίησης. Συνεπώς, όπως φαίνεται και από τον βαθμό εκμετάλλευσης, δεν απορροφά την μέγιστη λανθάνουσα θερμότητα, απορροφά ένα ποσοστό αισθητής και δεν αποδίδει αρκετή θερμότητα. Προφανώς με την αρχική θερμοκρασία δωματίου που έχει επιλεγεί δεν θα υπάρξει σημαντική αύξηση του βαθμού εκμετάλλευσης για οποιονδήποτε



συνδυασμό παραμέτρων, αλλά μπορεί να αυξηθεί η θερμοροή του υλικού, ποσοστό της οποίας θα προέρχεται από την αισθητή θερμότητα απορρόφησης του υλικού κατά την φόρτιση.

Τα υλικά RT27 και SP25A8 παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά ως προς όλα τα αποτελέσματα. Η ελαφρώς μεγαλύτερη θερμοροή του RT27 μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η πλειοψηφία των θερμοκρασιών του υλικού διατηρείται μεγαλύτερη της θερμοκρασίας δωματίου, σε αντίθεση με το SP25A8, το οποίο και αποφορτίζεται πλήρως στο τέλος του 24ώρου. Είναι προφανές ότι η συλλεκτική επιφάνεια δεν είναι αρκετή για την αύξηση της θερμοκρασίας των δύο υλικών, αφού και τα δύο εμφανίζουν μέγιστη θερμοκρασία ελαφρώς μεγαλύτερη της  $T_c$  (διφασική περιοχή), γεγονός που διαφαίνεται στον βαθμό εκμετάλλευσης και των δύο. Επίσης, παρατηρείται η σύγκλιση του RT27 στο 2<sup>ο</sup> 24ωρο, ενώ η σύγκλιση του SP25A8 είναι πλήρης από το 1<sup>ο</sup> 24ωρο, επειδή αποφορτίζεται εξ ολοκλήρου στο τέλος της ημέρας.

Όσον αφορά το RT58, κρίνεται ακατάλληλο για την μελέτη λόγω της μεγάλης απόκλισης του θερμοκρασιακού εύρους λειτουργίας του σε σχέση με την θερμοκρασία δωματίου. Η δοκιμή έγινε για λόγους πληρότητας και το υλικό δεν θα χρησιμοποιηθεί στην συνέχεια των υπολογισμών.

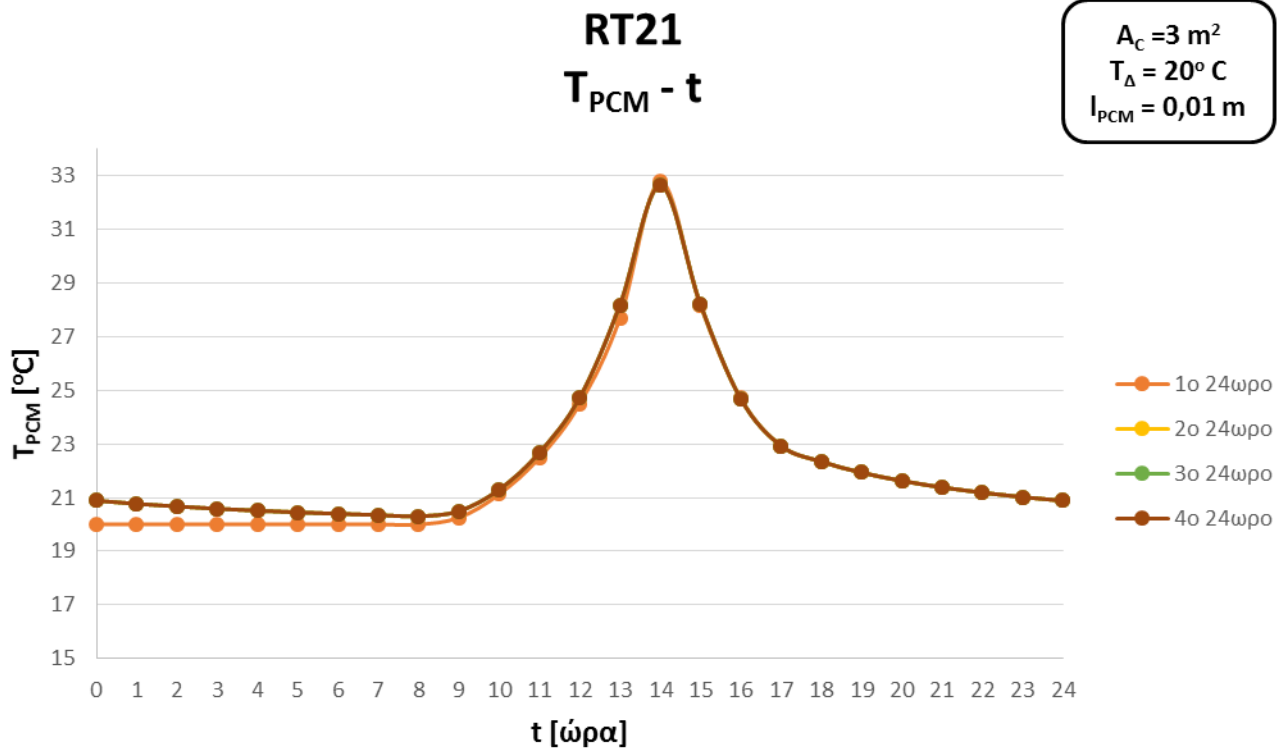
Τέλος, σημειώνεται ότι η πλήρης αποφόρτιση των υλικών πραγματοποιείται σε διάρκεια ελαφρώς μεγαλύτερη του ενός 24ώρου, χωρίς να έχουν την δυνατότητα απόδοσης την επόμενη ημέρα, στην περίπτωση συννεφιάς.

## 6.7 2<sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΑΥΞΗΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ $A_c = 3 \text{ m}^2$

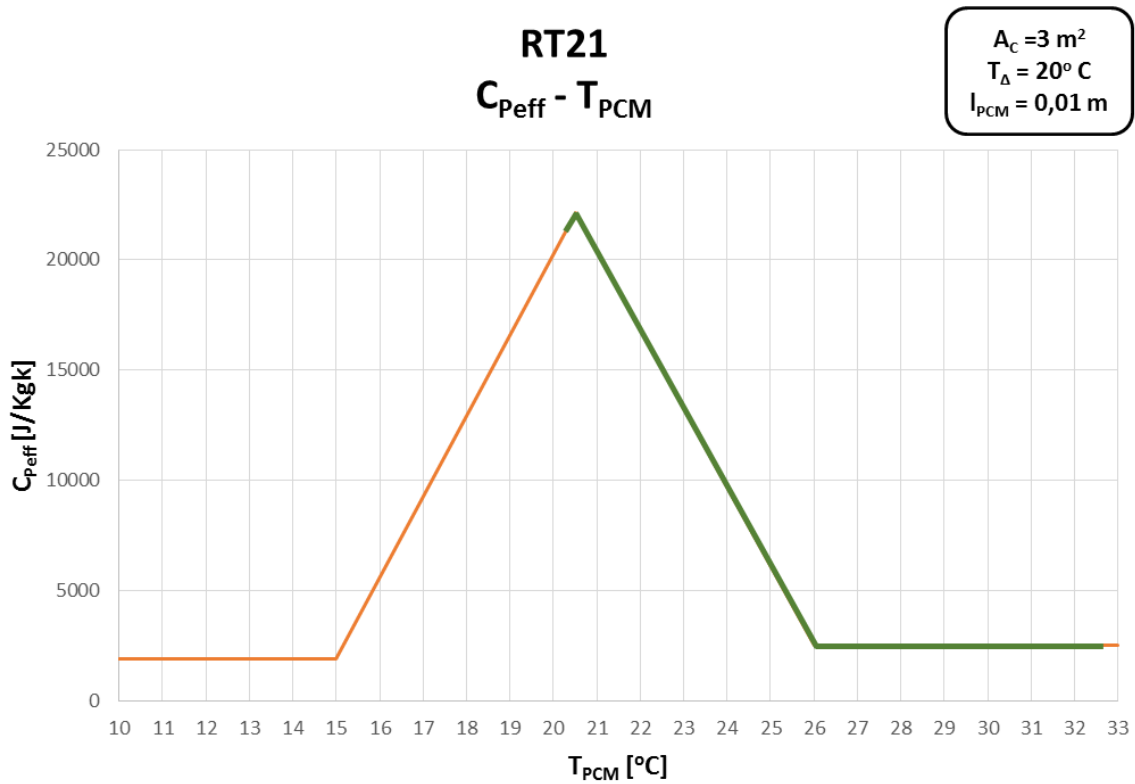
### 6.7.1 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ RT21

Παράμετροι 2 <sup>ης</sup> Δοκιμής με RT21	
Συλλεκτική Επιφάνεια [ $\text{m}^2$ ]	$A_c = 3$
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\Delta} = 20$
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_s = 15$
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_l = 26$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$C_{p_s} = 1900$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$C_{p_l} = 2500$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$H = 132100$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [ $\text{m}$ ]	$l_{PCM} = 0,01$

Πίνακας 6.7.1/1 : Παράμετροι 2ης Δοκιμής RT21



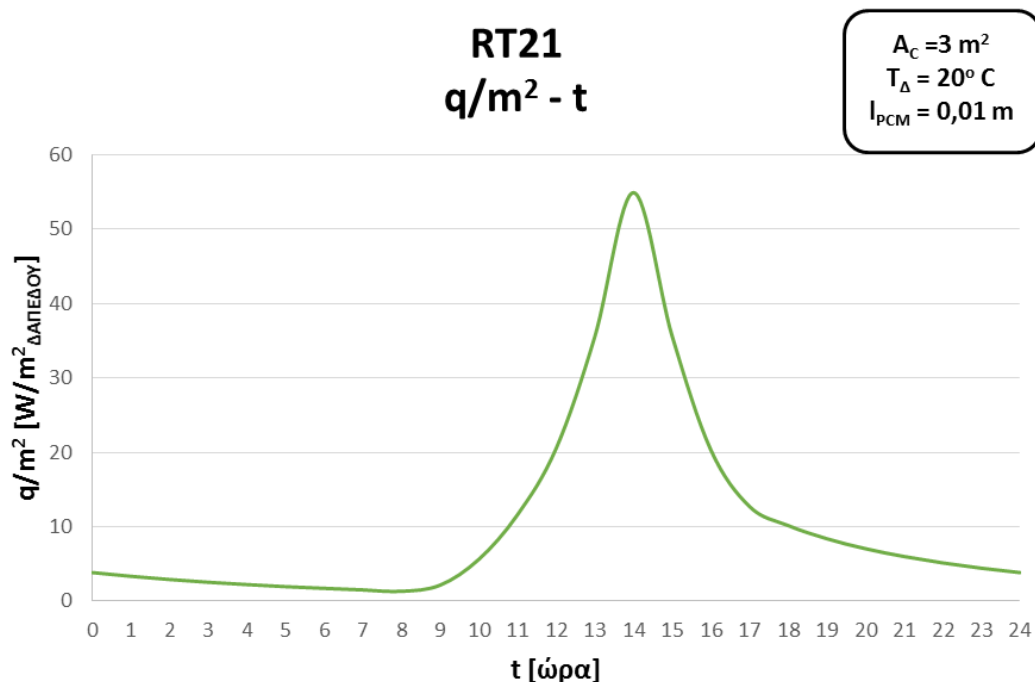
Σχήμα 6.7.1/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου



Σχήμα 6.7.1/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 2<sup>ης</sup> Δοκιμής RT21 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{70294,99}{132100} = 0,532$$



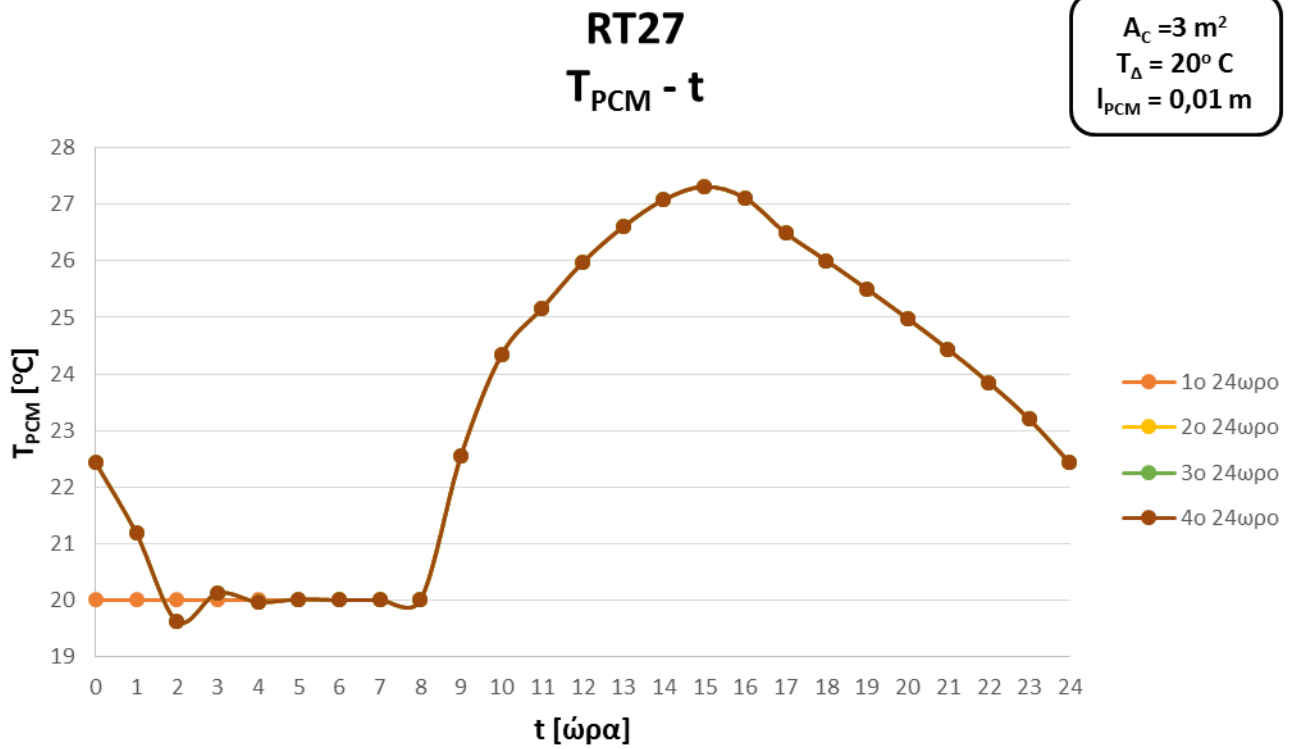
Σχήμα 6.7.1/3 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [W/m<sup>2</sup> δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **10,62 W/m<sup>2</sup>**.

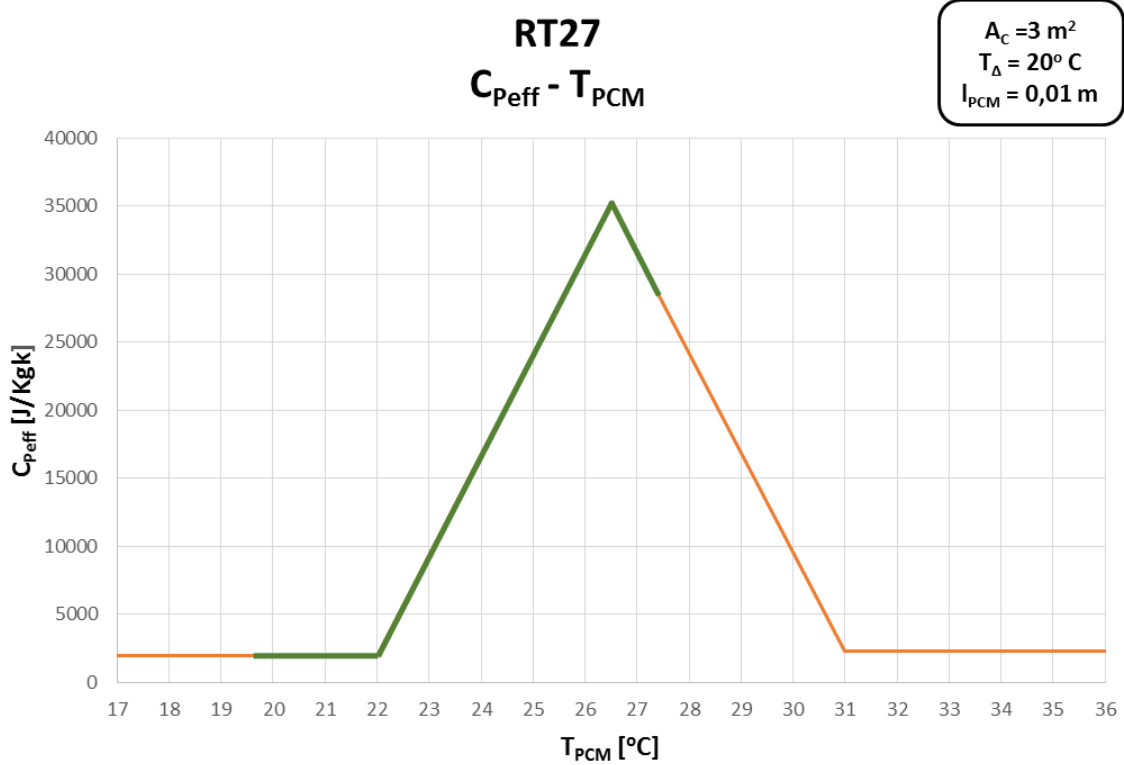
### 6.7.2 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ RT27

<b>Παράμετροι 2<sup>ης</sup> Δοκιμής με RT27</b>	
<b>Συλλεκτική Επιφάνεια [m<sup>2</sup>]</b>	<b>A<sub>C</sub> = 3</b>
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [°C]	T <sub>Δ</sub> = 20
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [°C]	T <sub>S</sub> = 22
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [°C]	T <sub>I</sub> = 31
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [J/KgK]	C <sub>P S</sub> = 2000
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [J/KgK]	C <sub>P I</sub> = 2300
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [J/KgK]	H = 167400
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [m]	I <sub>PCM</sub> = 0,01

Πίνακας 6.7.2/1 : Παράμετροι 2ης Δοκιμής RT27



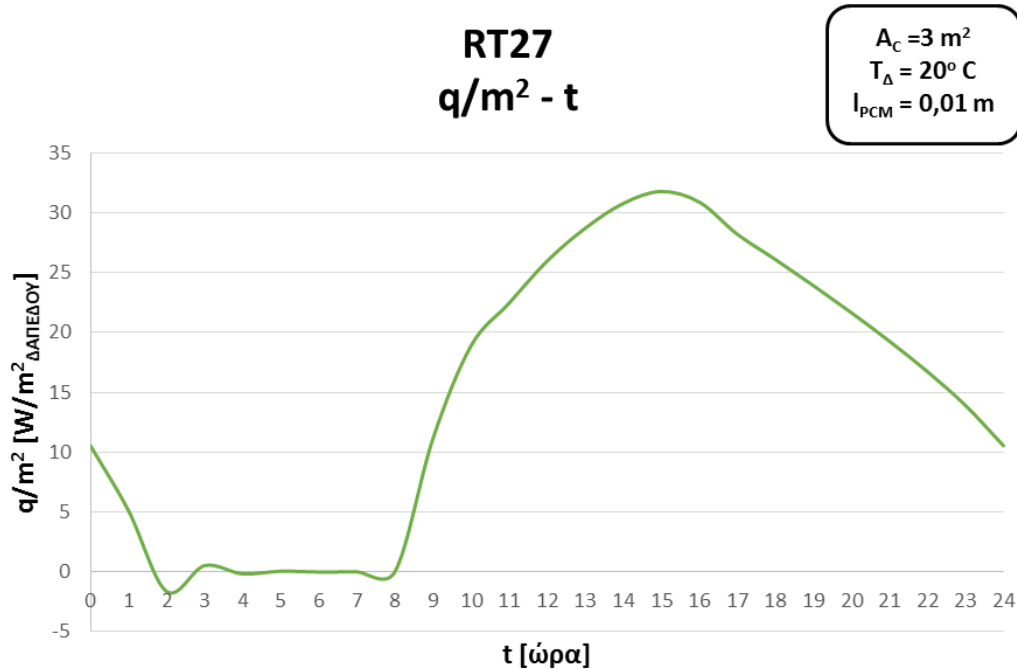
Σχήμα 6.7.2/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου



Σχήμα 6.7.2/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 2<sup>ης</sup> Δοκιμής RT27 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{110344,7}{167400} = 0,659$$



Σχήμα 6.7.2/3 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

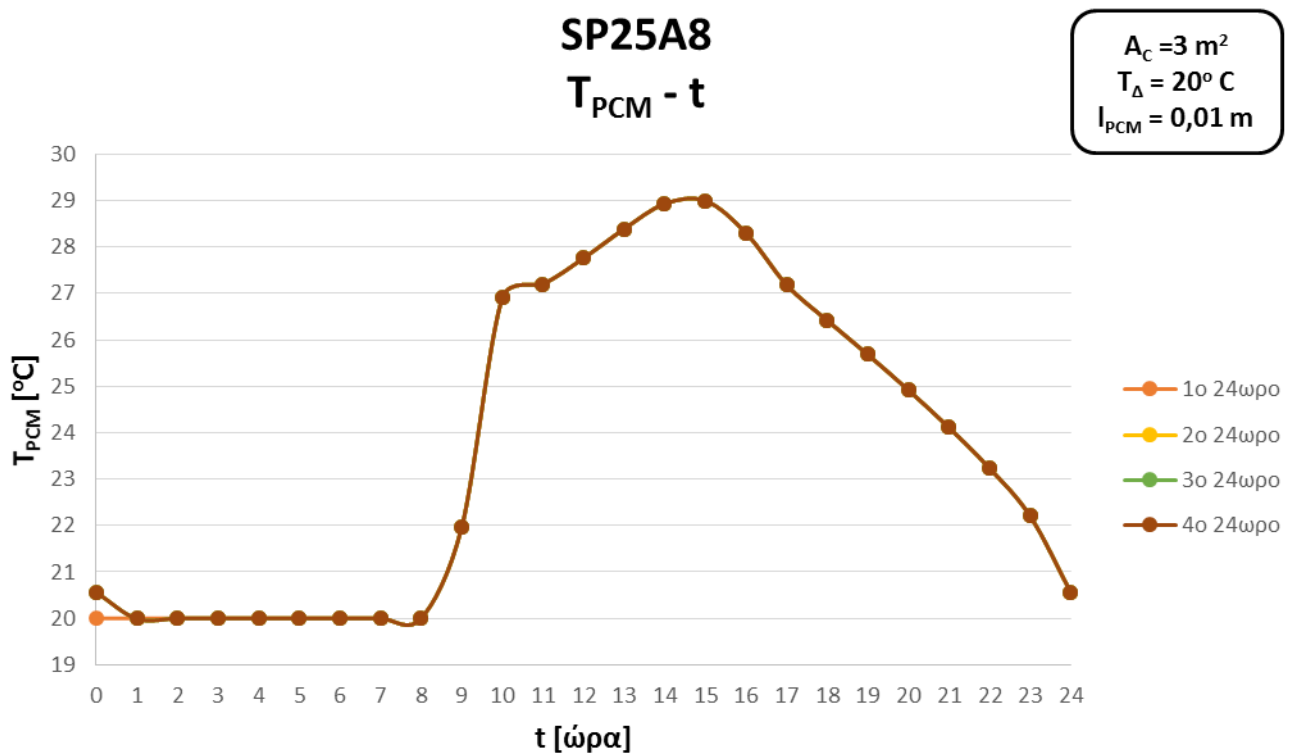
Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [W/m<sup>2</sup> δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **15,01 W/m<sup>2</sup>**.

Όπως αναφέρθηκε και στην 1<sup>η</sup> δοκιμή, η μικρή ανωμαλία της καμπύλης, στα σχήματα 6.7.2/1 και 6.7.2/3, στις 2:00 οφείλεται καθαρά στην υπολογιστική διαδικασία, αφού πραγματοποιείται απότομη αλλαγή των δεδομένων λόγω εξόδου από τον θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του υλικού και συνοδεύεται από αμελητέα απορρόφηση θερμότητας από το δωμάτιο.

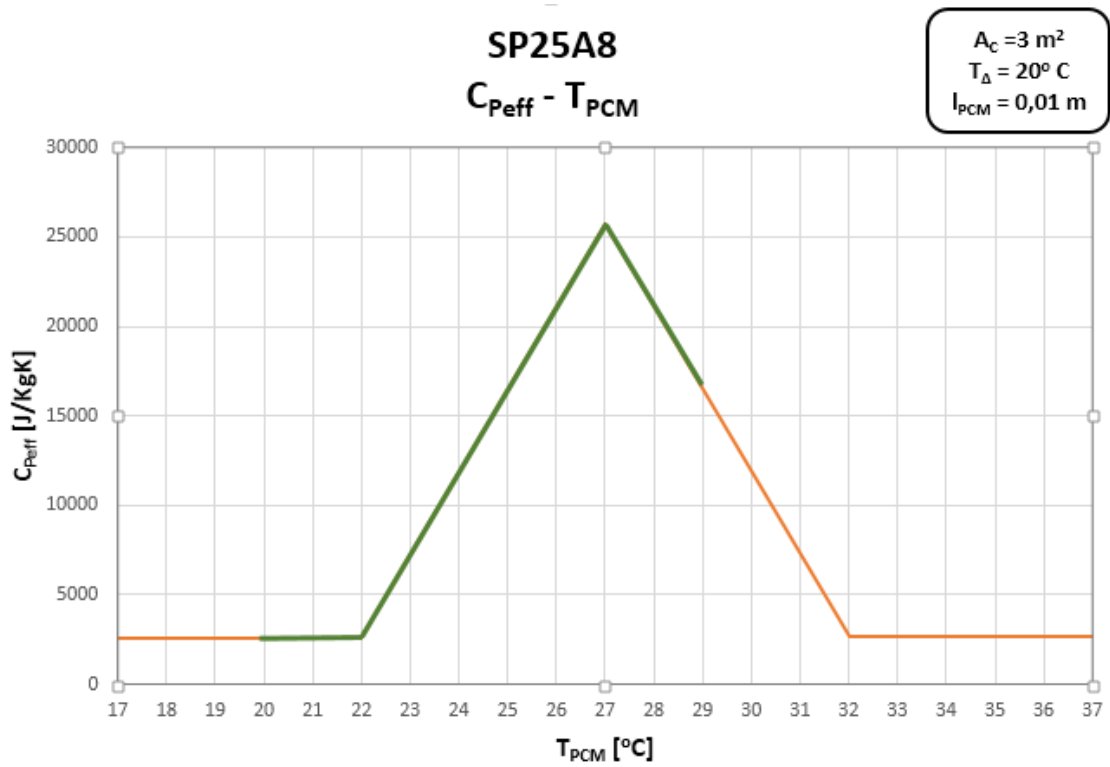
### 6.7.3 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ SP25A8

Παράμετροι 2 <sup>ης</sup> Δοκιμής με SP25A8	
Συλλεκτική Επιφάνεια [m <sup>2</sup> ]	$A_c=3$
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [°C]	$T_{\Delta}=20$
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [°C]	$T_s=22$
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [°C]	$T_l=32$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [J/KgK]	$C_{p_s}=2600$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [J/KgK]	$C_{p_l}=2700$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [J/KgK]	$H=141500$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [m]	$l_{PCM}=0,01$

Πίνακας 6.7.3/1 : Παράμετροι 2ης Δοκιμής SP25A8



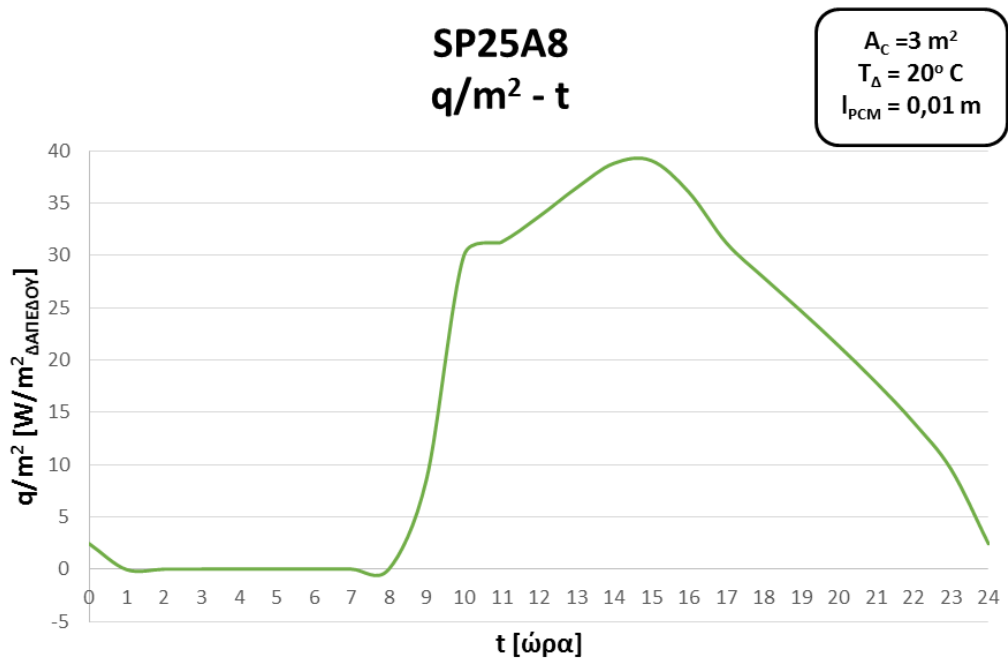
Σχήμα 6.7.3/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου



Σχήμα 6.7.3/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 2<sup>ης</sup> Δοκιμής SP25A8 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{112857,90}{141500} = 0,798$$



Σχήμα 6.7.3/3 : Καμπύλη Προσδιόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [ $W/m^2$  δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **16,22  $W/m^2$** .

#### 6.7.4 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

	<b>RT21</b>	<b>RT27</b>	<b>SP25A8</b>
<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>	20,3	19,02	19,99
<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	32,63	27,31	28,99
<b>η</b>	0,532	0,659	0,798
<b>q/m<sup>2</sup><sub>Δ</sub> [W/m<sup>2</sup>]</b>	10,62	15,01	16,22

Πίνακας 6.7.4/1 : Συνολικός Πίνακας Αποτελεσμάτων

Η αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας, όπως ήταν αναμενόμενο για το RT21, επιφέρει μικρή μείωση στον βαθμό εκμετάλλευσης, αφού προκαλεί αύξηση των θερμοκρασιών του υλικού και μετατοπίζει τον κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης περαιτέρω, εκτός του εύρους λειτουργίας, συγκριτικά με την 1<sup>η</sup> δοκιμή. Η αύξηση της θερμοροής οφείλεται στην αύξηση της απορροφώμενης αισθητής θερμότητας, η οποία αποδίδεται στο δωμάτιο χωρίς χρονική καθυστέρηση.

Παρόμοια είναι πάλι η συμπεριφορά των RT27 και SP25A8, στα οποία, όπως είναι λογικό η αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας επιφέρει σημαντική αύξηση του βαθμού εκμετάλλευσης και μικρή αύξηση της θερμοροής προς το δωμάτιο. Το φαινόμενο εξηγείται από την αύξηση των θερμοκρασιών των υλικών, λόγω μεγαλύτερης αποδιδόμενης ισχύος του συλλέκτη, με αποτέλεσμα μεγαλύτερους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης εντός του εύρους λειτουργίας.

Τέλος, σημειώνεται ότι η πλήρης αποφόρτιση των υλικών πραγματοποιείται σε διάρκεια ελαφρώς μεγαλύτερη του ενός 24ώρου, χωρίς να έχουν την δυνατότητα απόδοσης την επόμενη ημέρα, στην περίπτωση συνεφιάς.

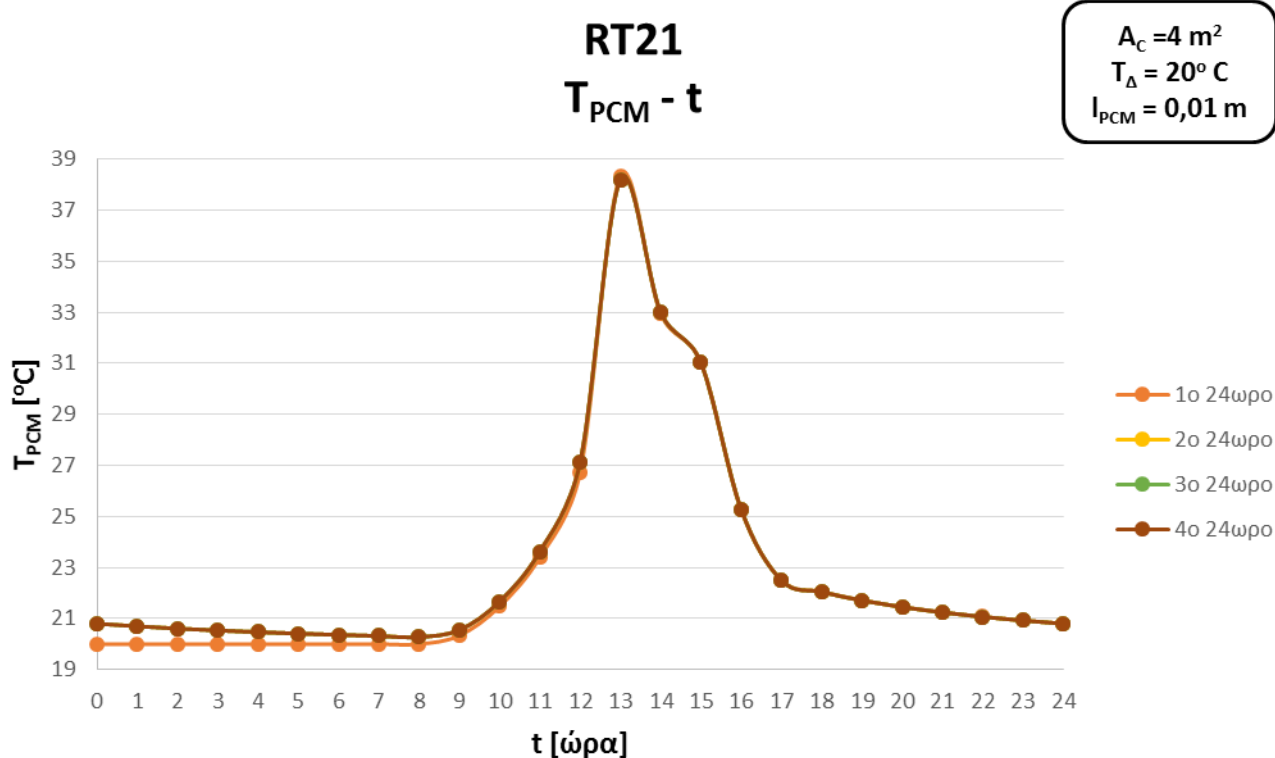


## 6.8 3<sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΑΥΞΗΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ $A_c = 4 \text{ m}^2$

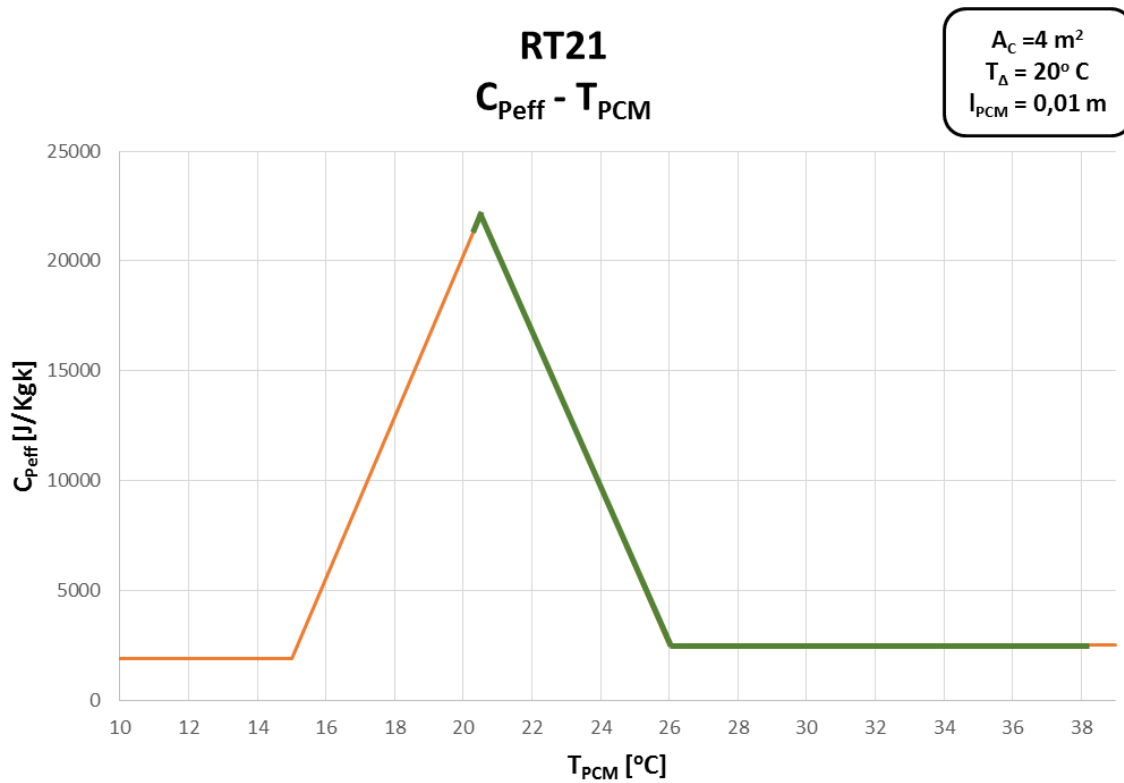
### 6.8.1 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ RT21

Παράμετροι 3 <sup>ης</sup> Δοκιμής με RT21	
Συλλεκτική Επιφάνεια [ $\text{m}^2$ ]	$A_c = 4$
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\Delta} = 20$
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_s = 15$
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_l = 26$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$C_{p_s} = 1900$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$C_{p_l} = 2500$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$H = 132100$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [ $\text{m}$ ]	$l_{PCM} = 0,01$

Πίνακας 6.8.1/1 : Παράμετροι 3ης Δοκιμής RT21



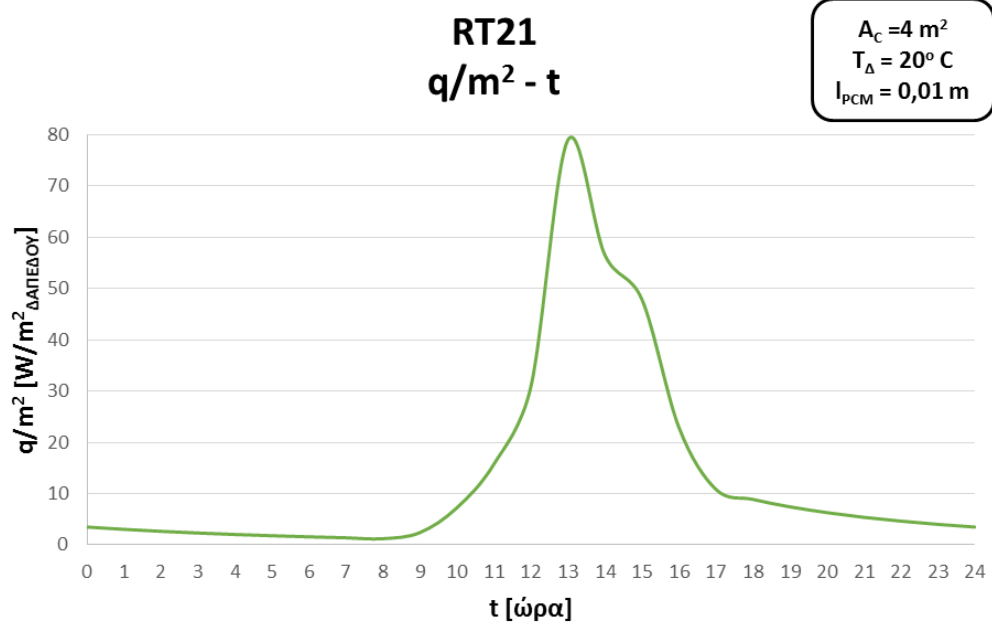
Σχήμα 6.8.1/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου



Σχήμα 6.8.1/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 3<sup>ης</sup> Δοκιμής RT21 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{70857,73}{132100} = 0,536$$



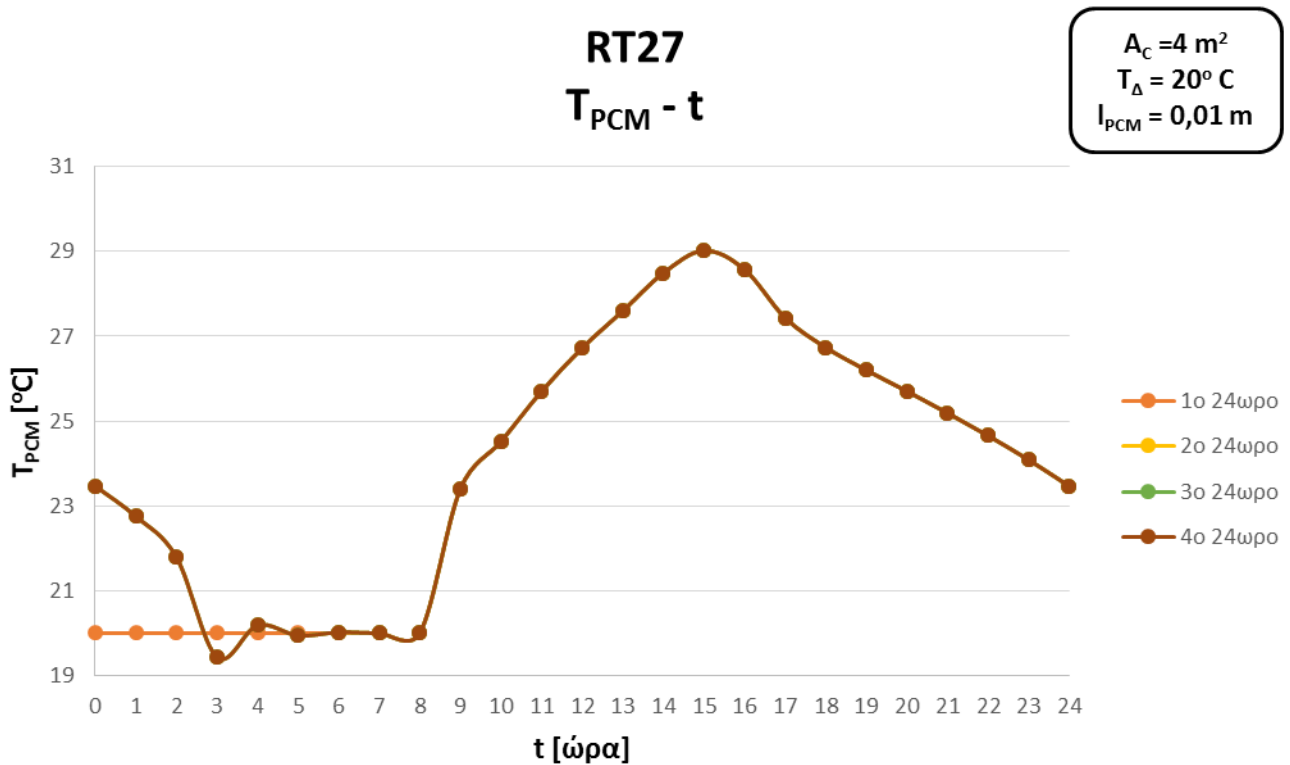
Σχήμα 6.8.1/3 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [ $\text{W}/\text{m}^2$  δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **13,32  $\text{W}/\text{m}^2$** .

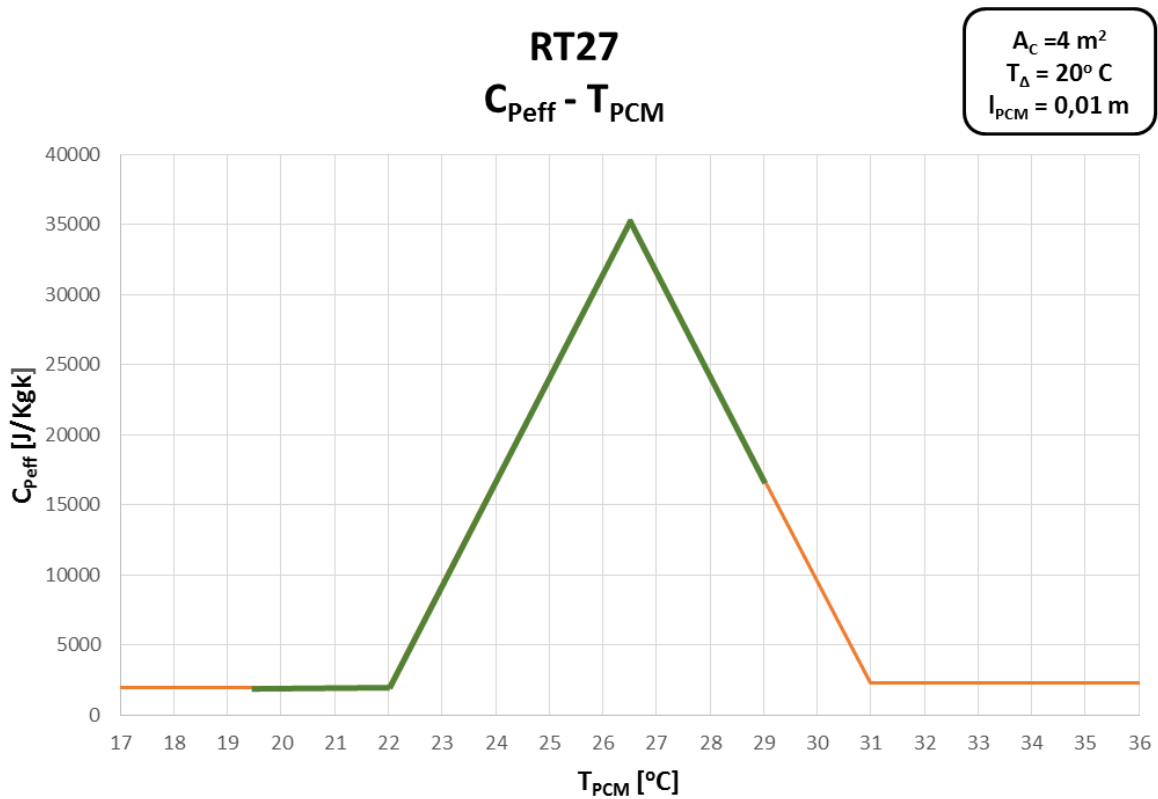
### 6.8.2 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ RT27

Παράμετροι 3 <sup>ης</sup> Δοκιμής με RT27	
Συλλεκτική Επιφάνεια [ $\text{m}^2$ ]	$A_c = 4$
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\Delta} = 20$
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_s = 22$
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_l = 31$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$C_{p_s} = 2000$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$C_{p_l} = 2300$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$H = 167400$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [ $\text{m}$ ]	$l_{PCM} = 0,01$

Πίνακας 6.8.2/1 : Παράμετροι 3ης Δοκιμής RT27



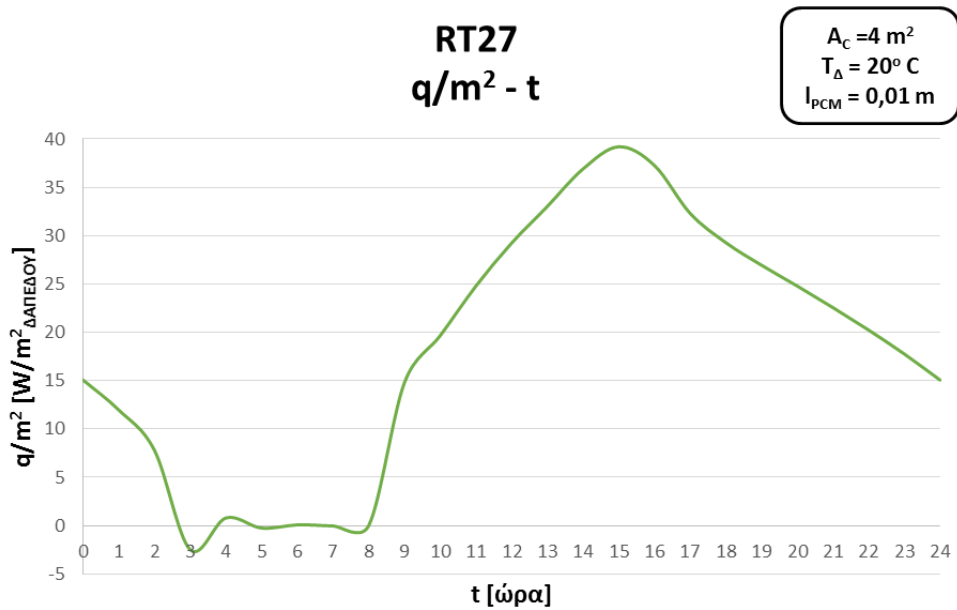
Σχήμα 6.8.2/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου



Σχήμα 6.8.2/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 3<sup>ης</sup> Δοκιμής RT27 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{148981,5}{167400} = 0,890$$



Σχήμα 6.8.2/3 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

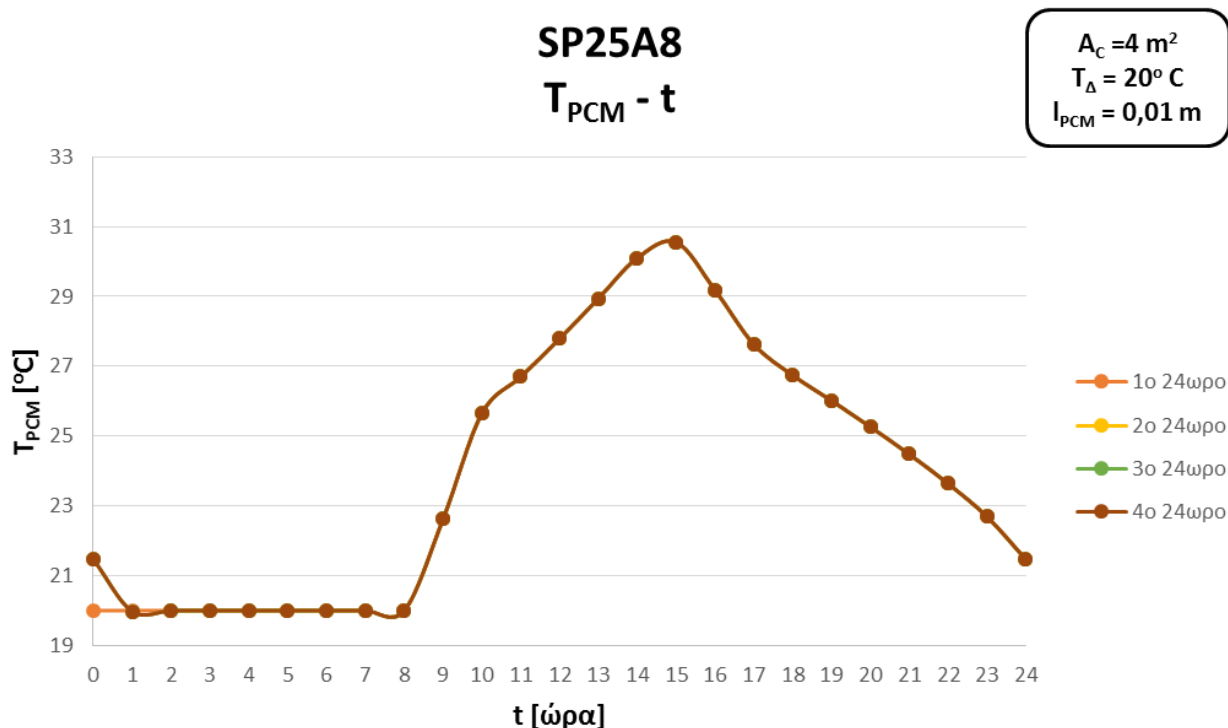
Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [ $W/m^2$  δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **18,27  $W/m^2$** .

Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες δοκιμές, η μικρή ανωμαλία της καμπύλης, στα σχήματα 6.8.2/1 και 6.8.2/3, στις 3:00 οφείλεται καθαρά στην υπολογιστική διαδικασία, αφού πραγματοποιείται απότομη αλλαγή των δεδομένων λόγω εξόδου από τον θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του υλικού και συνοδεύεται από αμελητέα απορρόφηση θερμότητας από το δωμάτιο.

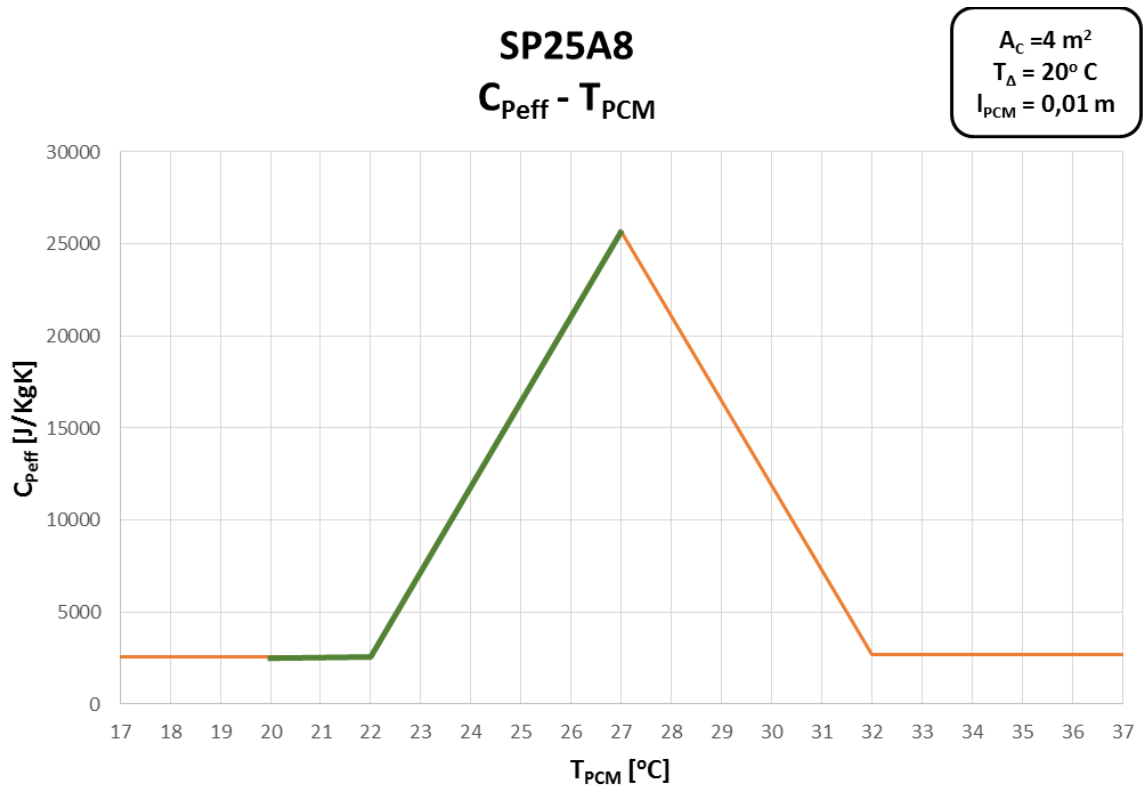
### 6.8.3 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ SP25A8

Παράμετροι 3 <sup>ης</sup> Δοκιμής με SP25A8	
Συλλεκτική Επιφάνεια [ $m^2$ ]	$A_C=4$
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [ $^{\circ}C$ ]	$T_{\Delta}=20$
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [ $^{\circ}C$ ]	$T_s=22$
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [ $^{\circ}C$ ]	$T_l=32$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [ $J/KgK$ ]	$C_{P_s}=2600$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [ $J/KgK$ ]	$C_{P_l}=2700$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [ $J/KgK$ ]	$H=141500$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [ $m$ ]	$l_{PCM}=0,01$

Πίνακας 6.8.3/1 : Παράμετροι 3ης Δοκιμής SP25A8



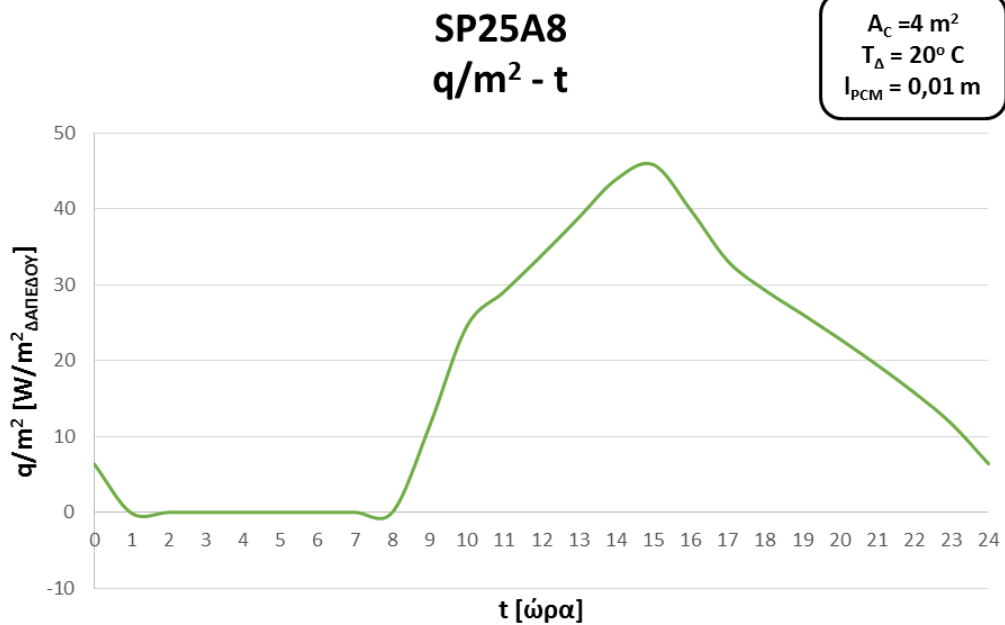
Σχήμα 6.8.3/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου



Σχήμα 6.8.3/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 3<sup>ης</sup> Δοκιμής SP25A8 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{132904,7}{141500} = 0,939$$



Σχήμα 6.8.3/3 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [ $W/m^2$  δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **17,54  $W/m^2$** .

#### 6.8.4 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

	<b>RT21</b>	<b>RT27</b>	<b>SP25A8</b>
<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>	20,27	19,42	19,98
<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	38,18	29,02	30,56
<b>η</b>	0,536	0,89	0,939
<b>q/m<sup>2</sup><sub>Δ</sub> [W/m<sup>2</sup>]</b>	13,32	18,27	17,54

Πίνακας 6.8.4/1 : Συνολικός Πίνακας Αποτελεσμάτων

Όπως και στην προηγούμενη δοκιμή, η αύξηση της θερμοροής οφείλεται στην αύξηση της απορροφώμενης αισθητής θερμότητας, η οποία αποδίδεται στο δωμάτιο χωρίς χρονική καθυστέρηση. Ωστόσο, παρατηρείται μία μικρή αύξηση του βαθμού εκμετάλλευσης, συγκριτικά με την προηγούμενη δοκιμή αύξησης της συλλεκτικής επιφάνειας, η οποία οφείλεται στην ελαφρώς μικρότερη ελάχιστη θερμοκρασία του κύκλου του υλικού που αυξάνει το ελάχιστο το εμβαδόν  $H_0$ , άρα και τον βαθμό εκμετάλλευσης.

Παρόμοια η συμπεριφορά των RT27 και SP25A8, στα οποία και πάλι, η αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας επιφέρει σημαντική αύξηση του βαθμού εκμετάλλευσης και μικρή αύξηση της θερμοροής προς το δωμάτιο. Το φαινόμενο εξηγείται από την αύξηση των θερμοκρασιών των υλικών, λόγω μεγαλύτερης αποδιδόμενης ισχύος του συλλέκτη, με αποτέλεσμα μεγαλύτερους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης εντός του εύρους λειτουργίας.

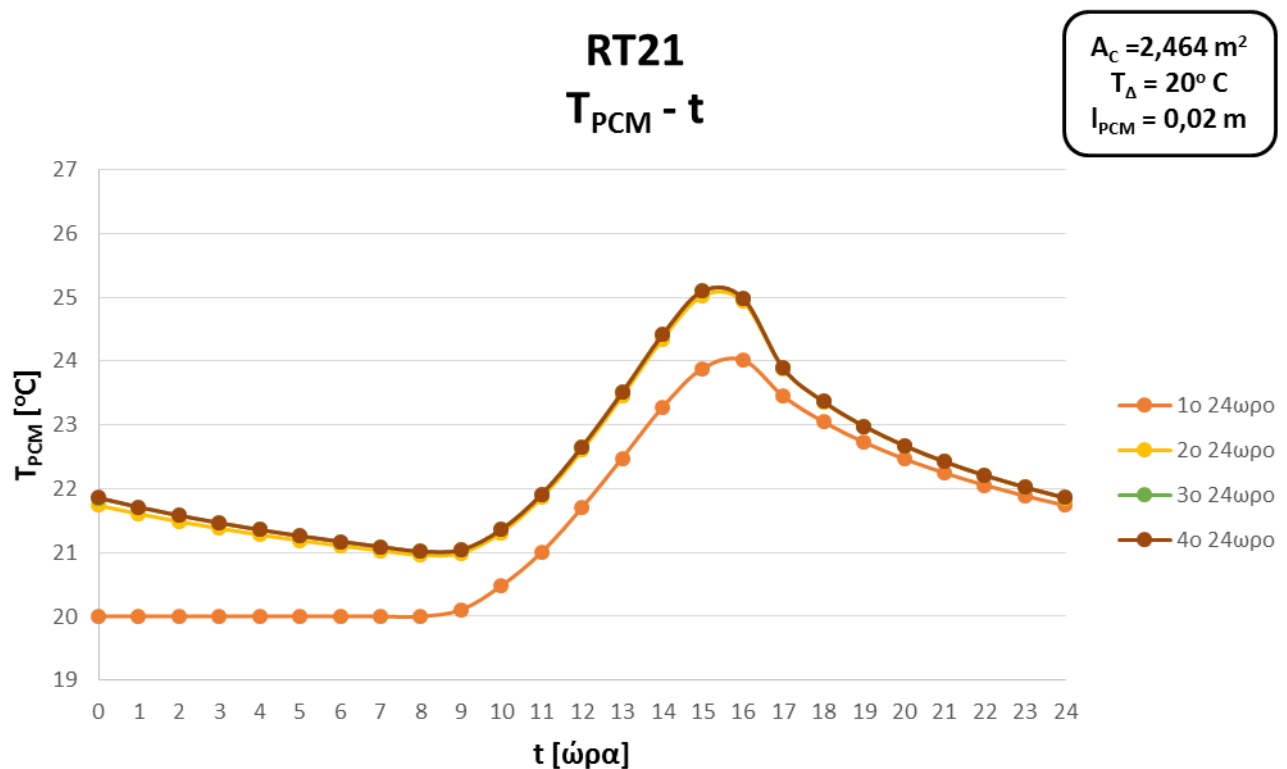
Τέλος, σημειώνεται ότι η πλήρης αποφόρτιση των υλικών πραγματοποιείται σε διάρκεια ελαφρώς μεγαλύτερη του ενός 24ώρου, χωρίς να έχουν την δυνατότητα απόδοσης την επόμενη ημέρα, στην περίπτωση συννεφιάς.

## 6.9 4<sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΑΥΞΗΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ PCM $l_{PCM}=0,02$ m

### 6.9.1 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ RT21

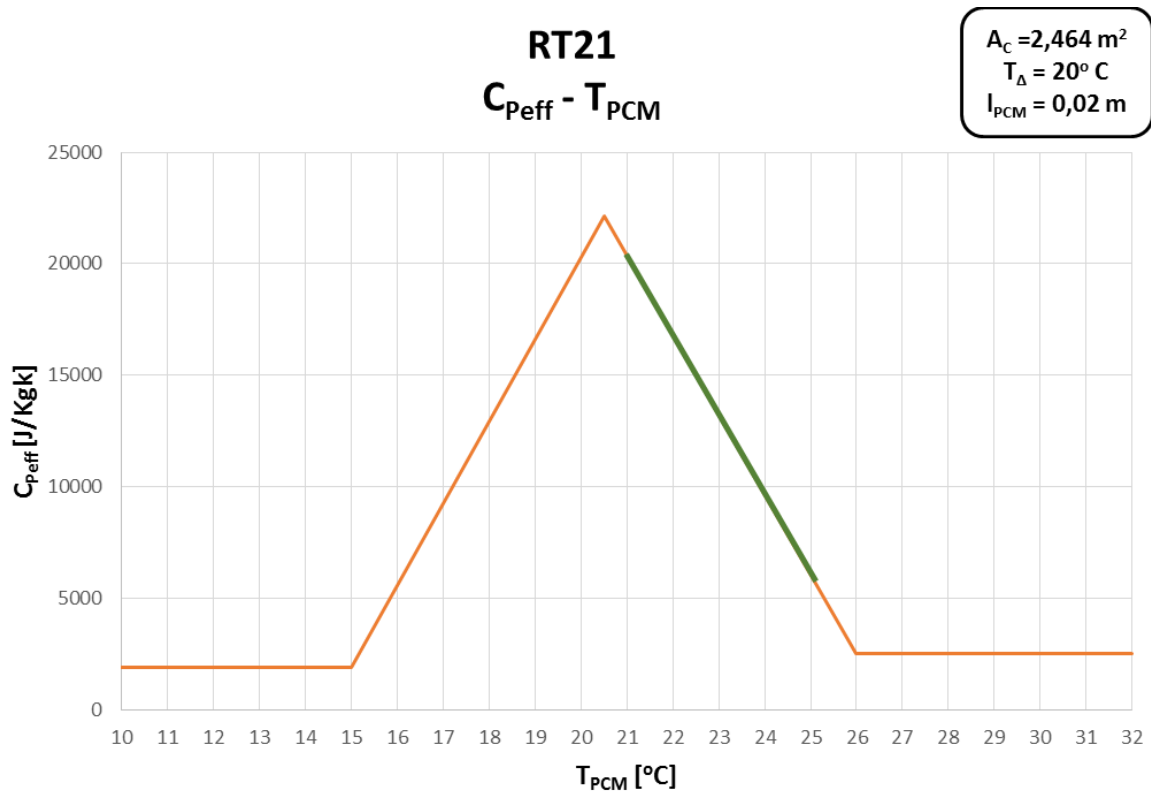
Παράμετροι 4 <sup>ης</sup> Δοκιμής με RT21	
Συλλεκτική Επιφάνεια [m <sup>2</sup> ]	$A_c=2,464$
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [°C]	$T_{\Delta}=20$
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [°C]	$T_s=15$
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [°C]	$T_l=26$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [J/KgK]	$C_{p_s}=1900$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [J/KgK]	$C_{p_l}=2500$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [J/KgK]	$H=132100$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [m]	$l_{PCM}=0,02$

Πίνακας 6.9.1/1 : Παράμετροι 4ης Δοκιμής RT21



Σχήμα 6.9.1/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου

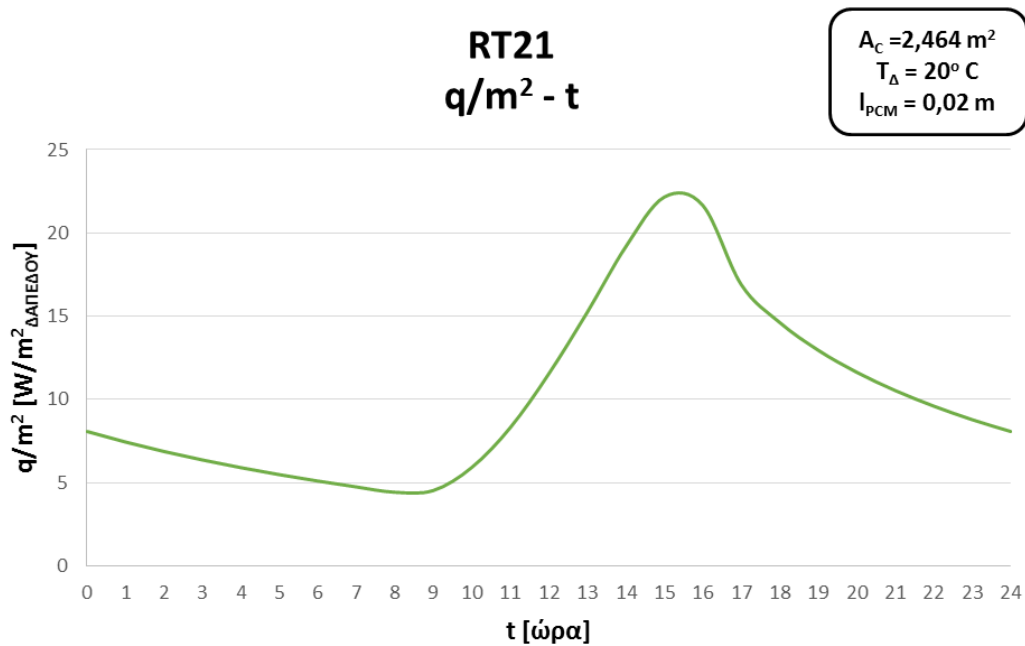




Σχήμα 6.9.1/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 4<sup>ης</sup> Δοκιμής RT21 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{51691.29}{132100} = 0,391$$



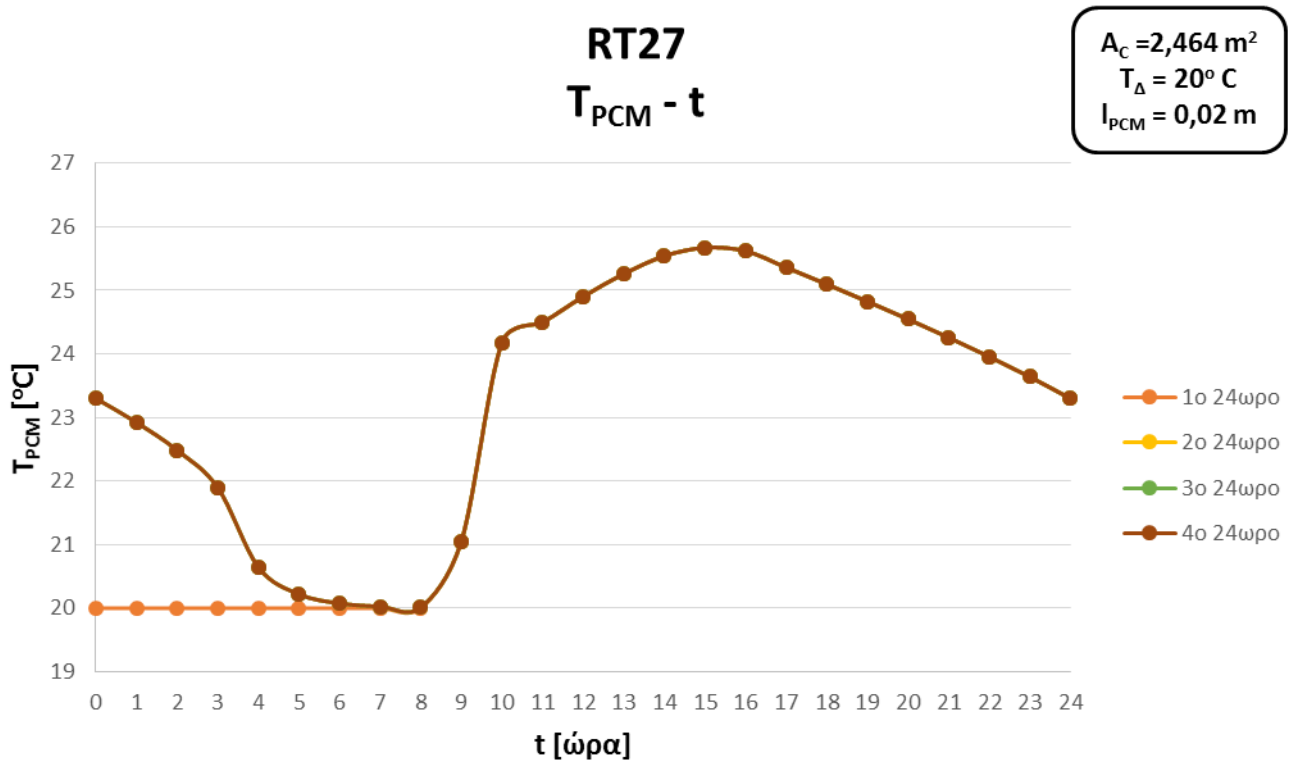
Σχήμα 6.9.1/3 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [ $W/m^2$  δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **10,24  $W/m^2$** .

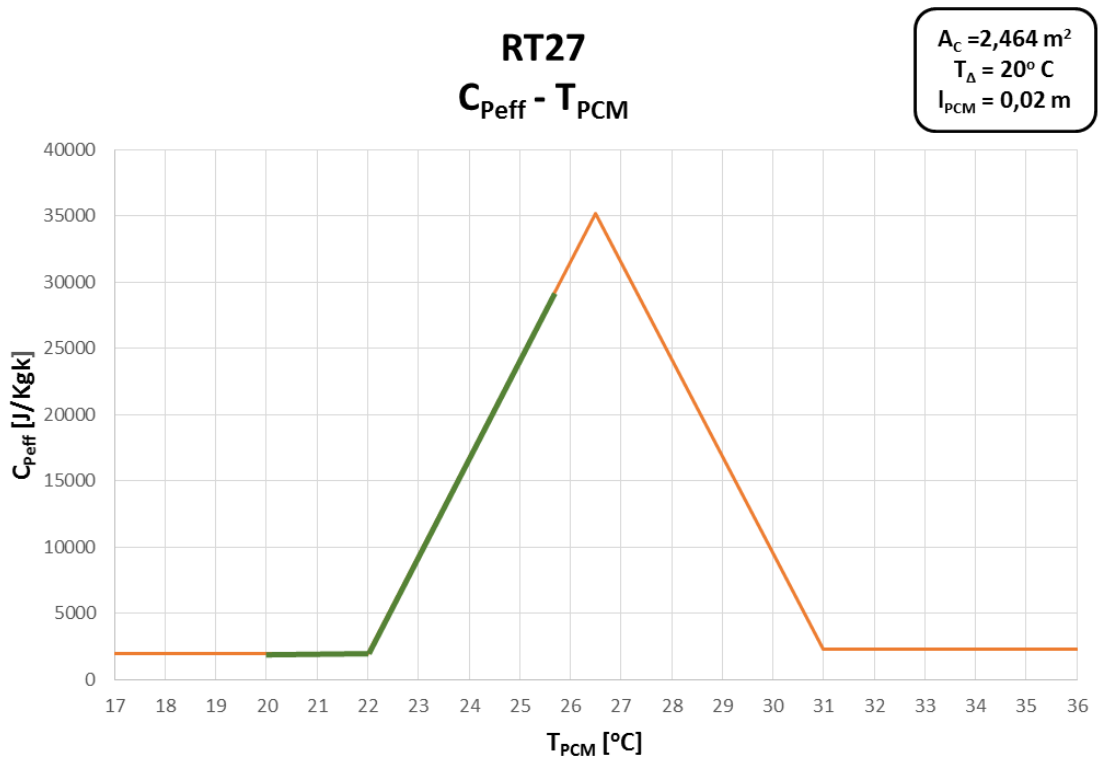
### 6.9.2 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ RT27

Παράμετροι 4 <sup>ης</sup> Δοκιμής με RT27	
Συλλεκτική Επιφάνεια [ $m^2$ ]	$A_c = 2,464$
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [ $^{\circ}C$ ]	$T_{\Delta} = 20$
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [ $^{\circ}C$ ]	$T_s = 22$
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [ $^{\circ}C$ ]	$T_l = 31$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [ $J/KgK$ ]	$C_{p_s} = 2000$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [ $J/KgK$ ]	$C_{p_l} = 2300$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [ $J/KgK$ ]	$H = 167400$
<b>Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [<math>m</math>]</b>	<b><math>l_{PCM} = 0,02</math></b>

Πίνακας 6.9.2/1 : Παράμετροι 4ης Δοκιμής RT27



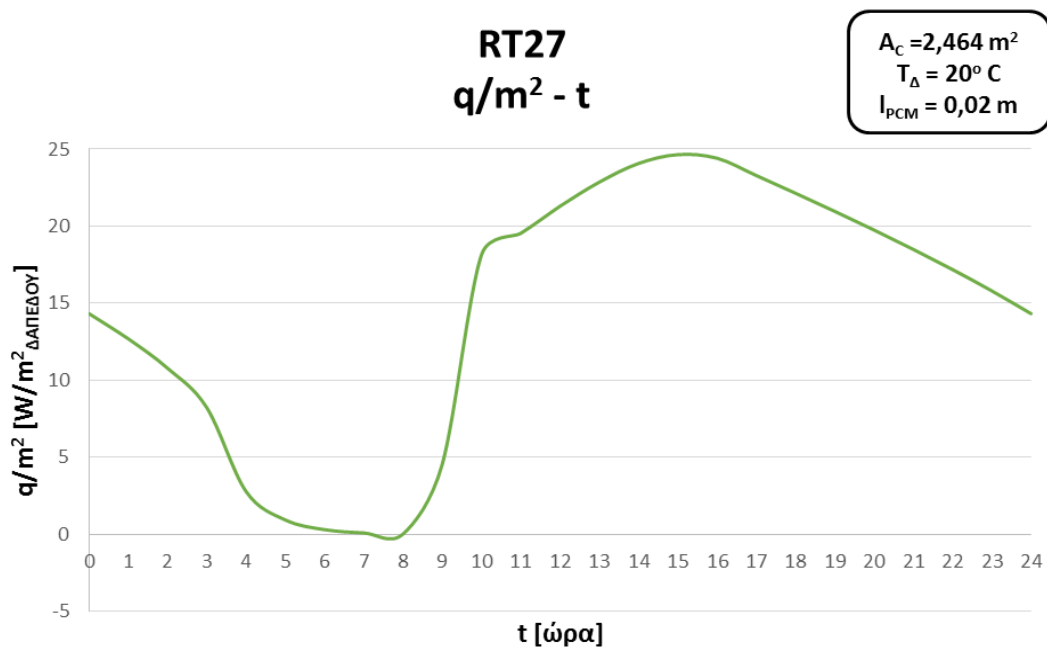
Σχήμα 6.9.2/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου



Σχήμα 6.9.2/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 4<sup>ης</sup> Δοκιμής RT27 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{57078,53}{167400} = 0,341$$



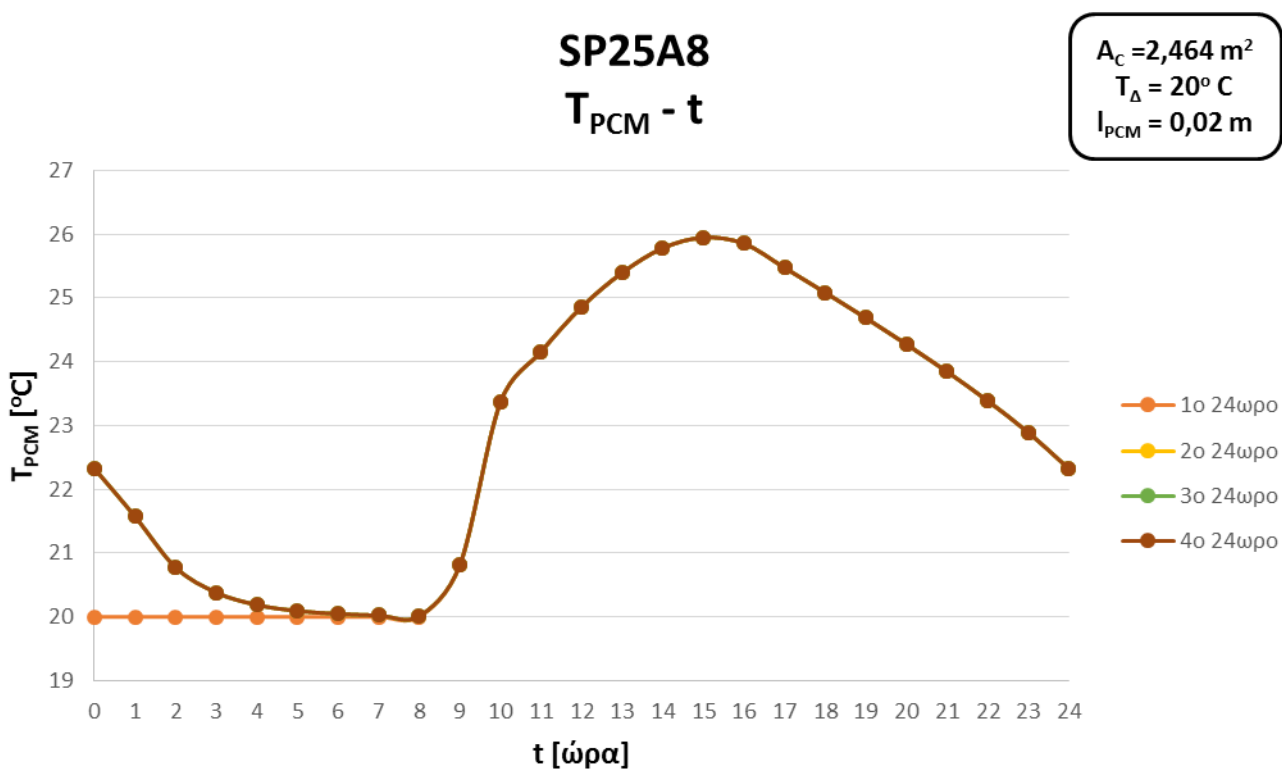
Σχήμα 6.9.2/3 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [ $\text{W}/\text{m}^2$  δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **14,47  $\text{W}/\text{m}^2$** .

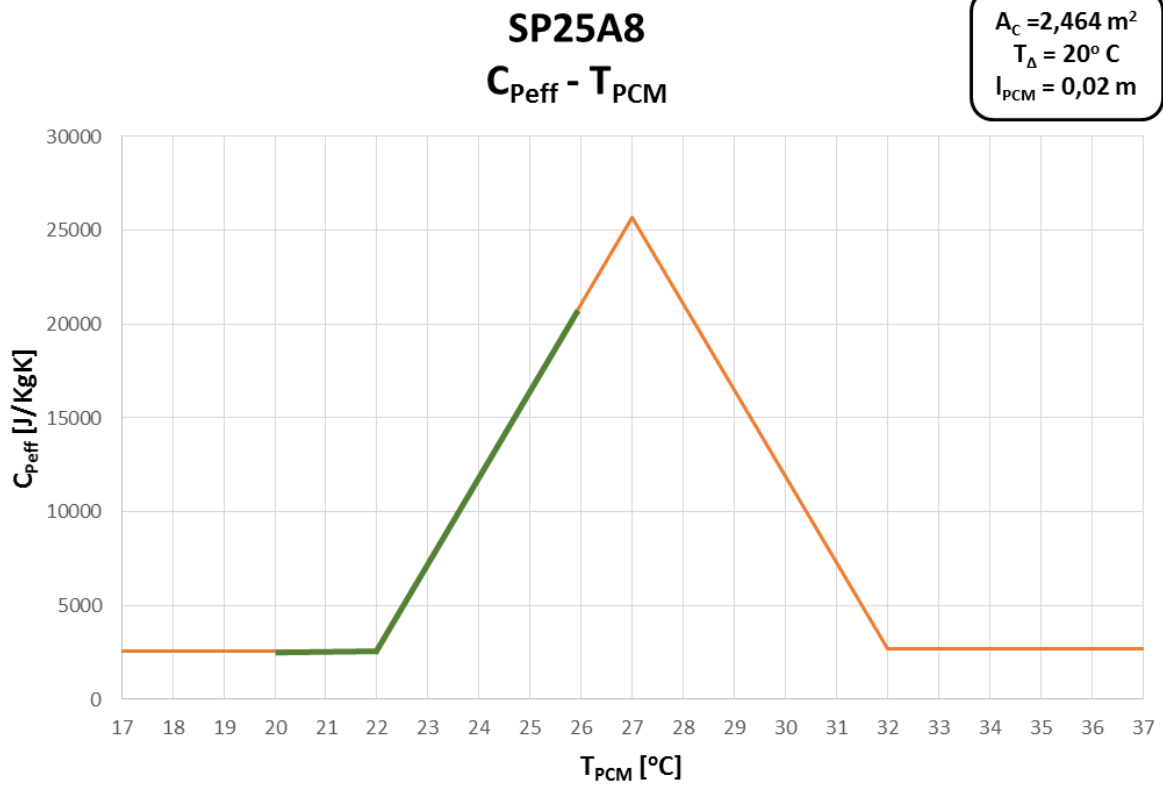
### 6.9.3 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ SP25A8

Παράμετροι 4 <sup>ης</sup> Δοκιμής με SP25A8	
Συλλεκτική Επιφάνεια [ $\text{m}^2$ ]	$A_c = 2,464$
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\Delta} = 20$
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_s = 22$
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_l = 32$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$C_{p_s} = 2600$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$C_{p_l} = 2700$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$H = 141500$
<b>Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [m]</b>	<b><math>l_{PCM} = 0,02</math></b>

Πίνακας 6.9.3/1 : Παράμετροι 4ης Δοκιμής SP25A8



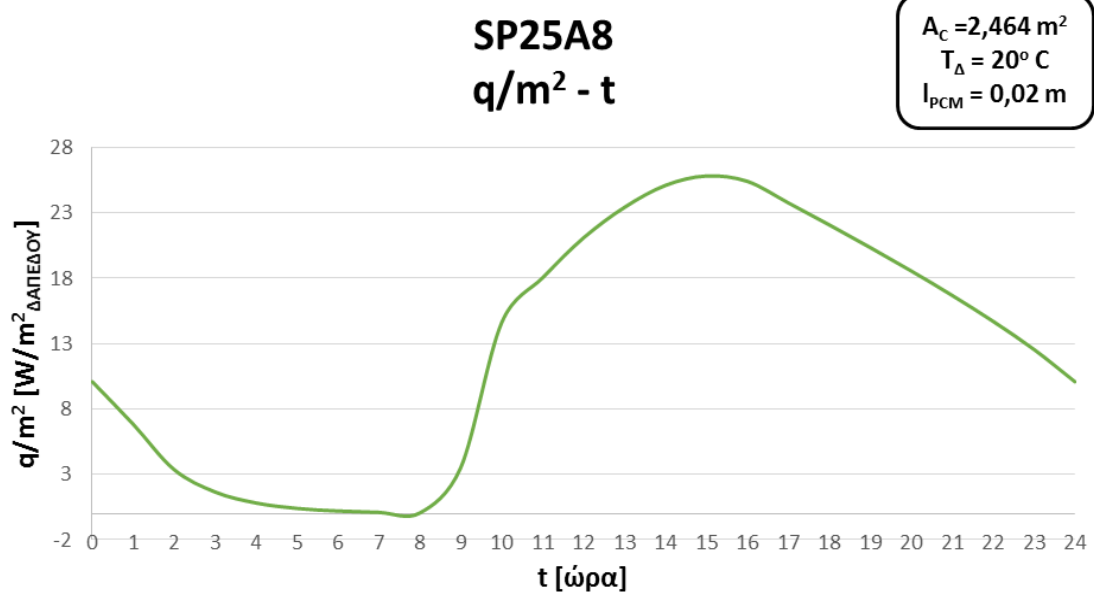
Σχήμα 6.9.3/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου



Σχήμα 6.9.3/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 4<sup>ης</sup> Δοκιμής SP25A8 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{46219,21}{141500} = 0,327$$



Σχήμα 6.9.3/3 : Καμπύλη Προσδιόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [ $W/m^2$  δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **12,78  $W/m^2$** .

#### 6.9.4 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

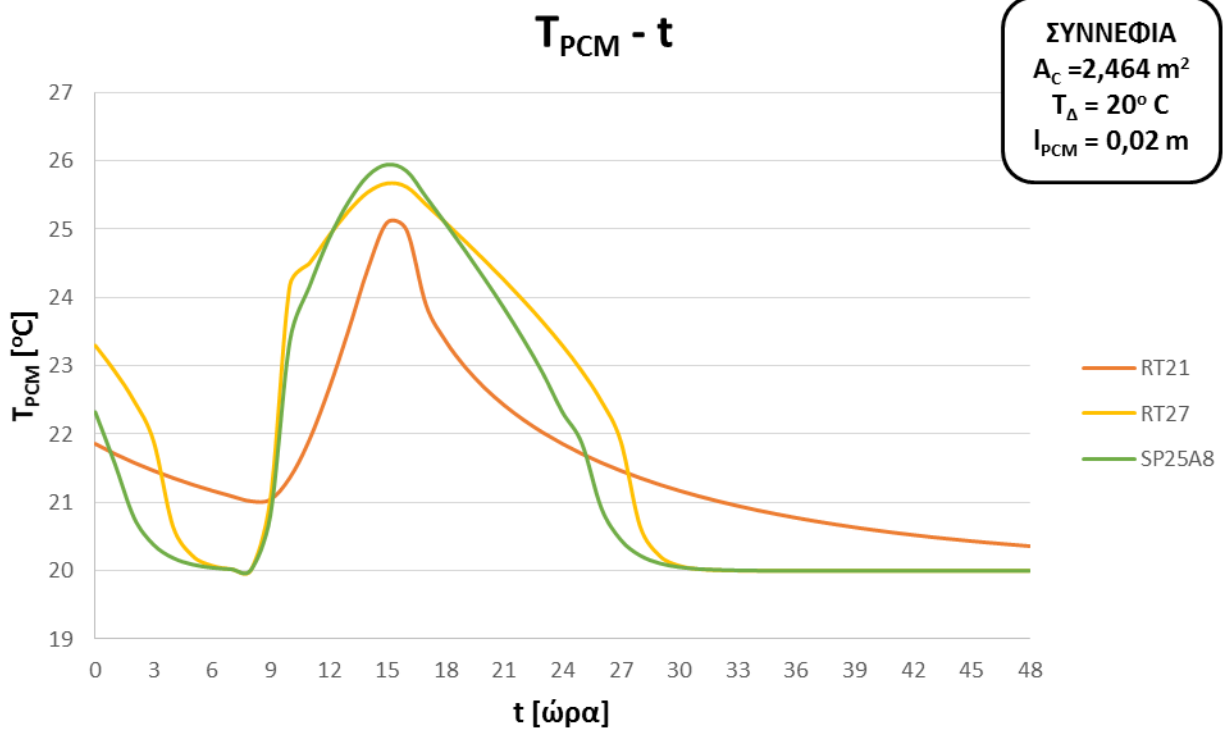
	<b>RT21</b>	<b>RT27</b>	<b>SP25A8</b>
<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>	21,2	20	20,01
<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	25,1	25,67	25,95
<b>η</b>	0,391	0,341	0,327
<b>q/m<sup>2</sup><sub>Δ</sub> [W/m<sup>2</sup>]</b>	10,24	14,47	12,78

Πίνακας 6.9.4/1 : Συνολικός Πίνακας Αποτελεσμάτων

Για το RT21 η αύξηση του πάχους PCM, προκαλεί πτώση των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών και πιο ομοιόμορφο θερμοκρασιακό προφίλ, το οποίο εξηγείται με το γεγονός ότι το ίδιο ποσό αποδιδόμενης ισχύος του συλλέκτη διαμοιράζεται σε μεγαλύτερη μάζα υλικού. Συνεπώς, συγκρίνοντας με την 1<sup>η</sup> δοκιμή, υπάρχει μείωση του θερμοκρασιακού εύρους του κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης, άρα μείωση του βαθμού εκμετάλλευσης. Επίσης, η αύξηση της ελάχιστης θερμοκρασίας σε τιμή μεγαλύτερη της θερμοκρασίας δωματίου, εξασφαλίζει την παροχή θερμότητας στο δωμάτιο, καθόλη την διάρκεια του 24ώρου, δικαιολογώντας την μικρή αύξηση της θερμοροής.

Η αύξηση του πάχους PCM προκαλεί παρόμοιες μεταβολές στα υλικά RT27 και SP25A8. Η μάζα του υλικού αυξάνεται, άρα η μέγιστη θερμοκρασία του υλικού και το θερμοκρασιακό εύρος του κύκλου μειώνονται, αποφέροντας αισθητή μείωση του βαθμού εκμετάλλευσης. Για το SP25A8 παρατηρείται μικρή μείωση της θερμοροής λόγω της πτώσης των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών, παράλληλα με την πλήρη αποφόρτιση του υλικού στο τέλος του 24ώρου. Αντίθετα, η πλειονότητα των θερμοκρασιών του RT27 παραμένουν σε τιμή μεγαλύτερη της θερμοκρασίας δωματίου, αφού και το υλικό δεν αποφορτίζεται πλήρως στο τέλος του 24ώρου. Σαν αποτέλεσμα, η παροχή θερμότητας στο δωμάτιο πραγματοποιείται κατά τις περισσότερες ώρες του 24ώρου, προκαλώντας μία ελάχιστη αύξηση της θερμοροής.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το θερμοκρασιακό προφίλ των τριών υλικών για διάρκεια 48 ωρών, στην περίπτωση εμφάνισης συννεφιάς την επόμενη ημέρα, δηλαδή χωρίς την πρόσδοση ισχύος από τον ηλιακό συλλέκτη το δεύτερο 24ωρο. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες δοκιμές, η αυξημένη μάζα του υλικού αλλαγής φάσης επιτρέπει την απόδοση λανθάνουσας θερμότητας για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, μειώνοντας το ρυθμό μείωσης της θερμοκρασίας του υλικού. Αυτό ισχύει κυρίως για το υλικό RT21, για το οποίο η συλλεκτική επιφάνεια είναι πιο επαρκής, συγκριτικά με τα υπόλοιπα υλικά, γεγονός που διαφαίνεται και στον μεγαλύτερο, εκ των τριών, βαθμό εκμετάλλευσης του υλικού.



Σχήμα 6.9.4/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ υλικών στην περίπτωση συννεφιάς

## 6.10 5<sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΑΥΞΗΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ PCM $l_{PCM} = 0,04 \text{ m}$

### 6.10.1 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ RT21

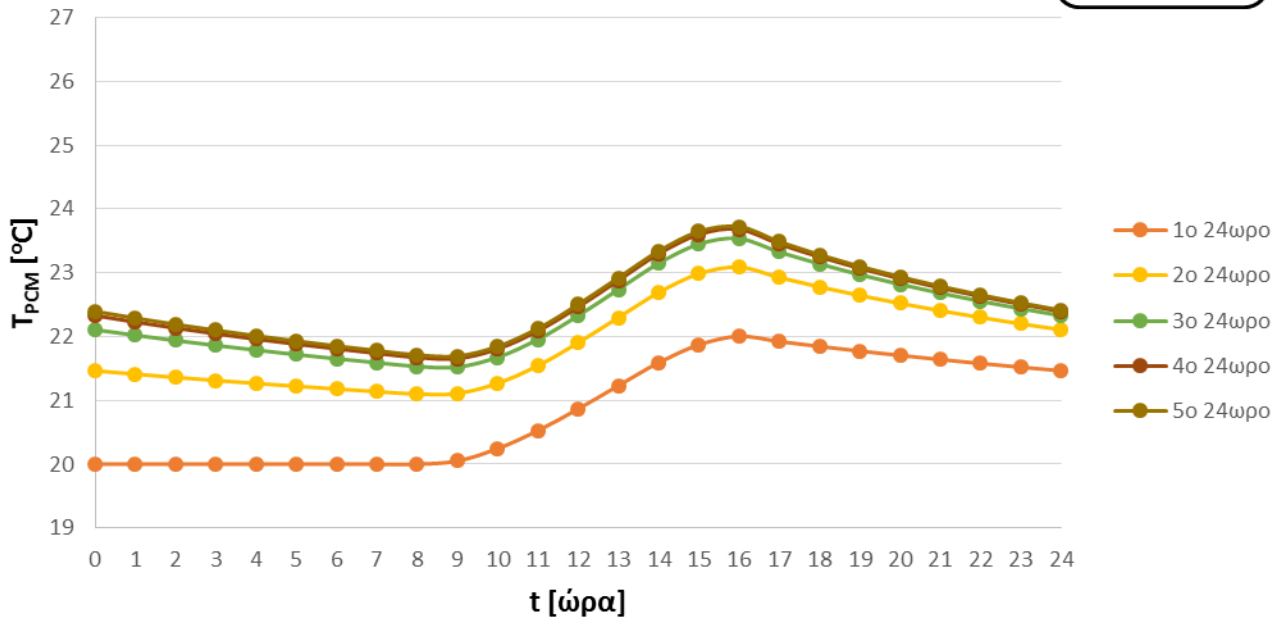
<b>Παράμετροι 5<sup>ης</sup> Δοκιμής με RT21</b>	
Συλλεκτική Επιφάνεια [m <sup>2</sup> ]	<b>A<sub>c</sub> = 2,464</b>
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [°C]	<b>T<sub>Δ</sub> = 20</b>
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [°C]	<b>T<sub>s</sub> = 15</b>
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [°C]	<b>T<sub>l</sub> = 26</b>
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [J/KgK]	<b>C<sub>p s</sub> = 1900</b>
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [J/KgK]	<b>C<sub>p l</sub> = 2500</b>
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [J/KgK]	<b>H = 132100</b>
<b>Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [m]</b>	<b><b>l<sub>PCM</sub> = 0,04</b></b>

Πίνακας 6.10.1/1 : Παράμετροι 5ης Δοκιμής RT21

## RT21

### $T_{PCM} - t$

$A_C = 2,464 \text{ m}^2$   
 $T_{\Delta} = 20^\circ \text{ C}$   
 $l_{PCM} = 0,04 \text{ m}$

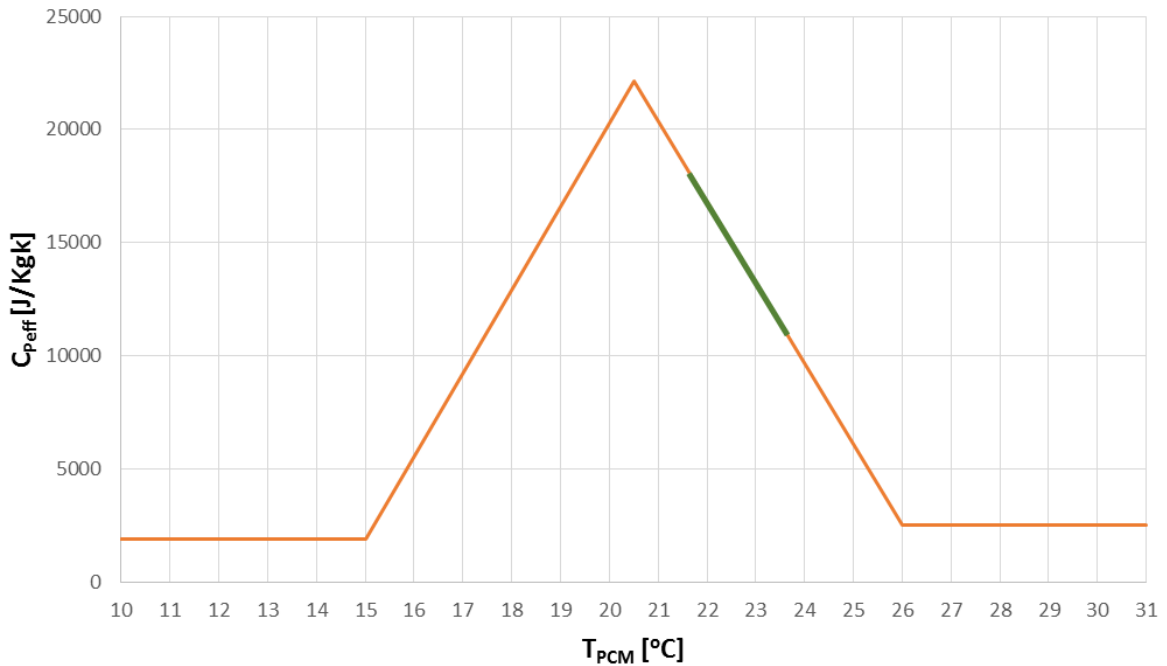


Σχήμα 6.10.1/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου

## RT21

### $C_{Peff} - T_{PCM}$

$A_C = 2,464 \text{ m}^2$   
 $T_{\Delta} = 20^\circ \text{ C}$   
 $l_{PCM} = 0,04 \text{ m}$

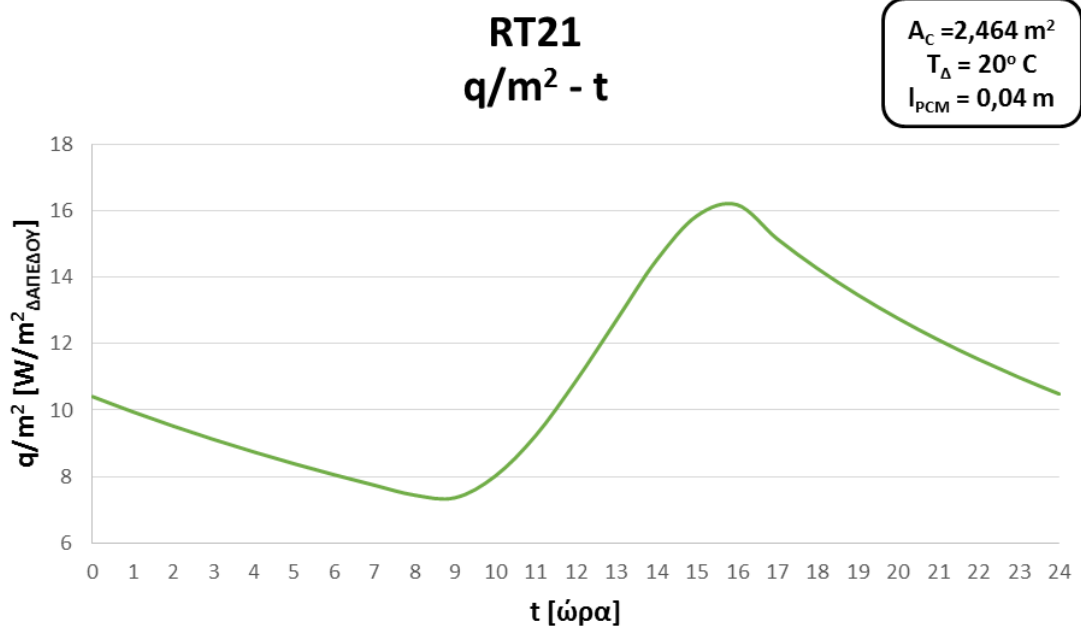


Σχήμα 6.10.1/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού



Βαθμός Εκμετάλλευσης 5<sup>ης</sup> Δοκιμής RT21 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{28174,58}{132100} = 0,213$$



Σχήμα 6.10.1/3 : Καμπύλη Προσδιόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [W/m<sup>2</sup> δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **10,99 W/m<sup>2</sup>**.

### 6.10.2 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ RT27

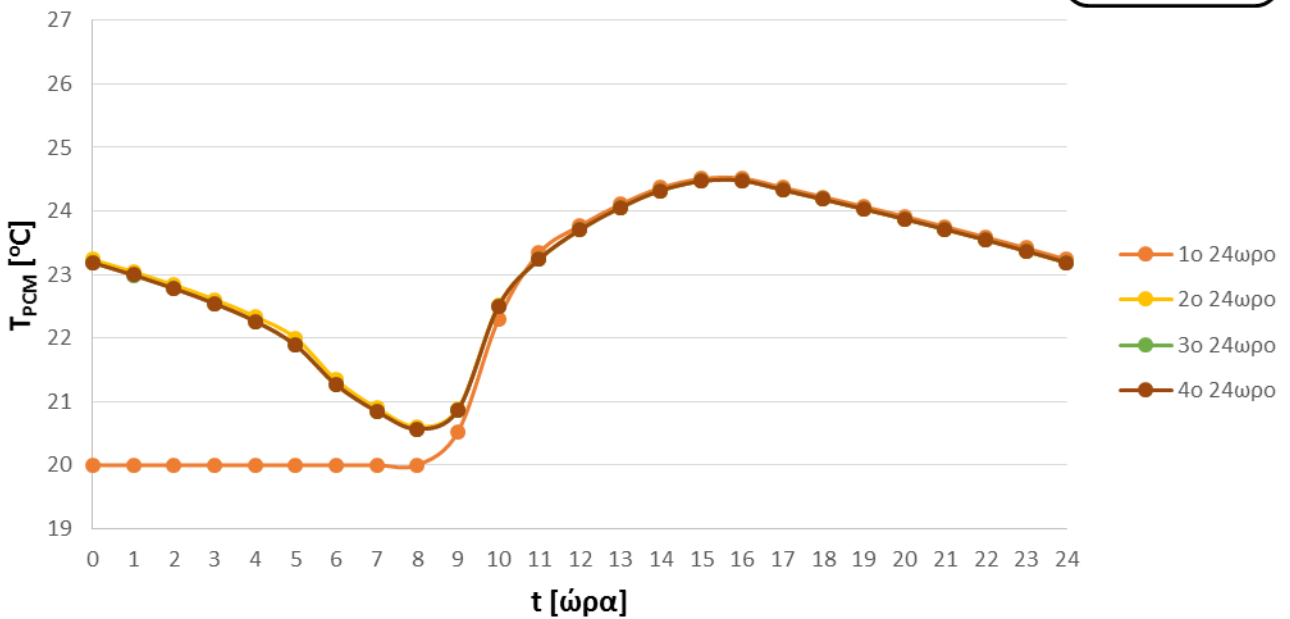
<b>Παράμετροι 5<sup>ης</sup> Δοκιμής με RT27</b>	
Συλλεκτική Επιφάνεια [m <sup>2</sup> ]	<b>A<sub>c</sub> = 2,464</b>
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [°C]	<b>T<sub>Δ</sub> = 20</b>
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [°C]	<b>T<sub>s</sub> = 22</b>
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [°C]	<b>T<sub>l</sub> = 31</b>
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [J/KgK]	<b>C<sub>p s</sub> = 2000</b>
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [J/KgK]	<b>C<sub>p l</sub> = 2300</b>
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [J/KgK]	<b>H = 167400</b>
<b>Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [m]</b>	<b>I<sub>PCM</sub> = 0,04</b>

Σχήμα 6.10.2/2 : Παράμετροι 5ης Δοκιμής RT27

## RT27

### $T_{PCM} - t$

$A_c = 2,464 \text{ m}^2$   
 $T_{\Delta} = 20^{\circ} \text{ C}$   
 $l_{PCM} = 0,04 \text{ m}$

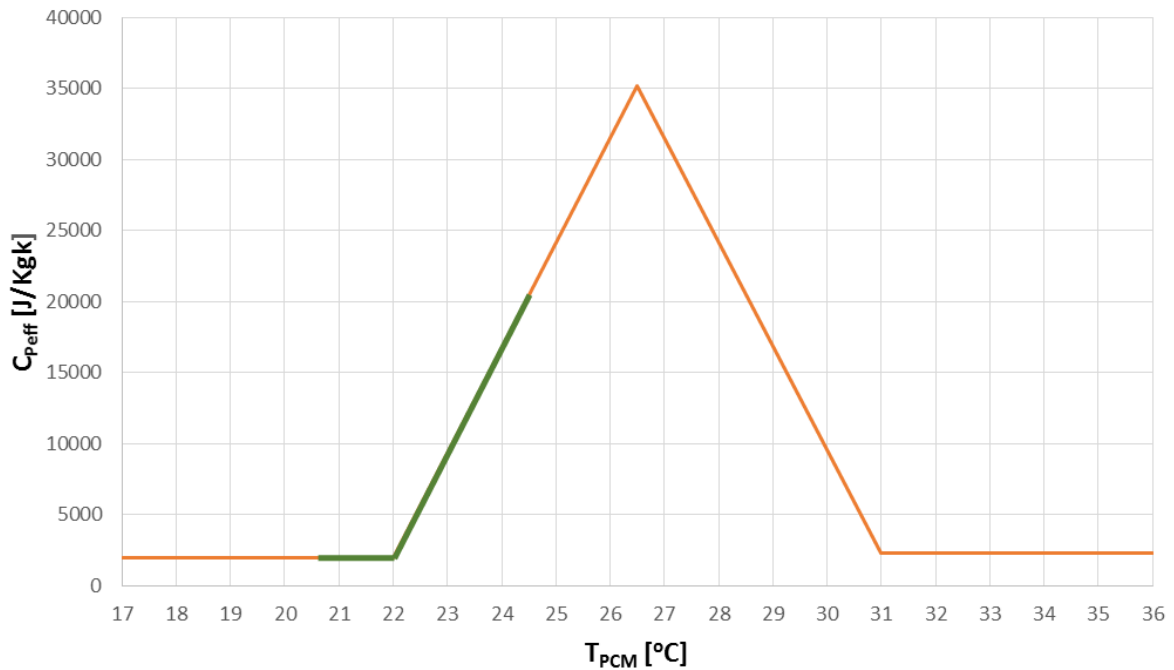


Σχήμα 6.10.2/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου

## RT27

### $C_{Peff} - T_{PCM}$

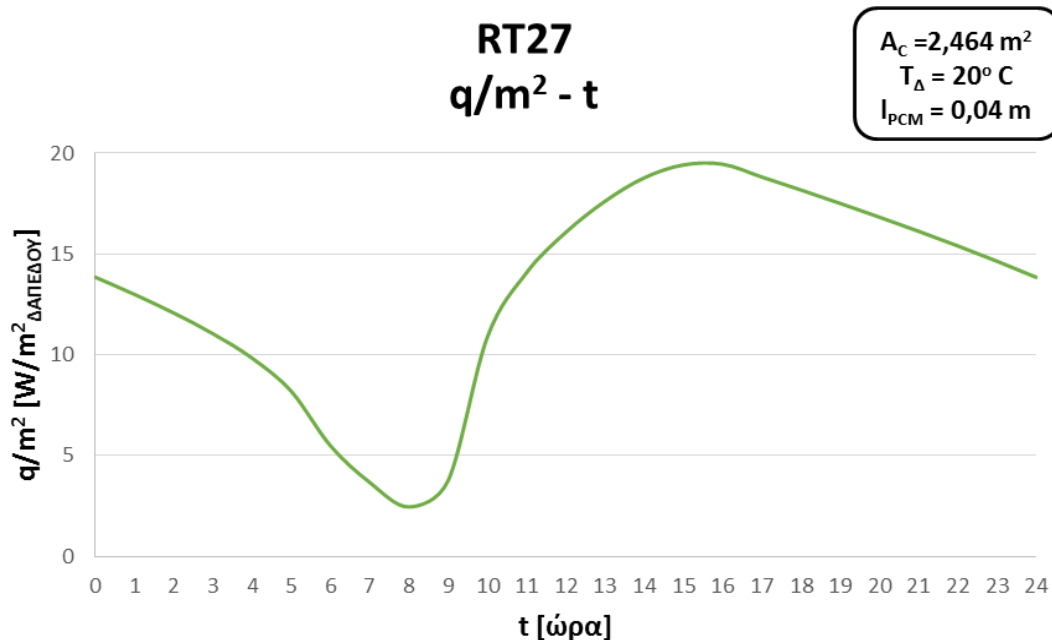
$A_c = 2,464 \text{ m}^2$   
 $T_{\Delta} = 20^{\circ} \text{ C}$   
 $l_{PCM} = 0,04 \text{ m}$



Σχήμα 6.10.2/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 5<sup>ης</sup> Δοκιμής RT27 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{27609,88}{167400} = 0,165$$



Σχήμα 6.10.2/3 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [W/m<sup>2</sup> δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **13,24 W/m<sup>2</sup>**.

### 6.10.3 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ SP25A8

<b>Παράμετροι 5<sup>ης</sup> Δοκιμής με SP25A8</b>	
Συλλεκτική Επιφάνεια [m <sup>2</sup> ]	<b>A<sub>c</sub> = 2,464</b>
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [°C]	<b>T<sub>Δ</sub> = 20</b>
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [°C]	<b>T<sub>s</sub> = 22</b>
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [°C]	<b>T<sub>l</sub> = 32</b>
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [J/KgK]	<b>C<sub>p s</sub> = 2600</b>
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [J/KgK]	<b>C<sub>p l</sub> = 2700</b>
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [J/KgK]	<b>H = 141500</b>
<b>Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [m]</b>	<b>I<sub>PCM</sub> = 0,04</b>

Πίνακας 6.10.3/1 : Παράμετροι 5ης Δοκιμής SP25A8

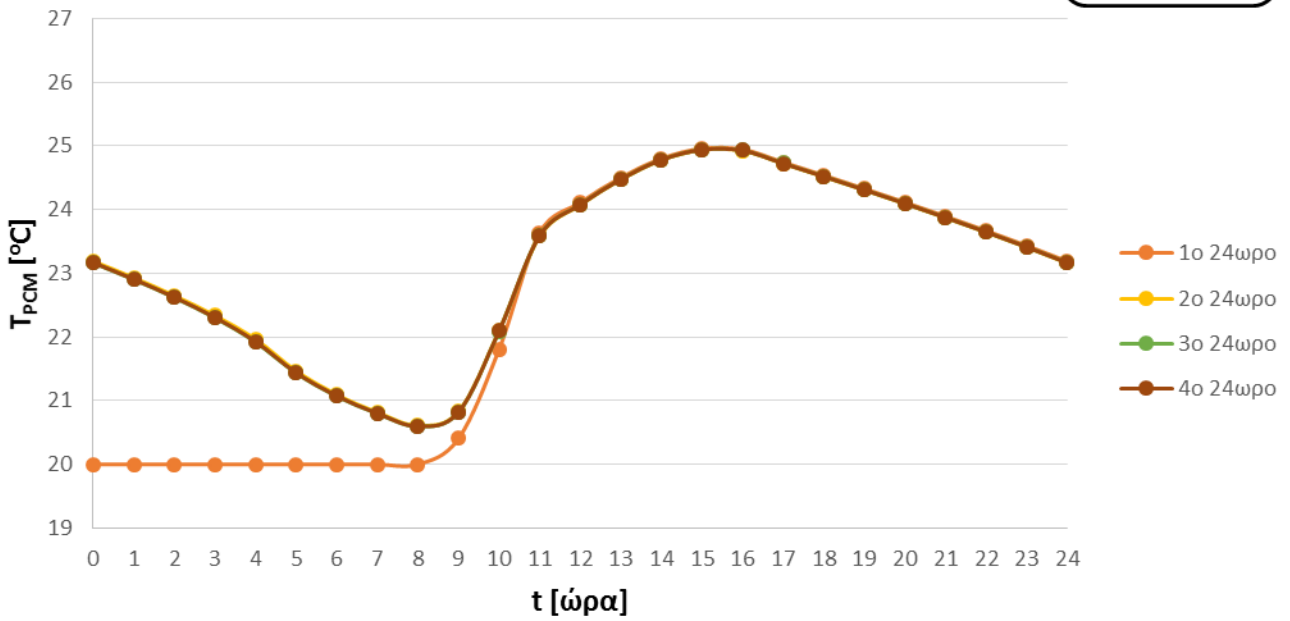
SP25A8

$T_{PCM} - t$

$A_C = 2,464 \text{ m}^2$

$T_\Delta = 20^\circ \text{ C}$

$l_{PCM} = 0,04 \text{ m}$



Σχήμα 6.10.3/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου

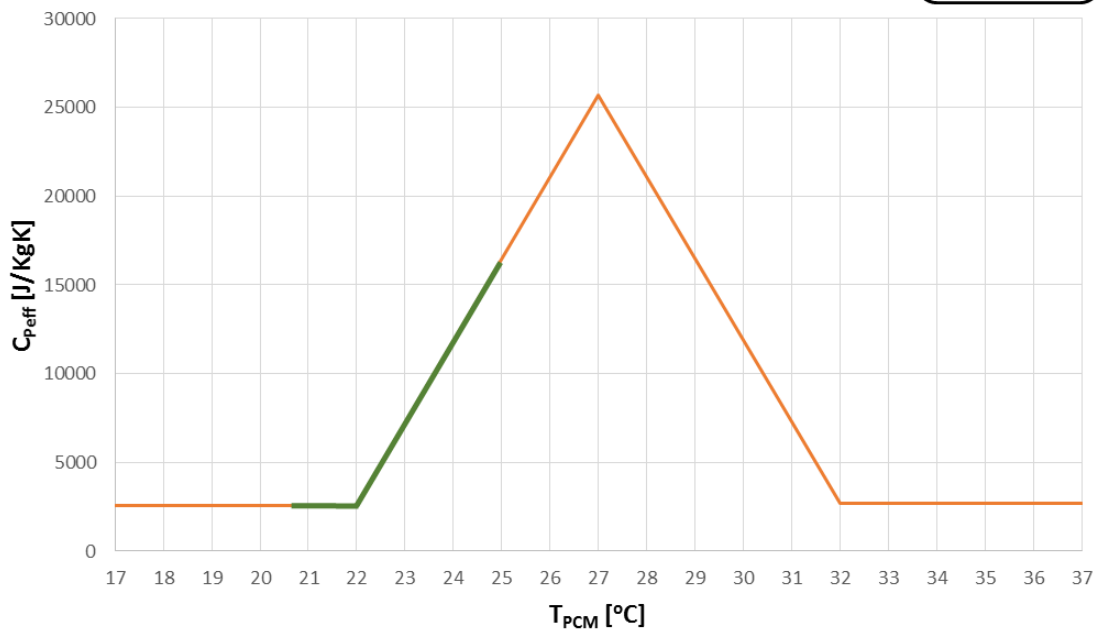
SP25A8

$C_{Peff} - T_{PCM}$

$A_C = 2,464 \text{ m}^2$

$T_\Delta = 20^\circ \text{ C}$

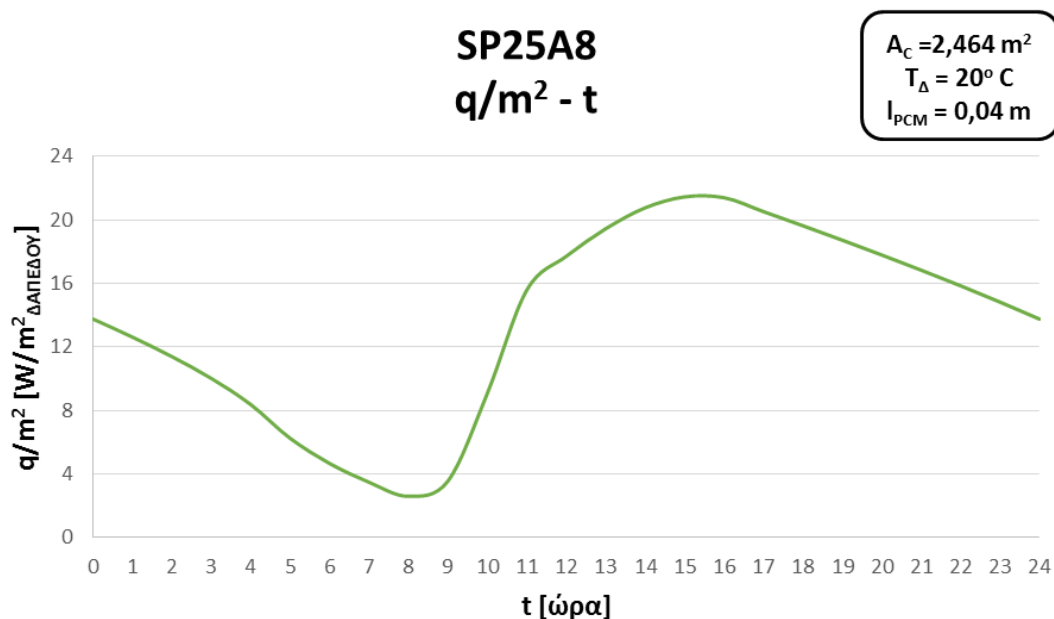
$l_{PCM} = 0,04 \text{ m}$



Σχήμα 6.10.3/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 5<sup>ης</sup> Δοκιμής SP25A8 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{27573,03}{141500} = 0,195$$



Σχήμα 6.10.3/3 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [W/m<sup>2</sup> δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **13,6 W/m<sup>2</sup>**.

#### 6.10.4 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

	RT21	RT27	SP25A8
T <sub>min</sub> [°C]	21,69	20,57	20,6
T <sub>max</sub> [°C]	23,73	24,48	24,94
η	0,213	0,165	0,195
q/m <sup>2</sup> <sub>Δ</sub> . [W/m <sup>2</sup> ]	10,99	13,24	13,6

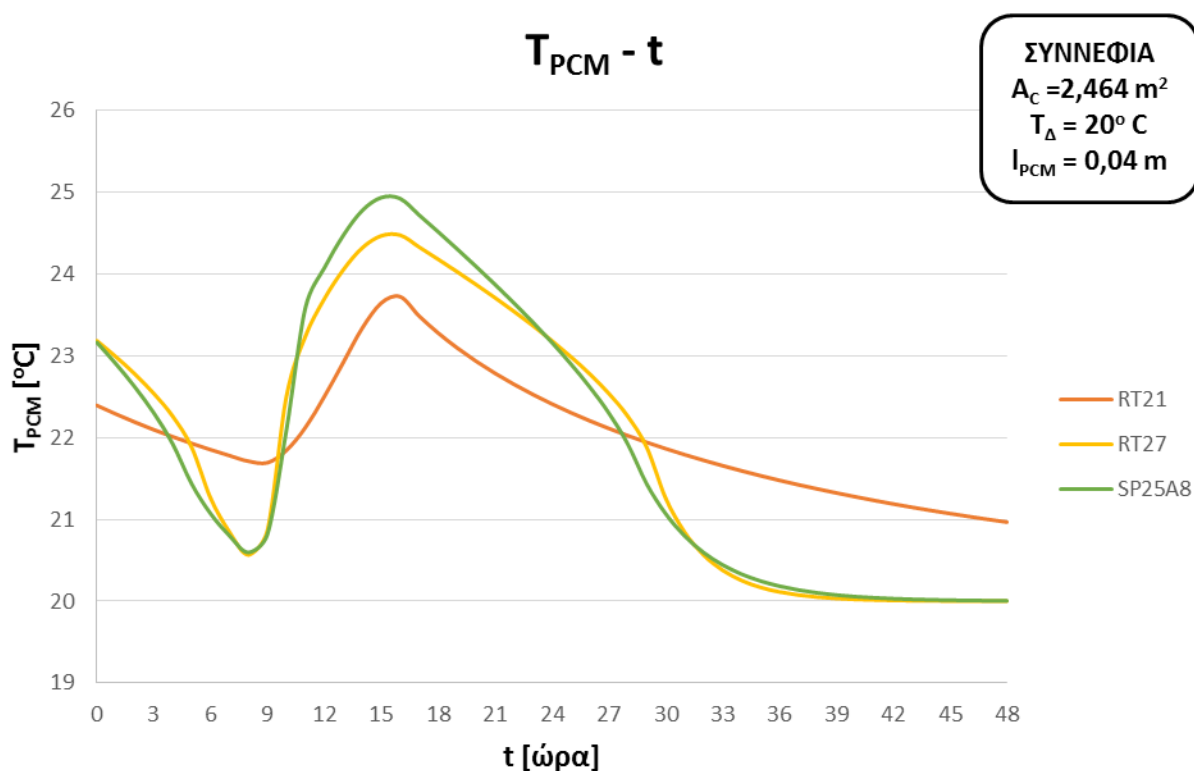
Πίνακας 6.10.4/1 : Συνολικός Πίνακας Αποτελεσμάτων

Ήδη από την προηγούμενη δοκιμή , με την αύξηση του πάχους σε l<sub>PCM</sub>=0,02m, φαίνεται ότι το σύστημα με υλικό RT21 υπολειτουργεί, αναπτύσσοντας χαμηλές θερμοκρασίες. Συνεπώς, η περαιτέρω αύξηση του πάχους σε l<sub>PCM</sub>=0,04m, επιδεινώνει το φαινόμενο, δικαιολογώντας και την καθυστέρηση σύγκλισης των αποτελεσμάτων (σύγκλιση στο 4<sup>ο</sup> 24ωρο) , εφόσον η μάζα του PCM είναι πολύ μεγάλη για την συγκεκριμένη συλλεκτική επιφάνεια. Όπως είναι φυσικό, το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του υλικού μειώθηκε, παράλληλα με τον βαθμό

εκμετάλλευσης. Η διατήρηση της ελάχιστης θερμοκρασίας σε τιμή μεγαλύτερη της θερμοκρασίας δωματίου, εξασφαλίζει την παροχή θερμότητας στο δωμάτιο, καθόλη την διάρκεια του 24ώρου, δικαιολογώντας την μικρή αύξηση της θερμοροής.

Όλα τα παραπάνω ισχύουν και για τα υλικά RT27 και SP25A8. Το μόνο αποτέλεσμα που αξίζει να σχολιασθεί είναι η μικρή μείωση της αποδιδόμενης θερμότητας του υλικού RT27, συγκριτικά με την προηγούμενη δοκιμή, που οφείλεται απλά στην μείωση της πλειοψηφίας των θερμοκρασιών, συμπεριλαμβανομένης και της μέγιστης, αποδίδοντας έτσι λιγότερη θερμότητα.

Όπως επεξηγήθηκε και στην προηγούμενη δοκιμή, παρακάτω δίνεται το θερμοκρασιακό προφίλ των υλικών στην περίπτωση συννεφιάς, με το υλικό RT21 να παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά, αποδίδοντας θερμότητα κατά την διάρκεια της συννεφιασμένης μέρας. Τα υλικά RT27 και SP25A8 αποφορτίζονται τις πρώτες ώρες του δεύτερου 24ώρου, καταλήγοντας στην θερμοκρασία δωματίου.



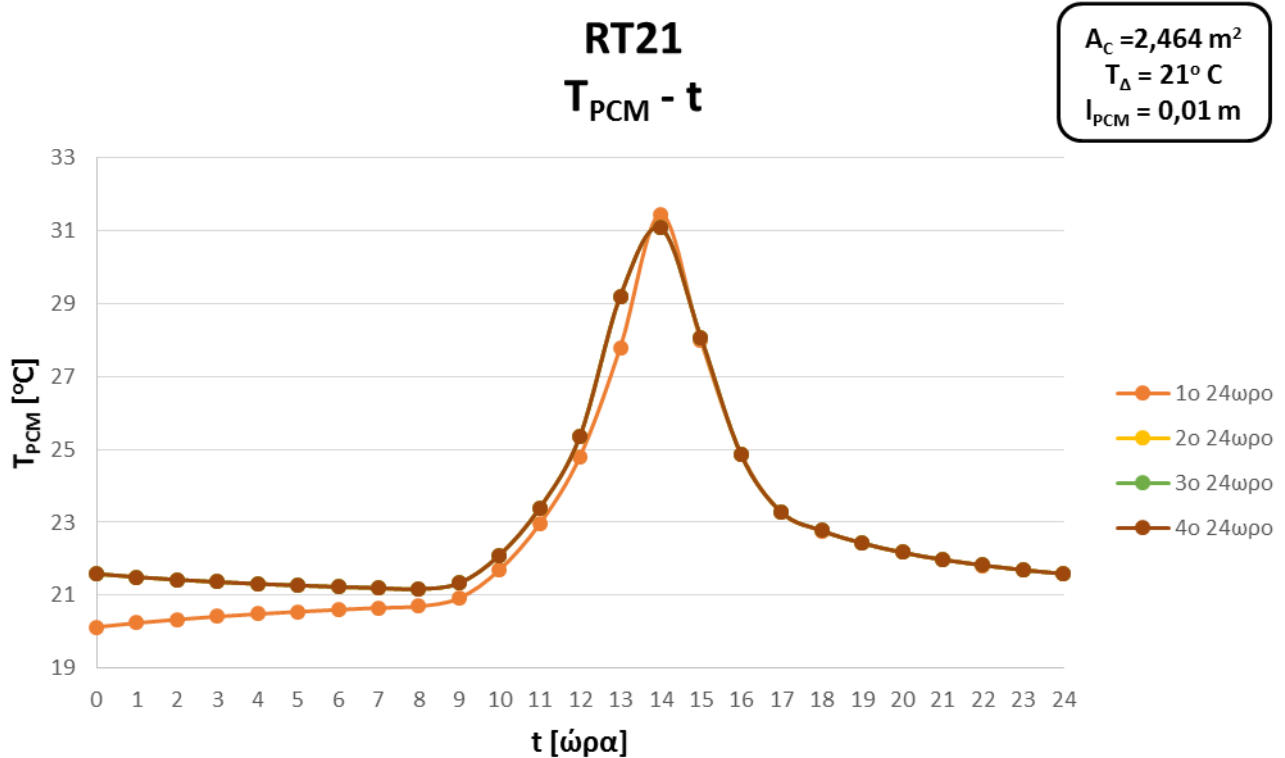
Σχήμα 6.9.4/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ υλικών στην περίπτωση συννεφιάς

## 6.11 6<sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΑΥΞΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ $T_{\Delta} = 21^{\circ}\text{C}$

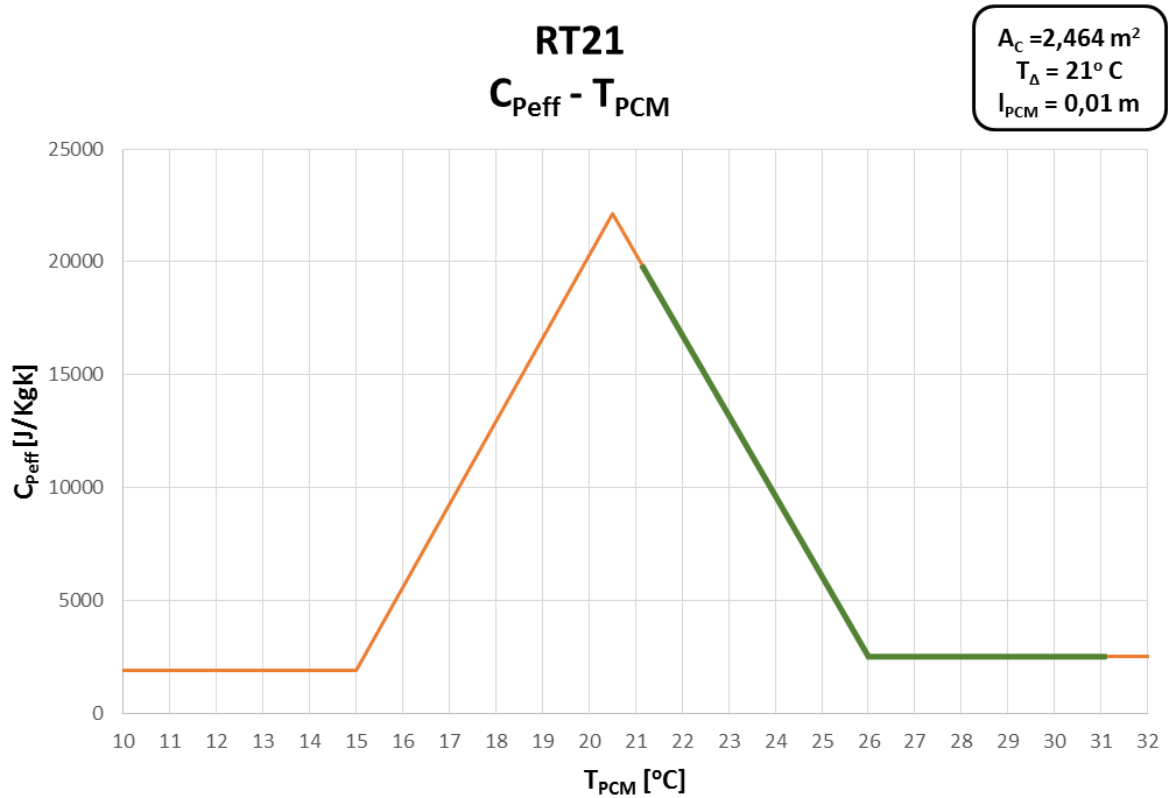
### 6.11.1 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ RT21

Παράμετροι 6 <sup>ης</sup> Δοκιμής με RT21	
Συλλεκτική Επιφάνεια [ $\text{m}^2$ ]	$A_c = 2,464$
<b>Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [<math>^{\circ}\text{C}</math>]</b>	<b><math>T_{\Delta} = 21</math></b>
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_s = 15$
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_l = 26$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]	$C_{p_s} = 1900$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]	$C_{p_l} = 2500$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]	$H = 132100$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [ $\text{m}$ ]	$l_{PCM} = 0,01$

Πίνακας 6.11.1/1 : Παράμετροι 6ης Δοκιμής RT21



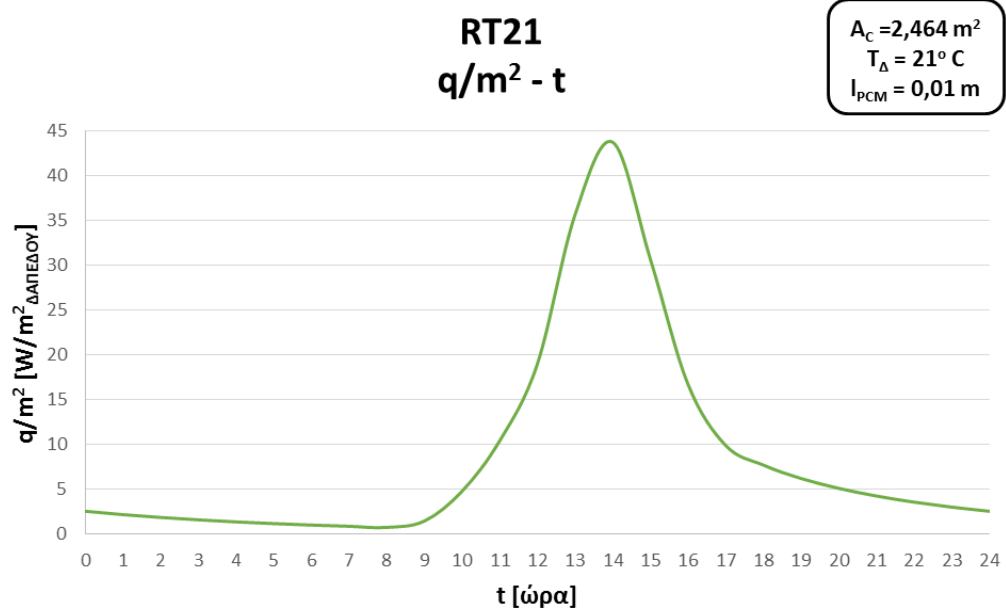
Σχήμα 6.11.1/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου



Σχήμα 6.11.1/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 6<sup>ης</sup> Δοκιμής RT21 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{50922,62}{132100} = 0,385$$



Σχήμα 6.11.1/3 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

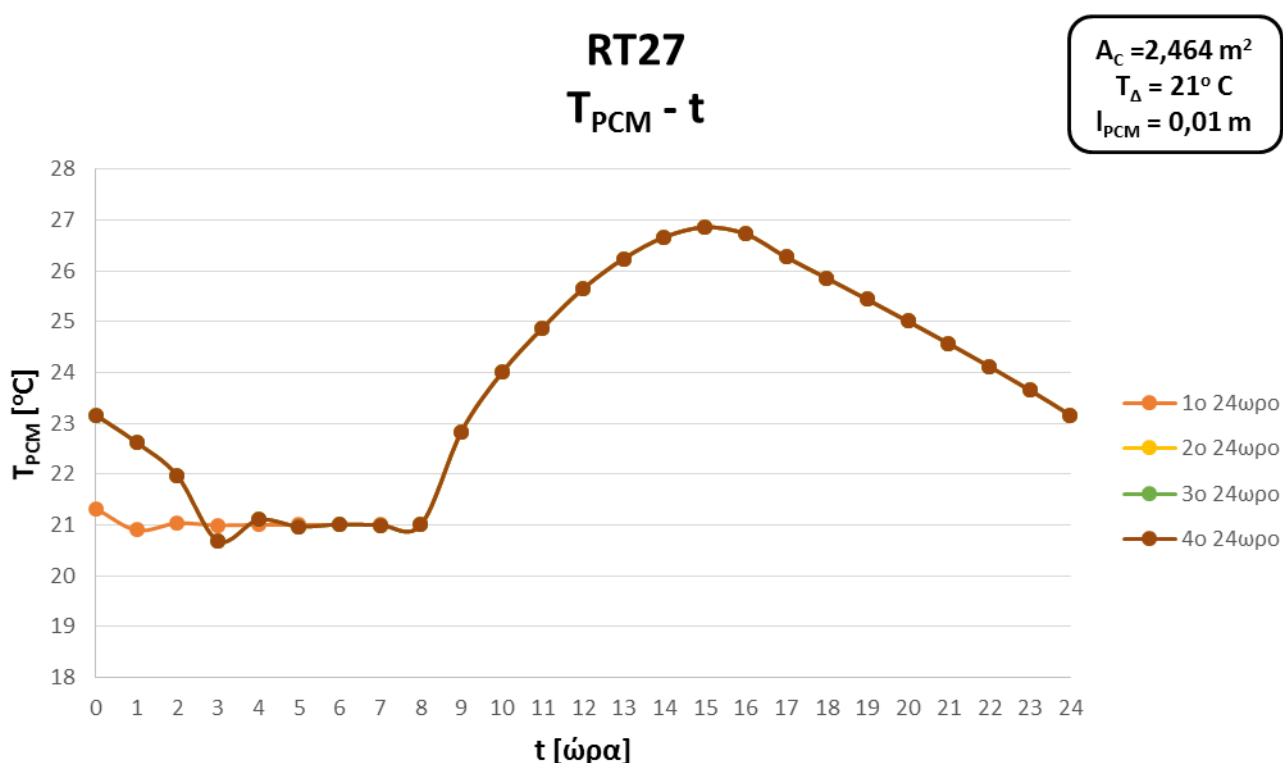


Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [ $\text{W}/\text{m}^2$  δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **8,73  $\text{W}/\text{m}^2$** .

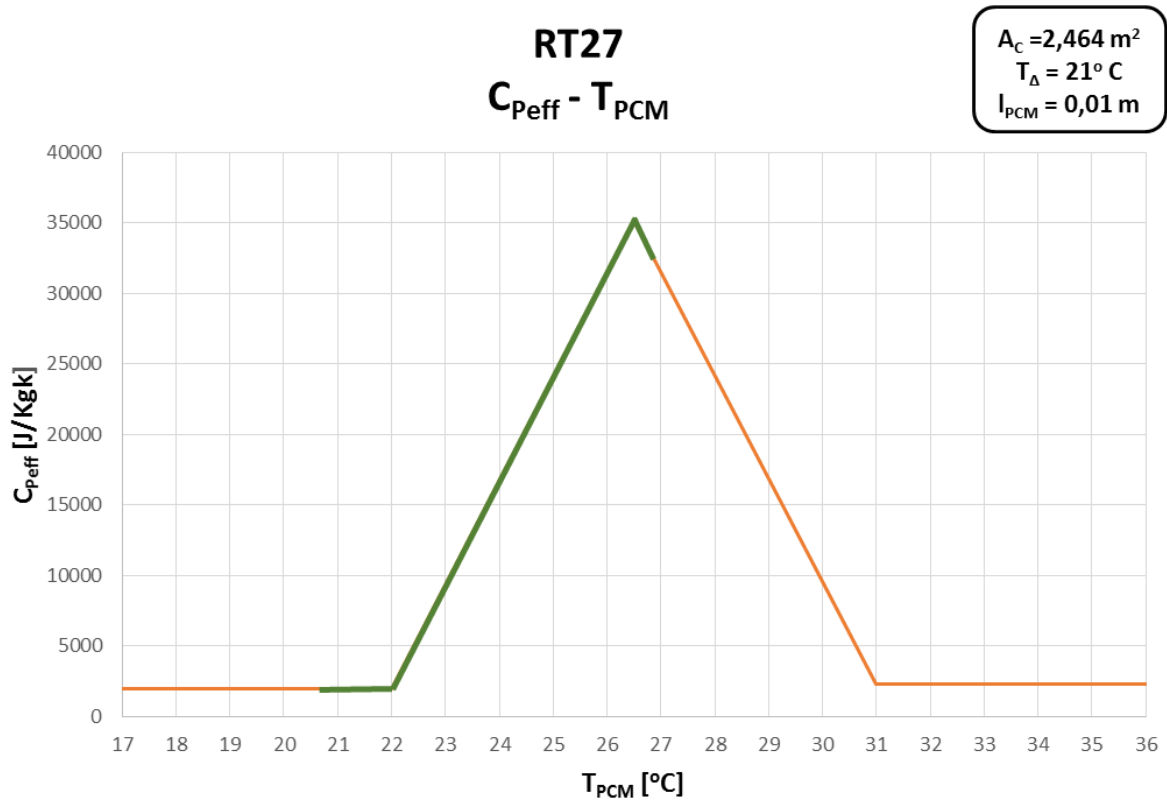
### 6.11.2 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ RT27

Παράμετροι 6 <sup>ης</sup> Δοκιμής με RT27	
Συλλεκτική Επιφάνεια [ $\text{m}^2$ ]	$A_C=2,464$
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\Delta}=21$
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_s=22$
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_l=31$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$C_{P_s}=2000$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$C_{P_l}=2300$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$H=167400$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [ $\text{m}$ ]	$l_{PCM}=0,01$

Πίνακας 6.11.2/1 : Παράμετροι 6ης Δοκιμής RT27



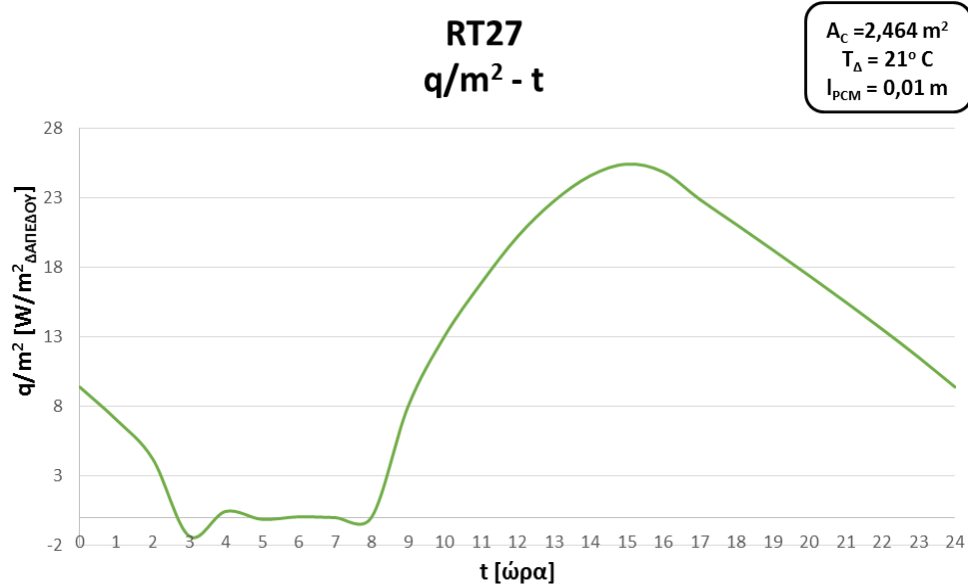
Σχήμα 6.11.2/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου



Σχήμα 6.11.2/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 6<sup>ης</sup> Δοκιμής RT27 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{96318,86}{167400} = 0,575$$



Σχήμα 6.11.2/3 : Καμπύλη Προσδιδόμενη Θερμότητας του υλικού

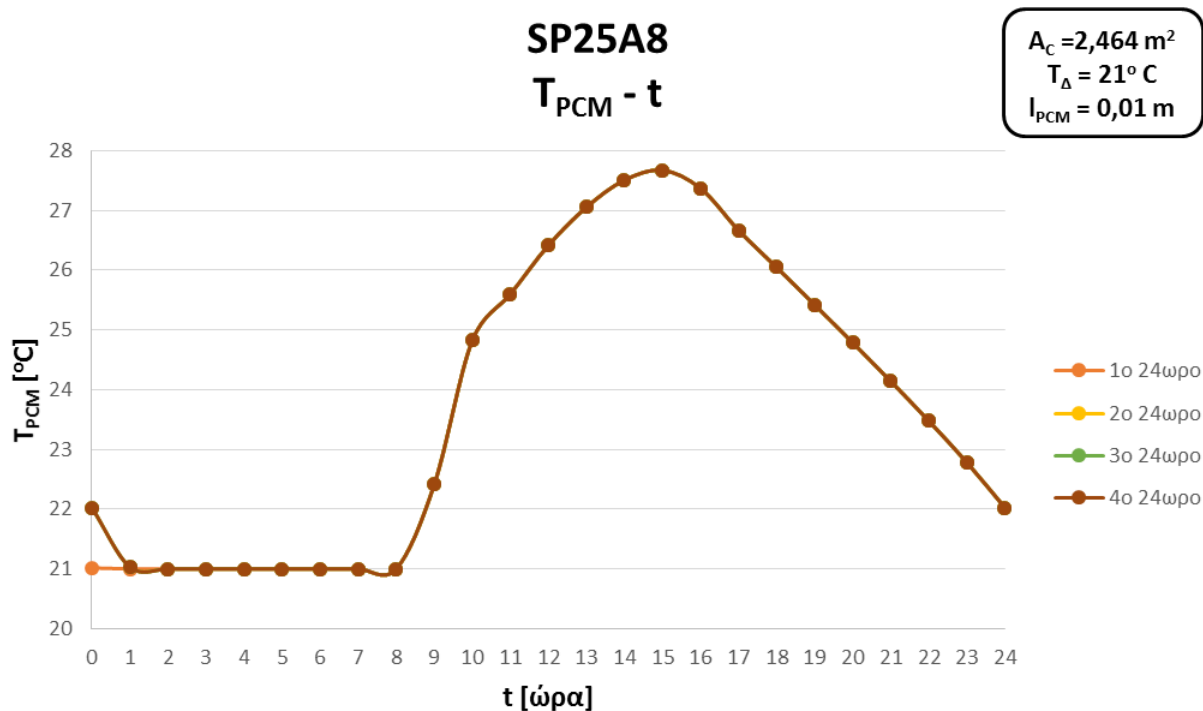
Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες δοκιμές, η μικρή ανωμαλία της καμπύλης, στα σχήματα 6.11.2/1 και 6.11.2/3, στις 3:00 οφείλεται καθαρά στην υπολογιστική διαδικασία, αφού πραγματοποιείται απότομη αλλαγή των δεδομένων λόγω εξόδου από τον θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του υλικού και συνοδεύεται από αμελητέα απορρόφηση θερμότητας από το δωμάτιο.

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [ $W/m^2$  δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **12,24  $W/m^2$** .

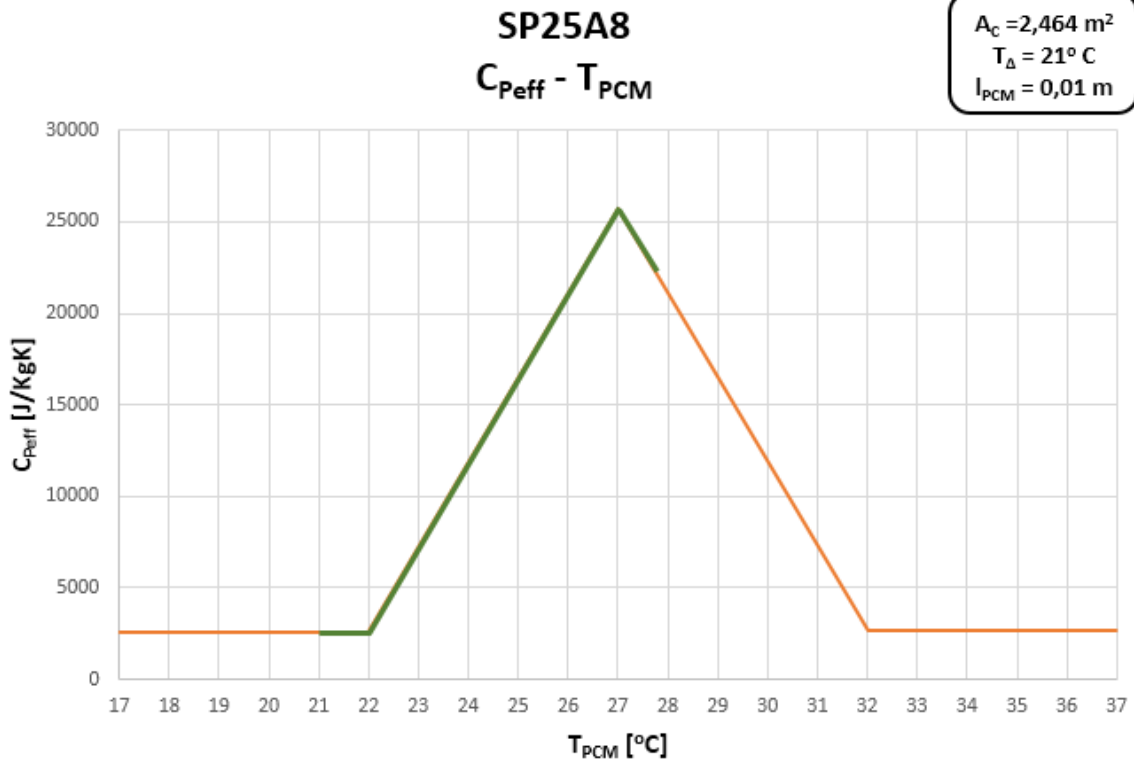
### 6.11.3 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ SP25A8

Παράμετροι 6 <sup>ης</sup> Δοκιμής με SP25A8	
Συλλεκτική Επιφάνεια [ $m^2$ ]	$A_C = 2,464$
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [ $^{\circ}C$ ]	$T_{\Delta} = 21$
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [ $^{\circ}C$ ]	$T_s = 22$
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [ $^{\circ}C$ ]	$T_l = 32$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [ $J/KgK$ ]	$C_{P_s} = 2600$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [ $J/KgK$ ]	$C_{P_l} = 2700$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [ $J/KgK$ ]	$H = 141500$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [ $m$ ]	$l_{PCM} = 0,01$

Πίνακας 6.11.3/1 : Παράμετροι 6ης Δοκιμής SP25A8



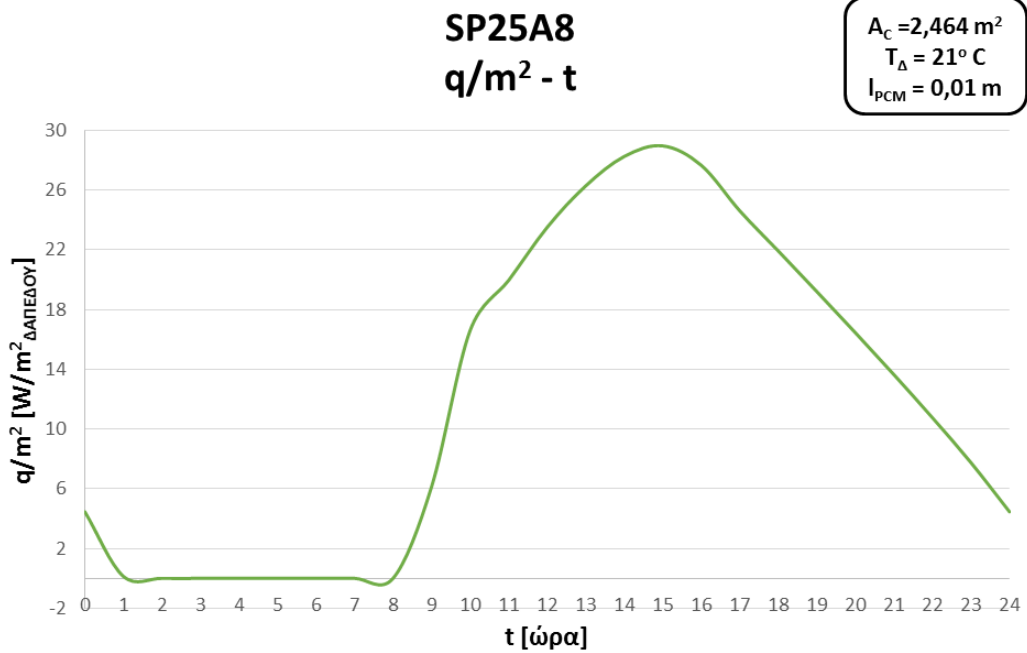
Σχήμα 6.11.3/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου



Σχήμα 6.11.3/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 6<sup>ης</sup> Δοκιμής SP25A8 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{87072,99}{141500} = 0,615$$



Σχήμα 6.11.3/3 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [ $W/m^2$  δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **12,03  $W/m^2$** .

#### 6.11.4 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

	<b>RT21</b>	<b>RT27</b>	<b>SP25A8</b>
<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>	21,17	20,69	21
<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	31,08	26,86	27,67
<b>η</b>	0,385	0,575	0,615
<b>q/m<sup>2</sup><sub>Δ</sub> [W/m<sup>2</sup>]</b>	8,73	12,24	12,03

Πίνακας 6.11.4/1 : Συνολικός Πίνακας Αποτελεσμάτων

Με την αύξηση της θερμοκρασίας δωματίου, διαφοροποιείται το θερμοκρασιακό εύρος του κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης των τριών υλικών, κυρίως με την αύξηση της ελάχιστης θερμοκρασίας. Με αυτόν τον τρόπο, η θερμοκρασιακή διαφορά υλικού-δωματίου, που απαιτείται για την απόδοση θερμότητας, μειώνεται, δικαιολογώντας την πτώση της θερμοροής προς το δωμάτιο. Όσον αφορά τους βαθμούς εκμετάλλευσης, για το RT21, η μείωση είναι αναμενόμενη, αφού ο κύκλος φόρτισης-αποφόρτισης μετατοπίζεται, σε μεγαλύτερο βαθμό, εκτός του εύρους λειτουργίας του υλικού. Για το RT27, η ελαφριά μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου, αποφέρει μείωση του βαθμού εκμετάλλευσης. Αντίθετα, στο υλικό SP25A8 πραγματοποιείται αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας, επιφέροντας αύξηση του βαθμού εκμετάλλευσης, συγκρίνοντας βέβαια με την 1<sup>η</sup> δοκιμή.

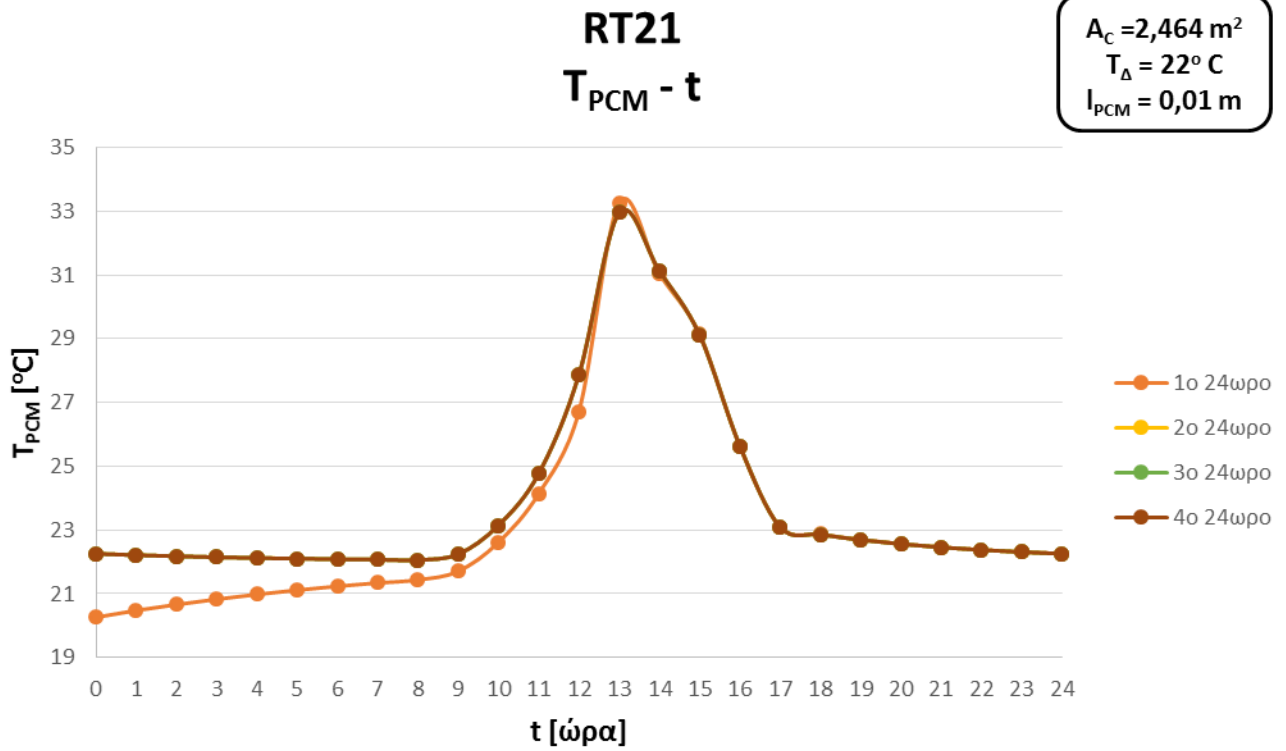
Τέλος, σημειώνεται ότι η πλήρης αποφόρτιση των υλικών πραγματοποιείται σε διάρκεια ελαφρώς μεγαλύτερη του ενός 24ώρου, χωρίς να έχουν την δυνατότητα απόδοσης την επόμενη ημέρα, στην περίπτωση συννεφιάς.

### 6.12 7<sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΑΥΞΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ T<sub>Δ</sub> =22°C

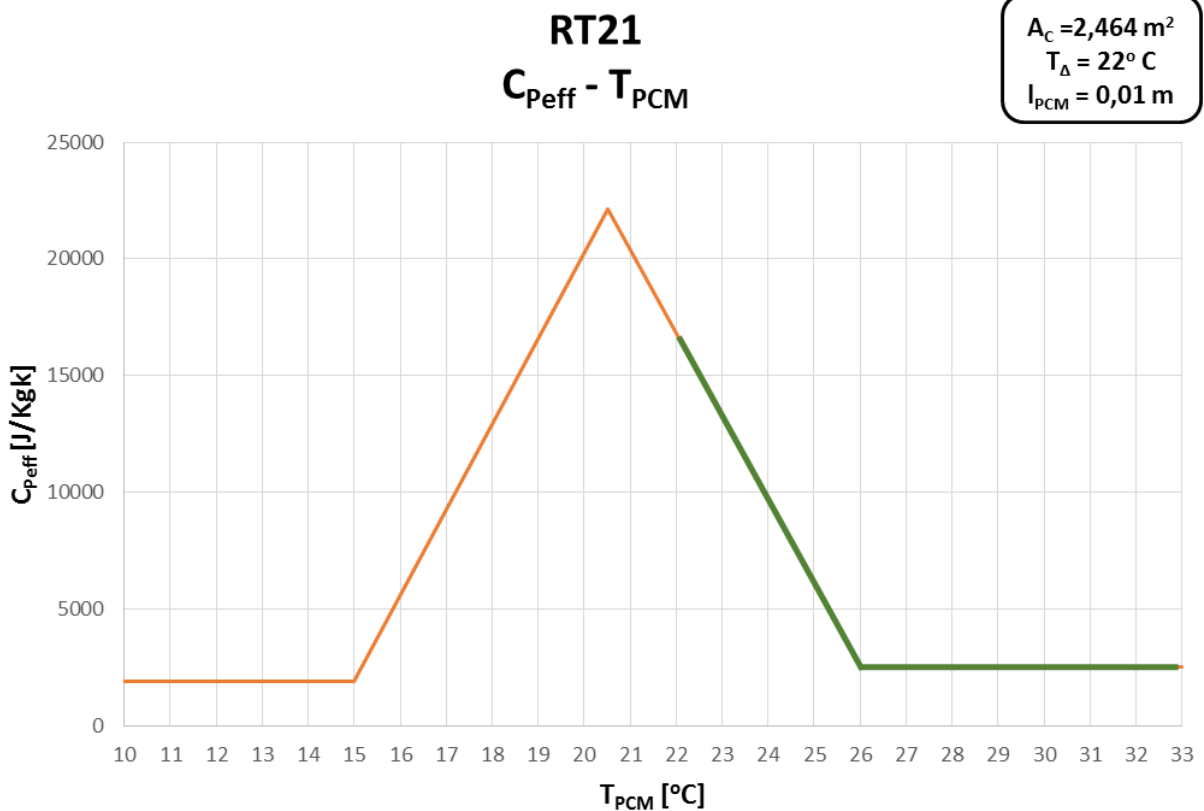
#### 6.12.1 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ RT21

<b>Παράμετροι 7<sup>ης</sup> Δοκιμής με RT21</b>	
Συλλεκτική Επιφάνεια [m <sup>2</sup> ]	<b>A<sub>c</sub> =2,464</b>
<b>Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [°C]</b>	<b>T<sub>Δ</sub> =22</b>
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [°C]	<b>T<sub>s</sub> =15</b>
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [°C]	<b>T<sub>l</sub> =26</b>
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [J/KgK]	<b>C<sub>p s</sub> =1900</b>
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [J/KgK]	<b>C<sub>p l</sub> =2500</b>
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [J/KgK]	<b>H =132100</b>
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [m]	<b>l<sub>PCM</sub> =0,01</b>

Πίνακας 6.12.1/1 : Παράμετροι 7ης Δοκιμής RT21



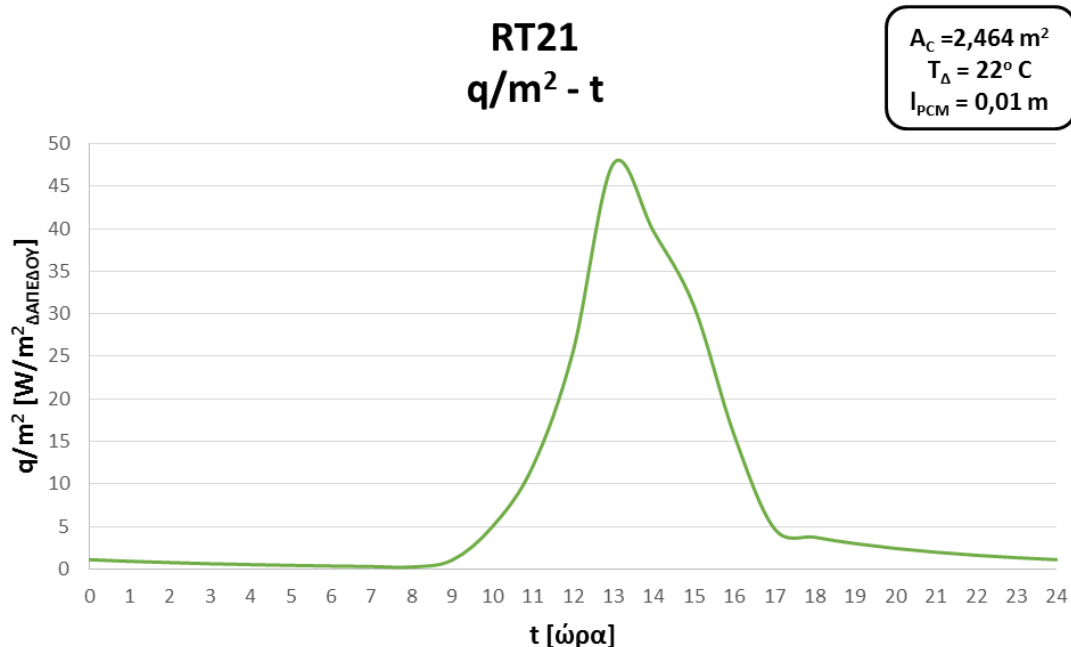
Σχήμα 6.12.1/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου



Σχήμα 6.12.1/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 7<sup>ης</sup> Δοκιμής RT21 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{35514,48}{132100} = 0,269$$



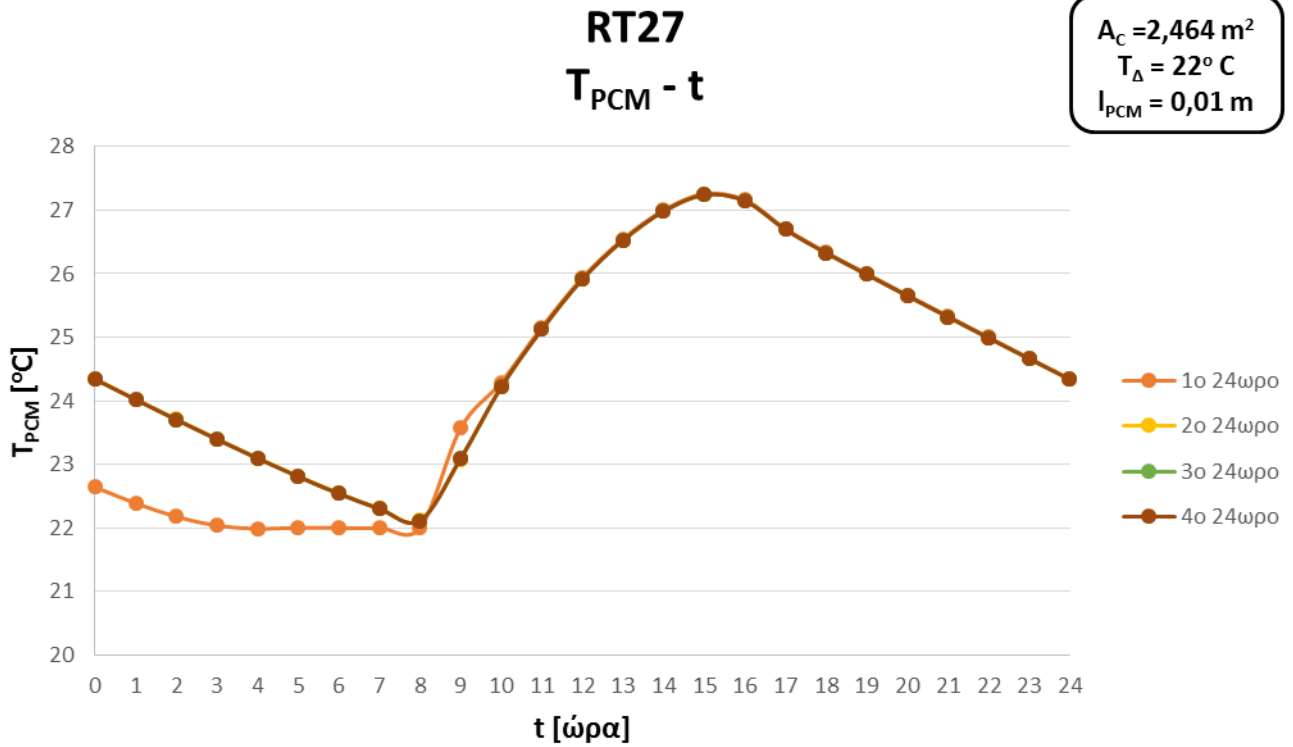
Σχήμα 6.12.1/3 : Καμπύλη Προσδιόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [W/m<sup>2</sup> δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **8,12 W/m<sup>2</sup>**.

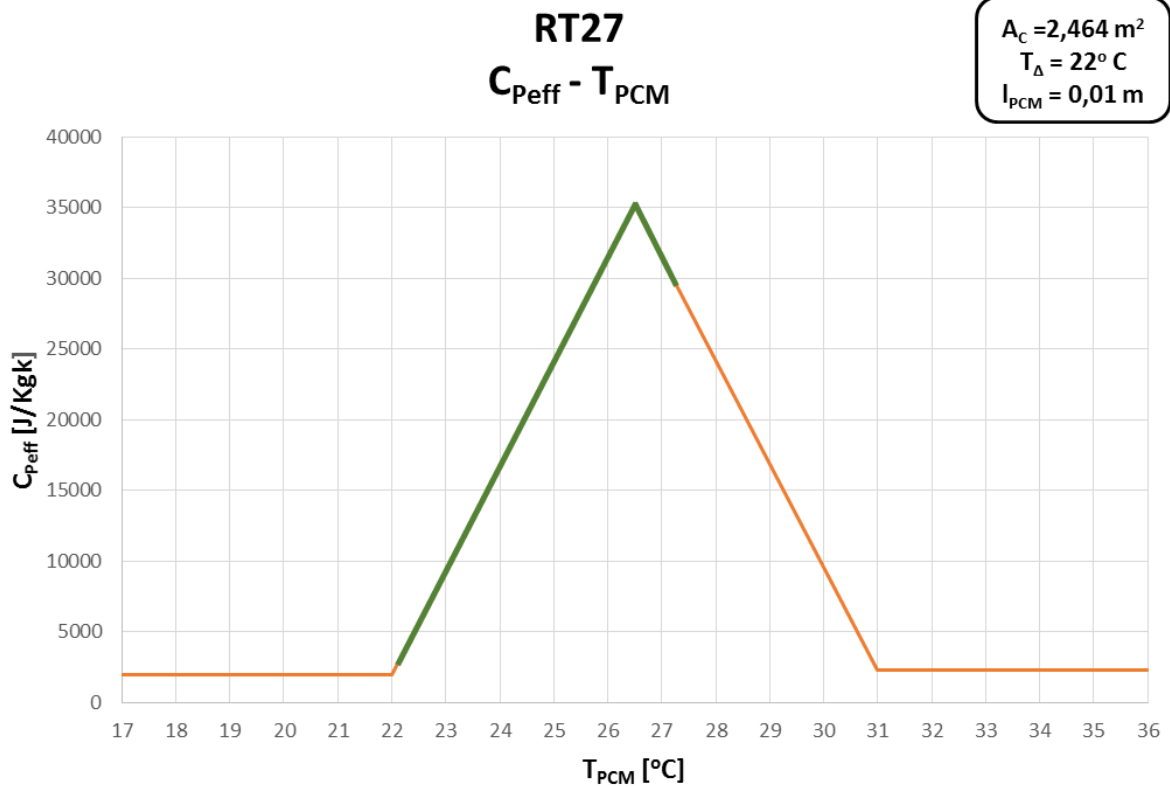
### 6.12.2 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ RT27

<b>Παράμετροι 7<sup>ης</sup> Δοκιμής με RT27</b>	
Συλλεκτική Επιφάνεια [m <sup>2</sup> ]	A <sub>c</sub> = 2,464
<b>Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [°C]</b>	<b>T<sub>Δ</sub> = 22</b>
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [°C]	T <sub>s</sub> = 22
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [°C]	T <sub>l</sub> = 31
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [J/KgK]	C <sub>p s</sub> = 2000
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [J/KgK]	C <sub>p l</sub> = 2300
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [J/KgK]	H = 167400
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [m]	I <sub>PCM</sub> = 0,01

Πίνακας 6.12.2/1 : Παράμετροι 7ης Δοκιμής RT27



Σχήμα 6.12.2/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου

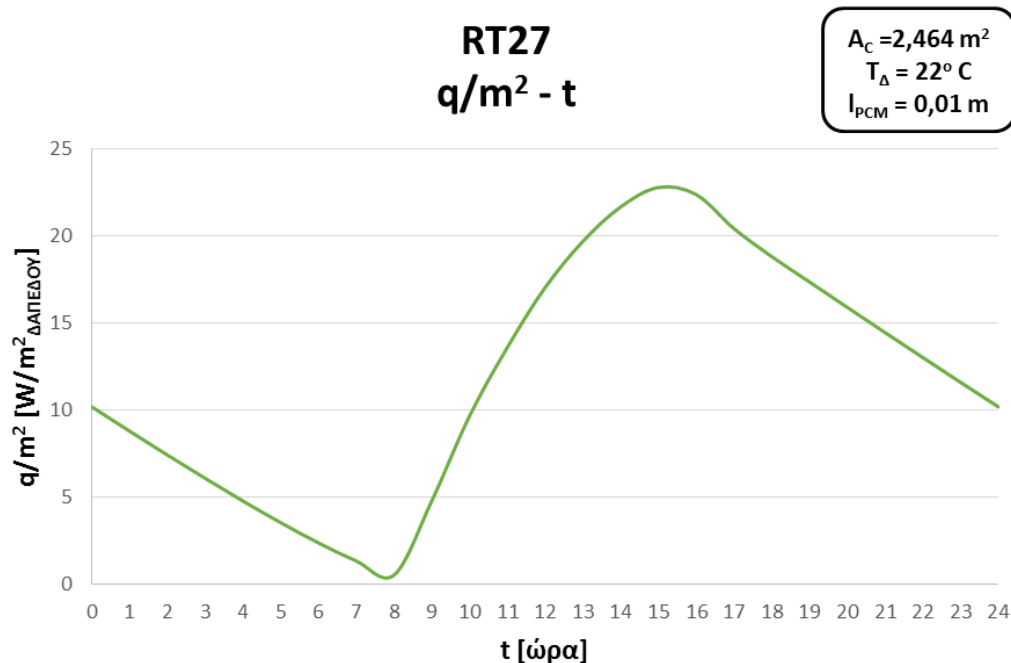


Σχήμα 6.12.2/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού



Βαθμός Εκμετάλλευσης 7<sup>ης</sup> Δοκιμής RT27 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{108164}{167400} = 0,646$$



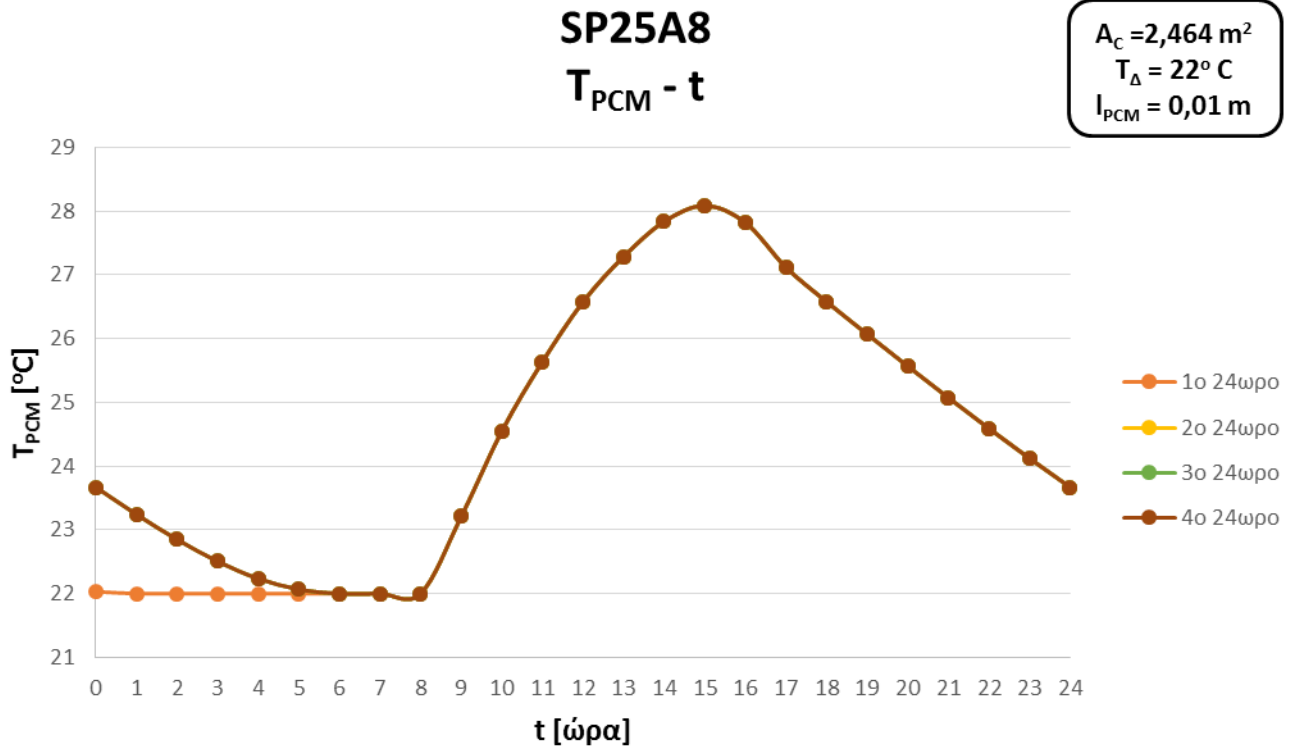
Σχήμα 6.12.2/3: Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [W/m<sup>2</sup> δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **11,91 W/m<sup>2</sup>**.

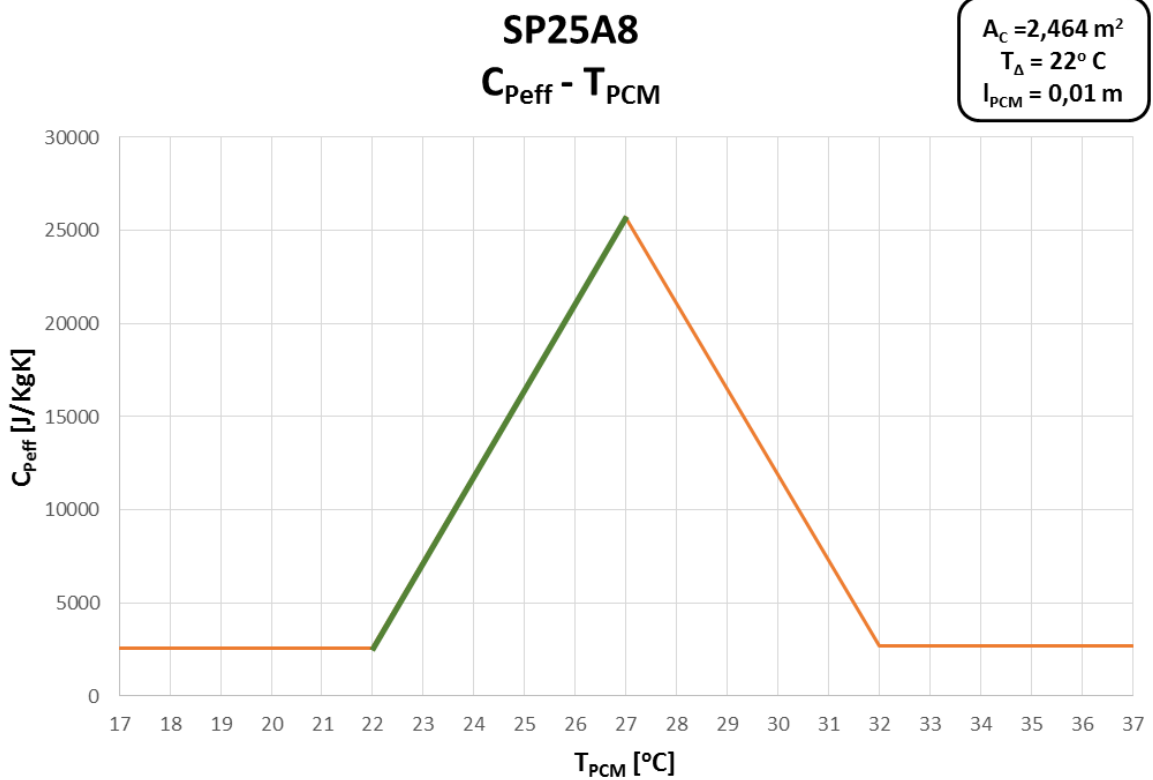
### 6.12.3 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ SP25A8

Παράμετροι 7 <sup>ης</sup> Δοκιμής με SP25A8	
Συλλεκτική Επιφάνεια [m <sup>2</sup> ]	A <sub>c</sub> = 2,464
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [°C]	T <sub>Δ</sub> = 22
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [°C]	T <sub>s</sub> = 22
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [°C]	T <sub>l</sub> = 32
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [J/KgK]	C <sub>p s</sub> = 2600
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [J/KgK]	C <sub>p l</sub> = 2700
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [J/KgK]	H = 141500
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [m]	l <sub>PCM</sub> = 0,01

Πίνακας 6.12.3/1 : Παράμετροι 7ης Δοκιμής SP25A8



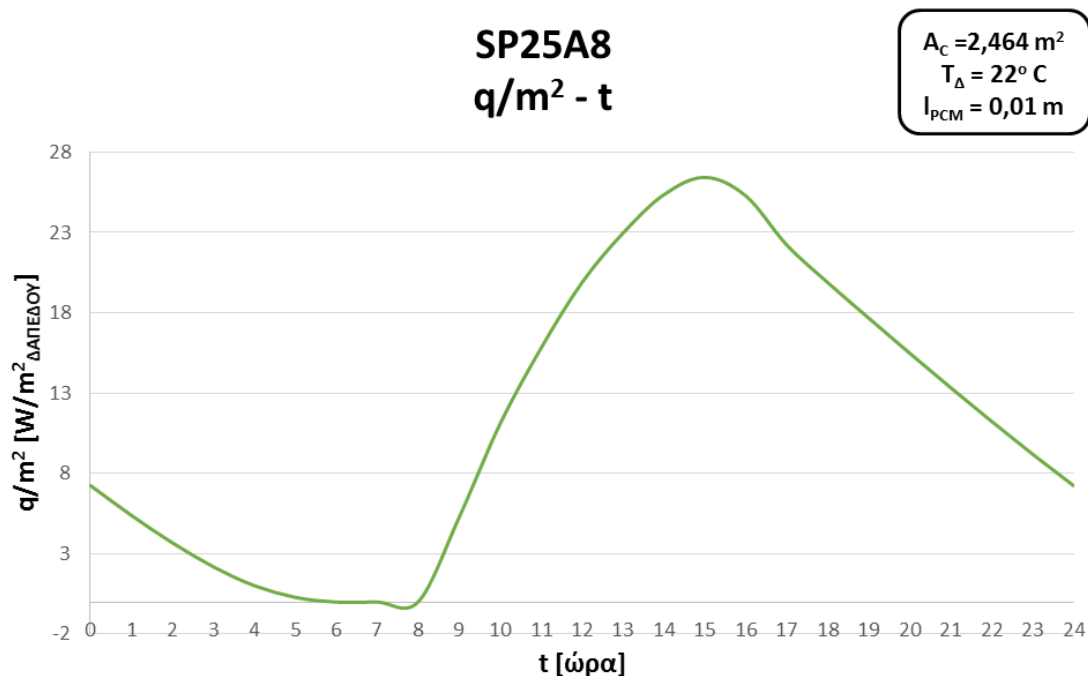
Σχήμα 6.12.3/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου



Σχήμα 6.12.3/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 7<sup>ης</sup> Δοκιμής SP25A8 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{95982,67}{141500} = 0,678$$



Σχήμα 6.12.3/3 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [W/m<sup>2</sup> δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **11,53 W/m<sup>2</sup>**.

#### 6.12.4 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

	RT21	RT27	SP25A8
T <sub>min</sub> [°C]	22,06	22,11	22
T <sub>max</sub> [°C]	32,96	27,24	28,08
η	0,269	0,646	0,678
q/m <sup>2</sup> <sub>Δ</sub> . [W/m <sup>2</sup> ]	8,12	11,91	11,53

Πίνακας 6.12.4/1 : Συνολικός Πίνακας Αποτελεσμάτων

Η επιρροή της περαιτέρω αύξησης της θερμοκρασίας δωματίου, στην αποδιδόμενη θερμότητα, είναι ίδια με την προηγούμενη δοκιμή. Η αύξηση της ελάχιστης θερμοκρασίας του κύκλου, μειώνει την θερμοκρασιακή διαφορά υλικού-δωματίου, προκαλώντας την πτώση της θερμοροής. Ο κύκλος φόρτισης-αποφόρτισης του RT21 συνεχίζει να μετατοπίζεται εκτός εύρους λειτουργίας του υλικού, επιφέροντας μείωση του βαθμού εκμετάλλευσης. Αντίθετα, για τα υλικά RT27 και SP25A8, ο

κύκλος έχει μετατοπιστεί, πλήρως, εντός του θερμοκρασιακού εύρους λειτουργίας των υλικών, αυξάνοντας φυσικά τον βαθμό εκμετάλλευσής τους.

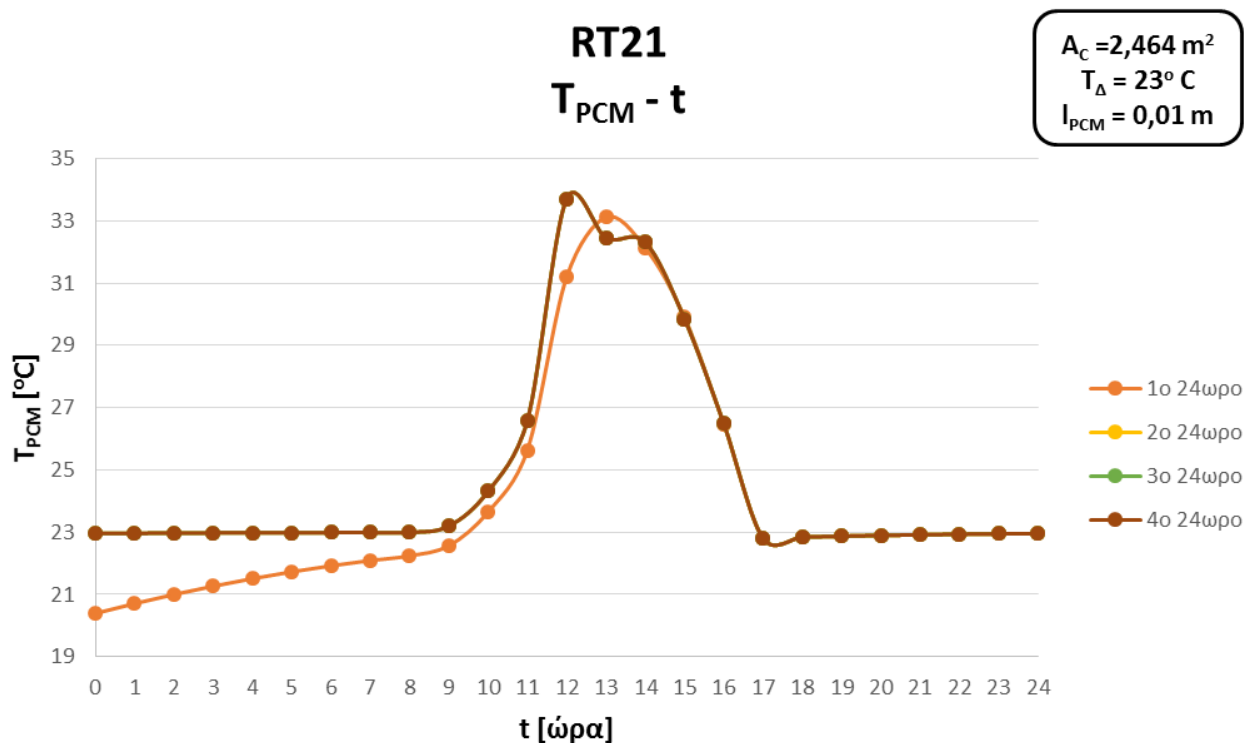
Τέλος, σημειώνεται ότι η πλήρης αποφόρτιση των υλικών πραγματοποιείται σε διάρκεια ενός 24ώρου, χωρίς να έχουν την δυνατότητα απόδοσης την επόμενη ημέρα, στην περίπτωση συννεφιάς.

### 6.13 8<sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΑΥΞΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ $T_{\Delta} = 23^{\circ}\text{C}$

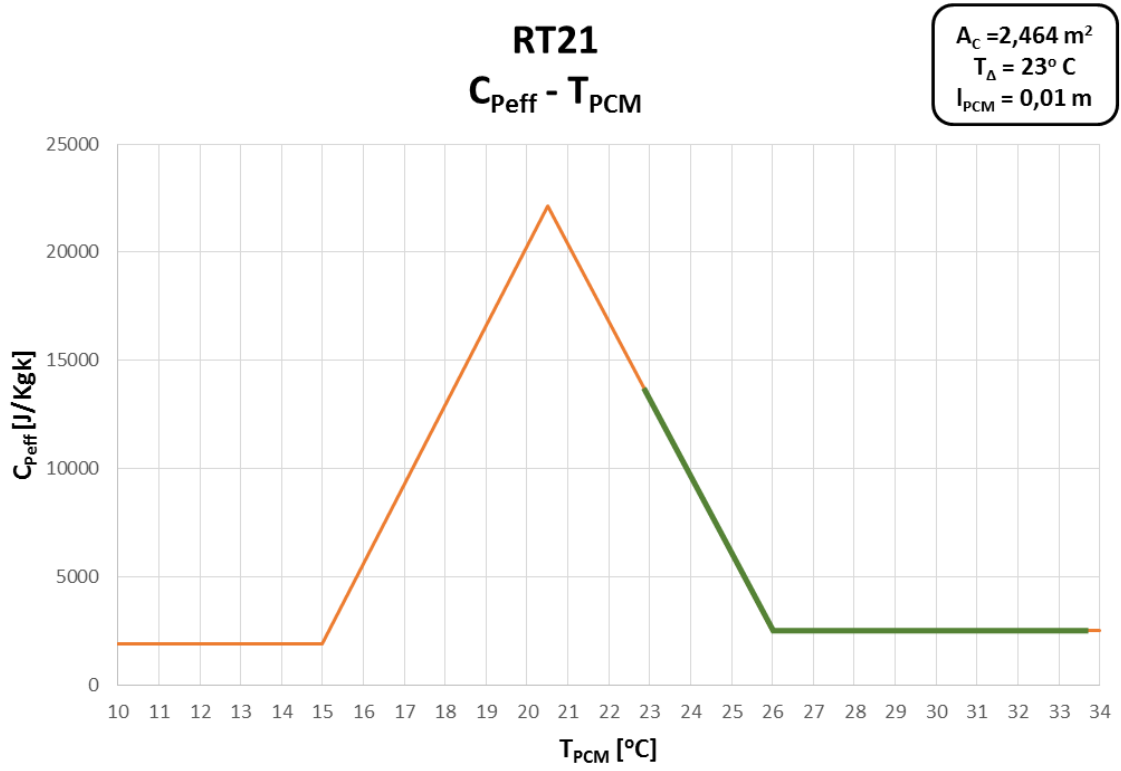
#### 6.13.1 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ RT21

Παράμετροι 8 <sup>ης</sup> Δοκιμής με RT21	
Συλλεκτική Επιφάνεια [ $\text{m}^2$ ]	$A_c = 2,464$
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\Delta} = 23$
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_s = 15$
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_l = 26$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$C_{p_s} = 1900$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$C_{p_l} = 2500$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$H = 132100$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [ $\text{m}$ ]	$I_{PCM} = 0,01$

Πίνακας 6.13.1/1 : Παράμετροι 8ης Δοκιμής RT21



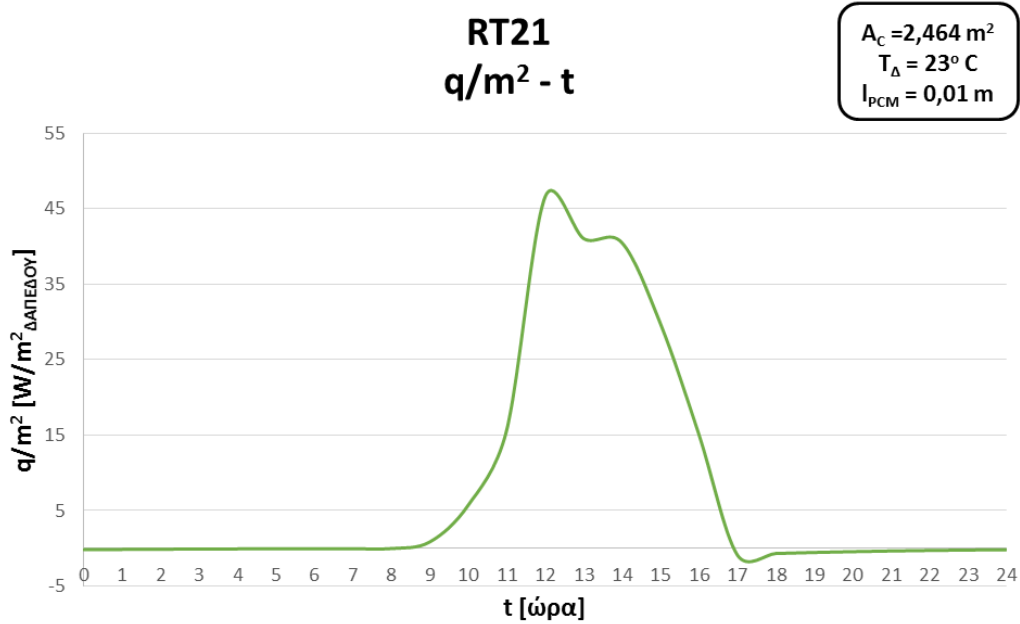
Σχήμα 6.13.1/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου



Σχήμα 6.13.1/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 8<sup>ης</sup> Δοκιμής RT21 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{24681,6}{132100} = 0,187$$



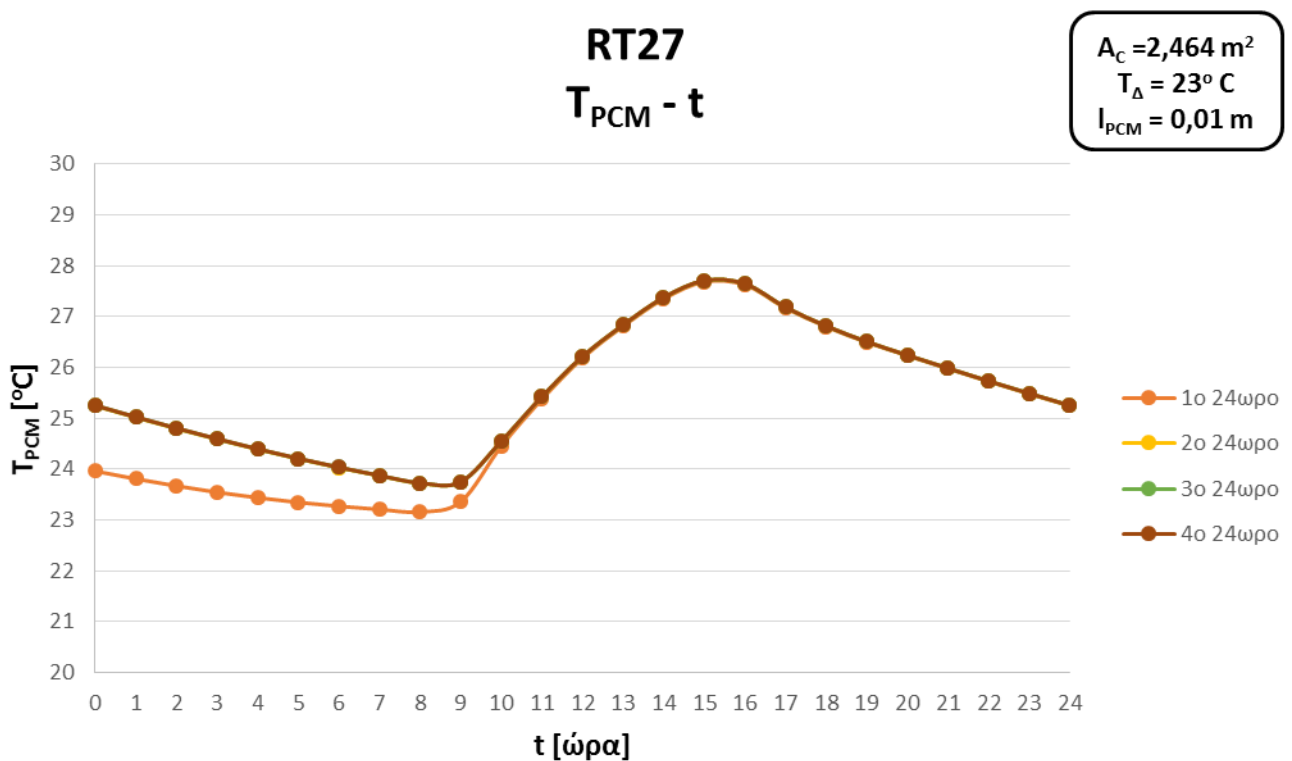
Σχήμα 6.13.1/3 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [ $\text{W}/\text{m}^2$  δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **7,64  $\text{W}/\text{m}^2$** .

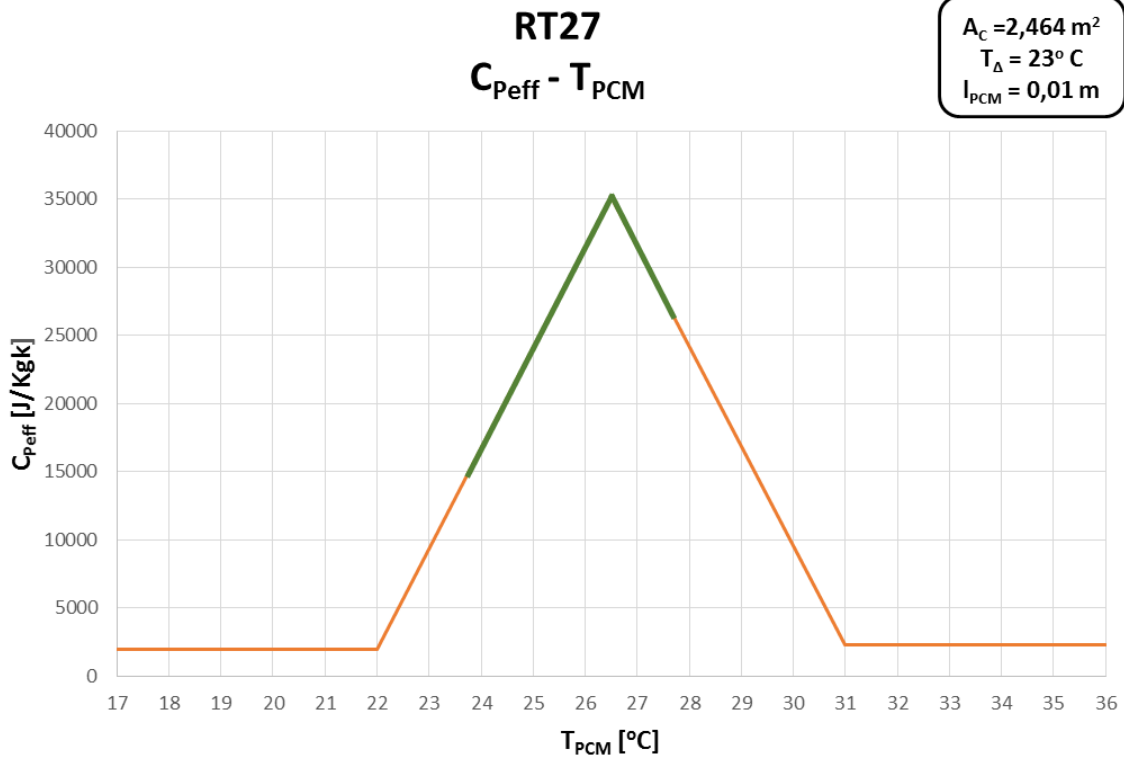
### 6.13.2 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ RT27

Παράμετροι 8 <sup>ης</sup> Δοκιμής με RT27	
Συλλεκτική Επιφάνεια [ $\text{m}^2$ ]	$A_C = 2,464$
<b>Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [<math>^{\circ}\text{C}</math>]</b>	<b><math>T_{\Delta} = 23</math></b>
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_s = 22$
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_l = 31$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$C_{P_s} = 2000$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$C_{P_l} = 2300$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [ $\text{J}/\text{KgK}$ ]	$H = 167400$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [ $\text{m}$ ]	$l_{PCM} = 0,01$

Πίνακας 6.13.2/1 : Παράμετροι 8ης Δοκιμής RT27



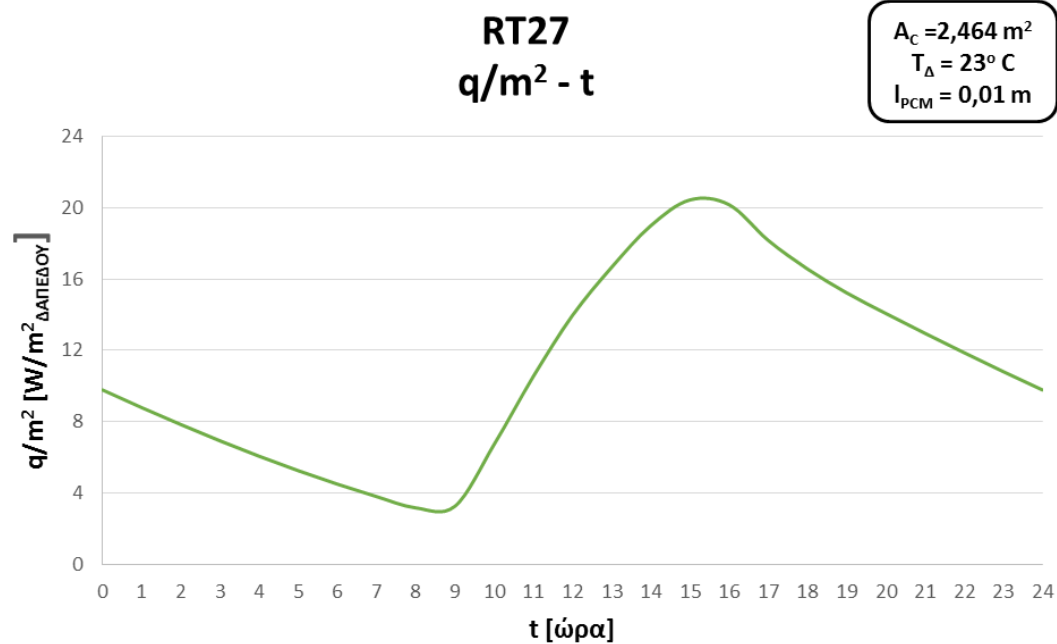
Σχήμα 6.13.2/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου



Σχήμα 6.13.2/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 8<sup>ης</sup> Δοκιμής RT27 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{106280,4}{167400} = 0,635$$



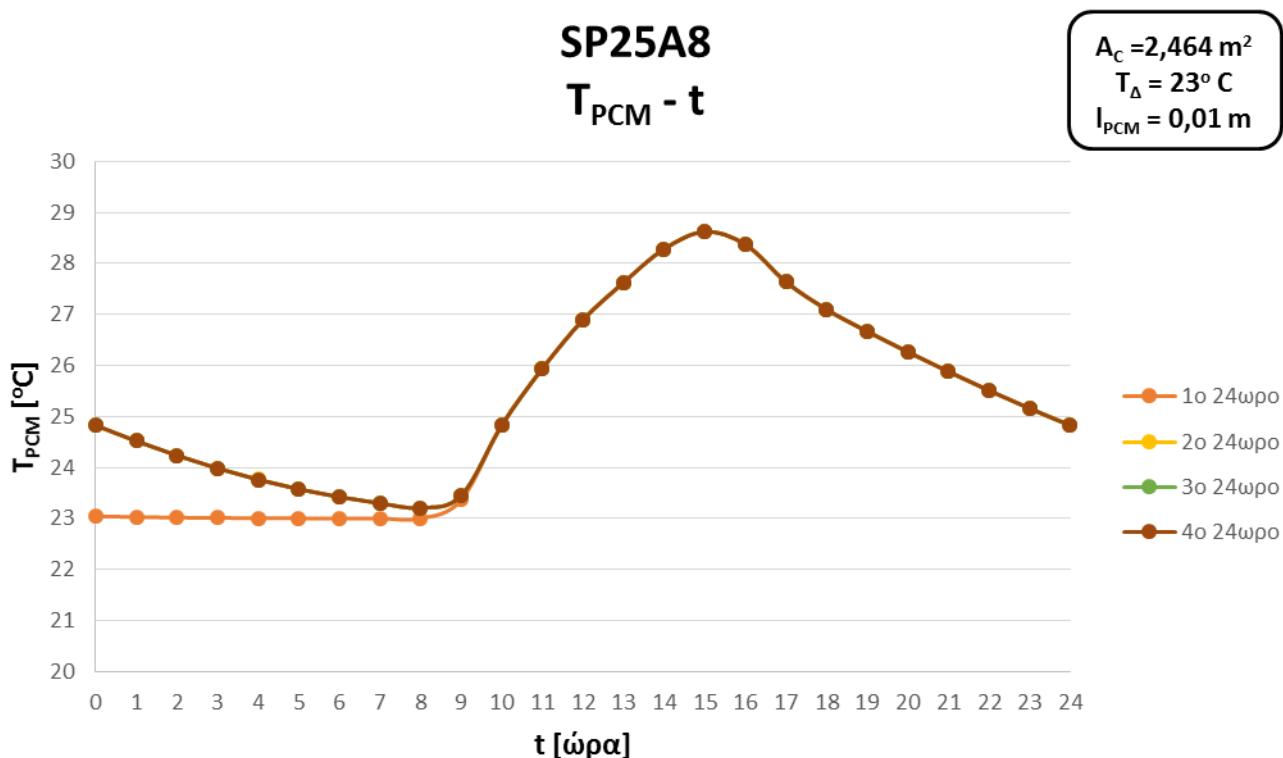
Σχήμα 6.13.2/3 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [ $\text{W}/\text{m}^2$  δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **11,06  $\text{W}/\text{m}^2$** .

### 6.13.3 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ SP25A8

Παράμετροι 8 <sup>ης</sup> Δοκιμής με SP25A8	
Συλλεκτική Επιφάνεια [ $\text{m}^2$ ]	$A_c = 2,464$
<b>Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [<math>^{\circ}\text{C}</math>]</b>	<b><math>T_{\Delta} = 23</math></b>
Θερμοκρασία Έναρξης Στερεοποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_s = 22$
Θερμοκρασία Πλήρους Υγροποίησης [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_l = 32$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]	$C_{p_s} = 2600$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]	$C_{p_l} = 2700$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]	$H = 141500$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [ $\text{m}$ ]	$l_{PCM} = 0,01$

Πίνακας 6.13.3/1 : Παράμετροι 8<sup>ης</sup> Δοκιμής SP25A8

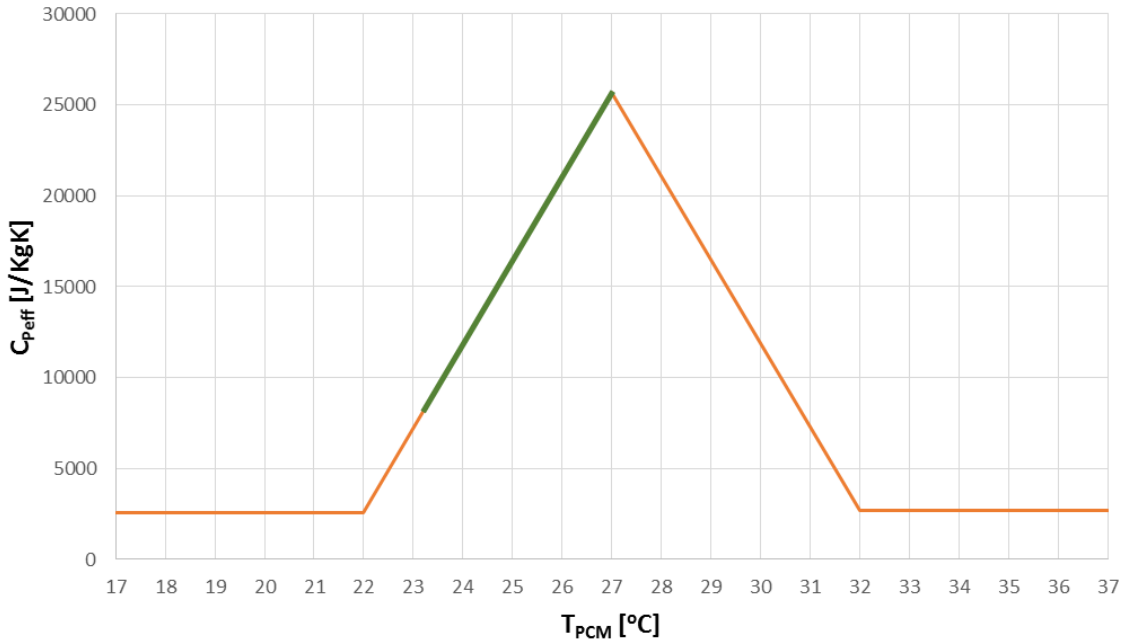


Σχήμα 6.13.3/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου



**SP25A8**  
**C<sub>Peff</sub> - T<sub>PCM</sub>**

A<sub>C</sub> = 2,464 m<sup>2</sup>  
 T<sub>Δ</sub> = 23° C  
 l<sub>PCM</sub> = 0,01 m



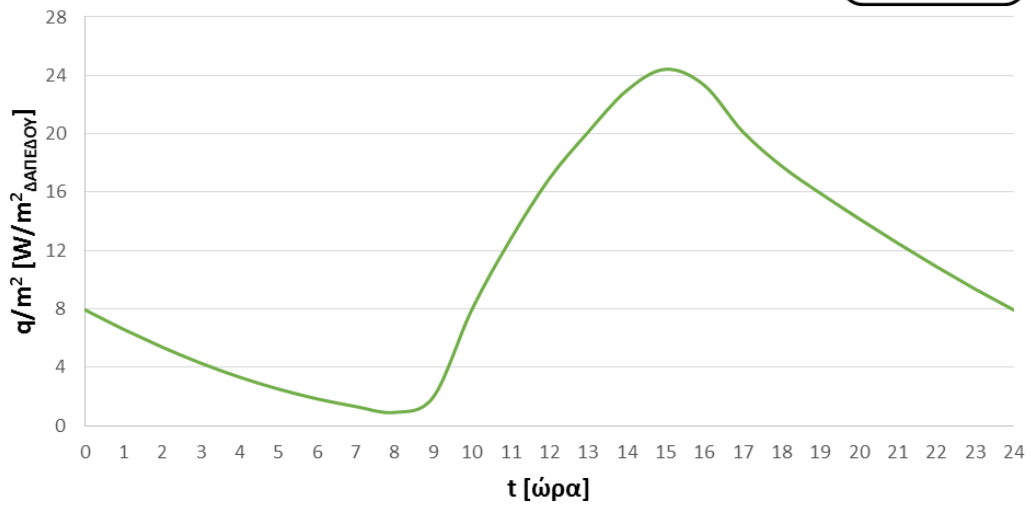
Σχήμα 6.13.3/2 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 8<sup>ης</sup> Δοκιμής SP25A8 :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{99785,25}{141500} = 0,705$$

**SP25A8**  
**q/m<sup>2</sup> - t**

A<sub>C</sub> = 2,464 m<sup>2</sup>  
 T<sub>Δ</sub> = 23° C  
 l<sub>PCM</sub> = 0,01 m



Σχήμα 6.13.3/3 : Καμπύλη Προσδιόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [ $W/m^2$  δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **10,93  $W/m^2$** .

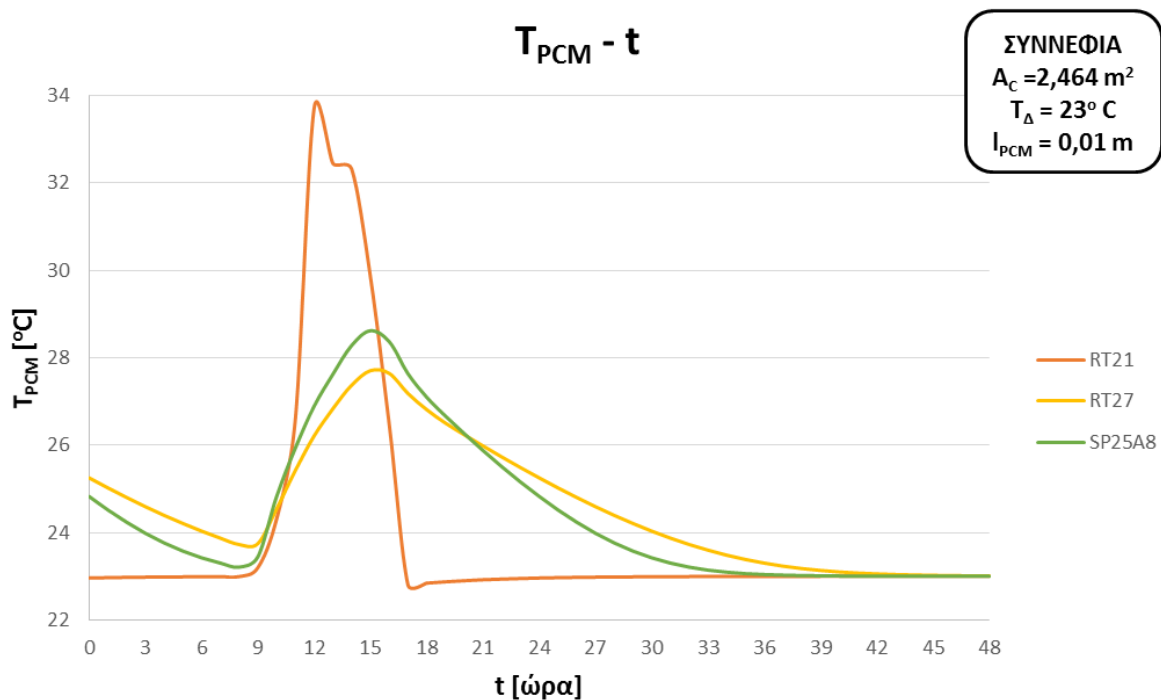
#### 6.13.4 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

	<b>RT21</b>	<b>RT27</b>	<b>SP25A8</b>
<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>	22,8	23,73	23,21
<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	33,72	27,71	28,62
<b>η</b>	0,187	0,635	0,705
<b>q/m<sup>2</sup><sub>Δ</sub>. [W/m<sup>2</sup>]</b>	7,64	11,06	10,93

Πίνακας 6.13.4/1 : Συνολικός Πίνακας Αποτελεσμάτων

Συνεχίζοντας την αύξηση της θερμοκρασίας δωματίου, χωρίς την παράλληλη αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας, συνεχίζει και η πτώση της αποδιδόμενης θερμότητας από τα τρία υλικά. Όπως αναλύθηκε και στην προηγούμενη δοκιμή, ο βαθμός εκμετάλλευσης του RT21 μειώθηκε, λόγω μείωσης του εμβαδού  $H_0$ , με την σταδιακή έξοδο από την διφασική περιοχή του υλικού. Η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών του υλικού κατά τις ώρες μέγιστης ηλιοφάνειας, οφείλεται στην απορρόφηση αισθητής θερμότητας, εκτός του εύρους λειτουργίας του υλικού. Για το υλικό RT27, παρατηρείται μείωση του θερμοκρασιακού εύρους του κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης, άρα μικρή πτώση του βαθμού εκμετάλλευσης. Αντίθετα, για το SP25A8, παρατηρείται μικρή αύξηση του βαθμού εκμετάλλευσης λόγω μετατόπισης του κύκλου σε θερμοκρασίες υψηλότερης θερμοχωρητικότητας και μικρότερης μείωσης του θερμοκρασιακού εύρους, συγκριτικά με του υλικού RT27.

Η αποφόρτιση των υλικών RT27 και SP25A8 στην περίπτωση συννεφιάς, διαρκεί περισσότερες ώρες, συγκριτικά με τις προηγούμενες δομικές αύξησης της θερμοκρασίας δωματίου. Πιθανότατα, με την παράλληλη αύξηση του πάχους του στρώματος PCM, η αποφόρτιση των υλικών να διαρκούσε περισσότερες ώρες την 2<sup>η</sup> ημέρα. Η απόδοση θερμότητας των υλικών προφανώς δεν θεωρείται ικανοποιητική, αλλά το παρακάτω διάγραμμα θερμοκρασίας 48ώρου δίνεται για την παρατήρηση της συμπεριφοράς των υλικών.



Σχήμα 6.13.4/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ υλικών στην περίπτωση συννεφιάς

## 6.14 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΗΣ ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

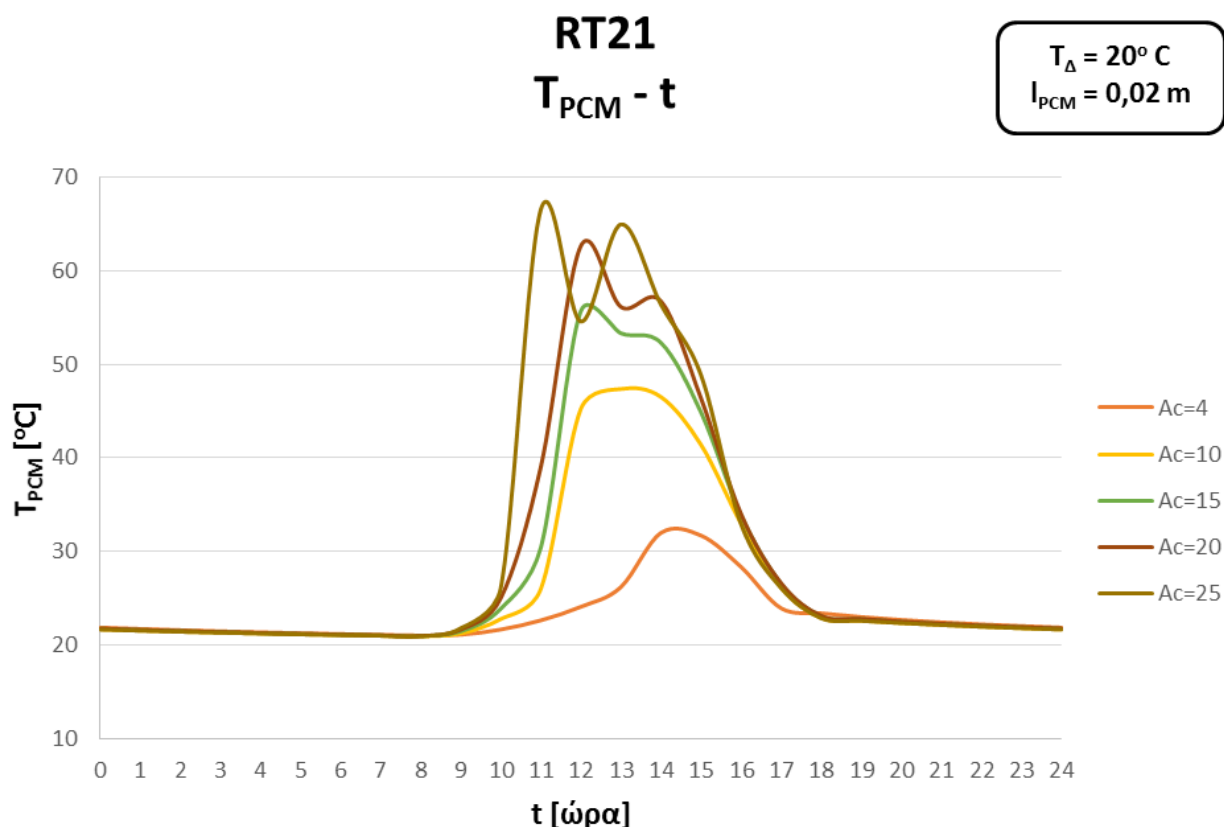
Κύριο αντικείμενο της παρούσας μελέτης αποτελεί η θερμική απόδοση των υλικών αλλαγής φάσης της εγκατάστασης, ως σύστημα θέρμανσης. Η προσφερόμενη, από το υλικό, θερμότητα συνδέεται άμεσα, όπως είναι φυσικό, με την συλλεκτική επιφάνεια της συστοιχίας των ηλιακών συλλεκτών  $A_c$ . Η αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος του συλλέκτη στα ΥΑΦ επιφέρει αύξηση της προσδιδόμενης θερμότητας στο εσωτερικό περιβάλλον του δωματίου. Συνεπώς, είναι επιθυμητή η μελέτη της συσχέτισης των δύο αυτών μεγεθών, κρατώντας σταθερές τις παραμέτρους της θερμοκρασίας δωματίου και του πάχους του στρώματος PCM. Το πάχος  $l_{PCM}$  λαμβάνει σταθερή τιμή  $l_{PCM} = 0,02 \text{ m}$ , για όλα τα εξεταζόμενα υλικά, ωστόσο η θερμοκρασία δωματίου διαφοροποιείται για την βελτίωση του βαθμού εκμεταλλευσιμότητας των υλικών. Για το υλικό RT21, λόγω χαμηλότερου θερμοκρασιακού εύρους λειτουργίας, διατηρείται η τιμή  $T_{\Delta} = 20^{\circ} \text{ C}$ , ενώ για τα υλικά RT27 και SP25A8 επιλέγεται  $T_{\Delta} = 22^{\circ} \text{ C}$ , για την πλήρη είσοδο του κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας τους.

Λόγω πληθώρας των αποτελεσμάτων από κάθε δοκιμή, παρουσιάζονται μόνο συγκριτικά διαγράμματα για κάθε υλικό, ενώ δίνεται συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων για κάθε τιμή της παραμέτρου  $A_c$ .

### 6.14.1 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ RT21

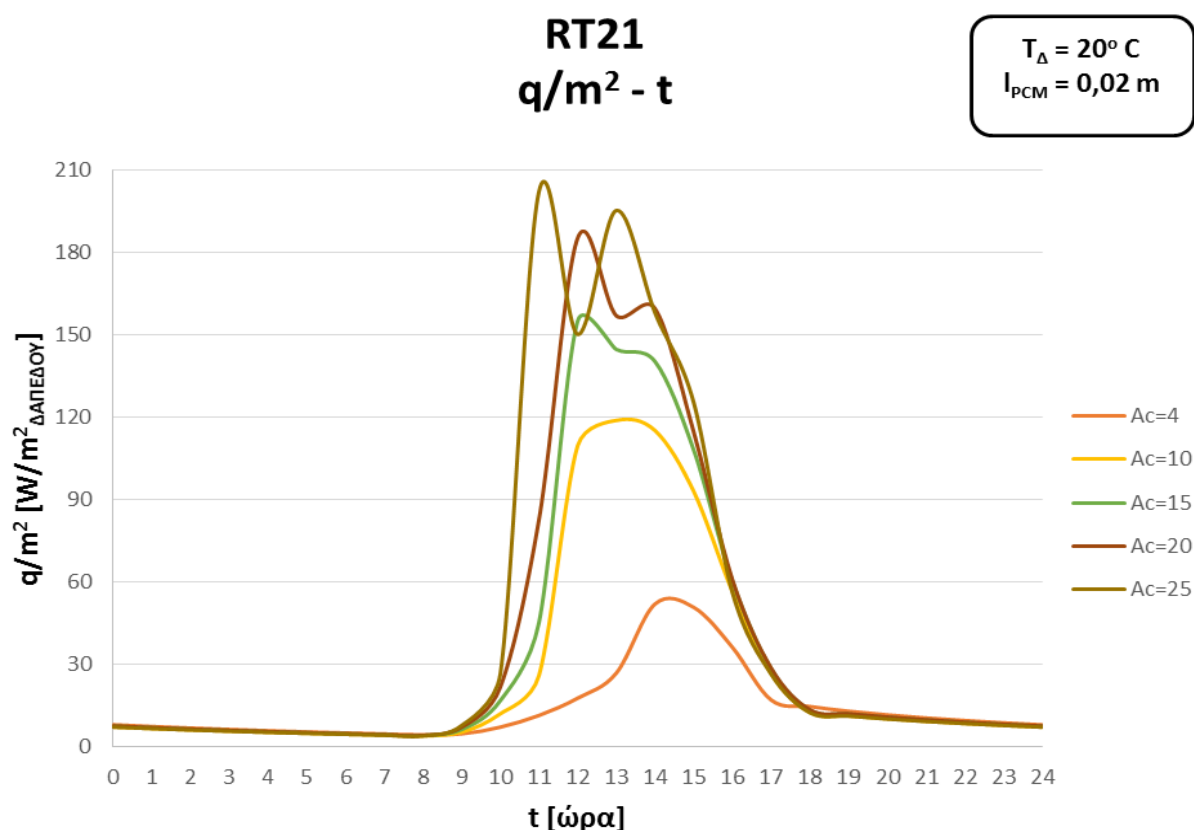
Στο παρακάτω σχήμα δίνονται οι καμπύλες των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών του υλικού για τις διάφορες τιμές της συλλεκτικής επιφάνειας  $A_c$ . Το θερμοκρασιακό προφίλ παρουσιάζεται ομοιόμορφο για τις πρώτες τιμές της συλλεκτικής επιφάνειας, ωστόσο για  $A_c \geq 15\text{m}^2$  παρατηρείται μία ανομοιομορφία, με ενδιάμεση πτώση της θερμοκρασίας. Με την αύξηση της  $A_c$ , η πτώση οξύνεται και μετατοπίζεται προς τις πρώτες ώρες ηλιακής ακτινοβολίας. Η μορφή της καμπύλης ερμηνεύεται με το γεγονός ότι λόγω ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιακών διαφορών υλικού-δωματίου, το ποσό και ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας του υλικού προς το δωμάτιο, ξεπερνάει κατά μεγάλο βαθμό το ποσό και τον ρυθμό απόδοσης ισχύος από τον συλλέκτη προς το υλικό, επιφέροντας την πτώση θερμοκρασίας του υλικού.

Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά προσδιδόμενης θερμότητας και αποδιδόμενης ισχύος, τόσο μεγαλύτερη παρουσιάζεται η πτώση της θερμοκρασίας. Με άλλα λόγια, το υλικό αποβάλλει περισσότερη ενέργεια από αυτήν που παραλαμβάνει, μέχρι την στιγμή εξισορρόπησης των δύο ποσών (τοπικό ελάχιστο) και την επικράτηση και πάλι της αποδιδόμενης ισχύος του συλλέκτη, με την οποία αποκαθίσταται η ανοδική πορεία της θερμοκρασίας.



Σχήμα 6.14.1/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ υλικού για κάθε συλλεκτική επιφάνεια

Συνεχίζοντας, όπως θα φανεί και στο παρακάτω διάγραμμα θερμοροής, το υλικό σχεδόν αποφορτίζεται μετά την παύση της αποδιδόμενης ισχύος από τον συλλέκτη, προσδίδοντας αμελητέα ποσά θερμότητας στο δωμάτιο, γεγονός που μαρτυρεί την μη αποδοτικότητα του υλικού σε περίπτωση συννεφιάς. Παρακάτω δίνεται το διάγραμμα θερμοροής, για τις διάφορες τιμές συλλεκτικής επιφάνειας, το οποίο βέβαια παρουσιάζει την ίδια μορφή με το θερμοκρασιακό προφίλ του υλικού, αλλά δίνεται για λόγους πληρότητας.

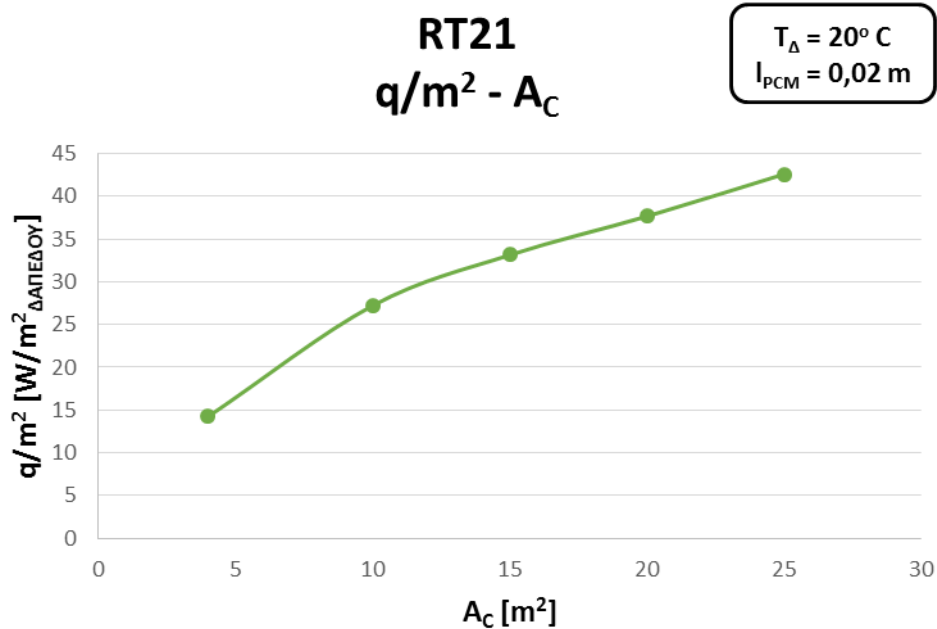


Σχήμα 6.14.1/2 : Καμπύλες Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

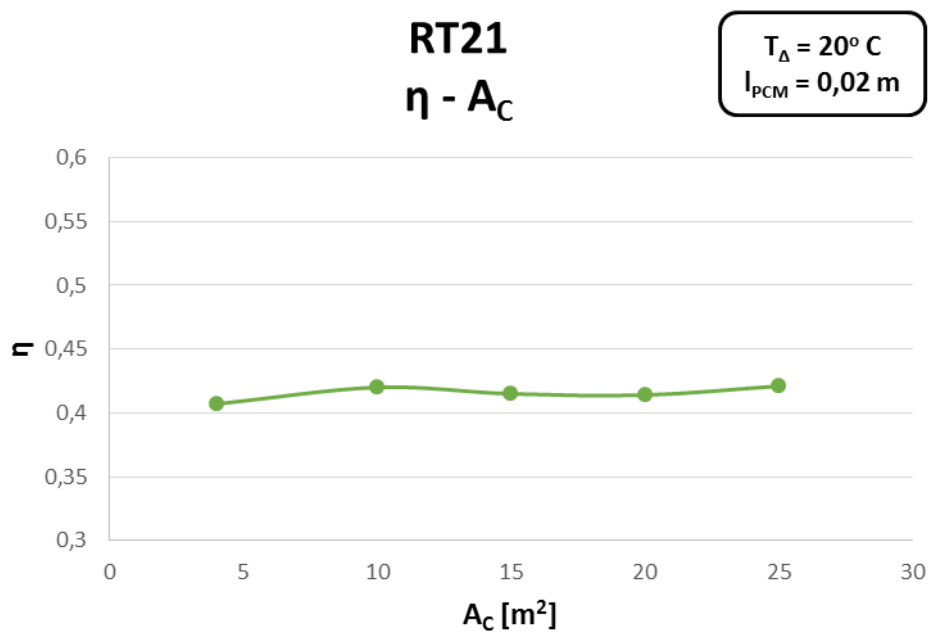
<b>RT21 (T<sub>s</sub> - T<sub>l</sub> = 15 - 26 °C)</b>					
<b>T<sub>Δ</sub> = 20°C</b>					
<b>I<sub>PCM</sub> = 0,02m</b>					
	<b>A<sub>c</sub> = 4m<sup>2</sup></b>	<b>A<sub>c</sub> = 10m<sup>2</sup></b>	<b>A<sub>c</sub> = 15m<sup>2</sup></b>	<b>A<sub>c</sub> = 20m<sup>2</sup></b>	<b>A<sub>c</sub> = 25m<sup>2</sup></b>
<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>	21,02	20,93	20,97	20,98	20,93
<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	32	47,37	55,7	62,64	66,54
<b>η</b>	0,407	0,42	0,415	0,414	0,421
<b>q/m<sup>2</sup><sub>Δ</sub> [W/m<sup>2</sup>]</b>	14,25	27,23	33,14	37,67	42,59

Πίνακας 6.14.1/1 : Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων

Τέλος, παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων για τις δοκιμές της παραμέτρου  $A_C$ , των οποίων οι μεταβολές απεικονίζονται στα διαγράμματα της προσδιδόμενης θερμότητας του υλικού και του βαθμού εκμετάλλευσης, συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας.



Σχήμα 6.14.1/3 : Καμπύλη προσδιδόμενης θερμότητας του υλικού συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας

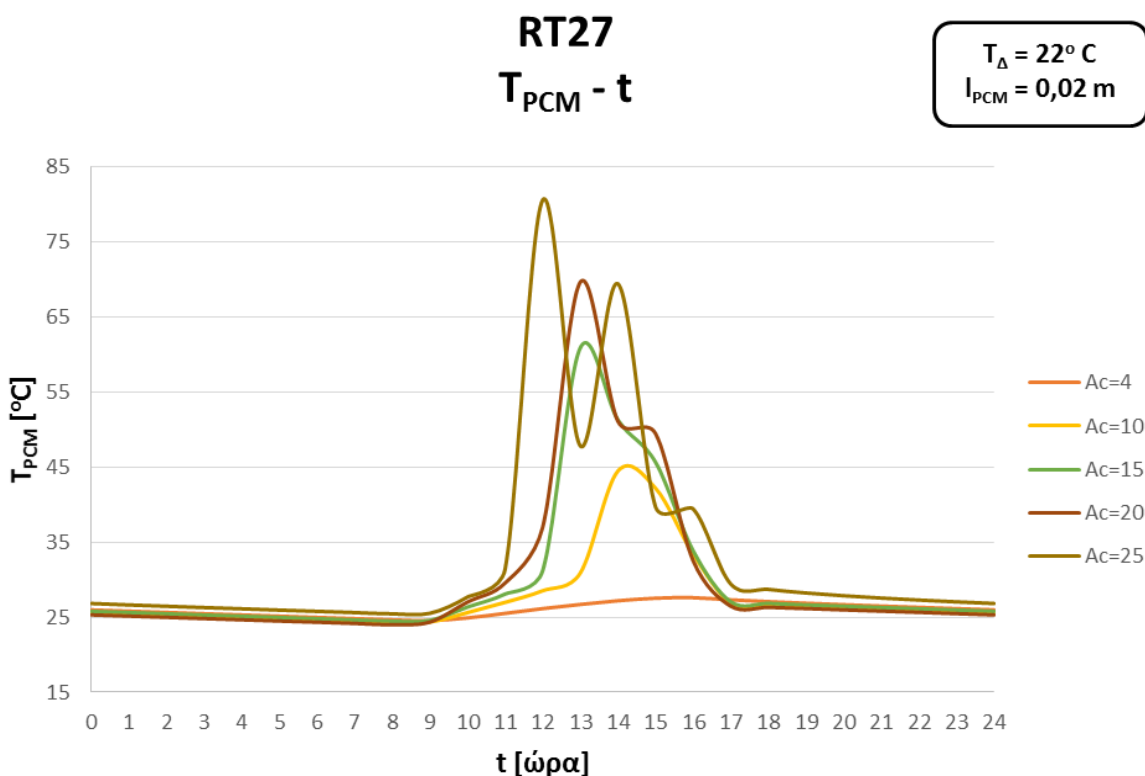


Σχήμα 6.14.1/4 : Καμπύλη βαθμού εκμετάλλευσης του υλικού συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας

Όπως ήταν αναμενόμενο, η θερμοκρασία και η προσδιδόμενη θερμότητα του υλικού είναι μεγέθη ανάλογα της συλλεκτικής επιφάνειας του συλλέκτη. Σε κάθε δοκιμή τιμών της  $A_c$ , η θερμοκρασία πλήρους υγροποίησης του υλικού ξεπερνάται, πράγμα που σημαίνει ότι μεγάλο μέρος της θερμότητας του υλικού προς το δωμάτιο, αποτελεί αισθητή θερμότητα, η οποία αποδίδεται χωρίς χρονική καθυστέρηση, εξηγώντας και την γρήγορη πτώση της θερμοκρασίας του υλικού μετά την παύση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο βαθμός εκμετάλλευσης του υλικού παραμένει σχεδόν σταθερός, αφού οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες βρίσκονται εκτός του εύρους λειτουργίας και δεν έχουν επιρροή, σε αντίθεση με τις αμελητέες μεταβολές της ελάχιστης θερμοκρασίας που προκαλούν τις διαφοροποιήσεις του βαθμού εκμετάλλευσης. Αξίζει να αναφερθεί ότι η μεταβολή του πάχους του στρώματος PCM, επαναφέρει την ομοιομορφία του θερμοκρασιακού προφίλ του υλικού, όπως είναι φυσικό, αφού κάθε ποσό προσδιδόμενης ισχύος του συλλέκτη απορροφάται ομοιόμορφα από την ανάλογη ποσότητα μάζας του υλικού. Στην περίπτωση αυτή, θα δινόταν μία πιο ξεκάθαρη εικόνα της μεταβολής του βαθμού εκμετάλλευσης, ωστόσο οι δοκιμές διαφορετικού πάχους PCM δεν θα ήταν μεταξύ τους συγκρίσιμες.

#### 6.14.2 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ RT27

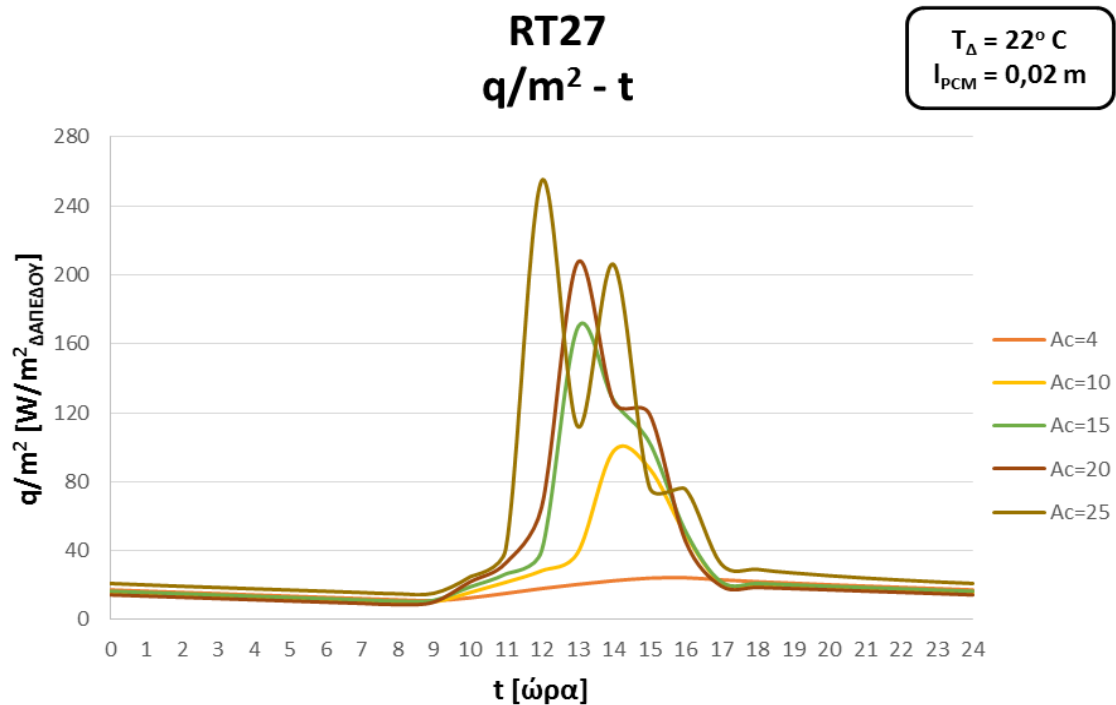
Στο παρακάτω σχήμα δίνονται οι καμπύλες των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών του υλικού για τις διάφορες τιμές της συλλεκτικής επιφάνειας  $A_c$ .



Σχήμα 6.14.2/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ υλικού για κάθε συλλεκτική επιφάνεια

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι η συλλεκτική επιφάνεια των 4m<sup>2</sup> δεν είναι επαρκής για τις τιμές θερμοροής που επιθυμούμε. Συνεχίζοντας, όπως αναλύθηκε και στο υλικό RT21, η ανομοιομορφία των καμπυλών για A<sub>c</sub> ≥ 15m<sup>2</sup>, οφείλεται στην αισθητά μεγαλύτερη πρόσδοση θερμότητας του υλικού προς το εσωτερικό περιβάλλον, συγκριτικά με την ισχύ που παραλαμβάνει από τον ηλιακό συλλέκτη. Το φαινόμενο είναι φανερά πιο έντονο στην περίπτωση του RT27, λόγω των υψηλότερων αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών του υλικού.

Στο επόμενο διάγραμμα της θερμοροής του υλικού, παρατηρείται προφανώς η ίδια μορφή καμπυλών και το γεγονός ότι η θερμική απόδοση του υλικού προς το δωμάτιο διατηρείται σε τιμές ≥ 15 W/m<sup>2</sup>, για όλες τις συλλεκτικές επιφάνειες, επιτρέποντας μικρή απόδοση θερμότητας μετά την διακοπή της ηλιακής ενέργειας, ποσότητα βέβαια ανεπαρκή για το επόμενο 24ωρο στην περίπτωση συννεφιάς.



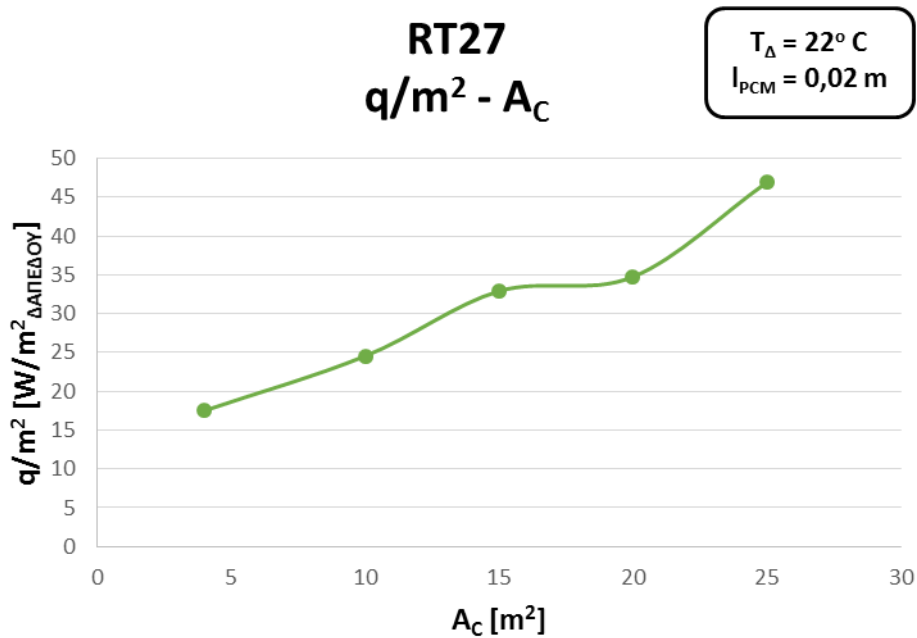
Σχήμα 6.14.2/2 : Καμπύλες Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

<b>RT27 (T<sub>s</sub> - T<sub>l</sub> = 22 - 31 °C)</b>					
<b>T<sub>Δ</sub> = 22°C</b>					
<b>I<sub>PCM</sub> = 0,02m</b>					
	<b>A<sub>c</sub> = 4m<sup>2</sup></b>	<b>A<sub>c</sub> = 10m<sup>2</sup></b>	<b>A<sub>c</sub> = 15m<sup>2</sup></b>	<b>A<sub>c</sub> = 20m<sup>2</sup></b>	<b>A<sub>c</sub> = 25m<sup>2</sup></b>
<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>	24,56	24,33	24,47	24,01	25,45
<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	27,6	44,49	60,93	69,67	80,6
<b>η</b>	0,531	0,853	0,836	0,886	0,696
<b>q/m<sup>2</sup><sub>Δ</sub>. [W/m<sup>2</sup>]</b>	17,52	24,54	32,9	34,74	46,9

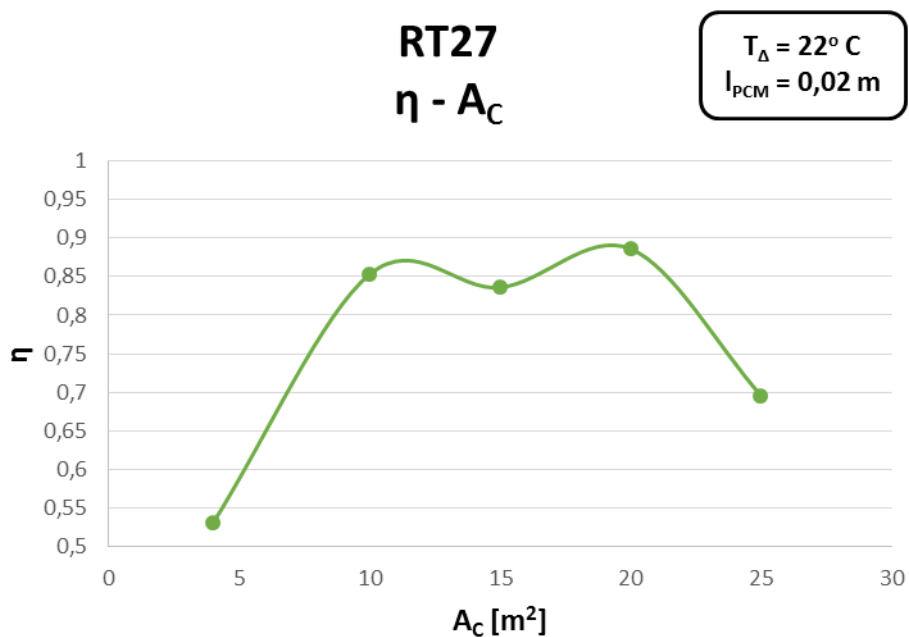
Πίνακας 6.14.2/1 : Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων



Μαζί με τον παραπάνω συγκεντρωτικό πίνακα αποτελεσμάτων, παρατίθενται τα παρακάτω διαγράμματα θερμοροής και βαθμού εκμετάλλευσης του υλικού, συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας.



Σχήμα 6.14.2/3 : Καμπύλη προσδιδόμενης θερμότητας του υλικού συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας



Σχήμα 6.14.2/4 : Καμπύλη βαθμού εκμετάλλευσης του υλικού συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας

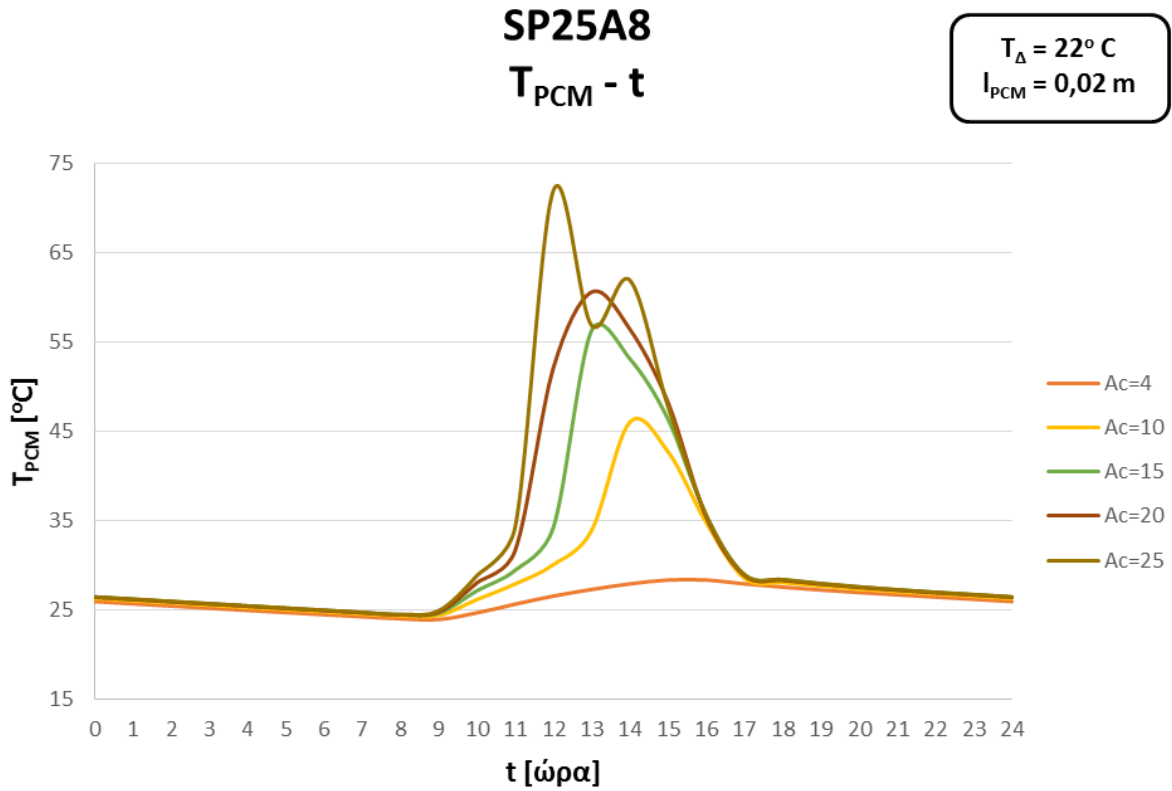
Η προσδιδόμενη θερμότητα του υλικού είναι φυσικά ανάλογη της συλλεκτικής επιφάνειας, ενώ λόγω καταλληλότητας του εύρους λειτουργίας του υλικού για σύστημα θέρμανσης οικίας, αξίζει να αναφερθεί η ικανοποιητική κάλυψη των θερμικών απωλειών για  $A_c \geq 15\text{m}^2$ . Προφανώς, μεγάλο μέρος της θερμοροής προέρχεται και πάλι από αισθητή θερμότητα. Όσον αφορά την καμπύλη μεταβολής του βαθμού εκμετάλλευσης, η αρχική τιμή οφείλεται στην ανεπαρκή επιφάνεια συλλεκτικής επιφάνειας για την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών. Η τελική τιμή του  $\eta$ , εξηγείται από την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών που μετατοπίζουν τον κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης εκτός του εύρους λειτουργίας, μειώνοντας τον βαθμό εκμετάλλευσης. Οι ενδιάμεσες τιμές, αποδεικνύουν την καταλληλότητα των τιμών συλλεκτικής επιφάνειας, με τις οποίες διατηρείται ελάχιστη θερμοκρασία κοντά στην θερμοκρασία εισόδου στην διφασική περιοχή (θερμοκρασία στερεοποίησης  $T_s$ ). Οι μικρές διαφοροποιήσεις των τιμών προκαλούνται από τις μικρές μεταβολές της ελάχιστης θερμοκρασίας κάθε δοκιμής.

Αξίζει να αναφερθεί ότι η μεταβολή του πάχους του στρώματος PCM, επαναφέρει την ομοιομορφία του θερμοκρασιακού προφίλ του υλικού, όπως είναι φυσικό, αφού κάθε ποσό προσδιδόμενης ισχύος του συλλέκτη απορροφάται ομοιόμορφα από την ανάλογη ποσότητα μάζας του υλικού. Στην περίπτωση αυτή, θα δινόταν μία πιο ξεκάθαρη εικόνα της μεταβολής του βαθμού εκμετάλλευσης, ωστόσο οι δοκιμές διαφορετικού πάχους PCM δεν θα ήταν μεταξύ τους συγκρίσιμες.

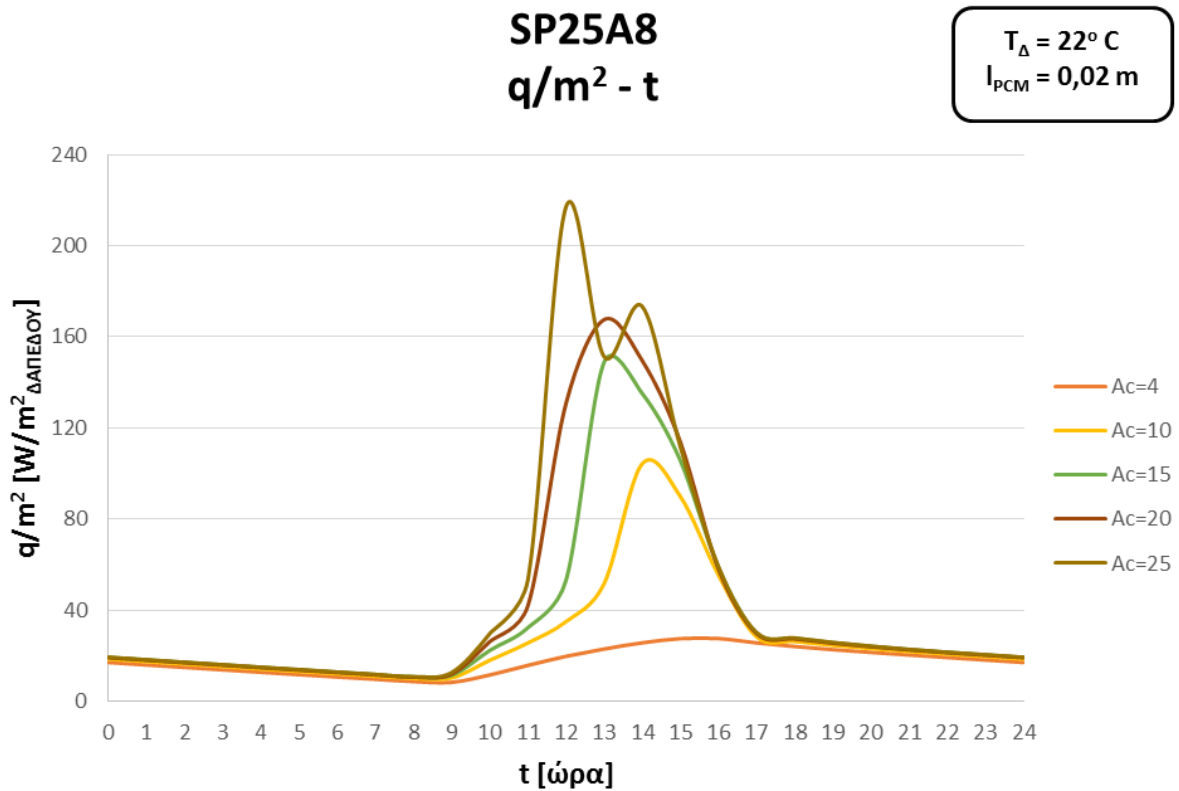
#### 6.14.3 ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ SP25A8

Στα παρακάτω σχήματα δίνονται οι καμπύλες των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών του υλικού και της θερμοροής για τις διάφορες τιμές της συλλεκτικής επιφάνειας  $A_c$ .

Συγκριτικά με τα προηγούμενα υλικά, το θερμοκρασιακό προφίλ των δοκιμών του SP25A8 παρουσιάζει ανομοιομορφία μόνο για μία τιμή συλλεκτικής επιφάνειας, την  $A_c = 25\text{m}^2$ . Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από το μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος, την υψηλή θερμοχωρητικότητα του υλικού, αλλά και την καταλληλότητα του πάχους του στρώματος PCM για τις μεταβολές. Παρόλο που αναπτύσσονται μικρότερες θερμοκρασίες, συγκριτικά με το υλικό RT27, σχεδόν σε όλες τις δοκιμές της παραμέτρου  $A_c$ , η αποδιδόμενη θερμότητα προς το εσωτερικό περιβάλλον εμφανίζεται μεγαλύτερη. Στο επόμενο διάγραμμα της θερμοροής του υλικού, παρατηρείται προφανώς η ίδια μορφή καμπυλών και το γεγονός ότι η θερμική απόδοση του υλικού προς το δωμάτιο διατηρείται σε τιμές  $\geq 17\text{ W/m}^2$ , για όλες τις συλλεκτικές επιφάνειες, επιτρέποντας μικρή απόδοση θερμότητας μετά την διακοπή της ηλιακής ενέργειας, ποσότητα βέβαια ανεπαρκή για το επόμενο 24ωρο στην περίπτωση συννεφιάς.



Σχήμα 6.14.3/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ υλικού για κάθε συλλεκτική επιφάνεια

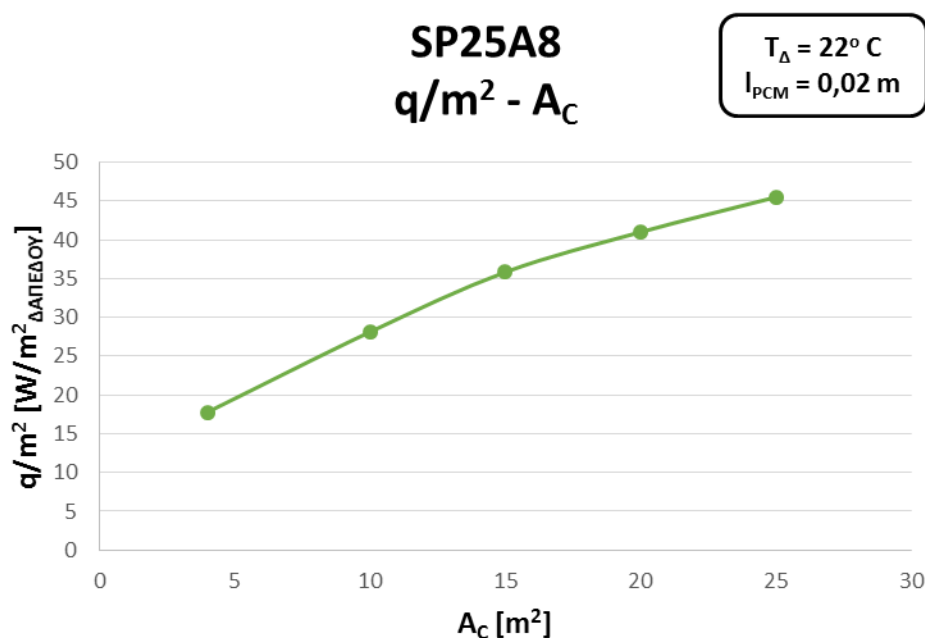


Σχήμα 6.14.3/2 : Καμπύλες Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

Μαζί με τον συγκεντρωτικό πίνακα αποτελεσμάτων, παρατίθενται τα διαγράμματα θερμοροής και βαθμού εκμετάλλευσης του υλικού, συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας.

<b>SP25A8 (<math>T_s - T_l = 22 - 32 \text{ }^\circ\text{C}</math>)</b>					
<b><math>T_\Delta = 22^\circ\text{C}</math></b>					
<b><math>I_{PCM} = 0,02\text{m}</math></b>					
	<b><math>A_C = 4\text{m}^2</math></b>	<b><math>A_C = 10\text{m}^2</math></b>	<b><math>A_C = 15\text{m}^2</math></b>	<b><math>A_C = 20\text{m}^2</math></b>	<b><math>A_C = 25\text{m}^2</math></b>
<b><math>T_{\min} [^\circ\text{C}]</math></b>	23,93	24,32	24,49	24,46	24,5
<b><math>T_{\max} [^\circ\text{C}]</math></b>	28,36	46,02	56,27	60,57	71,95
<b><math>\eta</math></b>	0,619	0,869	0,853	0,856	0,852
<b><math>q/\text{m}^2_\Delta. [\text{W}/\text{m}^2]</math></b>	17,79	28,12	35,83	41	45,5

Πίνακας 6.14.3/1 : Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων

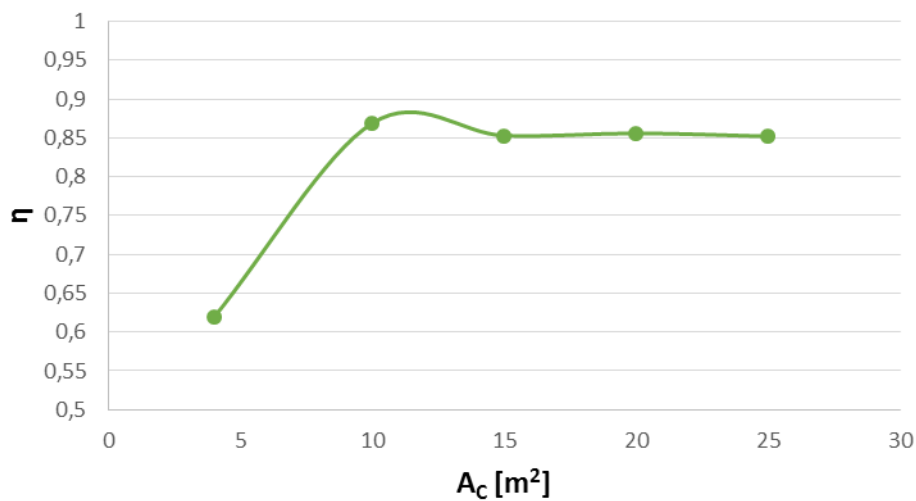


Σχήμα 6.14.3/3 : Καμπύλη προσδιδόμενης θερμότητας του υλικού συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας

Όπως και στα προηγούμενα υλικά, η προσδιδόμενη θερμότητα του υλικού προς το εσωτερικό περιβάλλον είναι μέγεθος ανάλογο της συλλεκτικής επιφάνειας. Το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του SP25A8 κρίνεται κατάλληλο για σύστημα θέρμανσης οικίας, με ικανοποιητική κάλυψη των θερμικών απωλειών για  $A_C \geq 15\text{m}^2$  και μεγάλο μέρος της προσδιδόμενης θερμότητας προερχόμενο από αισθητή θερμότητα απορρόφησης του υλικού.

## SP25A8 $\eta - A_c$

$T_{\Delta} = 22^{\circ} \text{C}$   
 $I_{PCM} = 0,02 \text{ m}$



Σχήμα 6.14.3/4 : Καμπύλη βαθμού εκμετάλλευσης του υλικού συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας

Η καμπύλη μεταβολής του βαθμού εκμετάλλευσης παρουσιάζει την ίδια μορφή με το υλικό RT27, με μόνη διαφορά την τελευταία τιμή. Η αρχική τιμή του  $\eta$  οφείλεται στην ανεπαρκή αποδιδόμενη ισχύ από τον ηλιακό συλλέκτη, λόγω μικρής συλλεκτικής επιφάνειας, η οποία δεν επιτρέπει την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών. Οι υπόλοιπες τιμές του βαθμού εκμετάλλευσης, αποδεικνύουν την καταλληλότητα των τιμών συλλεκτικής επιφάνειας, με τις οποίες διατηρείται ελάχιστη θερμοκρασία κοντά στην θερμοκρασία εισόδου στην διφασική περιοχή (θερμοκρασία στερεοποίησης  $T_s$ ). Οι μικρές διαφοροποιήσεις των τιμών προκαλούνται από τις μικρές μεταβολές της ελάχιστης θερμοκρασίας κάθε δοκιμής.

### 6.14.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διαφοροποίηση του υλικού RT21 σε σχέση με τα υπόλοιπα οφείλεται στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του υλικού, το οποίο δεδομένης της θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου επιτρέπει κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης μόνο στο δεύτερο κομμάτι της διφασικής περιοχής.

Τα υλικά RT27 και SP25A8, για ίδιες τιμές παραμέτρων, παρουσίασαν παρόμοια συμπεριφορά. Ωστόσο, για τις συγκεκριμένες τιμές παραμέτρων το SP25A8 με μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας, παρουσιάζει ομοιόμορφα θερμοκρασιακά προφίλ, υψηλούς βαθμούς εκμετάλλευσης και ελαφρώς υψηλότερη θερμοροή. Συνεπώς, επιλέγεται για την συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας σε μερικώς τροποποιημένη εγκατάσταση.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 6<sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- 
- <sup>1</sup> Κίμωνας Α. Αντωνόπουλος, “**Θερμικά-Ηλιακά Συστήματα**”, ΕΜΠ Αθήνα 2011
  - <sup>2</sup> [http://www.eurostar-solar.com/pdf/certificates/sollar\\_collector/certificate5.pdf](http://www.eurostar-solar.com/pdf/certificates/sollar_collector/certificate5.pdf)
  - <sup>3</sup> Κίμωνας Α. Αντωνόπουλος, “**Θερμικά-Ηλιακά Συστήματα**”, ΕΜΠ Αθήνα 2011
  - <sup>4</sup> Κίμωνας Α. Αντωνόπουλος, “**Κλιματισμός-Μέρος Πρώτο**”, ΕΜΠ Αθήνα 2011
  - <sup>5</sup> Κίμωνας Α. Αντωνόπουλος, “**Θερμικά-Ηλιακά Συστήματα**”, ΕΜΠ Αθήνα 2011
  - <sup>6</sup> Haitian Yang, Yiqian He, “**Solving heat transfer problems with phase change via smoothed effective heat capacity and element-free Galerkin methods**”, International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 37, Issue 4, April 2010, Pages 385–392
  - <sup>7</sup> Κίμωνας Α. Αντωνόπουλος, “**Υπολογιστικές Μέθοδοι Φαινομένων Μεταφοράς**”, ΕΜΠ Αθήνα 2008
  - <sup>8</sup> E.D. Kravvaritis, K.A. Antonopoulos, C. Tzivanidis, “**Experimental determination of the effective thermal capacity function and other thermal properties for various phase change materials using the thermal delay method**”, Applied Energy, Volume 88, Issue 12, December 2011, Pages 4459–4469

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>

### ΜΕΛΕΤΗ ΙΔΑΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCMs) ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΣΕ ΤΟΙΧΟ, ΦΟΡΤΙΖΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΗΛΙΑΚΟΥΣ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ, ΜΕ ΑΠΟΜΑΣΤΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΥ ΝΕΡΟΥ ΧΡΗΣΗΣ

#### 7.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Το αντικείμενο της μελέτης συνεχίζει να είναι η απόδοση και συμπεριφορά του συστήματος θέρμανσης PCM ενσωματωμένων σε τοίχο, με μοναδική διαφοροποίηση την χρήση απομάστευσης του νερού κυκλοφορίας προς την θέρμανση ζεστού νερού χρήσης.

Η εγκατάσταση αποτελείται από το κύκλωμα θερμού νερού της συστοιχίας των ηλιακών συλλεκτών, το οποίο τροφοδοτεί στρώσεις υλικού αλλαγής φάσης ενσωματωμένων σε τοίχο και δεξαμενή με εναλλάκτη (boiler). Το θερμό νερό παροχής  $\dot{m}_o$  [Kg/s] εξέρχεται από τους ηλιακούς συλλέκτες και διακλαδίζεται σε δύο παροχές νερού, την  $\dot{m}_τ$  [Kg/s] (τοίχου) για την φόρτιση των PCM και την  $\dot{m}_χ$  [Kg/s] (χρήσης) για την θέρμανση του νερού χρήσης (ζεστό νερό χρήσης-Z.N.X) στην δεξαμενή.

Η λειτουργία της εφαρμογής των ΥΑΦ εσωτερικά του τοίχου αναλύθηκε λεπτομερώς στο προηγούμενο κεφάλαιο, συνεπώς δεν κρίνεται απαραίτητη η επανάληψη της ανάλυσης. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν παραμένουν ίδια και θα παρατεθούν σε συγκεντρωτικό πίνακα στην συνέχεια. Η μελέτη της εγκατάστασης θα πραγματοποιηθεί μόνο για το υλικό **SP25A8**, με σταθερές τις παραμέτρους της θερμοκρασίας εσωτερικού περιβάλλοντος (δωματίου)  $T_{\Delta} = 22^{\circ}\text{C}$  και του πάχους του στρώματος PCM  $I_{\text{PCM}} = 0,02\text{m}$ , αλλά με μεταβολή της συλλεκτικής επιφάνειας  $A_c$ .

Η δεξαμενή περιλαμβάνει εναλλάκτη θερμότητας με θερμαντική σπείρα (σερπαντίνα), μέσω της οποίας τροφοδοτείται το θερμό νερό κυκλοφορίας του συλλέκτη, για την μετάδοση θερμότητας στο κρύο νερό δικτύου, που πληρεί την δεξαμενή. Όπως φαίνεται και στην σχηματική απεικόνιση της εγκατάστασης, που παρατίθεται παρακάτω, η δεξαμενή έχει δύο εισόδους, δύο εξόδους και ηλεκτρική αντίσταση ως βοηθητική πηγή θέρμανσης του νερού χρήσης. Η είσοδος του θερμού νερού από τον συλλέκτη στον εναλλάκτη, πραγματοποιείται με θερμοκρασία  $T_o$ , ενώ η έξοδος με θερμοκρασία  $T_χ$ . Το νερό του δικτύου εισέρχεται από το κάτω μέρος της δεξαμενής με παροχή  $\dot{m}_\delta$  [Kg/s] (δικτύου) και εξέρχεται από το πάνω μέρος, προς χρήση, με θερμοκρασία  $T_{z.n.x}$ .

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να τονισθεί το γεγονός ότι αντικείμενο της μελέτης αποτελεί η συμπεριφορά της εφαρμογής των υλικών αλλαγής φάσης. Συνεπώς, η εξέταση των θερμικών συναλλαγών στο περιβάλλον της δεξαμενής, πραγματοποιείται σε **ιδανικό** επίπεδο μόνο. Διατίθεται ευρύ φάσμα μοντέλων

προσομοίωσης της διαστρωμάτωσης που δημιουργείται στο περιεχόμενο της δεξαμενής λόγω διαφορετικών πυκνοτήτων, ξεκινώντας από τα μοντέλα πλήρους ανάμειξης μέχρι τα μοντέλα πολλών στρωμάτων. Ωστόσο, η **ιδανική** και μόνιμη κατάσταση που μελετάται προσεγγίζει την περίπτωση πλήρους ανάμειξης. Για λόγους απλότητας, λοιπόν, θεωρούμε την δεξαμενή **άπειρης χωρητικότητας, ομοιόμορφης θερμοκρασίας, χωρίς** την δυνατότητα **διαστρωμάτωσης** του νερού και **αμελητέων θερμικών απωλειών**. Είναι απολύτως κατανοητό ότι οι παραπάνω παραδοχές δεν ανταποκρίνονται σε πραγματικές συνθήκες, αλλά εξυπηρετούν την εστίαση της μελέτης στο σύστημα θέρμανσης υλικών αλλαγής φάσης.

Συνεχίζοντας, η συναλλαγή θερμότητας στον εναλλάκτη θα θεωρηθεί **ιδανική**, με την θερμοκρασία του ζεστού νερού χρήσης (έξοδος δεξαμενής) να εξέρχεται με θερμοκρασία ίση της εισόδου του θερμού νερού κυκλοφορίας του συλλέκτη στον εναλλάκτη,  $T_{z.n.x.}=T_o$ . Η παραδοχή αυτή δεν ανταποκρίνεται σε πραγματικές συνθήκες, αλλά θεωρείται, σε πρώτη φάση, για λόγους απλότητας, ενώ θα μεταβληθεί στο επόμενο κεφάλαιο της μελέτης.

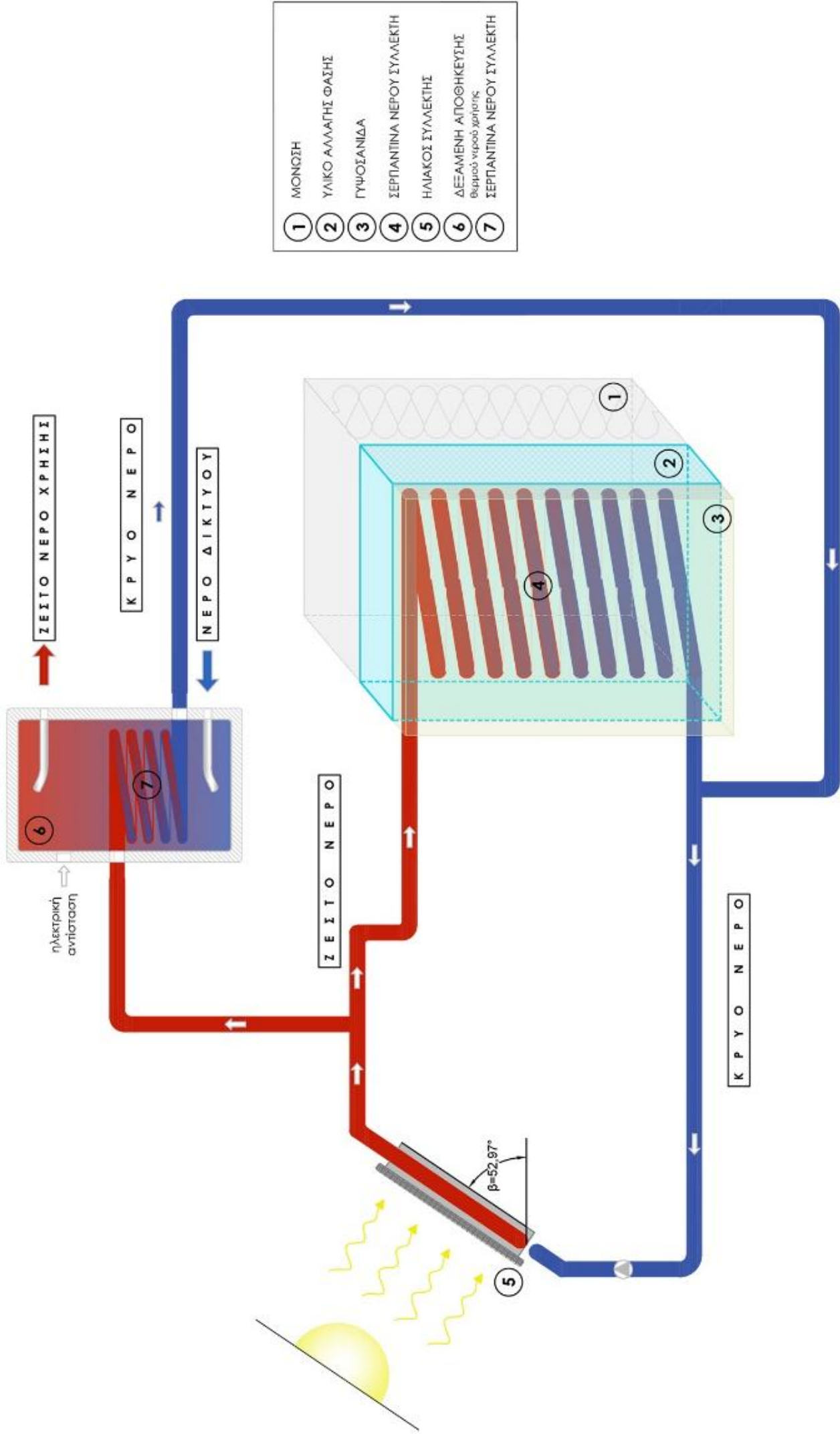
Παρακάτω δίνεται συγκεντρωτικός πίνακας των στοιχείων που παραμένουν σταθερά από την αρχική εγκατάσταση του προηγούμενου κεφαλαίου.

<b>ΥΛΙΚΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ SP25A8</b>	
Πραγματικό Θερμοκρασιακό Εύρος Λειτουργίας [°C]	$T_s - T_l = 22 - 32$
Θερμοχωρητικότητα Στερεής Κατάστασης [J/KgK]	$C_{p_s} = 2600$
Θερμοχωρητικότητα Υγρής Κατάστασης [J/KgK]	$C_{p_l} = 2700$
Θερμότητα Αλλαγής Φάσης [J/KgK]	$H = 141500$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [m]	$l_{PCM} = 0,02$
Τυπική Τιμή Πυκνότητας Υλικού Αλλαγής Φάσης [Kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{PCM} = 790$
<b>ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΩΜΑΤΙΟΥ</b>	
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος (δωματίου) [°C]	$T_{\Delta} = 22$
Πάχος Γυψοσανίδας [m]	$l_{\Gamma\psi} = 0,01$
Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας Γυψοσανίδας [W/mK]	$k_{\Gamma\psi} = 0,21$
Συντελεστής Συναγωγής Αέρα Εσωτερικού Περιβάλλοντος [W/m <sup>2</sup> K]	$h_{in} = 8$
Εμβαδόν Επιφάνειας Τοίχου Συναλλαγής [m <sup>2</sup> ]	$A_T = 9$
Εμβαδόν Επιφάνειας Δαπέδου Δωματίου [m <sup>2</sup> ]	$A_{\Delta} = 12$
<b>ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ</b>	
Γινόμενο Στοιχείων $F_R(\tau\alpha)$	$F_R(\tau\alpha) = 0,64$
Γινόμενο Στοιχείων $F_R U_L$	$F_R U_L = 4,23$

Πίνακας 7.1/1 : Συγκεντρωτικός Πίνακας Δεδομένων

Τέλος, στην επόμενη σελίδα δίνεται η σχηματική απεικόνιση της εγκατάστασης, με την διαστρωμάτωση του τοίχου να παραμένει ίδια με την αρχική εγκατάσταση στο προηγούμενο κεφάλαιο.





Σχήμα 7.1/1 : Σχηματική Απεικόνιση Εγκατάστασης

## 7.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ [βιβλ. 1, 2]

Η χρήση της επαναληπτικής διαδικασίας και της μεθόδου θερμοχωρητικότητας αναλύθηκαν λεπτομερώς στην αρχή του προηγούμενου κεφαλαίου. Συνεπώς, για την καινούργια τροποποιημένη εγκατάσταση θα παρατεθεί μόνο η υπολογιστική διαδικασία με την σειρά των παραμετρικών εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν. Οι τροποποιήσεις στις εξισώσεις είναι μικρές, ενώ παραμέτρους της μελέτης θα αποτελέσουν η συλλεκτική επιφάνεια  $A_c$  και οι παροχές θερμού νερού του συλλέκτη  $\dot{m}_o$ ,  $\dot{m}_x$  και  $\dot{m}_T$ .

Το νερό κυκλοφορίας της σερπαντίνας στον τοίχο εισέρχεται στην αρχή της ώρας με θερμοκρασία  $T_o = T_{PCM}^{PIN}$  και εξέρχεται στο τέλος της ώρας με θερμοκρασία ίση με το υλικό αλλαγής φάσης,  $T_{PCM}^{META}$ . Παρομοίως, το νερό κυκλοφορίας του εναλλάκτη στην δεξαμενή (σερπαντίνα δεξαμενής) εισέρχεται με θερμοκρασία  $T_o$  και εξέρχεται στο δίκτυο κυκλοφορίας του συλλέκτη με θερμοκρασία  $T_x$ . Συνεπώς, το ρεύμα εισόδου στον συλλέκτη ( $\dot{m}_o$ ) θερμοκρασίας  $T_{fi}$  αποτελεί ανάμειξη των δύο ρευμάτων εξόδου από τον τοίχο ( $\dot{m}_T, T_{PCM}^{META}$ ) και από τον εναλλάκτη της δεξαμενής ( $\dot{m}_x, T_x$ ).

Για την εκκίνηση της επαναληπτικής διαδικασίας στο Excel με το σύστημα των εξισώσεων και χρονικό βήμα  $\Delta t = 1h$ , απαιτείται η υπόθεση της αρχικής θερμοκρασίας  $T_{fi \text{ ΑΡΧΙΚΗ}} = 22^\circ C$ , η οποία λαμβάνεται ίση με την θερμοκρασία του δωματίου.

Με γνωστή την θερμοκρασία εισόδου του νερού στον συλλέκτη,  $T_{fi}$ , υπολογίζεται η αποδιδόμενη θερμική ισχύς του ηλιακού συλλέκτη στο νερό κυκλοφορίας του συστήματος, από την σχέση :

$$Q_u = A_c * [F_R(\tau\alpha) * G_T - F_R U_L * (T_{fi} - T_a)] [W] \quad \{1\}$$

Όπως έχει ήδη τονισθεί οι συναλλαγές θερμότητας σε ολόκληρη την εγκατάσταση θεωρούνται **ιδανικές, χωρίς θερμικές απώλειες**. Συνεπώς, η παραπάνω θερμική ισχύς του συλλέκτη αποδίδεται πλήρως στο ρεύμα νερού κυκλοφορίας του συλλέκτη, σύμφωνα με τον παρακάτω ισολογισμό ενέργειας, μέσω του οποίου υπολογίζεται η θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον συλλέκτη :

$$Q_u = \dot{m}_o * C_{p_v} * (T_o - T_{fi}) \quad \{2\}$$

$\dot{m}_o$  : η ολική παροχή μάζας του νερού κυκλοφορίας του συλλέκτη [Kg/s]

$C_{p_v}$  : η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού υπό σταθερή πίεση  $C_{p_v} = 4190 \text{ J/KgK}$ .

Με γνωστή την θερμοκρασία  $T_o = T_{PCM}^{PIN}$ , προχωράμε στον υπολογισμό της ενεργούς θερμοχωρητικότητας του υλικού για ολόκληρη την ώρα, που δίνεται από τις επόμενες σχέσεις, ανάλογα με την τιμή της θερμοκρασίας :

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

$$C_{P_{eff}} = 4(H - b * C_{P_s}) * \frac{(T - T_s)}{b^2} + C_{P_s} \quad \{3\}$$

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

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

Γνωρίζοντας πλέον όλα τα απαραίτητα μεγέθη, δίνεται η σχέση ισολογισμού της ιδανικής συναλλαγής θερμότητας του θερμού νερού με το υλικό αλλαγής φάσης στον τοίχο, μέσω της οποίας υπολογίζεται η θερμοκρασία του υλικού στο τέλος της ώρας  $T_{PCM}^{META}$  :

$$\begin{aligned} m_{PCM} * C_{P_{eff}} * (T_{PCM}^{META} - T_{PCM}^{PPIN}) &= \\ &= [\dot{m}_T * C_{P_v} * (T_o - T_{PCM}^{PPIN}) + U * A_T * (T_{\Delta} - T_{PCM}^{PPIN})] * 3600 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow T_{PCM}^{META} = T_{PCM}^{PPIN} + \frac{[\dot{m}_T * C_{P_v} * T_o + U * A_T * (T_{\Delta} - T_{PCM}^{PPIN})] * 3600}{m_{PCM} * C_{P_{eff}}} \quad \{5\}$$

$\dot{m}_o$  : η παροχή μάζας του νερού κυκλοφορίας του συλλέκτη στον τοίχο-PCM [Kg/s]

Η θερμοκρασία αυτή αποτελεί την θερμοκρασία του υλικού στο τέλος της ώρας, αλλά και την θερμοκρασία του νερού παροχής  $\dot{m}_T$  που εξέρχεται από την σερπαντίνα του τοίχου για ανάμειξη στο δίκτυο κυκλοφορίας του συλλέκτη.

Συνεχίζοντας, με τον ισολογισμό ενέργειας στον εναλλάκτη θερμότητας της δεξαμενής, παρουσία αμελητέων απωλειών, υπολογίζεται η θερμοκρασία εξόδου του νερού παροχής  $\dot{m}_X$  από την θερμομαντική σπείρα :

$$\begin{aligned} \dot{m}_X * C_{P_v} * (T_o - T_X) &= \dot{m}_\delta * C_{P_v} * (T_{Z.N.X.} - T_\delta) \\ \Rightarrow T_X &= T_o - \frac{\dot{m}_\delta * (T_o - T_\delta)}{\dot{m}_X} \end{aligned} \quad \{6\}$$

$\dot{m}_X$  : η παροχή μάζας του νερού κυκλοφορίας από τον συλλέκτη στον εναλλάκτη [Kg/s].

$\dot{m}_\delta$  : η παροχή μάζας του νερού δικτύου στην δεξαμενή [Kg/s].

$T_{z.n.x}$  : η θερμοκρασία εξόδου του ζεστού νερού χρήσης από την δεξαμενή, η οποία όπως αναφέρθηκε παραπάνω έχει τιμή  $T_{z.n.x} = T_o$  [°C].

$T_\delta$  : η μέση μηνιαία θερμοκρασία του νερού δικτύου για τον Ιανουάριο,  $T_\delta = 10,4$  °C, όπως παρατίθεται σε Τεχνική Οδηγία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος (Τ.Ε.Ε.) (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010)

Η παροχή μάζας  $\dot{m}_\delta$  αφορά την ωριαία κατανάλωση ζεστού νερού χρήσης τον χειμώνα. Η κατανάλωση του ζεστού νερού χρήσης από την δεξαμενή συμπληρώνεται απευθείας από το δίκτυο, κρατώντας σταθερή την περιεκτικότητα νερού της δεξαμενής. Οι τιμές της παροχής  $\dot{m}_\delta$  για ολόκληρο το 24ωρο, λήφθηκαν από διαθέσιμο Προφίλ Κατανάλωσης Ζεστού Νερού Χρήσης του 24ώρου, της πορτογαλικής εταιρείας Netgreen Solar και δίνονται στον επόμενο πίνακα.

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

Πίνακας 7.2/1 : 24ωρη Κατανάλωση Ζεστού Νερού Χρήσης

Προφανώς για την χρήση των συγκεκριμένων παροχών στις εξισώσεις πραγματοποιήθηκε μετατροπή των τιμών σε μονάδες [Kg/s].

Η τελική εξίσωση υπολογισμού της θερμοκρασίας εισόδου του νερού στον συλλέκτη  $T_{fi}$ , δίνεται από την παρακάτω σχέση ανάμειξης των ρευμάτων εξόδου του νερού από τον τοίχο και εξόδου του νερού από τον εναλλάκτη :

$$\dot{m}_x * C_{p \nu} * T_x + \dot{m}_T * C_{p \nu} * T_{PCM}^{META} = \dot{m}_o * C_{p \nu} * T_{fi} \quad \{7\}$$

Με αυτόν τον τρόπο επαναλαμβάνεται η υπολογιστική διαδικασία για ολόκληρο το 24ωρο και συνεχίζεται μέχρι την σύγκλιση των αποτελεσμάτων, που επιτυγχάνεται συνήθως μετά από τέσσερα 24ωρα.

Η παροχή μάζας νερού  $\dot{m}_o$  αφορά την συνολική παροχή νερού που φορτίζεται από την συστοιχία των ηλιακών συλλεκτών και διαφοροποιείται για κάθε συνολική συλλεκτική επιφάνεια. Η τυπική τιμή παροχής νερού ενός ηλιακού συλλέκτη είναι **0,01 Kg/s**, θεωρώντας συλλεκτική επιφάνεια **1 m<sup>2</sup>**. Συνεπώς, για κάθε τιμή της παραμέτρου της συνολικής συλλεκτικής επιφάνειας, που θα εξετασθεί στην συνέχεια της μελέτης, αντιστοιχεί συγκεκριμένη συνολική παροχή μάζας νερού της συστοιχίας.

Επίσης, όπως αναφέρθηκε στην αρχή, η παροχή  $\dot{m}_o$  διακλαδίζεται στις παροχές  $\dot{m}_x$  και  $\dot{m}_T$ , με την παροχή  $\dot{m}_x$  να αποτελεί παράμετρο της μελέτης. Τα εξεταζόμενα

ποσοστά παροχής της απομάστευσης θα είναι το **20%** και **40%** της συνολικής παροχής  $\dot{m}_o$ .

Με την ολοκλήρωση κάθε επαναληπτικής διαδικασίας/δοκιμής του υλικού, χρησιμοποιώντας τις τελικές τιμές των θερμοκρασιών  $T_{PCM}^{META}$ , υπολογίζεται η θερμότητα ( $q$  [W]) που προσδίδεται από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον του δωματίου.

$$q = U * A_T * (T_{PCM}^{META} - T_{\Delta}) [W] \quad \{8\}$$

Το μελετούμενο σύστημα θέρμανσης με PCM, θεωρείται αποδοτικό και επιτυχές **μόνο** στην περίπτωση που υπερκαλύπτει την τυπική τιμή θερμικών απωλειών **15-35 W/m<sup>2</sup> δαπέδου**, ενός δωματίου σύγχρονου κτιρίου με μόνωση και επιφάνεια δαπέδου **A<sub>Δ</sub> = 12 m<sup>2</sup>**.

Συνεπώς, υπολογίζοντας τον **μέσο όρο** της θερμικής παροχής/ m<sup>2</sup> δαπέδου ( $q/m^2$ ) ολόκληρου του 24ώρου, δύναται μία προσέγγιση ως προς την θερμική κάλυψη που επιτυγχάνει το σύστημα θέρμανσης με PCM.

$$q/m^2 \text{ δαπέδου} = q/A_{\Delta} = q/12m^2 [W/m^2] \quad \{9\}$$

Σημειώνεται η περίπτωση θερμοροής  $q/m^2$  δαπέδου, **αρνητικού προσήμου**, η οποία αποδεικνύει απλά την απορρόφηση θερμότητας του υλικού από το δωμάτιο για την συγκεκριμένη ώρα. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται με την πτώση της θερμοκρασίας του PCM χαμηλότερα της θερμοκρασίας δωματίου, ωστόσο αντιστοιχεί σε μικρή απορρόφηση θερμότητας αφού η ελάχιστη θερμοκρασία του υλικού προσεγγίζει την θερμοκρασία δωματίου.

Τέλος, με τον υπολογισμό του εμβαδού **H<sub>o</sub>** της καμπύλης που διαγράφει ο κύκλος φόρτισης-αποφόρτισης του ΥΑΦ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής (επαναληπτική διαδικασία για τέσσερα 24ωρα), ορίζεται ο **βαθμός εκμετάλλευσης ε** του υλικού από την παρακάτω σχέση :

$$\varepsilon = \frac{H_o}{H} = \frac{\text{εμβαδόν πραγματικού κύκλου φόρτισης}}{\text{εμβαδόν ιδανικού κύκλου φόρτισης}} \quad \{10\}$$

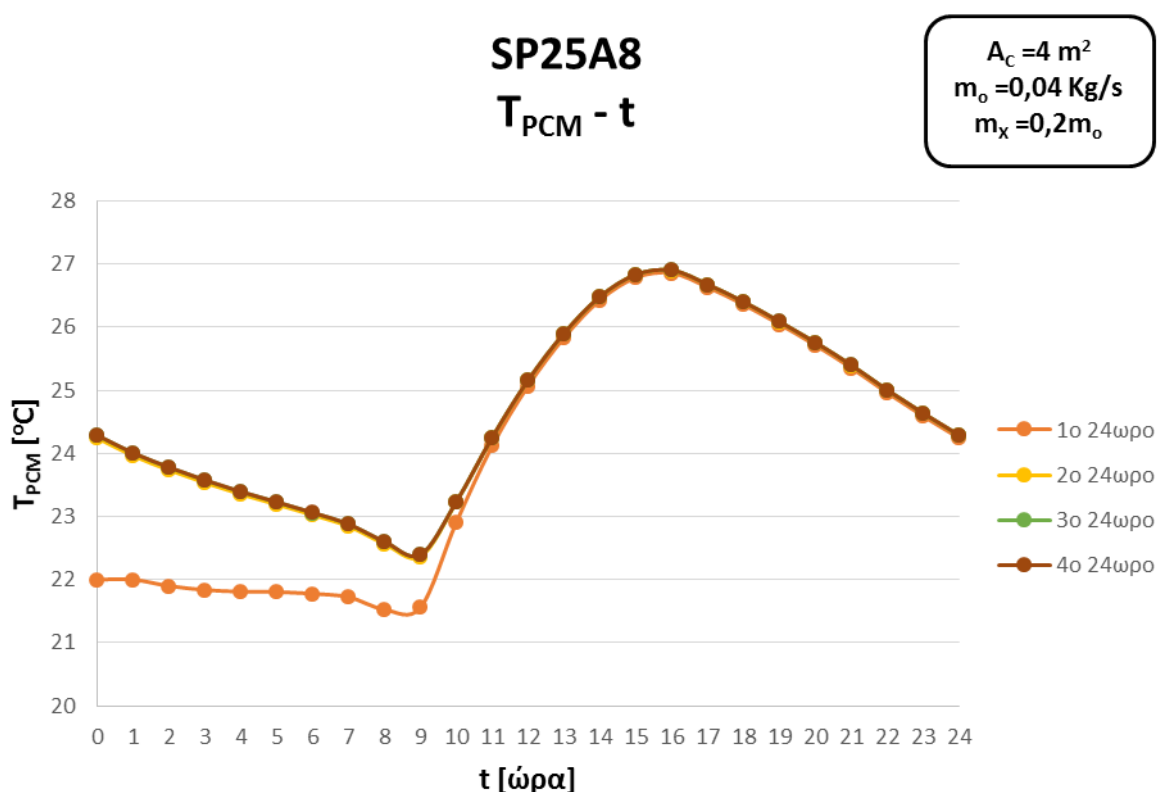
Σε αυτό το σημείο, πριν την παράθεση των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν, είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι η τυπική θερμοκρασία **ζεστού νερού χρήσης** για τους χειμερινούς μήνες είναι οι **45-55°C**. Εξαιτίας της ιδανικής λειτουργίας του εναλλάκτη και της δεξαμενής αναμένεται απλά προσέγγιση του θερμοκρασιακού προφίλ του ζεστού νερού χρήσης, η οποία όμως δεν ανταποκρίνεται σε πραγματικές συνθήκες. Σε επόμενο κεφάλαιο, πραγματοποιείται μία πιο αντικειμενική προσέγγιση της συναλλαγής θερμότητας του εναλλάκτη, χωρίς όμως να λαμβάνονται και πάλι υπόψη οι πραγματικές συνθήκες λειτουργίας της δεξαμενής (boiler), οι οποίες δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

### 7.3 1<sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ $A_c = 4 \text{ m}^2$

Παρόλο που η συλλεκτική επιφάνεια των  $4 \text{ m}^2$  κρίθηκε από προηγούμενες δοκιμές ανεπαρκής ως προς τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες και την αποδιδόμενη θερμότητα του υλικού, πραγματοποιείται δοκιμή για λόγους πληρότητας.

Παράμετροι 1 <sup>ης</sup> Δοκιμής SP25A8	
Συλλεκτική Επιφάνεια [ $\text{m}^2$ ]	$A_c = 4$
Συνολική Παροχή Μάζας Νερού Συλλέκτη [ $\text{Kg/s}$ ]	$\dot{m}_o = 0,04$
Παροχή Μάζας Νερού Εναλλάκτη	$\dot{m}_x = 0,2\dot{m}_o$
Παροχή Μάζας Νερού Τοίχου-PCM	$\dot{m}_T = 0,8\dot{m}_o$
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\Delta} = 22$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [ $\text{m}$ ]	$l_{\text{PCM}} = 0,02$

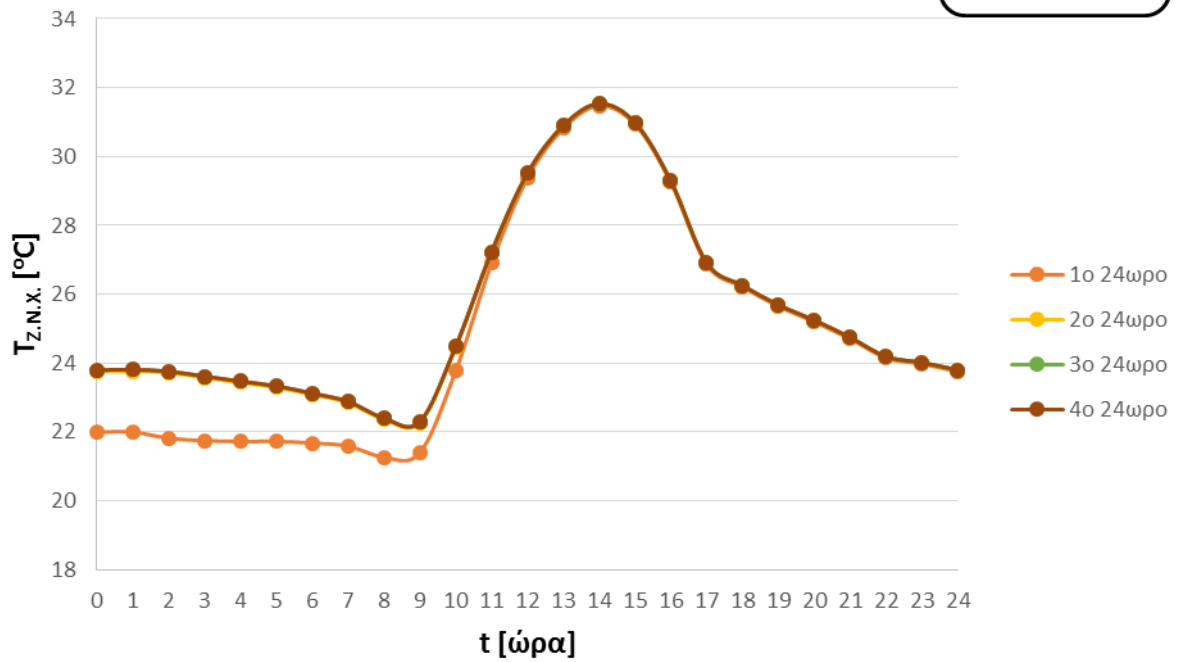
Πίνακας 7.3/1 : Παράμετροι 1ης Δοκιμής SP25A8



Σχήμα 7.3/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου

**SP25A8**  
 $T_{Z.N.X.} - t$

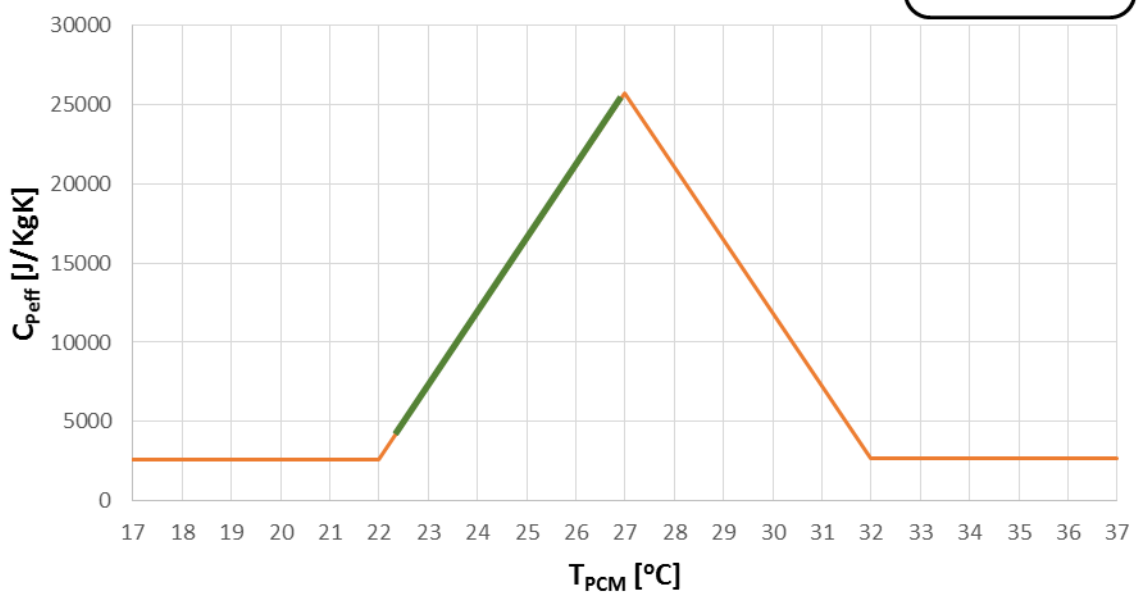
$A_c = 4 \text{ m}^2$   
 $m_o = 0,04 \text{ Kg/s}$   
 $m_x = 0,2m_o$



Σχήμα 7.3/2 : Θερμοκρασιακό Προφίλ Ζεστού Νερού Χρήσης

**SP25A8**  
 $C_{Peff} - T_{PCM}$

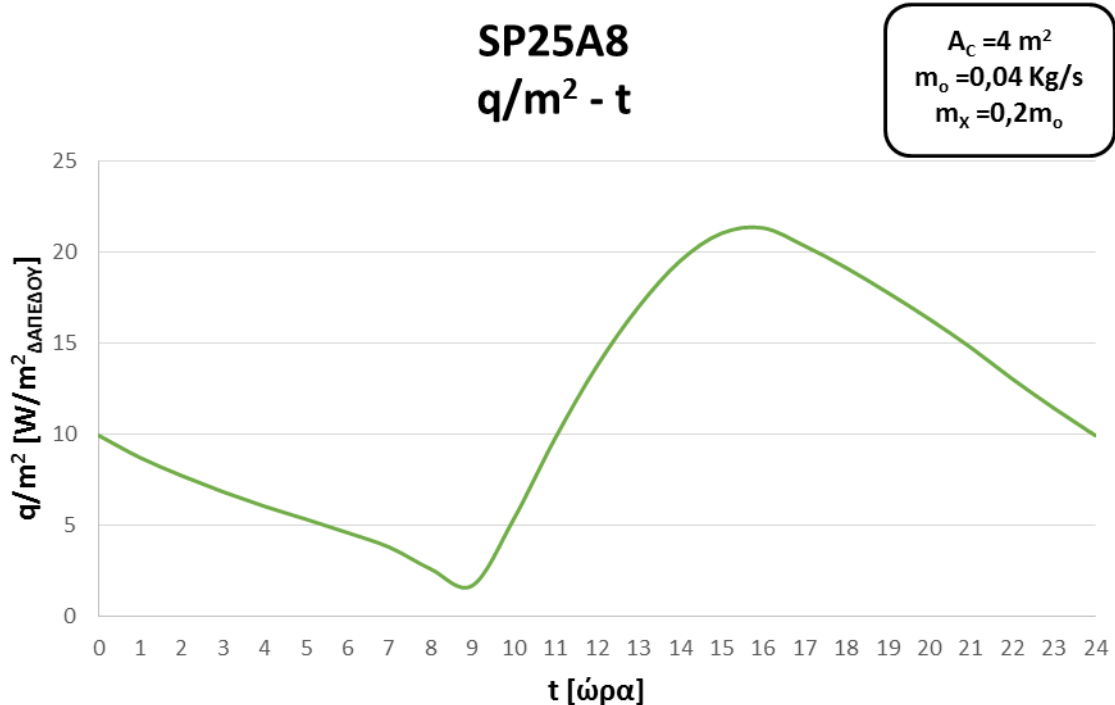
$A_c = 4 \text{ m}^2$   
 $m_o = 0,04 \text{ Kg/s}$   
 $m_x = 0,2m_o$



Σχήμα 7.3/3 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 1<sup>ης</sup> Δοκιμής :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{25255,2}{141500} = 0,473$$



Σχήμα 7.3/4 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [W/m<sup>2</sup> δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **11,51 W/m<sup>2</sup>**.

Όπως ήταν αναμενόμενο λόγω ανεπαρκούς συλλεκτικής επιφάνειας, δεν αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες του υλικού αλλαγής φάσης, με αποτέλεσμα μειωμένη αποδιδόμενη θερμότητα, αλλά και χαμηλό βαθμό εκμετάλλευσης. Η θέρμανση του νερού χρήσης κρίνεται επίσης ανεπαρκής αφού ο μέσος όρος των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι  $\bar{T}_{z.n.x.} = 25,49^\circ\text{C}$ , σημαντικά χαμηλότερος της επιθυμητής θερμοκρασίας. Συνεχίζοντας, η τιμή της παροχής  $\dot{m}_o$  βρίσκεται σε αντιστοιχία με την συγκεκριμένη συλλεκτική επιφάνεια (ανάλογα μεγέθη), ενώ σημειώνεται ότι η αύξησή της θα μείωνε τις τιμές αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών ολόκληρης της εγκατάστασης.

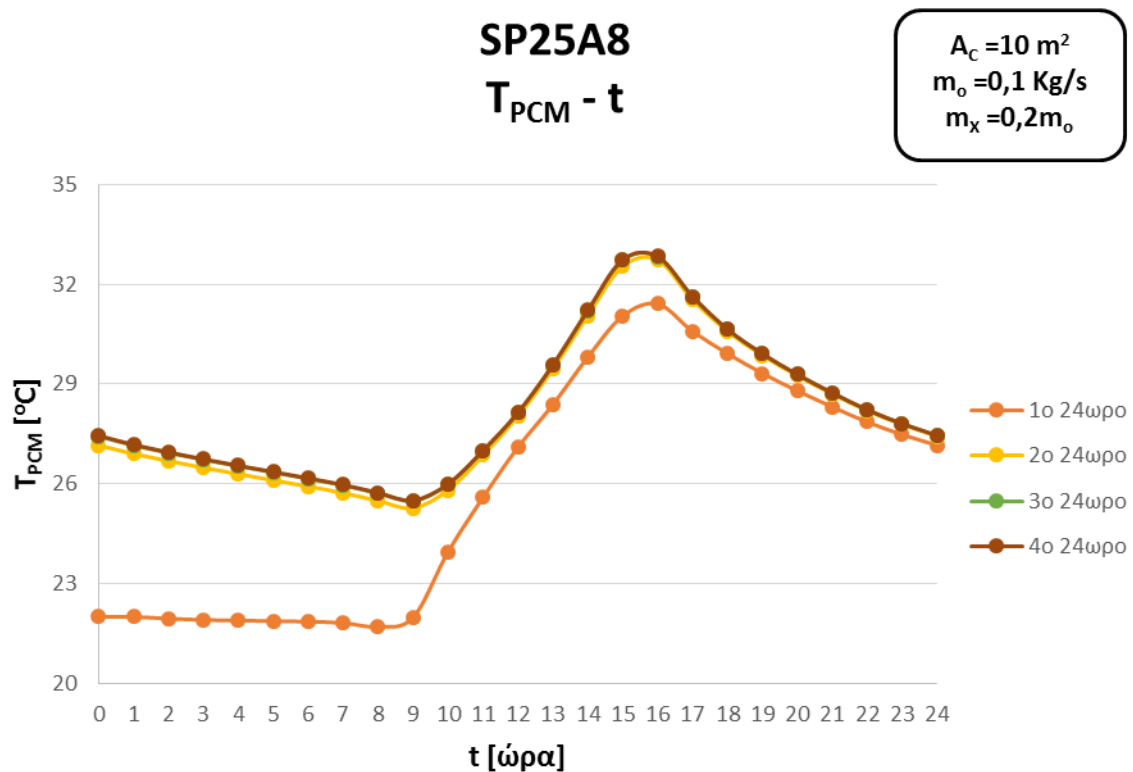
Τέλος, σημειώνεται ότι η πλήρης αποφόρτιση του υλικού πραγματοποιείται σε διάρκεια ελαφρώς μεγαλύτερη του ενός 24ώρου, χωρίς να έχει την δυνατότητα απόδοσης την επόμενη ημέρα, στην περίπτωση συννεφιάς. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.3/4, η προσδιδόμενη θερμότητα του υλικού στο τέλος του 24ώρου είναι ήδη ανεπαρκής για την θέρμανση του χώρου, ενώ μηδενίζεται τις πρώτες ώρες της επόμενης συννεφιασμένης ημέρας.



## 7.4 2<sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ $A_c = 10 \text{ m}^2$

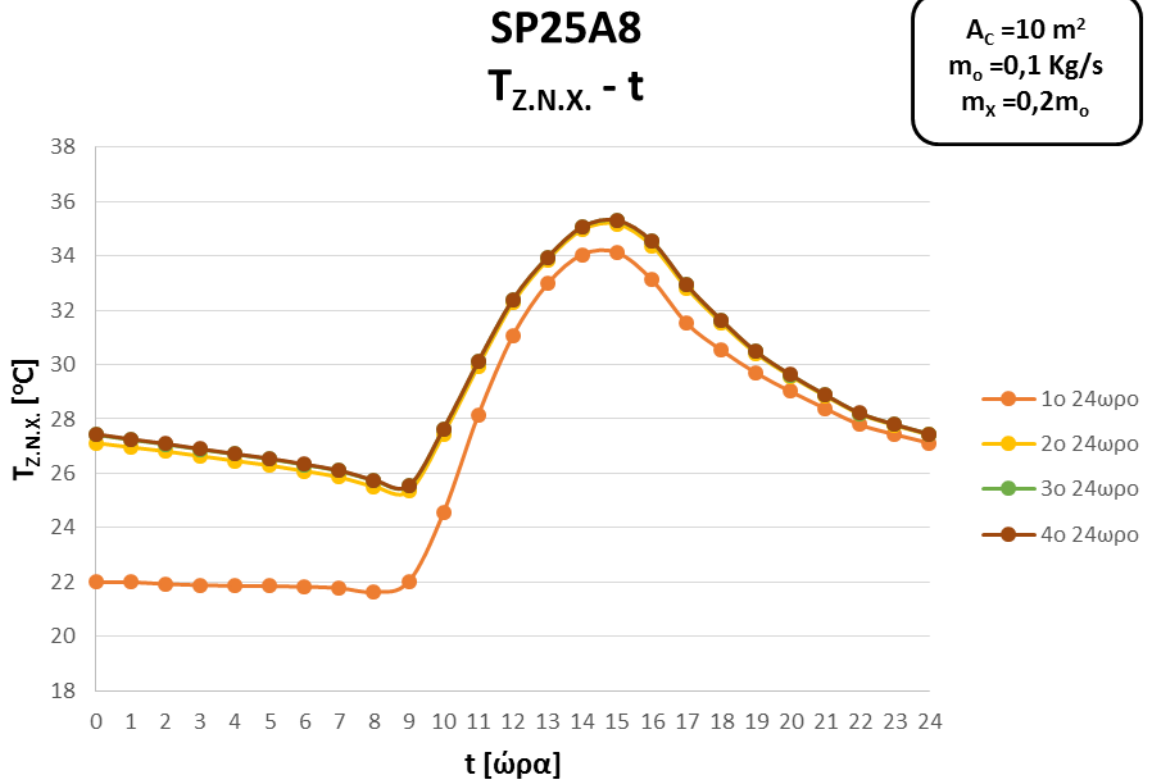
Παράμετροι 2 <sup>ης</sup> Δοκιμής SP25A8	
Συλλεκτική Επιφάνεια [ $\text{m}^2$ ]	$A_c = 10$
Συνολική Παροχή Μάζας Νερού Συλλέκτη [ $\text{Kg/s}$ ]	$\dot{m}_o = 0,1$
Παροχή Μάζας Νερού Εναλλάκτη	$\dot{m}_x = 0,2\dot{m}_o$
Παροχή Μάζας Νερού Τοίχου-PCM	$\dot{m}_T = 0,8\dot{m}_o$
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\Delta} = 22$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [ $\text{m}$ ]	$l_{\text{PCM}} = 0,02$

Πίνακας 7.4/1 : Παράμετροι 2ης Δοκιμής SP25A8

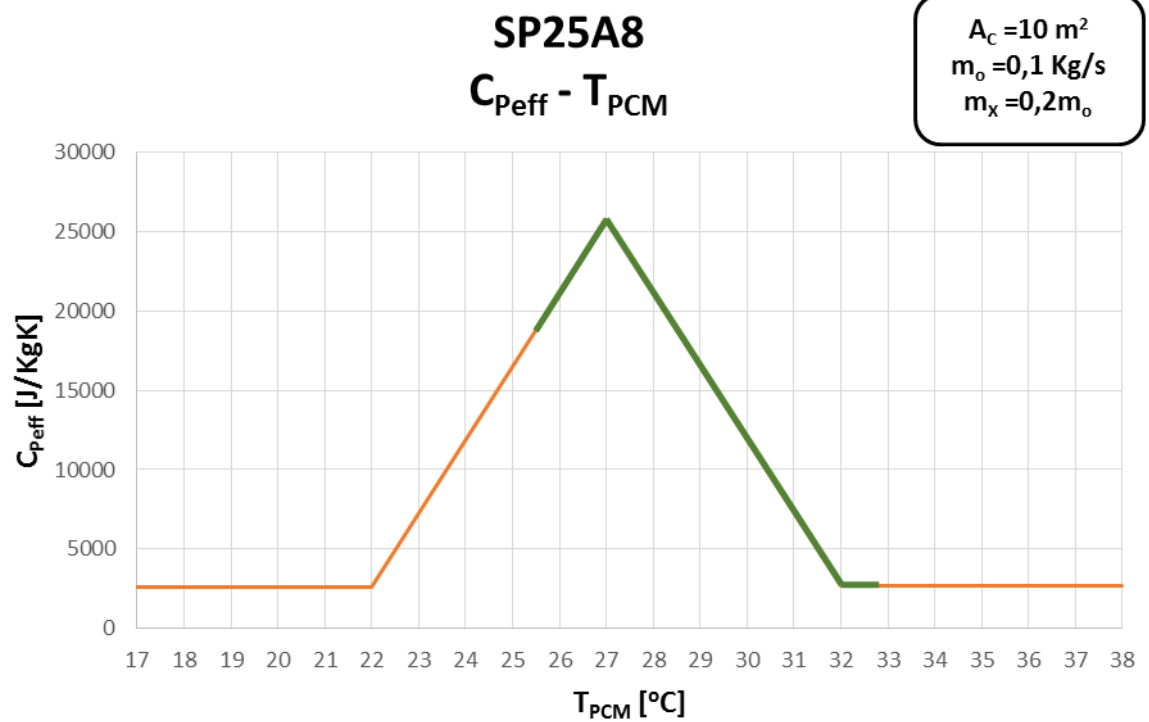


Σχήμα 7.4/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου

Η αρχική θερμοκρασία της επανάληψης του 1<sup>ο</sup> 24ώρου αποτελεί την θερμοκρασία δωματίου ( $22^{\circ}\text{C}$ ), η οποία είναι πολύ χαμηλή συγκριτικά με τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες του υλικού για την συλλεκτική επιφάνεια των  $10\text{m}^2$ . Ως αποτέλεσμα παρατηρείται η πλήρης διαφοροποίηση του θερμοκρασιακού προφίλ του 1<sup>ου</sup> 24ώρου, ωστόσο επιτυγχάνεται γρήγορα η σύγκλιση των αποτελεσμάτων το επόμενο 24ωρο. Η αρχική αυτή θερμοκρασία διατηρείται ίδια για όλες τις δοκιμές, εφόσον δεν αποτελεί εμπόδιο στην διαδικασία υπολογισμών και στην σύγκλιση των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 7.4/2 : Θερμοκρασιακό Προφίλ Ζεστού Νερού Χρήσης



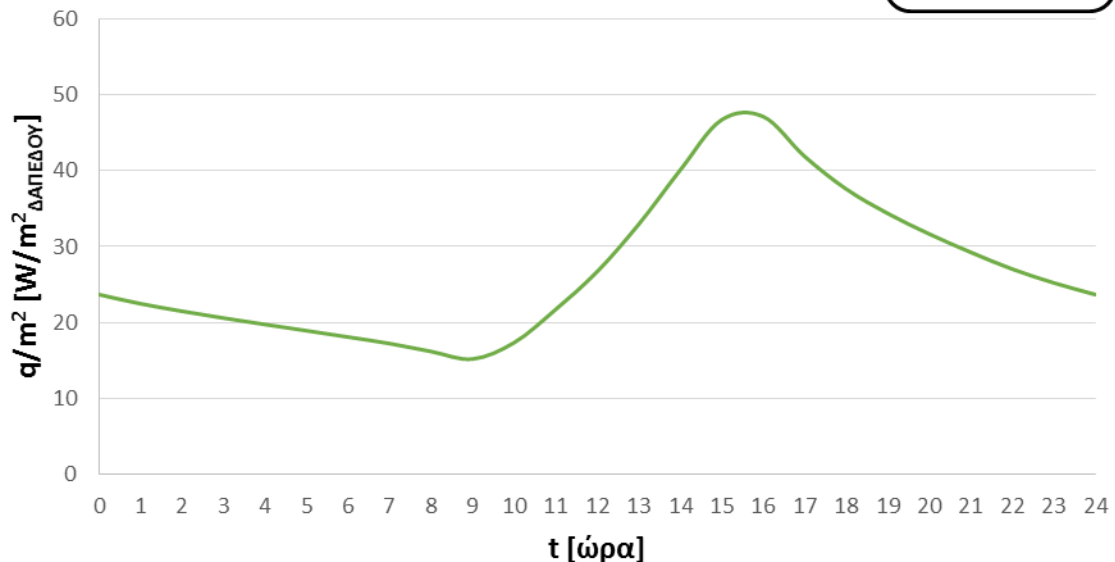
Σχήμα 7.4/3 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 2<sup>ης</sup> Δοκιμής :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{104051}{141500} = 0,735$$

**SP25A8**  
**q/m<sup>2</sup> - t**

$A_c = 10 \text{ m}^2$   
 $m_o = 0,1 \text{ Kg/s}$   
 $m_x = 0,2m_o$



Σχήμα 7.4/4 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [W/m<sup>2</sup> δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **27,08 W/m<sup>2</sup>**.

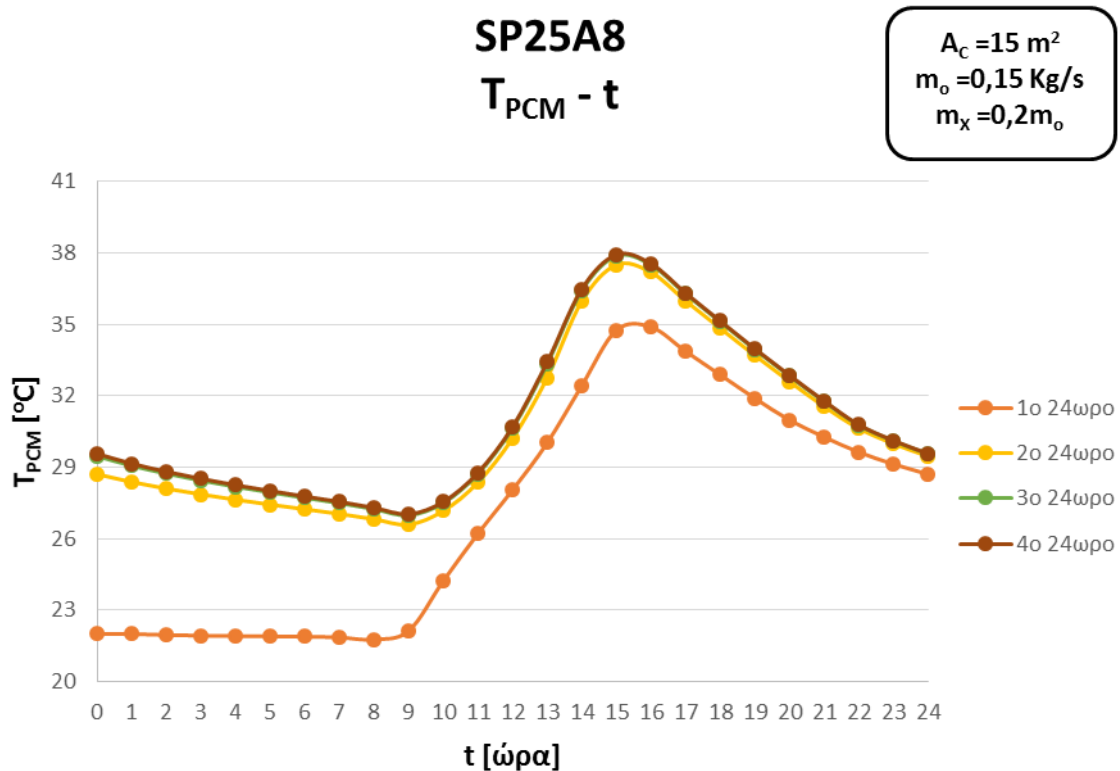
Προφανώς, η αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας συνοδεύεται από την αύξηση της παροχής  $\dot{m}_o$ , ώστε να βρίσκονται σε αναλογία. Στην συγκεκριμένη δοκιμή, με την ανάπτυξη υψηλότερων θερμοκρασιών εντός του εύρους λειτουργίας του υλικού, παρατηρείται διεύρυνση του κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης, με αποτέλεσμα την αισθητή αύξηση του βαθμού εκμετάλλευσης. Παράλληλα, ο μέσος όρος της αποδιδόμενης θερμότητας του υλικού στον εσωτερικό χώρο του δωματίου, υπερδιπλασιάζεται, σε τιμή εντός των τυπικών τιμών θερμικών απωλειών (15-35 W/m<sup>2</sup><sub>ΔΑΠΕΔΟΥ</sub>). Ωστόσο, δεν επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση στην θέρμανση του νερού χρήσης, με τον μέσο όρο θερμοκρασίας του 24ώρου  $\bar{T}_{z.n.x.} = 27,89^\circ\text{C}$ .

Τέλος, σημειώνεται ότι η πλήρης αποφόρτιση του υλικού πραγματοποιείται σε 44 ώρες, στην περίπτωση συννεφιάς. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.4/4, η προσδιδόμενη θερμότητα του υλικού στο τέλος του 24ώρου ξεπερνάει τα 20W/m<sup>2</sup><sub>Δ</sub>, με το ποσό αυτό να μειώνεται σταδιακά κατά την διάρκεια της 2<sup>ης</sup> ημέρας, μέχρι τον πλήρη μηδενισμό της θερμοροής. Συνεπώς, το υλικό δεν αποδίδει ικανοποιητικά στην περίπτωση συννεφιάς.

### 7.5 3<sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ $A_c = 15 \text{ m}^2$

Παράμετροι 3 <sup>ης</sup> Δοκιμής SP25A8	
Συλλεκτική Επιφάνεια [ $\text{m}^2$ ]	$A_c = 15$
Συνολική Παροχή Μάζας Νερού Συλλέκτη [ $\text{Kg/s}$ ]	$\dot{m}_o = 0,15$
Παροχή Μάζας Νερού Εναλλάκτη	$\dot{m}_x = 0,2\dot{m}_o$
Παροχή Μάζας Νερού Τοίχου-PCM	$\dot{m}_T = 0,8\dot{m}_o$
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\Delta} = 22$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [ $\text{m}$ ]	$l_{PCM} = 0,02$

Πίνακας 7.5/1 : Παράμετροι 3ης Δοκιμής SP25A8

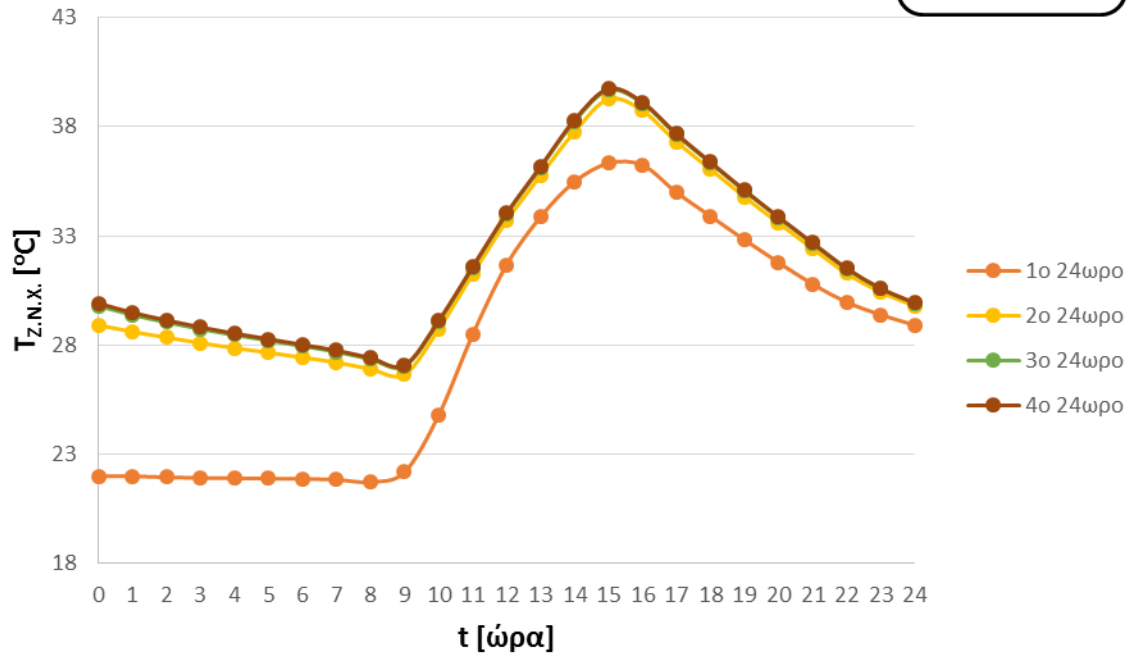


Σχήμα 7.5/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου

Με την ανάπτυξη υψηλότερων θερμοκρασιών, αφενός, συγκριτικά, με την προηγούμενη δοκιμή και αφετέρου με την θερμοκρασία δωματίου, οξύνεται η απόκλιση των αποτελεσμάτων από την αρχική επανάληψη (1<sup>ο</sup> 24ωρο), με αποτέλεσμα την καθυστέρηση σύγκλισης των επαναλήψεων, όπως φαίνεται και στο σχήμα.

**SP25A8**  
 $T_{Z.N.X.} - t$

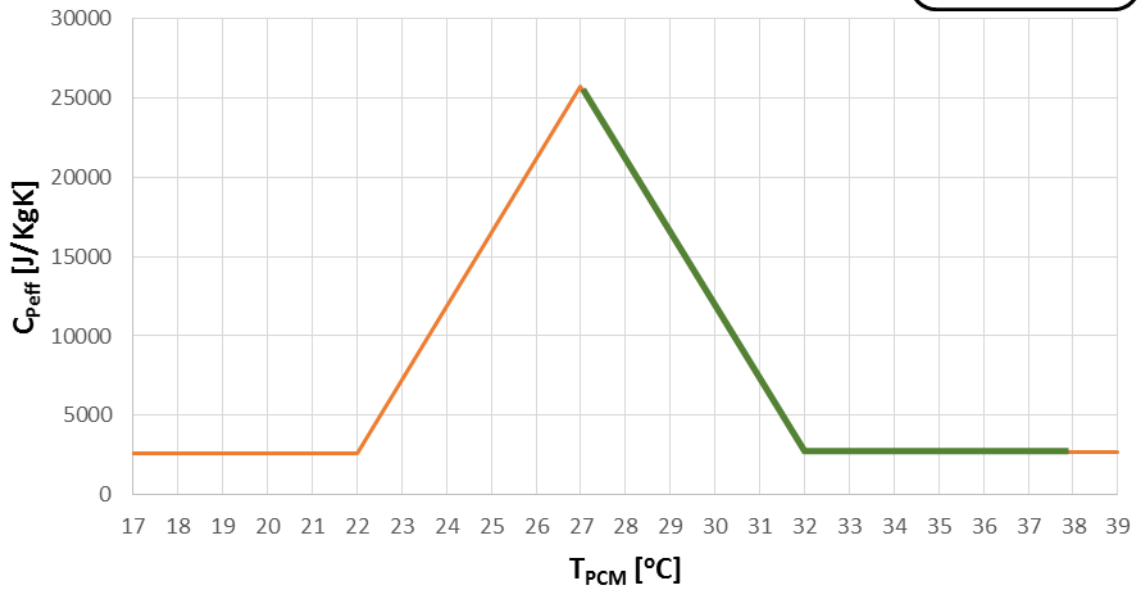
$A_c = 15 \text{ m}^2$   
 $m_o = 0,15 \text{ Kg/s}$   
 $m_x = 0,2m_o$



Σχήμα 7.5/2 : Θερμοκρασιακό Προφίλ Ζεστού Νερού Χρήσης

**SP25A8**  
 $C_{Peff} - T_{PCM}$

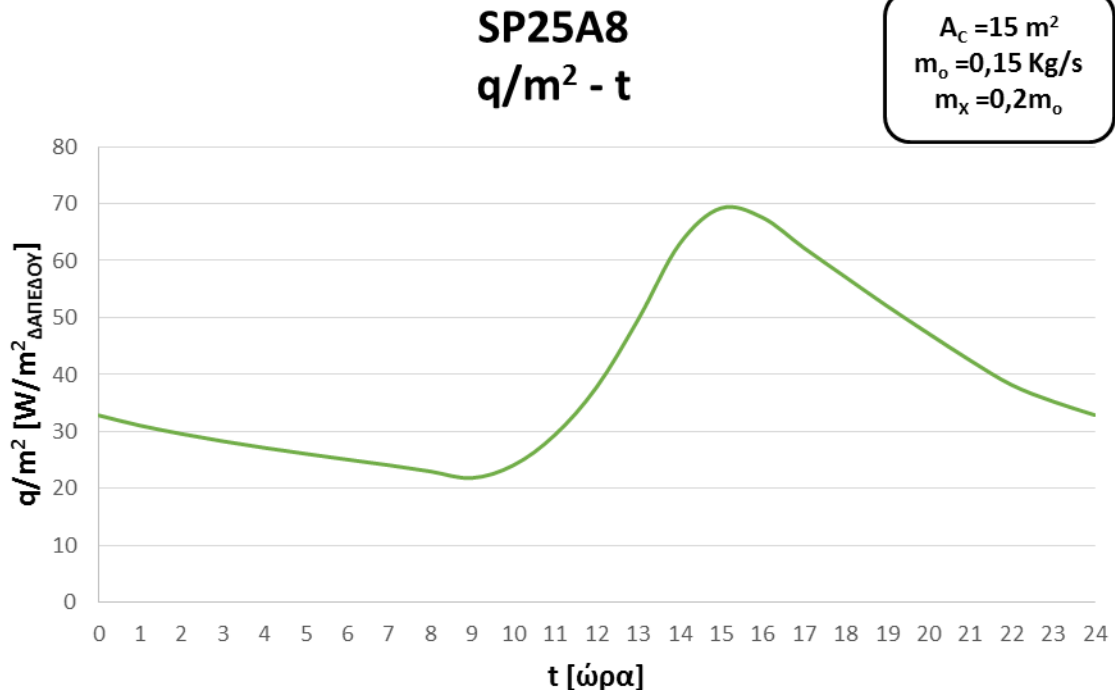
$A_c = 15 \text{ m}^2$   
 $m_o = 0,15 \text{ Kg/s}$   
 $m_x = 0,2m_o$



Σχήμα 7.5/3 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 3<sup>ης</sup> Δοκιμής :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{69616,2}{141500} = 0,492$$



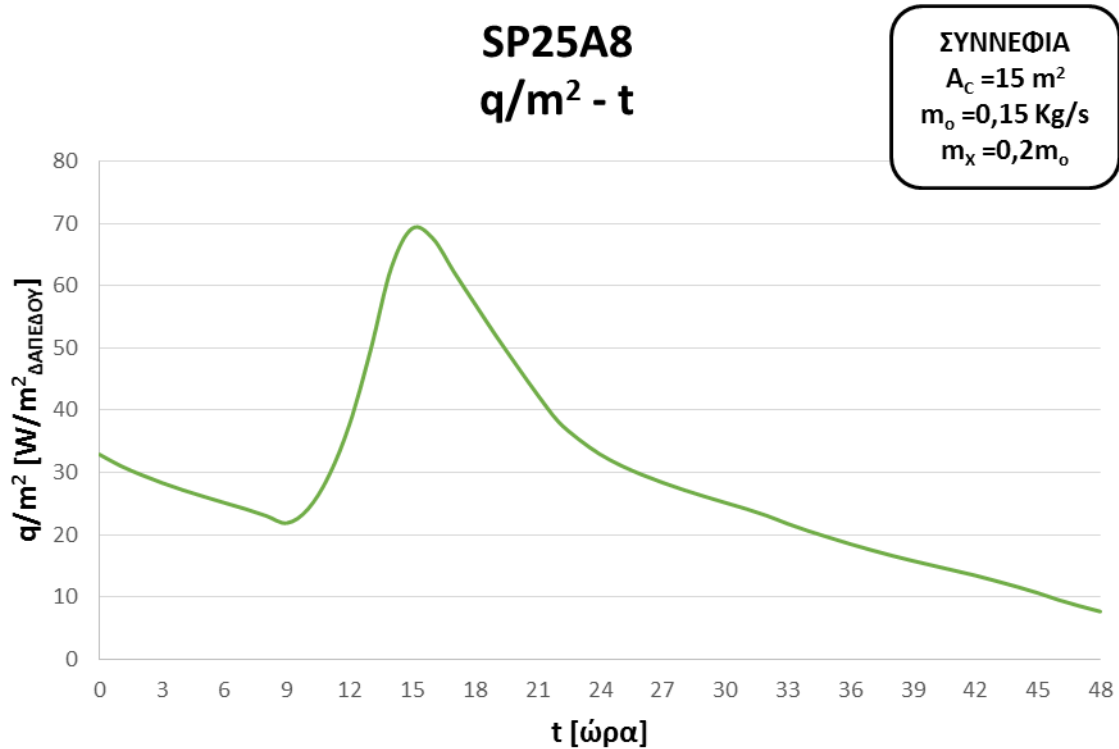
Σχήμα 7.5/4 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [W/m<sup>2</sup> δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **39,1 W/m<sup>2</sup>**.

Η τιμή της παροχής  $\dot{m}_o = 0,15 \text{ Kg/s}$  αντιστοιχεί στην συλλεκτική επιφάνεια των 15m<sup>2</sup>, εντούτοις αποτελεί και τον μέσο όρο των παροχών που χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις δοκιμές. Επομένως, η εφαρμογή της σε όλες τις τιμές συλλεκτικών επιφανειών θα επιτρέψει την σύγκριση των αποτελεσμάτων και την μελέτη της επίδρασης της A<sub>c</sub>. Συνεχίζοντας, η αύξηση των θερμοκρασιών του υλικού, όπως είναι φυσικό, μετατοπίζει τον κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης προς την περιοχή πλήρους υγροποίησης, μειώνοντας έτσι τον βαθμό εκμετάλλευσης. Αντίθετα, η αποδιδόμενη, από το υλικό, θερμότητα παρουσιάζει την αναμενόμενη αύξηση, ως επακόλουθο της αυξημένης προσδιδόμενης ισχύος από την συστοιχία των ηλιακών συλλεκτών. Η θερμοκρασία του ζεστού νερού χρήσης παρουσιάζει μικρή αύξηση, με την μέση θερμοκρασία του 24ώρου να είναι  $\bar{T}_{z.n.x.} = 32,01^\circ\text{C}$ , τιμή η οποία δεν καλύπτει τις ανάγκες των χειμερινών μηνών.

Στο επόμενο σχήμα, δίνεται το 48ωρο προφίλ προσδιδόμενης θερμότητας του υλικού στην περίπτωση συννεφιασμένης ημέρας. Η θερμοκρασία του υλικού παραμένει σε επίπεδα υψηλότερα των 24°C σχεδόν για ολόκληρη την διάρκεια των

δύο ημερών, αποδίδοντας αδιάκοπα θερμότητα προς το εσωτερικό περιβάλλον. Η θερμότητά του υλικού την **συννεφιασμένη ημέρα** ξεκινάει από την τιμή των  $32,93 \text{ W/m}^2_{\Delta}$ , και καταλήγει σε  $7,65 \text{ W/m}^2_{\Delta}$ , παρουσιάζοντας **μέσο όρο  $18,69 \text{ W/m}^2_{\Delta}$** . Η τιμή αυτή δεν είναι ικανοποιητική, ωστόσο αποτελεί μεγάλη βελτίωση, συγκριτικά με τις προηγούμενες δοκιμές.



Σχήμα 7.5/5 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού στη περίπτωση συννεφιάς

#### 7.6 4<sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ $A_c = 20 \text{ m}^2$

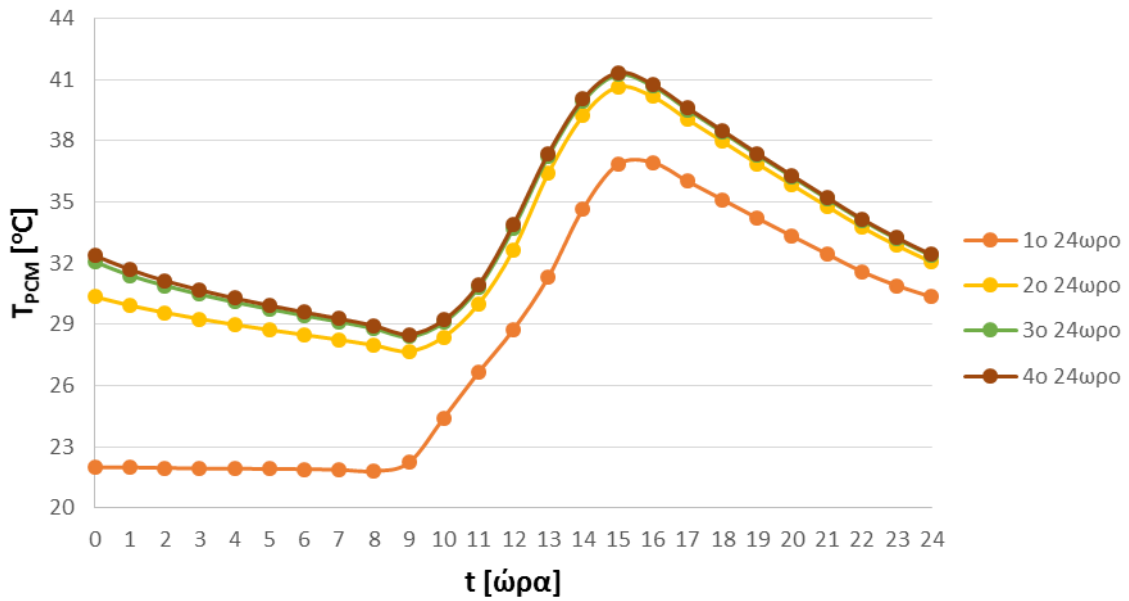
<b>Παράμετροι 4<sup>ης</sup> Δοκιμής SP25A8</b>	
<b>Συλλεκτική Επιφάνεια [<math>\text{m}^2</math>]</b>	<b><math>A_c = 20</math></b>
<b>Συνολική Παροχή Μάζας Νερού Συλλέκτη [<math>\text{Kg/s}</math>]</b>	<b><math>\dot{m}_o = 0,2</math></b>
<b>Παροχή Μάζας Νερού Εναλλάκτη</b>	<b><math>\dot{m}_x = 0,2\dot{m}_o</math></b>
<b>Παροχή Μάζας Νερού Τοίχου-PCM</b>	<b><math>\dot{m}_T = 0,8\dot{m}_o</math></b>
<b>Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [<math>^{\circ}\text{C}</math>]</b>	<b><math>T_{\Delta} = 22</math></b>
<b>Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [<math>\text{m}</math>]</b>	<b><math>l_{PCM} = 0,02</math></b>

Πίνακας 7.6/1 : Παράμετροι 4ης Δοκιμής SP25A8

SP25A8

$T_{PCM} - t$

$A_c = 20 \text{ m}^2$   
 $m_o = 0,2 \text{ Kg/s}$   
 $m_x = 0,2m_o$

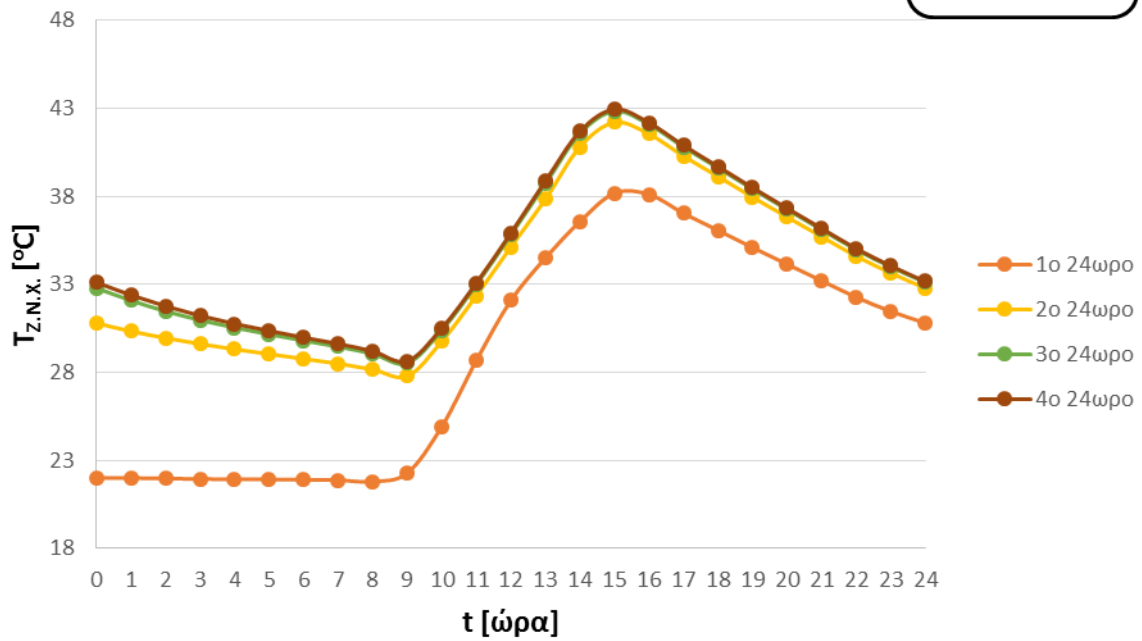


Σχήμα 7.6/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου

SP25A8

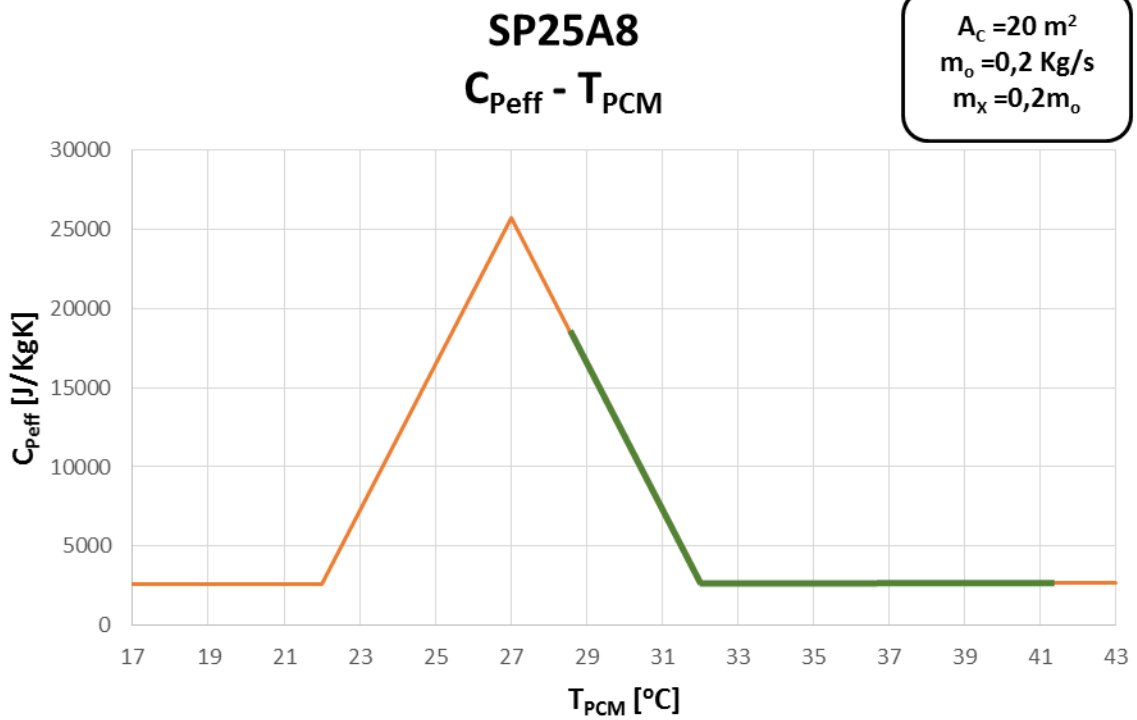
$T_{Z.N.X.} - t$

$A_c = 20 \text{ m}^2$   
 $m_o = 0,2 \text{ Kg/s}$   
 $m_x = 0,2m_o$



Σχήμα 7.6/2 : Θερμοκρασιακό Προφίλ Ζεστού Νερού Χρήσης

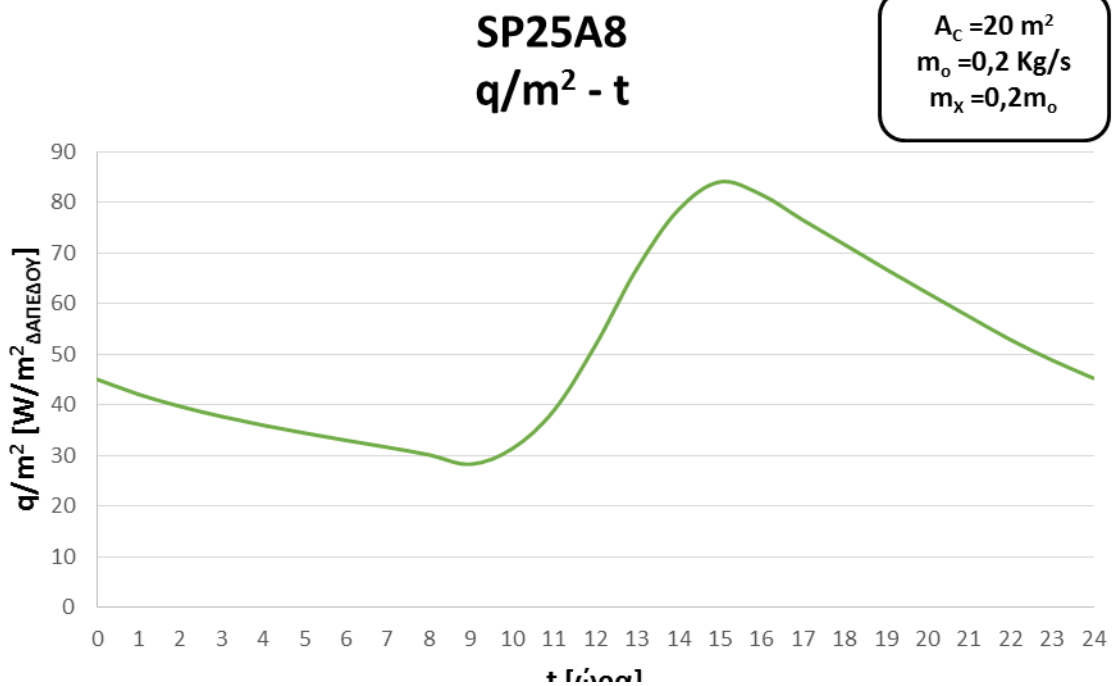




Σχήμα 7.6/3 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 4<sup>ης</sup> Δοκιμής :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{37063,96}{141500} = 0,262$$

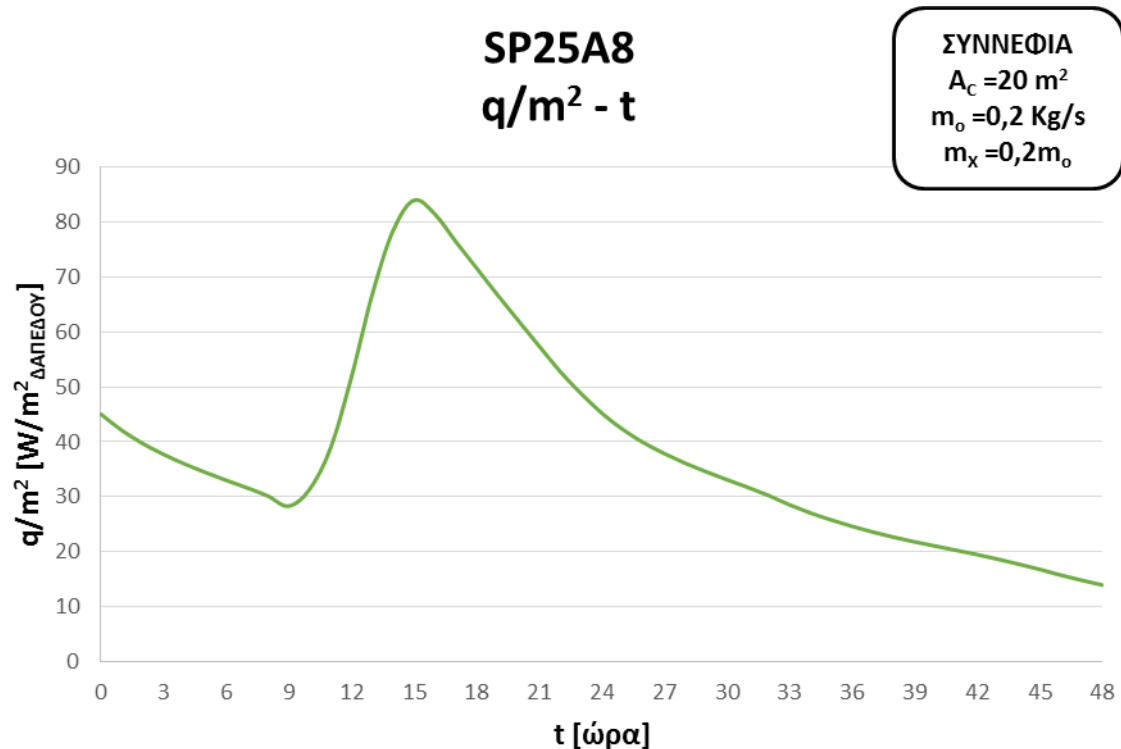


Σχήμα 7.6/4 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [ $W/m^2$  δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **50,9  $W/m^2$** .

Η τιμή της παροχής θερμού νερού της συστοιχίας συλλεκτών,  $\dot{m}_o$ , έχει επιλεχθεί αναλογικά με την συλλεκτική επιφάνεια. Η περαιτέρω αύξηση των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών του υλικού επιφέρει, φυσικά, σημαντική μείωση του βαθμού εκμετάλλευσης και παράλληλα αισθητή αύξηση της θερμοροής, με μεγάλο πλέον ποσοστό αισθητής θερμότητας (για  $T > T_1$ ). Πλέον, ο μέσος όρος θερμικών απωλειών του δωματίου υπερκαλύπτεται από το υλικό, αποδεικνύοντας την καταλληλότητα της συλλεκτικής επιφάνειας. Η μέση θερμοκρασία του ζεστού νερού χρήσης, όπως και στις προηγούμενες δοκιμές, παρουσιάζει μικρή αύξηση, με τιμή  $\bar{T}_{z.n.x.} = 34,68^\circ C$ , η οποία εξακολουθεί όμως να είναι ανεπαρκής για τους χειμερινούς μήνες.

Παρακάτω δίνεται το 48ωρο προφίλ προσδιδόμενης θερμότητας του υλικού στην περίπτωση συνεφιασμένης ημέρας. Η θερμοκρασία του υλικού παραμένει σε επίπεδα υψηλότερα των  $25^\circ C$  για ολόκληρη την διάρκεια των δύο ημερών, αποδίδοντας αδιάκοπα θερμότητα προς το εσωτερικό περιβάλλον. Η θερμοροή του υλικού την **συννεφιασμένη ημέρα** ξεκινάει από την τιμή των  $45,27 W/m^2_{\Delta}$  και καταλήγει σε  $13,95 W/m^2_{\Delta}$ , παρουσιάζοντας **μέσο όρο  $25,77 W/m^2_{\Delta}$** . Η μέση αυτή τιμή της θερμοροής είναι αισθητά βελτιωμένη και σχεδόν καλύπτει τις τυπικές τιμές θερμικών απωλειών του δωματίου, επιτυγχάνοντας θέρμανση και διατήρηση των συνθηκών θερμικής άνεσης, για ολόκληρη ημέρα, σε περίπτωση συνεφιάς.

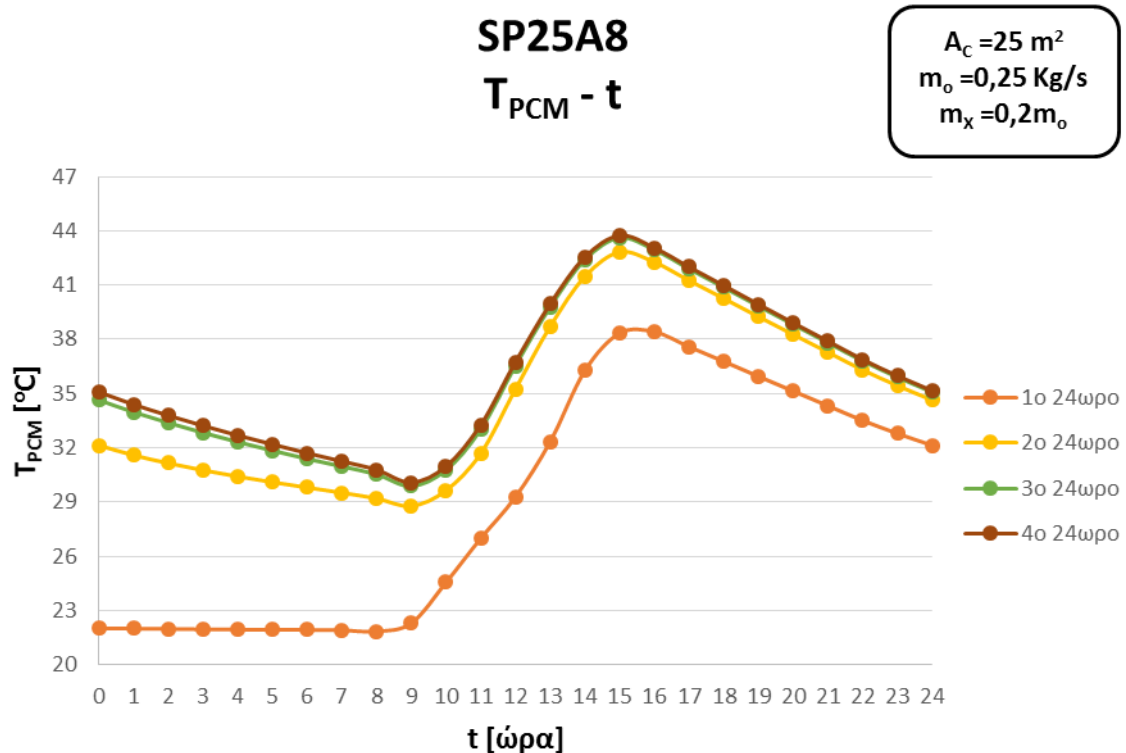


Σχήμα 7.6/5 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού στη περίπτωση συνεφιάς

## 7.7 5<sup>η</sup> ΔΟΚΙΜΗ-ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ $A_c = 25 \text{ m}^2$

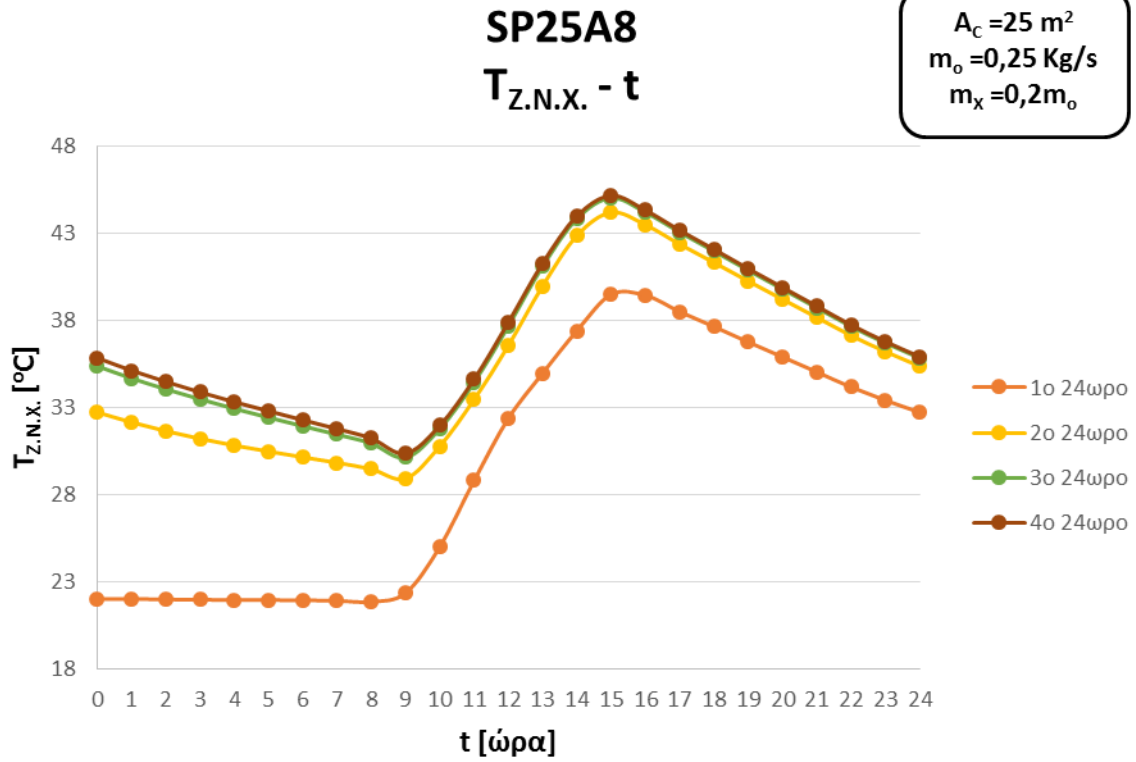
Παράμετροι 5 <sup>ης</sup> Δοκιμής SP25A8	
Συλλεκτική Επιφάνεια [ $\text{m}^2$ ]	$A_c = 25$
Συνολική Παροχή Μάζας Νερού Συλλέκτη [ $\text{Kg/s}$ ]	$\dot{m}_o = 0,25$
Παροχή Μάζας Νερού Εναλλάκτη	$\dot{m}_x = 0,2\dot{m}_o$
Παροχή Μάζας Νερού Τοίχου-PCM	$\dot{m}_T = 0,8\dot{m}_o$
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\Delta} = 22$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [ $\text{m}$ ]	$l_{PCM} = 0,02$

Πίνακας 7.7/1 : Παράμετροι 5ης Δοκιμής SP25A8

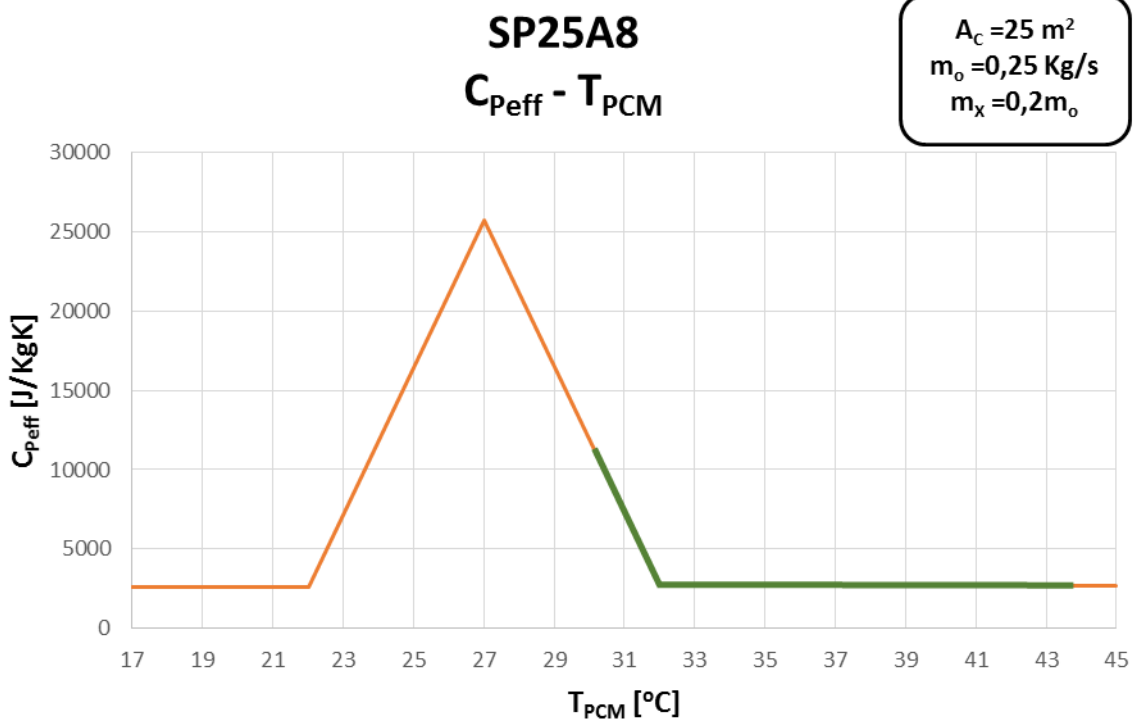


Σχήμα 7.7/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου

Η περαιτέρω αύξηση των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών του υλικού, λόγω μεγαλύτερης συλλεκτικής επιφάνειας, σε συνδυασμό με την χαμηλή αρχική θερμοκρασία του υλικού ( $T_{\Delta}$ ), επιφέρει καθυστέρηση της σύγκλισης των αποτελεσμάτων (3<sup>ο</sup> 24ωρο), όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.



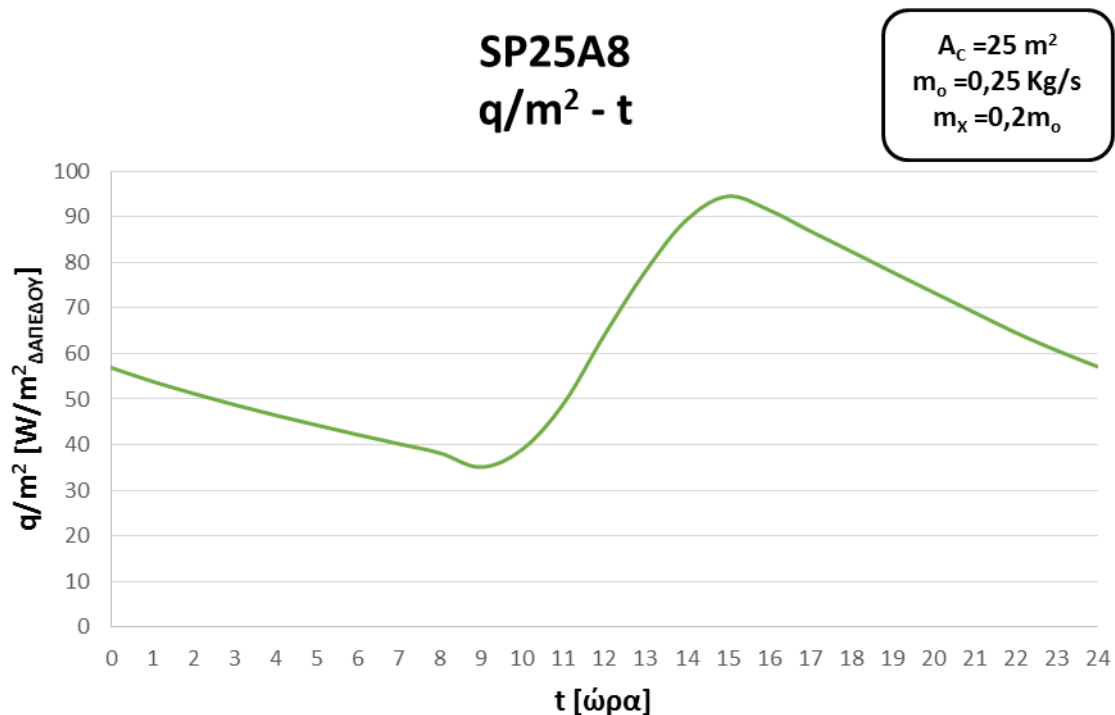
Σχήμα 7.7/2 : Θερμοκρασιακό Προφίλ Ζεστού Νερού Χρήσης



Σχήμα 7.7/3 : Καμπύλη Κύκλου Φόρτισης-Αποφόρτισης του υλικού

Βαθμός Εκμετάλλευσης 5<sup>ης</sup> Δοκιμής :

$$\eta = \frac{H_o}{H} = \frac{13515,77}{141500} = 0,096$$

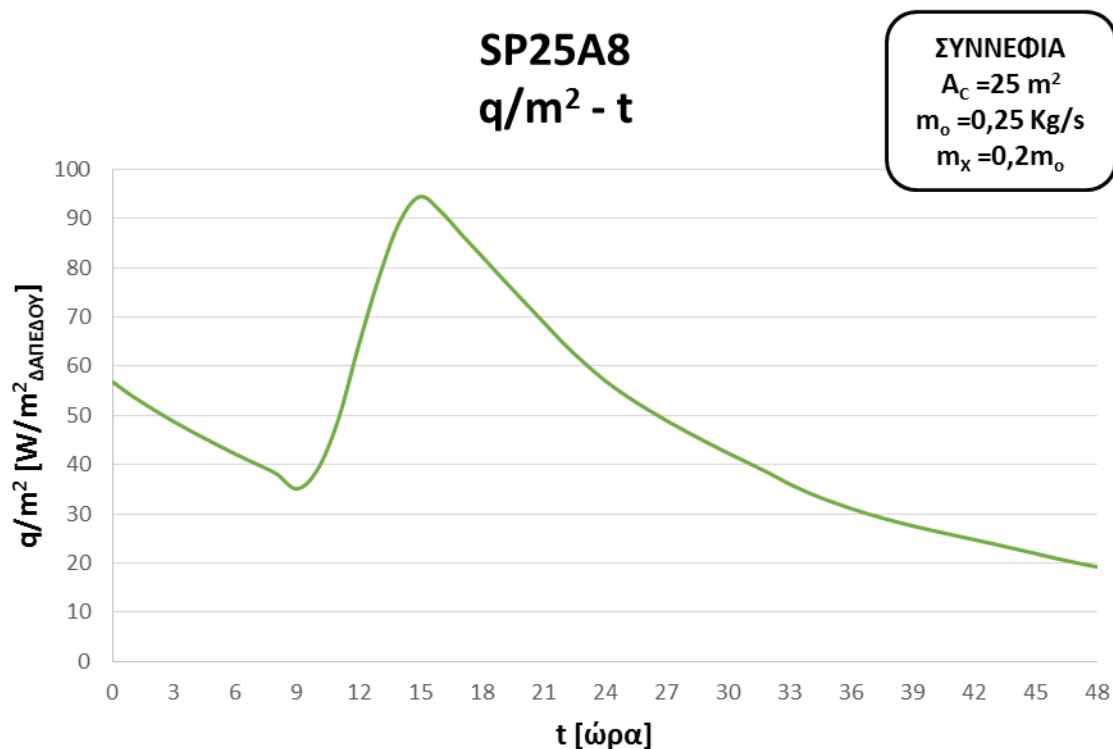


Σχήμα 7.7/4 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

Ο μέσος όρος προσφερόμενης θερμότητας [W/m<sup>2</sup> δαπέδου] από το υλικό προς το εσωτερικό περιβάλλον, κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι **61,39 W/m<sup>2</sup>**.

Η τιμή της παροχής  $\dot{m}_o$  βρίσκεται σε αντιστοιχία με την συλλεκτική επιφάνεια των 25m<sup>2</sup>, ενώ σημειώνεται ότι η αύξησή της θα μείωνε τις τιμές αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών ολόκληρης της εγκατάστασης. Με ελάχιστη θερμοκρασία του κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης 30,08°C, έχει σχεδόν πραγματοποιηθεί πλήρης υγραποίηση του υλικού (T<sub>i</sub> = 32°C) στην διάρκεια του 24ώρου. Ως αποτέλεσμα, ο βαθμός εκμετάλλευσης παρουσιάζει σημαντικά μικρή τιμή, ενώ, αντίθετα, η προσδιδόμενη θερμότητα του υλικού παρουσιάζεται σχεδόν διπλάσια των θερμικών απωλειών του δωματίου. Συνεπώς, η απόδοση του συστήματος θερμότητας κρίνεται ικανοποιητική και αναμένεται να ανταποκρίνεται και σε περίπτωση συννεφιάς. Συνεχίζοντας, η μέση θερμοκρασία του ζεστού νερού χρήσης, παρουσιάζει την προφανώς μικρή αύξηση, με τιμή  $\bar{T}_{z.n.x.} = 37,03^\circ\text{C}$ , η οποία εξακολουθεί όμως να είναι ανεπαρκής για τους χειμερινούς μήνες.

Στο επόμενο σχήμα, δίνεται το 48ωρο προφίλ προσδιδόμενης θερμότητας του υλικού στην περίπτωση συννεφιασμένης ημέρας. Ομοίως με τις προηγούμενες δοκιμές, η θερμοκρασία του υλικού παραμένει σε επίπεδα υψηλότερα των 26°C για ολόκληρη την διάρκεια των δύο ημερών, αποδίδοντας αδιάκοπα θερμότητα προς το εσωτερικό περιβάλλον. Η θερμοροή του υλικού την **συννεφιασμένη ημέρα** ξεκινάει από την τιμή των 57,17 W/m<sup>2</sup><sub>Δ</sub> και καταλήγει σε 19,26 W/m<sup>2</sup><sub>Δ</sub>, παρουσιάζοντας **μέσο όρο 33,07 W/m<sup>2</sup><sub>Δ</sub>**.



Σχήμα 7.7/5 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού στη περίπτωση συννεφιάς

Εύκολα, λοιπόν, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι με συλλεκτική επιφάνεια  $A_c = 25 \text{ m}^2$ , το σύστημα θέρμανσης αποδίδει, υπερκαλύπτοντας τις θερμικές απώλειες του δωματίου για ολόκληρο 24ωρο και επιτυγχάνοντας ικανοποιητική θέρμανση για μία επιπλέον ημέρα, σε περίπτωση συννεφιάς.

## 7.8 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Συμπερασματικά, έχει καταστεί σαφής η σχέση αναλογίας δύο κύριων μεγεθών, της συνολικής συλλεκτικής επιφάνειας της εγκατάστασης και της προσδιδόμενης θερμότητας του υλικού προς το εσωτερικό περιβάλλον. Ο βαθμός εκμετάλλευσης εξαρτάται από το εύρος των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών του υλικού, δηλαδή αποτελεί μέγεθος ανάλογο της συλλεκτικής επιφάνειας μέχρι συγκεκριμένη τιμή και από εκεί και έπειτα αποτελούν αντιστρόφως ανάλογα μεγέθη. Συνεχίζοντας, το σύστημα δεν αποδείχθηκε αποδοτικό ως προς την θέρμανση του ζεστού νερού χρήσης, ωστόσο η ιδανική λειτουργία του εναλλάκτη και της δεξαμενής δεν

ανταποκρίνονται σε πραγματικές συνθήκες. Η μεταβολή της παροχής απομάστευσης θα εξετασθεί και θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα. Τέλος, παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων των δοκιμών που έγιναν παραπάνω.

	1 <sup>η</sup> Δοκιμή	2 <sup>η</sup> Δοκιμή	3 <sup>η</sup> Δοκιμή	4 <sup>η</sup> Δοκιμή	5 <sup>η</sup> Δοκιμή
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	4	10	15	20	25
$\dot{m}_o$ [Kg/s]	0,04	0,1	0,15	0,2	0,25
$T_{min}$ [°C]	22,39	25,5	27,03	28,51	30,08
$T_{max}$ [°C]	26,9	32,84	37,93	41,33	43,74
$\eta$	0,473	0,735	0,492	0,262	0,096
$q/m^2_{\Delta}$ [W/m <sup>2</sup> ]	11,51	27,08	39,1	50,9	61,39
$\bar{T}_{z.n.x}$ [°C]	2,49	27,89	32,01	34,68	37,03

Πίνακας 7.8/1 : Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων

Η επιλογή μικρότερης θερμοκρασίας δωματίου από την  $T_{\Delta}=22^{\circ}\text{C}$ , φαίνεται ότι θα μετατόπιζε τον κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης του υλικού πιο κοντά στην θερμοκρασία στερεοποίησης ( $T_s=22^{\circ}\text{C}$ ), για τις τιμές συλλεκτικής επιφάνειας  $\geq 10\text{m}^2$ , αυξάνοντας τον βαθμό εκμετάλλευσης του υλικού, παράλληλα με την αποθηκευόμενη λανθάνουσα θερμότητα.

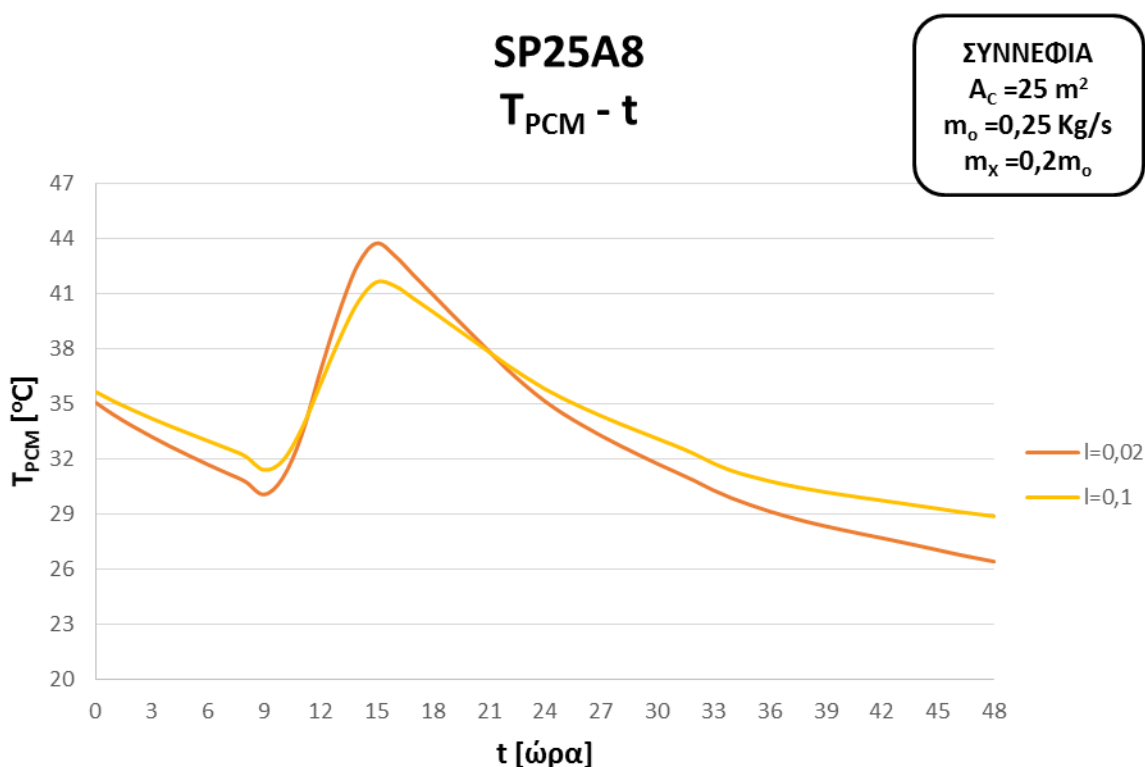
Επιπροσθέτως, η αύξηση του πάχους του στρώματος PCM, στις περιπτώσεις μεγάλης συλλεκτικής επιφάνειας, που καλύπτονται πλήρως οι θερμικές απώλειες του δωματίου ( $A_c \geq 15\text{m}^2$ ), αναμένεται ότι θα βελτίωνε την διάρκεια απόδοσης θερμότητας του υλικού κατά τις συννεφιασμένες ημέρες. Το φαινόμενο αυτό συνδέεται άμεσα με το γεγονός ότι η αύξηση της διαθέσιμης μάζας του PCM, αποφέρει ομοίμορφη φόρτιση και αποθήκευση μεγαλύτερων ποσών λανθάνουσας θερμότητας, η οποία αποδίδεται σταδιακά και με χρονική καθυστέρηση, σε αντίθεση με την αισθητή θερμότητα του υλικού. Ο ισχυρισμός αυτός επιβεβαιώνεται στην επόμενη ενότητα.

Συνοψίζοντας, σύμφωνα με τον πίνακα αποτελεσμάτων είναι ασφαλές να συμπεράνουμε ότι οι τιμές συλλεκτικής επιφάνειας  $A_c=15\text{-}25\text{m}^2$ , κρίνονται κατάλληλες για την πλήρη κάλυψη των θερμικών αναγκών του δωματίου.

## 7.9 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ PCM ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Για την επιβεβαίωση του ισχυρισμού που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, σχετικά με την βελτίωση της απόδοσης του συστήματος αυξάνοντας το πάχος στρώματος PCM, πραγματοποιήθηκε νέα δοκιμή για την συλλεκτική επιφάνεια των  $25\text{m}^2$ . Η κατάλληλη αύξηση του πάχους  $l_{PCM}$  διαφοροποιείται προφανώς για κάθε τιμή της συλλεκτικής επιφάνειας, ωστόσο παρουσιάζει την ίδια επιρροή, τόσο στην συμπεριφορά του υλικού, όσο και στα αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτόν, η δοκιμή

πραγματοποιήθηκε ενδεικτικά μόνο για την συλλεκτική επιφάνεια των 25m<sup>2</sup>, με αύξηση του πάχους στην τιμή  $l_{PCM} = 0,1m$ . Τα αποτελέσματα παρατίθενται συγκριτικά με την 5<sup>η</sup> δοκιμή της προηγούμενης ενότητας, η οποία πραγματοποιήθηκε με πάχος  $l_{PCM} = 0,02m$ . Οι υπόλοιπες παράμετροι των δοκιμών παραμένουν σταθερές ( $\dot{m}_o = 0,25Kg/s$ ) και η σύγκριση των αποτελεσμάτων εστιάζει στην προσδιδόμενη θερμότητα του υλικού για ένα 24ωρο και για 48 ώρες στην περίπτωση συννεφιάς.

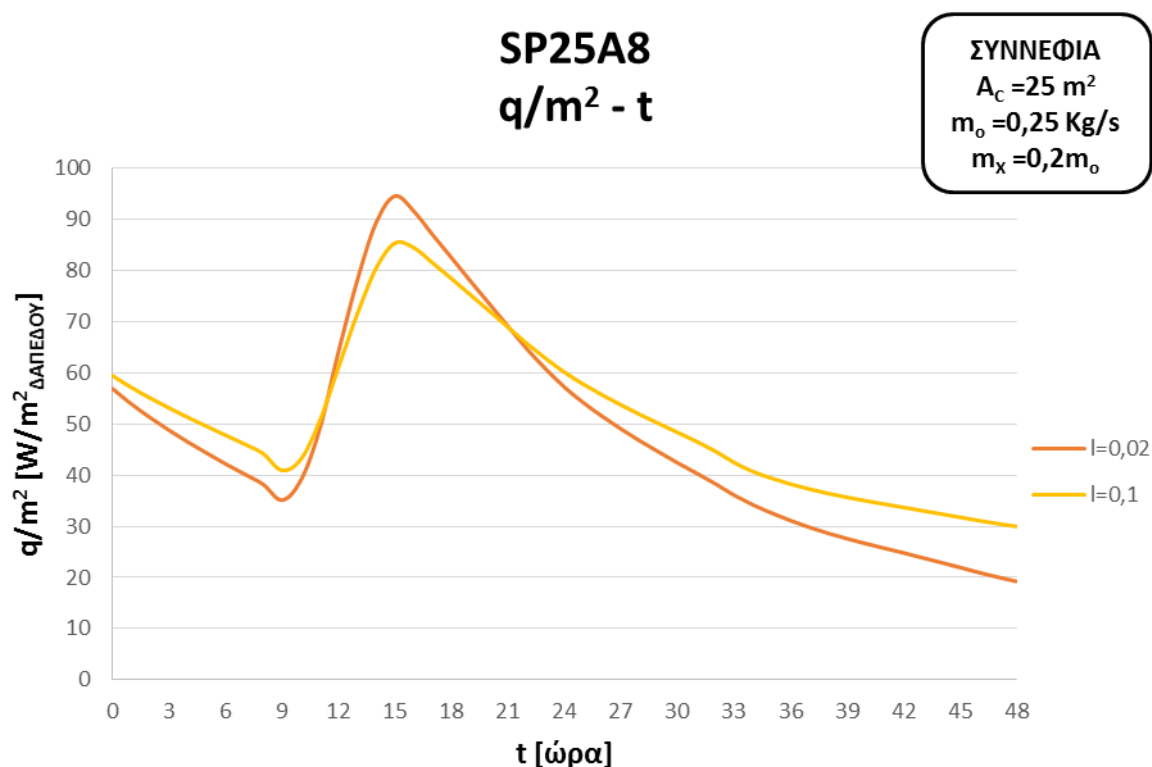


Σχήμα 7.9/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ του υλικού στη περίπτωση συννεφιάς

Στα σχήματα 7.9/1 και 7.9/2, φαίνεται ότι με την αύξηση του πάχους στρώματος PCM στην τιμή  $l_{PCM} = 0,1m$ , οι καμπύλες θερμοκρασίας και θερμοροής εξομαλύνονται, με την μείωση των εμφανιζόμενων ακροτάτων [ $T_{max} - (q/m^2_{\Delta})_{max}$ ,  $T_{min} - (q/m^2_{\Delta})_{min}$ ] και μετατοπίζονται σε υψηλότερες τιμές, κυρίως κατά την διάρκεια του 2<sup>ου</sup> 24ώρου. Όπως παρατηρείται, ο ρυθμός αποφόρτισης του υλικού μειώνεται (μείωση κλίσης καμπυλών), διατηρώντας υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας και θερμοροής για ολόκληρη την συννεφιασμένη ημέρα. Το φαινόμενο αυτό, αναλύθηκε και στην προηγούμενη ενότητα και οφείλεται στην αύξηση της διαθέσιμης μάζας του υλικού, που επιτρέπει την αποθήκευση μεγαλύτερων ποσών λανθάνουσας θερμότητας, τα οποία αποδίδονται στο δωμάτιο με χρονική καθυστέρηση. Η σύγκριση των δύο δοκιμών πραγματοποιείται και μέσω αριθμητικών αποτελεσμάτων που παρατίθενται σε συγκεντρωτικό πίνακα παρακάτω.



Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι η απόδοση του συστήματος βελτιώνεται μέσω της κατάλληλης αύξησης του πάχους στρώματος PCM στην εγκατάσταση.



Σχήμα 7.9/2 : Καμπύλη Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού στη περίπτωση συννεφιάς

	$l_{PCM} = 0,02m$		$l_{PCM} = 0,1m$	
	1 <sup>ο</sup> 24ωρο	2 <sup>ο</sup> 24ωρο (συννεφιά)	1 <sup>ο</sup> 24ωρο	2 <sup>ο</sup> 24ωρο (συννεφιά)
$q/m^2_{\Delta}$ [W/m <sup>2</sup> ]	61,39	33,07	61,8	44,45

Πίνακας 7.9/1 : Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων

Οι παρατηρήσεις που έγιναν παραπάνω, αντιπροσωπεύουν προφανώς τα αριθμητικά αποτελέσματα του πίνακα. Με κόστος μικρή μείωση της αποδιδόμενης θερμότητας το 1<sup>ο</sup> 24ωρο, επιτυγχάνεται μεγάλη αύξηση της θερμοροής του 2<sup>ο</sup> 24ώρου σε περίπτωση συννεφιάς, δηλαδή σαφής βελτίωση του συστήματος θέρμανσης. Σαν αποτέλεσμα, η θερμική κάλυψη των απωλειών και των αναγκών του δωματίου, για σταθερές συνθήκες θερμικής άνεσης, πραγματοποιείται επιτυχώς. Προτείνεται, λοιπόν, η αναζήτηση κατάλληλης τιμής πάχους στρώματος του PCM στον τοίχο, για την βελτιστοποίηση ενός τέτοιου συστήματος θέρμανσης.

## 7.10 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΗΣ ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Η επίδραση της παραμέτρου της συλλεκτικής επιφάνειας στην απόδοση του συστήματος, μπορεί να μελετηθεί μόνο υπό την σταθερότητα των συνθηκών και των υπολοίπων παραμέτρων. Για τον λόγο αυτόν, οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στην αρχή του κεφαλαίου, με σταθερή θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος  $T_{\Delta}=22^{\circ}\text{C}$  και σταθερό πάχος υλικού  $l_{\text{PCM}}=0,02\text{m}$ , επαναλαμβάνονται για σταθερή συνολική παροχή θερμού νερού της συστοιχίας συλλεκτών. Σε κάθε τιμή συλλεκτικής επιφάνειας αντιστοιχεί κατάλληλη τιμή της παροχής, ωστόσο για την δυνατότητα σύγκρισης των διαφόρων τιμών της  $A_c$ , απαιτείται ο ορισμός μίας μέσης παροχής, της  $\overline{\dot{m}}_o=0,15\text{ Kg/s}$ . Για την επεξήγηση της πρόβλεψης των αποτελεσμάτων δίνεται μία τυπική σχέση πρόσδοσης ισχύος :

$$Q [W] = \dot{m} * C_p * \Delta T$$

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω σχέση, για τις εγκαταστάσεις που λειτουργούν με παροχές μικρότερες της  $\overline{\dot{m}}_o$ , αναμένεται μείωση του θερμοκρασιακού εύρους του κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης, αφού η αύξηση της παροχής ( $\dot{m}$ ) επιφέρει μείωση της διαφοράς θερμοκρασίας εξόδου-εισόδου ( $\Delta T$ ). Αντίθετα, για εγκαταστάσεις μεγαλύτερης παροχής της  $\overline{\dot{m}}_o$ , η μείωση της παροχής λειτουργίας θα προκαλέσει την αύξηση του θερμοκρασιακού εύρους του κύκλου.

Τα διαγράμματα των καμπυλών της θερμοκρασίας του υλικού, της θερμοκρασίας του ζεστού νερού χρήσης και της αποδιδόμενης θερμότητας, παρατίθενται συγκεντρωτικά για όλες τις τιμές συλλεκτικής επιφάνειας. Στόχο αποτελεί η προβολή της επιρροής μεταβολών της  $A_c$  στην συμπεριφορά του συστήματος θέρμανσης. Στον επόμενο πίνακα δίνονται οι τιμές των σταθερών παραμέτρων των δοκιμών με την μέση παροχή.

<b>Σταθερές Παράμετροι Δοκιμών</b>	
Συνολική Παροχή Μάζας Νερού Συλλέκτη [Kg/s]	$\dot{m}_o=0,15$
Παροχή Μάζας Νερού Εναλλάκτη	$\dot{m}_x=0,2\dot{m}_o$
Παροχή Μάζας Νερού Τοίχου-PCM	$\dot{m}_T=0,8\dot{m}_o$
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\Delta}=22$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [m]	$l_{\text{PCM}}=0,02$

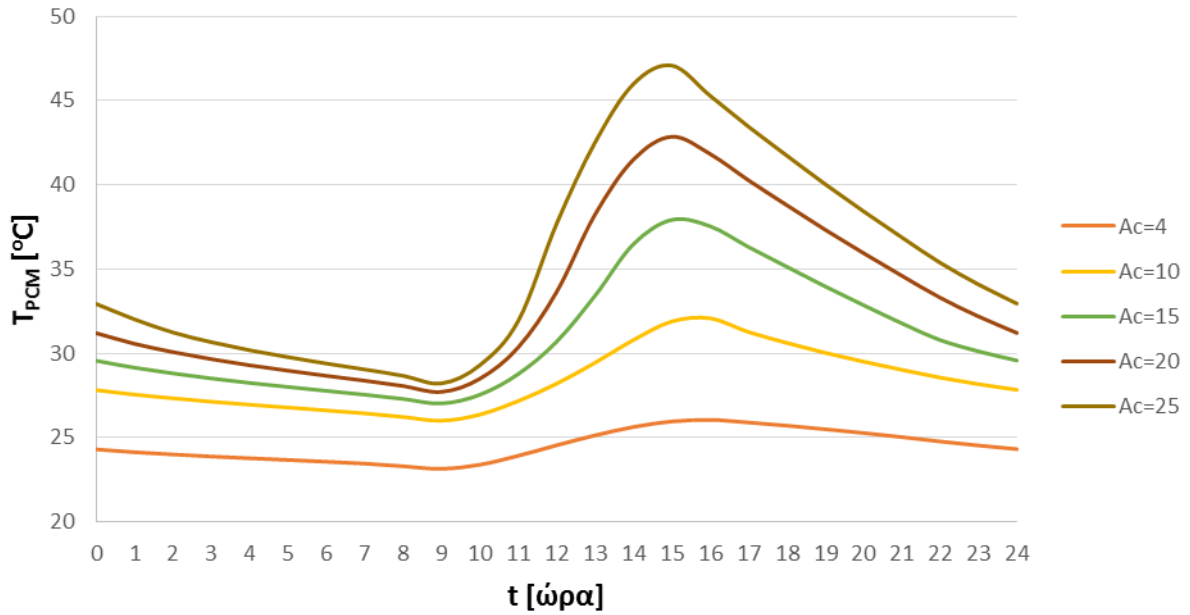
Πίνακας 7.10/1 : Πίνακας Σταθερών Παραμέτρων Δοκιμών

Στην συνέχεια, παρατίθενται τα συγκριτικά διαγράμματα των δοκιμών, ενώ στο τέλος δίνονται συγκεντρωτικοί πίνακες αποτελεσμάτων για σχολιασμό και σύγκριση των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν.

SP25A8

$T_{PCM} - t$

$\dot{m}_o = 0,15 \text{ Kg/s}$   
 $m_x = 0,2\dot{m}_o$

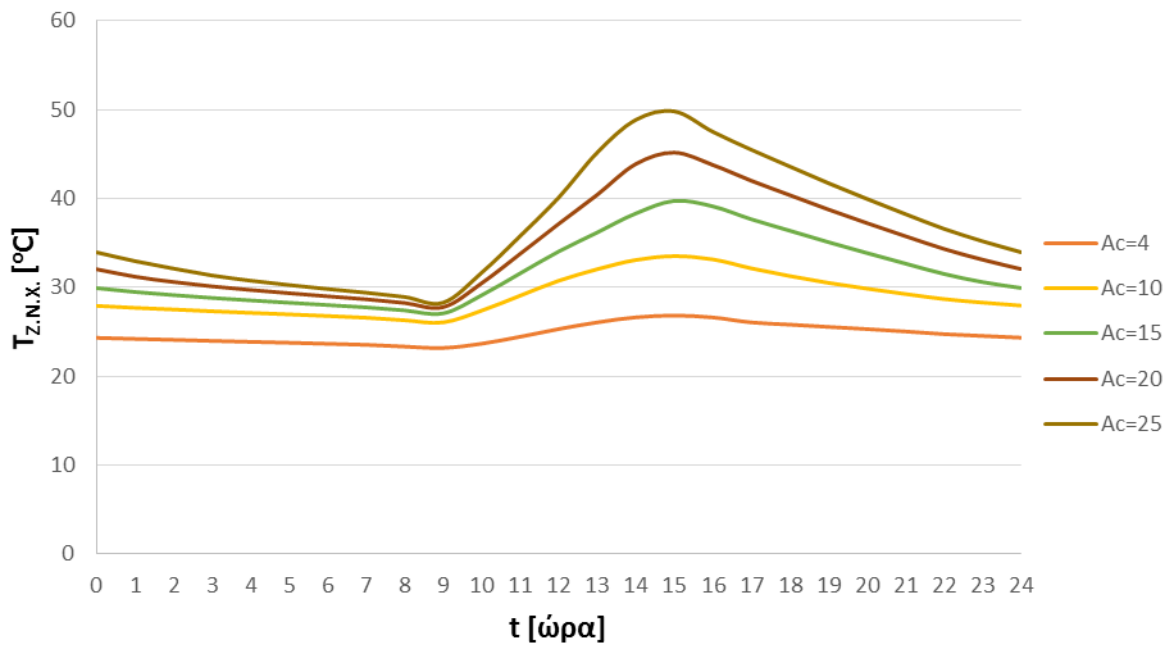


Σχήμα 7.10/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ υλικού για κάθε συλλεκτική επιφάνεια

SP25A8

$T_{Z.N.X} - t$

$\dot{m}_o = 0,15 \text{ Kg/s}$   
 $m_x = 0,2\dot{m}_o$

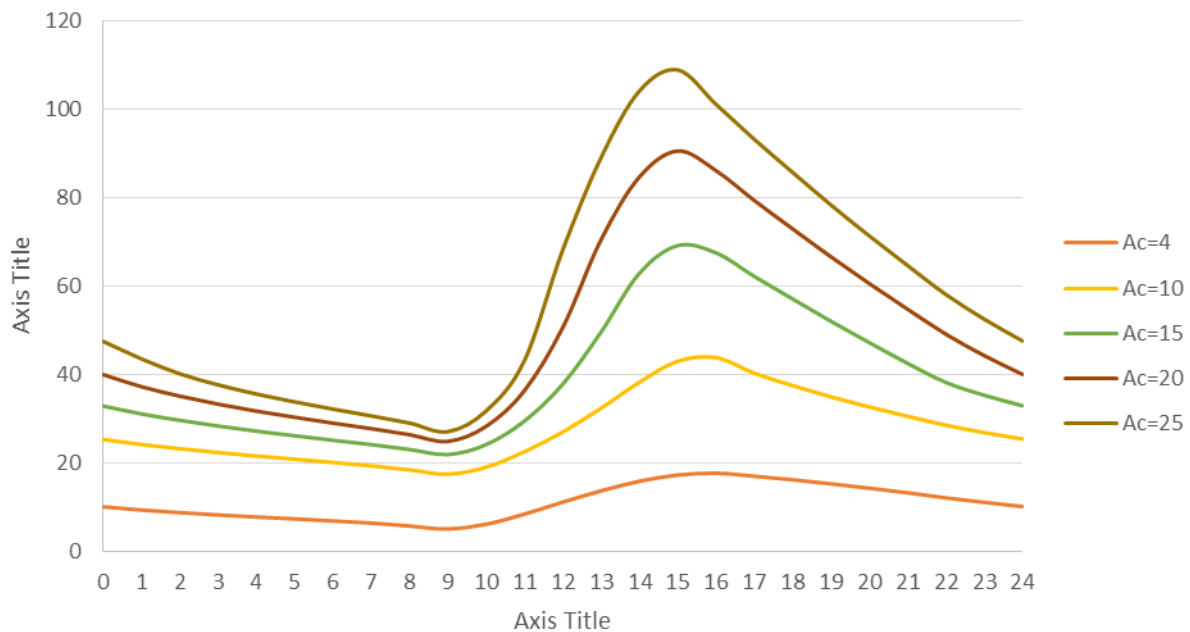


Σχήμα 7.10/2 : Θερμοκρασιακό Προφίλ Ζεστού Νερού Χρήσης για κάθε συλλεκτική επιφάνεια

## SP25A8 q/m<sup>2</sup> - t

$$\dot{m}_o = 0,15 \text{ Kg/s}$$

$$m_x = 0,2\dot{m}_o$$

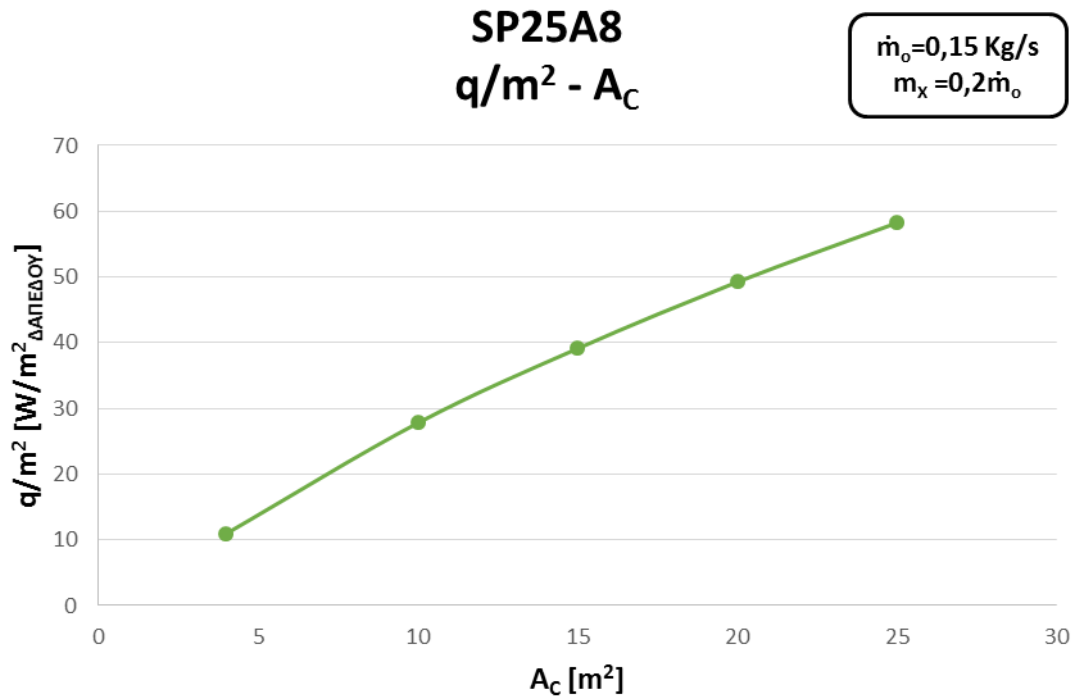


Σχήμα 7.10/3 : Καμπύλες Προσδιδόμενης Θερμότητας του υλικού

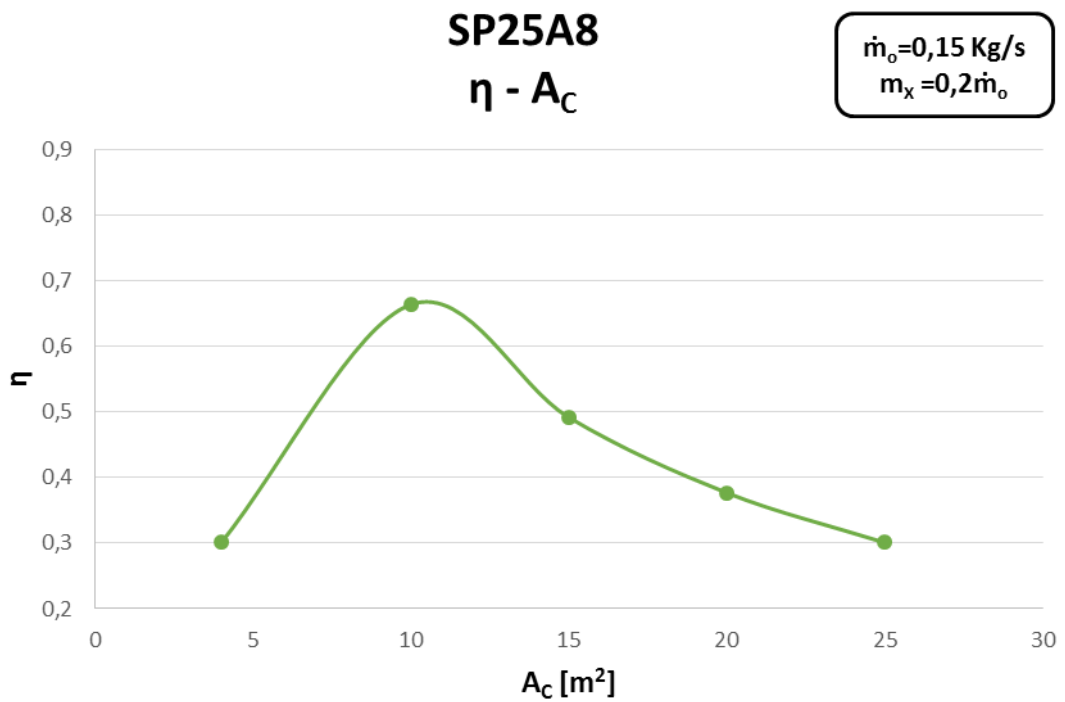
Για ακόμη μία φορά επιβεβαιώνεται η σχέση αναλογίας μεταξύ της συλλεκτικής επιφάνειας και των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών της εγκατάστασης, άρα και της προσδιδόμενης θερμότητας του υλικού προς το εσωτερικό περιβάλλον του δωματίου. Οι καμπύλες κάθε δοκιμής της  $A_c$  παρουσιάζουν παρόμοια μορφή, ωστόσο μετατοπίζονται προς υψηλότερες τιμές και εμφανίζουν πιο έντονα ακρότατα. Στον πίνακα 7.10/2, παρακάτω, δίνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών της μέσης παροχής  $\dot{m}_o = 0,15 \text{ Kg/s}$ , με τα οποία προκύπτουν οι καμπύλες της προσδιδόμενης θερμότητας και του βαθμού εκμετάλλευσης, συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας.

	$A_c = 4\text{m}^2$	$A_c = 10\text{m}^2$	$A_c = 15\text{m}^2$	$A_c = 20\text{m}^2$	$A_c = 25\text{m}^2$
$T_{\min}$ [°C]	23,15	26,01	27,03	27,72	28,23
$T_{\max}$ [°C]	26,06	32,09	37,93	42,86	47,09
$\eta$	0,301	0,664	0,492	0,377	0,301
$q/m^2_{\Delta}$ [W/m <sup>2</sup> ]	10,96	27,8	39,1	49,23	58,22
$\bar{T}_{z.n.x}$ [°C]	24,76	28,18	32,01	34,6	36,86

Πίνακας 7.10/2 : Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων



Σχήμα 7.10/4 : Καμπύλη προσδιδόμενης θερμότητας του υλικού συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας



Σχήμα 7.10/5 : Καμπύλη βαθμού εκμετάλλευσης του υλικού συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας

Στο σχήμα 7.10/4 φαίνεται ξεκάθαρα η σχέση αναλογίας της συλλεκτικής επιφάνειας και της αποδιδόμενης θερμότητας του υλικού, η οποία προκύπτει από τις τιμές του συγκεντρωτικού πίνακα των αποτελεσμάτων. Στο σχήμα 7.10/5 απεικονίζεται η μεταβολή του βαθμού εκμετάλλευσης των δοκιμών. Όπως ήταν αναμενόμενο, η αύξηση της  $A_c$  στην τιμή των  $10\text{m}^2$ , αναπτύσσει υψηλότερες θερμοκρασίες εντός του εύρους λειτουργίας του υλικού, αυξάνοντας τον βαθμό εκμετάλλευσης. Ωστόσο, η περαιτέρω αύξηση των θερμοκρασιών για  $A_c \geq 15\text{m}^2$ , οδηγεί μεγάλο μέρος του κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης του υλικού, σταδιακά, εκτός διφασικής περιοχής, με αποτέλεσμα την μείωση του βαθμού εκμετάλλευσης.

Τέλος, δίνεται πίνακας αποτελεσμάτων των δοκιμών μεταβολής συλλεκτικής επιφάνειας για τις δύο τιμές παροχών, την μέση παροχή  $\overline{\dot{m}}_o = 0,15\text{Kg/s}$  και την παροχή που αντιστοιχεί στην εκάστοτε  $A_c$ . Σημειώνεται ότι για συλλεκτική επιφάνεια  $A_c = 15\text{m}^2$ , δεν πραγματοποιήθηκε νέα μεταβολή αφού η τιμή της μέσης παροχής  $\overline{\dot{m}}_o$  αντιστοιχεί στην συλλεκτική επιφάνεια.

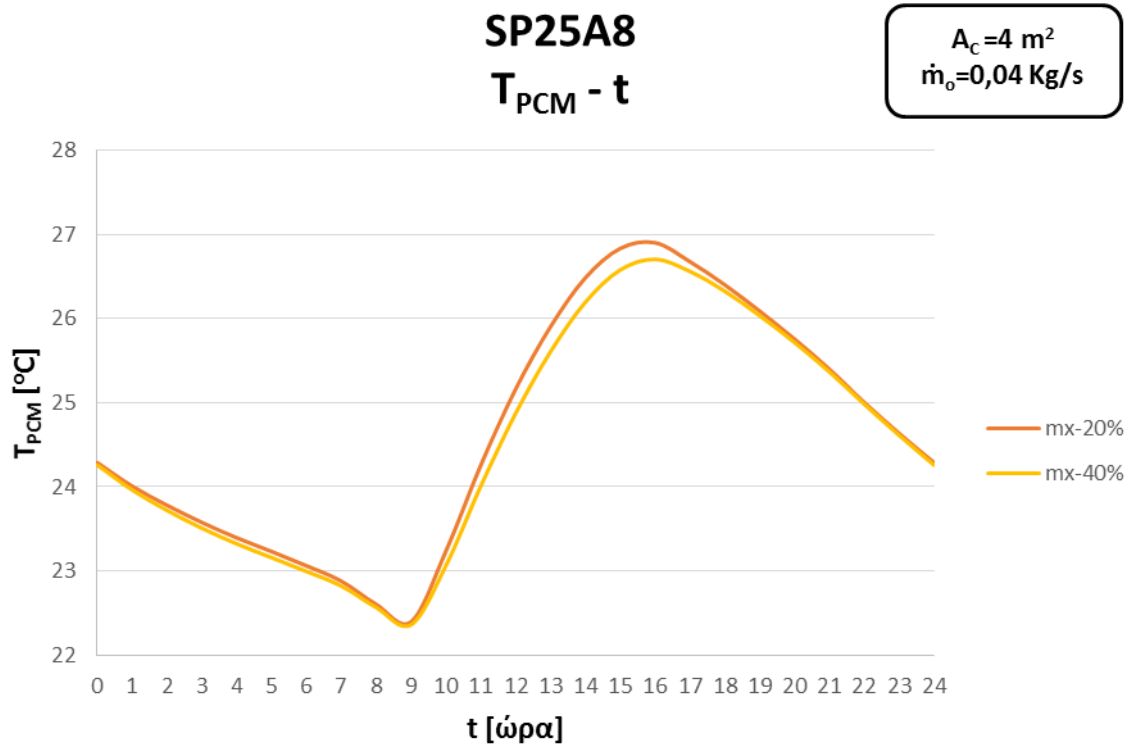
	$A_c = 4\text{m}^2$		$A_c = 10\text{m}^2$		$A_c = 20\text{m}^2$		$A_c = 25\text{m}^2$	
[Kg/s]	$\dot{m}_o = 0,04$	$\dot{m}_o = 0,15$	$\dot{m}_o = 0,1$	$\dot{m}_o = 0,15$	$\dot{m}_o = 0,2$	$\dot{m}_o = 0,15$	$\dot{m}_o = 0,25$	$\dot{m}_o = 0,15$
$T_{\min}$ [°C]	22,39	23,15	25,5	26,01	28,51	27,72	30,08	28,23
$T_{\max}$ [°C]	26,9	26,06	32,84	32,09	41,33	42,86	43,74	47,09
$\eta$	0,473	0,301	0,735	0,664	0,262	0,377	0,096	0,301
$q/m^2_{\Delta}$ [W/m <sup>2</sup> ]	11,51	10,96	27,08	27,8	50,9	49,23	61,39	58,22
$\overline{T}_{Z.N.X}$ [°C]	25,49	24,76	27,89	28,18	34,68	34,6	37,03	36,86

Πίνακας 7.10/3 : Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, επιβεβαιώνεται η επίδραση των μεταβολών παροχής. Για τις συλλεκτικές επιφάνειες των  $4\text{m}^2$  και  $10\text{m}^2$ , στις οποίες πραγματοποιείται αύξηση της παροχής, παρατηρείται η μείωση του θερμοκρασιακού εύρους του κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης. Αντίθετα, για τις συλλεκτικές επιφάνειες των  $20\text{m}^2$  και  $25\text{m}^2$ , που επιδέχονται μείωση της παροχής, παρατηρείται αύξηση του θερμοκρασιακού εύρους του κύκλου. Επιπροσθέτως, στις συλλεκτικές επιφάνειες των  $4\text{m}^2$  και  $25\text{m}^2$ , για τις οποίες η μεταβολή της παροχής ήταν μεγαλύτερη, παρατηρείται αντίστοιχα μεγαλύτερη μεταβολή του θερμοκρασιακού εύρους. Ωστόσο, στις συλλεκτικές επιφάνειες των  $10\text{m}^2$  και  $20\text{m}^2$ , που η μεταβολή της παροχής ήταν μικρή, παρουσιάζεται μικρή μεταβολή του εύρους του κύκλου.

## 7.11 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΠΟΜΑΣΤΕΥΣΗΣ

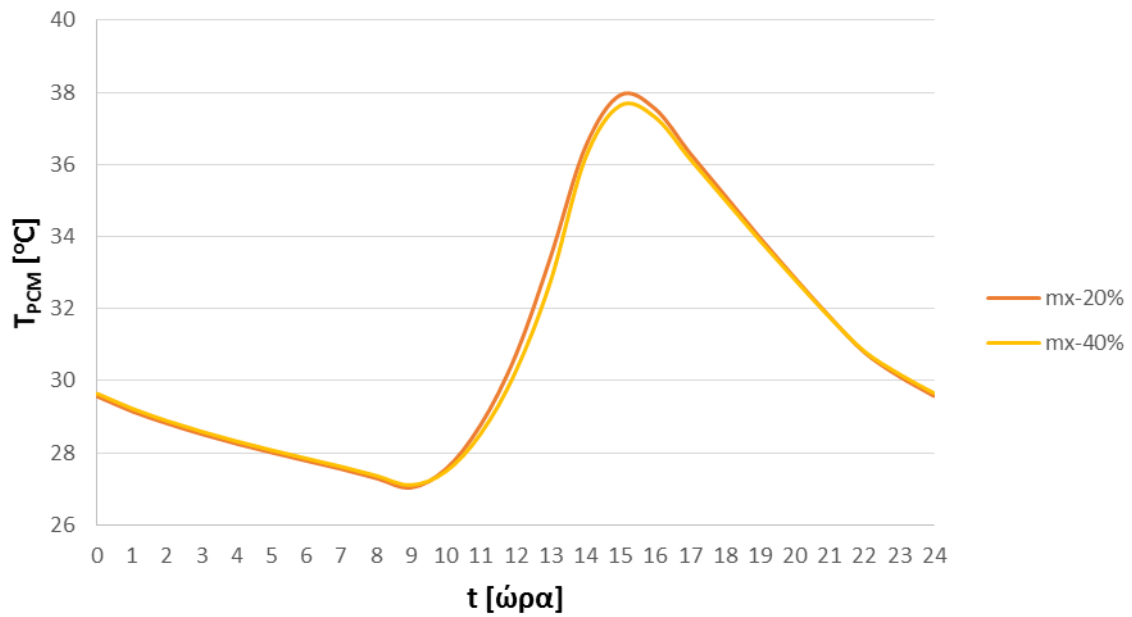
Σε όλες τις δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι το σημείο αυτό, το ποσοστό της παροχής θερμού νερού του συλλέκτη προς τον εναλλάκτη της δεξαμενής παρέμενε σταθερό στο 20% ( $\dot{m}_x = 0,2\dot{m}_o$ ,  $\dot{m}_T = 0,8\dot{m}_o$ ). Οι αρχικές δοκιμές, λοιπόν, της μεταβολής συλλεκτικής επιφάνειας, πραγματοποιήθηκαν εκ νέου, με αυξημένη την παροχή απομάστευσης σε ποσοστό 40%, δηλαδή  $\dot{m}_x = 0,4\dot{m}_o$ . Μεγαλύτερη παροχή μάζας νερού στον εναλλάκτη, αναμένεται να αποφέρει μετατόπιση του θερμοκρασιακού προφίλ του ζεστού νερού χρήσης σε υψηλότερες τιμές, με αντίστοιχη μετατόπιση του προφίλ του υλικού προς χαμηλότερες θερμοκρασίες, αφού η παροχή προς το PCM μειώνεται σε  $\dot{m}_T = 0,6\dot{m}_o$ . Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μεταβολή των παροχών του εναλλάκτη και της δεξαμενής, τέθηκαν σε σύγκριση με τα αρχικά, η οποία αποτυπώνεται στις επόμενες καμπύλες θερμοκρασιακών προφίλ. Παρατίθεται σύγκριση, ενδεικτικά, μόνο για τις συλλεκτικές επιφάνειες των  $4\text{m}^2$ ,  $15\text{m}^2$  και  $25\text{m}^2$ , με τις οποίες φαίνεται η πορεία των μεταβολών. Στα αρχικά διαγράμματα δίνονται οι καμπύλες θερμοκρασίας του υλικού, ενώ στην συνέχεια οι καμπύλες θερμοκρασίας του ζεστού νερού χρήσης.



Σχήμα 7.11/1 : Σύγκριση Θερμοκρασιακών Προφίλ για μεταβολή παροχών

### SP25A8 $T_{PCM} - t$

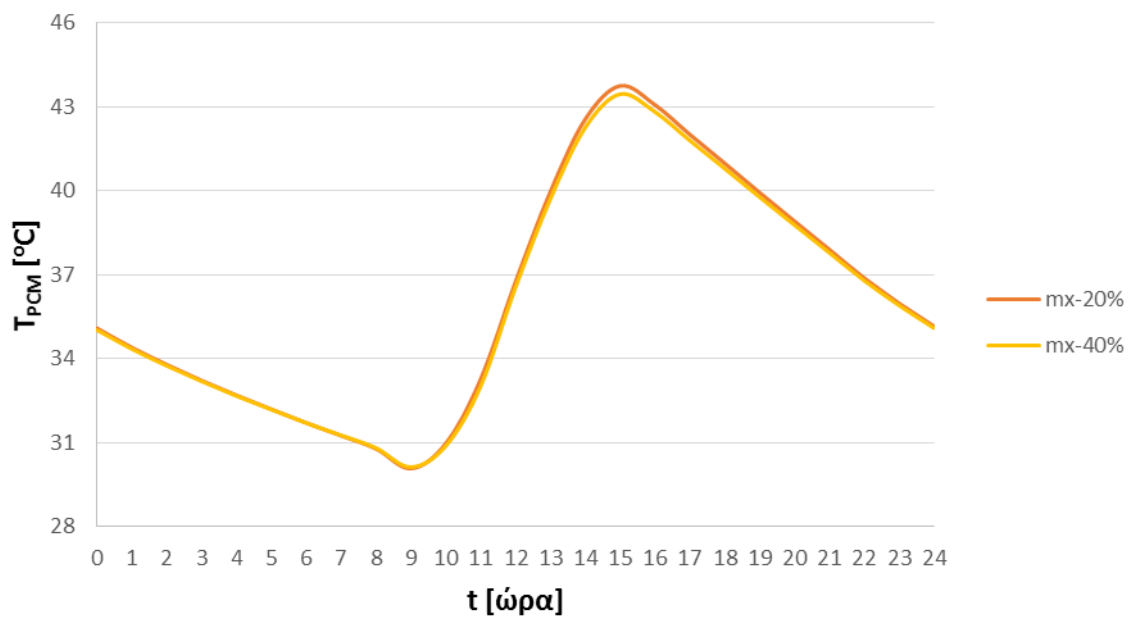
$A_c = 15 \text{ m}^2$   
 $\dot{m}_o = 0,15 \text{ Kg/s}$



Σχήμα 7.11/2 : Σύγκριση Θερμοκρασιακών Προφίλ για μεταβολή παροχών

### SP25A8 $T_{PCM} - t$

$A_c = 25 \text{ m}^2$   
 $\dot{m}_o = 0,25 \text{ Kg/s}$

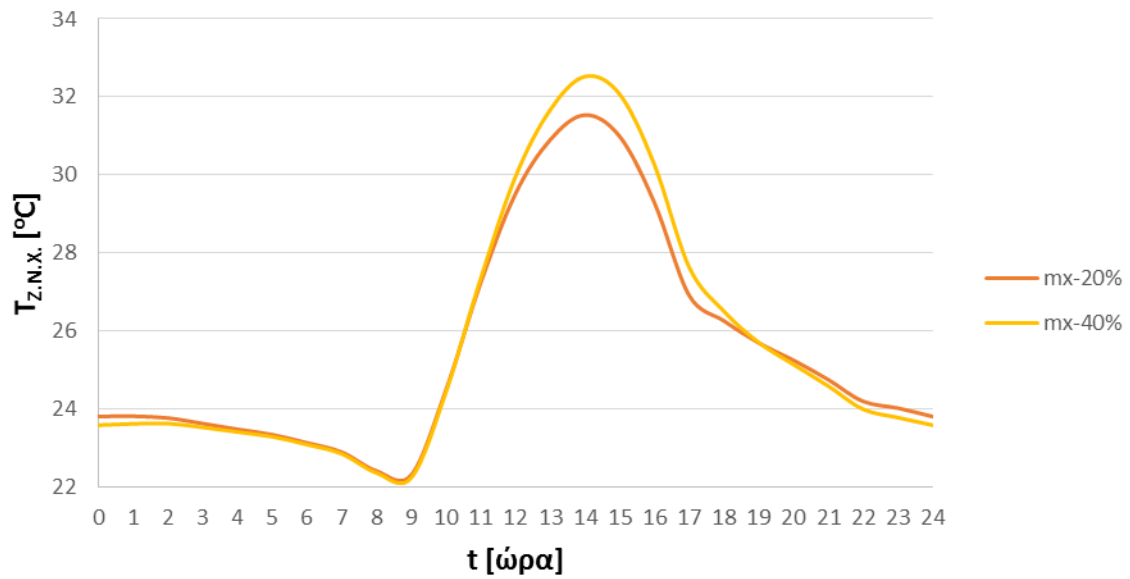


Σχήμα 7.11/3 : Σύγκριση Θερμοκρασιακών Προφίλ για μεταβολή παροχών



### SP25A8 $T_{Z.N.X.} - t$

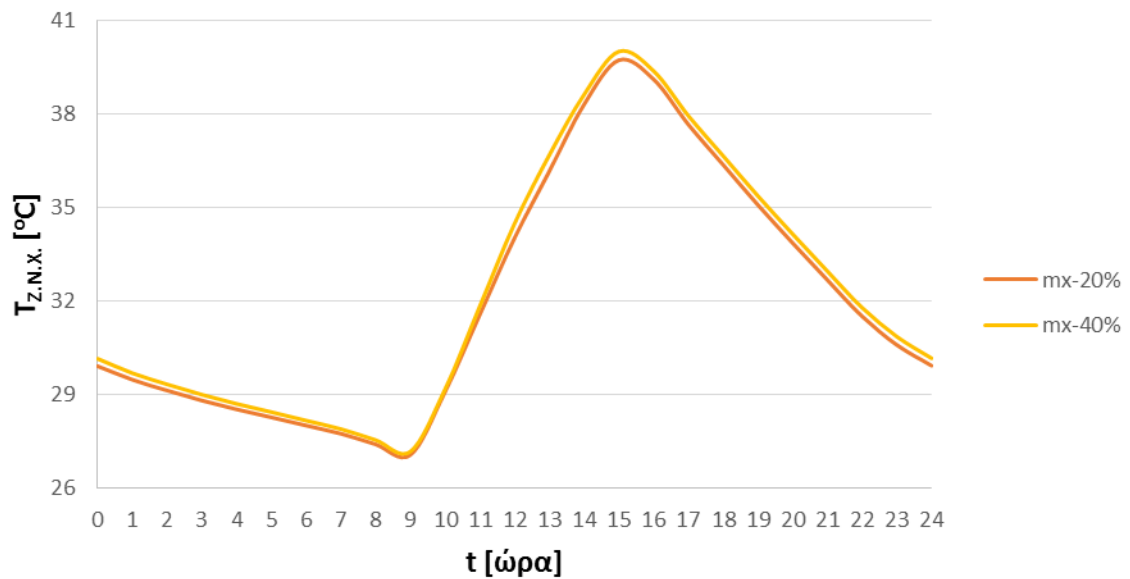
$A_c = 4 \text{ m}^2$   
 $\dot{m}_o = 0,04 \text{ Kg/s}$



7.11/4 : Σύγκριση Θερμοκρασιακών Προφίλ Ζεστού Νερού Χρήσης για μεταβολή παροχών

### SP25A8 $T_{Z.N.X.} - t$

$A_c = 15 \text{ m}^2$   
 $\dot{m}_o = 0,15 \text{ Kg/s}$

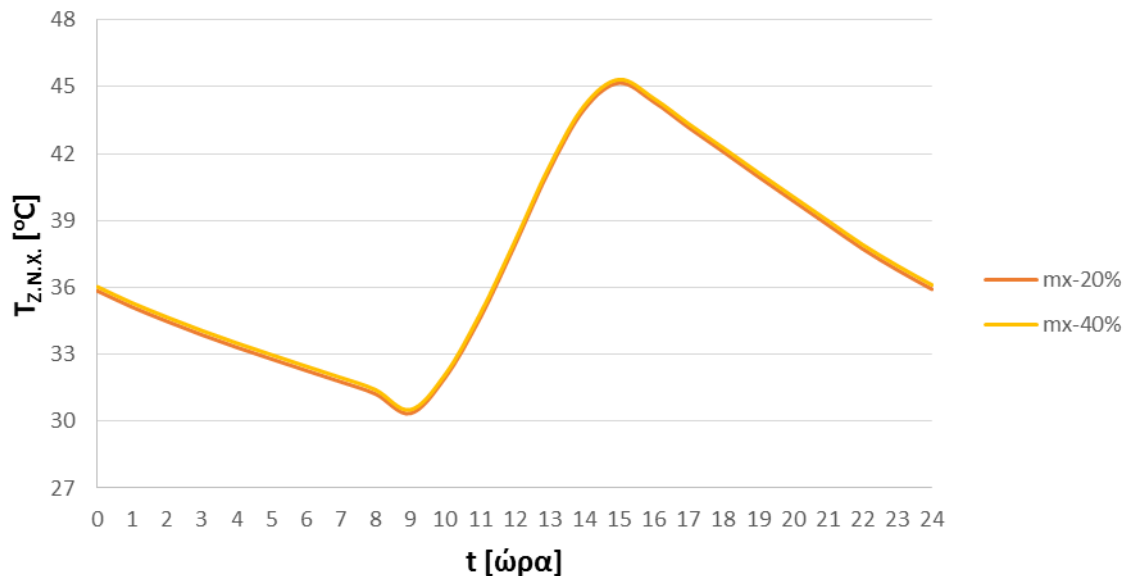


7.11/5 : Σύγκριση Θερμοκρασιακών Προφίλ Ζεστού Νερού Χρήσης για μεταβολή παροχών

## SP25A8

$T_{Z.N.X.} - t$

$A_c = 25 \text{ m}^2$   
 $\dot{m}_o = 0,25 \text{ Kg/s}$



7.11/6 : Σύγκριση Θερμοκρασιακών Προφίλ Ζεστού Νερού Χρήσης για μεταβολή παροχών

Καταρχήν, η μόνη διαφορά που πρέπει να επισημανθεί, μεταξύ των διαγραμμάτων θερμοκρασίας του υλικού και του ζεστού νερού χρήσης, είναι ότι μέσω της μεταβολής των παροχών, πραγματοποιήθηκε η αναμενόμενη μετατόπιση των θερμοκρασιακών προφίλ, για το ζεστό νερό χρήσης προς υψηλότερες τιμές (αύξηση  $\dot{m}_x$ ), ενώ για το υλικό προς χαμηλότερες (μείωση  $\dot{m}_T$ ). Ωστόσο, υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του εναλλάκτη, θα έπρεπε με την αύξηση της παροχής θερμού νερού να πραγματοποιηθεί μεγαλύτερη συναλλαγή θερμότητας με το κρύο ρεύμα του δικτύου, που θα επέφερε προφανώς μεγαλύτερες θερμοκρασίες στο προφίλ του ζεστού νερού χρήσης. Η παραδοχή ιδανικής λειτουργίας του εναλλάκτη αλλά και η παραδοχή εξόδου του ζεστού νερού χρήσης με θερμοκρασία ίση της εξόδου από τον συλλέκτη ( $\bar{T}_{Z.N.X.} = T_o$ ), εμποδίζει την μετάδοση θερμότητας του εναλλάκτη, η οποία όπως φάνηκε στα διαγράμματα, μειώνεται όσο αυξάνεται η συλλεκτική επιφάνεια (αύξηση  $\dot{m}_o$ ). Υπενθυμίζεται ότι σε κάθε συλλεκτική επιφάνεια αντιστοιχεί συγκεκριμένη τιμή συνολικής παροχής  $\dot{m}_o$ , η οποία αναγράφεται σε κάθε διάγραμμα. Συνεπώς, η αύξηση της παροχής απομάστευσης  $\dot{m}_T$  σε 40%, αντιστοιχεί σε διαφορετική τιμή της  $\dot{m}_T$  για κάθε συλλεκτική επιφάνεια. Για ευκολία, δίνονται οι παροχές κάθε δοκιμής, στον παρακάτω πίνακα.

	$A_c = 4\text{m}^2$	$A_c = 15\text{m}^2$	$A_c = 25\text{m}^2$
$\dot{m}_o$ [Kg/s]	0,04	0,15	0,25
$\dot{m}_x = 0,2\dot{m}_o$ [Kg/s]	0,008	0,03	0,05
$\dot{m}_x = 0,4\dot{m}_o$ [Kg/s]	0,016	0,06	0,1

Πίνακας 7.11/1 : Συγκεντρωτικός Πίνακας Παροχών Μάζας Νερού

Για την ανάλυση της σύγκριση των διαγραμμάτων μεταξύ των διαφορετικών συλλεκτικών επιφανειών, χρησιμοποιούμε την παρακάτω εξίσωση.

$$\dot{m}_X * C_{P_v} * (T_o - T_X) = \dot{m}_\delta * C_{P_v} * (T_{Z.N.X.} - T_\delta) \Rightarrow$$

$$\dot{m}_X * (T_o - T_X) = \dot{m}_\delta * (T_o - T_\delta)$$

Για **σταθερή τιμή  $A_c$** , πραγματοποιούνται οι δύο δοκιμές με τιμές παροχής  $\dot{m}_X = 0,2 \dot{m}_o$  και  $\dot{m}_X = 0,4 \dot{m}_o$ . Τα μεγέθη που παραμένουν σταθερά στην παραπάνω εξίσωση και για τις δύο δοκιμές είναι η θερμοκρασία  $T_o$ , η παροχή δικτύου  $\dot{m}_\delta$  και η θερμοκρασία νερού δικτύου  $T_\delta$ , δηλαδή ολόκληρο το δεύτερο μέλος της εξίσωσης. Για την εξισορρόπηση λοιπόν, της αύξησης της παροχής  $\dot{m}_X$  πρέπει να μειωθεί η θερμοκρασιακή διαφορά  $(T_o - T_X)$ , μειώνοντας έτσι την επιρροή του εναλλάκτη στις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερη είναι η αύξηση της παροχής τόσο μικρότερες είναι οι μεταβολές στα θερμοκρασιακά προφίλ της εγκατάστασης. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, λοιπόν, είναι λογικό η συλλεκτική επιφάνεια  $A_c = 4m^2$  με μεταβολή παροχής  $\Delta \dot{m}_X = 0,008 \text{ Kg/s}$ , να εμφανίζει εντονότερη μεταβολή θερμοκρασιακών προφίλ από τις υπόλοιπες συλλεκτικές επιφάνειες  $A_c = 15m^2$  και  $A_c = 25m^2$  με  $\Delta \dot{m}_X = 0,03 \text{ Kg/s}$  και  $\Delta \dot{m}_X = 0,05 \text{ Kg/s}$  αντίστοιχα.

Με αφορμή τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτής της ενότητας, εκφράζεται παρακάτω μία αξιολόγηση της λειτουργίας του εναλλάκτη ιδανικά και με την παραδοχή ισοτιμίας των  $\bar{T}_{Z.N.X.} = T_o$ .

Η αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας ( $A_c = 4 \div 25m^2$ ) επιφέρει αύξηση των θερμοκρασιών της εγκατάστασης και συγκεκριμένα της θερμοκρασία εξόδου του νερού από την συστοιχία των συλλεκτών  $T_o$ , άρα και της  $\bar{T}_{Z.N.X.}$ . Παράλληλα, η αύξηση της παροχής  $\dot{m}_X$  στον εναλλάκτη θα έπρεπε να αυξήσει την μετάδοση θερμότητας μεταξύ των ρευμάτων, με την αισθητή μετατόπιση των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών προς υψηλότερες τιμές. Ωστόσο, στα διαγράμματα παρατηρείται εμφανής μετατόπιση μόνο στην εγκατάσταση με συλλεκτική επιφάνεια  $A_c = 4m^2$ , ενώ αν λειτουργούσε ορθά ο εναλλάκτης θα έπρεπε η μετατόπιση να οξύνεται στις μεγαλύτερες τιμές  $A_c$ . Δίνεται ξανά η εξίσωση ισολογισμού ενέργειας του εναλλάκτη για την επεξήγηση που ακολουθεί.

$$\dot{m}_X * C_{P_v} * (T_o - T_X) = \dot{m}_\delta * C_{P_v} * (T_{Z.N.X.} - T_\delta) \Rightarrow$$

$$\dot{m}_X * (T_o - T_X) = \dot{m}_\delta * (T_o - T_\delta)$$

Η μέγιστη τιμή της παροχής του νερού δικτύου που εμφανίζεται κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι  $\dot{m}_{\delta \max} = 0,003 \text{ Kg/s}$ , τιμή αρκετά μικρότερη των αυξημένων παροχών  $\dot{m}_X$  ( $\dot{m}_X = 0,4 \dot{m}_o$ ). Στο δεύτερο μέλος, λοιπόν, της εξίσωσης, η παροχή  $\dot{m}_\delta$  παραμένει σταθερά χαμηλή, ενώ η θερμοκρασιακή διαφορά  $(T_o - T_\delta)$  αυξάνεται, αφού η θερμοκρασία του νερού δικτύου  $T_\delta$  είναι σταθερή και η  $T_o$  αυξάνεται ανάλογα με την  $A_c$ . Στο πρώτο μέλος, η παροχή  $\dot{m}_X$  αυξάνεται ανάλογα με την  $A_c$ ,

άρα για να εξισορροπηθούν τα μεγέθη και στα δύο μέλη, πρέπει η θερμοκρασιακή διαφορά ( $T_o - T_x$ ) να διατηρηθεί σε χαμηλή τιμή, με την θερμοκρασία  $T_x$  κοντά στην  $T_o$ . Η  $T_x$  με την σειρά της επηρεάζει την θερμοκρασία εισόδου  $T_{fi}$  και έτσι συνεχίζει η μεταβολή των θερμοκρασιών της εγκατάστασης. Η ανάλυση αυτή ισχύει για όλες τις δοκιμές συλλεκτικών επιφανειών, αποδεικνύοντας την μικρή αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη, γεγονός το οποίο βέβαια δεν αποτελεί αντικείμενο της μελέτης, ωστόσο τονίζεται ότι επηρεάζει τα αποτελέσματα σε κάποιο βαθμό. Στο επόμενο κεφάλαιο βέβαια πραγματοποιείται προσέγγιση της λειτουργίας του εναλλάκτη παρουσία απωλειών, οι οποίες μεταβάλλουν την θερμοκρασία εξόδου του ζεστού νερού χρήσης.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 7<sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

---

<sup>1</sup> ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟΥ ΕΛΛΑΔΑΣ Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010

<sup>2</sup> [http://www.netgreensolar.com/netgreen\\_heat\\_promo/body/images/costs\\_savings/profiles/hw-24hr\\_profile.PNG](http://www.netgreensolar.com/netgreen_heat_promo/body/images/costs_savings/profiles/hw-24hr_profile.PNG)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>

### ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ PCM-ΖΕΣΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΧΡΗΣΗΣ ΜΕ ΙΔΑΝΙΚΟ ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

#### 8.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία προσπάθεια βελτίωσης της εγκατάστασης, ως προς την λειτουργία του εναλλάκτη θερμότητας της δεξαμενής (boiler). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η πολυπλοκότητα προσέγγισης της διαστρωμάτωσης του νερού στην δεξαμενή, αποτελεί ξεχωριστό αντικείμενο έρευνας με ποικίλα μοντέλα προσομοίωσης, από το πιο απλό, πλήρους ανάμειξης, μέχρι τα μοντέλα πολλών στρωμάτων. Συνεπώς, οι συνθήκες λειτουργίας της δεξαμενής συνεχίζουν να θεωρούνται **ιδανικές**, με μόνιμη κατάσταση, προσεγγίζοντας την περίπτωση πλήρους ανάμειξης. Για λόγους απλότητας και πάλι, θεωρούμε την δεξαμενή **άπειρης χωρητικότητας, ομοιόμορφης θερμοκρασίας, χωρίς** την δυνατότητα **διαστρωμάτωσης** του νερού και **αμελητέων θερμικών απωλειών**. Η εγκατάσταση του συστήματος θέρμανσης παραμένει η ίδια που παρουσιάστηκε και εξετάσθηκε στις ενότητες 7.1-7.2 του προηγούμενου κεφαλαίου. Πρόκειται δηλαδή για συστοιχία ηλιακών συλλεκτών που τροφοδοτεί, πρωτίτως, σύστημα θέρμανσης PCM σε τοίχο δωματίου και δευτερευόντως, εναλλάκτη δεξαμενής για θέρμανση νερού χρήσης. Η συναλλαγή θερμότητας του θερμού νερού με το στρώμα PCM, εσωτερικά του τοίχου, έχει καθοριστεί από την αρχή του υπολογιστικού μέρους της διπλωματικής εργασίας ως **ιδανική**, παραδοχή η οποία ισχύει και σε αυτό το κεφάλαιο της μελέτης.

Η προσπάθεια προσέγγισης των πραγματικών συνθηκών, αφορά μόνο την λειτουργία του εναλλάκτη θερμότητας, η οποία στην εφαρμογή του κεφαλαίου 7 ήταν ιδανική. Κατά την συναλλαγή θερμότητας ενός πραγματικού εναλλάκτη προκύπτει, προφανώς, θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην είσοδο του θερμού μέσου (έξοδος συλλέκτη) και στην έξοδο του κρύου μέσου (ζεστό νερό χρήσης). Για τον λόγο αυτόν, επιλέγεται μία **τυπική τιμή  $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$** , δηλαδή έχουμε την σχέση θερμοκρασιών :

$$\Delta T = T_o - T_{Z.N.X} = 2^{\circ}\text{C}$$

Με τις νέες, λοιπόν, τιμές της θερμοκρασίας ζεστού νερού χρήσης, επαναλαμβάνονται οι δοκιμές μεταβολής συλλεκτικής επιφάνειας που πραγματοποιήθηκαν στις ενότητες 7.3-7.7. Αναμένεται αμελητέα μεταβολή τόσο των θερμοκρασιακών προφίλ του υλικού όσο και της αποδιδόμενης θερμότητας προς το δωμάτιο. Η διαφοροποίηση θα παρατηρηθεί στις καμπύλες θερμοκρασίες του ζεστού νερού χρήσης, με μετατόπιση αυτών προς χαμηλότερες τιμές.

Η σύγκριση των δοκιμών ιδανικού και 'πραγματικού' εναλλάκτη πραγματοποιείται καθαρά για λόγους πληρότητας, χωρίς, ουσιαστικά, την παρουσίαση καινούργιων

συμπεριφορών της εφαρμογής. Επίσης, σημειώνεται ότι έγινε προσπάθεια προσέγγισης της θερμοκρασιακής διαφοράς του εναλλάκτη, μέσω της εφαρμογής της μεθόδου NTU (μέθοδος θερμικών υπολογισμών εναλλακτών θερμότητας) με τον υπολογισμό της αποτελεσματικότητας  $\epsilon$  του εναλλάκτη. Ωστόσο, λόγω μικρών παροχών του νερού δικτύου και χρήσης πινάκων, διαγραμμάτων, προέκυψε μία αρκετά προσεγγιστική τιμή της αποτελεσματικότητας, η οποία απέδιδε πολύ μικρή θερμοκρασιακή διαφορά  $\Delta T$ , οδηγώντας στην απόρριψη της μεθόδου. Στην συνέχεια, δίνονται διαγράμματα σύγκρισης των συστημάτων ιδανικού και 'πραγματικού' εναλλάκτη, ενδεικτικά για τιμές συλλεκτικής επιφάνειας  $A_c=4\text{m}^2$ ,  $A_c=15\text{m}^2$  και  $A_c=25\text{m}^2$ .

## 8.2 ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ

Για ποσοστό απομάστευσης 20%, επαναλαμβάνονται οι δοκιμές μεταβολής συλλεκτικής επιφάνειας, με την αντίστοιχη μεταβολή συνολικής παροχής  $\dot{m}_o$ . Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για τιμές συλλεκτικής επιφάνειας  $A_c=4 \div 25\text{m}^2$ , με τις παραμέτρους και τα αποτελέσματα να παρατίθενται στους παρακάτω συγκεντρωτικούς πίνακες.

Σταθερές Παράμετροι Δοκιμών	
Παροχή Μάζας Νερού Εναλλάκτη	$\dot{m}_x = 0,2\dot{m}_o$
Παροχή Μάζας Νερού Τοίχου-PCM	$\dot{m}_T = 0,8\dot{m}_o$
Θερμοκρασία Εσωτερικού Περιβάλλοντος [°C]	$T_\Delta = 22$
Πάχος Στρώματος Υλικού Αλλαγής Φάσης [m]	$l_{PCM} = 0,02$

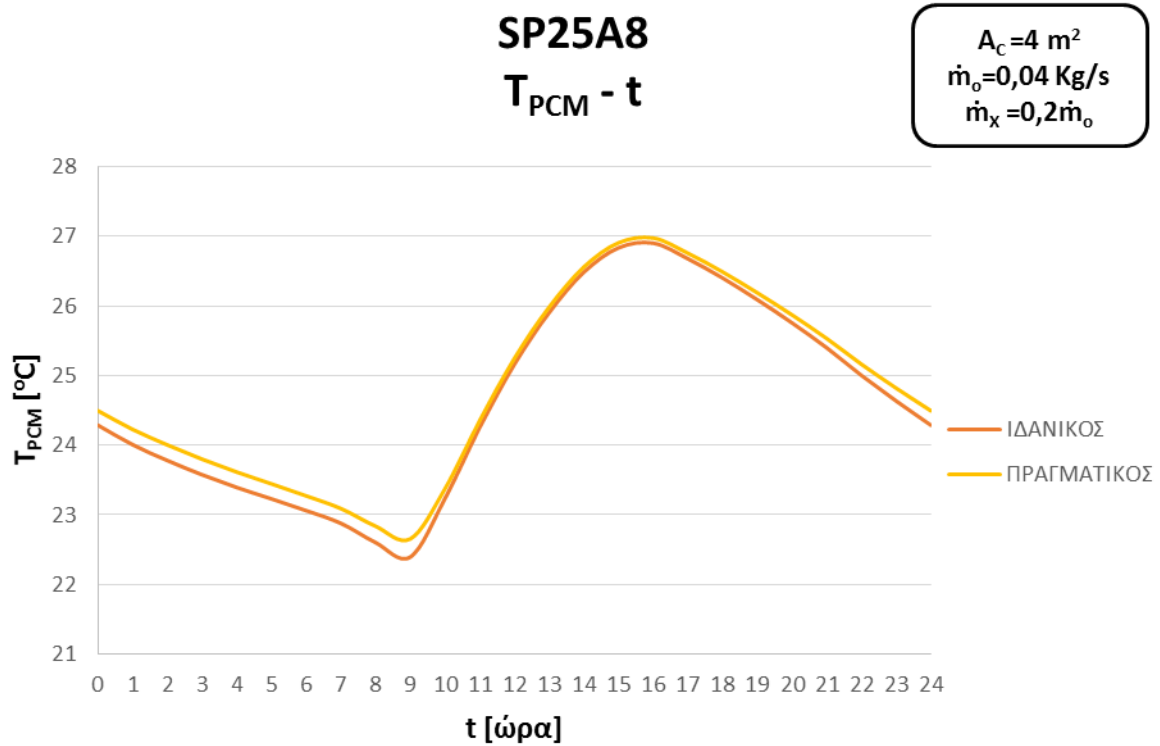
Πίνακας 8.2/1 : Πίνακας Σταθερών Παραμέτρων Δοκιμών

	1 <sup>η</sup> Δοκιμή	2 <sup>η</sup> Δοκιμή	3 <sup>η</sup> Δοκιμή	4 <sup>η</sup> Δοκιμή	5 <sup>η</sup> Δοκιμή
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	4	10	15	20	25
$\dot{m}_o$ [Kg/s]	0,04	0,1	0,15	0,2	0,25
$T_{min}$ [°C]	22,65	25,64	27,13	28,62	30,2
$T_{max}$ [°C]	26,98	33,08	38,12	41,49	43,86
$\eta$	0,477	0,717	0,474	0,258	0,086
$q/m^2_\Delta$ [W/m <sup>2</sup> ]	12,19	27,71	39,74	51,57	62
$\bar{T}_{z.n.x}$ [°C]	23,72	27,44	30,18	32,84	35,18

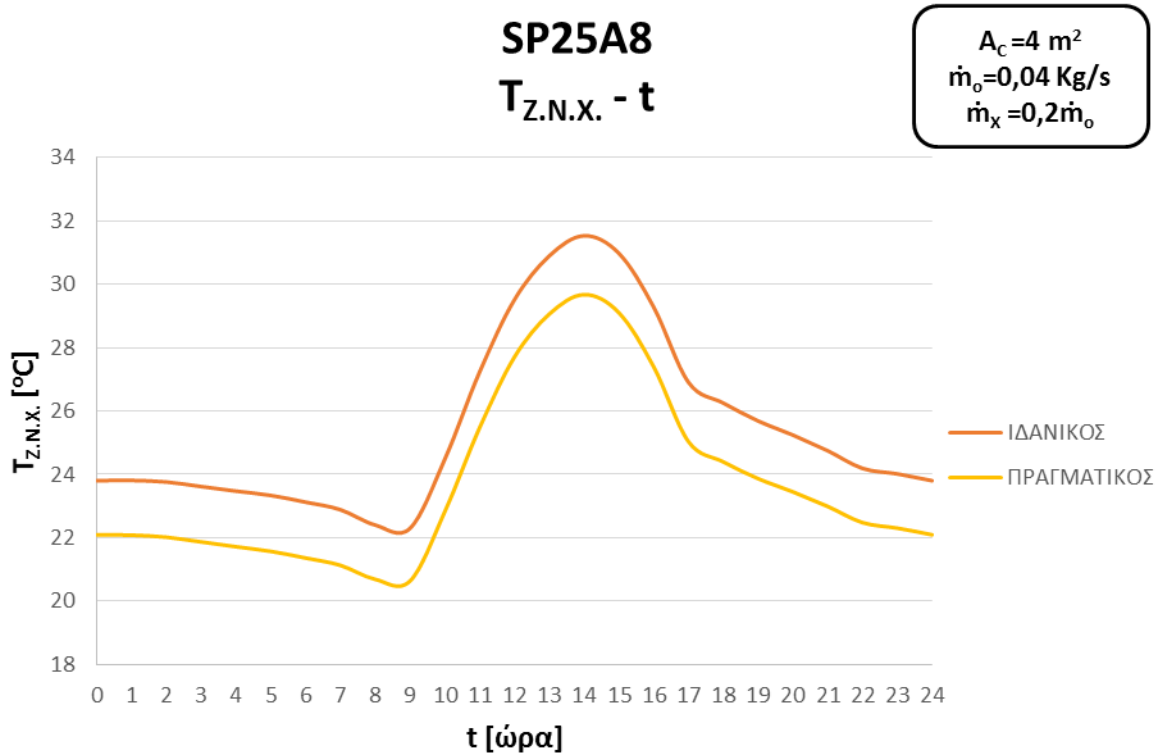
Πίνακας 8.2/2 : Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων

Λόγω ομοιότητας των διαγραμμάτων παρατίθενται παρακάτω, ενδεικτικά, μόνο τα διαγράμματα των δοκιμών 1,3,5 σε σύγκριση με τις ίδιες δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για την εγκατάσταση με τον ιδανικό εναλλάκτη (ενότητες 7.3-7.5). Κάθε διάγραμμα λοιπόν, περιλαμβάνει την ιδανική καμπύλη (ιδανικός εναλλάκτης) και την καμπύλη παρουσία απωλειών ('πραγματικός εναλλάκτης).

### 8.2.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 1<sup>ης</sup> ΔΟΚΙΜΗΣ- ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ $A_c = 4\text{m}^2$

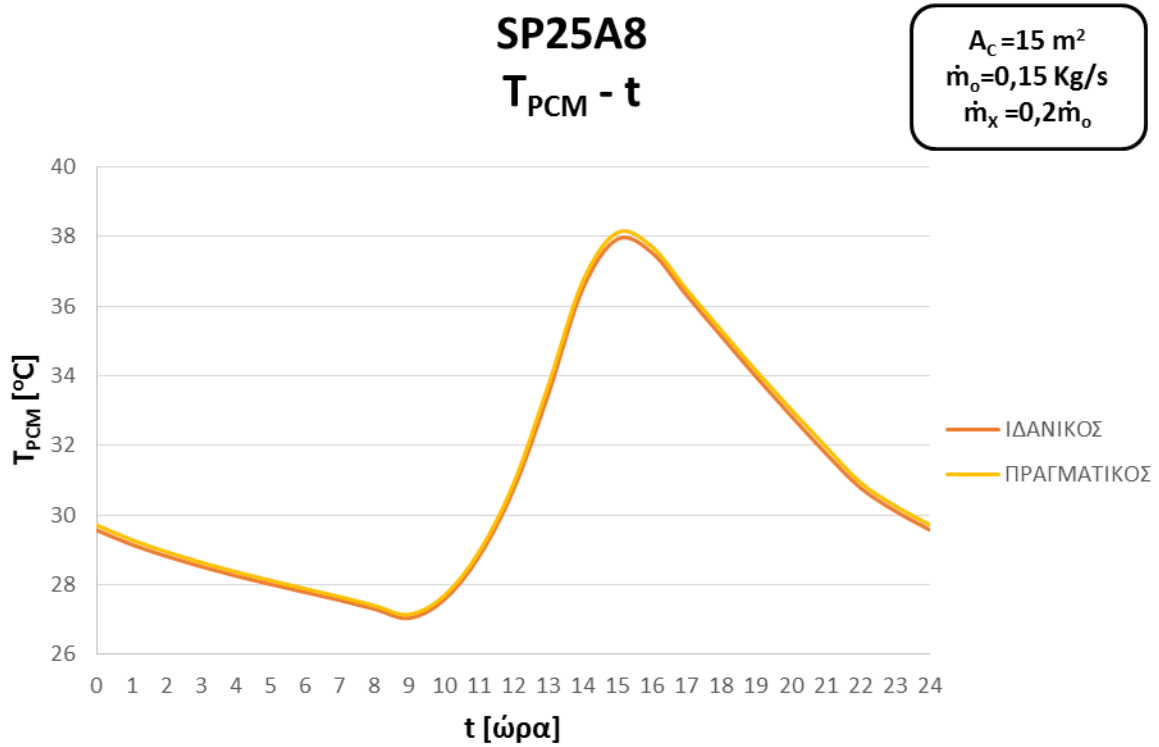


Σχήμα 8.2.1/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου

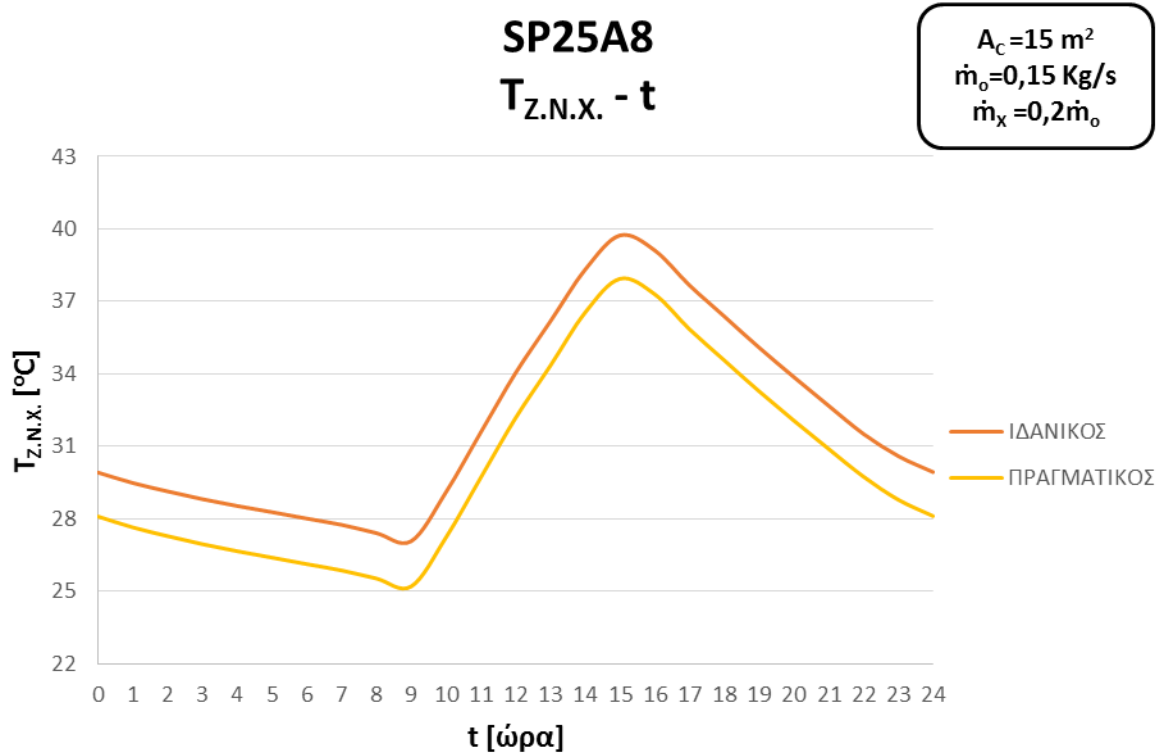


Σχήμα 8.2.1/2 : Θερμοκρασιακό Προφίλ Ζεστού Νερού Χρήσης

8.2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 3<sup>ης</sup> ΔΟΚΙΜΗΣ- ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ  $A_c = 15m^2$



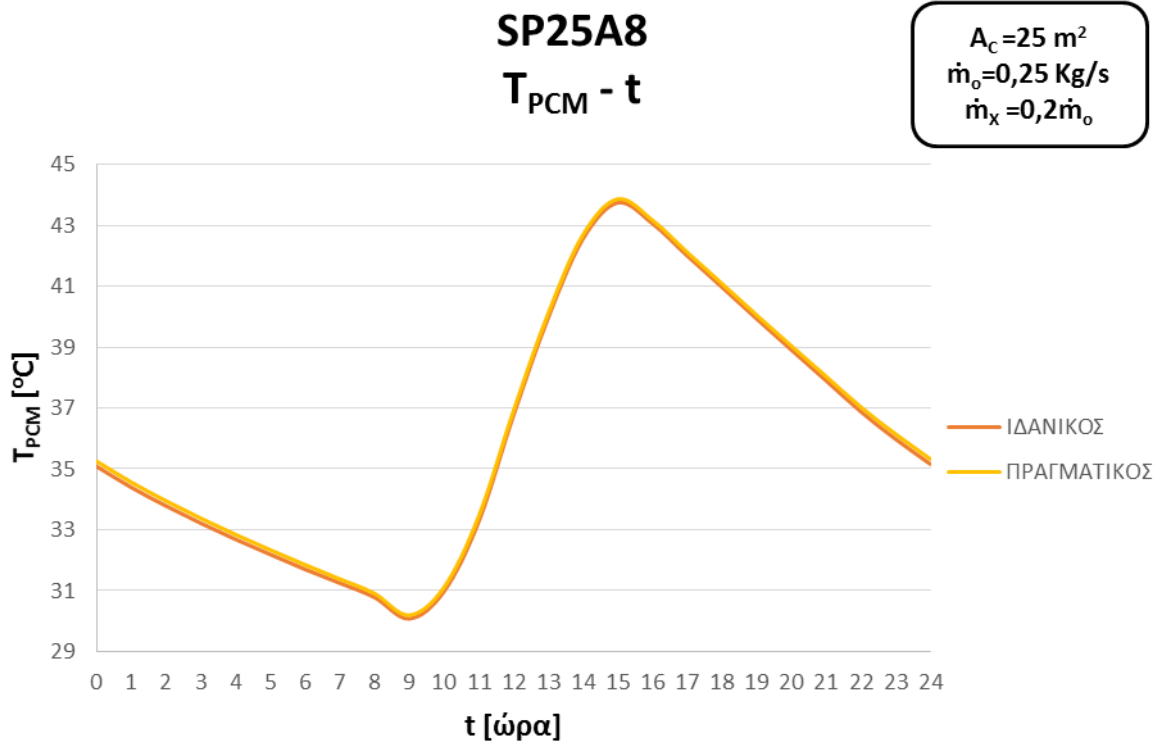
Σχήμα 8.2.2/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου



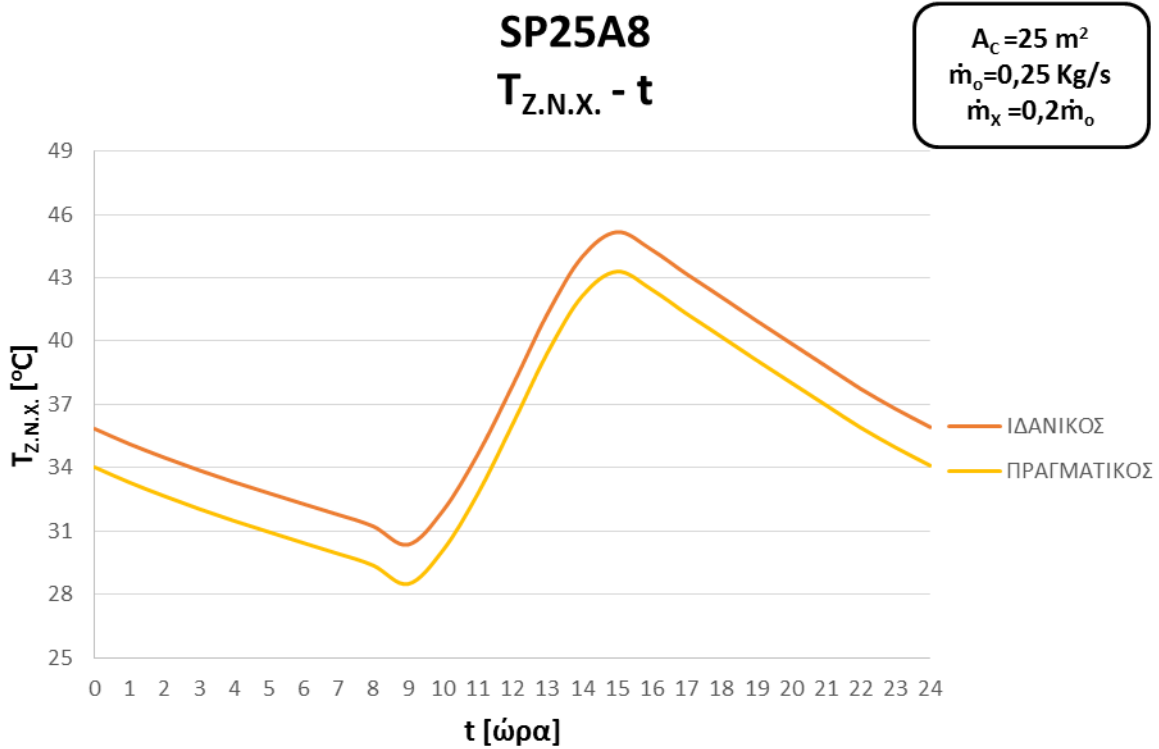
Σχήμα 8.2.2/2 : Θερμοκρασιακό Προφίλ Ζεστού Νερού Χρήσης



### 8.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 5<sup>ης</sup> ΔΟΚΙΜΗΣ- ΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ $A_c = 25\text{m}^2$



Σχήμα 8.2.3/1 : Θερμοκρασιακό Προφίλ για την 21η Ιανουαρίου



Σχήμα 8.2.3/2 : Θερμοκρασιακό Προφίλ Ζεστού Νερού Χρήσης

#### 8.2.4 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην ενότητα 7.11 εξηγήθηκε το φαινόμενο μείωσης των διαφοροποιήσεων στις καμπύλες με την αύξηση της παροχής, η οποία πραγματοποιείται με την αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας. Συνεπώς, ισχύει και σε αυτήν την περίπτωση, οι καμπύλες των θερμοκρασιών απέχουν μεταξύ τους, σε μεγαλύτερο βαθμό για μικρότερες συλλεκτικές επιφάνειες και συνολικές παροχές  $\dot{m}_o$ . Με την 'πραγματική' λειτουργία του εναλλάκτη λοιπόν, προφανώς, πραγματοποιήθηκε μετατόπιση του θερμοκρασιακού προφίλ ζεστού νερού χρήσης κατά 2°C χαμηλότερα. Στα διαγράμματα θερμοκρασιακού προφίλ του υλικού PCM παρατηρείται μία μικρή αύξηση με τον πραγματικό εναλλάκτη. Οι καμπύλες της αποδιδόμενης θερμότητας του υλικού προς το δωμάτιο έχουν ακριβώς την ίδια μορφή. Η μικρή αυτή μεταβολή οφείλεται στην επιρροή της μείωσης της  $\bar{T}_{z.n.x.}$ , με την οποία επιτρέπεται η αύξηση της διαφοράς ( $T_o - T_x$ ) στην σχέση ισολογισμού του εναλλάκτη, δηλαδή η μείωση της  $T_x$ . Με την σειρά της η  $T_x$ , μέσω της ανάμειξης των ρευμάτων, πριν τον συλλέκτη, προκαλεί ακόμα μικρότερη μείωση της θερμοκρασίας εισόδου του νερού στον συλλέκτη  $T_{fi}$ . Τελικά, μέσω της σχέσης πρόσδοσης της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη στο νερό κυκλοφορίας, η ελάχιστη μείωση της  $T_{fi}$  επιφέρει την ελάχιστη αύξηση της  $T_o$  (τιμή επόμενης ώρας), η οποία βέβαια αποτελεί και την θερμοκρασία του υλικού στην αρχή της ώρας. Με αυτήν την αλυσίδα μεταβολών εξηγείται η ελάχιστη διαφοροποίηση των εγκαταστάσεων ιδανικού και 'πραγματικού' εναλλάκτη.

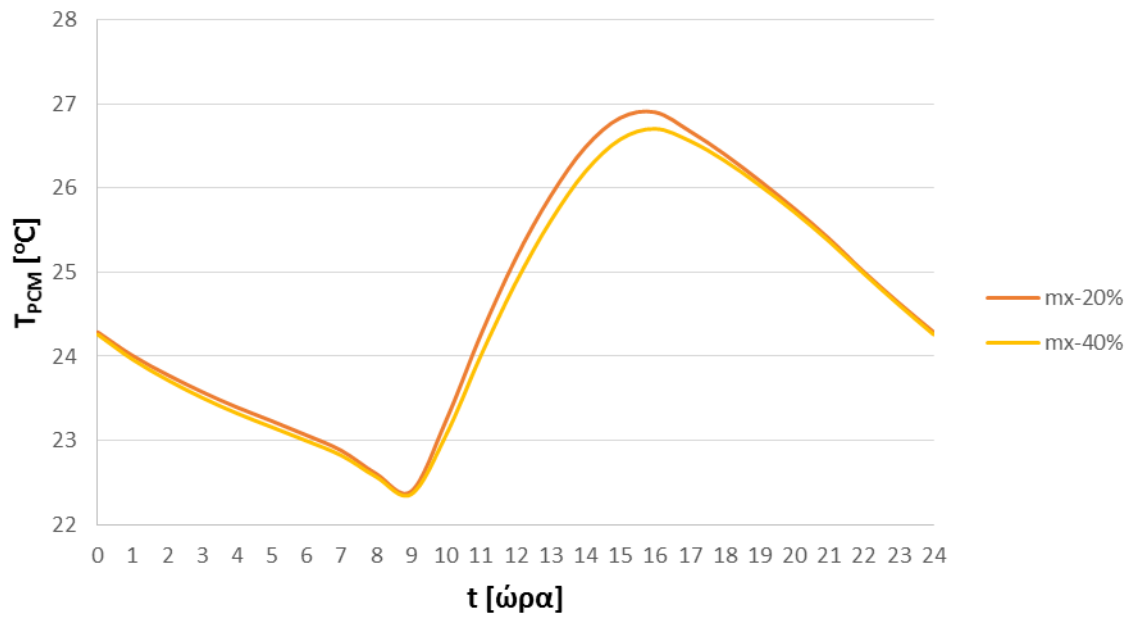
Εύκολα, λοιπόν, μπορεί κανείς να συμπεράνει την μικρή επίπτωση, της χρήσης ιδανικού εναλλάκτη, στα αποτελέσματα της εγκατάστασης που μελετάται. Πραγματοποιείται αισθητή μεταβολή της θερμοκρασίας ζεστού νερού χρήσης, το επίκεντρο όμως της μελέτης, η απόδοση, δηλαδή, του υλικού αλλαγής φάσης, παρουσιάζει αμελητέα μεταβολή.

#### 8.3 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΠΟΜΑΣΤΕΥΣΗΣ

Οι δοκιμές των προηγούμενων ενοτήτων πραγματοποιήθηκαν με το ποσοστό παροχής θερμού νερού του συλλέκτη προς τον εναλλάκτη της δεξαμενής, σταθερό στο 20%. Επιβάλλεται, λοιπόν, η επανάληψη των δοκιμών με αυξημένη παροχή του εναλλάκτη, σε ποσοστό 40% ( $\dot{m}_x = 0,4\dot{m}_o$ ,  $\dot{m}_T = 0,6\dot{m}_o$ ), για την σύγκριση των καμπυλών που αντιστοιχούν σε κάθε ποσοστό παροχής. Τα διαγράμματα σύγκρισης θα παρατεθούν, ενδεικτικά, μόνο για τις τιμές συλλεκτικής επιφάνειας  $A_c = 4m^2$ ,  $A_c = 15m^2$  και  $A_c = 25m^2$ , με τις οποίες θα είναι εμφανής η πορεία των μεταβολών. Στα αρχικά σχήματα δίνονται τα θερμοκρασιακά προφίλ του υλικού κάθε συλλεκτικής επιφάνειας, ενώ στην συνέχεια τα αντίστοιχα θερμοκρασιακά προφίλ του ζεστού νερού χρήσης.

### SP25A8 $T_{PCM} - t$

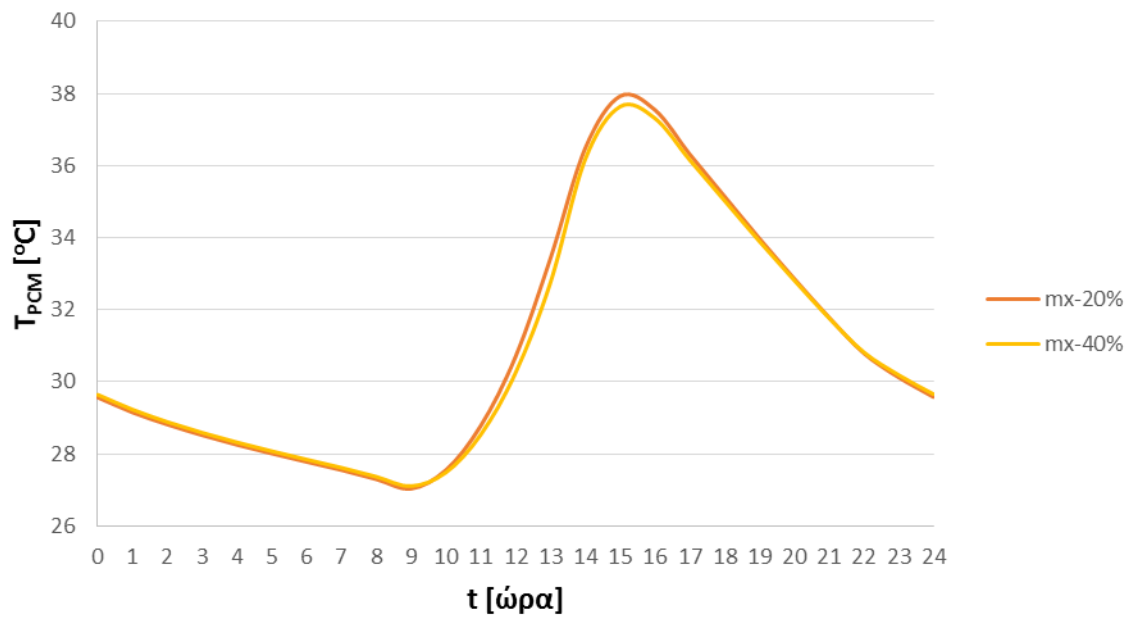
$A_c = 4 \text{ m}^2$   
 $\dot{m}_o = 0,04 \text{ Kg/s}$



Σχήμα 8.3/1 : Σύγκριση Θερμοκρασιακών Προφίλ για μεταβολή παροχών

### SP25A8 $T_{PCM} - t$

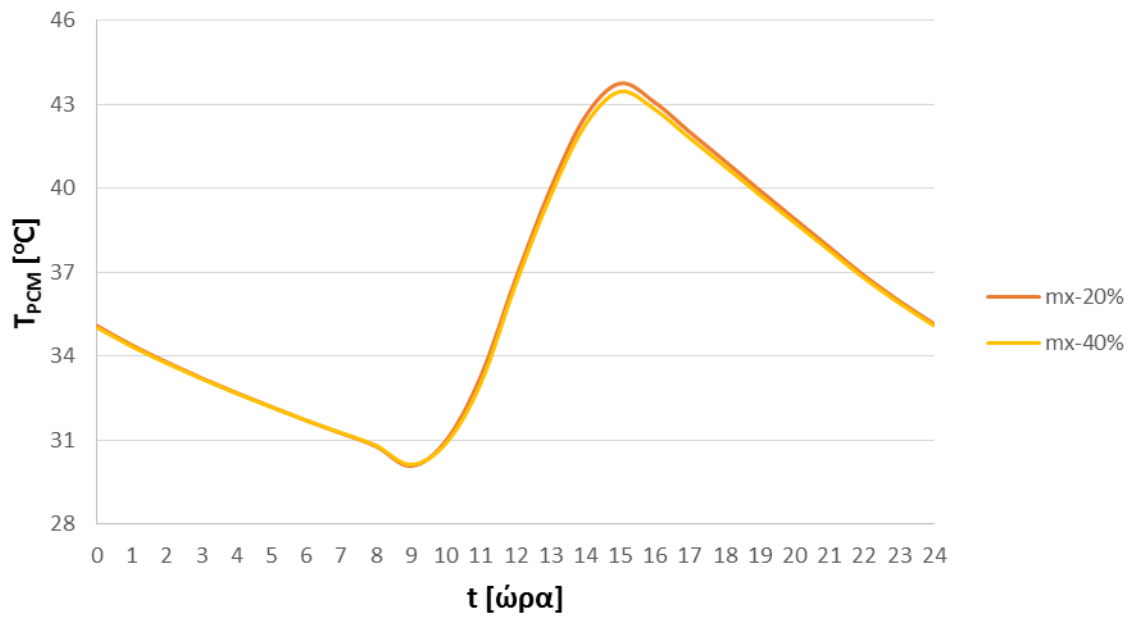
$A_c = 15 \text{ m}^2$   
 $\dot{m}_o = 0,15 \text{ Kg/s}$



Σχήμα 8.3/2 : Σύγκριση Θερμοκρασιακών Προφίλ για μεταβολή παροχών

### SP25A8 $T_{PCM} - t$

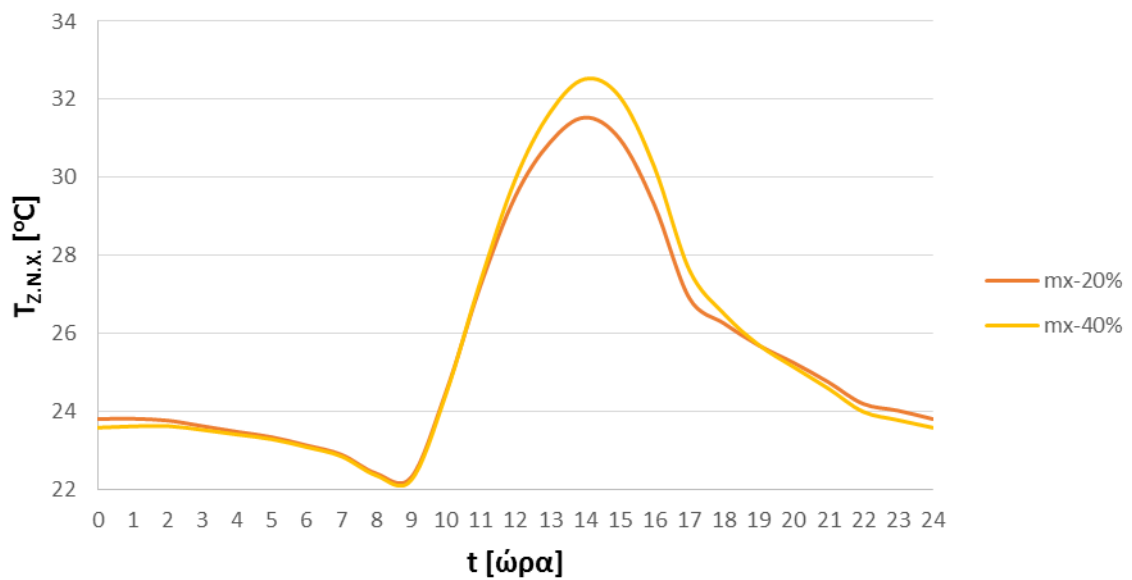
$A_c = 25 \text{ m}^2$   
 $\dot{m}_o = 0,25 \text{ Kg/s}$



Σχήμα 8.3/3 : Σύγκριση Θερμοκρασιακών Προφίλ για μεταβολή παροχών

### SP25A8 $T_{Z.N.X.} - t$

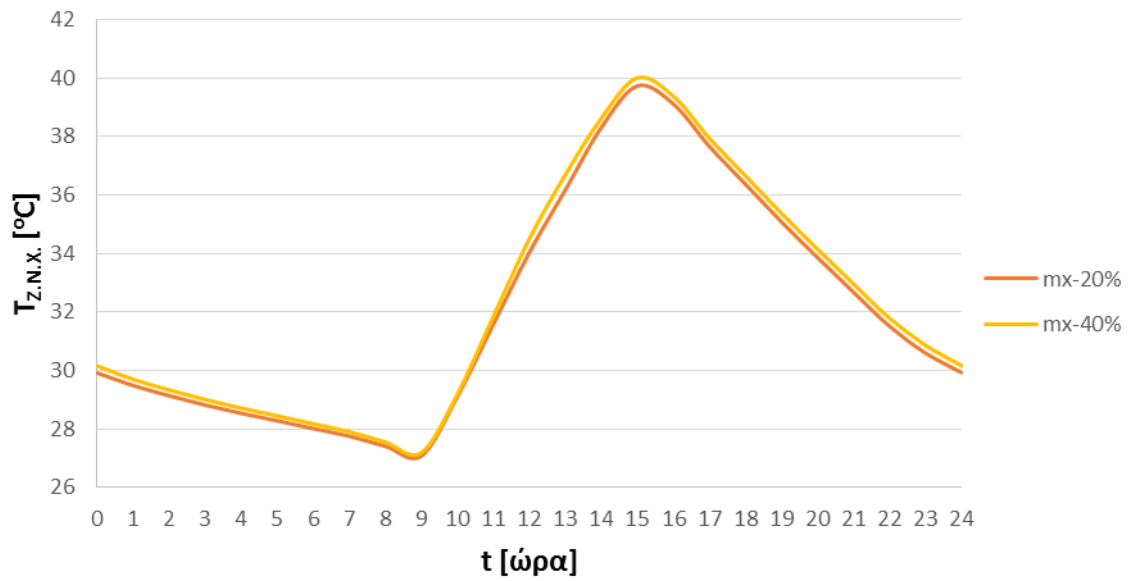
$A_c = 4 \text{ m}^2$   
 $\dot{m}_o = 0,04 \text{ Kg/s}$



8.3/4 : Σύγκριση Θερμοκρασιακών Προφίλ Ζεστού Νερού Χρήσης για μεταβολή παροχών

### SP25A8 $T_{Z.N.X.} - t$

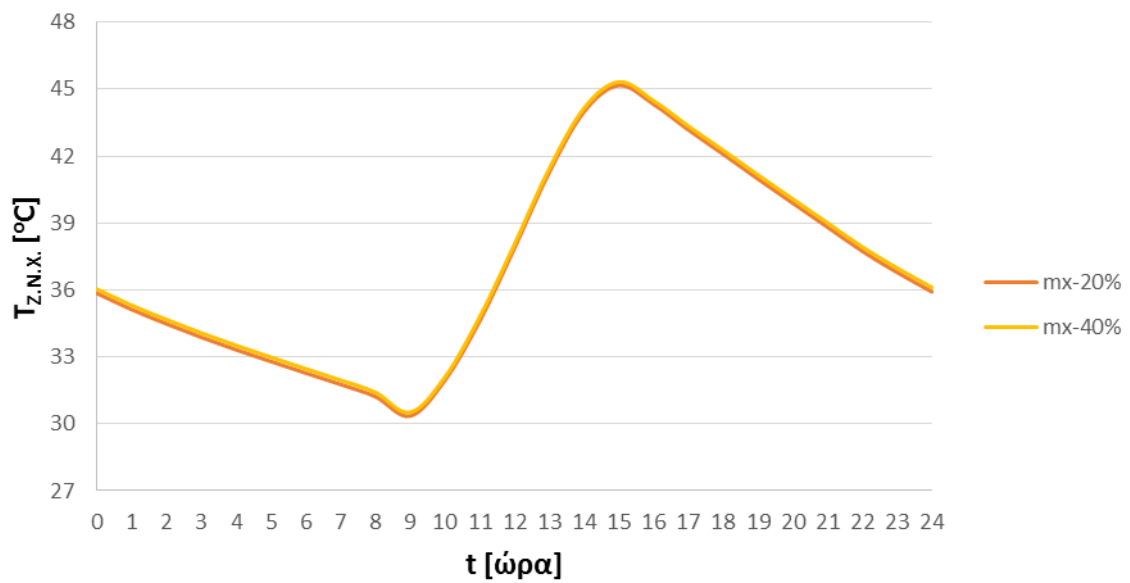
$A_c = 15 \text{ m}^2$   
 $\dot{m}_o = 0,15 \text{ Kg/s}$



8.3/5 : Σύγκριση Θερμοκρασιακών Προφίλ Ζεστού Νερού Χρήσης για μεταβολή παροχών

### SP25A8 $T_{Z.N.X.} - t$

$A_c = 25 \text{ m}^2$   
 $\dot{m}_o = 0,25 \text{ Kg/s}$



8.3/6 : Σύγκριση Θερμοκρασιακών Προφίλ Ζεστού Νερού Χρήσης για μεταβολή παροχών

Οι παρατηρήσεις που σημειώθηκαν στο υποκεφάλαιο 7.11, στο οποίο πραγματοποιήθηκε η ίδια σύγκριση καμπυλών για την μεταβολή παροχής  $\dot{m}_x$  του ιδανικού εναλλάκτη, ισχύουν και εδώ. Η επανάληψη, λοιπόν, της διεξοδικής ανάλυσης που παρατέθηκε νωρίτερα, δεν εξυπηρετεί κάποιο σκοπό.

Με την αύξηση της παροχής του εναλλάκτη  $\dot{m}_x$ , μειώθηκε η παροχή  $\dot{m}_T$  προς το σύστημα θέρμανσης των PCM, με αναμενόμενο αποτέλεσμα την αύξηση των θερμοκρασιών του ζεστού νερού χρήσης και παράλληλα την μείωση των θερμοκρασιών του υλικού. Ο βαθμός μεταβολής των θερμοκρασιακών προφίλ, εξαρτήθηκε, όπως έχει ήδη αναφερθεί, από την τιμή μεταβολής της παροχής  $\Delta\dot{m}_x = 0,2\dot{m}_o$ . Στην συλλεκτική επιφάνεια των  $4\text{m}^2$ , αντιστοιχεί μεταβολή παροχής  $\Delta\dot{m}_x = 0,008\text{ Kg/s}$  ( $\dot{m}_o = 0,04\text{ Kg/s}$ ), αρκετά μικρότερη από την  $\Delta\dot{m}_x = 0,05\text{ Kg/s}$  των  $25\text{m}^2$  ( $\dot{m}_o = 0,25\text{ Kg/s}$ ). Για τον λόγο αυτόν, η μεγαλύτερη διαφοροποίηση των καμπυλών που παρατέθηκαν, αντιστοιχεί στην μικρότερη παροχή ( $A_c = 4\text{m}^2$ ), με το ποσοστό διαφοροποίησης να μειώνεται με την αύξηση της παροχής  $\dot{m}_o$ , λόγω μεγαλύτερης συλλεκτικής επιφάνειας. Πιο εκτενής ανάλυση των αποτελεσμάτων γίνεται στο υποκεφάλαιο 7.11, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9<sup>ο</sup>

## ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 9.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η απόδοση και συμπεριφορά του συστήματος θέρμανσης με PCM, ενσωματωμένα σε τοίχο, η φόρτιση των οποίων πραγματοποιήθηκε μέσω συστοιχίας ηλιακών συλλεκτών, με ταυτόχρονη χρήση απομάστευσης, προς την θέρμανση νερού χρήσης. Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μεταβολής παραμέτρων για τέσσερα υλικά αλλαγής φάσης της εταιρίας Rubitherm, τα RT21 (παραφίνη), RT27 (παραφίνη), RT58 (παραφίνη) και SP25A8 (μίγμα παραφίνης-ένυδρου άλατος). Οι δοκιμές έγιναν για την απλή εγκατάσταση, δηλαδή μόνο το σύστημα θέρμανσης του δωματίου, με στόχο, αρχικά, την επαλήθευση της υπολογιστικής διαδικασίας και έπειτα, την μελέτη της συμπεριφοράς και θερμικής απόδοσης των υλικών. Στην συνέχεια, επιλέχθηκε το υλικό SP25A8 για την μελέτη της εγκατάστασης θέρμανσης του δωματίου με παράλληλη θέρμανση ζεστού νερού χρήσης. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές συνδυασμού παραμέτρων τόσο για την μελέτη και σύγκριση των αποτελεσμάτων, όσο και για την μελέτη επιρροής των μεταβολών των παραμέτρων. Η προσέγγιση του συστήματος των PCM έγινε μόνο σε ιδανικό επίπεδο, ενώ για τον εναλλάκτη θερμότητας του συστήματος θέρμανσης νερού χρήσης, έγινε, αρχικά, με ιδανικές συνθήκες, ενώ συνεχίζοντας, έγινε προσπάθεια προσέγγισης πραγματικών συνθηκών λειτουργίας. Η μελέτη εφαρμόστηκε για την 21<sup>η</sup> ημέρα του Ιανουαρίου, της οποίας οι συνθήκες θεωρούνται αντιπροσωπευτικές ολόκληρου του μήνα. Η προφανής πληθώρα των δοκιμών και αποτελεσμάτων, κατέστησε δύσκολη την εφαρμογή για όλους τους χειμερινούς μήνες Νοέμβριο-Μάρτιο, η εξέταση όμως του συστήματος για τον Ιανουάριο αποτελεί αντιπροσωπευτικό δείγμα.

Το σύστημα θέρμανσης αποδείχτηκε αποδοτικό για τιμές συλλεκτικής επιφάνειας  $A_c \geq 15\text{m}^2$ , επιτυγχάνοντας την κάλυψη των θερμικών απωλειών, τυπικής τιμής  $15\text{-}35\text{ W/m}^2_{\text{ΔΑΠΕΔΟΥ}}$ , για σύγχρονο κτίριο με μόνωση. Για τον υπολογισμό της προσδιδόμενης θερμότητας του υλικού προς τον εσωτερικό χώρο και την επιβεβαίωση κάλυψης των απωλειών, θεωρήθηκε επιφάνεια δαπέδου του δωματίου  $12\text{m}^2$ . Η θέρμανση του χώρου μελετήθηκε για την διάρκεια ενός 24ώρου και την διάρκεια 48ώρου σε περίπτωση συννεφιασμένης ημέρας, δηλαδή χωρίς την εκ νέου φόρτιση του υλικού το 2<sup>ο</sup> 24ωρο. Ομολογουμένως, η απόδοση του συστήματος σε συννεφιά, δεν αποδείχθηκε ικανοποιητική στις δοκιμές που έγιναν. Ωστόσο, παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση με την αύξηση του πάχους του στρώματος ΥΑΦ στον τοίχο, προβάλλοντας έτσι την κατεύθυνση προς την οποία θα μπορούσε να κινηθεί μία επόμενη μελέτη. Σημειώνεται ότι οι δοκιμές παραμέτρων στην παρούσα διπλωματική εστίασαν κυρίως στην μεταβολή της συλλεκτικής επιφάνειας, με δευτερεύοντες τις μεταβολές του πάχους PCM και της παροχής απομάστευσης για το θερμό νερό χρήσης. Αποδείχθηκε η αναμενόμενη σχέση αναλογίας της θερμικής απόδοσης του υλικού με την συλλεκτική επιφάνεια,

προφανώς λόγω της ανάπτυξης υψηλότερων θερμοκρασιών του υλικού. Αντιστρόφως ανάλογα μεγέθη της αποδιδόμενης θερμότητας αποτέλεσαν η παροχή μάζας του νερού κυκλοφορίας των συλλεκτών αλλά και το πάχος του ΥΑΦ στην δομή του τοίχου. Μεγαλύτερη μάζα νερού απορρόφησης της θερμικής ισχύος, επιφέρει μικρότερη θερμοκρασιακή αύξηση για την εγκατάσταση, μειώνοντας τα ποσά αποθηκευόμενης θερμότητας του υλικού. Όσον αφορά το πάχος του PCM, η αύξησή του οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές θερμικής απόδοσης, ωστόσο αυξάνει τα ποσά αποθηκευόμενης λανθάνουσας θερμότητας, με αποτέλεσμα την απόδοση του συστήματος για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι απαιτείται η αναζήτηση κατάλληλου πάχους για την εξισορρόπηση και καταλληλότητα της θερμικής απόδοσης, τόσο σε επίπεδο ποσότητας, όσο και σε επίπεδο χρόνου.

Η χρήση απομάστευσης του νερού κυκλοφορίας των συλλεκτών για την θέρμανση του νερού χρήσης σε δεξαμενή με εναλλάκτη θερμότητας (boiler), δεν απέδωσε την απαραίτητη θερμοκρασία του νερού στους 45°C, που απαιτείται κατά τους χειμερινούς μήνες. Συνεπώς, καθίσταται υποχρεωτική η χρήση βοηθητικής πηγής θέρμανσης, όπως η ηλεκτρική αντίσταση εσωτερικά της δεξαμενής (διπλής ενεργείας). Σημειώνεται βέβαια, ότι λόγω της ελλιπούς προσέγγισης της λειτουργίας του εναλλάκτη θερμότητας, περιλαμβάνεται σφάλμα στα αποτελέσματα της εφαρμογής του συστήματος θέρμανσης νερού χρήσης.

## 9.2 ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Αναγνωρίζεται ότι η μελέτη πραγματοποιήθηκε για ιδανική εγκατάσταση, χωρίς την παρουσία θερμικών απωλειών, ωστόσο δεν παύει να αποτελεί βιώσιμη λύση συστήματος θέρμανσης. Η εκμετάλλευση της αφθονίας της ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα, αποφέρει εξοικονόμηση ενέργειας, χωρίς περιβαλλοντική επιβάρυνση. Το σύστημα θέρμανσης με PCM ενσωματωμένα σε τοίχο, αποδίδει συνθήκες θερμικής άνεσης στο εσωτερικό περιβάλλον, χωρίς την ανάγκη βοηθητικής πηγής. Με την εξέταση κατάλληλων συνδυασμών παραμέτρων και ενδεχομένως διαφορετικών υλικών αλλαγής φάσης, με μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας αλλά και θερμοχωρητικότητα, είναι εφικτή η δημιουργία ενός συστήματος υψηλής απόδοσης και μακράς χρονικής διάρκειας λειτουργίας.