



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ-ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΥΣΗΣ  
Δ.Π.Μ.Σ ΣΧΟΛΗΣ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ «ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ»

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Υπολογιστική Προσομοίωση Δοχείου  
Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας με Υλικά Αλλαγής  
Φάσης (ΥΑΦ)**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Μ. ΦΟΥΝΤΗ  
ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΕΜΠ**

**ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΣΙΛΗΣ**

Αθήνα, Ιούνιος 2012



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Καθηγήτρια της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Φούντη Μαρία , επιβλέπουσα της μεταπτυχιακής μου εργασίας , τόσο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε για την ανάθεση της εργασίας όσο και για την υποστήριξη που μου παρείχε κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Επιπλέον, ευχαριστώ πολύ τον Μεταδιδακτορικό ερευνητή στο τομέα Θερμότητας της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, Κατσουρίνη Δημήτριο, για την πολύτιμη βοήθεια, τις εύστοχες παρατηρήσεις και τη συνεχή καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της υπολογιστικής μοντελοποίησης και της συγγραφής της εργασίας.

---





---

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ :** Υπολογιστική Προσομοίωση Δοχείου  
Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας  
με Υλικά Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ)

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΣ ΦΟΙΤΗΤΗΣ :** ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ :** ΦΟΥΝΤΗ ΜΑΡΙΑ, ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΕΜΠ

**ΣΧΟΛΗ :** ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Δ.Π.Μ.Σ. :** ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

**ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ :** 2011-2012

---



---

**ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ :** Σκοπός της υπολογιστικής προσομοίωσης είναι η θερμική ανάλυση της διαδικασίας αποφόρτισης δοχείου αποθήκευσης θερμού νερού που χρησιμοποιεί Υλικά Αλλαγής Φάσης για την αξιολόγηση της συνεισφοράς των ΥΑΦ στην ενεργειακή απόδοση του συστήματος, καθώς και η ποιοτική μελέτη χαρακτηριστικών και παραμέτρων που διαμορφώνουν τη λειτουργία του συστήματος.

---

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας αποτελούν σημαντικό και αναπόσπαστο κομμάτι στην εξοικονόμηση ενέργειας. Η παρούσα εργασία αποτελεί υπολογιστική προσομοίωση και ανάλυση ενός συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με Υλικά Αλλαγής Φάσης (**Phase Change Materials**). Η εργασία έγινε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Υπολογιστική Μηχανική» κατά τη διάρκεια του έτους 2011-2012.

Συγκεκριμένα, πρόκειται για έναν κυλινδρικό αγωγό θερμού νερού οικιακής χρήσης, στο εσωτερικό του οποίου έχουν τοποθετηθεί κυλινδρικοί σωλήνες που περιέχουν PCM . Γίνεται προσομοίωση της ροής νερού στον αγωγό και της μεταφοράς θερμότητας από τα PCM στο νερό. Με τη βοήθεια του υπολογιστικού κώδικα ANSYS CFX 13.0 πραγματοποιείται μοντελοποίηση του συστήματος του κυλινδρικού αγωγού, των φυσικών ιδιοτήτων του προβλήματος και των οριακών συνθηκών στον όγκο ελέγχου. Από την ανάλυση του πεδίου ροής και του θερμικού πεδίου που αναπτύσσεται μέσα στη δεξαμενή κατά τη διαδικασία αποφόρτισης του συστήματος, εξετάζεται η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας από τη χρήση ΥΑΦ και εκτιμώνται οι όποιες διαφοροποιήσεις από την αλλαγή κάποιας παραμέτρου.

Τα δύο πρώτα κεφάλαια αποτελούν θεωρητικά στοιχεία για τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και για τα ΥΑΦ και τις ιδιότητές τους.

Τα επόμενα κεφάλαια αναφέρονται στην υπολογιστική προσομοίωση με το 3<sup>ο</sup> να δίνει πληροφορίες για το πρόγραμμα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής ANSYS CFX, το 4<sup>ο</sup> να παρουσιάζει το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε και το 5<sup>ο</sup> τα υπολογιστικά αποτελέσματα και τα συμπεράσματά μας.

Αναλυτικότερα, η δομή της διπλωματικής εργασίας είναι η ακόλουθη:

Το 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο αποτελείται από θεωρητικά στοιχεία που αναφέρονται στους τρόπους αποθήκευσης ενέργειας, δίνοντας έμφαση στη θερμική ενέργεια, στους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας και στα θερμικά συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά οι αλλαγές φάσεων, τα Υλικά Αλλαγής Φάσης, οι κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται και οι ιδιότητες τους. Επιπλέον, εξηγούνται τα προβλήματα που προκύπτουν κατά τη χρήση διαφόρων ΥΑΦ και οι πιθανοί τρόποι αντιμετώπισης, και δίνεται ιδιαίτερη σημασία στις τεχνικές προσομοίωσης της μεταφοράς θερμότητας μέσω των ΥΑΦ. Τέλος, γίνεται λόγος για τους τρόπους ενσωμάτωσης των ΥΑΦ στα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και για τις διάφορες εφαρμογές τους σύμφωνα με τη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται ο πολύ ανεπτυγμένος επιστημονικός κλάδος της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD), η συμβολή του οποίου είναι τεράστια στην αριθμητική επίλυση φυσικών προβλημάτων. Επίσης, περιγράφεται αναλυτικά ο υπολογιστικός κώδικας πεπερασμένων στοιχείων ANSYS CFX 13.0 ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση του συστήματος που μελετήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία.

Το 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφέρεται εξ ολοκλήρου στην υπολογιστική προσομοίωση. Περιγράφεται αναλυτικά το φυσικό πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί και το σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας που μοντελοποιείται. Πρόκειται για κυλινδρικό δοχείο αποθήκευσης θερμού νερού οικιακής χρήσης το οποίο εμπεριέχει σωλήνες με ενσωματωμένα ΥΑΦ στο εσωτερικό τους. Η κατασκευή της γεωμετρίας, του υπολογιστικού πλέγματος καθώς και η μοντελοποίηση στον κώδικα CFX αναλύονται με όσο το δυνατόν καλύτερο τρόπο. Η εισαγωγή των υπό μελέτη τμημάτων του όγκου ελέγχου, των υλικών, των φυσικών ιδιοτήτων, και ο καθορισμός

των αρχικών και οριακών συνθηκών παρουσιάζεται λεπτομερώς και επικουρείται με παράθεση εικόνων από το ANSYS. Επίσης, δίνονται οι εξισώσεις τις οποίες χρησιμοποιεί το μοντέλο για να επιλύσει αριθμητικά και να υπολογίσει σε κάθε κόμβο μεταβλητές όπως η θερμοκρασία, η ταχύτητα και τα υπόλοιπα φυσικά μεγέθη του προβλήματος και γίνεται συνοπτική καταγραφή των περιπτώσεων που θα μελετηθούν μέσω του μοντέλου.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν, τα αποτελέσματα της επεξεργασίας τους καθώς και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη τους. Η υπολογιστική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για να μελετηθεί κυρίως η συμπεριφορά των ΥΑΦ με σε ένα σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Τα πρώτα αναλυτικά αποτελέσματα αφορούν το **πεδίο ροής** εντός της δεξαμενής και δίνεται μια ποιοτική ερμηνεία. Στη συνέχεια δίνονται αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης, από τη **μελέτη των ποιοτικών χαρακτηριστικών** του συστήματος που έχει προσομοιωθεί με ΥΑΦ σε σύγκριση με άλλα συστήματα και εξάγονται συμπεράσματα για την αποτελεσματική επίδραση του PCM στην αποθήκευση θερμότητας. Ακολουθεί η **αξιολόγηση του μοντέλου** μέσω της **σύγκρισης** με τα αντίστοιχα **πειραματικά δεδομένα** για το συγκεκριμένο σύστημα. Ύστερα έπονται μια σειρά από **παραμετρικές αναλύσεις** που βοηθούν στην περαιτέρω κατανόηση των ιδιοτήτων του προβλήματος. Τα γενικά συμπεράσματα αποτελούν σύνοψη των όσων παρατηρήθηκαν και βασικές επισημάνσεις των όσων διαπιστώθηκαν ενώ δίνονται και κάποιες προτάσεις για μελλοντική μελέτη στη συγκεκριμένη επιστημονική περιοχή. Τέλος, στη Βιβλιογραφία υπάρχουν όλες οι πηγές και αναφορές αυτής της εργασίας.

## **ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ**

Υλικά Αλλαγής Φάσης

Συστήματα Αποθήκευσης Λανθάνουσας Θερμότητας

Κυλινδρικοί Αγωγοί Θέρμανσης Νερού Οικιακής Χρήσης

Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας

Υπολογιστική Ρευστοδυναμική

Μεταφορά Θερμότητας

## **ABSTRACT**

The latent heat storage systems are an important and integral part in saving energy. This thesis is a computational simulation and analysis of a thermal energy storage system with **Phase Change Materials**. This work is part of the PostGraduate Master “Computational Mechanics” during the academic year 2011-2012.

Specifically , the work is about a domestic hot water cylindrical tank, within which are mounted cylindrical PVC tubes containing PCM. It is a simulation of the water flow in the tank and the heat transfer from the PCM to water.

The modeling of the system , the definition of the physical properties of the problem and the determination of the boundary conditions on the control volumes becomes using the computational software ANSYS CFX 13.0. From analysis of the water flow and the thermal field in the tank during the water system discharge , the heat storage possibilities of including PCM are considered and any variations of changing a physical parameter are estimated.

The first two chapters are theoretical points on thermal energy storage systems, phase change materials and their properties. The next chapters refer to the computational simulation. The third gives information about the CFD program ANSYS CFX, the following chapter presents the model which is used for the numerical simulation and the last contains the computational results and our concluding remarks.

## **KEYWORDS**

Phase Change Materials

Latent Heat Thermal Storage

Domestic Hot Water Cylinder

Thermal Energy Storage

Computational Fluid Dynamics

Heat Transfer



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	12
1.1 Εισαγωγή.....	12
1.2 Μέθοδοι Αποθήκευσης Ενέργειας.....	15
1.2.1 Αποθήκευση Μηχανικής Ενέργειας.....	15
1.2.2 Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	18
1.2.3 Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας .....	19
1.3 Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας και Θερμικά Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας .....	20
1.4 Θερμικά Ηλιακά Συστήματα.....	24
1.5 Μικρής διάρκειας Αποθήκευση Θερμότητας .....	27
1.5.1 Υγρές Αποθήκες Ομοιόμορφης Θερμοκρασίας .....	27
1.5.2 Υγρές Αποθήκες Θερμικής Διαστρωμάτωσης.....	28
1.5.3 Θερμική Κλίση Στερεών .....	29
1.5.4 Ηλιακοί Θερμοσίφωνες .....	30
1.5.5 Δεξαμενές Αποθήκευσης Θερμού Νερού.....	32
1.6 Θερμότητα και Θερμοχωρητικότητα .....	34
1.7 Μηχανισμοί Μεταφοράς Θερμότητας .....	35
1.7.1 Διαφορά Θερμοδυναμικής και Μετάδοσης Θερμότητας.....	35
1.7.2 Ανάλυση των μηχανισμών Μετάδοσης Θερμότητας .....	36
1.8 Τρόποι Αποθήκευσης Θερμότητας .....	41
1.8.1 Αποθήκευση με τη μορφή Αισθητής Θερμότητας.....	41
1.8.2 Αποθήκευση με τη μορφή Λανθάνουσας Θερμότητας.....	43



1.8.3 Σύγκριση των τεχνικών Αποθήκευσης Θερμότητας .....	45
1.8.4 Υλικά Αποθήκευσης Λανθάνουσας Θερμότητας .....	46
1.8.5 Προαπαιτήσεις Συστημάτων Λανθάνουσας Θερμότητας.....	47
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM) .....</b>	<b>48</b>
2.1 Καταστάσεις της Ύλης.....	48
2.1.1 Ιδιότητες της Ύλης.....	50
2.2 Αλλαγή Φάσης .....	51
2.2.1 Θερμική και Εσωτερική Ενέργεια στις Αλλαγές Φάσης .....	53
2.2.2 Λανθάνουσα Θερμότητα .....	54
2.2.3 Χαρακτηριστικά Σημεία.....	55
2.3 Υλικά Αλλαγής Φάσης (PCMs).....	56
2.3.1 Απαιτήσεις-Κριτήρια Επιλογής των ΥΑΦ.....	61
2.4 Ταξινόμηση των PCMs .....	63
2.4.1 Οργανικά PCMs .....	64
2.4.1.1 Παραφίνες.....	65
2.4.1.2 Μη Παραφινούχα Υλικά.....	68
2.4.1.3 Σύνοψη Ιδιοτήτων Οργανικών Υλικών .....	74
2.4.2 Ανόργανα PCMs.....	77
2.4.2.1 Ένυδρα Άλατα .....	77
2.4.2.2 Μεταλλικές Ενώσεις.....	80
2.4.2.3 Σύνοψη Ιδιοτήτων Ανόργανων Υλικών .....	81
2.4.3 Εύτηκτα Μίγματα.....	82
2.5 Προβλήματα των PCMs και τρόποι επίλυσης .....	84
2.5.1 Σταθερότητα Θερμικών Ιδιοτήτων σε Εκτεταμένη Κυκλική Φόρτιση....	84
2.5.2 Διαχωρισμός Φάσεων .....	85

2.5.3 Φαινόμενο <i>Supercooling</i> .....	88
2.5.4 Μικρή τιμή Θερμικής Αγωγιμότητας.....	90
2.5.5 Διάβρωση.....	91
2.6 Μέθοδοι Μέτρησης Ιδιοτήτων .....	92
2.6.1 Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA).....	93
2.6.2 Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (DSC) .....	95
2.6.3 Μέθοδος T-History .....	97
2.7 Προσομοίωση Μεταφοράς Θερμότητας με Αλλαγή Φάσης.....	99
2.7.1 Μέθοδος της Ενθαλπίας.....	100
2.7.2 Μέθοδος της Ενεργού Θερμοχωρητικότητας.....	101
2.8 Συσκευασία των PCMs – Παράγωγα Υλικά .....	103
2.8.1 <i>Macroencapsulation</i> .....	104
2.8.2 <i>Microencapsulation</i> .....	106
2.8.3 Ογκώδης Αποθήκευση .....	108
2.8.4 Παραγωγή και Χρήση Σύνθετων Υλικών.....	108
2.8.5 Τοποθέτηση ΥΑΦ σε Κλίνες.....	110
2.9 Εφαρμογές .....	113
2.9.1 Εφαρμογές στα Κτίρια .....	114
2.9.2 Εφαρμογές σε Φωτοβολταϊκά Πλαίσια.....	115
2.9.3 Εφαρμογές σε Συστήματα Κλιματισμού.....	115
2.9.4 Εφαρμογές σε Ηλεκτρονικά Εξαρτήματα και Η/Υ.....	116
2.9.5 Εφαρμογές σε Μεταφορές.....	117
2.9.6 Εφαρμογές στην ανθρώπινη ένδυση.....	118
2.9.7 Εφαρμογές σε Οχήματα .....	119
2.9.8 Εφαρμογές σε Αγωγούς και Δεξαμενές Θέρμανσης Νερού.....	120

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ (CFD).....</b>	<b>122</b>
3.1 Γενικά Στοιχεία.....	122
3.2 Εξέλιξη του CFD.....	123
3.3 Μαθηματικές Εξισώσεις του CFD .....	124
3.3.1 <i>Τυρβώδης Ροή</i> .....	125
3.4 Μεθοδολογία Επίλυσης ενός Κώδικα CFD.....	126
3.5 Υπολογιστικός Κώδικας ANSYS CFX .....	128
3.5.1 <i>Γεωμετρία – Υπολογιστικό Πλέγμα (Geometry-Mesh)</i> .....	131
3.5.2 <i>Ορισμός Φυσικών Ιδιοτήτων και Οριακών Συνθηκών (Physics Definition)</i> .....	133
3.5.3 <i>Επίλυση (Solver)</i> .....	135
3.5.4 <i>Επεξεργασία και Παρουσίαση Αποτελεσμάτων (Post Processor)</i> .....	137
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....</b>	<b>138</b>
4.1 Εισαγωγικά.....	138
4.2 Περιγραφή Φυσικού Προβλήματος .....	139
4.3 Γεωμετρία της Μονάδας Αποθήκευσης .....	140
4.4 Υπολογιστικό Πλέγμα .....	142
4.5 Μοντελοποίηση .....	143
4.5.1 <i>Φυσικά Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες</i> .....	147
4.5.2 <i>Αρχικές και Οριακές Συνθήκες</i> .....	150
4.6 Περιπτώσεις της Μελέτης Αποφόρτισης του Συστήματος Θέρμανσης Νερού .....	152

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>154</b>
<b>5.1 Πεδίο Ροής.....</b>	<b>154</b>
<b>5.2 Έλεγχος Αξιοπιστίας Μοντέλου .....</b>	<b>161</b>
<b>5.3 Μελέτη Ποιοτικών Χαρακτηριστικών της Αποφόρτισης Συστημάτων Κυλινδρικού Αγωγού με σωλήνες που περιέχουν PCM, με σωλήνες υλικού σταθερής Cp και χωρίς σωλήνες .....</b>	<b>168</b>
<b>5.4 Παραμετρικές Αναλύσεις.....</b>	<b>183</b>
<b>5.4.1 Παραμετρική Μελέτη διαφορετικών εισόδων ροής.....</b>	<b>183</b>
<b>5.4.2 Παραμετρική Μελέτη διαφορετικών παροχών νερού.....</b>	<b>187</b>
<b>5.4.3 Παραμετρική Μελέτη της θέσης και του αριθμού των σωλήνων με PCM.....</b>	<b>191</b>
<b>5.5 Γενικά Συμπεράσματα .....</b>	<b>203</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 1.1 Εισαγωγή

---

Η υποβάθμιση του περιβάλλοντος και η εξάντληση των συμβατικών, μη ανανεώσιμων ενεργειακών πηγών αποτελεί ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει σήμερα η ανθρωπότητα. Η νέα πραγματικότητα οδήγησε σε συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση για νέους ενεργειακούς πόρους και σε αλλαγή της στάσης απέναντι στο περιβάλλον κυρίως στην κατεύθυνση βιώσιμης διαχείρισης της ενέργειας και οικολογικής συνείδησης. Το θέμα αυτό βρίσκεται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος Παγκόσμιων Οργανισμών, Κυβερνήσεων, Ερευνητικών Κέντρων, Πανεπιστημιακών Ιδρυμάτων, των ενδιαφερόμενων παραγωγών και χρηστών ενέργειας, αλλά και όλων των ενημερωμένων πολιτών.

Η συνειδητοποίηση των διαρκώς αυξανόμενων αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων παγκοσμίως, έχει στρέψει τη μελέτη ερευνητών, κρατών και πολιτών στην ανάπτυξη και υιοθέτηση μέτρων και πρακτικών που υποστηρίζουν την ορθολογική χρήση των πηγών ενέργειας. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος πραγματοποιείται προσπάθεια για τη μείωση των περιβαλλοντικών και οικονομικών επιπτώσεων, με την ορθολογική διαχείριση της ενέργειας και την εφαρμογή τεχνολογιών αποθήκευσης και εξοικονόμησής της. Παράλληλα, με στόχο την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων αυτών, προωθείται η εκμετάλλευση φιλικών προς το περιβάλλον (και τον άνθρωπο) Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας(ΑΠΕ), συμβάλλοντας έτσι καθοριστικά στην αειφόρο ανάπτυξη.

Η Ελλάδα είναι μια χώρα με συγκριτικά πλεονεκτήματα ως προς τις μορφές ΑΠΕ, ωστόσο δεν έχει μεγάλο ποσοστό αξιοποίησης τους ενώ σε παγκόσμιο επίπεδο, γίνεται όλο και πιο έντονα αποδεκτό τα γεγονός, ότι η αύξηση της χρήσης των ΑΠΕ συνδυάζεται με τη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σαφώς μπορούν να συνεισφέρουν σε μεγάλο βαθμό τόσο στην ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού όσο και στην προστασία του περιβάλλοντος.

Είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Έχουν τρία βασικά χαρακτηριστικά. Καταρχάς, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερον, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, πολύ «φιλικές» στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα και δε το ρυπαίνουν όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Τρίτον είναι μορφές ενέργειας άφθονες και θεωρητικά ανεξάντλητες. Χρησιμοποιούνται είτε άμεσα (κυρίως για θέρμανση) είτε μετατρέπόμενες σε άλλες μορφές ενέργειας (κυρίως ηλεκτρισμό ή μηχανική ενέργεια).

Σήμερα, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις και τα στοιχεία της Ευρωπαϊκής Ένωσης η εξοικονόμηση και αποθήκευση ενέργειας στην Ελλάδα είναι δυνατή σε ποσοστό από 10 έως 50%. Η χρήση ηλιακής ενέργειας (που είναι η κυριότερη ήπια μορφή ενέργειας) αποτελεί έναν από τους βασικότερους στόχους δημιουργίας τέτοιων συστημάτων. Είναι κοινώς αποδεκτό ότι τόσο τα ενεργητικά (φωτοβολταϊκά, ηλιακά θερμικά), όσο και τα παθητικά Ηλιακά Συστήματα παρέχουν σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη σε σύγκριση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας, συνεισφέροντας σε μια αειφόρο προοπτική των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων. Εφαρμογές όπως οι ηλιακοί συλλέκτες, τα φωτοβολταϊκά συστήματα, οι δεξαμενές αποθήκευσης είναι στην πρώτη γραμμή ανάπτυξης.

Εκτός βέβαια από τα πολλά πλεονεκτήματα της ηλιακής ενέργεια έχει το μειονέκτημα ότι είναι διακοπτόμενη πηγή ενέργειας και πολλές φορές για μεγάλα χρονικά διαστήματα (νύχτα). Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος τις τελευταίες δεκαετίες αναπτύχθηκαν συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας τα οποία εκτός της μεγάλης αποθηκευτικής ικανότητας, επιτρέπουν τη χρήση της ενέργειας που αποθηκεύτηκε την ημέρα κατά τη διάρκεια της νύχτας, ή όποτε αυτή χρειαστεί.

Για να ικανοποιηθούν οι σύγχρονες απαιτήσεις, η αξιοποίηση μεθόδων εξοικονόμησης και αποθήκευσης ενέργειας είναι το ίδιο ή και περισσότερο σημαντική με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ).

Υπάρχουν όμως ορισμένοι περιορισμοί ως προς τη χρήση τους όπως το ότι είναι απρόβλεπτες ή ότι δεν είναι διαθέσιμες οποιαδήποτε στιγμή είναι αναγκαίο. Έτσι, έχουν δημιουργηθεί τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, που εκμεταλλεύονται τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και που έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν με τέτοια χρονική καθυστέρηση ώστε η παροχή ενέργειας να ικανοποιεί τη ζήτηση ανά πάσα στιγμή. Επομένως, η κατασκευή συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας έχει μεγάλο ενδιαφέρον και αποτελεί πρωταρχικό παράγοντα για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Τέτοια συστήματα είναι τα Συστήματα Αποθήκευσης Λανθάνουσας Θερμότητας τα οποία παρέχουν ένα πρακτικό και φυσικό τρόπο χρονικής καθυστέρησης επιτρέποντας τη χρήση της θερμότητας που αποθηκεύουν όποτε αυτή χρειάζεται.

Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας έχουν σήμερα μεγάλο επιστημονικό και τεχνολογικό ενδιαφέρον λόγω της ικανότητάς τους στην αποθήκευση μεγάλων ποσών ενέργειας σε σχετικά μικρό χώρο και της δυνατότητας αποθήκευσης της θερμότητας σε συγκεκριμένη σταθερή θερμοκρασία, η οποία αντιστοιχεί στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης της αποθηκευτικής ουσίας.

Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες η έρευνα γύρω από τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (κυρίως στις ΗΠΑ, την Ευρώπη και την Ιαπωνία) αποδεικνύει ότι τα συστήματα αυτά είναι ιδανικά για αποθήκευση ανανεώσιμης ενέργειας. Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας τα οποία συνδυάζονται με τη χρήση Υλικών Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ) παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα λόγω της πολύ μεγάλης αποθηκευτικής τους ικανότητας. Για την επίτευξη της αλλαγής φάσης (τήξη ή στερεοποίηση) απαιτούνται μεγάλα ποσά θερμότητας που απορροφούνται από το υλικό π.χ. η τήξη του πάγου. Ακριβώς σε αυτό το φαινόμενο στηρίζεται η τεχνολογία των PCM και τα χρησιμοποιεί για να αποθηκεύει θερμική ενέργεια.



## 1.2 Μέθοδοι Αποθήκευσης Ενέργειας

Η αποθήκευση ενέργειας σε διάφορες μορφές η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε κάποιο άλλο απαιτούμενο είδος προς χρήση αποτελεί πρόκληση για τους επιστήμονες σήμερα. Με την αποθήκευση ενέργειας μειώνεται η διαφορά στις ανάγκες προσφοράς και ζήτησης και βελτιώνεται η επίδοση και η αξιοπιστία των ενεργειακών συστημάτων.

Επιπλέον, η ανάπτυξη νέων τρόπων αποθήκευσης ενέργειας συντελεί στην εξοικονόμηση των καυσίμων και μειώνει το ποσοστό απώλειας της ενέργειας και του κόστους του κεφαλαίου δηλαδή συμβάλλει στη διατήρηση της ενέργειας. Συνεπώς, η αποθήκευση ενέργειας σήμερα μπορεί να αποτελέσει τη βασική συνιστώσα μιας εναλλακτικής ενεργειακής στρατηγικής που δε θα περιορίζεται στις συμβατικές πηγές.

Οι βασικές μορφές ενέργειας που μπορούν να αποθηκευτούν είναι :

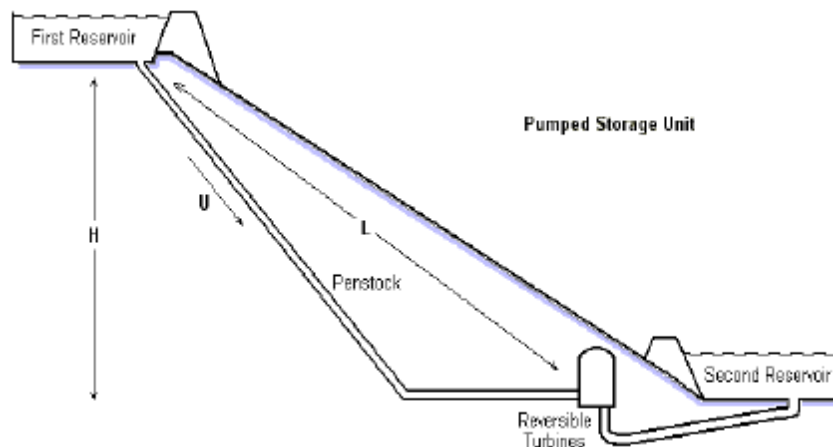
- Η Μηχανική Ενέργεια ( Κάνοντας μετατροπή της ηλ.ενέργειας)
- Η Ηλεκτρική Ενέργεια
- Η Θερμική Ενέργεια

### 1.2.1 Αποθήκευση Μηχανικής Ενέργειας

Τα συστήματα αποθήκευσης μηχανικής ενέργειας περιλαμβάνουν αποθήκευση ενέργειας με βαρύτητα, δηλαδή αποθήκευση ελκτικής δυναμικής ενέργειας, αποθήκευση ενέργειας με άντληση νερού (pumped hydro-power storage / PHPS) σε αντλιοστάσια υδροηλεκτρικής ενέργειας, αποθήκευση ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα (compressed air energy storage / CAES) και αποθήκευση με σφονδύλους. Οι τεχνολογίες PHPS και CAES χρησιμοποιούνται για μεγάλης κλίμακας αποθήκευση μηχανικής ενέργειας ενώ οι σφόνδυλοι είναι κατάλληλοι για ενδιάμεση αποθήκευση.

Η αποθήκευση ενέργειας με άντληση νερού (PHPS) χρησιμοποιεί δύο ταμιευτήρες σε διαφορετικά υψόμετρα για μετατροπή της αποθηκευμένης βαρυτικής δυναμικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα σύστημα άντλησης με αποθήκευση λειτουργεί με χρήση της περίσσειας της ενεργειακής παραγωγής κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης για την άντληση νερού από το χαμηλότερο ταμιευτήρα στον άνω ταμιευτήρα που πρέπει να αποθηκευτεί ως βαρυτική δυναμική ενέργεια.

Σε περιόδους φορτίου μεγάλης ζήτησης, το νερό στον πάνω ταμιευτήρα απελευθερώνεται μέσω τουρμπίνων παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια για παροχή στο δίκτυο. Σε γενικές γραμμές, ένα σύστημα PHPS λειτουργεί χρησιμοποιώντας το πλεόνασμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για την άντληση νερού σε μια δεξαμενή σε μεγαλύτερο υψόμετρο. Με απλά λόγια, όταν ζητηθεί ισχύς το νερό πέφτει στη χαμηλότερα τοποθετημένη (δεύτερη) δεξαμενή με τη βοήθεια υδροστρόβιλου, ενώ όταν δεν υπάρχει πια ζήτηση ισχύος μπορεί με αντλίες να οδηγηθεί ξανά πίσω στην πρώτη (ψηλότερη) δεξαμενή. Το σύστημα αντλησιοταμίευσης αποτελείται λοιπόν από τα εξής μέρη: μία ανώτερη δεξαμενή-ταμιευτήρα (First Reservoir), αγωγοί νερού (Penstock), αντλία, υδροστρόβιλος, ή σε συνδυασμό με στροβίλους αντιστρέψιμης φοράς Reversible Turbines και μία κατώτερη, δεύτερη δεξαμενή (Second Reservoir).

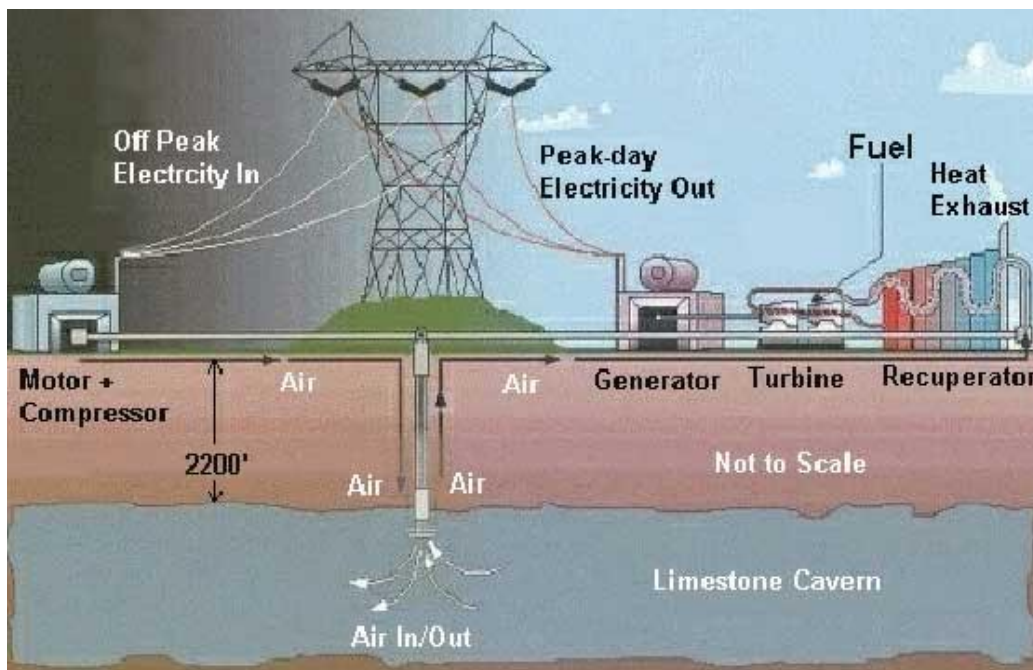


*Εικόνα 1.1: Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με αντλησιοταμίευση νερού*

Παρόλο όμως που η αποθήκευση με αντλησιοταμίευση νερού μπορεί να δώσει υψηλή χωρητικότητα ενέργειας σε χαμηλό κόστος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί όσο θα ήταν αναμενόμενο. Ο λόγος είναι αφενός η εξειδικευμένη περιοχή που χρειάζεται για να κατασκευαστεί η υδροηλεκτρική εγκατάσταση και αφετέρου ο χρόνος που χρειάζεται για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία και να απελευθερωθεί η αποθηκευμένη ενέργεια, αφού αν η αντλία δεν λειτουργεί ήδη χρειάζεται χρόνος ένταξης. Για αυτό κυρίως χρησιμοποιείται σε αποθηκεύσεις ενέργειας μεγάλης κλίμακας.

Η αποθήκευση ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα (CAES) περιγράφει ένα σύστημα που αποθηκεύει δυναμική ενέργεια μέσω της αποθήκευσης του συμπιεσμένου αερίου που αντλείται σε φυσικά υπόγεια πετρώματα ή μεγάλες δεξαμενές αποθήκευσης. Ένα σύστημα CAES χρησιμοποιεί ένα συμπιεστή κινούμενο από κινητήρα κατά καιρούς χαμηλών τιμών ηλεκτρικής ενέργειας για να αποθηκεύσει αέρα, πιο ευρέως, σε κοιλότητες που απαντώνται στη φύση κάτω από το έδαφος.

Κατά τη διάρκεια ωρών αυξημένων τιμών ηλεκτρικής ενέργειας, ο συμπιεσμένος αέρας καίγεται με φυσικό αέριο για να λειτουργήσει μια τουρμπίνα, η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η αρχή λειτουργίας χρησιμοποιείται και όταν CAES συνδυάζεται με τεχνολογία αιολικής ενέργειας, συμπιέζοντας αέρα κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής ταχύτητας του ανέμου και χρησιμοποιώντας το συμπιεσμένο αέρα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις περιόδους χαμηλής ταχύτητας του ανέμου.



*Εικόνα 2.2: Αποθήκευση Ενέργειας με τη μέθοδο του συμπιεσμένου αέρα. Η αποθήκευση λαμβάνει χώρα εκτός ωρών αιχμής της ζήτησης όταν είναι διαθέσιμο και φθινό το ηλ.ρεύμα*

Η αποθήκευση επιτυγχάνεται σε υψηλές πιέσεις (40 – 70 bar) και κοντά σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Αυτό σημαίνει μικρότερο όγκο και μικρότερη δεξαμενή αποθήκευσης. Υπάρχουν πολλοί γεωλογικοί σχηματισμοί που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ταμιευτήρες για την αποθήκευση με συμπιεσμένο αέρα.

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

Σε όλες τις περιπτώσεις η αποθήκευση γίνεται όταν είναι διαθέσιμη φθινή εκτός αιχμής ηλεκτρική ισχύς π.χ., τη νύχτα ή τα Σαββατοκύριακα. Η αποφόρτιση πραγματοποιείται όταν κρίνεται απαραίτητη η ενέργεια που αποθηκεύτηκε λόγω της ανεπαρκούς παροχής από τις εγκαταστάσεις βασικού φορτίου.

### 1.2.2 Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα διάφορα μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζουν τη λειτουργία τους σε μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική, μαγνητική ή δυναμική ενέργεια και στη συνέχεια την εκ νέου μετατροπή της ενέργειας αυτής σε ηλεκτρική. Ο Πίνακας 1-1 παρουσιάζει τις διάφορες μορφές ενέργειας στις οποίες μπορεί να μετατραπεί η ηλεκτρική ενέργεια προκειμένου να αποθηκευτεί καθώς και χαρακτηριστικά είδη διατάξεων για κάθε μορφή μετατροπής.

Πίνακας 3.1: Μορφή μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας για διάφορες αποθηκευτικές διατάξεις

Μορφή μετατροπής	Αντιπροσωπευτική διάταξη
Ηλεκτρική	Πυκνωτές και υπέρ-πυκνωτές
Υπεραγώγιμα Υλικά	Magnetic Energy Storage (SMES)
Χρήση μηχανικής ενέργειας (δυναμική ή περιστροφή)	Αντλησιοταμίευση
	Συμπιεσμένος Αέρας (CAES)
	Στρεφόμενοι σφόνδυλοι
Χημικές μέθοδοι	Μπαταρίες, μπαταρίες ροής, προχωρημένου τύπου μπαταρίες.

Οι πυκνωτές αποτελούν ηλεκτρονικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται στην προσωρινή αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Μια διάταξη πυκνωτή αποτελείται από δύο φορτισμένα αγωγία στερεά που απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $d$  και έχουν διαφορά δυναμικού  $\Delta V$ . Η ενέργεια που μπορούν να αποθηκεύσουν εξαρτάται από τη χωρητικότητα του πυκνωτή.

Η αποθήκευση ενέργειας μέσω μπαταριών είναι μια επιλογή για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Μία μπαταρία φορτίζεται συνδεδεμένη με μια πηγή άμεσου ηλεκτρικού ρεύματος και όταν αυτή αποφορτίζεται η αποθηκευμένη χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι πιο κοινοί τύποι μπαταριών αποθήκευσης είναι οι Μολύβδου-Οξέος, Νικελίου-Καδμίου (Ni-Cd), Λιθίου-Ιόντος (Li-ion) και οι μπαταρίες ροής (PSB, VRBr, ZnBr). Αν και πιο συχνά χρησιμοποιούνται σε συσκευές, μια μπαταρία με βάση το νικέλιο-κάδμιο (Ni-Cd) κυρίως χρησιμοποιείται για αποθήκευση ενέργειας στο δίκτυο.

Μπαταρίες με βάση το νικέλιο διαρκούν σχεδόν δύο φορές όσο οι μπαταρίες του οξέος του μολύβδου ωστόσο, κοστίζουν σχεδόν δέκα φορές περισσότερο και έχουν κατά μέσο όρο απόδοση της τάξης του 70%. Οι μπαταρίες λιθίου έχουν ακόμη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής για αυτό και έχουν εφαρμογή στην κινητή τηλεφωνία και σε υποσταθμούς ενέργειας. Ένα από τα ισχυρά σημεία της τεχνολογίας της μπαταρίας είναι η γρήγορη απόκριση. Έτσι, ορισμένες μπαταρίες μπορούν να ανταποκριθούν στις αλλαγές φορτίου σε περίπου 20 χιλιοστά του δευτερολέπτου. Πιθανές εφαρμογές των μπαταριών είναι χρήση τους εκτός των ωρών αιχμής ισχύος για εξομάλυνση του φορτίου και αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται συνήθως από ανεμογεννήτριες ή φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις.

Πίνακας 4.2: Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα μπαταριών

Αποθηκευτική Διάταξη	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μπαταρίες ροής (flow): PSB, VRBr, ZnBr	Υψηλή χωρητικότητα, ανεξάρτητη εκτίμηση ισχύος - ενέργειας	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας
Μολύβδου – οξέος	Χαμηλό αρχικό κόστος	Περιορισμένος κύκλος ζωής σε βαθιά εκφόρτιση
Ni – Cd	Υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, απόδοση	
Li – ion	Υψηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, υψηλή απόδοση	Υψηλό κόστος παραγωγής, απαιτεί ειδικό κύκλωμα φόρτισης

### 1.2.3 Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας

Η θερμική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί, αν αξιοποιηθεί σε ένα υλικό η αλλαγή στην εσωτερική του ενέργεια. Η προσθήκη θερμότητας σε ένα σύστημα έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας. Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μπορούν να είναι αισθητής αποθήκευσης θερμότητας ή λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας, ή συνδυασμός των δύο.

### 1.3 Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας και Θερμικά Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας

Η θερμική αποθήκευση ενέργειας, αποτελεί μια ευεργετική διαδικασία κατά την οποία η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε μια ουσία με την αύξηση ή τη μείωση της θερμοκρασίας της (με τη μορφή αισθητής θερμότητας ) ή με την αλλαγή της φάσης της (με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας) και ως εκ τούτου κατέχει βασικό ρόλο στην εξοικονόμηση της ενέργειας. Ακόμη, στη θερμική αποθήκευση συμπεριλαμβάνεται και η θερμοχημική αποθήκευση, αφού η συναλλασσόμενη ενέργεια εισέρχεται και εξέρχεται από το αποθηκευτικό σύστημα με τη μορφή θερμότητας.

Η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας είναι σημαντική σε πολλές εφαρμογές. Κυριότερη εφαρμογή είναι τα συστήματα ηλιακής ενέργειας όπου είναι αναγκαία η χρησιμοποίηση ενός μέσου στο οποίο θα αποθηκεύεται η περίσσεια της ηλιακής ενέργειας που συλλέγεται τις ώρες με ηλιοφάνεια, η διατήρησή της ενέργειας αυτής και η αποδέσμευσή της για μετέπειτα χρήση. Παραδείγματα θερμικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είναι η αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας για νυχτερινή θέρμανση, η αποθήκευση της καλοκαιρινής θερμότητας για τη χρήση της το χειμώνα, η αποθήκευση του χειμωνιάτικου πάγου για τον καλοκαιρινό κλιματισμό.

Η λειτουργία των ηλιακών συστημάτων είναι συνυφασμένη με αποθήκευση της θερμότητας και αυτό διότι η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη μόνο κατά την διάρκεια της ημέρας, ενώ η ζήτηση θερμότητας ή ενέργειας γενικότερα εκτείνεται σε όλες τις ώρες του 24ώρου. Επιπροσθέτως η ηλιακή ενέργεια είναι ένα στοχαστικό φαινόμενο και είναι δυνατόν να υπάρχουν περίοδοι όπου το επίπεδο της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας είναι κάτω από ένα κατώφλι ωφέλιμης απόδοσης. Απαιτείται λοιπόν η αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας ώστε να εξυπηρετούνται οι περίοδοι της νύχτας και της χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας.

Επιπλέον, με τη χρήση θερμικής αποθήκευσης είναι δυνατόν να μεγιστοποιηθεί η λειτουργικότητα του ηλιακού συστήματος διότι σε περιπτώσεις μεγάλης ηλιακής απολαβής που υπάρχει πλήρης κάλυψη του φορτίου, το πλεόνασμα ενέργειας το οποίο είναι δυνατόν να συλλεχθεί, δεν αποβάλλεται αλλά αποθηκεύεται. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι δεξαμενές διεποχιακής αποθήκευσης οι οποίες είναι δεξαμενές μεγάλης μάζας νερού, που αποθηκεύουν τη θερμότητα κατά τη

διάρκεια του καλοκαιριού και την αποδίδουν κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών οπότε η ζήτηση είναι μεγαλύτερη και η ηλιακή ενέργεια μικρότερη.

Εκτός όμως από τις εφαρμογές σε ηλιακά συστήματα η αποθήκευση θερμικής ενέργειας γίνεται πράξη και σε άλλες εφαρμογές όπως οι δεξαμενές αποθήκευσης θερμού νερού σε συστήματα θέρμανσης, μετατροπές της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική και γενικότερα η μικρής διάρκειας αποθήκευση θερμότητας.

Τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας θεωρούνται σαν μια από τις πιο προηγμένες τεχνολογίες σε θέματα ενέργειας. Λόγω και της διαφαινόμενης οικονομικής και ενεργειακής κρίσης, τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αναμένονται να είναι μια πολύ ελκυστική επιλογή σε βιομηχανικές, εμπορικές και οικιακές εφαρμογές, καθώς οδηγούν μεταξύ των άλλων σε αύξηση της απόδοσης του ενεργειακού συστήματος και σε περιβαλλοντικά οφέλη.

Τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αποτελούν μια μέθοδο για την ουσιαστική μείωση του ηλεκτρικού φορτίου μειώνοντας τα φορτία αιχμής. Επιπλέον, καθιστούν ευκολότερη μια σωστή πρόβλεψη της λειτουργίας του ενεργειακού συστήματος, αφού αποσβένουν τις αποκλίσεις ανάμεσα στην παραγωγή και τη ζήτηση του ενεργειακού φορτίου. Επομένως, οδηγούν σε μια αποδοτικότερη χρήση των συστημάτων ενέργειας στα οποία υφίστανται.



*Εικόνα 5.3: Δοχείο Αποθήκευσης ζεστού νερού για συστήματα θέρμανσης*

Τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές, η πλειοψηφία των οποίων αφορά στη θέρμανση και στην ψύξη. Τα αποθηκευτικά αυτά συστήματα αποτελούν ένα σύνδεσμο και μια προσωρινή αποθήκη μεταξύ της θερμικής πηγής και του χρήστη αυτής της θερμικής ενέργειας.

Ένας βασικός παράγοντας που καθορίζει την αποδοτική λειτουργία ενός συστήματος αποθήκευσης είναι η ημερήσια διακύμανση του φορτίου, γιατί από αυτήν καθορίζεται η φόρτιση και η αποφόρτιση του συστήματος αποθήκευσης. Τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας υποβάλλονται σε ελέγχους πριν από τη χρήση τους. Για την επιλογή του κατάλληλου συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης λαμβάνεται υπόψη η διάρκεια αποθήκευσης, η οικονομική βιωσιμότητα και διάφορες λειτουργικές παράμετροι. Η ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) έχει θεσπίσει ένα σύνολο κανόνων και παρατηρήσεων στις οποίες υποβάλλονται τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας ώστε να ελέγχεται αν είναι αποδοτική η χρήση τους.

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά ενός θερμικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας είναι:

- Η χωρητικότητα θερμικής αποθήκευσης ανά μονάδα όγκου.
- Το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας .
- Το αποθηκευτικό μέσο και οι ιδιότητες που πρέπει να πληροί ( υψηλή θερμική αγωγιμότητα, υψηλό ειδικό βάρος, χημική και γεωμετρική σταθερότητα κ.ά).
- Η θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση στο σύστημα. Ο συντελεστής θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης εκφράζει την ποιότητα της θερμότητας την οποία αποδίδει ένα σύστημα θέρμανσης νερού.
- Οι απαιτήσεις ισχύος για την προσαγωγή και απαγωγή της θερμότητας.
- Η χρονική απόκριση του συστήματος ανάλογα με τη ζήτηση.
- Η διάρκεια αποθήκευσης.
- Το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας.
- Η διάρκεια ζωής.
- Τα κατασκευαστικά στοιχεία της δεξαμενής.
- Οι θερμικές απώλειες .
- Το κόστος.



Η συνολική ενεργειακή αποθήκευση εξαρτάται τόσο από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά όσο και από τον τρόπο χρήσης του θερμού νερού. Με την πάροδο του χρόνου υπάρχει η τάση να χάνεται η θερμική διαστρωμάτωση και λόγω ανάμιξης να επικρατεί μια σχετικά ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασιών.

Στις περιπτώσεις θέρμανσης νερού η χρήση νερού ως μέσου αποθήκευσης ενδείκνυται αφού το νερό έχει γνωστή θερμοδυναμική συμπεριφορά, υψηλή θερμοχωρητικότητα ( $C_p = 4.18 \text{ kJ/kg K}$ ) και χρησιμοποιείται ευρέως εξαιτίας του μικρού κόστους που έχει όταν η θερμότητα που αποθηκεύεται πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε θερμοκρασίες μικρότερες των  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Στις περιπτώσεις θερμικής αποθήκευσης με αέριο μέσο η θερμότητα αποθηκεύεται σε δεξαμενή βότσαλων θερμικά μονωμένη η οποία περιέχει βότσαλα μικρής διαμέτρου και ο αέρας οδηγούμενος μέσα αποβάλλει τη θερμότητά του και εξέρχεται με χαμηλότερη θερμοκρασία αφού την απορρόφησαν τα βότσαλα. Το πλεονέκτημα αυτού του μέσου αποθήκευσης είναι ότι προσφέρει θερμική διαστρωμάτωση στη δεξαμενή ενώ στις περιπτώσεις δεξαμενών θερμού νερού η θερμική διαστρωμάτωση είναι δύσκολο να διατηρηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα λόγω της έντονης κυκλοφορίας και ανάμιξης του νερού.

Επιπλέον, στα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας χρησιμοποιούνται αποθηκευτικά μέσα τα οποία στηρίζονται στην αλλαγή φάσης. Αυτά κατά τη διάρκεια της φόρτισης τήκονται (λιώνουν) ενώ κατά την αποφόρτιση, όταν δηλαδή αποδίδουν την αποθηκευμένη θερμότητα αλλάζουν φάση και στερεοποιούνται.

Τέλος, τα κύρια προβλήματα σε μια εγκατάσταση αποθήκευσης θερμότητας

είναι:

- Η διαμόρφωση μιας κατάλληλης επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας με στόχο τη γρήγορη μεταφορά στο σύστημα για αποθήκευση αλλά και την ταχεία απόληψή της.
- Ο περιορισμός των απωλειών στο περιβάλλον με στόχο την αύξηση του χρόνου αποθήκευσης στα επίπεδα που χρειάζεται.

## 1.4 Θερμικά Ηλιακά Συστήματα

Ηλιακή Ενέργεια είναι η ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο και αξιοποιείται μέσω τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται τη θερμική και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του ήλιου με χρήση μηχανικών μέσων για τη συλλογή, αποθήκευση και διανομή της. Η μέση ημερήσια ενέργεια που δίνεται από τον ήλιο στην Ελλάδα είναι 4,6 KWh/m<sup>2</sup>. Η Ηλιακή ενέργεια αποτελεί μια ασφαλή και ανανεώσιμη πηγή με δυνατότητες κάλυψης μεγάλου τμήματος τόσο των θερμικών όσο και ηλεκτρικών αναγκών της ανθρώπινης δραστηριότητας. Τα θερμικά ηλιακά συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα.

Η εκμετάλλευση της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται με πολλούς τρόπους:

- Με τη χρήση των θερμικών ηλιακών συστημάτων που συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και τη μετατρέπουν σε θερμότητα σε κάποια θερμομονωμένη δεξαμενή, όπου την αποθηκεύουν και ονομάζονται ενεργητικά ηλιακά συστήματα.
- Με τα παθητικά ηλιακά συστήματα, δηλαδή όλα τα κατάλληλα σχεδιασμένα και συνδυασμένα δομικά στοιχεία των οικοδομικών κατασκευών (κτιρίων) που υποβοηθούν την καλύτερη άμεση ή έμμεση εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας είτε για τη θέρμανση των κτιρίων το χειμώνα είτε για το δρόσισμα τους το καλοκαίρι.
- Με την κατευθείαν μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική με τη χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων.



Σχήμα 1.1: Αξιοποίηση της Ηλιακής Ενέργειας - Διαχωρισμός των Ηλιακών Συστημάτων

Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα χρησιμοποιούν τους συλλέκτες και τις δεξαμενές αποθήκευσης ως χωριστές συνιστώσες και η μεταφορά της ενέργειας γίνεται με τη βοήθεια κάποιας αντλίας συστήματος. Τα ενεργητικά συστήματα θέρμανσης μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: τα συστήματα αέρα και τα συστήματα υγρού. Ένα θερμικό ηλιακό σύστημα συλλέγει, αποθηκεύει και διανέμει την ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιώντας είτε κάποιο υγρό, είτε αέρα, ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας των συλλεκτών. Οι διαφορές στα συστήματα θέρμανσης βρίσκονται στον τρόπο, με τον οποίο η ηλιακή ενέργεια συσσωρεύεται στον ηλιακό συλλέκτη. Τα συστήματα υγρού χρησιμοποιούν ένα υγρό για να συλλέγουν την ενέργεια στον ηλιακό συλλέκτη ενώ τα συστήματα αέρα απορροφούν την ενέργεια μέσω του αέρα.

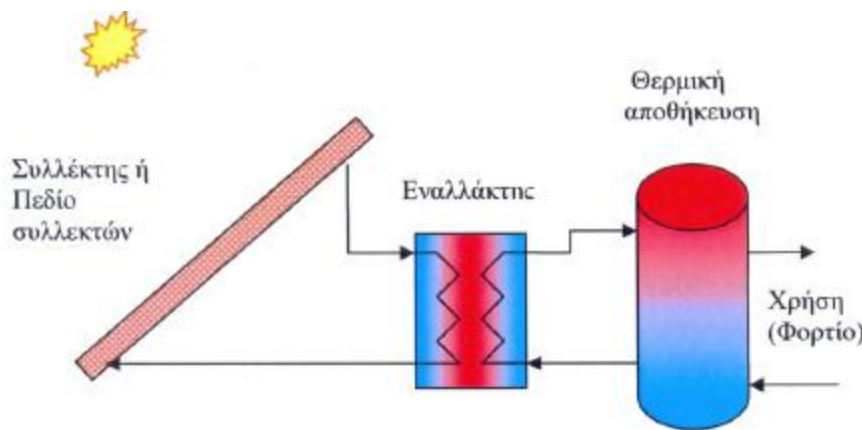
Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θέρμανση νερού οικιακής χρήσης, για τη θέρμανση και ψύξη χώρων (μπόιλερ), για βιομηχανικές διεργασίες, για αφαλάτωση κ.ά.

Η επιφάνεια ενεργητικών ηλιακών συστημάτων, που βρίσκονται σε λειτουργία στη χώρα μας, είναι περίπου  $3.587.200 \text{ m}^2$  (στοιχεία 2007). Ήδη, περισσότερες από 1.000.000 ελληνικές οικογένειες καλύπτουν περίπου 80% των ετήσιων αναγκών τους σε ζεστό νερό χρήσης με ηλιακό θερμοσίφωνα και περίπου 60% των ετήσιων αναγκών θέρμανσης του σπιτιού τους. Η απόδοση των ηλιακών συλλεκτών και η ποιότητα τους γενικά έχουν βελτιωθεί τα τελευταία χρόνια. Η Ελλάδα κατέχει αυτή τη στιγμή την τρίτη θέση στην ευρωπαϊκή αγορά ως προς την εγκατεστημένη επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών. Η Ελλάδα είναι ο μεγαλύτερος εξαγωγέας σε όλη την Ευρώπη και μάλιστα σε χώρες με ιδιαίτερη βιομηχανική παράδοση, όπως η Γερμανία.

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα αναφέρονται κυρίως σε παρεμβάσεις επί της μορφής και διάταξης των χώρων ή της δομής των στοιχείων κατασκευής ενός κτιρίου, οι οποίες σε συνδυασμό με τις εφαρμογές βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής, οδηγούν σε κάλυψη σημαντικού τμήματος αναγκών φωτισμού, θέρμανσης, δροσισμού & αερισμού των εσωτερικών χώρων.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα βασίζονται σε υλικά, όπως το πυρίτιο με πρόσμιξη άλλων στοιχείων, τα οποία λειτουργούν ως ημιαγωγοί (άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα προς μια μόνο διεύθυνση), έχουν δηλαδή τη δυνατότητα να δημιουργούν διαφορά δυναμικού όταν προσπίπτει φως και κατά συνέπεια να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα.

Μέχρι σήμερα τη μεγαλύτερη και ταυτόχρονα μαζικότερη εφαρμογή έχουν τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Ανάλογα με διάφορους παράγοντες, όπως η εφαρμογή για την οποία προορίζονται, την τεχνολογία που χρησιμοποιείται, το μέγεθος, τις μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφόρων τύπων θερμικά ηλιακά συστήματα. Τα συστήματα αυτά ποικίλουν από τα χαμηλού κόστους συμβατικά θερμοσιφωνικά έως τα περίπλοκα και δαπανηρά κεντρικά ηλιακά συστήματα όπου χρησιμοποιούνται αντλίες, εναλλάκτες θερμότητας, αισθητήρες και συστήματα ελέγχου. Η ποικιλία οφείλεται κυρίως στους διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους τα συστήματα αυτά προστατεύονται από τον παγετό και στους τρόπους που επιτυγχάνεται η ροή θερμού νερού.



Εικόνα 6.4: Τυπικό Θερμικό Ηλιακό Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα όσον αφορά τη ροή διακρίνονται σε 2 κατηγορίες :

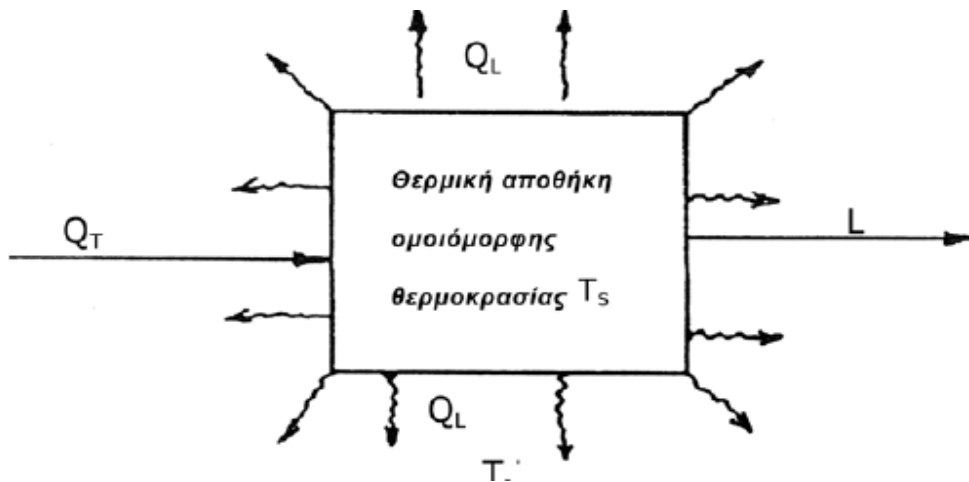
- Στα συστήματα φυσικής κυκλοφορίας, τα οποία δε χρειάζονται κανένα μηχανισμό να παρέχει την επιπλέον ενέργεια όταν αποθηκεύεται και μεταφέρεται ενέργεια στον έμμεσο κύλινδρο. Σε αυτό το είδος συστημάτων ανήκουν οι συμπαγείς θερμοαντήρες νερού που αποτελούνται από μία ή περισσότερες δεξαμενές αποθήκευσης και τα θερμοσιφωνικά συστήματα τα οποία βασίζονται στην κυκλοφορία του νερού στους συλλέκτες και τη δεξαμενή.
- Στα συστήματα βεβιασμένης κυκλοφορίας στα οποία χρησιμοποιούνται ηλεκτρικές αντλίες, βαλβίδες και συστήματα ελέγχου για να κυκλοφορήσουν το νερό ή άλλα ρευστά μεταφοράς θερμότητας. Πρόκειται για πιο σύνθετα συστήματα έχουν όμως το πλεονέκτημα του πλήρους ελέγχου της εγκατάστασης και εξαιρετικές επιδόσεις.

## 1.5 Μικρής Διάρκειας Αποθήκευση Θερμότητας

Οι υγρές θερμικές αποθήκες ενέργειας μικρής διάρκειας χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις υγρές αποθήκες ομοιόμορφης θερμοκρασίας και τις θερμικά διαστρωματωμένες υγρές αποθήκες. Για αποθήκευση με χρήση στερεών χρησιμοποιούνται η θερμική κλίση στερεών και ο τοίχος θερμικής αποθήκευσης.

### 1.5.1 Υγρές αποθήκες ομοιόμορφης θερμοκρασίας

Αποτελούν την πιο διαδεδομένη μέθοδο αποθήκευσης της αισθητής θερμότητας, δηλαδή της θερμότητας που προκαλεί μεταβολές στη θερμοκρασία ενός υλικού. Το ισοζύγιο ενέργειας για μια δεξαμενή αποθήκευσης θερμού υγρού μπορεί να απλοποιηθεί αρκετά αν η θερμοκρασία στο χώρο της αποθηκευτικής δεξαμενής θεωρηθεί ομοιόμορφη. Αυτό επιτυγχάνεται με αργή προσθήκη θερμότητας και επομένως με αργή άνοδο της θερμοκρασίας. Η ροή θερμότητας στην αποθήκη φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα :



Σχήμα 1.2 : Θερμική αποθήκη ομοιόμορφης θερμοκρασίας

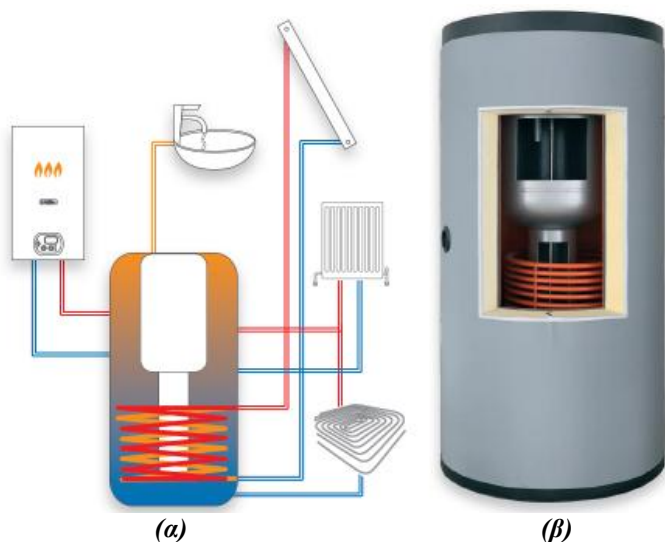
Η ικανότητα που έχουν τα υλικά να επιτρέπουν τη θερμική ροή (διέλευση της θερμότητας μέσω της μάζας τους περιγράφεται από το συντελεστή **θερμικής αγωγιμότητας**  $k$  . Μία από τις πιο διαδεδομένες χρήσεις της ενεργειακής αποθήκης ομοιόμορφης θερμοκρασίας είναι ο οικιακός ηλιακός θερμοσίφοντας. Ωστόσο αρκετοί σημερινοί ηλιακοί συλλέκτες διαθέτουν θερμικά διαστρωματωμένες δεξαμενές αποθήκευσης υγρού για να βελτιώνεται η απόδοσή τους και να παρέχουν ζεστό νερό για όσο είναι δυνατό μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα.

### 1.5.2 Υγρές αποθήκες θερμικής διαστρωμάτωσης

Σε πραγματικές καταστάσεις η θερμοκρασία του υγρού σε μια δεξαμενή δεν είναι ομοιόμορφη, ειδικά στην κατακόρυφη αποθήκευση. Αυτό συμβαίνει επειδή το θερμό υγρό έχοντας μικρότερο ειδικό βάρος από το ψυχρό, παραμένει στην κορυφή της δεξαμενής και το ψυχρό στον πυθμένα, δημιουργώντας έτσι θερμική διαστρωμάτωση. Η τέλεια διαστρωμάτωση δεν είναι εφικτή διότι η είσοδος του υγρού στη δεξαμενή αποθήκευσης προκαλεί αναταραχές και ανάμειξη. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα εισόδου τόσο μεγαλύτερη ανάμειξη παρατηρείται.

Η δημιουργία μιας καλής διαστρωμάτωσης η οποία θα εξουδετερώνει την ανάμειξη λόγω παροχής είναι τόσο σημαντική όσο και η διατήρηση των θερμοκρασιακών βαθμίδων. Η θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση δε διατηρείται για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Οι απώλειες θερμότητας από την επιφάνεια της δεξαμενής οδηγούν τη θερμοκρασία του υγρού (συνήθως νερό) κοντά στα τοιχώματα σε χαμηλότερα επίπεδα και δημιουργείται έτσι φυσική μεταφορά θερμότητας η οποία καταστρέφει τα θερμοκρασιακά στρώματα. Για την επίτευξη διαστρωμάτωσης στη δεξαμενή για μεγάλο χρονικό διάστημα, η δεξαμενή απαιτείται να είναι ενισχυμένη με εξαιρετικά καλή θερμική μόνωση.

Στην εικόνα που ακολουθεί παριστάνεται ένα σύστημα θέρμανσης χώρου δύο ζωνών και ζεστού νερού χρήσης το οποίο χρησιμοποιεί δεξαμενή αποθήκευσης.



Εικόνα 7.5 : (α) Σύστημα θέρμανσης με αποθήκη διαστρωματωμένης θερμοκρασίας  
(β) Τομή Δεξαμενής αποθήκευσης διαστρωματωμένης θερμοκρασίας

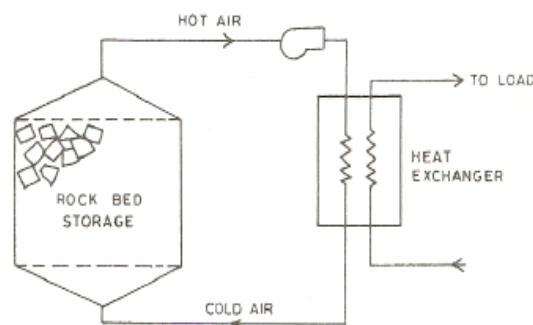
Ηλιακοί συλλέκτες θερμαίνουν το νερό που βρίσκεται στο κάτω μέρος της δεξαμενής οπότε αυτό ανέρχεται προκαλώντας θερμική διαστρωμάτωση.

Η θέρμανση των χώρων αποτελείται από μια ζώνη υψηλής θερμοκρασίας (καλοριφέρ) και μία χαμηλής (ενδοδαπέδια θέρμανση). Η κάθε ζώνη χρησιμοποιεί θερμό νερό από διαφορετικό στρώμα θερμοκρασίας. Για το ζεστό νερό χρήσης υπάρχει εσωτερικό δοχείο στο πάνω μέρος της δεξαμενής (υψηλή θερμοκρασία) μέσα στο οποίο θερμαίνεται το νερό του δικτύου.

Το κύριο πλεονέκτημα της θερμικής αποθήκης διαστρωματωμένης θερμοκρασίας είναι ότι παρέχει τη δυνατότητα χρήσης υγρού από το πάνω μέρος της δεξαμενής, σε θερμοκρασία υψηλότερη από ότι εάν αυτό ήταν αναμεμειγμένο, οπότε βελτιώνεται η απόδοση του συστήματος.

### 1.5.3 Θερμική κλίση στερεών (rock bed)

Μια θερμική κλίση στερεών αποτελείται από ένα σώμα θερμοαπορροφητικών στερεών διαμέσου των οποίων ένα αέριο ρευστό, συνήθως ατμοσφαιρικός αέρας, ρέει κι έτσι ανταλλάσσεται θερμική ενέργεια μεταξύ στερεού και αέρα. Τα στερεά υλικά που χρησιμοποιούνται ως μέσα αποθήκευσης μπορεί να είναι χαλίκια, σίδηρο, τσιμέντο, τούβλα, κεραμικά κ.ά.



Σχήμα 1.3 : Θερμική κλίση στερεών

Τα πλεονεκτήματα αυτού του είδους συσκευών θερμικής αποθήκευσης είναι ο μεγάλος συντελεστής της θερμικής μεταφοράς μεταξύ του στερεού υλικού και του αέρα, η μικρή αγωγιμότητα της αποθήκης όταν δεν υπάρχει ροή και το μικρό κόστος. Εντούτοις, υπάρχουν και πολύ βασικά μειονεκτήματα σε αυτά τα συστήματα θερμικής αποθήκευσης. Το κυριότερο είναι ότι ο όγκος του θερμικού στρώματος που πρέπει να καταλαμβάνει το αέριο είναι τρεις φορές μεγαλύτερος σε σχέση με ισοδύναμη θερμική αποθήκη νερού. Επιπλέον δημιουργούνται φαινόμενα σκόνης και υγρασίας στο στερεό υλικό αποθηκευτικό μέσο και απαιτείται μεγάλη πτώση πίεσης για να διέλθει το αέριο μέσα από την αποθήκη γεγονός που σημαίνει κατανάλωση αρκετής ενέργειας.

### 1.5.4 Ηλιακοί Θερμοσίφωνες

Ο ηλιακός θερμοσίφωνας είναι ένα ενεργητικό ηλιακό σύστημα που ζεσταίνει νερό χρησιμοποιώντας την ηλιακή ακτινοβολία. Χρησιμοποιείται ευρύτατα στις χώρες που έχουν μεγάλη ηλιοφάνεια, όπως για παράδειγμα στις χώρες της Μεσογείου και στην Ελλάδα. Ο ηλιακός θερμοσίφωνας είναι η απλούστερη και η γνωστότερη ηλιακή συσκευή. Κατά την λειτουργία του γίνεται εκμετάλλευση δυο φυσικών φαινομένων. Του φυσικού φαινομένου της ροής των ρευστών λόγω διαφοράς θερμοκρασίας (διαφοράς πυκνότητας), γνωστό και σαν αρχή του θερμοσίφωνου. Με το φαινόμενο αυτό επιτυγχάνεται με φυσικό τρόπο χωρίς κυκλοφορητή (αντλία) συνεχής ροή του θερμαινόμενου μέσου, από το θερμότερο σημείο (ηλιακοί συλλέκτες) προς το ψυχρότερο (δεξαμενή νερού), μέχρις ότου τα δύο σημεία να αποκτήσουν παρόμοιες θερμοκρασίες. Για να είναι αυτό δυνατό πρέπει το ψυχρότερο σημείο να είναι ψηλότερα από το θερμότερο σημείο και για τον λόγο αυτό σε όλους τους ηλιακούς θερμοσίφωνες η δεξαμενή αποθήκευσης είναι πάντα ψηλότερα από τους ηλιακούς συλλέκτες.



*Εικόνα 8.6: ο ευρέως γνωστός Ηλιακός Θερμοσίφωνας*

Η θέρμανση του νερού γίνεται με την εκμετάλλευση του φαινομένου του θερμοκηπίου που αναπτύσσεται στους συλλέκτες του, στο χώρο ανάμεσα στην πλάκα απορρόφησης και τη γυάλινη επικάλυψη. Η ηλιακή ακτινοβολία πέφτει στην (συνήθως μαύρη) απορροφητική πλάκα, ανεβάζοντας τη θερμοκρασία της. Η πλάκα με τη σειρά της εκπέμπει μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία (θερμική ακτινοβολία) για την οποία το τζάμι που καλύπτει την πλάκα είναι σχεδόν αδιαφανές. Έτσι η μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία (η ζέστη) παγιδεύεται ανάμεσα στην πλάκα και το τζάμι, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η απόδοση όσον αφορά τη θέρμανση του νερού.



Η συνολική απόδοση του ηλιακού θερμοσίφωνα εξαρτάται κι απ' τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, τη νεφοκάλυψη και την αποτελεσματικότητα της θερμικής μόνωσης του συστήματος.

Οι ηλιακοί θερμοσίφωνες , αποτελούνται από δύο βασικά μέρη:

- Το τμήμα συλλογής (οι ηλιακοί συλλέκτες, η επιφάνεια απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας).
- Το τμήμα αποθήκευσης (η δεξαμενή αποθήκευσης του νερού). Το τμήμα αποθήκευσης διαθέτει και ηλεκτρική αντίσταση με θερμοστάτη, για να μπορεί να παράγεται ζεστό νερό και σε άσχημες καιρικές συνθήκες.

Υπάρχουν δύο είδη ηλιακών θερμοσιφώνων ανάλογα με το κύκλωμα κυκλοφορίας του θερμαινόμενου μέσου:

- Ανοικτού κυκλώματος: απευθείας θέρμανση του νερού χρήσης (το θερμαινόμενο μέσο είναι το ίδιο το νερό χρήσης).
- Κλειστού κυκλώματος: έμμεση θέρμανση του νερού χρήσης (το θερμαινόμενο μέσο κυκλοφορεί σε ιδιαίτερο κύκλωμα το οποίο θερμαίνει το νερό που θα χρησιμοποιηθεί χωρίς να γίνεται ανάμιξή τους, μέσω εναλλάκτη θερμότητας).

Οι ηλιακοί θερμοσίφωνες ανοικτού κυκλώματος είναι απλούστεροι και φθηνότεροι, έχουν όμως προβλήματα σε χαμηλές θερμοκρασίες (παγετούς) γιατί δεν μπορούμε να τους προσθέσουμε αντιψυκτικά μίγματα.

Επίσης διαχωρίζονται ανάλογα με τον αριθμό ενεργειακών πηγών που μπορούν να εκμεταλλευτούν σε:

- Διπλής ενέργειας: Ο θερμοσίφοντας λειτουργεί εκμεταλλεύμενος είτε την ηλιακή ενέργεια είτε το ηλεκτρικό ρεύμα. (π.χ. κατά την διάρκεια συννεφιάς οπότε η ηλιακή ενέργεια δεν είναι αρκετή για να ζεστάνει το νερό). Για τον σκοπό αυτό, υπάρχει ηλεκτρική αντίσταση τοποθετημένη εντός του τμήματος αποθήκευσης.
- Τριπλής ενέργειας: Λειτουργεί όπως ο ηλιακός θερμοσίφοντας διπλής ενέργειας αλλά έχει επιπλέον μια είσοδο για να εκμεταλλευτεί ως θερμαντικό μέσο το ζεστό νερό του καλοριφέρ που παράγεται από τον λέβητα κεντρικής θέρμανσης. Προϋπόθεση για την εγκατάσταση ηλιακού θερμοσίφωνα τριπλής ενέργειας είναι να υπάρχει η κατάλληλη υποδομή στο οίκημα υπό την μορφή ξεχωριστών σωληνώσεων.

### 1.5.5 Δεξαμενές αποθήκευσης θερμού νερού

Το Boiler είναι παράδειγμα δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας στην οποία αποθηκεύεται το ζεστό νερό χρήσης του δικτύου της εγκατάστασης. Στις συνήθεις εφαρμογές ζεστού νερού οι δεξαμενές χρησιμοποιούνται ως παρασκευαστήρες και αποθηκευτικοί χώροι ζεστού νερού και αποτελούν την πιο αξιόπιστη λύση σε μία εγκατάσταση. Ο κυλινδρικός θερμοαντήρας ζεστού νερού είναι κατασκευασμένος είτε από ανοξείδωτο χάλυβα είτε από χαλκό είτε από χάλυβα με επιστρώσεις γυαλιού βασισμένος στις απαιτήσεις έτσι ώστε να εκπληρώνει όλες τις προδιαγραφές ασφαλείας και υγείας. Εξωτερικά έχει πολύ καλή μόνωση συνήθως από πολυουρεθάνη ή υαλοβάμβακα. Συνήθως έχει ενσωματωμένη κάποια ηλεκτρική αντίσταση. Στα συστήματα κλειστού κυκλώματος έχει επιπλέον ενσωματωμένο εναλλάκτη (σερπαντίνα) για την κυκλοφορία του θερμαινόμενου μέσου ή σε πιο ακριβά συστήματα είναι διπλών τοιχωμάτων.

Η μεγάλη εναλλακτική επιφάνεια της σερπαντίνας θερμαίνει πολύ γρήγορα το νερό χρήσης ενώ η θερμική μόνωση ελαχιστοποιεί τις θερμικές απώλειες. Το εξωτερικό κάλυμμα είναι από χαλυβδοέλασμα βαμμένο κίτρινο ενώ για την αντιδιαβρωτική προστασία του θερμοαντήρα υπάρχει ανόδιο μαγνησίου. Με την προσθήκη και δεύτερου εναλλάκτη ο θερμοαντήρας δύναται να λειτουργήσει ως μπόϊλερ τριπλής ενέργειας π.χ. με ηλιακό συλλέκτη (πρόσθετος εξοπλισμός).

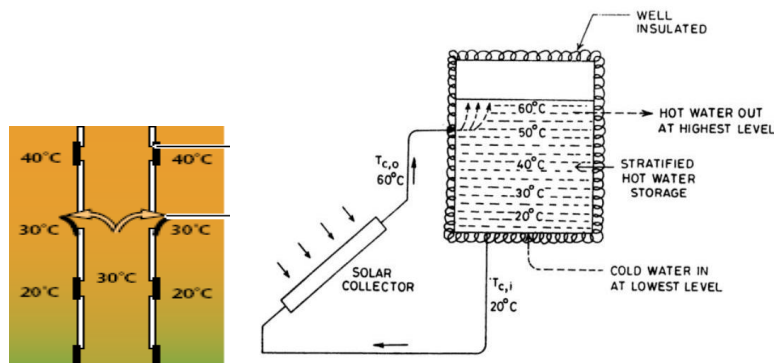


*Εικόνα 9.7: Επάνω - Δεξαμενές αποθήκευσης θερμού νερού μονωμένες από την κατασκευή τους /  
Κάτω - Οικιακά δοχεία αποθήκευσης θερμού νερού (Boilers)*

Οι δεξαμενές τοποθετούνται στο υπόγειο αν πρόκειται για σύστημα βεβιασμένης κυκλοφορίας ή στην οροφή του κτιρίου αν πρόκειται για σύστημα φυσικής κυκλοφορίας. Η επιλογή του όγκου της δεξαμενής γίνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εγκατάστασης με χωρητικότητα νερού από 100 λίτρα και πάνω. Οι δεξαμενές αποθήκευσης θερμού νερού που χρησιμοποιούνται για συνήθεις οικιακές εφαρμογές νερού έχουν χωρητικότητα που κυμαίνεται από 100 έως 200 λίτρα.

Το νερό είναι συνήθως το μέσο αποθήκευσης θερμότητας για τα ηλιακά συστήματα, ιδίως για εκείνα της θέρμανσης ζεστού νερού χρήσης, καθώς η θερμότητα προσάγεται και απάγεται με το ίδιο μέσο. Σήμερα η ανάπτυξη της τεχνολογίας στα συγκεκριμένα συστήματα έχει συμβάλει στη χρήση και άλλων νέων υλικών ως αποθηκευτικών μέσων που αποθηκεύουν μεγάλα ποσά ενέργειας υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Τα υλικά αυτά λέγονται υλικά αλλαγής φάσης (ΥΑΦ) και έχουν εξίσου καλές δυνατότητες θερμικής αποθήκευσης. Αλληλεπιδρούν με το νερό μέσα στις δεξαμενές ζεστού νερού στις οποίες τοποθετούνται έγκλειστα σε σωλήνες και μεταφέρουν τη θερμότητά τους σε αυτό.

Μετά την αποθήκευση της ενέργειας, δημιουργείται φυσική διαστρωμάτωση στη δεξαμενή λόγω διαφοράς θερμοκρασίας. Υπάρχουν 3 βασικές περιοχές διαστρωμάτωσης (Εικόνα).



Εικόνα 10.8 : Αποθήκευση θερμότητας σε δεξαμενή νερού διαστρωματωμένης θερμοκρασίας

Το νερό προσάγεται συνήθως στο υψηλότερο σημείο, από όπου γίνεται και η απαγωγή προς το φορτίο ζήτησης, ενώ απάγεται προς το ηλιακό σύστημα από το κάτω μέρος της αποθηκευτικής δεξαμενής, το οποίον είναι και το πλέον κρύο σημείο της δεξαμενής. Η θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση, μετά την πρώτη χρήση και τη σταδιακή αποφόρτιση λόγω ανάμιξης, παύει να υπάρχει, δηλαδή μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα η θερμοκρασία κατανέμεται ομοιόμορφα μέσα στη δεξαμενή.

## 1.6 Θερμότητα και Θερμοχωρητικότητα

• **Θερμότητα** : Είναι η θερμική ενέργεια που ανταλλάσσεται μεταξύ 2 συστημάτων διαφορετικής θερμοκρασίας τα οποία έρχονται σε επαφή και τα δομικά σωματίδιά τους συγκρούονται με αποτέλεσμα τα σωματίδια του θερμότερου σώματος να χάνουν ενέργεια την οποία μεταδίδουν στο πιο ψυχρό σώμα.

• **Θερμοχωρητικότητα** : Η *Θερμοχωρητικότητα* είναι φυσικό μέγεθος της Θερμοδυναμικής το οποίο δείχνει το ποσό της θερμικής ενέργειας που χρειάζεται να προσλάβει ένα σύστημα-σώμα-υλικό για την ψύξη ή τη θέρμανσή του.

Με τον όρο θερμοχωρητικότητα χαρακτηρίζεται η ποσότητα της θερμότητας που παράγεται ή απορροφάται από κάποιο σώμα όταν η θερμοκρασία του μεταβληθεί κατά ένα βαθμό Κελσίου ( $^{\circ}\text{C}$ ). Μαθηματικά, ο τύπος που ορίζει τη θερμοχωρητικότητα είναι ο λόγος της θερμότητας  $\Delta Q$  που προσφέρεται σε ένα σύστημα προς τη μεταβολή της θερμοκρασίας του  $\Delta T$  :

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

Η θερμοχωρητικότητα εξαρτάται από τη μάζα του σώματος. Έτσι η θερμοχωρητικότητα ενός σώματος βρίσκεται αν πολλαπλασιασθεί η μάζα του επί την ειδική θερμότητά του. Η θερμοχωρητικότητα που αναφέρεται στη μονάδα της μάζας ονομάζεται *Ειδική Θερμοχωρητικότητα*, ενώ *Γραμμομοριακή Θερμοχωρητικότητα* ονομάζεται η θερμοχωρητικότητα που αναφέρεται σε ένα mole του υλικού.

Η ειδική θερμότητα του νερού είναι ίση με τη μονάδα, και γι αυτό το λόγο η θερμοχωρητικότητα και η μάζα του εκφράζονται με τον ίδιο αριθμό. Αυτό σημαίνει πως η θερμοχωρητικότητα οποιουδήποτε σώματος εκφράζεται με τη μάζα του ύδατος που λαμβάνεται αν πολλαπλασιασθεί η μάζα του σώματος επί την ειδική του θερμότητα. Ο αριθμός που προκύπτει ονομάζεται αξία του σώματος σε ύδωρ ή "θερμικό ισοδύναμο" του συγκεκριμένου σώματος ως προς το νερό.

Γενικά, η θερμοχωρητικότητα ενός υλικού δεν είναι μια σταθερά, αλλά εξαρτάται από τη διαδικασία που ακολουθείται κατά τη θέρμανση του υλικού. Δηλαδή, για την ίδια μεταβολή θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ), μπορεί να συμβαίνουν διαφορετικές διαδικασίες θέρμανσης οι οποίες να απαιτούν διαφορετικά ποσά θερμότητας ( $\Delta Q$ ). Πιο συγκεκριμένα η θερμοχωρητικότητα ενός συστήματος εξαρτάται από τις συνθήκες υπό τις οποίες προσφέρεται θερμότητα και στις οποίες μεταβάλλεται η θερμοκρασία του. Έτσι διακρίνουμε τη θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ( $C_p$ ) και τη θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο  $C_v$ .

## 1.7 Μηχανισμοί Μεταφοράς Θερμότητας

### 1.7.1 Διαφορά Θερμοδυναμικής και Μετάδοσης Θερμότητας

Η Θερμοδυναμική ασχολείται με τη μελέτη της ενεργειακής κατάστασης ενός συστήματος σε θερμοδυναμική ισορροπία και με τον υπολογισμό των συνολικών ποσών ενέργειας (θερμότητας) που απαιτούνται για τη μετάβαση του συστήματος από τη μία κατάσταση ισορροπίας σε άλλη. Δεν δίνει όμως καμία ένδειξη του χρόνου που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί μια διεργασία αφού ο χρόνος δεν αποτελεί θερμοδυναμική μεταβλητή.

Η Μεταφορά Θερμότητας (**Heat Transfer**) ασχολείται με τον προσδιορισμό του ρυθμού ανταλλαγής θερμότητας σε συνθήκες διεργασίας μεταξύ συστημάτων αλλά και των εσωτερικών ρυθμών ροής ενέργειας και της κατανομής θερμοκρασίας που αυτή συνεπάγεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον καθορισμό των διαστάσεων και του κόστους του συστήματος που για τη μεταφορά θερμότητας σε συγκεκριμένο χρόνο.

Στη Θερμοδυναμική η θερμότητα ορίζεται ως η ενέργεια που ανταλλάσσεται μεταξύ ενός συστήματος και του περιβάλλοντός του ή μεταξύ 2 συστημάτων εξαιτίας της μεταξύ τους διαφοράς θερμοκρασίας. Η ανάπτυξη του αντικειμένου της Μεταφοράς Θερμότητας βασίζεται στα αξιώματα της Θερμοδυναμικής. Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος δηλώνει ότι η συνολική ενέργεια που δίδεται σε ένα σύστημα με τη μορφή θερμότητας ή έργου είναι ίση με τη μεταβολή της εσωτερικής του ενέργειας και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό αυτών των ενεργειακών μεταβολών. Στη Μεταφορά Θερμότητας ο νόμος αυτός αναφέρεται ως ισοζύγιο ενέργειας. Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος δηλώνει την κατεύθυνση της μετάδοσης θερμότητας, ότι δηλαδή η θερμότητα ρέει από περιοχές υψηλότερης σε περιοχές χαμηλότερης θερμοκρασίας. Εντούτοις, η θερμοδυναμική δεν δείχνει με ποιο τρόπο η μεταφερόμενη θερμότητα εξαρτάται από την διαφορά θερμοκρασίας και πόσο γρήγορη είναι αυτή η μη αναστρέψιμη διαδικασία. Η Μεταφορά θερμότητας περιγράφει τους νόμους που διέπουν αυτή την διαδικασία. Υπάρχουν τρεις μηχανισμοί για τη μεταφορά θερμότητας :

- Μεταφορά με Αγωγή
- Μεταφορά με Συναγωγή
- Μεταφορά με Ακτινοβολία

### 1.7.2 Ανάλυση των μηχανισμών μετάδοσης θερμότητας

**Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας** λέγεται η θερμότητα που μεταφέρεται μέσω μιας θερμικής διεργασίας στη μονάδα του χρόνου και συμβολίζεται με  $\dot{q}$ . Οι μονάδες του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας στο SI είναι [J/sec] δηλαδή [Watt]. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι δυνατό να μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας. Ο ανηγμένος ρυθμός μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα επιφανείας

ονομάζεται ροή θερμότητας, δηλαδή η θερμική ροή τη σχέση :  $q'' = \frac{\dot{q}}{A}$

**Μεταφορά με αγωγή :** Αγωγή ή διάχυση θερμότητας παρατηρείται όταν η θερμότητα μεταφέρεται σε ένα υλικό λόγω διαφοράς θερμοκρασίας χωρίς μακροσκοπική μετακίνηση της μάζας του υλικού από τη μία θέση στην άλλη. Μικροσκοπικά υπάρχουν μετακινήσεις και αλληλεπιδράσεις αλλά το υλικό δεν κινείται. Απλώς γίνεται μεταφορά ενέργειας από τα πιο ενεργά σωματίδια του υλικού προς τα γειτονικά λιγότερο ενεργά σωματίδια λόγω των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων. Η αγωγή είναι κύριος μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας στα στερεά σώματα και σε μη κινούμενα ρευστά αλλά παρατηρείται και σε αέρια. Στα στερεά οφείλεται στο συνδυασμό των ταλαντώσεων των μορίων στο δομικό πλέγμα και της μεταφοράς ενέργειας από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Στα αέρια οφείλεται στις συγκρούσεις και στη διάχυση των μορίων κατά την τυχαία κίνησή τους.

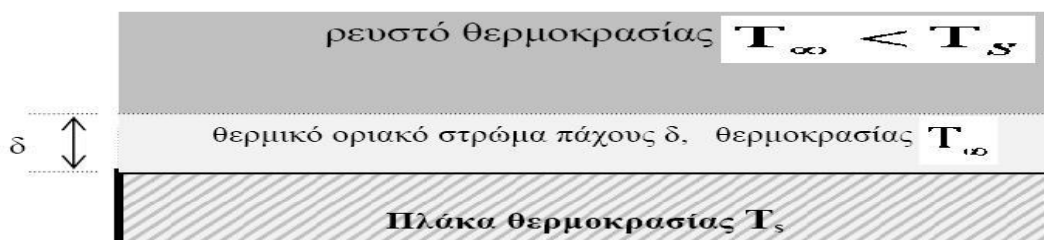
Ο ρυθμός με τον οποίο μεταφέρεται η θερμότητα δια αγωγής είναι ανάλογος με τη διαφορά της θερμοκρασίας και αντιστρόφως ανάλογος με την επιφάνεια μέσα από την οποία μεταδίδεται η θερμότητα. Το φαινόμενο της αγωγής περιγράφεται από το **νόμο του Fourier** ο οποίος συνδέει τη ροή θερμότητας με τη βαθμίδα θερμοκρασίας. Για τρισδιάστατο πεδίο θερμοκρασιών και για ισότροπο υλικό με ίδια θερμική αγωγιμότητα προς όλες τις διευθύνσεις ισχύει γενικά :

$$q'' = -k \nabla T$$

Όπου :  $\nabla T$  είναι η βαθμίδα (κλίση), το grad όπως λέγεται, της θερμοκρασίας στο χώρο και  $k$  ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (**Thermal conductivity**) ο οποίος είναι χαρακτηριστική θερμοφυσική ιδιότητα του υλικού και στο SI έχει διαστάσεις [W/m \* K]. Οι κρύσταλλοι και τα μέταλλα εμφανίζουν τον υψηλότερο συντελεστή.

**Μεταφορά με συναγωγή :** Παρατηρείται στα ρευστά όπου η ύλη μπορεί να μετακινηθεί ελεύθερα. Δημιουργείται λόγω της μετακίνησης της μάζας του ρευστού , το οποίο καθώς κινείται από θέση σε θέση, μεταφέρει μαζί του και τη θερμική ενέργεια που περιέχει και την ορμή του και τα συστατικά του. Η συναγωγή μπορεί να εμφανιστεί σε ένα ρευστό που κινείται λόγω εξαναγκασμένης κυκλοφορίας από εξωτερικά αίτια που του έχουν επιβληθεί όπως μια *εξωτερική ταχύτητα* (παροχή). Επίσης συναντάται και σε ρευστό που θερμαίνεται ακίνητο (δεν ρέει) σε ένα χώρο με αποτέλεσμα την άνοδο της θερμοκρασίας του και τη διαστολή του. Η διαστολή με τη σειρά της δημιουργεί *διαφορά πυκνότητας* σε περιοχές διαφορετικών θερμοκρασιών και έτσι παρατηρείται κίνηση του ρευστού λόγω δυνάμεων άνωσης. Η κίνηση αυτή του ρευστού , που οφείλεται στην επίδραση της βαρύτητας ονομάζεται φυσική κυκλοφορία.

Η συναγωγή συμβαίνει ανάμεσα σε ένα στερεό και ένα ρευστό, και ειδικότερα όταν ένα ρευστό κινείται πάνω σε μια επιφάνεια στερεού. Δεν μπορεί να συμβεί μεταξύ δύο στερεών όπου εκεί η θερμότητα μεταδίδεται μέσω αγωγής. Άλλωστε όταν δύο ρευστά διαφορετικής θερμοκρασίας έρχονται σε επαφή πραγματοποιείται ανάμιξη των ουσιών (δηλαδή πιο πολύπλοκο φαινόμενο που περιλαμβάνει και μεταφορά θερμότητας και μεταφορά μάζας). Η συναγωγή είναι εκείνος ο τρόπος μετάδοσης θερμότητας που μπορεί να μεταφέρει μεγάλες ποσότητες θερμότητας σε μικρό χρονικό διάστημα σε αντίθεση με την αγωγή και την ακτινοβολία σε μικρές θερμοκρασίες.



**Θερμικό οριακό στρώμα:** η περιοχή στην οποία η θερμοκρασία του ρευστού μεταβάλλεται ως συνάρτηση της απόστασης από το στερεό

- Η θερμορροή από το στερεό σώμα θερμαίνει ένα ρευστό
- Λόγω της κίνησης του ρευστού η θερμότητα μεταφέρεται μακριά από το στερεό

*Σχήμα 11.4 : Μηχανισμός της Συναγωγής – Η πλάκα θερμαίνει το ρευστό με το οποίο έρχεται σε επαφή και η κίνηση του ρευστού διώχνει τις μάζες θερμού ρευστού μακριά από την επιφάνεια. Ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και για ροή σε κυλινδρικό αγωγό που εμπεριέχει θερμό στερεό υλικό.*

Στην περίπτωση λοιπόν μιας στερεής επιφάνειας η οποία μεταφέρει θερμότητα σε ένα ρευστό **το πρώτο στρώμα** ρευστού κοντά στην επιφάνεια θερμαίνεται με **αγωγή**. Σε κάποια απόσταση από τη στερεή επιφάνεια η θερμότητα μεταφέρεται λόγω **ελεύθερης κίνησης** του ρευστού επειδή οι δυνάμεις ιξώδους έχουν εξασθενήσει. Δηλαδή οι μάζες θερμού ρευστού φεύγουν από την περιοχή υψηλών θερμοκρασιών κοντά στην επιφάνεια και μεταφέρουν μαζί τη θερμική τους ενέργεια επομένως κύριος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι η συναγωγή.

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή εκφράζεται συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας από τη σχέση του Νεύτωνα, γνωστή ως **νόμος ψύξης του Newton**. Ο συνολικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από την επιφάνεια εμβαδού  $A$  στο ρευστό είναι :

$$\dot{q} = hA\Delta T = hA(T_s - T_\infty)$$

Όπου :  $(T_s - T_\infty)$  είναι η διαφορά θερμοκρασίας της επιφάνειας και θερμοκρασίας του ρευστού και ο συντελεστής αναλογίας  $h$  ονομάζεται συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή (**Heat transfer coefficient**). Ο συντελεστής συναγωγής εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ροής (ταχύτητα, γεωμετρία) και από τις ιδιότητες του ρευστού (αγωγιμότητα, ειδική θερμοχωρητικότητα, ιξώδες, πυκνότητα) αλλά και από τη θερμοκρασία.

Στο διεθνές σύστημα (SI) οι μονάδες του είναι  $[W/m^2 K]$ . Η εύρεση του συντελεστή γίνεται με την αδιάστατη μορφή του που είναι ο αριθμός Nusselt (Nu) ο οποίος υπολογίζεται συναρτήσει των αριθμών Reynolds (Re) και Prantl (Pr).

**Μεταφορά με ακτινοβολία :** Η θερμότητα μπορεί να διαδοθεί από ένα σώμα σε ένα άλλο ακόμα και όταν δεν υπάρχει ανάμεσά τους ύλη (μπορεί να γίνει μέχρι και στο κενό). Η ακτινοβολία είναι μορφή ενέργειας που μεταφέρεται με **ηλεκτρομαγνητικά κύματα**. Το αίτιο της εκπομπής των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι η θερμοκρασία. Η θέρμανση της ύλης προκαλεί τη διέγερση κάποιων ηλεκτρονίων τα οποία στη συνέχεια εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Θερμική ακτινοβολία εκπέμπεται και απορροφάται από όλα τα στερεά σώματα σε όποια θερμοκρασία κι αν βρίσκονται, αλλά και από τα υγρά και από αρκετά αέρια.



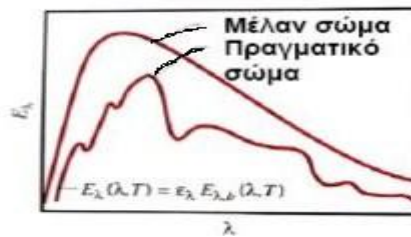
Η ικανότητα εκπομπής και η ικανότητα απορρόφησης ακτινοβολίας ενός σώματος για μια ορισμένη θερμοκρασία είναι η ίδια. Η μέγιστη θερμική ισχύς που είναι δυνατό να ακτινοβολεί ένα σώμα ανά μονάδα επιφάνειας και η ολική θερμική ισχύς που εκπέμπει μια επιφάνεια  $A$  υπολογίζονται από το **νόμο των Stefan-Boltzmann** :

$$\dot{q}_b'' = \sigma T_s^4 \quad \text{και} \quad \dot{q}_b = A\sigma T_s^4 \quad \text{αντίστοιχα, όπου } T_s \text{ είναι η}$$

απόλυτη θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του σώματος και  $\sigma$  η σταθερά των Stefan-Boltzmann η οποία ισούται με  $\sigma = 5.67 * 10^{-8} \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}^4$

Ένα υποθετικό σώμα που εκπέμπει τη μέγιστη δυνατή θερμική ισχύ ( το μεγαλύτερο ποσό ακτινοβολίας από όλα τα σώματα στη φύση) για κάθε θερμοκρασία ονομάζεται **μέλαν σώμα**. Επίσης, το μέλαν σώμα είναι ομοιογενής και ισότροπη πηγή και απορροφά πλήρως όλες τις ακτινοβολίες που δέχεται.

Το μέλαν σώμα εκπέμπει τη μέγιστη δυνατή ακτινοβολία, σε όλα τα μήκη κύματος



Σχήμα 12.5 : Θερμική Ισχύς Ακτινοβολίας μέλανος και πραγματικού σώματος για συγκεκριμένη θερμοκρασία

Η θερμική ισχύς που ακτινοβολεί μια επιφάνεια είναι μικρότερη από αυτή του μέλανος σώματος :

$$\dot{q}'' = \epsilon \sigma T_s^4$$

Όπου  $\epsilon$  είναι η ικανότητα εκπομπής (**emissivity**) για ένα ορισμένο μήκος κύματος  $\lambda$ . Ο συντελεστής εκπομπής μπορεί να παίρνει τιμές από 0 έως 1 και εκφράζει την απόδοση σε θερμική εκπομπή της επιφάνειας σε σχέση με την εκπομπή μέλανος

σώματος στο ίδιο μήκος κύματος της αυτής θερμοκρασίας ( $\epsilon_{(\lambda)} = \dot{q}'' / \dot{q}_b''$ ).

Στις πρακτικές εφαρμογές της μετάδοσης θερμότητας ενδιαφέρει η **θερμοροή** που ανταλλάσσεται μεταξύ δύο ή περισσοτέρων επιφανειών η οποία εξαρτάται από τη σχετική θέση και τη γεωμετρία τους. Για την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ 2 επιφανειών  $A_1$  και  $A_2$  με συντελεστές εκπομπής  $\varepsilon_1$  και  $\varepsilon_2$ , ισχύει η σχέση :

$$\dot{q}_{12} = \varepsilon_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \text{ όπου } \frac{1}{\varepsilon_{12}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)$$

### Ανταλλαγή Θερμότητας :

Στις περισσότερες περιπτώσεις στην πράξη οι τρεις μηχανισμοί συνυπάρχουν αλλά κάποιος από αυτούς, είναι κυρίαρχος ανάλογα με την περίπτωση, και παίζει σπουδαιότερο ρόλο στη μετάδοση της θερμότητας.

Σύνηθες αντικείμενο μελέτης σε συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι η **ανταλλαγή θερμότητας** μεταξύ μιας **επιφάνειας** και του κινούμενου **ρευστού** που την περιβάλλει. Σ' αυτή την περίπτωση, η μεταφορά θερμότητας στο ρευστό πραγματοποιείται με μηχανισμό συναγωγής, με μηχανισμό θερμικής ακτινοβολίας, αλλά και με μηχανισμό αγωγής για τα στρώματα που βρίσκονται στην επιφάνεια και έχουν μικρή ταχύτητα. Γενικά για τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ στερεής επιφάνειας και ρευστού χρησιμοποιείται ο όρος συναγωγή. Για να υπάρχουν όσο το δυνατόν μικρότερες θερμικές απώλειες από το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, μέσα στο οποίο συντελείται η μεταφορά θερμότητας από τη στερεή επιφάνεια ενός υλικού σε κάποιο ρευστό, προς το περιβάλλον, χρησιμοποιούνται υλικά ως μονωτικά τα οποία είναι πορώδη (παγιδεύουν αέρα μέσα στους πόρους τους) όπως ο υαλοβάμβακας, το αφρολέξ, η πολυουρεθάνη.

Σε σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (θερμότητας η οποία προκαλεί αλλαγές φάσης ενός υλικού) το υλικό αυτό, το οποίο μεταφέρει τη θερμότητα που έχει αποθηκεύσει στο ρευστό, είναι κάποιο υλικό αλλαγής φάσης (σε αγγλική συντομογραφία PCM) που αποθήκευσε θερμότητα κατά τη διαδικασία αλλαγής της φάσης του και την επαναπροσδίδει στο σύστημα.

## 1.8 Τρόποι Αποθήκευσης Θερμότητας

Υπάρχουν γενικά 2 τρόποι αποθήκευσης θερμότητας: Αποθήκευση με τη μορφή αισθητής θερμότητας και αποθήκευση με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Κατά τη θερμική αποθήκευση αισθητής θερμότητας η ενέργεια αποθηκεύεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του μέσου αποθήκευσης, για παράδειγμα νερό, ενώ κατά την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας, η ενέργεια αποθηκεύεται μεταβάλλοντας τη φυσική κατάσταση της ύλης του μέσου αποθήκευσης, μεταβολή η οποία μπορεί να είναι στερεά-στερεά, υγρή-αέρια, υγρή-στερεά, στερεά-αέρια. Επιπλέον θερμότητα αποθηκεύεται ή απελευθερώνεται μέσω χημικών αντιδράσεων κατά τη διάσπαση και το σχηματισμό των μοριακών χημικών δεσμών σε μια πλήρως αντιστρεπτή χημική αντίδραση.

### 1.8.1 Αποθήκευση με τη μορφή αισθητής θερμότητας

Η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας (θέρμανσης και ψύξης) με τη μορφή της αισθητής θερμότητας (sensible heat storage-SHS), πραγματοποιείται με την αύξηση ή τη μείωση της θερμοκρασίας ενός υλικού, χωρίς να αλλάζει η φάση στην οποία βρίσκεται. Το σύστημα SHS χρησιμοποιεί τη θερμοχωρητικότητα και την αλλαγή στη θερμοκρασία του υλικού κατά τη διαδικασία φόρτισης και αποφόρτισης. Το ποσό της θερμότητας που αποθηκεύεται εξαρτάται από την ειδική θερμότητα του μέσου, την αλλαγή της θερμοκρασίας και το ποσό του υλικού αποθήκευσης. Για ένα υλικό που μεταβαίνει από μια θερμοκρασία  $T_1$  σε μια θερμοκρασία  $T_2$ , η θερμική ενέργεια που συναλλάσσεται, είτε προσδίδεται είτε αφαιρείται από το υλικό είναι :

$$\Delta Q = m \int_{T_1}^{T_2} C_p dT = m C_p (T_2 - T_1) \quad (1)$$

Όπου  $m$ : η μάζα του υλικού σε kg ή moles

$C_p$ : η ειδική θερμοχωρητικότητα, υπό σταθερή πίεση, του υλικού σε J/Kg °K

$V$ : ο όγκος του υλικού σε  $m^3$

$dT$ : η διαφορά θερμοκρασίας σε βαθμούς °K

Το υλικό αυτό δε θα αλλάζει φάση σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος της διαδικασίας. Η ποσότητα  $\Delta Q$  αποτελεί, τελικά, την ποσότητα ενέργειας που αποθηκεύεται στο σύστημα. Η αύξηση θερμοκρασίας μπορεί να ανιχνευθεί από αισθητήρα.

Το νερό φαίνεται να είναι το καλύτερο διαθέσιμο υγρό μέσο αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, επειδή είναι φθινό και έχει υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα. Ωστόσο, πάνω από τους  $100^{\circ}\text{C}$  χρησιμοποιούνται έλαια, ανόργανα άλατα υγρής ή στερεής φάσης (πέτρες, βότσαλα, πυρίμαχα) υγρά μέταλλα και τήγματα. Για εφαρμογές θέρμανσης αέρα χρησιμοποιούνται υλικά τύπου rock bed .

Ένας ακόμη βασικός παράγοντας που χαρακτηρίζει αυτά τα υλικά αποθήκευσης είναι ο ρυθμός με τον οποίο μπορούν να αποθηκεύσουν ή να εκλύσουν θερμότητα.

Η πυκνότητα ενός υλικού,  $\rho$ , είναι το μέγεθος που μας δείχνει πόση μάζα καταλαμβάνει το υλικό ανά μονάδα όγκου ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) και η ειδική θερμοχωρητικότητα αυτού,  $C_p$  ( $\text{J}/\text{Kg K}$ ), είναι το μέγεθος που μας δείχνει πόση ενέργεια απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία ενός  $\text{kg}$  του υλικού κατά έναν βαθμό Kelvin, υπό σταθερή πίεση. Η ικανότητα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας κάποιων υλικών παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα :

**Πίνακας 13.3 : Ιδιότητες Υλικών αποθήκευσης αισθητής θερμότητας**

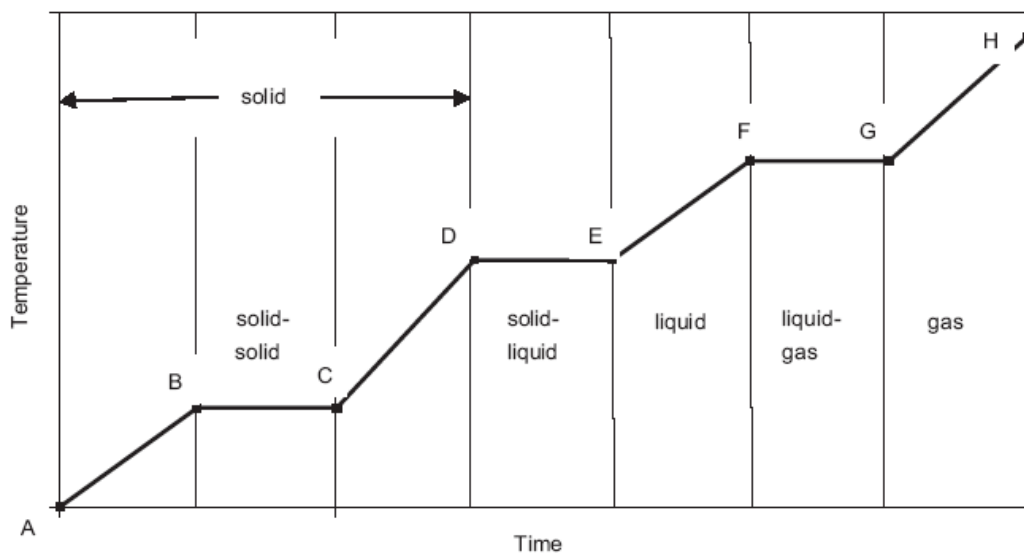
A list of selected solid-liquid materials for sensible heat storage

Medium	Fluid type	Temperature range ( $^{\circ}\text{C}$ )	Density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Specific heat ( $\text{J}/\text{kg K}$ )
Rock		20	2560	879
Brick		20	1600	840
Concrete		20	1900-2300	880
Water		0-100	1000	4190
Caloria HT43	Oil	12-260	867	2200
Engine oil	Oil	Up to 160	888	1880
Ethanol	Organic liquid	Up to 78	790	2400
Proponal	Organic liquid	Up to 97	800	2500
Butanol	Organic liquid	Up to 118	809	2400
Isotunaol	Organic liquid	Up to 100	808	3000
Isopentanol	Organic liquid	Up to 148	831	2200
Octane	Organic liquid	Up to 126	704	2400

### 1.8.2 Αποθήκευση με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας

Γενικά, όταν σε μια ουσία προστίθεται ενέργεια υπό μορφή θερμότητας, προκύπτει αύξηση της εσωτερικής ενέργειας όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα. Η προσθήκη αυτή της θερμότητας συνεπάγεται αύξηση στη θερμοκρασία (αισθητή θέρμανση) ή αλλαγή της φάσης σε σταθερή θερμοκρασία (λανθάνουσα θέρμανση).

Η αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας (latent heat storage) στηρίζεται στην απορρόφηση ή την απελευθέρωση θερμότητας ενός υλικού αποθήκευσης που υποβάλλεται σε αλλαγή φάσης (Phase Change Material, PCM). Η αλλαγή φάσης του υλικού μπορεί να έχει μία από τις παρακάτω μορφές (σχήμα) :



Σχήμα 14.6 : Διάγραμμα χρόνου - θερμοκρασίας για τη θέρμανση μιας ουσίας

Η εκκίνηση γίνεται με μια αρχικά στερεά κατάσταση στο σημείο A, στην οποία προσθήκη θερμότητας στην ουσία, πρώτα προκαλεί αισθητή θέρμανση του στερεού (περιοχή A-B) ακολουθούμενη από μια αλλαγή φάσης από στερεό σε στερεό με μεταβολή στην κρυσταλλική δομή (περιοχή B-C). Στη συνέχεια, παρατηρείται πάλι αισθητή θέρμανση του στερεού (περιοχή C-D), αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό (περιοχή D-E), αισθητή θέρμανση του υγρού (περιοχή E-F), αλλαγή φάσης από υγρό σε αέριο (περιοχή F-G) και αισθητή θέρμανση του αερίου (περιοχή G-H).

Οι μετασχηματισμοί από στερεά-αέρια και από υγρά-αέρια συνήθως δεν χρησιμοποιούνται για αποθήκευση της θερμικής ενέργειας παρά τις υψηλότερες λανθάνουσες θερμότητες, αφού τα αέρια καταλαμβάνουν μεγάλους όγκους.

Στις μεταβάσεις από στερεό-στερεό, η θερμότητα αποθηκεύεται καθώς το υλικό μετατρέπεται από μια κρυσταλλική μορφή σε μια άλλη. Αυτές οι μεταβάσεις έχουν γενικά μικρές λανθάνουσες θερμότητες καθιστώντας τέτοια υλικά λιγότερο επιθυμητά. Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας κατά τη **μετάβαση από τη στερεά στην υγρή φάση** είναι η βασικότερη επειδή παρέχει υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας και έχει την ικανότητα να αποθηκεύει ενέργεια ως λανθάνουσα θερμότητα τήξης σε μια σταθερή θερμοκρασία που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία μετάβασης φάσης. Αυτό σημαίνει ότι πολύ μικρότερο βάρος και όγκος υλικού απαιτείται για να αποθηκεύσει μια ορισμένη ποσότητα ενέργειας. Το ποσό της θερμότητας που αποθηκεύεται εξαρτάται από τη μάζα  $m$  και από τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης  $L$  του υλικού. Άρα, στην περίπτωση που η διαδικασία αποθήκευσης πραγματοποιείται ισοθερμοκρασιακά (ισόθερμα) στο σημείο τήξης του υλικού ισχύει:

$$\Delta Q = mL \quad (2)$$

Στην περίπτωση που η διαδικασία αποθήκευσης γίνεται σε ένα φάσμα θερμοκρασιών  $T_1$  και  $T_2$ , μέσα στο οποίο περιλαμβάνεται το σημείο τήξης τότε λαμβάνεται υπόψη και η αισθητή θερμότητα αποθήκευσης. Η ικανότητα αποθήκευσης με ένα υλικό αλλαγής φάσης (PCM) δίνεται από τον τύπο :

$$\Delta Q = m \left( \int_{T_1}^{T^*} C_{p,solid} dT + L + \int_{T^*}^{T_2} C_{p,liquid} dT \right) = m \left[ (T^* - T_1) C_{p,solid} + L + (T_2 - T^*) C_{p,liquid} \right] \quad (3)$$

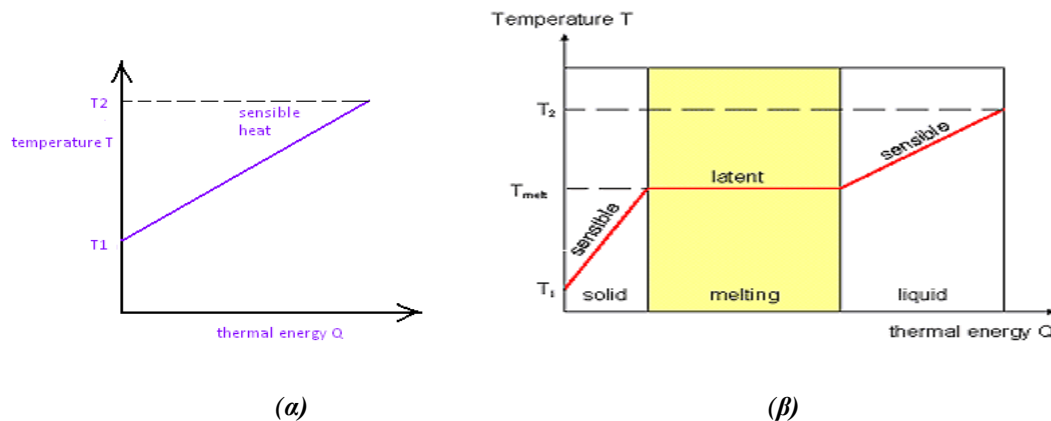
Με βάση τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι, η ικανότητα αποθήκευσης του υλικού εξαρτάται εκτός από την ειδική θερμότητα και από την τιμή της λανθάνουσας θερμότητας. Ως εκ τούτου, είναι επιθυμητό για το μέσο αποθήκευσης να έχει υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα και λανθάνουσα θερμότητα (References<sup>1</sup>).

<sup>1</sup> Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009), p. 318–345  
A. Felix Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review, Renewable & Sustainable Energy Reviews 2008, Vol 12, 2438-2458  
Ibrahim Dincer, Marc Rosen, "Thermal Energy storage, systems and Applications", John Wiley and sons, West Sussex, 2002

R. Velraj, R.V. Seeniraj, B. Hafner, C. Faber, K. Schwarzer, Heat Transfer Enhancement in a latent heat storage system, Solar Energy 1999, Vol. 65, No 3, p.171-180

### 1.8.3 Σύγκριση των τεχνικών αποθήκευσης θερμότητας

Συγκρίνοντας τα συστήματα και τις τεχνικές αποθήκευσης φαίνεται ότι υπάρχουν αρκετά μειονεκτήματα των συστημάτων αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας είναι πιο απλά στη σχεδίαση από τα λανθάνοντα και από τα θερμοχημικά, είναι όμως πολύ μεγάλα σε μέγεθος. Ένα δεύτερο μειονέκτημα είναι η δυσκολία να αξιολογηθεί η σωστή θερμική μάζα που απαιτείται οπότε η ενέργεια δε μπορεί να αποθηκευτεί ή να απελευθερωθεί σε σταθερή θερμοκρασία αλλά μεταβάλλεται σύμφωνα με το σχήμα 1.3.α:



Σχήμα 15.7: Διάγραμμα Θερμικής αποθήκευσης ενέργειας α) Αισθητής θερμότητας  
β) Λανθάνουσας θερμότητας με αλλαγή φάσης

Η μέθοδος αποθήκευσης με τη μορφή αισθητής θερμότητας θεωρείται αναποτελεσματική και για το λόγο ότι παίρνει λιγότερη ενέργεια για την αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού από αυτή που απαιτείται για να αλλάξει μια στερεά κρυσταλλική δομή σε υγρή.

Για την αποθήκευση της ίδιας ποσότητας ενέργειας είναι αναγκαίες σημαντικά μεγαλύτερες ποσότητες του μέσου αποθήκευσης σε σύγκριση με τη μέθοδο αποθήκευσης με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας.

Με την αποθήκευση υπό τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας μπορούν να αποθηκευτούν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας ανά μονάδα όγκου καθώς επίσης η θερμότητα αποθηκεύεται υπό ισοθερμικές συνθήκες το οποίο σημαίνει ότι μπορεί να αποδεσμεύεται ή να αποθηκεύεται ενέργεια σε σταθερή θερμοκρασία.

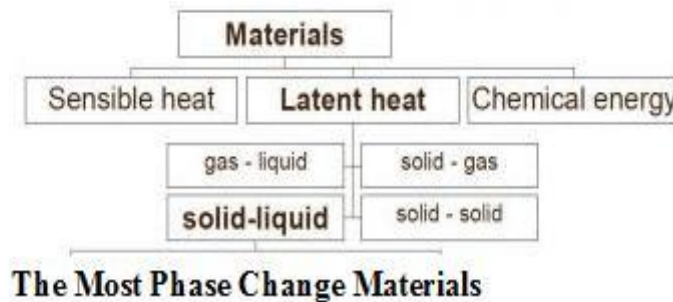
Η χρήση αποθήκευσης με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την αποθήκευση ηλιακής ενέργειας όπου μπορεί να οδηγήσει σε υψηλής ηλιακής συλλογής απόδοση γεγονός που θα μπορούσε να μειώσει την επιφάνεια ενός ηλιακού συλλέκτη κατά 30 %.

Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας αποτελεί μια πολύ ελκυστική τεχνική , εφόσον παρέχει υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας και έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύει θερμότητα σε σταθερή θερμοκρασία αντίστοιχη της αλλαγής φάσης του υλικού (PCM) που χρησιμοποιείται. Επίσης, δεν υπάρχει βαθμιαία μείωση στην θερμοκρασία καθώς το υλικό αποφορτίζεται.

#### 1.8.4 Υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας

Τα υλικά αλλαγής φάσης είναι υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Τα PCMs διατίθενται σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και θερμοτήτων αλλαγής φάσης. Αρχικά λειτουργούν όπως τα συμβατικά υλικά αποθήκευσης και όσο απορροφούν θερμότητα αυξάνει η θερμοκρασία τους. Στη συνέχεια όμως όταν φτάσουν στο θερμοκρασιακό επίπεδο αλλαγής φάσης τότε τα PCMs απορροφούν μεγάλα ποσά θερμότητας σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία.

Σε πραγματικά συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας η αλλαγή της φάσης του υλικού δε γίνεται σε απόλυτα σταθερή θερμοκρασία αλλά σε ένα πολύ μικρό εύρος θερμοκρασιών (3-6 °C) αφού τα συστήματα αυτά δε βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία. Η μεταβολή αυτή της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα εκτός από τη λανθάνουσα θερμότητα να αποθηκεύεται στο υλικό ακόμη ένα ποσό ενέργειας με τη μορφή της αισθητής θερμότητας. Τα PCMs αποθηκεύουν πολύ περισσότερη θερμότητα από ότι τα υλικά που αποθηκεύουν αισθητή θερμότητα.



Σχήμα 16.8 : Υλικά για χρήση σε εφαρμογές αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας



Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται συνήθως υλικά που αλλάζουν φάση **μεταξύ στερεής και υγρής κατάστασης** (Τήξη) όπως φαίνεται κι από το σχήμα 1.8, ενώ έχουν μελετηθεί σε ερευνητικό επίπεδο και υλικά που μεταβαίνουν από τη μία φάση στην άλλη με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. Τα υλικά που μεταπίπτουν σε αέρια κατάσταση κατά την αλλαγή φάσης δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, λόγω των πρακτικών δυσκολιών που εμφανίζει η μεγάλη αλλαγή της πυκνότητας και του όγκου αλλά και η ίδια η χασομική συμπεριφορά της φύσης των αερίων.

### **1.8.5 Προαπαιτήσεις συστημάτων λανθάνουσας θερμότητας**

Ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας απαιτείται να έχει τρεις τουλάχιστον ιδιότητες :

- Ένα κατάλληλο PCM του οποίου η θερμοκρασία τήξης να εμπεριέχεται στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας.
- Σωστά σχεδιασμένη επιφάνεια εναλλάκτη θερμότητας ώστε να αντέχει στη θερμική διάχυση των PCM.
- Ένα κατάλληλο container συμβατό με το PCM.

Επιπλέον, για να χρησιμοποιηθεί ένα υλικό PCM ως αποθήκη θερμικής ενέργειας σε ένα σύστημα λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας, θα πρέπει, **σε μια πρώτη βασική προσέγγιση**, να ικανοποιεί και αυτό και ο χώρος στον οποίο θα γίνει η αποθήκευση, τα παρακάτω κριτήρια:

1. υψηλή ενθαλπία μετάβασης ανά μονάδα μάζας
2. ικανότητα για πλήρη αντιστροφή της διαδικασίας
3. ικανή θερμοκρασία μετάβασης από τη μια φάση στην άλλη
4. χημική ισορροπία και σταθερότητα με τον αποθηκευτικό χώρο
5. ελάχιστη αλλαγή όγκου με την αλλαγή φάσης
6. μη τοξικότητα
7. χαμηλό κόστος

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

## ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM)

### 2.1 Καταστάσεις της Ύλης

---

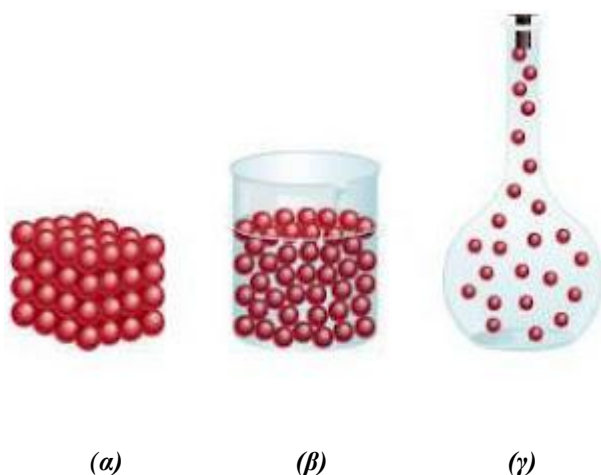
Η κατάσταση της ύλης ενός σώματος περιγράφει το πόσο εύκολα μεταβάλλεται το σχήμα, το μέγεθός του και οι ιδιότητές του. Η ύλη βρίσκεται σε 4 βασικές καταστάσεις : στερεά, υγρή, αέρια και υπάρχει και μία τέταρτη, το πλάσμα. Η κατάσταση στην οποία θα βρεθεί ένα σώμα εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την πίεση του περιβάλλοντός του. Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, η κινητικότητα των μορίων της ύλης σε όλες τις καταστάσεις εντείνεται.

Η σύγχρονη περιγραφή της κατάστασης της ύλης γίνεται με σύγκριση της κατάστασης των εσωτερικών μορίων. Στερεά θεωρούνται τα υλικά στα οποία τα μόρια κρατούνται σε σταθερές θέσεις μεταξύ τους στο χώρο. Υγρά θεωρούνται τα υλικά στα οποία τα μόρια είναι κοντά μεταξύ τους αλλά όχι σε σταθερές θέσεις. Αέρια είναι τα υλικά στα οποία τα μόρια βρίσκονται σε σχετικά μεγάλη απόσταση μεταξύ τους και η θέση τους δεν επηρεάζεται από τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης των μορίων. Η τέταρτη κατάσταση της ύλης, το πλάσμα, είναι ένα ιδιαίτερα ιονισμένο αέριο σε υψηλή θερμοκρασία. Η ιονισμένη κατάσταση δημιουργεί ελκτικές και απωθητικές δυνάμεις δίνοντας ιδιαίτερες ιδιότητες στο πλάσμα, οι οποίες το ξεχωρίζουν από τα αέρια.

Η ύλη σε μικροσκοπικό μοριακό επίπεδο απαρτίζεται από άτομα, μόρια και ιόντα, αυτά είναι τα δομικά συστατικά της. Οι διαμοριακές δυνάμεις, ελκτικές και απωστικές που αναπτύσσονται μεταξύ τους, ώστε να σχηματιστούν διακριτά σώματα, καθορίζουν εκτός των άλλων, το σχήμα, το μέγεθός τους, όπως επίσης και την ευκολία και τον τρόπο με τον οποίο αυτά μεταβάλλονται. Δηλαδή πρόκειται για ελκτικές δυνάμεις ηλεκτροστατικής φύσεως μεταξύ των μορίων, οι οποίες ευθύνονται για τη φυσική κατάσταση ενός σώματος για ορισμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης.

Πιο αναλυτικά :

- Στα στερεά οι διαμοριακές δυνάμεις είναι ισχυρές. Οι δομικοί λίθοι ταλαντώνονται γύρω από τη θέση ισορροπίας και βρίσκονται σε συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ τους, χωρίς να μπορούν να αλλάξουν θέση αφού ασκούν ισχυρές ελκτικές δυνάμεις το ένα στο άλλο. Έτσι, τα στερεά έχουν συγκεκριμένο σχήμα και όγκο που δύσκολα μεταβάλλονται για ορισμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας.
- Στα υγρά οι διαμοριακές δυνάμεις είναι σημαντικές. Τα δομικά συστατικά μπορούν να αλλάξουν θέση αλλά δε μπορούν να αλλάξουν τη μεταξύ τους απόσταση. Συνεπώς, παρουσιάζουν μεγαλύτερη κινητικότητα συγκριτικά με τα στερεά, οι δυνάμεις συνοχής είναι μέτριες και οι μεταξύ τους αποστάσεις λίγο μεγαλύτερες συγκριτικά με τα στερεά σώματα. Έτσι, τα υγρά δεν έχουν σχήμα, παίρνουν κάθε φορά το σχήμα του δοχείου τους, αλλά έχουν καθορισμένο όγκο.
- Στα αέρια οι διαμοριακές δυνάμεις είναι αμελητέες. Τα δομικά σωματίδια είναι ελεύθερα, κινούνται άτακτα προς όλες τις κατευθύνσεις καταλαμβάνοντας όλο το διαθέσιμο χώρο, οπότε βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις. Τα αέρια δεν έχουν καθορισμένο σχήμα και όγκο αλλά έχουν τον όγκο και το σχήμα του δοχείου στο οποίο περιέχονται.



Εικόνα 2.1: Οι 3 βασικές καταστάσεις της Ύλης

### 2.1.1 Ιδιότητες της Ύλης

Υπάρχει ένα σύνολο από ιδιότητες που σχετίζονται με τον όγκο και το σχήμα της ύλης, άρα και με την κατάστασή της. Μερικές από αυτές είναι η συμπιεστότητα, η ρευστότητα, το ιξώδες, η σταθερότητα, η τάση ατμών. Παρακάτω δίνονται οι ορισμοί:

- **Συμπιεστότητα (ή διασταλτικότητα):** Είναι η ιδιότητα της ύλης να μειώνεται εύκολα ο όγκος της. Τα στερεά και τα υγρά είναι ασυμπίεστα, ενώ τα αέρια συμπιεστά. Η συμπιεστότητα των αερίων εξαρτάται σύμφωνα με την εξίσωση των ιδανικών αερίων, από την ευκολία μεταβολής της θερμοκρασίας και της πίεσης.
- **Ρευστότητα:** Είναι η ιδιότητα της ύλης να ρέει, δηλαδή να μπορεί να μεταφέρεται αλλάζοντας σχήμα. Τα σώματα που έχουν αυτήν την ιδιότητα ονομάζονται ρευστά. Τα υγρά και τα αέρια, καθώς και τα κολλοειδή είναι ρευστά. Τα στερεά γενικά δεν είναι ρευστά. Ωστόσο, στην επιστήμη της γεωλογίας έχει διατυπωθεί η θεωρία ότι τα στερεά είναι και αυτά ρευστά.
- **Ιξώδες:** Είναι η ιδιότητα των ρευστών να αντιστέκονται στη ροή τους. Για παράδειγμα το μέλι έχει πολύ μεγαλύτερο ιξώδες από ότι το νερό. Όταν το ιξώδες γίνεται υπερβολικά μεγάλο, ή τείνει στο άπειρο, τότε το ρευστό τείνει να μη ρέει, άρα να μην αλλάζει σχήμα, δηλαδή τείνει να είναι στερεό.
- **Σταθερότητα:** Όσον αφορά τις καταστάσεις της ύλης μερικές καταστάσεις προκύπτουν όχι μόνο από τις συνθήκες που τελικά επικρατούν στο περιβάλλον, αλλά και από τον τρόπο με τον οποίο αυτές διαμορφώθηκαν. Τότε μπορούν να προκύψουν ορισμένες καταστάσεις της ύλης, οι οποίες είναι εξαιρετικά ασταθείς και οι οποίες πολύ εύκολα υποκύπτουν σε άλλες σταθερές καταστάσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το υπέρκορο υγρό διάλυμα, το οποίο με μία απλή κρούση στο δοχείο μετατρέπεται σε ετερογενές μίγμα. Ίσως μια τέτοια κατάσταση είναι και το υπερκρίσιμο ρευστό.
- **Τάση ατμών:** Είναι η ιδιότητα που φανερώνει για ορισμένη θερμοκρασία, την ευκολία ή τη δυσκολία με την οποία εξατμίζεται ένα υγρό ή εξαχνώνεται ένα στερεό.

## 2.2 Αλλαγή Φάσης

Στη Θερμοδυναμική η αλλαγή φάσης είναι η διαδικασία μετάβασης ενός θερμοδυναμικού συστήματος από τη μία φάση σε μία άλλη. Το ξεχωριστό χαρακτηριστικό του φαινομένου αυτού είναι η παρατήρηση μιας αλλαγής σε μία ή περισσότερες φυσικές ιδιότητες του συστήματος και κυρίως η ραγδαία αύξηση στη θερμοχωρητικότητά του με ταυτόχρονη μικρή μεταβολή στη θερμοκρασία του, κατά τη διάρκεια της μετάβασης αυτής. Συνήθως ο όρος αλλαγή φάσης αναφέρεται σε μεταβάσεις μεταξύ των τριών βασικών καταστάσεων (στερεής, υγρής και αέριας) εξαιρώντας συνήθως την κατάσταση του πλάσματος.

Αν ένα σώμα βρίσκεται σε διαφορετική κατάσταση από αυτήν που αντιστοιχεί στις συνθήκες του περιβάλλοντος, τότε τη μεταβάλλει για να βρεθεί στην κατάλληλη. Ακόμα κι αν φαίνεται ότι είναι στην κατάλληλη κατάσταση, ένα μέρος του μετατρέπεται σε άλλη κατάσταση λόγω διαφοράς στη τάση ατμών.

Οι αλλαγές φάσης περιλαμβάνουν:

- Τις μεταβάσεις μεταξύ της στερεής, υγρής και αέριας φάσης μιας ουσίας, λόγω αλλαγών στις συνθήκες θερμοκρασίας και/ή πίεσης οι οποίες είναι αλλαγές φάσης μεταξύ: **στερεού - υγρού → τήξη**

**στερεού - αερίου → εξάχνωση**

**υγρού - στερεού → στερεοποίηση (πήξη)**

**υγρού - αερίου → βρασμός/ατμοποίηση(εξάτμιση), εξαέρωση**

**αερίου - στερεού → απόθεση**

**αερίου - υγρού → συμπύκνωση, υγροποίηση**

**αερίου - πλάσματος → ιονισμός**

- Τη μετάβαση μεταξύ διαφορετικών μοριακών δομών, ιδίως για στερεά, όπως για παράδειγμα τη μετάβαση από μία άμορφη δομή σε μία κρυσταλλική ή τη μετάβαση μεταξύ δύο διαφορετικών κρυσταλλικών δομών (**στερεού – στερεού**).

Στη **μετατροπή υγρού σε αέριο** διακρίνουμε δύο διαδικασίες: Το βρασμό και την εξάτμιση. Ο βρασμός οφείλεται στην ασυμφωνία τρέχουσας και κατάλληλης κατάστασης, ενώ η εξάτμιση γίνεται λόγω της μερικής πίεσης στην επιφάνεια (τάσης ατμών). Για αυτό ο βρασμός εμφανίζεται μόνο σε συγκεκριμένες συνθήκες και συμβαίνει σε όλη την έκταση του υγρού, ενώ η εξάτμιση μπορεί να γίνει σε οποιοσδήποτε συνθήκες και συμβαίνει μόνο στην επιφάνεια του υγρού.

Γενικά, οι αλλαγές φάσεις (που δεν οφείλονται στις μερικές πιέσεις) γίνονται σε συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης για την κάθε καθαρή ουσία. Για αυτό αυτές αποτελούν χαρακτηριστικές ιδιότητες του κάθε υλικού και μάλιστα αποτελούν τις συνθήκες ισορροπίας δύο διαφορετικών καταστάσεών του. Αντίθετα, στα μίγματα οι συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, που απαιτούνται για τις αλλαγές φάσεων, εξαρτώνται από τις αναλογίες των συστατικών τους, άρα μεταβάλλονται. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται ορισμένα παραδείγματα φαινομένων αλλαγής φάσης.



(α) Τήξη Πάγου



(β) Εξάχνωση Πάγου



(γ)



(δ)

*Εικόνα 2.2 : (γ) Το στερεό ιώδιο μετατρέπεται απευθείας σε αέριο χωρίς να περάσει από την υγρή κατάσταση (δ) Η λάβα ενός ηφαιστείου που φθάνει στη θάλασσα είναι παράδειγμα με συμπύκνωση ατμού*

Σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να εμφανιστεί αλλαγή κατάστασης μη αδιαβατικά με τέτοιο τρόπο ώστε το θερμοδυναμικό σύστημα να διέλθει τα όρια της αλλαγής φάσης, χωρίς να παρατηρείται η αλλαγή αυτή καθ' αυτή, όπως παρατηρείται στα φαινόμενα της υπέρψυξης και της υπερθέρμανσης. Η προκύπτουσα κατάσταση δεν είναι ενεργειακά σταθερή και χαρακτηρίζεται ως ενεργειακά ημισταθερή.

### 2.2.1 Θερμική & Εσωτερική Ενέργεια στις αλλαγές φάσης

Σημαντικό ρόλο στις αλλαγές φάσεις παίζει η θερμική ενέργεια. Συνήθως οι αλλαγές φάσης γίνονται σε κανονική πίεση (1 atm ή 760 mm Hg), οπότε οι μετατροπές οφείλονται στην αλλαγή της θερμοκρασίας, άρα υπάρχει δυνατότητα πρόσληψης ή αποβολής θερμικής ενέργειας. Γενικά ένα σώμα είναι στερεό σε χαμηλές θερμοκρασίες, και καθώς αυτές αυξάνονται το σώμα μετατρέπεται διαδοχικά σε υγρό και έπειτα σε αέριο. Σε αυτήν την περίπτωση η θερμική ενέργεια του σώματος αυξάνεται. Η θερμική ενέργεια χαρακτηρίζει το σύνολο της κινητικής ενέργειας των δομικών σωματιδίων που συγκροτούν τα υλικά σώματα, καθώς αυτά κινούνται στο εσωτερικό τους με συνέπεια να αναπτύσσουν θερμοκρασία.

Κατά την πρόσληψη ή αποβολή θερμικής ενέργειας το σώμα μεταβάλλει τη θερμοκρασία του, εκτός κι αν αλλάζει κατάσταση. Όταν ένα σώμα αλλάζει κατάσταση, τότε η θερμοκρασία του διατηρείται σταθερή, παρόλο που στο σώμα μεταφέρεται θερμότητα ενώ, η ανταλλασσόμενη θερμική ενέργεια αξιοποιείται στη διάλυση ή τη δημιουργία των διαμοριακών δυνάμεων. Αυτό το φαινόμενο σχετίζεται άμεσα με τη δομή του σώματος σε μικροσκοπικό, μοριακό επίπεδο. Επίσης, αυτή η δομή εξηγεί την ύπαρξη και συμπεριφορά των τριών καταστάσεων της ύλης.

Η θερμική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί, αν αξιοποιηθεί σε ένα υλικό η αλλαγή στην εσωτερική του ενέργεια. Κατά τη διάρκεια των αλλαγών κατάστασης η κινητική ενέργεια των δομικών λίθων του σώματος διατηρείται σταθερή. Αλλάζει όμως η δυναμική τους ενέργεια. Στις αλλαγές φάσης, επομένως, η εσωτερική ενέργεια του σώματος μεταβάλλεται επειδή μεταβάλλεται η συνολική δυναμική ενέργεια των δομικών συστατικών. Το νερό θερμοκρασίας 0 °C έχει μεγαλύτερη εσωτερική ενέργεια από ίση ποσότητα πάγου ίδιας θερμοκρασίας. Η διαφορά στην εσωτερική τους ενέργεια ισούται με τη **λανθάνουσα θερμότητα** τήξης.

Οι αλλαγές φάσης περιλαμβάνουν λανθάνουσα θερμότητα. Κατά τη διάρκεια μιας τέτοιας αλλαγής το σύστημα είτε απορροφά είτε ελευθερώνει μία σταθερή και συνήθως αξιόλογη ποσότητα ενέργειας.

Επειδή η ενέργεια αυτή δεν μπορεί να μεταφερθεί στιγμιαία μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντος, αυτές οι μεταβάσεις, βρίσκονται υπό καθεστώς μικτής φάσης, όπου τμήμα του θερμοδυναμικού συστήματος έχει ολοκληρώσει την μετάβαση και το υπόλοιπο όχι.

### 2.2.2 Λανθάνουσα Θερμότητα

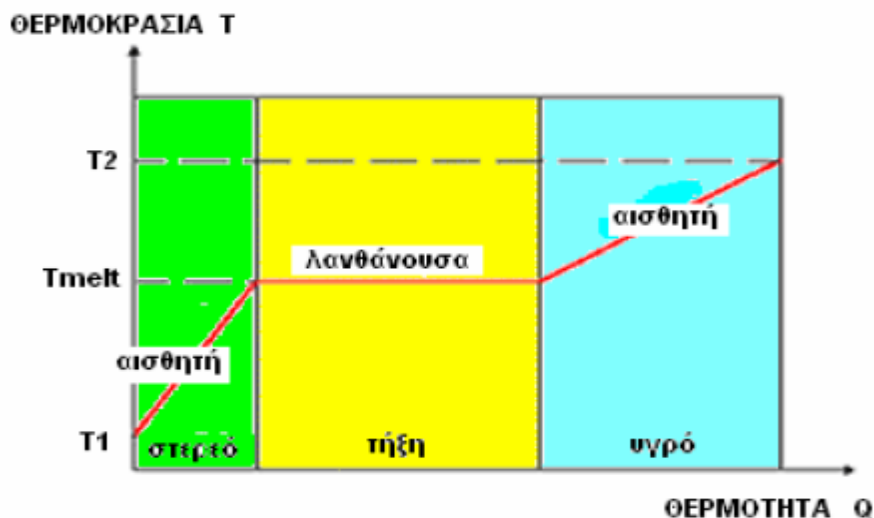
Ο όρος λανθάνουσα θερμότητα εμφανίστηκε για πρώτη φορά από τον Joseph Black γύρω στα 1750. Είναι το ποσό θερμότητας που απελευθερώνεται ή απορροφάται από μία χημική ουσία κατά την αλλαγή φάσης της χωρίς μεταβολή της θερμοκρασίας. Φέρεται με την ονομασία αυτή επειδή λανθάνει τρόπο τινά της προσοχής, μη γενόμενη αντιληπτή σε προσαρμοσμένο θερμόμετρο που συνεχίζει να παρουσιάζει σταθερή θερμοκρασία.

Δύο από τις κύριες μορφές λανθάνουσας θερμότητας είναι η λανθάνουσα θερμότητα τήξης (**latent heat of fusion**) και η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (latent heat of vaporization). Η εξάτμιση παρουσιάζει μεγάλα ποσά λανθάνουσας θερμότητας όμως ο σχηματισμός αερίου σημαίνει μεγάλες μεταβολές όγκου οπότε κάνει το σύστημα αποθήκευσης μη πρακτικό. Οι μετατροπές στερεού-στερεού εμφανίζουν μικρές τιμές λανθάνουσας θερμότητας και δεν πολυεφαρμόζονται. Η πιο συνηθισμένη διεργασία που χρησιμοποιείται είναι η αλλαγή φάσης στερεού-υγρού-στερεού (τήξη - πήξη).

Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης είναι το ποσό θερμότητας που πρέπει να απορροφηθεί ή να εκλυθεί, ώστε 1 gr ουσίας να αλλάξει φάση από στερεά σε υγρή ή/και αντίστροφα. Ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης και η θερμοκρασία στην οποία αυτή εμφανίζεται, ονομάζεται σημείο τήξης. Κατά τη διαδικασία της τήξης η θερμότητα μεταφέρεται στο υλικό αποθήκευσης. Όταν αφαιρείται θερμική ενέργεια από ένα υλικό, η θερμοκρασία του πέφτει. Αντίστοιχα, όταν προσφέρεται θερμότητα σε ένα υλικό, η θερμοκρασία του αυξάνει.

Στο σημείο μετάβασης **μεταξύ στερεής και υγρής φάσης**, απαιτείται περισσότερη θερμότητα. Για να υπάρξει μετάβαση από υγρό σε στερεό, τα μόρια της ουσίας πρέπει να τοποθετηθούν αυστηρώς διατεταγμένα, και για να γίνει αυτό, θα πρέπει να αφαιρεθεί θερμότητα, ώστε να μεταπέσει το σύστημα σε μία χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη. Αντιθέτως, για να έχουμε την αντίστροφη διαδικασία και τη μετάβαση από την στερεή κρυσταλλική μορφή στην υγρή, χρειάζεται απορρόφηση θερμότητας για τη λύση των διαμοριακών δεσμών. Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης παρατηρείται με τη μέτρηση της θερμοκρασίας κατά τη στερεοποίηση ενός υγρού. Τα παραπάνω παρατηρούνται και στο ακόλουθο διάγραμμα :



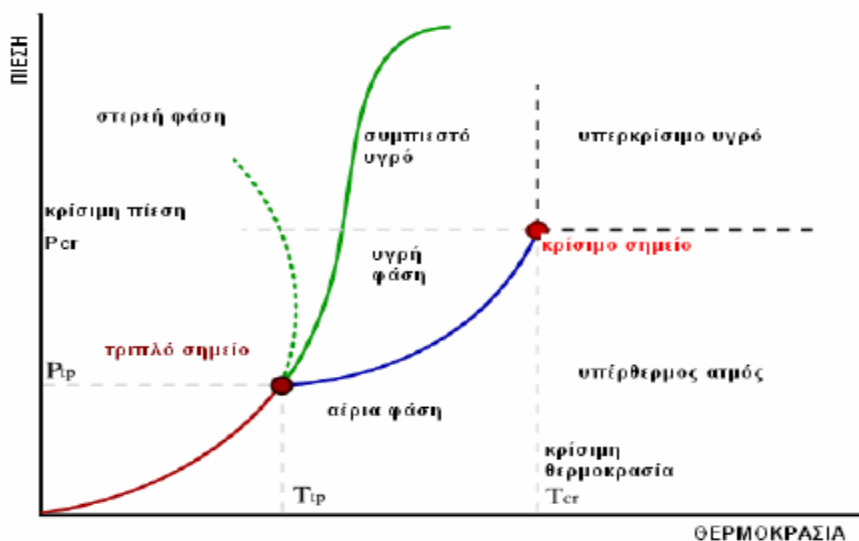


Σχήμα 2.1 : Διάγραμμα αλλαγής φάσης

### 2.2.3 Χαρακτηριστικά Σημεία

Εκτός από τη θερμότητα, σημαντικό ρόλο παίζει και η πίεση, όταν αυτή μεταβάλλεται. Τότε η μελέτη των αλλαγών φάσεων γίνεται με διαγράμματα φάσεων.

Σε συστήματα που περιέχουν υγρή και αέρια φάση υπάρχει ένας συνδυασμός ορισμένης πίεσης και θερμοκρασίας που ονομάζεται κρίσιμο σημείο. Στο σημείο αυτό το υγρό είναι τόσο θερμό και υπό κατάλληλη πίεση, ώστε η διάκριση μεταξύ υγρής και αέριας φάσης είναι σχεδόν αδύνατη. Εκτός από αυτό το σημείο, υπάρχει και ένα άλλο χαρακτηριστικό σημείο στο οποίο οι τρεις φάσεις της συγκεκριμένης ουσίας συνυπάρχουν σε ισορροπία. Το σημείο αυτό ονομάζεται τριπλό σημείο. Τα δύο σημεία φαίνονται στο ακόλουθο διάγραμμα φάσεων :



Σχήμα 2.2 : Ποιοτικό διάγραμμα P-T μιας καθαρής ουσίας

## 2.3 Υλικά Αλλαγής Φάσης (PCMs)

Ως υλικά αλλαγής φάσης (Phase Change Materials – PCM ) ορίζονται τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ενέργειας σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Τα υλικά αυτά αλλάζουν φάση σε ένα τμήμα του εύρους θερμοκρασιών της εφαρμογής τους γι αυτό και αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία με τη συντομογραφία PCMs , ενώ στο υπόλοιπο τμήμα συναλλάσσουν θερμική ενέργεια με τη μορφή αισθητής θερμότητας.

PCMs θεωρούνται συνήθως τα υλικά που αλλάζουν φάσεις μεταξύ στερεάς και υγρής. Το πλέον γνωστό PCM είναι το νερό, η χρήση του οποίου όμως είναι περιορισμένη παρά την ικανότητά του να αποθηκεύει μεγάλα ποσά θερμότητας λόγω κυρίως της χαμηλής θερμοκρασίας τήξης του (0°C). Η μεταφορά της θερμικής ενέργειας εμφανίζεται κατά τη διάρκεια που το υλικό αλλάζει από στερεό σε υγρό, ή από υγρό σε στερεό.

Αρχικά τα PCMs που μεταπίπτουν από τη στερεά στην υγρή φάση συμπεριφέρονται όπως τα συμβατικά υλικά αποθήκευσης, η θερμοκρασία τους δηλαδή αυξάνεται καθώς απορροφούν θερμότητα. Αντίθετα όμως από τα συμβατικά (που απορροφούν αισθητή θερμότητα) υλικά αποθήκευσης, στη συνέχεια, όταν το PCM φτάσει στο θερμοκρασιακό επίπεδο αλλαγής φάσης (σημείο τήξης) ,απορροφά και απελευθερώνει θερμότητα σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία. Τα PCMs αποθηκεύουν 5-14 φορές περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα όγκου από ότι υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, όπως το νερό σε υγρή μορφή, το σκυρόδεμα, οι πέτρες κ.ά.

Στα συμβατικά υλικά αποθήκευσης χαρακτηριστικό μέγεθος για τη θερμική συμπεριφορά αποτελεί η θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ή όγκο, ενώ **στα PCMs** , εκτός από την **θερμοχωρητικότητα** της υγρής και της στερεάς φάσης, σπουδαίο ρόλο παίζει η **λανθάνουσα θερμότητα** που απαιτείται για τη μετάβαση από τη μία φάση στην άλλη.

Είναι φανερό ότι τα PCMs δεν είναι κάποια ανατρεπτική ανακάλυψη, παρά κάποιες καταλλήλως χρησιμοποιούμενες ουσίες, οι οποίες αλλάζουν φάση, υπό σχεδόν σταθερή θερμοκρασία, από τη στιγμή που τους προσφέρεται κατάλληλο ποσό θερμότητας. Στα πλαίσια του θερμοκρασιακού εύρους της ανθρώπινης θερμικής άνεσης 20-30 °C είναι ιδιαίτερα αποδοτικά.

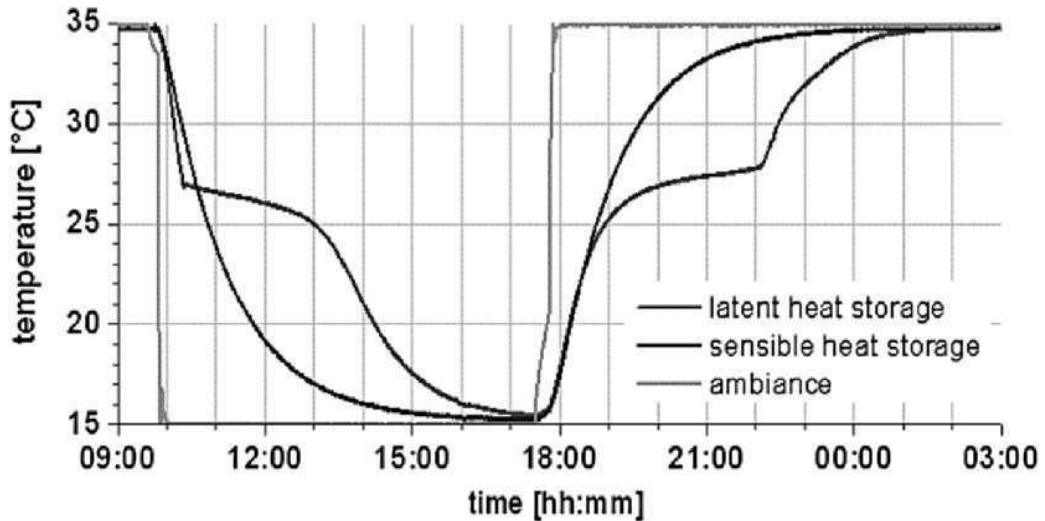
Πίνακας 2.1 : Ιδιότητες ενδεικτικών Υλικών Αλλαγής Φάσης

Υλικό	Σημείο Τήξης(°C)	Λανθάνουσα Θερμότητα (W/mK)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK) (κατάσταση, °C)	Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> ) (κατάσταση, °C)
<b>Ανόργανα Υλικά</b>				
H <sub>2</sub> O	0	333	0,612(υγρό,20)	998(υγρό,20) 917(στερεό, 0)
MgCl <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O	117	168,6	0,570(υγρό, 120) 0,694(στερεό,90)	1450(υγρό,120) 1569(στερεό,20)
Mg(NO <sub>3</sub> )*6H <sub>2</sub> O	89	162,8	0,490(υγρό,95) 0,611(στερεό,37)	1550(υγρό,94) 1636(στερεό,25)
Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O	36	146,9	0,464(υγρό,39,9)	1828(υγρό,36) 1937(στερεό,24)
CaCl <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O	27	190,8	0,540(υγρό,38,7) 1,088(στερεό,23)	1562(υγρό,32) 1802(στερεό,24)
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> *H <sub>2</sub> O (Άλας Glauber)	32	254	0,544	1485(στερεό)
<b>Οργανικά Υλικά</b>				
Παραφίνη	64	173,6	0,164(υγρό,63,5) 0,346(στερεό,33,6)	790(υγρό,65) 916(στερεό,24)
Πολυγλυκόλη E400	8	99,6	0,187(υγρό,38,6)	1125(υγρό,25) 1228(στερεό,3)
Πολυγλυκόλη E600	22	127,2	0,189(υγρό,38,6)	1126(υγρό,25) 1232(στερεό,4)
Παραφίνη C <sub>18</sub>	28	244	0,148(υγρό,40) 0,358(στερεό,25)	774(υγρό,70) 814(στερεό,20)
<b>Λιπαρά Οξέα</b>				
Στεαρικό οξύ	69	202,5	0,172(υγρό,70)	848(υγρό,70)
Παλμειτικό οξύ	64	185,4	0,162(υγρό,68,4)	850(υγρό,65) 989(στερεό,24)
Capric Acid	32	152,7	0,153(υγρό,38,5)	850(υγρό,65) 989(στερεό,24)
Caprylic Acid	16	148,5	0,149(υγρό,38,6)	901(υγρό,30) 981(στερεό,13)

Το ιδανικό ΥΑΦ θα ήταν ένα υλικό με μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας, υψηλή θερμική αγωγιμότητα, θερμοκρασία τήξης σύμφωνη με το θερμοκρασιακό εύρος της αποθηκευτικής εφαρμογής, να τήκεται με την ελάχιστη εμφάνιση supercooling (υπέρψυξης), να είναι χημικά σταθερό, άφθονο, φθινό στην παραγωγή, όπως επίσης να μην είναι τοξικό, διαβρωτικό, ή εύφλεκτο.

Η βασική ιδέα του PCM είναι η εξής : Το PCM καθώς τήκεται αποθηκεύει μεγάλα ποσά ενέργειας. Όταν η περιβάλλουσα το PCM θερμοκρασία του δοχείου αρχίζει να ελαττώνεται, τότε αυτό στερεοποιείται ελευθερώνοντας το ποσό θερμότητας που είχε απορροφήσει κατά τη φάση της υγροποίησης.

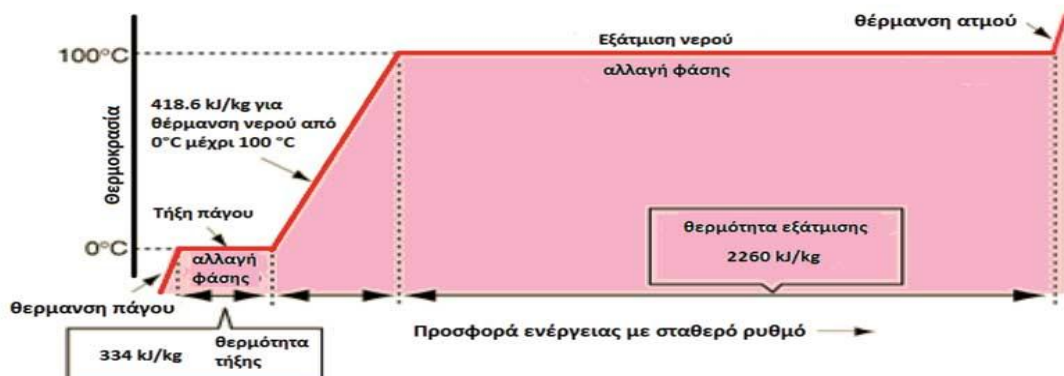
Τα υλικά που έχουν μελετηθεί τα τελευταία χρόνια είναι τα ένυδρα άλατα, οι παραφίνες, τα λιπαρά οξέα και εύτηκτα μίγματα οργανικών και μη οργανικών συστατικών.



Σχήμα 2.3 : Στερεοποίηση και τήξη σχεδόν ιδανικού ΥΑΦ

Το πλέον γνωστό υλικό που έχει χρησιμοποιηθεί ως ΥΑΦ όπως προαναφέρθηκε είναι το νερό, το οποίο κατά την αλλαγή φάσης του σε πάγο, μπορεί να αποθηκεύσει πολύ μεγάλα ποσά θερμότητας (περίπου 80 φορές περισσότερη αποθηκευμένη ενέργεια σε σχέση με την υγρή του κατάσταση).

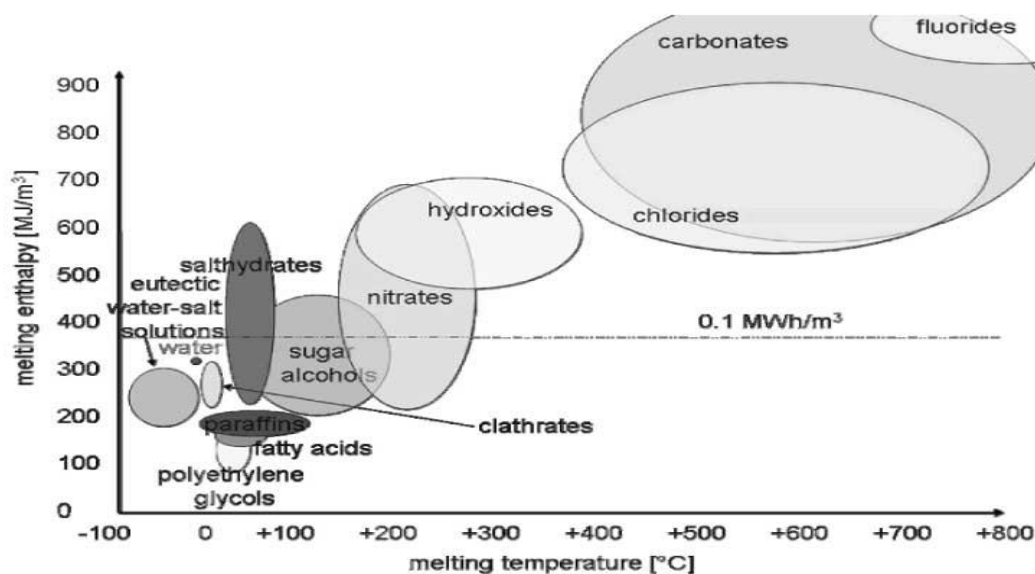
Το νερό, στη θερμοκρασία 0°C, προκειμένου να αλλάξει φάση, από στερεό (πάγος) σε υγρό, χρειάζεται να απορροφήσει ενέργεια ίση με 334 kJ/kg. Η ενέργεια αυτή είναι η **λανθάνουσα θερμότητα τήξης** γιατί δεν προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του (δηλαδή, δεν είναι αντιληπτή με τις αισθήσεις) αλλά αποδίδεται στη μεταβολή των δεσμών και της κινητικής ενέργειας των μορίων του. Ομοίως, για την εξάτμιση του νερού, στους 100°C, δηλαδή για τη μετατροπή από την υγρή στην αέρια φάση, θα πρέπει να απορροφήσει, ως λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, ενέργεια ίση με 2260 kJ/kg.



Σχήμα 2.4 : Διάγραμμα των μεταβολών φάσης του νερού

Κατά την αντίστροφη διαδικασία της ψύξης και της στερεοποίησης του νερού, στις θερμοκρασίες αλλαγής φάσης, οι κατά περίπτωση λανθάνουσες θερμότητες **απελευθερώνονται**. Στο διάγραμμα του σχήματος 2.4 φαίνεται ότι με συνεχή και σταθερό ρυθμό θέρμανσης μιας ποσότητας νερού επιτυγχάνουμε σταθερή αύξηση της θερμοκρασίας του, εκτός από τις θερμοκρασίες των 0 και 100°C, όπου η προσφορά θερμικής ενέργειας (σε ποσότητες 334 και 2260 kJ/kg αντίστοιχα) δεν προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας αλλά μεταβολή φάσης.

Επειδή η χρήση του πάγου ως ΥΑΦ παρουσιάζει ορισμένα προβλήματα που δημιουργούνται λόγω των ιδιοτήτων του νερού (Σ.Τ. 0 °C, μεγάλη μεταβολή της πυκνότητας με τη θερμοκρασία, χαμηλή θερμοκρασία προσαγωγής στο σύστημα αποθήκευσης κλπ) η ιδέα ήταν να αναπτυχθούν υλικά με βάση το νερό, ώστε να παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματά του (μεγάλη τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας, μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας) αλλά να μην παρουσιάζουν τα υπόλοιπα προβλήματα χρήσης του πάγου ως ΥΑΦ και κυρίως την χαμηλή θερμοκρασία τήξης.



Σχήμα 2.5 : Υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ΥΑΦ με βάση τα τυπικά εύρη τιμών θερμοκρασίας τήξης και λανθάνουσας θερμότητας (ενθαλπίας) τήξης

Η τεχνολογία αξιοποίησης των PCMs σε πρακτικές εφαρμογές ακολουθεί δύο βασικές κατευθύνσεις. Η πρώτη στοχεύει στον έλεγχο της θερμοκρασίας και τη δυνατότητα ρύθμισής της σε κάποιο εύρος τιμών και η δεύτερη στην αποθήκευση θερμότητας.

Με βάση το νερό δημιουργήθηκαν τα πρώτα PCMs που είναι τα ένυδρα άλατα, μία κατηγορία υλικών που αναπτύσσεται και τελειοποιείται ακόμη και σήμερα. Τα ένυδρα άλατα είναι σχετικά ασταθείς ενώσεις με μόρια νερού που ανάλογα με την αποβολή ή απορρόφηση θερμότητας από το σύστημα, αποβάλλουν ή προσλαμβάνουν τα μόρια νερού. Ένα από τα πλέον γνωστά ένυδρα άλατα είναι το άλας του Glauber ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) με Σ.Τ.  $32.4\text{ }^\circ\text{C}$  και λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης  $254\text{kJ/kg}$ .

Κύριο πλεονέκτημα των ΥΑΦ έναντι του πάγου είναι η δυνατότητα ρύθμισης της θερμοκρασίας σε ένα μεγάλο εύρος από τους  $-40$  έως τους  $110\text{ }^\circ\text{C}$ . Το χαρακτηριστικό αυτό είναι και το κύριο πλεονέκτημα των ΥΑΦ, διότι ανάλογα με την εφαρμογή η επιθυμητή θερμοκρασία αλλαγής φάσης είναι και διαφορετική. Για παράδειγμα, η εφαρμογή στην τοιχοποιία ζητά θερμοκρασίες αλλαγής φάσης από  $25$  έως  $27\text{ }^\circ\text{C}$ , ενώ για αποθήκευση ψύξης σε εφαρμογές θέρμανσης νερού και κλιματισμού το αντίστοιχο εύρος πρέπει να κυμαίνεται από  $2$  έως  $5\text{ }^\circ\text{C}$ .

Τα PCMs ήδη απαντώνται σε πλήθος εφαρμογών. Η πιο γνωστή στο ευρύ κοινό εφαρμογή των ΥΑΦ είναι οι παγοκύστες που χρησιμοποιούνται σε ψυγεία μεταφορών, για την διατήρηση της θερμοκρασίας κατά την μεταφορά οργάνων, ευπαθών φαρμάκων, τροφίμων ως και στα ψυγεία τύπου κάμπινγκ. Μεταξύ άλλων περιλαμβάνονται σημαντικές εφαρμογές όπως η μεταφορά και αποθήκευση ευαίσθητων σε μεταβολές θερμοκρασίας προϊόντων, όπως τρόφιμα, φάρμακα, η μεταφορά οργάνων για μεταμόσχευση, η ρύθμιση της θερμοκρασίας του σώματος (θερμικά τζάκετ, κουβέρτες κλπ), θεραπείες ζεστού-κρύου, έλεγχος θερμοκρασίας εξώθερμων χημικών αντιδράσεων, θερμική προστασία ηλεκτρικών μηχανών, διαφόρων ηλεκτρονικών διατάξεων, συσκευών καθώς και ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Τα PCMs χρησιμοποιούνται και σε εφαρμογές στα κτίρια. Μεταξύ αυτών, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν οι εφαρμογές που στοχεύουν στην αύξηση της ικανότητας αποθήκευσης θερμότητας του κελύφους. Επιπλέον τα PCMs έχουν ευρύτατη χρήση σε συστήματα αποθήκευσης θερμού νερού και σε συστήματα θέρμανσης-ψύξης και κλιματισμού, σε συστήματα ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας, σε αντλίες θερμότητας καθώς και σε εργοστάσια παραγωγής και αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.

### 2.3.1 Απαιτήσεις – Κριτήρια Επιλογής των ΥΑΦ (PCMs)

Η εφαρμογή της τεχνολογίας των ΥΑΦ αναμένεται να δώσει σημαντικές λύσεις σε θέματα αποθήκευσης ενέργειας, εξοικονόμησης ενεργειακών πόρων (συμβατικών οι οποίοι εξαντλούνται) και προστασίας του περιβάλλοντος. Η αποτελεσματική χρήση των ΥΑΦ στις τεχνολογικές εφαρμογές προϋποθέτει υλικά με μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας και με κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης η οποία να ανταποκρίνεται στο εύρος λειτουργίας του συστήματος. Ωστόσο, για να είναι σωστοί οι σχεδιασμοί και οι υπολογισμοί, υπάρχουν κι άλλες προϋποθέσεις που πρέπει να ικανοποιούνται για την καταλληλότητα των ΥΑΦ στα συστήματα αποθήκευσης.



Εικόνα 2.3 : Υλικά σε μορφή κόκκων και σε ρευστή μορφή που χρησιμοποιούνται ως ΥΑΦ

- Οι απαιτήσεις ως προς τις ιδιότητες που πρέπει να πληρούν τα PCMs είναι :

**Απαιτήσεις ως προς τις θερμικές ιδιότητες :**

- Κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης δηλαδή σημείο τήξεως στο επιθυμητό εύρος λειτουργίας.
- Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα μετάβασης
- Καλή μεταφορά θερμότητας
- Υψηλός λόγος λανθάνουσας θερμότητας προς όγκο, ώστε ο απαιτούμενος φυσικός όγκος του συστήματος να είναι ο ελάχιστος δυνατός.
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα τόσο της στερεής όσο και της υγρής φάσης για τη βοήθεια φόρτισης/αποφόρτισης της αποθηκευμένης ενέργειας του συστήματος.
- Υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα για σημαντική πρόσθετη αποθήκευση αισθητής θερμότητας.

**Απαιτήσεις ως προς τις φυσικές ιδιότητες :**

- Ευνοϊκή ισορροπία μεταξύ των φάσεων
- Υψηλή πυκνότητα η οποία θα επιτρέψει τη χρήση δοχείου αποθήκευσης μικρότερου μεγέθους.
- Σταθερότητα κατά τη διάρκεια του κύκλου φάσεων τήξης/στερεοποίησης, για τον καθορισμό της αποθηκευτικής ικανότητας του υλικού.
- Μικρές μεταβολές όγκου μεταξύ των αλλαγών φάσης για να μη δημιουργείται πρόβλημα χώρου.
- Χαμηλή τάση ατμών στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας, ώστε να μειωθεί το πρόβλημα αποθήκευσης.

**Απαιτήσεις ως προς τις κινητικές ιδιότητες :**

- Όχι Υπέρψυξη (Supercooling). Η υπέρψυξη υπήρξε προβληματική πτυχή στην ανάπτυξη του PCM ιδιαίτερα για τα ένυδρα άλατα.
- Επαρκές ποσοστό κρυστάλλωσης και υψηλή ταχύτητα ανάπτυξης των κρυστάλλων, ώστε το σύστημα να μπορεί να καλύπτει την ζήτηση ανακτώντας θερμότητα από το σύστημα αποθήκευσης.

**Απαιτήσεις ως προς τις χημικές ιδιότητες :**

- Μακροχρόνια χημική σταθερότητα
- Συμβατότητα με τα υλικά κατασκευής
- Να μην είναι τοξικό, να μην είναι εύφλεκτο και να μην εκρήγνυται
- Να μην υποβαθμίζεται μετά από πολλούς κύκλους τήξης/στερεοποίησης (κόπωση).
- Να μην διαβρώνει τα υλικά με τα οποία έρχεται σε επαφή

**Οικονομικές Απαιτήσεις :**

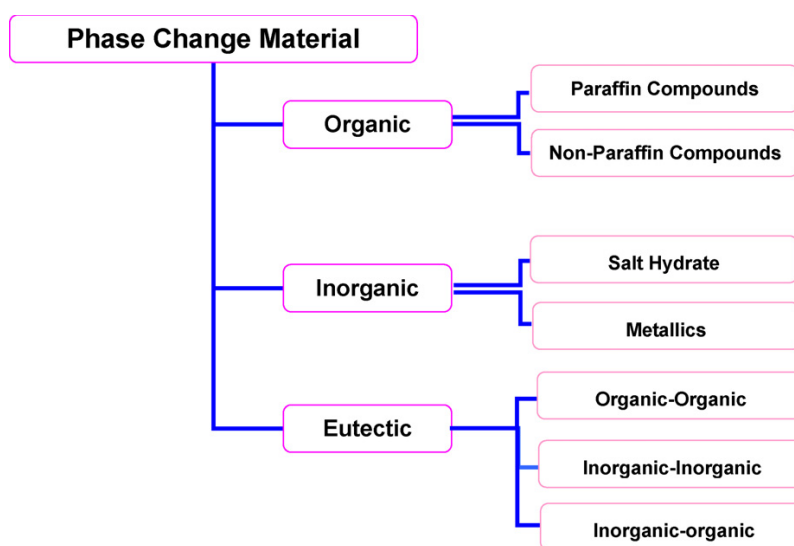
- Αφθονία
- Χαμηλό κόστος
- Μεγάλο εύρος διαθεσιμότητας



## 2.4 Ταξινόμηση των PCMs

Τα PCMs μπορούν να ομαδοποιηθούν ανάλογα με το εύρος θερμοκρασιών που λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης (από στερεό σε υγρό) καθώς και με τις εφαρμογές που καλύπτουν. Χωρίζονται έτσι σε υλικά που αλλάζουν φάση κάτω από τους 15 °C και χρησιμοποιούνται για αποθήκευση ψύξης σε εφαρμογές κλιματισμού ή μεταφορά ευπαθών υλικών (ιατρικές εφαρμογές) και σε υλικά που αλλάζουν φάση πάνω από τους 90 °C και χρησιμοποιούνται για εφαρμογές ψύξης με απορρόφηση. Όλα τα άλλα υλικά με ενδιάμεσες τιμές της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές θέρμανσης σε συνεργασία με ηλιακά συστήματα ή εφαρμογές ομαλοποίησης των φορτίων κλιματισμού καθώς και για αποθήκευση θερμότητας.

Τα PCMs που μεταπίπτουν από τη στερεά στην υγρή φάση κυρίως κατηγοριοποιούνται **με βάση τη σύστασή τους** σε οργανικά, ανόργανα, εϋτηκτα μίγματα και σε μια κατηγορία που βρίσκεται ακόμα υπό έρευνα και η οποία περιλαμβάνει υλικά προερχόμενα από ανακυκλούμενα φυτικά ή ζωικά έλαια.



Σχήμα 2.6 : Κατηγοριοποίηση ΥΑΦ με βάση τη σύστασή τους

Η κατηγορία των οργανικών υλικών αντιπροσωπεύεται κυρίως από τις παραφίνες και μικροκρυσταλλικά κεριά (μίγματα παραφινών με αριθμό ατόμων C : 19 - 25) καθώς και από μη παραφινούχα υλικά όπως τα λιπαρά οξέα, εστέρες και αλκοόλες λιπαρών οξέων ή και μίγματα αυτών. Τα ανόργανα υλικά είναι κυρίως διαλύματα των ενυδρών αλάτων και κάποια μέταλλα ή κράματα. Τα ευτηκτικά υλικά είναι μίγματα .

Πίνακας 2.2 : Κυριότερα Υλικά που χρησιμοποιούνται ως Υλικά Αλλαγής Φάσης

Main phase change materials

Paraffins	Inorganic compounds	Inorganic eutectics	Organic compounds
Paraffin C <sub>14</sub>	H <sub>2</sub> O	58.7% Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Polyglycol E 400
Paraffin C <sub>15</sub> -C <sub>16</sub>	LiClO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	+ 41.3% MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Polyglycol E 600
Paraffin C <sub>16</sub> -C <sub>18</sub>	KF·4H <sub>2</sub> O	66.6% CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O +	Polyglycol E 6000
Paraffin C <sub>13</sub> -C <sub>24</sub>	Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	33.3% MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Dodecanol
Paraffin C <sub>16</sub> -C <sub>28</sub>	CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	48% CaCl <sub>2</sub> + 4.3% NaCl	Tetradecanol
Paraffin C <sub>18</sub>	LiNO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	+ 0.4% KCl + 47.3%	Biphenyl
Paraffin C <sub>20</sub> -C <sub>33</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	HDPE
Paraffin C <sub>22</sub> -C <sub>45</sub>	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	47% Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O +	Trans-1,4-polybuta-
Paraffin C <sub>23</sub> -C <sub>50</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ·10H <sub>2</sub> O	33% Mg (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	diene (TPB)
Paraffin wax	CaBr <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	60% Na(CH <sub>3</sub> COO)·3H <sub>2</sub> O	Propionamide
Oktadekan	Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	+ 40% CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	Naphtalene
	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O	66.6% Urea + 33.4%	Erythitol
	Na(CH <sub>3</sub> COO)·3H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> Br	Dimetly-sulfoxide
	Na <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ·10H <sub>2</sub> O		Capric acid
	Ba(OH) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O		Caprinic acid
	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O		Laurinic acid
	(NH <sub>4</sub> )Al(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O		Miristic acid
	MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O		Laksiol
	NaNO <sub>3</sub>		Palmitin acid
	KNO <sub>3</sub>		Stearic acid
	KOH		Acetamid
	MgCl <sub>2</sub>		Propionamid
	NaCl		
	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		
	KF		
	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		

### 2.4.1 Οργανικά PCMs

Η κατηγορία των οργανικών υλικών εκπροσωπείται κατά κύριο λόγο από τις παραφίνες και τα λιπαρά οξέα και σε δεύτερο λόγο και από τις σάκχαρο-αλκοόλες. Τα οργανικά υλικά τήκονται και στερεοποιούνται επανειλημμένα χωρίς διαχωρισμό φάσεων και μείωση της λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης. Αυτά τα υλικά καλύπτουν ένα θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 0 - 200 °C. Λόγω των ομοιοπολικών δεσμών στα οργανικά υλικά τα περισσότερα από αυτά δεν είναι σταθερά σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Όμως εμφανίζουν αμελητέα υπέρψυξη, είναι χημικά αδρανή, μη διαβρωτικά χωρίς παρουσία εκφυλισμού ιδιοτήτων. Στις περισσότερες περιπτώσεις η πυκνότητα των οργανικών PCM είναι μικρότερη από την πυκνότητα ανόργανων υλικών. Το αποτέλεσμα είναι ότι (με εξαίρεση τις αλκοόλες) τα οργανικά υλικά έχουν συνήθως μικρότερες ενθαλπίες τήξης κατ' όγκο από τα ανόργανα υλικά.

### 2.4.1.1 Παραφίνες

Παραφίνη είναι το σύννηθες όνομα για μια ουσία που αποτελείται κυρίως από την οργανική ομάδα των αλκανικών υδρογονανθράκων μεγάλου μοριακού βάρους, με γενικό μοριακό τύπο  $C_nH_{2n+2}$ , με  $n$  μεγαλύτερο του 20. Παραφίνη είναι επίσης επιστημονική ονομασία για ένα αλκάνιο γενικότερα, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις αναφέρεται γενικά σε ένα γραμμικό (κανονικό) αλκάνιο, ενώ τα ισοαλκάνια ονομάζονται ισοπαραφίνες. Οι εμπορικές παραφίνες είναι προϊόντα από απόσταξη ορυκτού λαδιού (πετρελαίου) και όχι καθαρές ουσίες. Καθαρές παραφίνες περιέχουν μόνο αλκάνια.

Τα αλκάνια είναι κορεσμένοι υδρογονάνθρακες. Το πλέον απλό αλκάνιο είναι το μεθάνιο,  $CH_4$ . Δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των ατόμων που σχηματίζουν την ανθρακική αλυσίδα. Οι παραφίνες αποτελούνται κυρίως από μίγματα  $n$  αλκανίων.  $CH_3-(CH_2)-CH_3$ . Η κρυστάλλωση της αλυσίδας απελευθερώνει μεγάλο ποσό λανθάνουσας θερμότητας. Το σημείο τήξης και η λανθάνουσα θερμότητα αυξάνουν στα αλκάνια με την αύξηση των ατόμων άνθρακα και το μήκος της αλυσίδας.

Τα αλκάνια δεν είναι ιδιαίτερα αντιδραστικές ουσίες, θεωρούνται βιολογικά υποπροϊόντα και είναι σημαντικά κυρίως λόγω των μη υδρογονανθρακικών ουσιών, οι οποίες μπορούν να προσαρτηθούν στην ανθρακική αλυσίδα. Τα πρώτα τέσσερα αλκάνια της σειράς (από το μεθάνιο μέχρι το βουτάνιο) είναι αέρια σε θερμοκρασία δωματίου και ατμοσφαιρική πίεση (πρότυπες συνθήκες). Οι ενώσεις μεταξύ  $C_5H_{12}$  και  $C_{17}H_{36}$  είναι υγρά και ενώσεις με περισσότερα από 17 άτομα άνθρακα ανά μόριο είναι κηρώδη στερεά σε θερμοκρασία δωματίου. Τα κεριά παραφίνης αποτελούνται από μείγματα κυρίως κανονικών αλκανίων. Το ποσό των κανονικών αλκανίων σε κεριά παραφίνης υπερβαίνει συνήθως το 75% (και μπορεί να φθάσει σχεδόν το 100%), ενώ το υπόλοιπο αποτελείται κυρίως από ισοαλκάνια και κυκλοαλκάνια.

Το σημείο βρασμού των αλκανίων γενικότερα εξαρτάται από το μοριακό βάρος, και μάλιστα η συνάρτηση των δύο μεγεθών είναι σχεδόν γραμμική. Αντίστοιχα, οι κυκλικοί υδρογονάνθρακες έχουν υψηλότερο σημείο βρασμού από τους υδρογονάνθρακες ευθείας αλυσίδας ίδιου μοριακού βάρους. Όμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και το σημείο τήξης, δηλαδή όσο περισσότερα άτομα άνθρακα στο μόριο του αλκανίου, τόσο υψηλότερο το σημείο τήξης.

Τα αλκάνια με περιττό αριθμό ατόμων άνθρακα έχουν γενικά χαμηλότερο σημείο τήξης από αυτά με άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα, και αυτό διότι τα μόρια με άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα, είναι καλύτερα χωροθετημένα, γεγονός που απαιτεί υψηλότερη προσθήκη θερμότητας για να σπάσουν οι δεσμοί και να επιτευχθεί η μετάβαση στην υγρή φάση.

Οι περισσότερες παραφίνες αποτελούνται από ευθείες ανθρακικές αλυσίδες με δύο μεθυλικά μόρια κοντά στο τέλος της αλυσίδας. Διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες, ανάλογα με τον αριθμό των ατόμων άνθρακα στην αλυσίδα τους. Υπάρχουν οι n-Παραφίνες, οι οποίες έχουν άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα καθώς και οι ισο-Παραφίνες, των οποίων η ανθρακική αλυσίδα αποτελείται από περιττό αριθμό ατόμων άνθρακα.

Οι παραφίνες είναι ιδανικά υλικά για χρήση ως PCM, αφού είναι κατάλληλα να καλύψουν οποιοδήποτε εύρος θερμοκρασιών εφαρμογής αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, φτηνές και άφθονες. Έχουν αρκετά καλή αποθηκευτική ικανότητα σε σχέση με άλλα υλικά, όπως επίσης έχουν το πλεονέκτημα να μην υπερψύχονται, δηλαδή όλο το υλικό στερεοποιείται, χωρίς εμφάνιση υπέρψυξης, άρα το υλικό αποδίδει τη μέγιστη αποθηκευτική ικανότητά του. Επίσης, σαν οργανικές ουσίες, δεν εμφανίζουν στη διάρκεια ζωής τους το φαινόμενο του διαχωρισμού των φάσεων, που σημαίνει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα που εμφανίζουν οι παραφίνες έναντι άλλων υλικών για εφαρμογές θέρμανσης σε κτίρια, είναι πως υπάρχει πλήθος παραφινών με σημεία τήξης από 20-26°C, στα πλαίσια δηλαδή που κυμαίνονται οι απαιτήσεις των εν λόγω συστημάτων.

Η αύξηση του όγκου τους κατά την τήξη είναι της τάξης του 10% κατ' όγκο, η οποία είναι παρόμοια με εκείνη πολλών ανόργανων υλικών, αλλά λιγότερο κρίσιμη καθώς οι παραφίνες είναι πιο μαλακές και ως εκ τούτου δημιουργούνται μικρότερες δυνάμεις κατά την επέκταση. Οι παραφίνες επίσης είναι αδιάλυτες στο νερό καθώς είναι νεροαπωθητικές και δεν αντιδρούν με τα περισσότερα κοινά χημικά αντιδραστήρια. Επιπροσθέτως, έχουν χαμηλή τάση ατμών όταν τήκονται, γεγονός που ερμηνεύει τις ελάχιστες απώλειες υλικού σε ένα μεγάλο βάθος χρόνου χρήσης, ιδιαίτερα σημαντικό για τις εφαρμογές όπου απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός κυκλικών φορτίσεων του υλικού. Ως παράδειγμα η εφαρμογή σε τοιχοποιία, όπου απαιτούνται περισσότερα από 25 έτη ζωής. Επιπλέον δεν παρουσιάζουν προβλήματα διάβρωσης με κανένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μέταλλο.

Οι παραφίνες παρουσιάζουν και ανεπιθύμητες ιδιότητες όπως μη συμβατότητα τους με πλαστικά δοχεία αποθήκευσης στα οποία προκαλούν χαλάρωση, μέτρια αναφλεξιμότητα και μικρή τιμή θερμικής αγωγιμότητας  $0.2 \text{ W/m K}$ . Για την αύξηση του συντελεστή αγωγιμότητας, έχουν μελετηθεί διάφορες περιπτώσεις εμπλουτισμού με μεταλλικά υλικά με τα οποία η συμβατότητά τους είναι πολύ καλή. Το κυψελωτό αλουμίνιο έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία ως υλικό πλήρωσεως. Για την αναφλεξιμότητα, αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ είναι εύφλεκτες, δεν καίγονται εύκολα ως σύνολο.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι οι παραφίνες χρησιμοποιούμενες σε υψηλές θερμοκρασίες ενδέχεται να σπάσουν τους δεσμούς παραφινών και η προκύπτουσα μικρή αλυσίδα μορίων να εξατμιστεί καθώς και ότι πραγματοποιούν ολοκληρωμένα την αλλαγή φάσης σε θερμοκρασιακό εύρος περίπου  $10 \text{ K}$  ( $9 \text{ K}$  πριν το Σ.Τ. και  $1 \text{ K}$  μετά από αυτό). Αυτό φαινόμενο αν δεν ληφθεί υπ' όψη μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένη επιλογή υλικού με αποτέλεσμα μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με τις αναμενόμενες τιμές.



*Εικόνα 2.4 : ΥΑΦ της εταιρίας Rubitherm που βασίζονται σε Παραφίνες και κεριά παραφινών*

Η ύπαρξη πληθώρας ουσιών (παραφινών) λύνει τα χέρια των μελετητών και δίνει τη δυνατότητα σχεδιασμού και ανάπτυξης αποδοτικότερων και οικονομικότερων συστημάτων. Υπάρχει ακόμα χώρος για μελέτη και βελτίωση αυτών των συστημάτων, λόγω του υπαρκτού κινδύνου ανάφλεξης της υγρής φάσης της παραφίνης, καθώς επίσης και για την ανάπτυξη μεθόδων ακόμη καλύτερης ενσωμάτωσης της παραφίνης στα υλικά για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου διαφυγής του PCM, όταν αυτό βρίσκεται στην υγρή φάση.

Πίνακας 2.2 : Σημείο τήξης (°C) και Λανθάνουσα θερμότητα τήξης (kJ/kg) των Παραφινών

No. of carbon atoms	Melting point (°C)	Latent heat of fusion (kJ/kg)	Group <sup>a</sup>
14	5.5	228	I
15	10	205	II
16	16.7	237.1	I
17	21.7	213	II
18	28.0	244	I
19	32.0	222	II
20	36.7	246	I
21	40.2	200	II
22	44.0	249	II
23	47.5	232	II
24	50.6	255	II
25	49.4	238	II
26	56.3	256	II
27	58.8	236	II
28	61.6	253	II
29	63.4	240	II
30	65.4	251	II
31	68.0	242	II
32	69.5	170	II
33	73.9	268	II
34	75.9	269	II

<sup>a</sup> Ομάδα I: πιο υποσχόμενα, ομάδα II: υποσχόμενα, ομάδα III: λιγότερο υποσχόμενα

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα μίγματα παραφίνης με πολυμερή, είτε θερμοπλαστικά είτε θερμοσκληρυνόμενα ως μήτρα συγκράτησης. Η πιο συνήθης είναι η χρήση πολυαιθυλενίου PE.

#### 2.4.1.2 Μη Παραφινούχα Υλικά

Τα οργανικά μη παραφινούχα υλικά αποτελούν την πιο πολυάριθμη ομάδα υλικών αλλαγής φάσης. Καθένα από αυτά παρουσιάζει τις δικές του ιδιότητες, εν αντιθέσει με τις παραφίνες που έχουν γενικά παρόμοια χαρακτηριστικά. Ύστερα από διεξαγωγή εκτεταμένων ερευνών γύρω από τα οργανικά υλικά εκτός παραφινών έχουν παρατηρηθεί αρκετά λιπαρά οξέα, εστέρες και αλκοόλες (σακχαρο-αλκοόλες, γλυκόλες) που είναι κατάλληλα για αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Τα υλικά αυτά είναι εύφλεκτα και δεν πρέπει να εκτίθενται σε υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες (ασταθή) ούτε να έρχονται σε επαφή με εύφλεκτες και οξειδωτικές ουσίες. Από αυτά, τα επικρατέστερα είναι τα λιπαρά οξέα γιατί συγκεντρώνουν αρκετά πλεονεκτήματα. Τα σημαντικότερα αποτελούν το μεγάλο εύρος θερμοκρασιών τήξης, η ανυπαρξία υπέρψυξης και διαχωρισμού των φάσεων και η περιορισμένη τοξικότητα. Ωστόσο, λόγω 2-2.5 μεγαλύτερου κόστους από τις εμπορικές παραφίνες η χρήση τους σε σχέση με αυτές είναι υποβαθμισμένη.

Πίνακας 2.3 : Σημείο (°C) και Λανθάνουσα θερμότητα Τήξης(kJ/kg) ορισμένων μη Παραφινών

Melting temperature and heat of fusion of organic compounds with potential use as a PCM		
Compound	Melting temperature (K)	Heat of fusion (kJ/kg)
Polyglycol E 400	281.2	99.6
Polyglycol E 600	295.2	127.2
Polyglycol E 6000	339.2	190.0
Dodecanol	299.2	200
Tetradecanol	311.2	205
Biphenyl	344.2	190.0
HDPE	373.2	200
Trans-1,4-polybutadiene (TPB)	418.2	144
Propionamide	352.2	168.2
Naphtalene	353.2	147.7
Erythitol	391.2	89.8
Dimethyl-sulfoxide	289.7	85.7

### Λιπαρά Οξέα

Στη Βιοχημεία, λιπαρό οξύ ονομάζεται ένα καρβοξυλικό οξύ, συνήθως με μακρά μη διακλαδισμένη ανθρακική αλυσίδα, είτε κορεσμένη, είτε ακόρεστη. Καρβοξυλικά οξέα σαν το βουτυρικό οξύ (με 4 άτομα άνθρακα) θεωρούνται λιπαρά οξέα, παρά το ότι γενικότερα τα λιπαρά οξέα προέρχονται από φυσικά λίπη και έλαια και θεωρείται ότι έχουν τουλάχιστον 8 άτομα άνθρακα, όπως το καπριλικό οξύ. Τα περισσότερα από τα φυσικά λιπαρά οξέα, έχουν άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα στην ανθρακική αλυσίδα τους. Στη βιομηχανία παράγονται από την υδρόλυση των εστερικών δεσμών ενός λιπαρού ή βιολογικού ελαίου (π.χ. τριγλυκερίδια), με την αφαίρεση της γλυκερόλης.

Τα λιπαρά οξέα χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τα **κορεσμένα** και τα **ακόρεστα**. Τα κορεσμένα λιπαρά οξέα δεν περιέχουν καθόλου διπλούς δεσμούς ή άλλα λειτουργικά σύνολα κατά μήκος της ανθρακικής αλυσίδας. Ο γενικός χημικός τύπος των λιπαρών οξέων είναι  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ .

Κάποια κορεσμένα λιπαρά οξέα είναι:

- Βουτυρικό οξύ:  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$
- Μυριστικό οξύ:  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$

• Παλμιτικό οξύ:  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$

• Στεαρικό οξύ:  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$

Τα ακόρεστα λιπαρά οξέα είναι παρόμοιας μορφής με τα κορεσμένα, περιέχοντας όμως αυτή τη φορά αλκύλια κατά μήκος της ανθρακικής αλυσίδας με αποτέλεσμα να υπάρχουν **διπλοί δεσμοί** μεταξύ των ατόμων του άνθρακα. Ενδεικτικά ακόρεστα λιπαρά οξέα:

• Άλφα-λινολεϊκό οξύ:  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$

• Λινολεϊκό οξύ:  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$

• Ολεϊκό οξύ:  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$

Τα λιπαρά οξέα εμφανίζουν σημεία τήξης και λανθάνουσα θερμότητα παρόμοια με αυτά των παραφινών. Τα λιπαρά οξέα έχουν καλή συμπεριφορά στην κυκλική καταπόνηση τήξης-πήξης και στερεοποιούνται χωρίς την παρουσία φαινομένου υπέρψυξης (supercooling). Επομένως θεωρούνται καλά υλικά αλλαγής φάσης.

**Πίνακας 2.4 : Σημείο τήξης ( $^{\circ}\text{C}$ ) και Λανθάνουσα θερμότητα Τήξης ( $\text{kJ/kg}$ ) Λιπαρών Οξέων**

Melting point and latent heat of fusion: fatty acids

Material	Formula	Melting point ( $^{\circ}\text{C}$ )	Latent heat ( $\text{kJ/kg}$ )	Group <sup>a</sup>
Acetic acid	$\text{CH}_3\text{COOH}$	16.7	184	I
Polyethylene glycol 600	$\text{H}(\text{OC}_2\text{H}_4)_n\text{OH}$	20-25	146	I
Capric acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$	36	152	-
Eladic acid	$\text{C}_8\text{H}_7\text{C}_8\text{H}_{16}\text{COOH}$	47	218	I
Lauric acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$	49	178	II
Pentadecanoic acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{13}\text{COOH}$	52.5	178	-
Tristearin	$(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_3\text{C}_3\text{H}_5$	56	191	I
Myristic acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$	58	199	I
Palmitic acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	55	163	I
Stearic acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$	69.4	199	I
Acetamide	$\text{CH}_3\text{CONH}_2$	81	241	I
Methyl fumarate	$(\text{CHCO}_2\text{NH}_3)_2$	102	242	I

<sup>a</sup> Group I, most promising; group II, promising; group III, less promising; —insufficient data.

Ακόμα διαθέτουν χημική σταθερότητα, χαμηλή τάση ατμών σε θερμοκρασία δωματίου αν και όπως οι παραφίνες έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα.. Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα που τα χαρακτηρίζει είναι ότι δεν μπορεί να υπάρξει διαχωρισμός των φάσεων καθώς αποτελούνται από ένα μόνο συστατικό. Το πιο σημαντικό όμως απ' όλα είναι ότι οι πρώτες ύλες για την κατασκευή των λιπαρών οξέων αποτελούνται από ανανεώσιμες πηγές φυτικών και ζωικών πηγών.



Αυτό εξασφαλίζει μια συνεχιζόμενη πηγή εφοδιασμού, ανεξάρτητη από εξάντληση αποθεμάτων στον κόσμο και από προμήθειες ορυκτών καυσίμων.

Παρόλα αυτά, υπάρχουν λίγα λιπαρά οξέα τα οποία να είναι κατάλληλα για κτιριακές θερμικές εφαρμογές, σημαντικό μειονέκτημα συγκριτικά με τις παραφίνες. Τα δύο επικρατέστερα είναι το Καπρικό Οξύ (Σ.Τ 31.5°C) και το Καπριλικό Οξύ (Σ.Τ 16.5°C). Υπάρχουν και κάποια που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για αποθήκευση θερμότητας σε χαμηλές θερμοκρασίες.



*Εικόνα 2.5 : Λιπαρό Οξύ με χρήση ως PCM*

Τα λιπαρά οξέα σε θερμοκρασία δωματίου, υπόκεινται σε μία χημική αντίδραση, γνωστή σαν αυτό-οξειδωση. Το λιπαρό οξύ σπάει σε υδατάνθρακες, κετόνες, αλδεΐδες και μικρότερες ποσότητες αλκοολών και εποξικών. Επίσης συχνά τα τελευταία επεξεργάζονται με συμπυκνωτικούς παράγοντες, όπως το κιτρικό οξύ.

Ένα ακόμη μειονέκτημα αυτής της ομάδας υλικών είναι η κακοσμία, γεγονός εμποδίζει δραματικά τη χρησιμότητα του χώρου στον οποίο αυτά εγκαθίστανται. Επιπλέον, είναι υλικά ήπια διαβρωτικά. Τα δύο τελευταία προβλήματα αντιμετωπίζονται με την κατασκευή κατάλληλης συσκευασίας και ενθυλάκωσης φτιάχνοντας έτσι ένα PCM που να μπορεί να χαρακτηριστεί χημικά σταθερό. Τέλος, τα λιπαρά οξέα δεν έχουν συμβατότητα με μέταλλα λόγω του οξύ τους χαρακτήρα επομένως δε μπορούν να συσκευαστούν σε container μετάλλων.

## Σακχαρο-αλκοόλες και γλυκόλες

Μια σάκχαρο-αλκοόλη είναι μια υδρογονωμένη μορφή υδατάνθρακα, της οποίας η καρβονυλική ομάδα (αλδεΐδη ή κετόνη, με μείωση της ζάχαρης) έχει μειωθεί σε μια κύρια ή δευτερεύουσα ομάδα υδροξυλίου. Η γενική χημική δομή είναι  $\text{HOCH}_2[\text{CH}(\text{OH})]_n\text{CH}_2\text{OH}$  και μπορούν να σχηματιστούν διάφορες μορφές ανάλογα με τον προσανατολισμό των ομάδων OH. Οι σάκχαρο-αλκοόλες είναι μια νέα κατηγορία υλικών, επομένως γνωστές είναι πολύ λίγες πληροφορίες. Έχουν θερμοκρασίες τήξης στην περιοχή από 90°C έως 200°C, και οι μαζικές ειδικές ενθαλπίες τήξης τους είναι υψηλές. Επιπλέον, η πυκνότητά τους είναι και αυτή υψηλή, γεγονός που οδηγεί σε πολύ υψηλές ογκομετρικές ειδικές ενθαλπίες τήξης. Σε αντίθεση με πολλά άλλα οργανικά υλικά, εμφανίζουν υπόψυξη.

Οι αιθυλενογλυκόλες αποτελούν τη βασική ουσία για το σχηματισμό αντιψυκτικών υλικών. Η πολυαιθυλενογλυκόλη (PEG) είναι ένα πολυμερές με γενικό τύπο  $\text{C}_{2n}\text{H}_{4n+2}\text{O}_{n+1}$ . Παράγεται από την αλληλεπίδραση του οξειδίου του αιθυλενίου με το νερό, ή με αιθυλενογλυκόλη, ή ολιγομερή αιθυλενογλυκόλης. Η αντίδραση καταλύεται από όξινους ή βασικούς καταλύτες. Η αιθυλενογλυκόλη και τα ολιγομερή της, είναι προτιμότερα ως πρώτη ύλη αντί για νερό, επειδή επιτρέπουν την δημιουργία πολυμερών με χαμηλή πολυδιασπαρσιμότητα (στενή κατανομή μοριακών βαρών).

Οι πολυαιθυλενογλυκόλες είναι διαθέσιμες σε ένα εύρος τιμών μοριακού βάρους από περίπου 200 – 35000 g/mole το οποίο αντιστοιχεί σε 5 και σε περίπου 800 μονομερή αντίστοιχα. Τα σημεία τήξης τους στη συνέχεια ποικίλουν ανάλογα με το βάρος του τύπου του πολυμερούς. Ειδικότερα, PEGs με μέσο μοριακό βάρος μεταξύ 200 και 400 είναι υγρά σε θερμοκρασία δωματίου ενώ PEGs με 600 λιώνουν στους 17 - 22°C. Η **θερμοκρασία τήξης** όλων των PEGs με μοριακό βάρος που υπερβαίνει τα 4.000 g/mol είναι περίπου 58 - 65°C. Επισημαίνεται ότι τα διαθέσιμα PEGs δεν έχουν καθορισμένη μοριακή μάζα καθώς τα περισσότερα είναι πολυδιάσπαρτα.

Η PEG θεωρείται καλό υλικό αποθήκευσης θερμότητας, λόγω της σχετικά μεγάλης θερμότητας τήξης, της ομοιόμορφης συμπεριφοράς τήξεως, της μη διαβρωτικότητας και της ευρείας περιοχής μετάβασης ως υλικό αλλαγής φάσης (PCM), όμως δεν πρέπει να υποβαθμιστεί θερμικά κατά την περίοδο της εφαρμογής γιατί παράγονται προϊόντα χαμηλού μοριακού βάρους, τα οποία προκαλούν μείωση

του σημείου τήξης και της λανθάνουσας θερμότητας τήξης και της απόδοσης του θερμικού συστήματος αποθήκευσης. Η PEG είναι ευαίσθητη στην θερμική οξειδωτική επίθεση ελεύθερων ριζών επειδή οι υψηλές πιέσεις στις πτυχώσεις της αλυσίδας της ελασματοειδούς δομής χαμηλώνουν την ενέργεια ενεργοποίησης αφαίρεσης του υδρογόνου κι έτσι γίνεται η θερμική της υποβάθμιση. Θερμική υποβάθμιση της PEG σε 80°C στον αέρα προκαλεί σημαντικές αλλαγές και στο σχήμα της. Μετά από 100 h θερμικής οξείδωσης, η PEG μετατρέπεται από μια σκόνη ελεύθερης ροής σε ένα μαλακό κηρώδες στερεό.

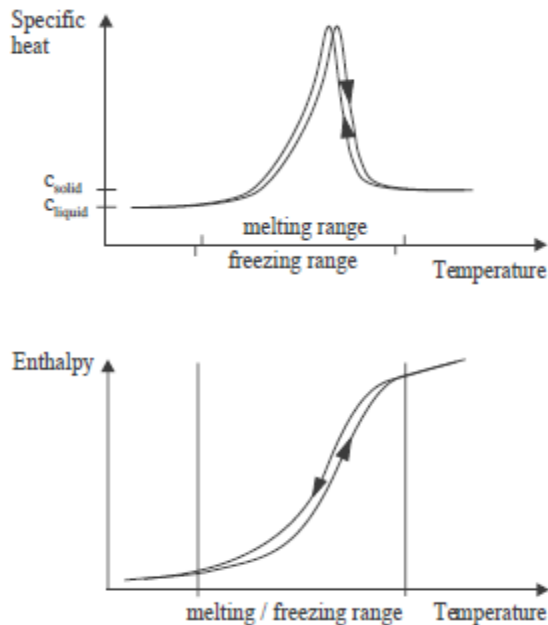
**Πίνακας 2.5 : Οργανικά υλικά τα οποία μπορούν να χρησιμοποιούνται ως ΥΑΦ**

Compound	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m K)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Paraffin C <sub>14</sub>	4.5 [1]	165 [1]	n.a.	n.a.
Paraffin C <sub>15</sub> -C <sub>16</sub>	8 [1]	153 [1]	n.a.	n.a.
Polyglycol E400	8 [4,11]	99.6 [4,11]	0.187 (liquid, 38.6 °C) [4,11] 0.185 (liquid, 69.9 °C) [11]	1125 (liquid, 25 °C) [4,11] 1228 (solid, 3 °C) [4,11]
Dimethyl-sulfoxide (DMS)	16.5 [28]	85.7 [28]	n.a.	1009 (solid and liquid) [28]
Paraffin C <sub>16</sub> -C <sub>18</sub>	20-22 [29]	152 [29]	n.a.	n.a.
Polyglycol E600	22 [4,11]	127.2 [4,11]	0.189 (liquid, 38.6 °C) [4,11] 0.187 (liquid, 67.0 °C) [11]	1126 (liquid, 25 °C) [4,11] 1232 (solid, 4 °C) [4,11]
Paraffin C <sub>13</sub> -C <sub>24</sub>	22-24 [1]	189 [1]	0.21 (solid) [1]	0.760 (liquid, 70 °C) [1] 0.900 (solid, 20 °C) [1]
1-Dodecanol	26 [9]	200 [9]	n.a.	n.a.
Paraffin C <sub>18</sub>	28 [1] 27.5 [30]	244 [1] 243.5 [30]	0.148 (liquid, 40 °C) [30] 0.15 (solid) [1] 0.358 (solid, 25 °C) [30]	0.774 (liquid, 70 °C) [1] 0.814 (solid, 20 °C) [1]
1-Tetradecanol	38 [9]	205 [9]	n.a.	n.a.
Paraffin C <sub>16</sub> -C <sub>28</sub>	42-44 [1]	189 [1]	0.21 (solid) [1]	0.765 (liquid, 70 °C) [1] 0.910 (solid, 20 °C) [1]
Paraffin C <sub>20</sub> -C <sub>33</sub>	48-50 [1]	189 [1]	0.21 (solid) [1]	0.769 (liquid, 70 °C) [1] 0.912 (solid, 20 °C) [1]
Paraffin C <sub>22</sub> -C <sub>45</sub>	58-60 [1]	189 [1]	0.21 (solid) [1]	0.795 (liquid, 70 °C) [1] 0.920 (solid, 20 °C) [1]
Parffin wax	64 [4,11]	173.6 [4,11] 266 [6]	0.167 (liquid, 63.5 °C) [4,11] 0.346 (solid, 33.6 °C) [4,11] 0.339 (solid, 45.7 °C) [11]	790 (liquid, 65 °C) [4,11] 916 (solid, 24 °C) [4,11]
Polyglycol E6000	66 [4,11]	190.0 [4,11]	n.a.	1085 (liquid, 70 °C) [4,11] 1212 (solid, 25 °C) [4,11]
Paraffin C <sub>21</sub> -C <sub>50</sub>	66-68 [1]	189 [1]	0.21 (solid) [1]	0.830 (liquid, 70 °C) [1] 0.930 (solid, 20 °C) [1]
Biphenyl	71 [4,11]	119.2 [4,11]	n.a.	991 (liquid, 73 °C) [4,11] 1166 (solid, 24 °C) [11]
Propionamide	79 [11]	168.2 [11]	n.a.	n.a.
Naphthalene	80 [4,11]	147.7 [4,11]	0.132 (liquid, 83.8 °C) [4,11] 0.341 (solid, 49.9 °C) [4,11] 0.310 (solid, 66.6 °C) [11]	976 (liquid, 84 °C) [4,11] 1145 (solid, 20 °C) [4,11]
Erythritol	118.0 [31]	339.8 [31]	0.326 (liquid, 140 °C) [31] 0.733 (solid, 20 °C) [31]	1300 (liquid, 140 °C) [31] 1480 (solid, 20 °C) [31]
HDPE	100-150 [32]	200 [32]	n.a.	n.a.
Trans-1,4-polybutadiene (TPB)	145 [33]	144 [33]	n.a.	n.a.

n.a.: not available.

### 2.4.1.3 Σύνοψη Ιδιοτήτων Οργανικών Υλικών

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται η γενική συμπεριφορά των οργανικών υλικών κατά τον κύκλο της διαδικασίας τήξης-στερεοποίησης-τήξης. Τα οργανικά PCMs χαρακτηρίζονται από **μεγάλο εύρος** θερμοκρασίας τήξης ( $\Delta T$  of fusion), με υψηλές τιμές ειδικής θερμοχωρητικότητας.



Σχήμα 2.7 :Ειδική Θερμοχωρητικότητα και Ενθαλπία Οργανικών ΥΑΦ κατά την αλλαγή φάσης

Τα εμπορικά προϊόντα οργανικών υλικών είναι **αρκετά φθηνότερα** από τα ανόργανα όπως τα ένυδρα άλατα. Παρουσιάζουν τιμές λανθάνουσας θερμότητας περίπου 150-200 kJ/kg και δυνατότητα παραγωγής και διαθεσιμότητας για σχεδόν όλο το εύρος των θερμοκρασιών. Η εμφάνιση supercooling είναι αμελητέα, είναι χημικά αδρανή και σταθερά, χωρίς να εμφανίζουν διαχωρισμό φάσεων ή εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους, όμως εμφανίζουν **χαμηλή θερμική αγωγιμότητα** στη στερεή φάση. Επίσης στα οργανικά υλικά επηρεάζεται αρκετά η πυκνότητα του υλικού από τη φάση, ώστε είναι δυνατόν όταν το υλικό στερεοποιηθεί και αυξηθεί η πυκνότητά του, να αποκολληθεί από τα τοιχώματα του δοχείου, γεγονός που θα επηρεάσει αρκετά το φαινόμενο της αγωγής θερμότητας (ουσιαστικά δεν είναι πλέον αγωγή, αλλά αγωγή-συναγωγή θερμότητας). Άλλο μειονέκτημα είναι η αναφλεξιμότητά τους, παρ' όλο που η κοινή άποψη των ερευνητών της περιοχής είναι πως η χαμηλή τάση ατμών της παραφίνης, δεν αποτελεί κίνδυνο ανάφλεξης.

Συνοψίζοντας τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των οργανικών υλικών :

### **Πλεονεκτήματα**

- Διαθεσιμότητα σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και σε διάφορους τύπους (σκόνη, κόκκοι, πλάκες).
- Χαμηλή ή αμελητέα υπόψυξη-υπέρψυξη
- Ικανότητα ομοιογενούς τήξης του υλικού
- Σχετικά υψηλές λανθάνουσες θερμότητες τήξης
- Χημική και Θερμική Σταθερότητα
- Δεν υφίσταται Διαχωρισμός Φάσεων
- Συμβατότητα με το περιβάλλον και ανακύκλωση
- Μη διαβρωτικά και αδρανή
- Χαμηλό κόστος αγοράς

### **Μειονεκτήματα**

- Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα στη στερεή φάση
- Χαμηλή ογκομετρική ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας
- Μέτρια αναφλεξιμότητα ( Μπορεί να μειωθεί με χρήση ειδικών δοχείων)
- Υψηλό ποσοστό μεταφορά θερμότητας κατά τη διάρκεια του κύκλου τήξης-πήξης
- Μεταβολές στην πυκνότητα μετά από επανειλημμένους κύκλους

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται ένα εμπορικό οργανικό PCM της εταιρίας Rubitherm το οποίο έχει ευρεία περιοχή θερμοκρασίας αλλαγής φάσης από 77-85°C, θερμική αποθηκευτική ικανότητα 58 KJ/Kg, ειδική θερμοχωρητικότητα 1.5 KJ/Kg K, θερμική αγωγιμότητα 0.2 W/m K και μέγιστη θερμοκρασία χρήσης σε εφαρμογή αποθήκευσης 110°C.

Innovative PCM's  
and  
Thermal Technology

**RUBITHERM**  
PHASE CHANGE MATERIAL



## **RUBITHERM® GR**

### Latent Heat Granulate based on Paraffins

*RUBITHERM GR* is a heat storage granulate in which a phase change material (PCM) is contained within a secondary supporting structure, in this case a natural porous mineral particle. Used in thermal energy storage applications, the bound PCM melts and congeals, thus storing and releasing the latent heat associated with the phase change process.

In *RUBITHERM® GR* our patented mechanism ensures that the PCM, when in the liquid form, does not leak out of the granulate. The result is that the bound PCM is always a solid in its macroscopic form.

Advantageous is that for many applications, large quantities of thermal energy can be stored and released at a relatively constant temperature, even when limited volumes and low operating temperature differences are applicable.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

#### Properties:

- High heat storage capacity
- Heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- Bound RCM's exhibit little volume change during phase change
- operate without fluid materials
- Long life product, cycles rugged
- Ecologically harmless and non-toxic
- easy handling
- Melting temperatures range between  $-3^{\circ}\text{C}$  and  $100^{\circ}\text{C}$ .
- Various granulate sizes are possible

Rubitherm Technologies GmbH  
Sperenberger Str. 5a  
D-12277 Berlin

Tel: +49 30 720004-62

Fax: +49 30 720004-99

E-Mail: [info@rubitherm.com](mailto:info@rubitherm.com)

Internet: [www.rubitherm.com](http://www.rubitherm.com)

*Εικόνα 2.6 : Βασικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες ενός σύνθετου ΥΑΦ το οποίο βασίζεται σε διοξείδιο του πυριτίου και σε παραφίνες της εταιρίας RUBITHERM*

### 2.4.2 Ανόργανα PCMs

Τα ανόργανα υλικά λανθάνουσας θερμότητας διακρίνονται σε ένυδρα άλατα και σε μεταλλικές ενώσεις. Τα συγκεκριμένα υλικά αλλαγής φάσης υφίστανται υψηλού βαθμού υπέρψυξη (supercooling) και ύστερα από επαναλαμβανόμενη κυκλική φόρτιση μειώνεται η ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας.

#### 2.4.2.1 Ένυδρα Άλατα

Τα ένυδρα άλατα είναι ο κύριος εκπρόσωπος των ανόργανων υλικών και παρουσιάζουν αρκετά καλές ιδιότητες (τιμή λανθάνουσας θερμότητας περίπου 250 kJ/kg και θερμικής αγωγιμότητας 0.6 W/mK), πιο μικρό κόστος παραγωγής από τις παραφίνες αλλά υψηλό κόστος πώλησης σε σχέση με τις τιμές πώλησης των παραφινών λόγω της επιβεβλημένης ενσωμάτωσής τους σε προστατευτικό κάλυμμα και χρήση πρόσθετων ουσιών σταθεροποίησης των ιδιοτήτων τους.

Ένυδρα άλατα θεωρούνται κράματα ανόργανων αλάτων και νερού σχηματίζοντας ένα τυπικό κρυσταλλικό στερεό με χημικό τύπο  $AB_nH_2O$  όπου AB είναι μία ανόργανη ουσία, ενυδατωμένη με n μόρια νερού με αποτέλεσμα το σχηματισμό μίας σύνθετης ουσίας ικανής να αποθηκεύσει μεγάλο ποσό λανθάνουσας θερμότητας.



Εικόνα 2.7 : ΥΑΦ με βάση Ένυδρα Άλατα

Η μετάβαση από στερεό σε υγρό των ένυδρων αλάτων γίνεται είτε σε ένυδρα με λιγότερα moles νερού  $AB_nH_2O \rightarrow AB_mH_2O + (n-m)H_2O$  είτε στην άνυδρη μορφή  $AB_nH_2O \rightarrow AB + nH_2O$ . Τα ένυδρα άλατα έχουν λάβει μέρος με χρήση ως PCM σε πολλές μελέτες. Ο κύριος λόγος είναι το σχετικά μεγάλο εύρος σημείων τήξης που διαθέτουν, σχεδόν από 0 έως 120°C, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για πολλές θερμικές εφαρμογές. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται αρκετά ένυδρα άλατα.



Πίνακας 2.6 : Σημείο τήξης ( $^{\circ}\text{C}$ ) και Λανθάνουσα θερμότητα τήξης ( $\text{kJ/kg}$ ) Ένυδρων Αλάτων

Melting point and latent heat of fusion: salt hydrates

Material	Melting point ( $^{\circ}\text{C}$ )	Latent heat ( $\text{kJ/kg}$ )	Group <sup>a</sup>
$\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	14.0	109	II
$\text{FeBr}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	21.0	105	II
$\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	25.5	148	II
$\text{FeBr}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	27.0	105	II
$\text{CaCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	29.8	174	I
$\text{LiNO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	30.0	296	I
$\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	30	189	I
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	32.0	267	II
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	32.4	241	II
$\text{KFe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	33	173	I
$\text{CaBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	34	138	II
$\text{LiBr}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	34	124	I
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	36.1	134	III
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	37.0	223	I
$\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	37.1	115	II
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	40.0	279	II
$\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	40.7	170	I
$\text{KF} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	42	162	III
$\text{MgI}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	42	133	III
$\text{CaI}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	42	162	III
$\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	45.0	145	II
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	45	110	III
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	47.0	142	II
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	47.0	153	I
$\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	47	155	I
$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	48	168	II
$\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	48	99	II
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	48.5	210	II
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	48.5	202	II
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	51	104	I
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	55	68	III
$\text{FeCl}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	56	90	I
$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	57.0	169	II
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	58.0	151	II
$\text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	58.0	178	II
$\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	58.0	265	II
$\text{Fe}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	60.5	126	–
$\text{NaAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	61.0	181	I
$\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$	64.3	273	I
$\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	65.0	190	–
$\text{LiCH}_3\text{COO} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	70	150	II
$\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	72	155	I
$\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	78	265	II
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	89.9	167	II
$\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	91	184	II
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	117	167	I

<sup>a</sup> Group I, most promising; group II, promising; group III, less promising; – insufficient data.



Η αρχή λειτουργίας των ένυδρων αλάτων, βασίζεται στην αποβολή του κρυσταλλικού νερού (στο σημείο τήξης), το οποίο αποβάλλεται όταν προσδοθεί θερμότητα στο άλας σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Με τον τρόπο αυτό, αποθηκεύεται θερμότητα στο PCM, η οποία θα απελευθερωθεί με επανακρυστάλλωση του νερού του άλατος.

Ένα πρόβλημα με τα περισσότερα ένυδρα άλατα είναι ότι κατά τη διαδικασία της τήξης το νερό που απελευθερώνεται δεν αρκεί για να διαλύσει όλη τη στερεή φάση. Εξαιτίας της διαφοράς στην πυκνότητα το ένυδρο άλας με το χαμηλότερο ποσοστό υγρασίας ή το άνυδρο άλας εγκαθίσταται στον πυθμένα του δοχείου δημιουργώντας ίζημα και δεν είναι διαθέσιμο για να πραγματοποιήσει την αντίστροφη διαδικασία της στερεοποίησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ενέργειας σε κάθε κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης. Επίσης, γίνεται αφυδάτωση του ένυδρου άλατος, λόγω συνεχούς και μακράς χρήσης, κατά την οποία οι φάσεις του PCM διαχωρίζονται κυρίως λόγω της πίεσης των ατμών του νερού. Το φαινόμενο του διαχωρισμού των φάσεων το οποίο συμβαίνει λόγω της ανάρμοστης τήξης του υλικού είναι σοβαρό πρόβλημα και μπορεί να αντιμετωπιστεί είτε με μηχανική ανάδευση είτε με κατάλληλη συσκευασία αεροστεγών δοχείων αποθήκευσης (encapsulating).

Τα περισσότερα ένυδρα άλατα παρουσιάζουν αδυναμία σχηματισμού πυρήνων με αποτέλεσμα την εμφάνιση του φαινομένου supercooling στο υγρό πριν την κρυσταλλοποίηση. Πιθανές λύσεις στο πρόβλημα αποτελούν η προσθήκη ουσιών που παρέχουν πυρήνες των οποίων ο σχηματισμός κρυστάλλων θα είναι ενεργοποιημένος και η παραμονή κάποιων κρυστάλλων σε μια μικρή περιοχή για τη χρήση τους ως πυρήνες. Επιπροσθέτως, τα ένυδρα άλατα παρουσιάζουν ασυμβατότητα με τα υλικά συσκευασίας, επειδή είναι ιδιαίτερα διαβρωτικά και αυτό έχει συνέπειες στο δοχείο.

Το **άλας του Glauber** ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), με τυπική κατά βάρος σύσταση 44%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  και 56%  $\text{H}_2\text{O}$  είναι ένα από τα πλέον μελετημένα υλικά με θερμοκρασία τήξης  $32,4^\circ\text{C}$  και λανθάνουσα θερμότητα  $254 \text{ kJ/kg}$ . Αν και είναι ένα από τα φθηνότερα υλικά που κυκλοφορούν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση ενέργειας, τα προβλήματα του διαχωρισμού των φάσεων, του σχηματισμού ιζήματος και του supercooling περιορίζουν το εύρος των εφαρμογών. Ερευνητές προτείνουν την προσθήκη επιπλέον ύδατος, για την αποφυγή δημιουργίας ιζήματος, όμως κάτι τέτοιο θα μείωνε την αποθηκευτική ικανότητα του υλικού.

Αντί για αυτό έχει δοκιμαστεί πληθώρα υλικών για την σταθεροποίηση του PCM, προσπαθώντας παράλληλα να αυξηθεί η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας.

Συνοψίζοντας, τα κυριότερα προβλήματα που εμφανίζει η χρήση των ένυδρων αλάτων δημιουργούνται λόγω της ανεπάρκειας σταθερότητας της χημικής σύνθεσης του υλικού και του φαινομένου διάβρωσης μεταξύ του υλικού και του υλικού συσκευασίας. Δεν είναι όμως εύφλεκτα, βασικό πλεονέκτημα σε σχέση με τις παραφίνες. Επιπλέον τα ένυδρα άλατα είναι πυκνότερα υλικά από τα υπόλοιπα PCM και παρουσιάζουν ιδιαίτερα αυξημένες τιμές αποθήκευσης ενέργειας ανά μονάδα όγκου υλικού γεγονός που οδηγεί σε εξοικονόμηση χώρου.

#### 2.4.2.2 Μεταλλικές Ενώσεις

Η συγκεκριμένη κατηγορία ανόργανων υλικών περιλαμβάνει μέταλλα χαμηλής τήξης και μεταλλικά ευτηκτικά μίγματα. Αυτά τα υλικά δεν έχουν ληφθεί ακόμη σοβαρά υπόψη ως PCMs εξαιτίας του βάρους τους, όμως έχουν υψηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου που τα καθιστά υποψήφια. Επιπλέον έχουν υψηλή τιμή θερμικής αγωγιμότητας. Άλλα χαρακτηριστικά τους είναι η χαμηλή ειδική θερμότητα, χαμηλή τάση ατμών και χαμηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα βάρους. Στον επόμενο πίνακα αναφέρονται μερικά από αυτά :

Πίνακας 2.7 : Σημείο τήξης (°C) και Λανθάνουσα θερμότητα τήξης (kJ/kg) Μεταλλικών

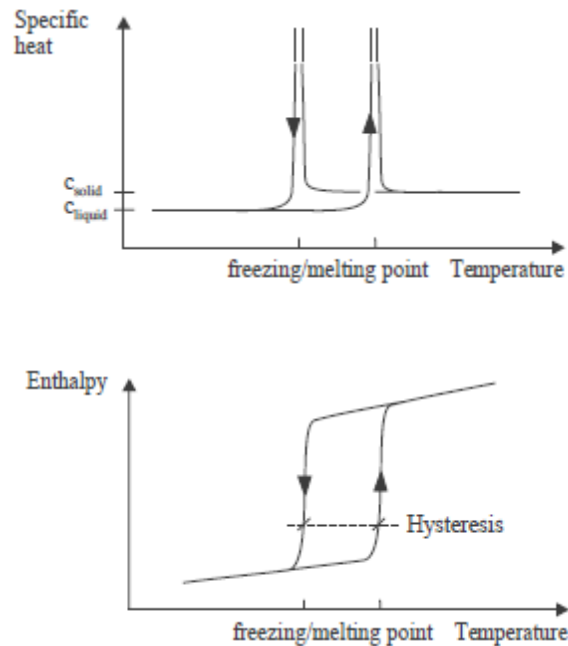
Melting point and latent heat of fusion: metallics

Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)	Group <sup>a</sup>
Gallium–gallium antimony eutectic	29.8	–	–
Gallium	30.0	80.3	I
Cerrolow eutectic	58	90.9	–
Bi–Cd–In eutectic	61	25	–
Cerrobend eutectic	70	32.6	I
Bi–Pb–In eutectic	70	29	–
Bi–In eutectic	72	25	–
Bi–Pb–tin eutectic	96	–	–
Bi–Pb eutectic	125	–	–

<sup>a</sup> Group I, most promising; group II, promising; group III, less promising; — insufficient data.

### 2.4.2.3 Σύνοψη Ιδιοτήτων Ανόργανων Υλικών

Τα ανόργανα PCMs έχουν μικρό εύρος αλλαγής φάσης οπότε παραμένουν σε σταθερή θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται ο τρόπος που συμπεριφέρονται τα υλικά αυτά κατά τον κύκλο φόρτισης – αποφόρτισης.



Σχήμα 2.8 : Ειδική Θερμοχωρητικότητα και Ενθαλπία Ανόργανων ΥΑΦ κατά την αλλαγή φάσης

### Πλεονεκτήματα

- Υψηλή ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας κατ όγκο
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα
- Υψηλή θερμοκρασία τήξης
- Υψηλότερη πυκνότητα από τα οργανικά
- Διαθεσιμότητα
- Χαμηλότερο κόστος παραγωγής
- Μη εύφλεκτα

### ***Μειονεκτήματα***

- Supercooling
- Διαχωρισμός φάσεων → Αδρανοποίηση μετά από κύκλους φορτίσεων
- Διαβρωτικά → Απαιτείται ενισχυμένη συσκευασία
- Δυνατή δημιουργία ιζήματος
- Αβέβαιη θερμική και χημική σταθερότητα
- Εκφυλισμός ιδιοτήτων σε βάθος χρόνου λόγω υγρασίας
- Αρκετά μεγαλύτερο κόστος αγοράς

### ***2.4.3 Εύτηκτα Μίγματα***

Εύτηκτα ονομάζονται τα μίγματα PCMs τα οποία μπορεί να είναι είτε οργανικά, είτε ανόργανα ή ακόμα και μίγμα ανόργανων με οργανικά PCMs. Τα εύτηκτα υλικά αλλαγής φάσης αποτελούνται από ένα ή περισσότερα συστατικά καθένα από τα οποία λιώνουν και στερεοποιούνται χωρίς προβλήματα, σχηματίζοντας ένα μίγμα κρυστάλλων των συστατικών κατά τη διαδικασία της κρυστάλλωσης.

Τα συγκεκριμένα υλικά έχουν τη δυνατότητα να αποδίδουν τα επιθυμητά σημεία τήξης σύμφωνα με την κάθε εφαρμογή. Τήκονται και στερεοποιούνται σε μικρότερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία τήξης ή πήξης των συστατικών τους σχεδόν πάντα χωρίς να εμφανίζουν διαχωρισμό των φάσεων δεδομένου ότι στερεοποιούνται σε ένα ομογενές μίγμα κρυστάλλων με ελάχιστα περιθώρια διαχωρισμού συστατικών.

Τα εύτηκτα PCMs συγκεντρώνουν τα πλεονεκτήματα και των δύο ομάδων, οργανικών και ανοργάνων, ενώ παράλληλα δεν έχουν την τάση να κάνουν το ίδιο με τα μειονεκτήματα. Βασικό μειονέκτημά τους είναι το κόστος παραγωγής, το οποίο είναι διπλάσιο έως τριπλάσιο απ' ότι των οργανικών και ανόργανων PCMs.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα κυριότερα ευτηκτικά ΥΑΦ και στη συνέχεια δίνονται επιγραμματικά τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους.

**Πίνακας 2.8 : Οργανικά και Ανόργανα Εύτηκτα Μίγματα με χρήση ως PCMs**

List of organic and inorganic eutectics

Material	Composition (wt.%)	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)	Group <sup>a</sup>
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O + CaBr <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	45 + 55	14.7	140	–
Triethylolethane + water + urea	38.5 + 31.5 + 30	13.4	160	I
C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub> + C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	34 + 66	24	147.7	–
CaCl <sub>2</sub> + MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	50 + 50	25	95	II
CH <sub>3</sub> CONH <sub>2</sub> + NH <sub>2</sub> CONH <sub>2</sub>	50 + 50	27	163	II
Triethylolethane + urea	62.5 + 37.5	29.8	218	I
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O + Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	47 + 53	30	136	–
CH <sub>3</sub> COONa·3H <sub>2</sub> O + NH <sub>2</sub> CONH <sub>2</sub>	40 + 60	30	200.5	I
NH <sub>2</sub> CONH <sub>2</sub> + NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	53 + 47	46	95	II
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O + NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	61.5 + 38.5	52	125.5	I
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O + MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	58.7 + 41.3	59	132.2	I
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O + MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	50 + 50	59.1	144	–
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O + Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O	53 + 47	61	148	–
CH <sub>3</sub> CONH <sub>2</sub> + C <sub>17</sub> H <sub>35</sub> COOH	50 + 50	65	218	–
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O + MgBr <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	59 + 41	66	168	I
Napthalene + benzoic acid	67.1 + 32.9	67	123.4	–
NH <sub>2</sub> CONH <sub>2</sub> + NH <sub>4</sub> Br	66.6 + 33.4	76	151	II
LiNO <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> + NaNO <sub>3</sub>	25 + 65 + 10	80.5	113	–
LiNO <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> + KNO <sub>3</sub>	26.4 + 58.7 + 14.9	81.5	116	–
LiNO <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> Cl	27 + 68 + 5	81.6	108	–

<sup>a</sup> Group I, most promising; group II, promising; group III, less promising; —insufficient data.

### **Πλεονεκτήματα**

- Ευδιάκριτο σημείο τήξης
- Η ογκομετρική ικανότητα αποθήκευσης είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτή των οργανικών μιγμάτων
- Δεν εμφανίζουν διαχωρισμό φάσεων

### **Μειονεκτήματα**

- Δεν υπάρχουν πολλά στοιχεία στη διεθνή βιβλιογραφία για τις θερμοφυσικές ιδιότητες αφού πρόσφατα έγινε χρήση τους στις εφαρμογές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας
- Τριπλάσιο κόστος παραγωγής από τις άλλες κατηγορίες υλικών

## 2.5 Προβλήματα των PCMs και τρόποι επίλυσης

Ένα υλικό που δύναται να χρησιμοποιηθεί ως PCM συχνά παρουσιάζει προβλήματα με αποτέλεσμα να μην πληρούνται όλες οι προϋποθέσεις για την αποδοτικότητα της χρήσης του. Στην κατεύθυνση αυτή, της μεγιστοποίησης της αξιοπιστίας και της απόδοσης των ΥΑΦ, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές αποφυγής, μετρίασης ή επίλυσης των ενδεχόμενων προβλημάτων. Τα βασικότερα προβλήματα που εμφανίζονται στα υλικά αλλαγής φάσης αναλύονται παρακάτω.

### 2.5.1 Σταθερότητα θερμικών ιδιοτήτων σε εκτεταμένη κυκλική φόρτιση

Το σοβαρότερο κριτήριο για την αξιοποίηση των PCMs σε βιομηχανικές εφαρμογές είναι ο **ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών** (χωρίς εκφυλισμό των ιδιοτήτων), ο οποίος μετράται καλύτερα σε κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης του υλικού παρά σε πραγματικές μονάδες χρόνου. Η ανεπάρκεια σταθερότητας των υλικών αποθήκευσης οφείλεται σε δύο λόγους:

- Σε μικρής σταθερότητας χημική σύνθεση του υλικού ή των υλικών που αποτελούν το PCM.
- Σε πιθανή διάβρωση μεταξύ του PCM και του υλικού συσκευασίας (container).

Η κατασκευή των δοχείων συσκευασίας για PCM πρέπει να κατευθύνεται προς την ανάδειξη φυσικής και θερμικής σταθερότητας, αφού τα PCMs πρέπει να είναι σε θέση να υποβληθούν σε επαναλαμβανόμενους κύκλους θέρμανσης και ψύξης. Ο σκοπός αυτών των δοκιμών κυκλικής φόρτισης είναι να διαπιστωθεί αν αυτές επηρεάζουν τις θερμικές ιδιότητες του PCM. Το μεγαλύτερο μέρος των ερευνών που ως αντικείμενο αναφοράς έχουν τη διατήρηση των ιδιοτήτων των PCM κατά την κυκλική φόρτιση - αποφόρτισή τους ή τη διαβρωτική τους ικανότητα, αφορούν στα ένυδρα άλατα. Για τις παραφίνες έχει βρεθεί (Gibbs and Hasnain) ότι έχουν άριστη σταθερότητα στις θερμικές τους ιδιότητες καθώς επίσης και καμία επίδραση όταν έρχονται σε επαφή με τα περισσότερα υλικά (μεταλλικά και λοιπά υλικά). Αντιθέτως, τα ένυδρα άλατα παρουσιάζουν διαβρωτικές τάσεις όταν έρχονται σε άμεση επαφή με τα μέταλλα (χαλκός, σίδηρος, κλπ). Για τα ένυδρα άλατα με περισσότερο νερό από τη στοιχειομετρική τους σύνθεση, έχει χρησιμοποιηθεί NaCl για τη βελτίωση της σταθερότητας και του χρόνου ζωής κυκλικών φορτίσεων με θετικά αποτελέσματα.

### 2.5.2 Διαχωρισμός Φάσεων

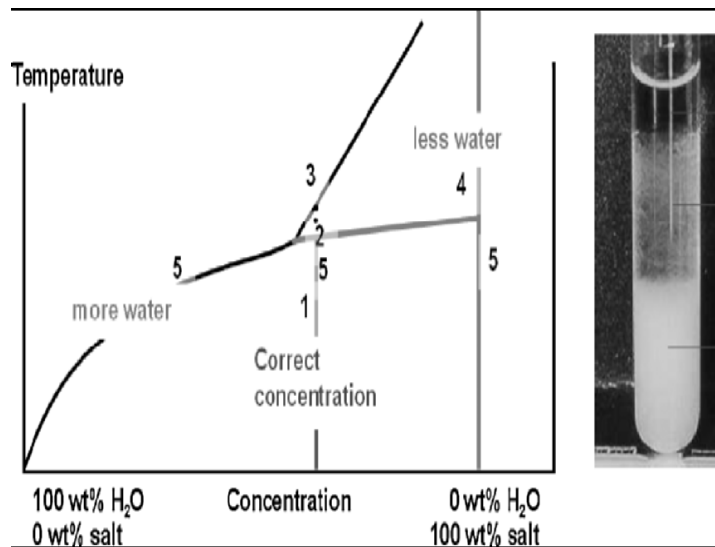
Μια καθαρή χημική ουσία (π.χ. νερό) όταν θερμανθεί πάνω από τη θερμοκρασία τήξης και λιώσει, θα έχει στην υγρή φάση την ίδια ομογενή σύσταση όπως στη στερεή. Το ίδιο θα συμβεί και όταν το υλικό ψυχθεί και οδηγηθεί σε στερεοποίηση. Επιπλέον, η ενθαλπία αλλαγής φάσης του υλικού και το σημείο τήξης του θα έχουν παραμείνει σταθερά. Τα υλικά αυτά υφίστανται αρμονική τήξη. Υπάρχουν όμως υλικά με δύο ή περισσότερα συστατικά τα οποία δεν ακολουθούν ακριβώς αυτή τη διαδικασία αλλαγής φάσης. Η συμπεριφορά κατά την αλλαγή φάσης στα ένυδρα άλατα είναι μακράν πιο περίπλοκη απ' ό,τι στα οργανικά PCM, γιατί το υλικό περνά **στάδια ενυδάτωσης και αφυδάτωσης**, και όχι απλά τις φάσεις της τήξης και της στερεοποίησης.

Τα ένυδρα άλατα εμφανίζουν τρεις κύριους τρόπους μετάβασης από τη μία φάση σε κάποια άλλη: τον ομοιόμορφο, τον ανομοιόμορφο και τον ημι-ομοιόμορφο. Η επιθυμητή συμπεριφορά είναι αυτή του ομοιόμορφου τρόπου τήξης, ο οποίος λαμβάνει χώρα όταν η σύσταση της στερεάς φάσης είναι ίδια με τη σύσταση της υγρής. Η ημι-ομοιόμορφη τήξη συμβαίνει όταν το PCM έχει δύο ή περισσότερες ένυδρες μορφές με διαφορετικές συστάσεις στερεού μέρους και διαφορετικά σημεία τήξης. Η ανομοιόμορφη τήξη λαμβάνει χώρα στην περίπτωση που κατά την τήξη του PCM εμφανίζονται **δύο ξεχωριστές φάσεις**: ένα κορεσμένο διάλυμα και ένα ίζημα αδιάλυτης άνυδρης ουσίας. Λόγω της **διαφοράς πυκνότητας** των δύο αυτών φάσεων, η στερεή φάση κατακάθεται στον πυθμένα του δοχείου αποθήκευσης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αποσύνθεση του υλικού ή διαχωρισμός των φάσεων. Το αποτέλεσμα είναι κατά την επόμενη διαδικασία στερεοποίησης να μην μπορεί να στερεοποιηθεί όλο το PCM και να χάνεται μέρος της λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης από κύκλο σε κύκλο, αφού έχει απορριφθεί από τη διαδικασία κυκλικής επαναφόρτιση μέρος της μάζας του.

Η μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα των ένυδρων αλάτων είναι δύσκολο να διατηρηθεί και συνήθως μειώνεται με τους κύκλους φόρτισης του υλικού, συνεπώς δεν μπορεί να υπολογιστεί με βεβαιότητα ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών. Ο διαχωρισμός των φάσεων του υλικού και ο πιθανός σχηματισμός ανύδρων αλάτων με δημιουργία ιζήματος θεωρείται κύρια αιτία εκφυλισμού των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών.

Τα περισσότερα ένυδρα άλατα τήκονται σύμφωνα με το κατώτερο συστατικό του μίγματος (ανομοιόμορφη τήξη), δημιουργώντας μη αναστρέψιμη διαδικασία που οδηγεί σε εξασθένηση των ιδιοτήτων τους.

Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζεται ο διαχωρισμός φάσεων ενός ένυδρου άλατος με διαφορετική συγκέντρωση νερού και πυκνότητα (δεξιά) καθώς και το αντίστοιχο διάγραμμα φάσης (αριστερά). Το ένυδρο άλας αποτελείται από δύο συνιστώσες π.χ. αλάτι και νερό. Η ενιαία φάση του ένυδρου άλατος πρώτα θερμαίνεται από το σημείο 1 (στερεό), στο σημείο 2. Μετά την θέρμανση ή ψύξη, μεταξύ των σημείων 2 και 3, δύο φάσεις σχηματίζονται, το υγρό και ένα μικρό ποσό μιας φάσης με λιγότερο νερό (σημείο 4). Εάν αυτές οι φάσεις διαφέρουν στην πυκνότητα, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μακροσκοπικό διαχωρισμό των φάσεων και ως εκ τούτου διαφορές συγκέντρωσης των συστατικών που σχηματίζουν το PCM (σημείο 5 και σχήμα δεξιά). Όταν το δείγμα θερμαίνεται σε μια θερμοκρασία όπου το σημείο της φάσης του συνόλου του δείγματος είναι στην υγρή περιοχή (σημείο 3) οι διάφορες φάσεις θα πρέπει να αναμειχθούν ξανά το οποίο μπορεί να διαρκέσει ώρες ή ακόμα και μέρες.



Σχήμα 2.8: Διαχωρισμός Φάσεων ενός ένυδρου άλατος (διακρίνονται 3 φάσεις)

Ένας τρόπος για να μετριαστεί το πρόβλημα του διαχωρισμού των φάσεων στα ένυδρα άλατα είναι η **προσθήκη επιπλέον ύδατος** κάνοντας το διάλυμα πιο αραιό με μικρότερη περιεκτικότητα σε άλας η οποία οδηγεί σε σημαντική ομογενοποίηση της υγρής φάσης από τη διασπορά του άνυδρου άλατος. Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η μείωση της πυκνότητας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και η αύξηση του εύρους θερμοκρασιών τήξης.



Άλλη μέθοδος αντιμετώπισης του διαχωρισμού των φάσεων είναι η χρήση διαδικασιών **διάχυσης** για την επίτευξη της ομογενοποίησης, οι οποίες όμως είναι αποτελεσματικές μόνο σε μικροκλίμακα αφού η ταχύτητα διάχυσης είναι ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης. Για να μειωθεί η απόσταση ώστε οι φάσεις να διαχωρίζονται στην κλίμακα των λίγων mm χρησιμοποιούνται αβαθή δοχεία και για να συγκρατούνται οι διαφορετικές φάσεις του PCM μαζί, διάφορες **πηκτικές ουσίες**. Το ίδιο αποτέλεσμα με τις πηκτικές ουσίες μπορεί να επιτευχθεί με την εισαγωγή του PCM σε ένα μικροπορώδες υλικό.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί ο διαχωρισμός φάσεων, μπορεί βέβαια να χρησιμοποιηθεί και **τεχνητή ανάμιξη**. Αυτή είναι μια πολύ γνωστή προσέγγιση για τη διάλυση της ζάχαρης στον καφέ ή του αλατιού στο νερό. Είναι ταχύτερη διαδικασία από αυτή της διάχυσης και έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε πολλά ένυδρα άλατα. Το κυριότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ο **απαραίτητος εξοπλισμός**.

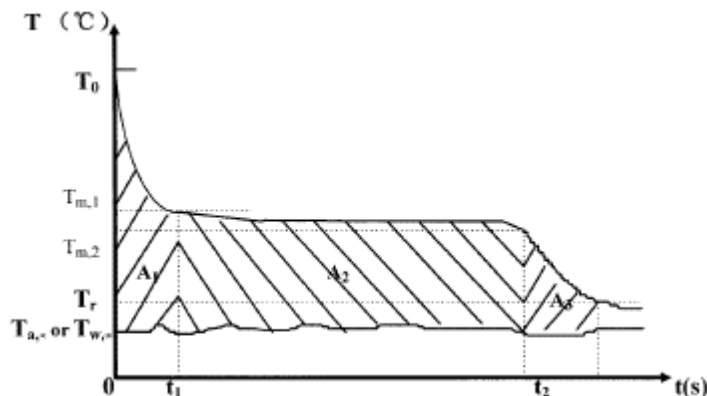
Ο καλύτερος τρόπος μείωσης της εμφάνισης του φαινομένου αλλά και πιο περίπλοκος είναι η προσθήκη υλικών στο PCM που θα του αυξήσουν το **ιξώδες** και θα το κάνουν **παχύρευστο**. Λόγω υψηλού ιξώδους ο διαχωρισμός φάσεων δε θα μπορεί να συμβεί και το υλικό θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ΥΑΦ χωρίς περιορισμούς.



*Εικόνα 2.8 : Παχύρευστο PCM με βάση Ένυδρα Άλατα*

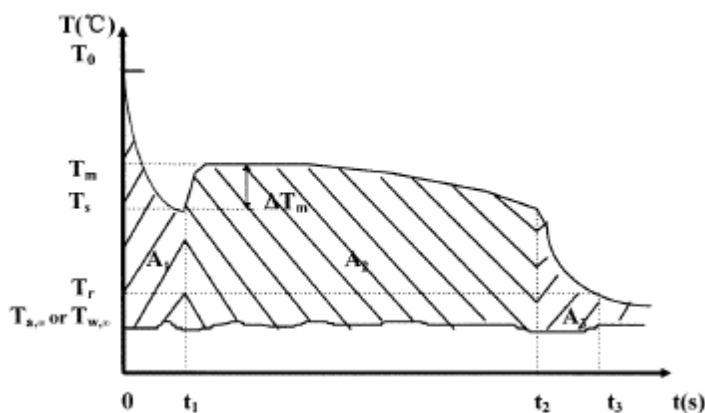
### 2.5.3 Φαινόμενο *Supercooling*

Ένα βασικό πρόβλημα των PCMs που εμφανίζεται κυρίως στα ανόργανα ένυδρα άλατα είναι το φαινόμενο της υπέρψυξης ή υπόψυξης ( *supercooling* or *subcooling* ). Ένα ιδανικό υλικό αλλαγής φάσης θα έπρεπε να στερεοποιείται και να τήκεται στην ίδια θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα :



Σχήμα 2.9 : Τοπική καμπύλη ψύξης ενός PCM χωρίς υπόψυξη

Πολλά υλικά δεν στερεοποιούνται αμέσως μετά την ψύξη τους, εάν η θερμοκρασία του υλικού είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία τήξης αλλά αρχίζουν να σχηματίζουν κρυσταλλική δομή σε θερμοκρασία πολύ χαμηλότερη από το σημείο τήξης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υπόψυξη ή υπέρψυξη και δίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Κατά τη διάρκεια της υπόψυξης το υλικό βρίσκεται σε μια μετασταθή κατάσταση. Το φαινόμενο είναι δυνατόν να περιορισθεί με **χρήση** ενός μέσου **πυρήνωσης (nucleator)**, ο οποίος προστίθεται στο ΥΑΦ για να εξασφαλίσει ότι η στερεή φάση θα σχηματισθεί με μηδαμινή ή ακόμα και καθόλου υπόψυξη.



Σχήμα 2.10 : Τοπική καμπύλη ψύξης ενός PCM με υπόψυξη

Οι πιθανοί προς χρήση πυρήνες μπορεί να είναι :

- «Εγγενείς» Πυρήνες (Intrinsic nucleators). Πρόκειται για ίδια συστατικά του ΥΑΦ, στερεά σωματίδια του PCM, τα οποία πρέπει να φυλάσσονται ξεχωριστά από το ΥΑΦ, διότι αλλιώς υπάρχει κίνδυνος να λιώσουν μαζί με αυτό και να γίνουν ανενεργά.
- «Συμβατοί» Πυρήνες (Extrinsic nucleators). Αυτοί είναι ξένοι κρύσταλλοι οι οποίοι παρουσιάζουν όμοια δομή με αυτή του PCM . Αυτό σημαίνει ότι έχουν παρόμοιες θερμοκρασίες τήξης με το PCM και επίσης πρέπει να φυλάσσονται ξεχωριστά από αυτό, γιατί απενεργοποιούνται.

Για τα περισσότερα καλά μελετημένα ΥΑΦ έχουν βρεθεί κατάλληλοι πυρήνες που περιορίζουν το φαινόμενο της υπόψυξης. Για τα πιο πρόσφατα όμως υλικά η εξεύρεση ενός μέσου πυρήνωσης είναι συνήθως χρονοβόρα κι ανεπιτυχής.

**Πίνακας 2.9 : Εύρος φάσματος Subcooling συμπυκνωμένων PCMs για διαφορετικούς παράγοντες πυρήνωσης**

Subcooling range of thickened PCMs with different nucleating agents [28]

PCM	Thickener	$T_m$ (°C)	Nucleating agent (size, $\mu\text{m}$ )	Subcooling (°C)	
				w/o nucleator	w/nucleator
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	SAP	32	Borax ( $20 \times 50 - 200 \times 250$ )	15-18	3-4
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	SAP	36	Borax ( $20 \times 50 - 200 \times 250$ )	20	6-9
			Carbon (1.5-6.7)		0-1
			TiO <sub>2</sub> (2-200)		0-1
			Copper (1.5-2.5)		0.5-1
			Aluminum (8.5-20)		3-10
$\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	CMC	46	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	20	4-6
			$\text{SrSO}_4$		0-2
			Carbon (1.5-6.7)		4-7
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	CMC	57	$\text{K}_2\text{SO}_4$	30	0-3
			$\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$		0-2

Τέλος, θα πρέπει επισημανθεί ότι ο βαθμός του supercooling δεν είναι φυσική ιδιότητα του υλικού με σταθερή τιμή αλλά μεταβάλλεται από διάφορες παραμέτρους, όπως ο όγκος του δείγματος, η «καθαρότητα» του υλικού, ο ρυθμός ψύξης, η επιφάνεια του δοχείου αποθήκευσης. Όσο μεγαλύτερος ο ρυθμός ψύξης του δείγματος, τόσο μεγαλύτερος ο βαθμός supercooling.

### 2.5.4 Μικρή τιμή θερμικής αγωγιμότητας

Ένα σημαντικό πρόβλημα των PCM που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι ότι τα περισσότερα υλικά παρουσιάζουν ιδιαίτερα χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και ως εκ τούτου για κάθε εφαρμογή αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας απαιτούνται τεχνικές βελτίωσης της μεταφοράς θερμότητας.

Η χαμηλή τιμή της θερμικής αγωγιμότητας του PCM είναι μια εγγενής ιδιότητα των μη μεταλλικών υγρών. Το πρόβλημα έγκειται στο ότι το υλικό, αποθηκεύει ένα μεγάλο ποσό θερμότητας σε μικρό όγκο και αυτή η θερμότητα πρέπει να μεταφερθεί μέσω της επιφάνειας αυτού του όγκου στο εξωτερικό περιβάλλον ώστε να χρησιμοποιηθεί από το σύστημα. Γενικά υπάρχουν δύο τρόποι βελτίωσης της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού, οι οποίοι αναφέρονται παρακάτω :

- Βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιώντας μεταφορά μάζας, με συναγωγή. Ο μηχανισμός της μεταφοράς εμφανίζεται μόνο κατά την υγρή φάση και επομένως ενεργεί μόνο όταν θερμότητα μεταφέρεται στο ΥΑΦ. Όταν η θερμότητα εξάγεται, οι στερεές μορφές σχηματίζονται στις συναλλασσόμενες με τη θερμότητα επιφάνειες.
- Βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας μέσω της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη αντικειμένων με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα στο ΥΑΦ.

Έχουν αναφερθεί διάφορες τεχνικές για τη ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας. Ο Siegel μελέτησε τη βελτίωση του ρυθμού στερεοποίησης σε λιωμένο αλάτι διασκορπισμένο με διάσπαρτα σωματίδια υψηλής θερμικής αγωγιμότητας. Οι Abhat *et al* πρότειναν χρήση σωλήνων με πτερύγια που περιέχουν PCM. Οι Bauer and Wirtz έκαναν χρήση λεπτών πλακών αλουμινίου γεμάτων με PCM, ενώ έχει δοκιμαστεί και η ενσωμάτωση του PCM σε μήτρα μεταλλικής δομής. Οι Mehling *et al* προτείνουν την ένταξη του PCM σε μήτρα γραφίτη η οποία έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας χωρίς μεγάλη μείωση της αποθήκευσης ενέργειας, μείωση της υπόψυξης στα ένυδρα άλατα και μείωση των μεταβολών όγκου στις παραφίνες.

### 2.5.5 Διάβρωση

Πολύ σημαντικός παράγοντας στη λειτουργία ενός PCM είναι **να μην είναι διαβρωτικό**, κυρίως απέναντι **σε μεταλλικά υλικά**. Δυστυχώς τα ανόργανα υλικά στην πλειοψηφία τους είναι διαβρωτικά, οι παραφίνες όμως όχι. Η διάβρωση που προκαλεί ένα PCM σε συνδυασμό με τις συνεχείς εναλλαγές θερμοκρασίας και φάσης και σε βάθος χρόνου (όχι υποχρεωτικά μεγάλο) μπορεί να καταστρέψει τη συσκευασία του PCM (το container) και κατ' επέκταση το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας.

Οι περισσότερες δοκιμές διάβρωσης έχουν πραγματοποιηθεί σε αραιωμένα ένυδρα άλατα όπως συνήθως χρησιμοποιούνται στη χημική βιομηχανία και μόνο ελάχιστα αποτελέσματα έχουν προκύψει με βάση την παρατήρηση πειραματικών διαδικασιών. Πρόσφατα οι Cabeza *et al* μελέτησαν την αντίσταση στη διάβρωση πέντε κοινών μετάλλων (αλουμίνιο, μπρούντζο, χαλκό, γάλυβα, ανοξείδωτο γάλυβα) κατά την επαφή με λιωμένα ένυδρα άλατα (ανθρακικό νάτριο, χλωριούχο κάλιο, τριυδρικό οξικό νάτριο κ.ά.).

Επιπλέον, ακόμα πιο πρόσφατα, οι Sari & Kaygusuz διερεύνησαν την αντίσταση στη διάβρωση από λιπαρά οξέα (στεατικό οξύ, παλμιτικό οξύ κ.ά.) ορισμένων δομικών υλικών κατασκευής. Τα containers ήταν από υλικά ανοξείδωτου γάλυβα, ανθρακικού γάλυβα, αλουμινίου και χαλκού. Το συμπέρασμα που έχει εξαχθεί είναι ότι μόνο ένα μεταλλικό container από ανοξείδωτο γάλυβα μαζί με μια επιφανειακή στρώση οξειδίου του χρωμίου, και container από αλουμίνιο με μερικά επιφανειακά στρώματα οξειδίου του αλουμινίου έχουν συμβατότητα με τα λιπαρά οξέα και δεν διαβρώνονται. Ο κλασικός γάλυβας και ο χαλκός προτιμούνται γιατί αποτελούν πιο συμβατά υλικά.

## 2.6 Μέθοδοι μέτρησης ιδιοτήτων

Ο υπολογισμός των ιδιοτήτων ενός ΥΑΦ είναι πολύ σημαντικός για την επιλογή του κατάλληλου υλικού ανάλογα με την εφαρμογή. Οι κυριότερες ιδιότητες του υλικού που πρέπει να εξετάζονται είναι:

- Σημείο τήξης
- Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
- Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση
- Λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης-στερεοποίησης
- Βαθμός supercooling
- Βαθμός διαχωρισμού των φάσεων
- Βαθμός διάβρωσης σε διάφορα «κοινά» υλικά

Οι ιδιότητες των ΥΑΦ εξετάζονται με δύο κατηγορίες μεθόδων:

- Με μεθόδους με τις οποίες εξετάζονται οι ιδιότητες σε περιορισμένο χρονικό διάστημα και για ένα μόνο κύκλο φόρτισης του υλικού.
- Με μεθόδους με τις οποίες εξετάζονται οι ιδιότητες σε μεγάλο χρονικό διάστημα και για πολλούς κύκλους φόρτισης του υλικού.

Η θερμική ανάλυση περιλαμβάνει μια ομάδα από τεχνικές με τις οποίες μια φυσική ιδιότητα μιας ουσίας μετριέται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, ενώ η ουσία υποβάλλεται σε ελεγχόμενο πρόγραμμα θερμοκρασίας. απαιτείται προσοχή κατά την προετοιμασία του δείγματος μέτρησης, το οποίο πρέπει να εκπροσωπεί το υλικό που διερευνάται. Λόγω πολύ πιο συχνής εμφάνισης της υπόψυξης σε μικρά δοχεία και ανομοιογένειας των υλικών των ΥΑΦ (πολλά περιέχουν παράγοντες πυρήνωσης που δεν μπορούν να διαλυθούν στην υγρή φάση) απαιτείται αντιπροσωπευτική φυσική και χημική σύνθεση του μεγαλύτερου μέρους του υλικού και όσο δυνατόν μεγαλύτερη ποσότητα υλικού. Ωστόσο, μεγάλα μεγέθη δειγμάτων οδηγούν σε μεγαλύτερες κλίσεις θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δείγματος κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Η θερμοκρασία μετράται σε ένα μόνο σημείο του δείγματος, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι θερμοκρασιακές διαφορές στο δείγμα και να προκύπτει καλή συμφωνία μεταξύ πραγματικής και μετρούμενης θερμοκρασίας του δείγματος.

Οι συνηθέστερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση του σημείου τήξης, της λανθάνουσας θερμότητας τήξης και της ειδικής θερμοχωρητικότητας, είναι:

- Συμβατική θερμιδομετρική μέθοδος (Conventional Calorimetry Method)
- Διαφορική Θερμιδομετρία Σαρώσεως (Differential Scanning Calorimetry - DSC)
- Διαφορική θερμική ανάλυση (Differential Thermal Analysis - DTA)
- Μέθοδος T - History

Το κύριο πλεονέκτημα των τριών πρώτων μεθόδων είναι η ακρίβεια των μετρούμενων μεγεθών, ενώ τα μειονεκτήματα συνοψίζονται στα εξής:

- Το δείγμα που χρησιμοποιείται είναι πολύ μικρό, ενώ οι περισσότερες ιδιότητες των ΥΑΦ επηρεάζονται από το μέγεθος του δείγματος ή από το αν το ΥΑΦ είναι συσκευασμένο ή όχι. Επιπλέον αν το υλικό είναι μη ομογενές είναι δύσκολη έως αδύνατη η επιλογή αντιπροσωπευτικού δείγματος .
- Σε μία μέτρηση δεν μπορούν να μετρηθούν ταυτόχρονα πολλά δείγματα αλλά θα πρέπει να επαναλαμβάνεται το πείραμα τόσες φορές όσες και ο αριθμός δειγμάτων.
- Ο εξοπλισμός που απαιτείται για τη διεξαγωγή των πειραμάτων είναι πολύπλοκος και πολυδάπανος.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου T – History είναι η δυνατότητα χρήσης σχετικά μεγάλου μεγέθους δείγματος , η ταυτόχρονη μέτρηση πολλών δειγμάτων σε ένα πείραμα και η οπτική παρατήρηση του πειράματος. Επιπλέον, απαιτεί χαμηλότερο κόστος συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους και λόγω της δυνατότητας μεγάλου μεγέθους δείγματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανόργανα και οργανικά, ενσωματωμένα σε κάψουλες ή σύνθετα PCM Τα μειονεκτήματά της είναι σφάλματα μετρήσεων τα οποία έχουν άμεση σχέση με την κατασκευή της πειραματικής διάταξης και τη διεξαγωγή πειραμάτων

### **2.6.1 Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA)**

Η διαφορική θερμική ανάλυση (DTA) είναι μια τεχνική θερμικής ανάλυσης κατά την οποία μετράται η διαφορά θερμοκρασίας που αναπτύσσεται μεταξύ ενός δείγματος του υλικού που εξετάζεται και ενός αδρανούς υλικού αναφοράς όταν αμφότερα υπόκεινται σε πανομοιότυπο θερμοκρασιακό καθεστώς εντός περιβάλλοντος ελεγχόμενης θέρμανσης ή ψύξης. Στη συνέχεια οι διαφορές αυτές της

θερμοκρασίας που παρατηρούνται κατά τη θέρμανση ή τη ψύξη του δείγματος και του υλικού αναφοράς καταγράφονται είτε συναρτήσει του χρόνου είτε συναρτήσει της θερμοκρασίας (καμπύλη DTA). Έτσι τυχόν αλλαγές στο δείγμα που οδηγούν στην απορρόφηση ή έκλυση θερμότητας μπορούν να ανιχνευθούν μετά από σύγκριση με το αδρανές υλικό αναφοράς. Εκτός όμως από διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ δείγματος και υλικού αναφοράς, διαφορές θερμοκρασίας μπορούν να προκύψουν μεταξύ δύο αδρανών δειγμάτων όταν η απόκριση τους στη θερμική επεξεργασία που εφαρμόζεται δεν είναι ταυτόσημη. Επομένως η DTA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη των θερμικών ιδιοτήτων και των αλλαγών φάσης χωρίς μεταβολή της ενθαλπίας.

Η καμπύλη της DTA παρέχει στοιχεία σχετικά με τους μετασχηματισμούς που έχουν σημειωθεί, όπως είναι οι μεταβάσεις γυαλιού, η κρυστάλλωση, η τήξη και η εξάχνωση. Η μορφή της παρουσιάζει ασυνέχειες στις θερμοκρασίες μετάβασης και η κλίση της καμπύλης σε οποιοδήποτε σημείο θα εξαρτηθεί από τη συγκρότηση της μικροδομής στη συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Η DTA αποτελείται από ένα σύστημα συγκράτησης του δείγματος που περιλαμβάνει θερμοζεύγη, τα δοχεία δείγματος και μια κεραμική ή μεταλλική κατασκευή (block), από έναν κλίβανο, έναν προγραμματιστή θερμοκρασίας, και ένα σύστημα καταγραφής. Ο κλίβανος θα πρέπει να παρέχει μια σταθερή και αρκετά μεγάλη ζεστή ζώνη και πρέπει να μπορεί να ανταποκρίνεται γρήγορα στις εντολές από το προγραμματιστή θερμοκρασίας. Ένας προγραμματιστής θερμοκρασίας τώρα είναι απαραίτητος για να επιτευχθεί σταθερός ρυθμός θέρμανσης. Το καταγραφικό σύστημα έπειτα πρέπει να έχει χαμηλή αδράνεια για να αναπαραγάγει πιστά τις διακυμάνσεις στην πειραματική διάταξη. Το πιο σημαντικό όμως από όλα είναι η ύπαρξη των δύο θερμοζευγών του συστήματος συγκράτησης που συνδέονται με ένα βολτόμετρο. Το ένα θερμοζεύγος τοποθετείται σε ένα αδρανές υλικό, όπως , ενώ το άλλο τοποθετείται σε ένα δείγμα του υλικού που μελετάται. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, θα υπάρξει μια σύντομη εκτροπή του βολτόμετρου αν το δείγμα υφίσταται μετάβαση φάσης, επειδή η είσοδος της θερμότητας θα αυξήσει τη θερμοκρασία της αδρανούς ουσίας και θα ενσωματωθεί ως λανθάνουσα θερμότητα στο υλικό με αλλαγή της φάσης του.



### 2.6.2 Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (DSC)

Κατά τη διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης (DSC) μετρίεται η διαφορά στο ποσό θερμότητας που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας ενός δείγματος και ενός υλικού αναφοράς, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Ειδικότερα μετρά την θερμοκρασία και τη ροή θερμότητας που συνδέονται με μεταβάσεις στα υλικά ως συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας.

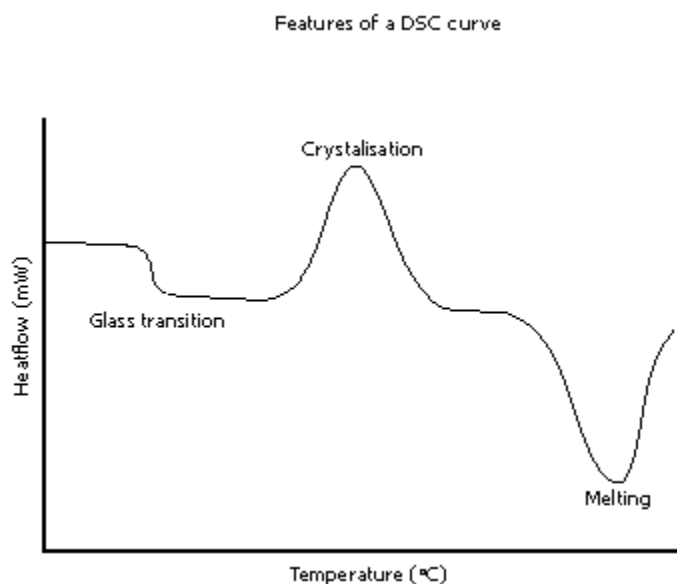
Η μέθοδος παρέχει ποιοτικές και ποσοτικές πληροφορίες σχετικά με τις φυσικές και χημικές αλλαγές που αφορούν ενδόθερμες ή εξώθερμες διαδικασίες ή αλλαγές στη θερμοχωρητικότητα χρησιμοποιώντας ελάχιστες ποσότητες δείγματος. Έχει πολλά πλεονεκτήματα όπως γρήγορο χρόνο ανάλυσης (συνήθως τριάντα λεπτά) εύκολη προετοιμασία του δείγματος, εφαρμογή όχι μόνο στα υγρά αλλά και στα στερεά και σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Τόσο το δείγμα όσο και το υλικό αναφοράς διατηρούνται σχεδόν στην ίδια θερμοκρασία σε όλο το πείραμα.

Σε γενικές γραμμές, το πρόγραμμα θερμοκρασίας για μια ανάλυση DSC είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε η θερμοκρασία του δείγματος να αυξάνεται γραμμικά ως συνάρτηση του χρόνου. Το δείγμα αναφοράς επίσης πρέπει να έχει μια καλά καθορισμένη θερμοχωρητικότητα στην περιοχή των θερμοκρασιών που πρόκειται να σαρωθεί. Υπάρχουν δύο είδη οργάνων DSC σήμερα που χρησιμοποιούνται: τα όργανα «ροής θερμότητας» και «αντιστάθμισης ισχύος», τα οποία αν και είναι ριζικά διαφορετικά στο σχεδιασμό, τα δεδομένα που παράγονται είναι συγκρίσιμα.

Η βασική αρχή που διέπει αυτήν την τεχνική είναι ότι όταν το δείγμα υφίσταται κάποια φυσική αλλαγή όπως μεταβάσεις φάσης, χρειάζεται ροή θερμότητας σε αυτό από ότι στο υλικό αναφοράς για να διατηρηθεί και στα δύο η ίδια θερμοκρασία. Κατά πόσο λιγότερη ή περισσότερη θερμότητα πρέπει να μεταβιβαστεί προς το δείγμα εξαρτάται από το αν η διαδικασία είναι εξώθερμη ή ενδόθερμη.

Παρατηρώντας τη διαφορά στη ροή θερμότητας μεταξύ του δείγματος και του υλικού αναφοράς, **διαφορικά θερμιδόμετρα σάρωσης** μετρούν την ποσότητα της θερμότητας που απορροφάται ή απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια τέτοιων μεταβάσεων. Η DSC μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την παρατήρηση πιο λεπτών αλλαγών φάσης, όπως υαλώδεις μεταβάσεις.

Αυτού του είδους οι μεταβάσεις μπορεί να εμφανιστούν όταν αυξάνεται η θερμοκρασία ενός άμορφου στερεού και δίνονται ως ένα βήμα στη βασική γραμμή του καταγραφόμενου σήματος DSC. Μια τυπική καμπύλη DSC η οποία παρουσιάζει τα σημεία εμφάνισης ορισμένων κοινών χαρακτηριστικών είναι η παρακάτω :



*Σχήμα 2.11 : Τυπική μορφή καμπύλης DSC*

Συνοψίζοντας, η δυνατότητα καθορισμού των θερμοκρασιών μετάβασης κάνει τη DSC ένα πολύτιμο εργαλείο για την παραγωγή διαγραμμάτων φάσης για διάφορα χημικά συστήματα. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση πολλών χαρακτηριστικών ιδιοτήτων ενός δείγματος όπως υαλώδεις μεταβάσεις, σημεία τήξης και βρασμού, χρόνος κρυστάλλωσης και θερμοκρασία, ποσοστό κρυσταλλικότητας, θερμότητα τήξης, ειδική θερμότητα και θερμοχωρητικότητα κτλ. Ακόμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της οξειδωσης, καθώς και άλλων χημικών αντιδράσεων.

Οι μέθοδοι DTA και DSC είναι καλά ανεπτυγμένες όμως τα δείγματα που ελέγχονται από αυτές είναι πολύ μικρά (1-10 mg), με τις θερμοφυσικές ιδιότητες των δειγμάτων να είναι συνήθως διαφορετικές από εκείνες του μεγαλύτερου μέρους των υλικών που χρησιμοποιούνται σε πρακτικά συστήματα. Επιπλέον, δεν μπορούν να μετρήσουν θερμοότητες τήξης, ειδικές θερμότητες και θερμικές αγωγιμότητες διαφόρων δειγμάτων PCM ταυτόχρονα.

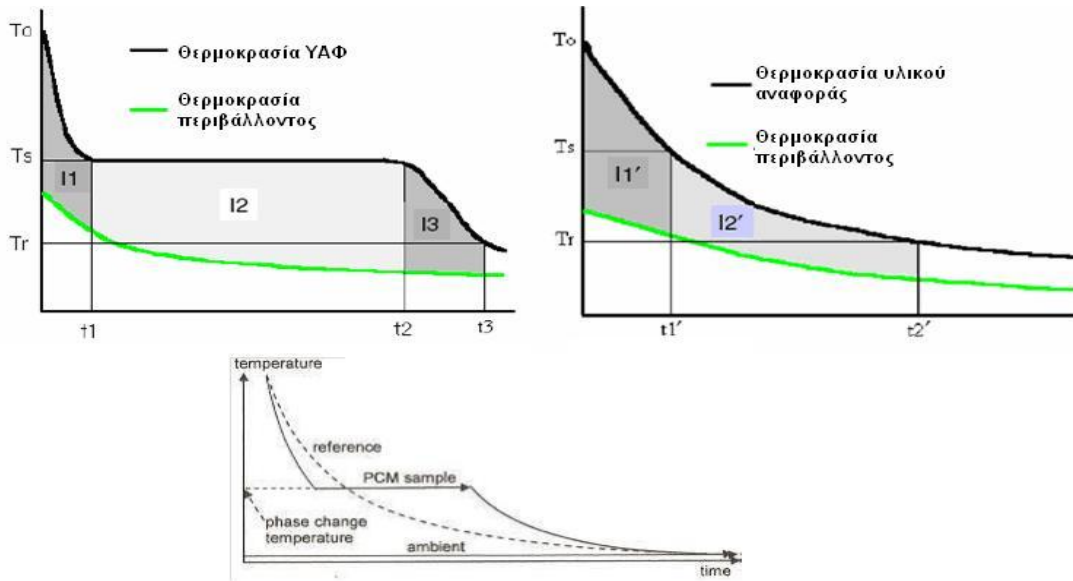
### 2.6.3 Μέθοδος T - History

Με βάση τη μέθοδο T-History μπορούν να καθοριστούν το σημείο τήξης, ο βαθμός υπέρψυξης, η θερμοκρασία τήξης, η ειδική θερμότητα και η θερμική αγωγιμότητα διαφόρων δειγμάτων PCM ταυτόχρονα. Είναι μία μέθοδος μετρήσεων που χρησιμοποιείται επιτυχώς και προτάθηκε από τους Zhang Yinping και Jiang Li. Κατά τη μέθοδο αυτή το δείγμα PCM και ένα άλλο δείγμα με γνωστές θερμικές ιδιότητες και ομοιόμορφη θερμοκρασία, υπόκεινται σε ατμοσφαιρικό αέρα θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Για την εφαρμογή της μεθόδου, αναμένονται θετικά αποτελέσματα, μόνο στις περιπτώσεις όπου ο αριθμός Biot είναι μικρότερος του 0.1, περιορισμός που τίθεται εξ αιτίας της υπόθεσης της ομοιόμορφης θερμοκρασίας του ΥΑΦ στο σωλήνα δοκιμής κατά την αποφόρτιση. Οι σωλήνες δοκιμής έχουν τη μορφή :



Εικόνα 2.9 : Σωλήνες που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο T-History

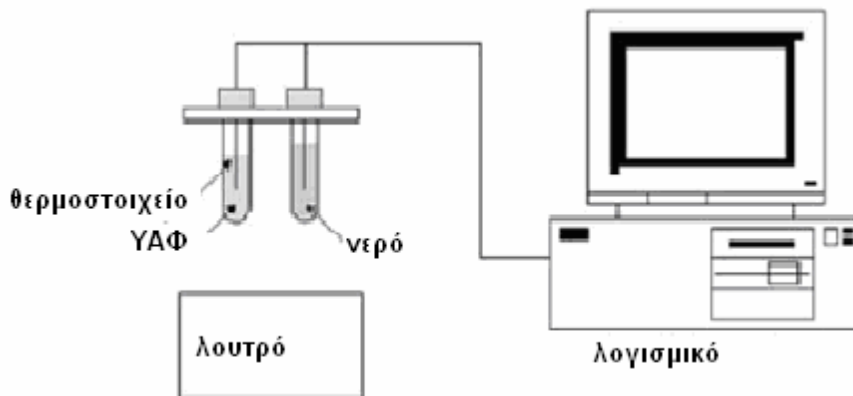
Οι σωλήνες δοκιμής γεμίζονται αντίστοιχα με το ΥΑΦ και με το υλικό αναφοράς (συνήθως χρησιμοποιείται καθαρό νερό) του οποίου οι θερμοκρασίες παραμένουν αρχικά ίδιες και μεγαλύτερες από τη χαμηλή θερμοκρασία του ΥΑΦ. Το πείραμα της μεθόδου T-History είναι πολύ απλό. Οι σωλήνες δοκιμής παραμένουν αρχικά κάθετα σε ένα λουτρό σταθερής θερμοκρασίας, και ξαφνικά εκτίθενται στην ατμόσφαιρα. Οι θερμοκρασίες στους σωλήνες δοκιμής και την ατμόσφαιρα αρχίζουν ταυτόχρονα να μετρώνται. Οι δύο καμπύλες T-History, που εμφανίζουν τη μεταβολή της θερμοκρασίας, λαμβάνονται για το ΥΑΦ και για το υλικό αναφοράς. Οι θερμικές ιδιότητες όπως η θερμότητα τήξης και η ειδική θερμοχωρητικότητα, μπορούν να υπολογιστούν από τα μετρημένα πειραματικά δεδομένα και τις καμπύλες αυτές.



Σχήμα 2.12 : Καμπύλες T-History ΥΑΦ και υλικού αναφοράς επάνω και κάτω στο ίδιο διάγραμμα

Οι καμπύλες αυτές αποτελούν την «ιστορία της θερμοκρασίας» τους. Μια σύγκριση των δύο καμπυλών, χρησιμοποιώντας μια μαθηματική περιγραφή της μεταφοράς θερμότητας, επιτρέπει τον προσδιορισμό της θερμοχωρητικότητας του PCM έχοντας γνωστή του υλικού αναφοράς.

Η πειραματική διάταξη που παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα περιλαμβάνει δοκιμαστικούς σωλήνες των οποίων ο λόγος  $L / D$  πληροί τον όρο  $Bi < 0.1$  όπως προαναφέρθηκε, ο οποίος είναι απαραίτητος ώστε η γεωμετρία των σωλήνων να επιτρέπει μονοδιάστατη μεταφορά της θερμότητας. Περιλαμβάνει ακόμα το λουτρό θερμού ύδατος, για τη θέρμανση του δείγματος και του υλικού αναφοράς στην αρχική θερμοκρασία, αισθητήρες θερμοκρασίας, θερμοζεύγη τύπου T για μέτρηση της θερμοκρασίας του PCM, του νερού και του ατμοσφαιρικού αέρα και εξοπλισμό λήψης δεδομένων συνδεδεμένο με έναν υπολογιστή.



Σχήμα 2.13 : Σχηματική απεικόνιση της διάταξης της μεθόδου T- History

## 2.7 Προσομοίωση μεταφοράς θερμότητας με αλλαγή φάσης

Το πιο σημαντικό κριτήριο σύμφωνα με το οποίο επιλέγεται ένα PCM είναι η θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Μόνο με κατάλληλη επιλογή υλικού ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να διασφαλιστεί η επανειλημμένη κυκλική φόρτιση (τήξης – στερεοποίησης) του υλικού. Οι διαδικασίες της τήξης και της στερεοποίησης είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τη μεταφορά θερμότητας. Η μεταφορά θερμότητας συντελεί στην αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε ένα PCM.

Η ανάπτυξη ενός θερμικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας συνεπάγεται ως εκ τούτου την κατανόηση κυρίως της μεταφοράς θερμότητας (των ανταλλαγών) στα PCMs όταν υποβάλλονται σε μετάβαση από τη στερεή στην υγρή φάση στο απαιτούμενο λειτουργικό εύρος θερμοκρασίας. Όπως κάθε φυσικό φαινόμενο, έτσι και το πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας με αλλαγή φάσης στερεού-υγρού, απαιτεί προσεγγίσεις για τη μαθηματική περιγραφή του.

Τα προβλήματα στερεοποίησης και τήξης είναι μη γραμμικά με την μαθηματική έννοια, λόγω της ύπαρξης ενός κινούμενου ορίου (**διεπιφάνεια**) μεταξύ των δύο φάσεων το οποίο κινείται ανάλογα με την ταχύτητα με την οποία η λανθάνουσα θερμότητα απορροφάται ή χάνεται στο όριο. Έτσι ούτε η θέση ούτε η ταχύτητα της διεπιφάνειας μπορούν να προβλεφθούν εκ των προτέρων.

Οι εξισώσεις που διέπουν το πρόβλημα αυτό, βασίζονται στην ιδέα ενός μοντέλου συνέχειας. Επιπλέον, κάθε φάση υποτίθεται ότι είναι ομοιογενής και ιστροπική. Η παρουσία της πυκνότητας που αλλάζει μεταξύ των φάσεων έχει μακροπρόθεσμες συνέπειες. Σε εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης, η μεταφορά θερμότητας εμποδίζεται από μη επιθυμητές κοιλότητες, οι οποίες δημιουργούνται κατά τη στερεοποίηση επειδή η στερεή φάση είναι πιο πυκνή από την υγρή φάση.

Η φυσική κυκλοφορία μεταφοράς στο υγρό θα μπορούσε να έχει σημαντική κατεύθυνση στην κίνηση. Κατά την τήξη η φυσική συναγωγή προκαλεί απόσπασση και έπειτα μετακίνηση του στερεού υλικού στο εσωτερικό της υγρής φάσης. Καταστάσεις όπου οι διαφορές πυκνότητας είναι παρούσες μεταξύ των φάσεων ή όπου μεταβολές πυκνότητας προκαλούνται στο υγρό, απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή.

Η μαθηματική ανάλυση γίνεται τέλος πιο περίπλοκη όταν οι φυσικές ιδιότητες του υλικού αλλαγής φάσης (PCM) εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και όταν οι οριακές συνθήκες είναι του τύπου που εφαρμόζονται σε συναγωγή και ακτινοβολία

Οι αναλυτικές λύσεις για τα προβλήματα αλλαγής φάσης έχουν χρησιμοποιηθεί μόνο για μερικές φυσικές καταστάσεις με απλή γεωμετρία και συνθήκες απλών ορίων και για υπολογισμό ημι-άπειρης ή άπειρης αποθήκευσης, γεγονός το οποίο δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα όπου οι αποθηκεύσεις είναι πεπερασμένες και πρέπει να αντιμετωπιστούν σε τρεις ή τουλάχιστον δύο διαστάσεις, έτσι ώστε να επιτευχθεί μια αρκετά ακριβής λύση. Αντίθετα αριθμητικές μέθοδοι με βάση τις πεπερασμένες διαφορές, τα πεπερασμένα στοιχεία και πιο πρόσφατα τα στοιχεία των ορίων φαίνεται να προσφέρουν μια πιο πρακτική προσέγγιση για την επίλυση των προβλημάτων αλλαγής φάσης.

Στη διεθνή βιβλιογραφία, οι πιο συνηθισμένες αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι η μέθοδος της ενθαλπίας και η μέθοδος της ενεργού θερμοχωρητικότητας. Οι δύο μέθοδοι προσομοίωσης προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας με αλλαγή φάσης, διαχωρίζονται με βάση την επιλογή της εξαρτημένης μεταβλητής που χρησιμοποιείται.

### **2.7.1 Μέθοδος της Ενθαλπίας**

Η μέθοδος της ενθαλπίας εισάγεται σε πολλές αναφορές ως μια αριθμητική μέθοδος για την επίλυση των προβλημάτων αλλαγής φάσης και βασίζεται στην αδύνατη επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Χρησιμοποιείται έτσι ώστε η μόνη άγνωστη μεταβλητή να είναι η θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης. Η μέθοδος αυτή συνεπώς αντιμετωπίζει την **ενθαλπία** ως μια **εξαρτημένη μεταβλητή** από τη θερμοκρασία και υλοποιεί τη ροή λανθάνουσας θερμότητας μέσω της ογκομετρικής ολοκλήρωσης με τη χρήση της ενθαλπίας του συστήματος.

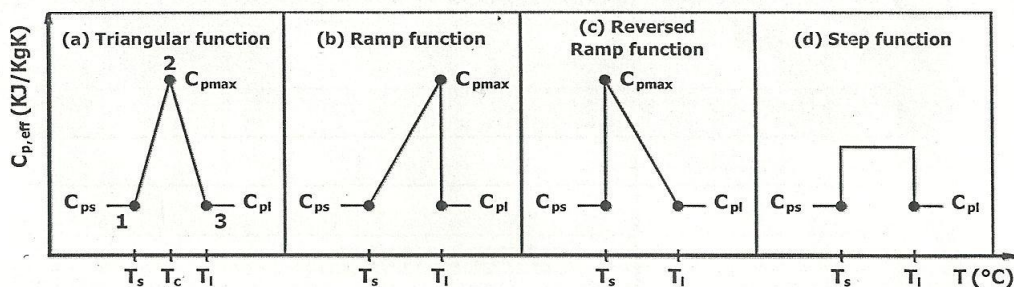
Η σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της ενθαλπίας θα εξαρτηθεί από τη φύση της αλλαγής φάσης. Για παράδειγμα για ένα καθαρό υλικό, που υφίσταται μια αλλαγή φάσης τήξη-πήξη, όλη η λανθάνουσα θερμότητα απορροφάται σε μια σταθερή θερμοκρασία  $T$ . Σε πολλά όμως φυσικά προβλήματα η αλλαγής φάσης γίνεται σε ένα εύρος θερμοκρασιών. Στην περίπτωση αυτή η ενθαλπία  $H(T)$  αντικαθίσταται από μια ομαλή συνεχή συνάρτηση, ή μια τμηματικά συνεχή συνάρτηση.

### 2.7.2 Μέθοδος της Ενεργού Θερμοχωρητικότητας

Η μη ισοθερμική αλλαγή φάσης στο PCM είναι επίσης δυνατόν να περιγραφεί με την ενεργό θερμοχωρητικότητα. Αυτή η προσέγγιση αναφέρεται ως η βασισμένη στην θερμοκρασία μέθοδος και είναι αυτή που χρησιμοποιείται συχνότερα. Η ενεργός θερμοχωρητικότητα του υλικού ( $C_{eff}$ ) είναι ευθέως ανάλογη προς την ενέργεια που αποθηκεύεται και απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης και αντιστρόφως ανάλογη προς το εύρος της περιοχής τήξης-στερεοποίησης ( $\Delta T$  of fusion). Στη μέθοδο αυτή η **θερμοχωρητικότητα** αντιμετωπίζεται ως μια **συνάρτηση της θερμοκρασίας** στην περιοχή θερμοκρασιών αλλαγής φάσης.

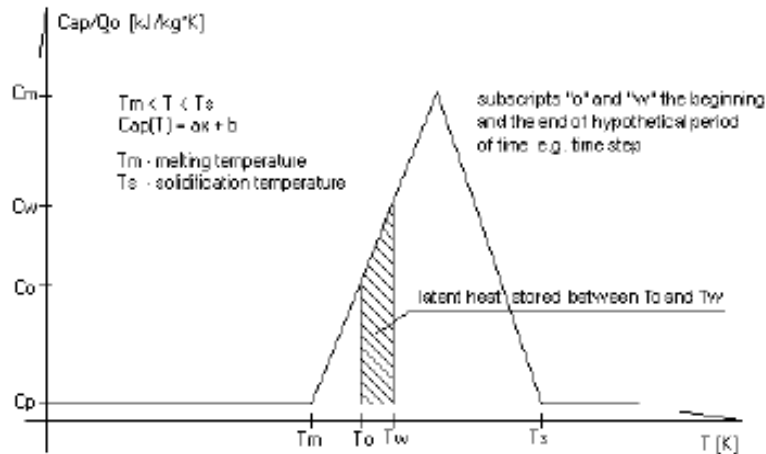
Κάτω από τη θερμοκρασία τήξης το υλικό έχει αποφορτιστεί πλήρως και επιπλέον ενέργεια αποθηκεύεται ως αισθητή θερμότητα. Κατά τη διάρκεια του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης, οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του υλικού περιορίζονται από σχεδόν ισοθερμική διαδικασία, τήξης ή στερεοποίησης. Θερμοκρασία ίση ή πάνω από τη θερμοκρασία στερεοποίησης είναι δυνατή μόνο για κατάσταση πλήρους φορτίου. Ως εκ τούτου, το υλικό μπορεί να είναι **εκτός της περιοχής θερμοκρασιών αλλαγής φάσης** μόνο σε δύο περιπτώσεις: **όταν είναι πλήρως φορτισμένο, ή αποφορτισμένο.**

Συνεπώς, το μοντέλο της ενεργού θερμοχωρητικότητας είναι ο πιο απλός τρόπος προσομοίωσης της αλλαγής φάσης. Μοναδική δυσκολία της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η επιλογή της σωστής συνάρτησης  $C_{P,eff}(T)$ . Τα δεδομένα που χρειάζονται για να προκύψει η συνάρτηση  $C_{P,eff}(T)$  είναι η θερμότητα αλλαγής φάσης  $H$  του PCM δηλαδή η λανθάνουσα θερμότητα τήξης (latent heat of fusion), οι θερμοκρασίες  $T_s$  και  $T_L$  στα άκρα της διφασικής περιοχής του PCM καθώς επίσης και οι αντίστοιχες θερμοχωρητικότητες  $C_{P,Solid}$  και  $C_{P,Liquid}$ . Στο σχήμα παρουσιάζονται συναρτήσεις προσδιορισμού της  $C_{P,eff}(T)$  στην περιοχή θερμοκρασιών αλλαγής φάσης.



Σχήμα 2.14 : Συναρτήσεις ενεργού θερμοχωρητικότητας απλού γεωμετρικού σχήματος για PCM

Από τις παραπάνω «συναρτήσεις παρεμβολής», ύστερα από εκτεταμένες συγκρίσεις, εκείνη που θεωρείται ότι εκφράζει με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια την πραγματικότητα και δίνει παρόμοιες τιμές με πειραματικές μετρήσεις είναι η **συνάρτηση τριγωνικής μορφής** για την ενεργό θερμοχωρητικότητα.



Σχήμα 2.15 : Γραφική παράσταση της μεθόδου ενεργού θερμοχωρητικότητας

Συνοψίζοντας, στην περιοχή του εύρους θερμοκρασιών αλλαγής φάσης, η ενεργός θερμοχωρητικότητα του PCM περιγράφεται από τη σχεδόν τριγωνική συνάρτηση παρεμβολής ( $C_{P,Solid} < C_{P,Liquid}$ ) της παραπάνω μεθόδου ενώ, έξω από το εύρος αυτών των θερμοκρασιών το υλικό συμπεριφέρεται σαν ένα υλικό σταθερής θερμοχωρητικότητας. [References<sup>1</sup>]

<sup>1</sup> References - Chapter 2 : [www.Rubitherm.com](http://www.Rubitherm.com)

Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009), p. 318–345

Harald Mehling and Luisa F. Cabeza: Phase Change Materials and their Basic Properties, Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption, Springer, Part V (2007)

Daniel. R. Rousse, Nizar Ben Salah, and Stéphane Lassue, An Overview of Phase Change Materials and their Implication on Power Demand

Mohammed M. Farid, Amar M. Khudhair, Siddique Ali K. Razack, A review on phase change energy storage: materials and applications, Energy Conversion and Management 45 (2004) p.1597–1615

Ghoneim.A.A. & Klein.S.A, Phase Change Materials Analysis, Solar Energy, Vol.47, No.3., 1991

M Fatih Demirbas, Thermal Energy Storage and Phase Change Materials: An Overview

D. Zhou, C.Y. Zhao, Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, Applied Energy 92 (2012) p. 593–605

Dariusz Heim, Two solution methods of heat transfer with phase change within whole building dynamic simulation, Ninth International IBPSA Conference (2005)



## 2.8 Συσκευασία των PCMs – Παράγωγα Υλικά

Η επιτυχής χρήση των PCMs στα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας απαιτεί την προστασία του υλικού σε κάποιο είδος συσκευασίας (τοποθέτηση σε κάψουλες ή σακούλες, ενσωμάτωση στο πορώδες υλικό άλλων υλικών, εναλλάκτες θερμότητας ενισχυμένοι με ΥΑΦ) ώστε να προφυλαχθεί το υλικό από την επίδραση των συνθηκών του περιβάλλοντος και να διευκολύνει τη μετάδοση της αποθηκευμένης λανθάνουσας θερμότητας. Η συσκευασία του PCM θα πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες προϋποθέσεις :

- Τήρηση των απαιτήσεων της αντοχής, της ευελιξίας, της αντίστασης σε διάβρωση και της θερμικής σταθερότητας.
- Δράση ως μέσο προστασίας του PCM από επιβλαβή αλληλεπίδραση με το περιβάλλον.
- Παροχή επαρκούς επιφάνειας για τη μεταφορά θερμότητας.
- Παροχή δομικής κατασκευαστικής σταθερότητας και εύκολου χειρισμού.

Τα είδη διαθέσιμων συσκευασιών είναι η αποθήκευση όγκου σε δεξαμενές συναλλαγής θερμότητας, η ενσωμάτωση τους σε κάψουλες, η και η τοποθέτησή τους σε κλίνες. Διακρίνουμε τρία είδη ενσωμάτωσης των ΥΑΦ σε κάψουλες. Την ενσωμάτωση σε μακροκάψουλες (macroencapsulation) την ενσωμάτωση σε μικροκάψουλες (microencapsulation) και την ενσωμάτωση σε μοριακές κάψουλες. Στις περισσότερες περιπτώσεις, εκτός από ορισμένες εφαρμογές του νερού τα ΥΑΦ πρέπει να ενσωματώνονται σε κάψουλες για την επίτευξη της συγκράτησης της υγρής φάσης του PCM και της αποφυγής επαφής του με το περιβάλλον.



(α)

(β)

(γ)

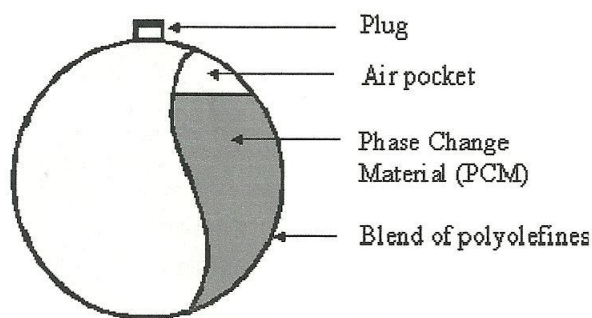
(δ)

*Εικόνα 2.10 : Εμπορικές συσκευασίες PCM, (α) σφαιρίδια πολυολεφίνης, (β) μεταλλικά σφαιρίδια (γ) μεταλλικοί σωλήνες, (δ) πλαίσια αλουμινίου με πτερύγια*

### 2.8.1 Macroencapsulation

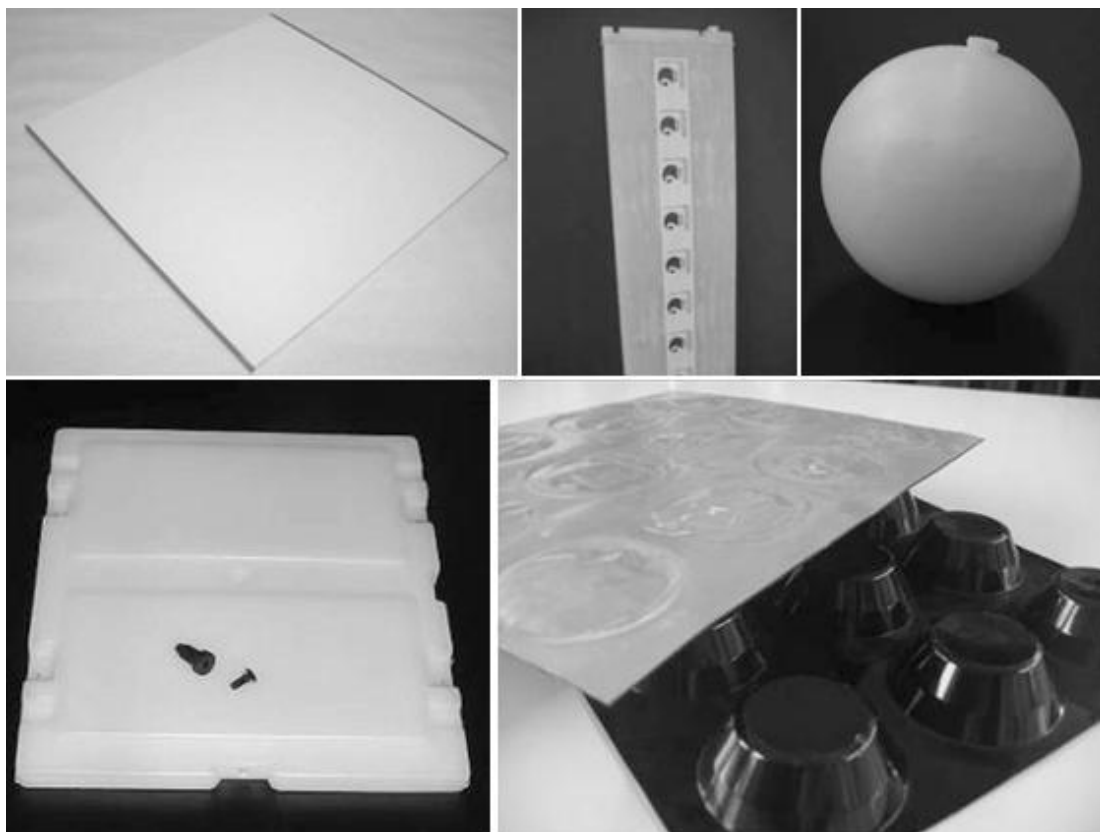
Η ενσωμάτωση σε μακροκάψουλες περιλαμβάνει την ενσωμάτωση του PCM σε κάψουλες διαμέτρου μεγαλύτερης του 1 cm. Η μορφή της συσκευασίας μπορεί να είναι σωλήνες, σακουλάκια, σφαίρες (σχήμα 2.16), πάνελ ή γενικά κάποιο είδος δοχείου, η οποία είναι συνήθως φτιαγμένη από μέταλλο (συνθετικές ρητίνες) ή πλαστικό και έχει χωρητικότητα από μερικά ml μέχρι 1l. Η μακροενσωμάτωση είναι πολύ συνηθισμένη, διότι τέτοια δοχεία ή σακούλες είναι διαθέσιμα στην αγορά σε μια μεγάλη ποικιλία ήδη από άλλες εφαρμογές.

Εκτός από τη συγκράτηση του υγρού υλικού PCM και την αποτροπή αλλαγών στη σύνθεσή του από την επαφή με το περιβάλλον, η μακροενσωμάτωση εξαφανίζει το φαινόμενο διαχωρισμού φάσεων, μειώνει τις μεταβολές όγκου μεταξύ των φάσεων και, εάν το εμπορευματοκιβώτιο είναι αρκετά άκαμπτο, μπορεί επίσης να συμβάλει στη μηχανική σταθερότητα του συστήματος. Το κύριο πλεονέκτημά της όμως είναι η δυνατότητα εφαρμογής της και σε αέρια ρευστά μετάδοσης θερμότητας καθιστώντας έτσι πιο εύκολο το χειρισμό αλλά και τη μεταφορά τους. Πρόβλημα αποτελεί η μεγάλη αναλογία επιφάνειας προς όγκο που απαιτείται για να ανταποκριθεί στη ζητούμενη μεταφοράς θερμότητας.



Σχήμα 2.16: Σφαιρίδιο πολυολεφίνης που περιέχει PCM της εταιρίας CRISTOPIA

Για την ενσωμάτωση των ένυδρων αλάτων σε μακροκάψουλες συνήθως χρησιμοποιούνται πλαστικά δοχεία γιατί έχουν συμβατότητα και δεν παθαίνουν διάβρωση από τα ένυδρα άλατα. Πλαστικές συσκευασίες έχουν χρησιμοποιηθεί και για οργανικά ΥΑΦ αλλά με ιδιαίτερη μελέτη στο συνδυασμό ΥΑΦ-υλικού συσκευασίας για να μη μαλακώνει το PCM το πλαστικό, επομένως κυρίως χρησιμοποιούνται μεταλλικές μακροκάψουλες. Στην εικόνα παρουσιάζονται διάφορες περιπτώσεις εισαγωγής PCM σε πλαστικές μακροκάψουλες.



Εικόνα 2.11 : Μακροενσωμάτωση PCM σε διάφορων τύπων πλαστικές συσκευασίες



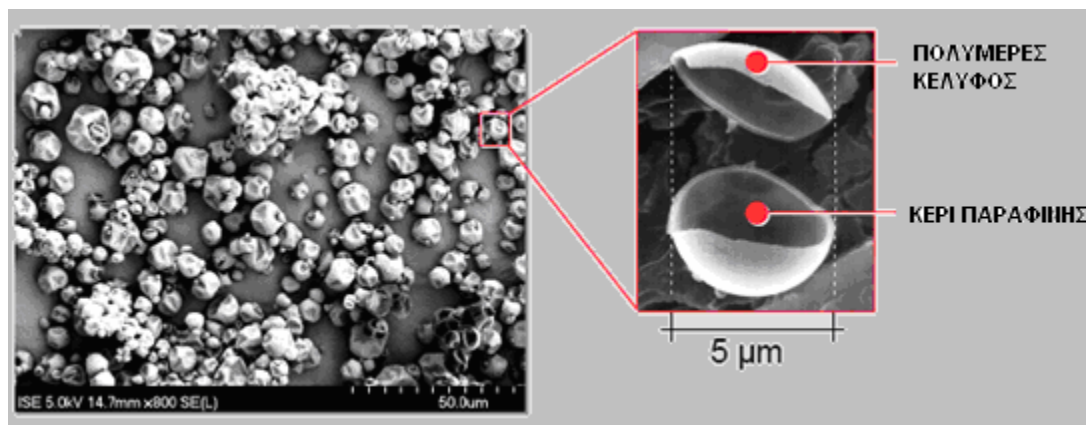
Εικόνα 2.12 : Μακροσκοπικό είδος συσκευασίας σε σακούλες (αριστερά από την Climator/Σουηδία και δεξιά από την Dorken/Γερμανία)

Το σχήμα της κάψουλας στη μέθοδο αυτή ποικίλει από ορθογώνια κομμάτια σε σφαιρικούς σάκους, πλαστικές κάψουλες μέχρι και συσκευασίες χωρίς καθορισμένο σχήμα. Το κλειδί για μια επιτυχημένη συγκράτηση macroencapsulation είναι η σχεδίαση της κάψουλας έτσι ώστε να ταιριάζει σωστά στην κάθε εφαρμογή που επιχειρείται.

### 2.8.2 Microencapsulation

Σε αυτή την περίπτωση γίνεται τοποθέτηση του PCM σε κάψουλες-σφαιρίδια με διάμετρο μικρότερη του 1 mm. Η μέθοδος έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτή της macroencapsulation, αλλά έχει επιπλέον τα εξής προτερήματα :

- Επιφέρει την επιθυμητή μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής που βελτιώνει τις συνθήκες μεταφοράς θερμότητας
- Βελτιώνει ουσιαστικά την σταθερότητα της κυκλικής φόρτισης καθώς ο διαχωρισμός των φάσεων είναι ιδιαίτερα περιορισμένος λόγω των μικροσκοπικών διαστάσεων της κάψουλας που εμπεριέχει το P.C.M.
- Βελτιώνει τη θερμική συμπεριφορά του συστήματος με τα ΥΑΦ, καθώς εμποδίζει την ανάπτυξη του στέρεου τοιχώματος στην εσωτερική επιφάνεια μεταφοράς, φαινόμενο το οποίο είναι υπεύθυνο για την ανεπιθύμητη μείωση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

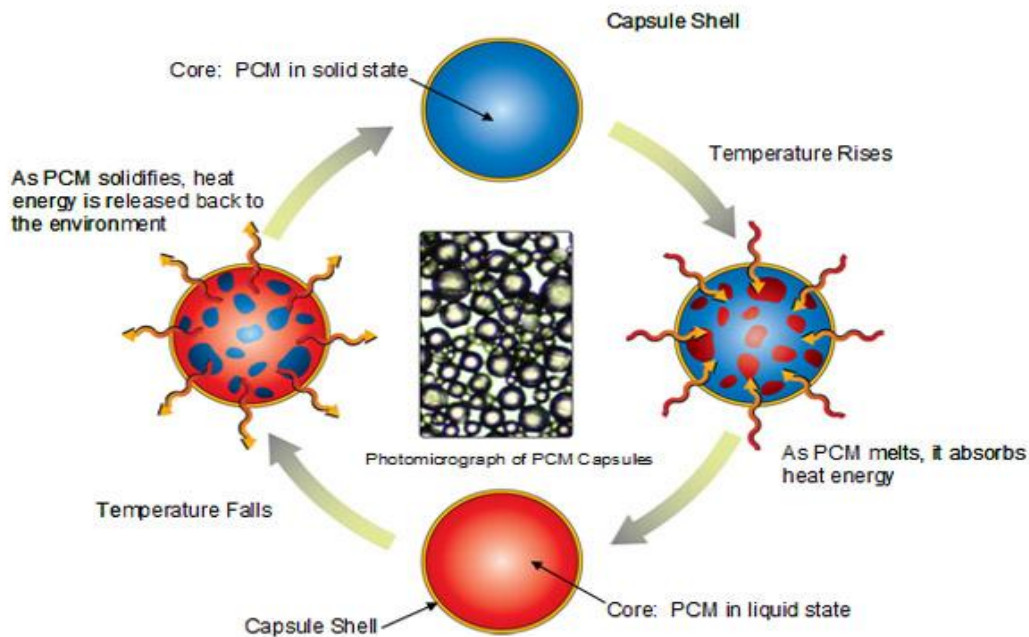


Εικόνα 2.11 : PCM σε μικροκάψουλες (από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο)

Η μήτρα στην οποία είναι επικαλυμμένα σωματίδια πρέπει να είναι συμβατή με τη μεμβράνη (πολυμερές κέλυφος). Οι μικροκάψουλες μπορεί να έχουν σφαιρικό σχήμα, με ένα συνεχές, σκληρό κέλυφος να περιβάλλει τον πυρήνα, ενώ άλλες μπορεί να είναι ασύμμετρες και μεταβλητού σχήματος, με μια ποσότητα από μικρότερα σταγονίδια του υλικού του πυρήνα ενσωματωμένα σε όλη τη μικροκάψουλα.

Και οι τρεις καταστάσεις της ύλης (στερεά, υγρά και αέρια) μπορούν να μικροενσωματωθούν σε κάψουλες. Αυτό επιτρέπει υλικά υγρής ή αέριας κατάστασης να αντιμετωπίζονται ευκολότερα ως στερεά, παρέχοντας παράλληλα και κάποιο μέτρο προστασίας κατά το χειρισμό επικίνδυνων υλικών.

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί ένα σύστημα ενσωμάτωσης PCM σε κάψουλες.



Εικόνα 2.12 : Τρόπος λειτουργίας της ενσωμάτωσης PCM σε κάψουλες

Τα συμπυκνωμένα, ενσωματωμένα σε κάψουλες PCMs αποτελούνται από την έγκλειστη ουσία η οποία έχει υψηλή θερμοκρασία τήξης και το περίβλημα. Το υλικό αλλαγής φάσης όταν τήκεται απορροφά θερμική ενέργεια και όταν στερεοποιείται απελευθερώνει θερμική ενέργεια στο περιβάλλον, επομένως επικρατεί μια ρυθμιζόμενη θερμοκρασία στο εσωτερικό του προϊόντος.

Τα ΥΑΦ που χρησιμοποιούνται ενσωματωμένα σε κάψουλες, πρέπει να είναι συμβατά με το υλικό της κάψουλας, το οποίο είναι πλαστικό για χαμηλές θερμοκρασίες και μέταλλο ή ειδική μεμβράνη για υψηλές θερμοκρασίες.

Στην περίπτωση των οργανικών ΥΑΦ, θέλουμε κυρίως να επιτύχουμε την αύξηση του συντελεστή αγωγιμότητας καθώς βρίσκεται στην περιοχή του  $0.2 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ .

Στην περίπτωση των ανόργανων ΥΑΦ, το ενδιαφέρον της συσκευασίας στρέφεται στην προστασία των υλικών που συνεργάζονται με το ΥΑΦ, καθώς αν έρθουν σε επαφή τα υλικά αυτά θα διαβρωθούν και θα αλληλεπιδράσουν αρνητικά για τη συνολική εγκατάσταση.

### **2.8.3 Ογκώδης αποθήκευση**

Τα συστήματα ογκώδους αποθήκευσης αναφέρονται στην ενσωμάτωση PCM's σε δεξαμενές ανταλλαγής θερμότητας που είναι παρόμοιες στο σχεδιασμό με τις υπάρχουσες δεξαμενές που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της ενέργειας, αλλά με ορισμένες σημαντικές διαφορές. Η βασική αυτών των συστημάτων PCM είναι η ανάγκη μιας πιο εντατικής μεταφοράς θερμότητας από αυτή που υπάρχει σε δεξαμενές χωρίς PCM, επειδή η πυκνότητα αποθήκευσης θερμότητας των PCM's είναι υψηλότερη σε σύγκριση με άλλα μέσα αποθήκευσης. Η περιοχή ανταλλαγής θερμότητας είναι μικρότερη, αλλά εξακολουθεί να απαιτεί ένα υψηλό ρυθμό απελευθέρωσης ή πρόσληψης θερμότητας.

Οι διάφορες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι η εισαγωγή πτερυγίων η χρήση υψηλής αγωγιμότητας σωματιδίων, μεταλλικών κατασκευών, ινών που έρχονται σε επαφή με την πλευρά του PCM, εναλλάκτες θερμότητας άμεσης επαφής, κυλιόμενοι κύλινδροι, καθώς και κυλινδρικοί σωλήνες με έγκλειστο το PCM. Οι δεξαμενές που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούν υγρό ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Οι δεξαμενές όγκου με αέριο για ρευστό θερμότητας έχουν μελετηθεί πολύ λίγο και δεν έχουν βρει εφαρμογή στην αποθήκευση θερμότητας.

### **2.8.4 Παραγωγή & Χρήση Σύθετων Υλικών**

Τα σύνθετα υλικά είναι υλικά που αποτελούνται από ένα PCM και τουλάχιστον ένα άλλο υλικό. Παράγονται με σκοπό τη βελτίωση τουλάχιστον μίας από τις ιδιότητες του PCM ή τη βελτίωση της ικανότητας αποθήκευσης του άλλου υλικού. Η χρήση σύνθετων ενώσεων έχει επιπλέον τα εξής προτερήματα :

- Βελτιώνει τη σταθερότητα της κυκλικής φόρτισης, αφού οι μικροσκοπικές δομές μειώνουν ουσιαστικά το διαχωρισμό των φάσεων στο τήγμα.
- Βελτιώνει τη μεταφορά θερμότητας, μέσω της προσθήκης υλικών με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα όπως για παράδειγμα γραφίτη.

Ένα σύνολο από διάφορα σύνθετα υλικά που βασίζονται στην παραφίνη ως PCM έχει δημιουργηθεί και διατίθεται στο εμπόριο από την εταιρία Rubitherm (Εικόνα 2.13)





Εικόνα 2.13 : (από αριστερά προς δεξιά) Σύνθετα PCM ,υλικό PK σκόνη PX και κόκκοι GR

Το σύνθετο υλικό PK είναι από παραφίνη και μια δομή πολυμερούς και έχει χρήση σε συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Η σκόνη PX βασίζεται σε σκόνη διοξειδίου πυριτίου ως πορώδες υλικό, περιέχει έως και 60% PCM και χρησιμοποιείται σε ιατρικές εφαρμογές. Οι κόκκοι GR βασίζονται σε πορώδες ορυκτής αργίλου ενώ έχουν 35% PCM . Η ενσωμάτωση του υλικού στο πορώδες άλλου υλικού αποτελεί τη βάση του σύνθετου τελικού προϊόντος. Σε αυτήν την περίπτωση σημαντικό κριτήριο για την επιτυχημένη ενσωμάτωση είναι η μη αλληλεπίδραση του ΥΑΦ με το υλικό και η περιορισμένη έως μηδενική απώλειά του από το πορώδες όταν το ΥΑΦ βρίσκεται στην υγρή φάση.

Ένα από τα σύνθετα υλικά των PCM που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι εκείνο που περιέχει **γραφίτη**. Η ύπαρξη σωματιδίων ή ινών γραφίτη μέσα στο PCM έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμικής του αγωγιμότητας. Επιπλέον ο γραφίτης παρουσιάζει μεγάλη χημική σταθερότητα και σε υψηλές θερμοκρασίες και σε διαβρωτικό περιβάλλον σε σύγκριση με άλλα υλικά. Σύνθετα PCM με γραφίτη παράγονται από τη γερμανική εταιρία SGL.



Εικόνα 2.14 : Σύνθετο υλικό από PCM (παραφίνη) και γραφίτη μετά από ανάμιξή τους

### 2.8.5 Τοποθέτηση ΥΑΦ σε κλίνες

Είναι απαραίτητο να βρεθεί ένα αποδοτικό και οικονομικό μέσο με το οποίο να επιτυγχάνεται μεταφορά θερμότητας για την ψύξη και την τήξη του μέσου αποθήκευσης σε ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Η κλίνη αποτελείται από μακροκάψουλες ΥΑΦ, ένα δοχείο και ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας, το οποίο ρέει διαμέσου των κενών στο εσωτερικό της κλίνης. Οι κύριοι παράγοντες που πρέπει να μελετηθούν, σχετικά με το σχεδιασμό μιας μονάδας αποθήκευσης, η οποία περιέχει ΥΑΦ, είναι:

- Τα όρια της θερμοκρασίας μέσα στα οποία μπορεί να λειτουργήσει η μονάδα
- Η θερμοκρασία τήξης-πήξης του ΥΑΦ
- Η λανθάνουσα θερμότητα του ΥΑΦ
- Η θερμική φόρτιση
- Η διαμόρφωση της κλίνης αποθήκευσης

Άλλοι παράγοντες σχεδίασης, οι οποίοι είναι σημαντικοί, αλλά λιγότερο κρίσιμοι, είναι η πτώση πίεσης και η δύναμη άντλησης της μονάδας αποθήκευσης. Η θερμότητα μεταφέρεται στο ή από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας, καθώς αυτό ρέει διαμέσου των κενών της κλίνης. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, του συστήματος, ζεστό ρευστό μεταφοράς θερμότητας κυκλοφορεί μέσα στη δεξαμενή, μεταφέροντας ενέργεια από την πηγή.

Το ΥΑΦ μέσα στις κάψουλες απορροφά θερμότητα και λιώνει. Κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης του συστήματος, ψυχρό ρευστό μεταφοράς θερμότητας κυκλοφορεί μέσα στη δεξαμενή ψύχοντας το ΥΑΦ στις κάψουλες. Το ζεστό ρευστό χρησιμοποιείται ύστερα για να επιτευχθεί θέρμανση, είτε απευθείας, είτε μέσω ενός θερμικού εναλλάκτη. Και στους δύο τρόπους λειτουργίας (φόρτιση – αποφόρτιση), η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του ρευστού μεταφοράς θερμότητας και της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης πρέπει να είναι ικανοποιητική ώστε να προκύπτει αξιόλογο ποσοστό μεταφοράς θερμότητας.

Απαιτείται αποδοτική μεταφορά θερμότητας μεταξύ του ρεύματος του ρευστού και των μορίων του στερεού, για καλύτερη λειτουργία των συσκευασμένων κλινών στην αποθήκευση ενέργειας. Υπάρχουν διάφορες μεταβλητές, οι οποίες καθορίζουν την απόδοση των μονάδων θερμικής αποθήκευσης με συσκευασμένες κλίνες.

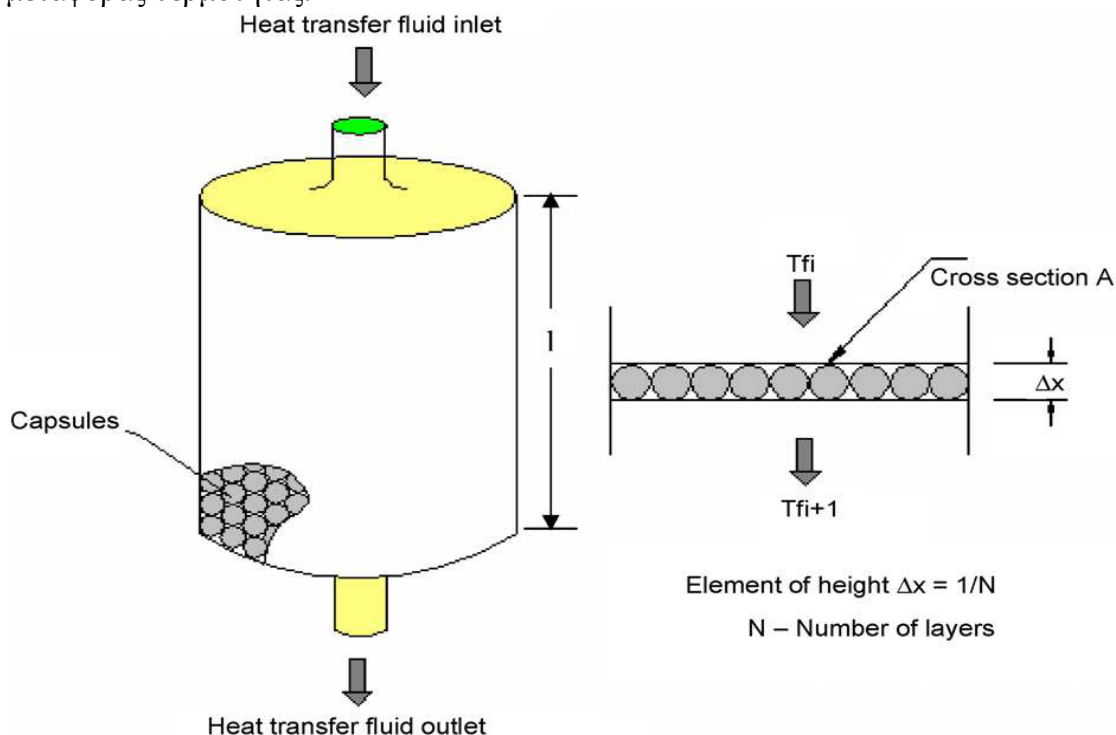


Οι μεταβλητές αυτές μπορούν να διαιρεθούν στις παρακάτω τρεις κατηγορίες:

(i) Αυτές που είναι συνδεδεμένες με την κατασκευή της κλίνης, όπως το μέγεθος, το σχήμα και η συσκευασία των υλικών στοιχείων, το μήκος της κλίνης και της γεωμετρικής διαμόρφωσης του δοχείου.

(ii) Αυτές που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά της ροής, όπως οι ιδιότητες του ρευστού και η ταχύτητα της μάζας.

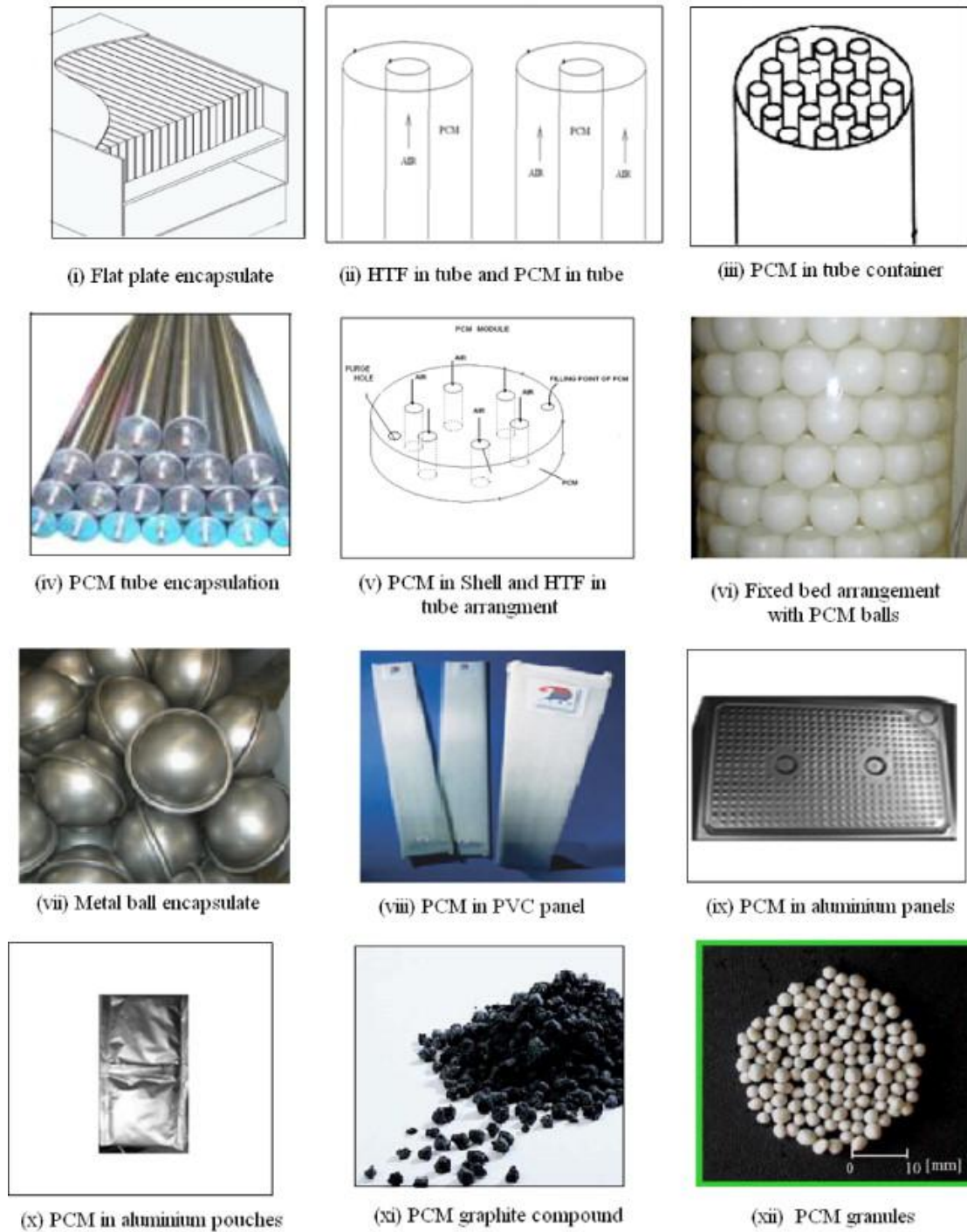
(iii) Αυτές που σχετίζονται με τη μεταβατική ανταπόκριση του υλικού της κλίνης, όπως η αρχική θερμική κατάσταση της κλίνης, η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού, οι φυσικές και θερμικές ιδιότητες του υλικού της κλίνης και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας.



Εικόνα 2.15: Διάταξη Κλίνης ΥΑΦ για αποθήκευση θερμότητας

Γενικά, οι κύριες παράμετροι που διέπουν τη σχεδίαση μιας κλίνης ΥΑΦ είναι ο τύπος του μορίου το μέγεθος και το σχήμα του μέσου, τα κενά μέσα στην κλίνη, οι θερμικές ιδιότητες και οι ιδιότητες μεταφοράς του ΥΑΦ και του ρευστού, το γενικό μέγεθος της κλίνης (διατομή και μήκος), το ποσοστό της ροής και η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού.

Μια τυπική μονάδα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με λανθάνουσα θερμότητα αποτελούμενη από έναν αριθμό κάψουλων τοποθετημένων με ένα συγκεκριμένο τρόπο στο εσωτερικό του δοχείου ως μια συσκευασμένη κλίνη φαίνεται στην εικόνα.



Εικόνα 2.16 : Κυριότεροι τρόποι συσκευασίας, ενσωμάτωσης και σύνθεσης των ΥΑΦ

[References<sup>2</sup>]

<sup>2</sup> References - Chapter 2 : [www.Rubitherm.com](http://www.Rubitherm.com)

<http://www.microteklabs.com/how-they-work.html>

A. Felix Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, An analysis of a packed bed latent heat thermal energy storage system using PCM capsules: Numerical investigation

S.D. Sharma, Kazunobu Sagara, Latent heat storage materials and systems : a review

## 2.9 Εφαρμογές

Οι εφαρμογές των PCMs καλύπτουν πολλούς και διαφορετικούς τομείς. Η πρώτη χρήση PCM έγινε με τη χρήση του πάγου στις διάφορες εφαρμογές τις ιατρικής, αλλά και της συντήρησης τροφίμων. Η χρησιμοποίηση άλλων ΥΑΦ, (εκτός πάγου), σε ενεργητικά και παθητικά συστήματα ξεκίνησε, αν και σε πρώιμο στάδιο, τη δεκαετία του 1940. Οι εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας σε λανθάνουσα μορφή είναι αρκετά εκτεταμένες. Βασικό προτέρημα είναι η μεγάλη πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας. Τα PCMs παράγονται και διατίθενται σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές άμεσης ή έμμεσης αποθήκευσης θερμότητας. Μερικές περιπτώσεις είναι:

- εντοιχισμός σε τοιχοποιία
- ενδοδαπέδια θέρμανση
- σύνθετα υλικά από παραπροϊόντα δομικών υλικών
- δοχεία και δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας σε χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες (θερμές και ψυχρές αποθηκευτικές μονάδες)
- εφαρμογές κλιματισμού
- φωτοβολταϊκά συστήματα
- ενισχυμένα θερμικά ηλιακά συστήματα
- εναλλάκτες θερμότητας για χρήση σε θερμοκήπια
- εφαρμογές στις μεταφορές (κιβώτια μεταφορών)
- ιατρικές εφαρμογές
- συστήματα ψύξης για εγκαταστάσεις H/Y
- διαστημικές εφαρμογές
- είδη θερμικής ένδυσης (για ρύθμιση & διατήρηση θερμοκρασίας)
- συστήματα τηλεπικοινωνίας

---

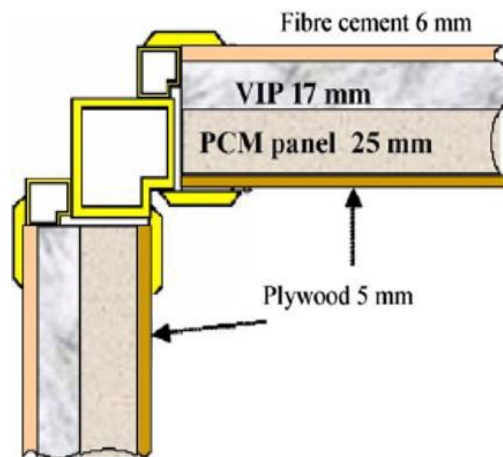
Σήμερα, είναι εμπορικά διαθέσιμα στην αγορά περισσότερα από 50 PCMs από τις εταιρίες :

- RUBITHERM GmbH , Γερμανία
- Dörken GmbH & Co. KG , Γερμανία
- Climator AB , Σουηδία
- TEAP , Αυστραλία
- CRISTOPIA Energy Systems , Γαλλία
- Mitsubishi Chemical , Ιαπωνία

### 2.9.1 Εφαρμογές στα κτίρια

Οι τρόποι χρήσης των PCMs σε κτίρια είναι γενικά τρεις :τοποθέτηση σε τοίχους κτιρίων, ενσωμάτωση σε δομικά στοιχεία εκτός από τοίχους και εισαγωγή σε μονάδες αποθήκευσης. Οι γυψοσανίδες με PCM θεωρούνται μια αποτελεσματική και λιγότερο δαπανηρή μέθοδος για την αποθήκευση θερμότητας από τον ήλιο στα κτίρια. Τα PCMs είναι ουσιαστικά ενσωματωμένα (σε κάψουλες) σε πλάκες γύψου, σοβά ή στην τοιχοποιία. Οι εφαρμογές λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιοδήποτε κατάλληλο υλικό κτιρίου.

Οι Kedl και Stovall και οι Salyer και Sircar χρησιμοποίησαν διαποτισμένο τοίχο με κερι παραφίνης για παθητική εφαρμογή. Ο Sharigo και οι συνεργάτες του, ανακάλυψαν μεθόδους για διαποτισμό γύψινου τοίχου και άλλων αρχιτεκτονικών υλικών με PCM και έδειξαν ότι πολλά PCMs είναι κατάλληλα για εισαγωγή σε γύψινο τοίχο. Ο Feldman και οι συνεργάτες του, διεξήγαγαν εκτενή έρευνα στη χρήση και σταθερότητα των οργανικών συστατικών για αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας, συμπεριλαμβανομένων των λιπαρών οξέων (capric, lauric, palmitic and stearic acids) αλλά και άλλων υλικών όπως butyl stearate, dodecanol and polyethylene glycol 600.

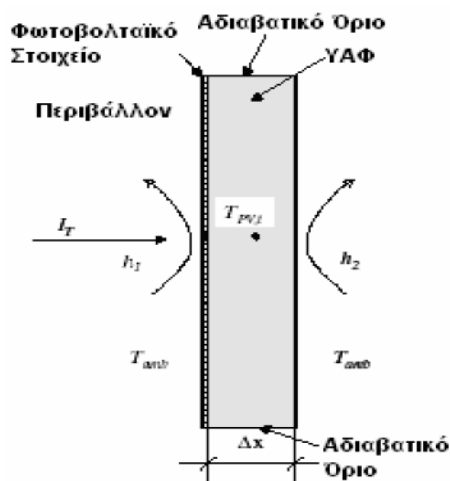


Εικόνα 2.17 : Δομή γυψοσανίδας με PCM, μόνωση VIP και ίνες τσιμέντου

Η εφαρμογή των PCMs σε κτίρια μπορεί να έχει δύο διαφορετικούς στόχους. Πρώτον, χρήση της φυσικής θερμότητας, που είναι η ηλιακή ενέργεια, για θέρμανση ή του κρύου στη διάρκεια της νύχτας για ψύξη. Δεύτερον, χρήση ανθρωπογενών πηγών θέρμανσης ή ψύξης. Σε κάθε περίπτωση η αποθήκευση θερμότητας είναι αναγκαία προκειμένου να ταυτίζονται η διαθεσιμότητα και η ζήτηση ως προς το χρόνο καθώς και σε ό,τι αφορά την ισχύ.

### 2.9.2 Εφαρμογές σε φωτοβολταϊκά πλαίσια

Έχει παρατηρηθεί, ότι λόγω των υψηλών θερμοκρασιών σε κτίρια, όπου γίνεται χρήση φωτοβολταϊκών, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται με αρκετές απώλειες. Κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει σχεδιαστεί για να εργάζεται υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Μια χαρακτηριστική τιμή θερμοκρασίας είναι οι 25°C. Όταν η θερμοκρασία στην επιφάνεια του στοιχείου ξεπεράσει αυτή την τιμή, η απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μειώνεται κατά 0.5%K<sup>-1</sup>. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα κρίθηκε απαραίτητη η εισαγωγή ΥΑΦ σε φωτοβολταϊκά στοιχεία με τον εικονιζόμενο τρόπο. Το ΥΑΦ τοποθετημένο σε αδιαβατικό προς το περιβάλλον πλαίσιο, απορροφά την εξέχουσα θερμότητα, διατηρώντας το φωτοβολταϊκό στοιχείο σε σταθερή θερμοκρασία, εξασφαλίζοντας την αποδοτική λειτουργία του.



Εικόνα 2.18 : Γραφική απεικόνιση φωτοβολταϊκού πλαισίου με PCM

### 2.9.3 Εφαρμογές σε συστήματα κλιματισμού

Τα παραδοσιακά συστήματα κλιματισμού λειτουργούν σπάνια στο μέγιστο φορτίο, γεγονός που αναδεικνύει την υπερδιαστασιολόγηση των συστημάτων αυτών, καθώς έχουν επιλεγθεί για να καλύψουν το μέγιστο φορτίο. Με άλλα λόγια, λειτουργούν κατά τη διάρκεια της ημέρας για να καλύψουν τις μέγιστες απαιτήσεις, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας παραμένουν απενεργοποιημένα. Επιπρόσθετα, οι βιομηχανικές ψυκτικές διατάξεις είναι για να ικανοποιήσουν τη μέγιστη στιγμιαία ζήτηση ψύξης, η οποία εμφανίζεται σε λίγες μόνο μέρες το χρόνο. Τα βιομηχανικά συστήματα ψύξης, παρέχουν την ψύξη με ενσωματωμένα PCM για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, εκ των οποίων αρκετές απαιτούν μεγάλα ψυκτικά φορτία σε μικρό χρονικό διάστημα.

### 2.9.4 Εφαρμογές σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα και Η/Υ

Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα είναι ιδιαίτερος ευαίσθητα στη υπερθέρμανση, επηρεάζοντας αρνητικά τόσο τη διάρκεια ζωής, όσο και την αξιοπιστία του εξαρτήματος. Οι ηλεκτρικές αντιστάσεις που συναντά το ρεύμα καθώς διαπερνά τα καλώδια, τα επίπεδα πυριτίου, τα transistor των επιμέρους ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, αυξάνουν τη θερμοκρασία τους με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος φθοράς ή και καταστροφής. Σκοπός είναι να διατηρηθεί η θερμοκρασία των εξαρτημάτων αυτών εντός ορίων ασφαλούς λειτουργίας της εκάστοτε συσκευής, χωρίς να χρειαστεί να αυξηθεί το συνολικό της μέγεθος.

Σήμερα, μεταλλικά πτερύγια χρησιμοποιούνται για την απαγωγή θερμότητας από τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, ενισχύοντας τα συστήματα ψύξης αυτά με ανεμιστήρες καταλλήλου μεγέθους. Η χρησιμοποίηση ΥΑΦ σε αυτά τα συστήματα για την απομάκρυνση των σημείων αιχμής που παρουσιάζει η χρονική κατανομή της θερμοκρασίας του εξαρτήματος, είναι απολύτως αξιόπιστη, καθώς το ΥΑΦ ανανεώνεται από μόνο του και επανέρχεται στην αρχική κατάσταση, μεταξύ δυο διαδοχικών σημείων αιχμής της θερμοκρασίας και δεν είναι απαραίτητος κανενός είδους κινητήρας ή διάταξη μέτρησης θερμοκρασίας.



Εικόνα 2.19 : Προϊόντα με PCM για ηλεκτρονικά εξαρτήματα

Όπως είναι γνωστό τα ΥΑΦ δρουν σε τρεις φάσεις. Κατά την πρώτη φάση η θερμοκρασία του στερεού ΥΑΦ αυξάνεται μέχρι το σημείο τήξης του, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντός του. Κατά τη δεύτερη φάση, η θερμοκρασία του ΥΑΦ παραμένει σχεδόν σταθερή καθώς το ΥΑΦ λιώνει. Κατά τη τρίτη φάση η θερμοκρασία υγρού ΥΑΦ συνεχίζει να αυξάνεται. Για να εισαχθούν τα ΥΑΦ επιτυχώς στις ηλεκτρονικές εφαρμογές, θα πρέπει θεωρητικά να μην βρεθούν στην τρίτη φάση, αλλά να παραμείνουν στη δεύτερη, έτσι ώστε να αποφευχθεί η υπερθέρμανση. Πλέον, από πολλές εταιρίες που δραστηριοποιούνται στο χώρο ανάπτυξης και εμπορίας υλικών αλλαγής φάσης, διατίθενται στο εμπόριο προϊόντα ΥΑΦ σχεδιασμένα για τοποθέτηση σε ηλεκτρονικές διατάξεις, ιδιαίτερος αποδοτικά.



### 2.9.5 Εφαρμογές σε μεταφορές

Ο τομέας των μεταφορών σε πολλές περιπτώσεις περιλαμβάνει τη μεταφορά προϊόντων τα οποία είναι ευαίσθητα στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις και απαιτούν πολύ συγκεκριμένα και στενά θερμοκρασιακά πλαίσια κατά τη μεταφορά τους.

Είτε τα μεταφερόμενα αγαθά απαιτούν χαμηλές είτε υψηλές θερμοκρασίες, στο συνολικό κόστος μεταφοράς, προστίθεται ένα ιδιαίτερα αυξημένο κόστος το οποίο έχει να κάνει με τη διατήρηση της θερμοκρασίας, είτε πρόκειται για όχημα-ψυγείο, είτε για όχημα με κάποια θερμαντική διάταξη.

Η μεταφορά ευαίσθητων νωπών τροφίμων, ευαίσθητων στις θερμοκρασιακές αλλαγές φαρμακευτικών ειδών, ιατρικών προϊόντων, διάφορων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, χημικών, εκρηκτικών, απαιτεί κλιματιζόμενα οχήματα. Τέτοια οχήματα καθιστούν απαγορευτική από πλευράς κόστους τη λειτουργία τους, καθώς χρησιμοποιούν σαν καύσιμο ντίζελ. Το κόστος της ενέργειας η οποία παράγεται από ντίζελ είναι 6 φορές μεγαλύτερη από το αντίστοιχο κόστος της συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας.

Επομένως, η χρήση των ΥΑΦ στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ενδεδειγμένη και ιδιαίτερα οικονομική. Τα ΥΑΦ φορτίζονται πριν από τη μεταφορά είτε σε ψυγείο, είτε σε φούρνο, ώστε να είναι έτοιμα για χρήση. Το πολύ θετικό εδώ είναι ότι το ΥΑΦ παρέχει τη δυνατότητα φόρτισής του καταναλώνοντας ηλεκτρική ενέργεια μη αιχμής, που ως γνωστό, είναι πολύ φθηνότερη.



*Εικόνα 2.20 : Θάλαμοι μεταφοράς με μόνωση PCM για σταθεροποίηση της θερμοκρασίας*

### 2.9.6 Εφαρμογές στην ανθρώπινη ένδυση

Η εισαγωγή υλικών αλλαγής φάσης στα ρούχα έχει ως στόχο να παρέχουν θερμική άνεση, ομοιόμορφα κατανομημένη θερμοκρασία και λιγότερο ιδρώτα. Ουσιαστικά, τα ΥΑΦ που ενσωματώνονται σε ρούχα, αλληλεπιδρούν με τη θερμοκρασία του δέρματος για να παρέχουν ένα είδος προστασίας έναντι διακυμάνσεων της θερμοκρασίας. Η εισαγωγή των ΥΑΦ σε ρούχα ξεκίνησε από **διαστημικές** εφαρμογές, στις **στολές** των αστροναυτών, για τη προστασία τους από τις απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές. Σήμερα οι εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης στα ρούχα και γενικότερα στα υφάσματα έχουν επεκταθεί. Χρησιμοποιούνται σε στολές που εκτίθενται σε ακραίες θερμοκρασίες, όπως για παράδειγμα σε πυροσβεστικές, ορειβατικές και **αγωνιστικές** (F1) στολές. Η χρήση τους όμως έχει επεκταθεί και σε καθημερινά ρούχα και άλλα υφάσματα, όπως κουβέρτες, κάλτσες, παπούτσια κλπ.

Στα ενδύματα χρησιμοποιούνται κυρίως οργανικά ΥΑΦ σε μικροκάψουλες, για να μην εμφανίζονται διαρροές κατά τη μετάβαση στην υγρή φάση. Τα ΥΑΦ αυτά όταν προστίθενται στις υφασμάτινες ίνες ή ανάμεσα στα στρώματα των ενδυμάτων, μπορούν να ελαττώσουν το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και μπορούν να αυξήσουν τη θερμοχωρητικότητα (του ενδύματος) περίπου 10 φορές. Αυτά τα ανεπτυγμένα θερμικά χαρακτηριστικά μπορούν να εμφανιστούν στα σύγχρονα ρούχα με εμφύτευση των ινών του υφάσματος σε διάλυμα που περιέχει μικροσκοπικές μονάδες ΥΑΦ ή με την προσθήκη των μικρο-ΥΑΦ σε πολυμερή.

Επειδή τα ΥΑΦ παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερη πυκνότητα από τα συνήθη υλικά των ενδυμάτων, αλλά και λόγω του υψηλού κόστους των ΥΑΦ, χρησιμοποιείται ΥΑΦ κατά 20-35% επί του ολικού βάρους του ενδύματος. Κυρίως χρησιμοποιούνται παραφινούχα ΥΑΦ. Η εφαρμογή των ΥΑΦ σε προϊόντα κλωστοϋφαντουργίας παρέχει παράλληλα με την παθητική επίδραση της θερμομόνωσης μια ενεργητική θερμομόνωση, η οποία ελέγχει τη ροή θερμότητας μέσα από τα ρούχα και προσαρμόζει τη ροή θερμότητας σε διαφορετικές οριακές συνθήκες.



Εικόνα 2.21 : Ισοθερμικά ρούχα και εσώρουχα με PCM

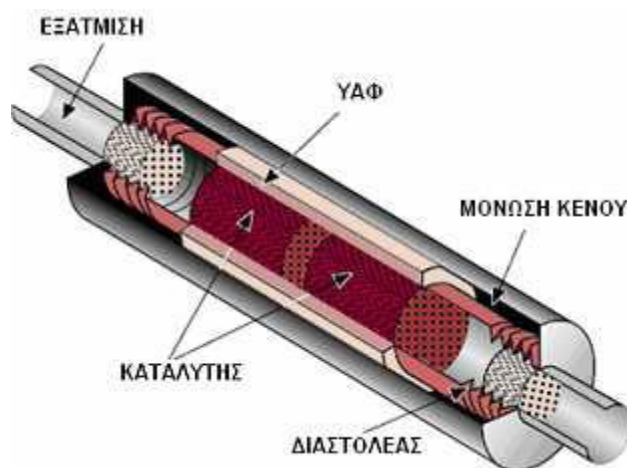


### 2.9.7 Εφαρμογές σε οχήματα

Η χρησιμοποίηση ΥΑΦ σε οχήματα έχει επιφέρει εντυπωσιακά αποτελέσματα. Τα ΥΑΦ χρειάζονται για την αποφυγή της υπερθέρμανσης της μηχανής εσωτερικής καύσης και την προθέρμανσή της πριν την ανάφλεξη.

Χαρακτηριστική περίπτωση εφαρμογής στα αυτοκίνητα είναι η τοποθέτηση ΥΑΦ μέσα σε λεπτούς σωλήνες οι οποίοι με τη σειρά τους εμπεριέχονται σε ένα μεγάλο κύλινδρο, ο οποίος ενώνεται με το ψυγείο του αυτοκινήτου και αποθηκεύει την πλεονάζουσα θερμότητα όταν ο κινητήρας λειτουργεί στα θερμοκρασιακά του όρια. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η υπερθέρμανση της μηχανής. Όταν σταματήσει η λειτουργία της μηχανής τα ΥΑΦ αποδεσμεύουν την αποθηκευμένη θερμότητα για να διατηρηθεί η μηχανή ζεστή μέχρι την επόμενη εκκίνηση. Μια μπαταρία λανθάνουσας θερμότητας η οποία στηρίζεται στην παραπάνω διαδικασία έχει κατασκευάσει η εταιρία BMW.

Μια δεύτερη εφαρμογή αποτελεί η χρήση ΥΑΦ στο σύστημα εξαγωγής και συγκεκριμένα στον καταλύτη, σκοπός του οποίου είναι η εξάλειψη των υδρογονανθράκων και των υπόλοιπων ρύπων από τα καυσαέρια του αυτοκινήτου.



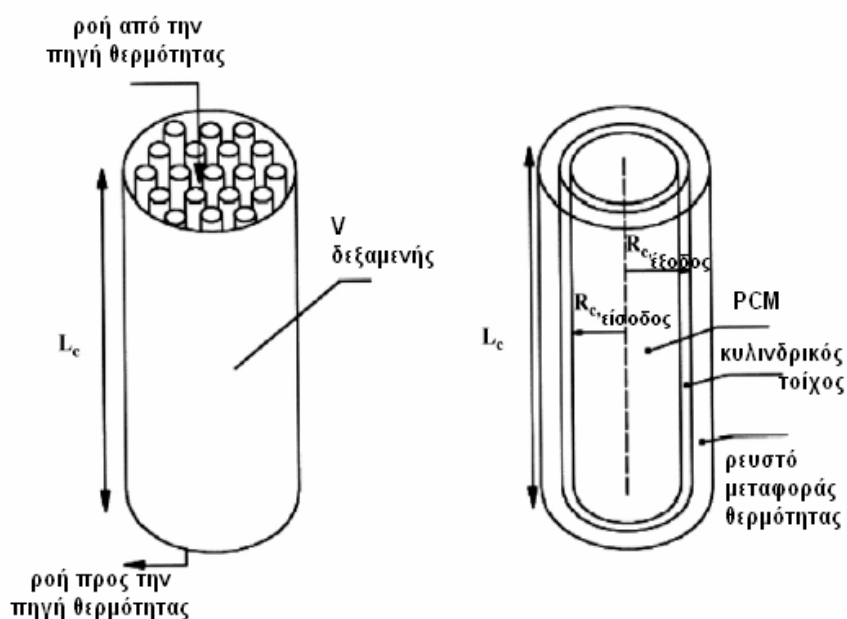
Εικόνα 2.22 : Καταλύτης αυτοκινήτου με PCM

Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει η θερμοκρασία του καταλύτη να είναι πολύ υψηλή, γεγονός το οποίο συμβαίνει λίγα λεπτά μετά την εκκίνηση του οχήματος. Η χρήση ΥΑΦ μειώνει τις εκπομπές σε ποσοστό πάνω από 80% σε σχέση με έναν συμβατικό καταλύτη.

### 2.9.8 Εφαρμογές σε αγωγούς & δεξαμενές θέρμανσης νερού

Οι δεξαμενές αποθήκευσης θερμού νερού χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα συστήματα θέρμανσης, αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας. Τα ΥΑΦ προσφέρουν μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα μάζας και συμβάλουν με αυτό τον τρόπο στη μείωση του όγκου μιας θερμικής αποθήκης. Προσθέτοντας ΥΑΦ στη δεξαμενή νερού, προσδίδεται στο σύστημα μεγαλύτερη πυκνότητα αποθήκευσης και αντισταθμίζεται η θερμική απώλεια στο ανώτερο στρώμα, εξαιτίας της λανθάνουσας θερμότητας του ΥΑΦ

Συνήθως οι θερμικές αποθήκες νερού με ΥΑΦ είναι μονωμένοι κυλινδρικοί αγωγοί οι οποίοι περιέχουν παραφίνη ενσωματωμένη είτε σε σφαιρικές κάψουλες είτε σε κυλινδρικούς σωλήνες. Το σύστημα μπορεί να χαρακτηριστεί ως υβριδικό αφού, εκτός από τη λανθάνουσα θερμότητα που αποθηκεύουν τα ΥΑΦ αποθηκεύεται ποσό ενέργειας και με τη μορφή αισθητής θερμότητας στο νερό. Επιπλέον, η θερμομόνωση περιορίζει τις απώλειες θερμότητας.



Εικόνα 2.22 : Κυλινδρικά δοχεία αποθήκευσης θερμότητας με PCM

Οι εφαρμογές των αγωγών με ΥΑΦ εμφανίζονται σε εγκαταστάσεις αντλιών θερμότητας με κλειστό σύστημα κυκλοφορίας νερού για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης, για άλλες οικιακές χρήσεις όπως ο καθαρισμός ή το μαγείρεμα, σε συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε ώρες μη αιχμής και σε βιομηχανικές μονάδες ανάκτησης θερμότητας.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ (CFD)

### 3.1 Γενικά Στοιχεία

---

Η Ρευστομηχανική (Fluid Mechanics) είναι ο τομέας της επιστήμης ο οποίος αναπτύχθηκε για την κατανόηση των ιδιοτήτων που παρουσιάζουν τα ρευστά, χρησιμοποιώντας θεμελιώδεις νόμους και έννοιες της Μηχανικής και της Θερμοδυναμικής αλλά παράλληλα και πολλές μεθόδους Πειραμάτων. Οι πειραματικές μέθοδοι υπήρχαν από την αρχαιότητα (Αρχιμήδης) ενώ οι αναλυτικές θεωρητικές μέθοδοι γνώρισαν μεγάλη ανάπτυξη το 19<sup>ο</sup> αιώνα. Από το 1950, λόγω της εξέλιξης των Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, της Τεχνολογίας, της Πληροφορικής αλλά και της δημιουργίας Αριθμητικών μεθόδων και τεχνικών Προγραμματισμού, η μηχανική ρευστών πλαισιώθηκε και από σύγχρονες υπολογιστικές μεθόδους.

Η εφεύρεση του Η/Υ και η ραγδαία βελτίωση της τεχνολογίας των Η/Υ έδωσε μεγάλη ώθηση σε αυτό που ονομάζεται σήμερα Υπολογιστική Ρευστομηχανική (Computational Fluid Dynamics - CFD) και βασίζεται σε υπολογιστική προσομοίωση, μοντελοποίηση και επίλυση των εξισώσεων με τη βοήθεια αλγορίθμων (εξισώσεις Euler, Navier-Stokes κτλ). Συνεπώς η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική είναι ένα εργαλείο το οποίο στηρίζεται στον Η/Υ και χρησιμοποιείται για την προσομοίωση (simulation) της συμπεριφοράς συστημάτων που περιέχουν ροές ρευστών, μετάδοση θερμότητας, φυσικές και χημικές διεργασίες. Το CFD αυτό που κάνει είναι να επιλύει τις εξισώσεις ενός ροϊκού πεδίου στον όγκο ελέγχου στα σύνορα του οποίου έχουν εφαρμοστεί κατάλληλες οριακές και αρχικές συνθήκες.

Τα πλεονεκτήματα των υπολογιστικών μεθόδων είναι ότι γενικά δε θέτουν μεγάλους περιορισμούς, μπορούν να εφαρμοστούν σε σύνθετες γεωμετρίες, έχουν πολύ χαμηλότερο κόστος από τις πειραματικές καθώς και το ότι μπορούν να συμπληρώσουν ή να ελέγξουν πειραματικές μεθόδους.

### 3.2 Εξέλιξη του CFD

Ξεκινώντας από την αρχαιότητα, οι αρχαίοι έλληνες φιλόσοφοι (Ηράκλειτος) διατύπωσαν την αυθαίρετη μη επιστημονικά τεκμηριωμένη έννοια ότι όλα ρέουν. Πρώτος, ο Αρχιμήδης ήταν αυτός που ασχολήθηκε με το πεδίο της υδροστατικής, τη μέτρηση της πυκνότητας και του όγκου ρευστών και στερεών και άλλων ιδιοτήτων και αργότερα με τα υδραυλικά έργα. Μετά την Αναγέννηση ο Leonardo da Vinci και ο Νεύτωνας ήταν δύο επιστήμονες που εξέτασαν το φυσικό κόσμο των ρευστών και των ροών και η συνεισφορά τους στη Μηχανική Ρευστών θεωρείται σημαντική.

Το 18<sup>ο</sup> και 19<sup>ο</sup> αιώνα περιγράφηκε μαθηματικά η κίνηση των ρευστών. Η εξίσωση ενέργειας διατυπώθηκε από τον Bernoulli και οι εξισώσεις κίνησης από τον Euler. Στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα οι Navier-Stokes, έχοντας ως βάση τις εξισώσεις Euler, διατυπώνουν τις εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν τη μεταφορά θερμότητας, μάζας και ορμής, τις γνωστές εξισώσεις Navier-Stokes. Αυτές είναι μερικές διαφορικές εξισώσεις οι οποίες στη γενική τους μορφή δεν έχουν αναλυτική λύση αλλά μπορούν να διακριτοποιηθούν και να λυθούν αριθμητικά (με Αριθμητική Ανάλυση).

Το 1933 πραγματοποιήθηκε στην Αγγλία η πρώτη αριθμητική επίλυση ροής γύρω από κύλινδρο, από τον A. Thom. Τη δεκαετία του 60 η NASA συμβάλλει σημαντικά στην εξέλιξη του CFD κατασκευάζοντας πολλές αριθμητικές μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα (κώδικας TEACH, αλγόριθμος SIMPLE). Στις αρχές της δεκαετίας του 80 έκαναν την εμφάνισή τους στην αγορά οι πρώτοι εμπορικοί κώδικες CFD. Το CFD έχει πλέον αναγνωριστεί ως τμήμα της υπολογιστικά βοηθούμενης Μηχανικής (Computer-Aided Engineering, CAE). Είναι εφαρμόσιμο σε όλες τις βιομηχανίες και έχει κύριο στόχο τη μοντελοποίηση ροών μέσα ή γύρω από οποιαδήποτε γεωμετρία. Αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της αεροδυναμικής και της υδροδυναμικής, του σχεδιασμού αεροπλάνων, πλοίων, τραίνων, αυτοκινήτων, μηχανών, πυραύλων, συστημάτων ενέργειας και αυτοματισμού και γενικά οποιασδήποτε κατασκευής έχει επινοήσει ο άνθρωπος.

### 3.3 Μαθηματικές Εξισώσεις του CFD

Έστω αδρανειακό σύστημα αναφοράς το τρισσορθογώνιο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων  $x, y, z$  το οποίο περιγράφει την κίνηση του ρευστού σε έναν όγκο ελέγχου. Τότε, οι συντεταγμένες  $x, y, z, t$  καθορίζουν τη θέση ενός σημείου του χώρου ως προς το σύστημα αναφοράς τη χρονική στιγμή  $t$ . Για τη ροή των ρευστών έχουν διατυπωθεί κάποιες διαφορικές εξισώσεις που διέπουν τη κίνησή τους.

#### Νόμοι Διατήρησης των ρευστών

- Εξίσωση Συνέχειας : 
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

Η εξίσωση συνέχειας εκφράζει τη διατήρηση της μάζας. Η εξίσωση συνέχειας ισχύει για όλα τα ρευστά, ιδανικά και πραγματικά. Αν υπάρχουν πηγές ή καταβόθρες αυτές προστίθενται στο δεξί μέλος της εξίσωσης.

- Εξισώσεις Navier-Stokes :

Αν το πεδίο ταχυτήτων του ρευστού δίνεται από τις σχέσεις

$$u = u(x, y, z, t)$$

$$v = v(x, y, z, t)$$

$$w = w(x, y, z, t)$$

τότε οι διαφορικές εξισώσεις της κίνησης θα είναι οι γνωστές εξισώσεις διατήρησης της ορμής, Navier-Stokes, οι οποίες γράφονται υπό διανυσματική μορφή :

$$\frac{d}{dt} \vec{v}(x, y, z, t) - \nu \nabla^2 \vec{v}(x, y, z, t) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}$$

ή ισοδύναμα υπό μορφή συστήματος εξισώσεων :

$$\frac{du}{dt} = f_1 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u$$

$$\frac{dv}{dt} = f_2 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 v$$

$$\frac{dw}{dt} = f_3 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 w$$

Όπου  $v$  το κινηματικό ιξώδες του ρευστού, για το οποίο ισχύει :  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$

$p$  η πίεση του ρευστού,  $\rho$  η πυκνότητα του, και τέλος οι τυχόν εξωτερικές δυνάμεις  $f$  οι οποίες συνήθως είναι οι δυνάμεις βαρύτητας.

Το παραπάνω σύστημα εξισώσεων διατήρησης της ορμής μαζί με την εξίσωση της συνέχειας αποτελεί ένα κλειστό (επιλύσιμο) μη γραμμικό σύστημα διαφορικών εξισώσεων με μερικές παραγώγους, το οποίο επιλύεται με αριθμητικές υπολογιστικές μεθόδους. Για να είναι το πρόβλημα καλά τοποθετημένο θα πρέπει να καθορίζονται για κάθε περίπτωση οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες.

### 3.3.1 Τυρβώδης Ροή

Η τυρβώδης ροή ρευστού είναι το πιο περίπλοκο δυναμικό φαινόμενο της κλασσικής μηχανικής, καθώς πραγματοποιείται σε μεγάλο αριθμό χρονικών και χωρικών κλιμάκων. Σε κάθε τυρβώδη ροή, το ρευστό ικανοποιεί τις εξισώσεις Navier-Stokes. Η τύρβη απαιτεί χρήση στατιστικών μεθόδων για την περιγραφή της. Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει μεγάλη πρόοδος στην αριθμητική προσομοίωση της τύρβης με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η τύρβη χαρακτηρίζεται από αποτελεσματική ανάμειξη μεγεθών όπως ορμή, θερμότητα και μάζα οπότε ενδείκνυται σε προσομοιώσεις μεταφοράς θερμότητας. Η «αυστηρή» προσομοίωση της τύρβης, χωρίς την βοήθεια εμπειρικών δεδομένων από πειραματικές μετρήσεις, έχει γίνει μόνο για σχετικά χαμηλούς αριθμούς Reynolds και για απλές γεωμετρίες.

Η μη αυστηρή προσομοίωση της τύρβης έχει να κάνει με την περιγραφή βασικών χαρακτηριστικών του πεδίου ροής, είναι χρήσιμη στο CFD και διακρίνεται σε 2 βασικές κατηγορίες :

- Μοντελοποίηση της τύρβης (Turbulence modeling). Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται διαιρούν το πεδίο ταχυτήτων στη μέση τιμή και στις διακυμάνσεις του. Κατάλληλη για πληθώρα υπολογιστικών πλεγμάτων και χαρακτηριστικών ροής.
- Προσομοίωση μεγάλων δινών (Large eddies simulation). Μπορεί να εφαρμοστεί σε αριθμητικές προσομοιώσεις για τον υπολογισμό μόνο των χαρακτηριστικών της ροής που έχουν διαστάσεις μεγαλύτερες από τις διαστάσεις του υπολογιστικού πλέγματος

### 3.4 Μεθοδολογία Επίλυσης ενός κώδικα CFD

Οι πιο γνωστές υπολογιστικές μέθοδοι που εφαρμόζονται στους κώδικες Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής είναι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων. Η πιο αξιόπιστη μέθοδος είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method). Με βάση τη μέθοδο αυτή η υπό μελέτη περιοχή χωρίζεται σε στοιχεία με συγκεκριμένο αριθμό κόμβων. Οι εξισώσεις διακριτοποιούνται και επιλύονται επαναληπτικά σε κάθε στοιχείο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αριθμητική προσέγγιση της τιμής φυσικών μεγεθών σε χαρακτηριστικά σημεία του πεδίου ροής. Η βελτίωση του CFD καθορίζεται από τον Η/Υ και την τεχνολογία του αλλά και από :

- Επιτυχή καθορισμό Γεωμετρίας
- Κατασκευή Πλεγμάτων
- Φυσική και Μοντέλα τύρβης
- Δημιουργία Αλγορίθμων και Μεθοδολογίες λύσης

Η βασική εφαρμογή του CFD είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου προσομοίωσης και επίλυσης μιας ροής για την εξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων για συγκεκριμένες παραμέτρους. Το πρώτο βήμα αποτελεί ο ορισμός της γεωμετρίας του φυσικού προβλήματος, δηλαδή της υπό εξέταση περιοχής ή του όγκου ελέγχου όπως λέγεται. Στα υπολογιστικά πακέτα CFD δίνονται δύο δυνατότητες για το σχεδιασμό της γεωμετρίας. Η μία είναι η κατασκευή της γεωμετρίας από υποτομήμα του ίδιου του προγράμματος ενώ η δεύτερη, η οποία αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα των CFD πακέτων, είναι η εισαγωγή μιας έτοιμης γεωμετρίας σχεδιασμένης μέσω κάποιου σχεδιαστικού CAD λογισμικού. Μετά τη δημιουργία του όγκου ελέγχου ακολουθεί η κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος.

Αφού σχεδιαστεί το πλέγμα, κατόπιν εισάγεται στο τμήμα φυσικής μοντελοποίησης του CFD, όπου δίνονται χαρακτηριστικές αρχικές τιμές για κάποια μεγέθη και ορίζονται και οι οριακές συνθήκες του προβλήματος στα διάφορα πεδία (domains) του όγκου ελέγχου.



Στο τμήμα αυτό μπορούν επίσης να εισαχθούν από το χρήστη συναρτήσεις, παράμετροι, υλικά και ειδικά χαρακτηριστικά αυτών, όπως για παράδειγμα ειδική θερμοχωρητικότητα, θερμική αγωγιμότητα, πυκνότητα, τύρβη, ακτινοβολία κ.ά. ή ακόμα και αντιδράσεις που εκφράζουν την υπό μελέτη περίπτωση. Επιπλέον από το τμήμα αυτό καθορίζονται οι εξισώσεις επίλυσης, ο ρυθμός επίλυσης, ο αριθμός επαναλήψεων και αν πρόκειται για μόνιμη ή παροδική κατάσταση (steady state-transient). Το τμήμα αυτό του CFD λέγεται Pre-Processor.

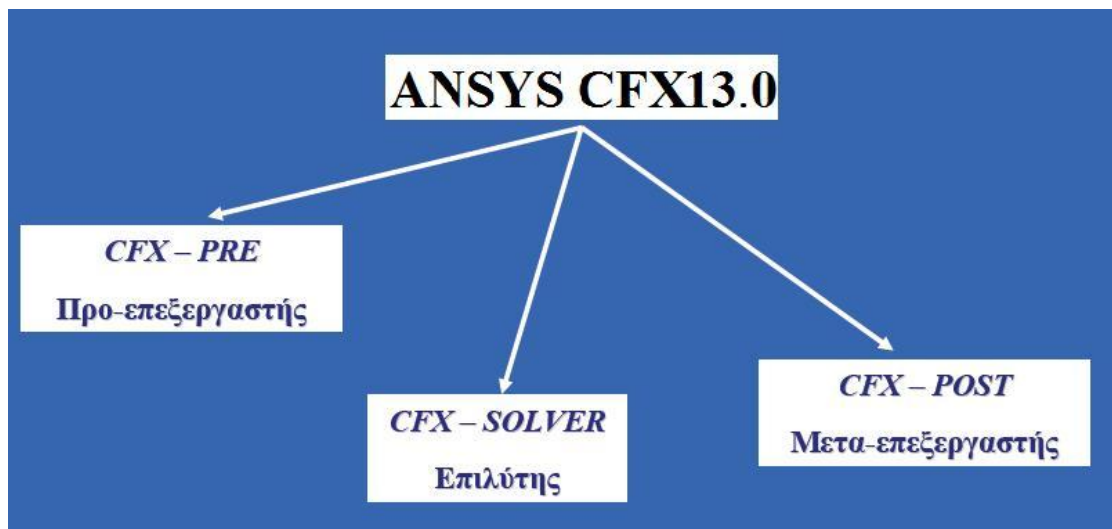
Μόλις ρυθμιστούν όλα τα παραπάνω μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία επίλυσης από τον Solver. Το τμήμα αυτό θέτει σε τρέξιμο (Run) το πρόγραμμα το οποίο «τρέχει» μέχρι να παρουσιαστεί αριθμητική σύγκλιση. Κατά τη διάρκεια του τρεξίματος, συνήθως ο χρήστης έχει τη δυνατότητα αν το επιθυμεί να βλέπει την εξέλιξη της επίλυσης. Ο Solver μόλις επιλύσει το πρόβλημα δημιουργεί ένα αρχείο αποτελεσμάτων το οποίο περιέχει τις μεταβολές των τιμών της ταχύτητας, της πίεσης, της θερμοκρασίας και όλων των χαρακτηριστικών φυσικών μεγεθών της ροής. Τα αποτελέσματα μπορούν μέσω του σχετικού αρχείου να γραφικοποιηθούν με χρήση του τμήματος Post-Processor για να μελετηθεί η συμπεριφορά του ρευστού, να κατανοηθεί το φυσικό πρόβλημα και να ελεγχθεί η αξιοπιστία του μοντέλου.

Επομένως η διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής με τη χρήση υπολογιστικού κώδικα αποτελείται από τα εξής βήματα :

- Γεωμετρία (Geometry)
- Υπολογιστικό Πλέγμα (Meshing)
- Ορισμός πεδίου ροής, χαρακτηριστικών τιμών ιδιοτήτων και οριακών συνθηκών (Physics definition, Pre Processor)
- «Τρέξιμο» - Επίλυση (Run – Solver)
- Παρουσίαση και επεξεργασία αποτελεσμάτων (Post Processor)

### 3.5 Υπολογιστικός Κώδικας ANSYS CFX

Το λογισμικό Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής το οποίο χρησιμοποιείται στην εργασία είναι το ANSYS-CFX 13.0 το οποίο περιλαμβάνει Pre Processor, Solver και Post Processor (Σχήμα 3.1). Το CFX αποτελεί σήμερα ένα από τα πλέον εξελιγμένα πακέτα λογισμικού ΥΡ παγκοσμίως, ίσως το πιο τελειοποιημένο εξ αυτών. Με σαφή ανωτερότητα στην τεχνολογία κατασκευής πλεγμάτων και επίλυσης εξισώσεων στο χώρο των εμπορικών πακέτων CFD γενικής χρήσης, το CFX παρέχει μια μεγάλη ποικιλία νέων μοντέλων, εργαλείων κατασκευής πλεγμάτων, καθώς και έναν εντελώς νέο μετά-επεξεργαστή (post-processor) ο οποίος αυξάνει σημαντικά το εύρος εφαρμογών και τη χρηστικότητα του πακέτου.



Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση βασικών τμημάτων υπολογιστικού πακέτου ANSYS CFX

Ο νέος **μετά-επεξεργαστής**, εκτός του ότι διαθέτει ένα σύγχρονο γραφικό περιβάλλον εργασίας (Graphical User Interface, GUI) και ισχυρά εργαλεία απεικόνισης, έχει και δυνατότητα προγραμματιζόμενης ποσοτικής μετά-επεξεργασίας, η οποία επιτρέπει την αυτοματοποίηση τυποποιημένων υπολογισμών σε επαναλαμβανόμενες διαδικασίες ελέγχων και βελτιστοποιήσεων, συνήθεις σε περιβάλλοντα σχεδιασμού, όπως για παράδειγμα της απόδοσης μηχανολογικών εξαρτημάτων, ή μιας χημικής διεργασίας. Προσαρμόζεται με εξαιρετική ευκολία στις ανάγκες του χρήστη και κυρίως μπορεί να έχει απευθείας πρόσβαση σε όλα τα δεδομένα και τις παραμέτρους της εφαρμογής για ακριβή ποσοτική μετά-επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Το CFX παρέχει μια νέα και αποτελεσματική μέθοδο για την προσομοίωση ελευθέρων επιφανειών, η οποία βρίσκει εφαρμογές σε πολύ διαφορετικά μεταξύ τους πεδία, όπως αυτά της θαλάσσιας υδροδυναμικής, της κίνησης ρευστών σε δεξαμενές ή της υδραυλικής. Μία προηγμένη και ακριβής μέθοδος ανάλυσης της διεπιφάνειας αερίου-υγρού, σε συνδυασμό με την προηγμένη τεχνολογία επίλυσης εξισώσεων του CFX, οδηγεί σε ακρίβεια και αποτελεσματικότητα στην επίλυση.

Το ANSYS δημιουργεί **πλέγματα** γρήγορα και εύκολα, υπερτερώντας από ανάλογα λογισμικά ως προς την ποιότητα του πλέγματος που παρέχει. Επιπροσθέτως, η δυνατότητα γενικευμένων **διεπιφανειών** πλεγμάτων (GGI) επαυξάνει σημαντικά την ευελιξία του πακέτου σε θέματα γεωμετρίας. Οι χρήστες μπορούν πλέον να δημιουργήσουν ομάδες από ανεξάρτητα μεταξύ τους πλέγματα για διαφορετικά μέρη του προβλήματος, χωρίς να χρησιμοποιούν κατ' ανάγκη τα ίδια εργαλεία ή την ίδια πλεγματική δομή σε κάθε ένα από αυτά, τα οποία μετά μπορούν να συνενωθούν.

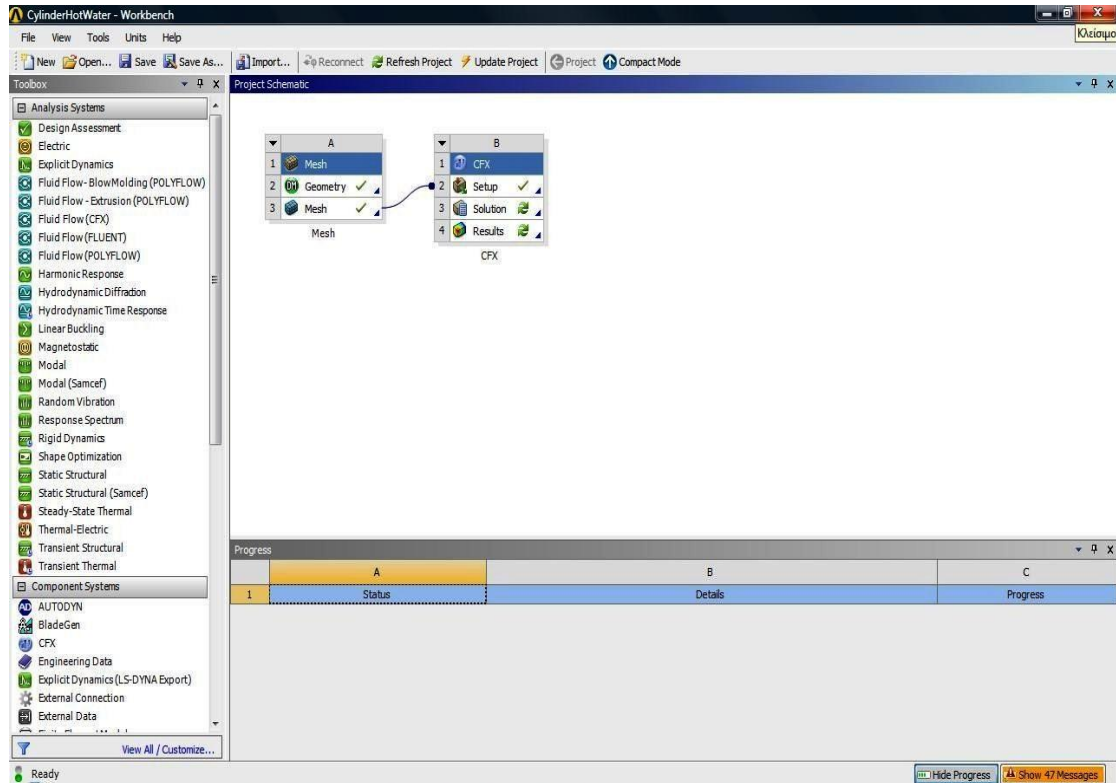
Η δυνατότητα αυτή, καθώς και όλες οι νέες δυνατότητες που προσφέρει το πακέτο υποστηρίζονται πλήρως από τη συζευγμένη μέθοδο επίλυσης εξισώσεων σε πολλαπλά πλέγματα (coupled multigrid linear solver) και από την ιδιαίτερα αποτελεσματική παράλληλη επίλυση, μειώνοντας έτσι δραστικά το χρόνο στησίματος.

Όσον αφορά σε **εφαρμογές διεργασιών**, το υπολογιστικό πακέτο επεκτείνει σημαντικά τις ήδη προηγμένες δυνατότητές του για προσομοίωση πολυφασικών ροών. Τόσο η ενέργεια όσο και δευτερεύοντα βαθμωτά μεγέθη μεταφέρονται και ανταλλάσσονται μεταξύ δύο φάσεων. Έτσι, με τη χρήση και νέων μοντέλων δίδεται η δυνατότητα βελτίωσης της αποτελεσματικότητας και της απόδοσης εργαλείων και εξοπλισμού, όπως αντιδραστήρες, στήλες φυσαλίδων και ρευστοποιημένες κλίνες.

Επίσης, το CFX προσφέρει τα πιο σύγχρονα και πλέον **προηγμένα μοντέλα τύρβης**, όπως το μοντέλο τύρβης SST (shear stress transport) το οποίο συνδυάζεται με αυτόματες συναρτήσεις τοιχωμάτων. Λεπτομερείς έλεγχοι της αξιοπιστίας έδειξαν ότι το μοντέλο SST «υψώνει τον πήχη» σε ό,τι αφορά την προσομοίωση της τυρβώδους ροής στα εμπορικά λογισμικά CFD.

Τέλος, η πρόβλεψη δύσκολων φαινομένων, όπως η αποκόλληση ροής και η **μεταφορά θερμότητας**, έχει βελτιωθεί σημαντικά αναβαθμίζοντας τη χρησιμότητα του πακέτου στις περισσότερες προσομοιώσεις βιομηχανικών ροών.

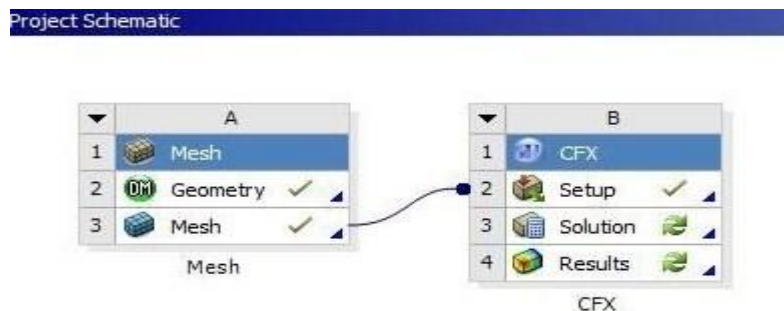
Η χρήση του υπολογιστικού κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS - CFX 13.0 ξεκινά με το άνοιγμα της εφαρμογής Workbench η οποία εισάγει το χρήστη στο περιβάλλον του προγράμματος. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το περιβάλλον του υπολογιστικού πακέτου καθώς και η πληθώρα δυνατοτήτων που έχει.



Εικόνα 3.1: Workbench – Γραφικό Περιβάλλον εργασίας του λογισμικού ANSYS - CFX 13.0

Στη συνέχεια, η πρώτη ενέργεια που πρέπει να πραγματοποιηθεί για δυνατότητα εργασίας στο ANSYS-CFX Workbench είναι να οριστεί μια working directory, δηλαδή μια προεπιλεγμένη τοποθεσία όπου θα γίνεται η φόρτωση και η αποθήκευση των αρχείων ενός συγκεκριμένου project.

Το περιβάλλον εργασίας του ANSYS Workbench συμπυκνώνει ένα σύνολο προηγμένων τεχνολογιών προσομοίωσης και παρέχει εποπτεία της εξέλιξης του έργου με τη χρήση διαγραμμάτων ροής.

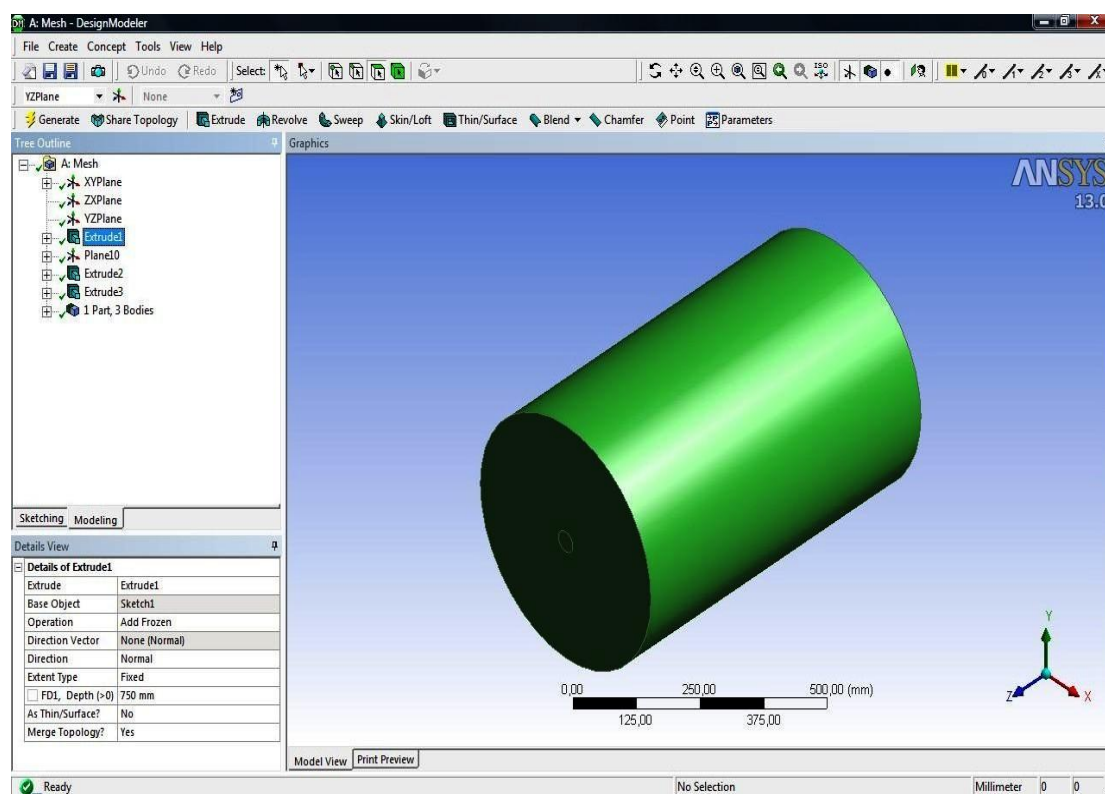


Εικόνα 3.2: Τα βασικά στάδια της διαδικασίας υπολογιστικής επίλυσης στο ANSYS

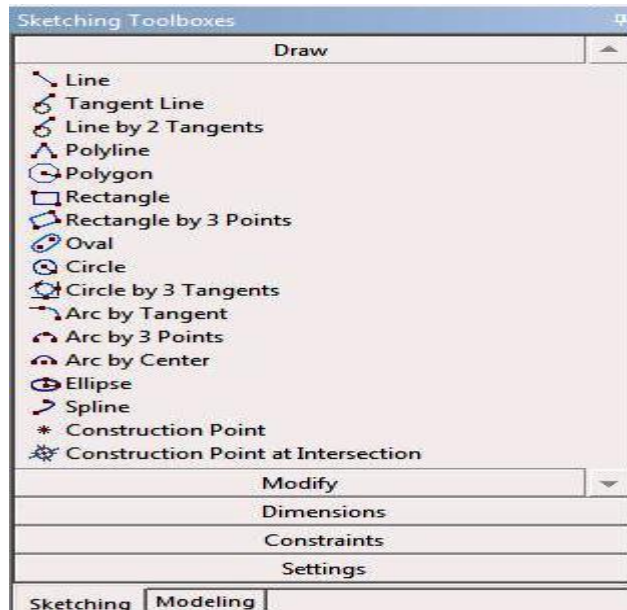
### 3.5.1 Γεωμετρία – Υπολογιστικό Πλέγμα (Geometry – Mesh)

Αυτή η διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί ως το πρώτο τμήμα του Pre Processing σταδίου. Τα εργαλεία διαμόρφωσης της γεωμετρίας του προβλήματος συμπεριλαμβάνονται στον Design Modeler ο οποίος ανοίγει από το Geometry (Εικόνα 3.2). Στόχος είναι ο καλύτερος δυνατός σχεδιασμός της γεωμετρίας του υπό μελέτη προβλήματος και η δημιουργία του κατάλληλου υπολογιστικού πλέγματος από το Mesh. Τα βασικά σημεία αυτού του τμήματος περιλαμβάνουν :

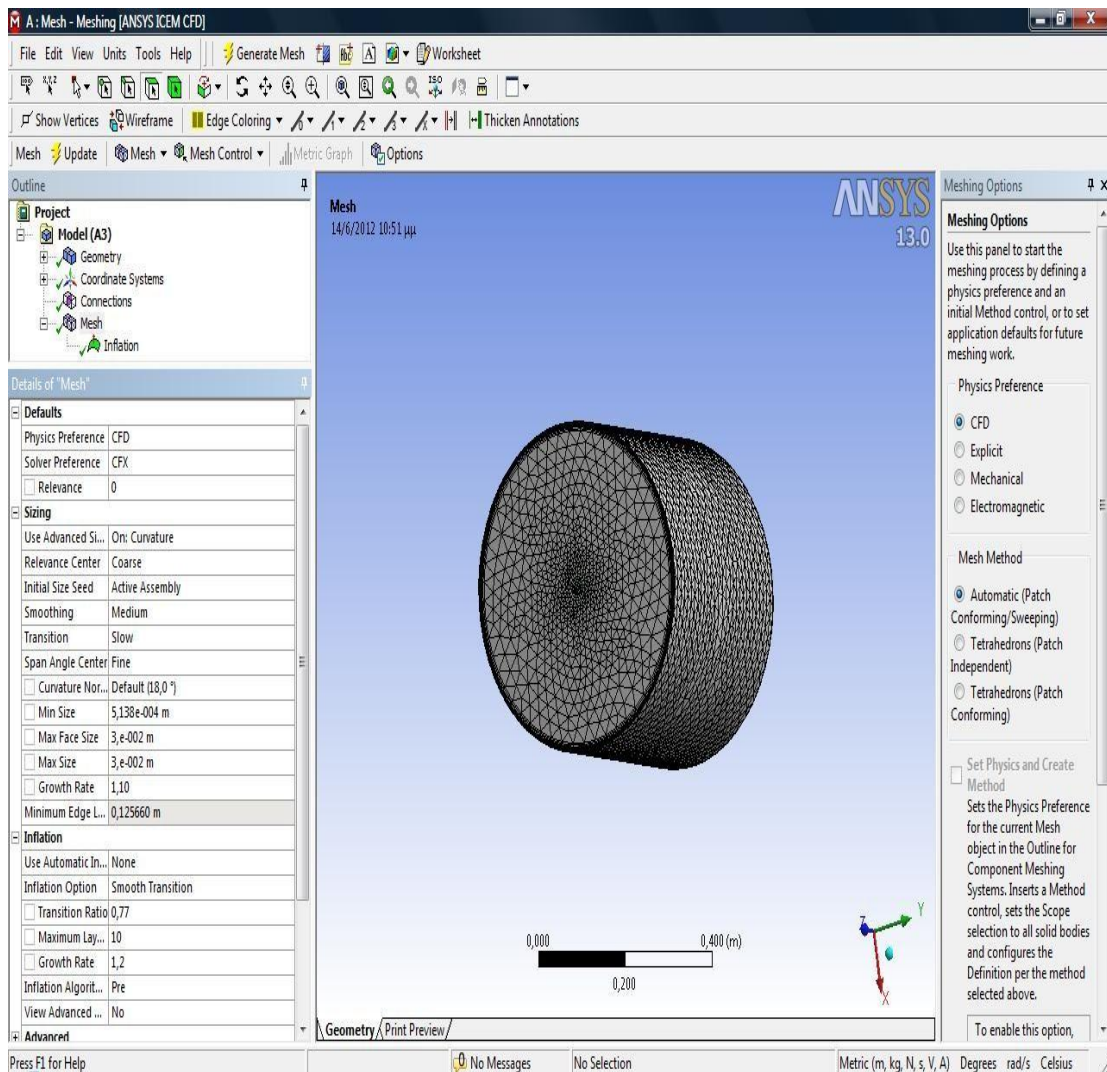
- Σχεδιασμό της γεωμετρίας και καθορισμό του όγκου ελέγχου
- Δημιουργία των απαραίτητων τμημάτων (εισόδων, εξόδων, συνόρων , επιφανειών) στα οποία στη συνέχεια θα εφαρμοστούν οι οριακές συνθήκες.
- Κατασκευή πλέγματος που να ανταποκρίνεται στη γεωμετρία και να δίνει τη δυνατότητα επίλυσης.( είδος μεθόδου κατασκευής στοιχείων)
- Ρύθμιση των παραμέτρων του πλέγματος ( μέγιστο - ελάχιστο μήκος πλευράς πεπερασμένων στοιχείων , αριθμός κόμβων, αριθμός πεπερασμένων στοιχείων, εξομάλυνση του πλέγματος κοντά σε συνοριακές επιφάνειες)



Εικόνα 3.3: Περιβάλλον διαμόρφωσης γεωμετρίας (Tree Outline & Graphics του Design Modeler )



Εικόνα 3.4: Εργαλεία σχεδίασης γεωμετρικών δομών και σχημάτων



Εικόνα 3.5: ANSYS Meshing – Τμήμα κατασκευής υπολογιστικού πλέγματος



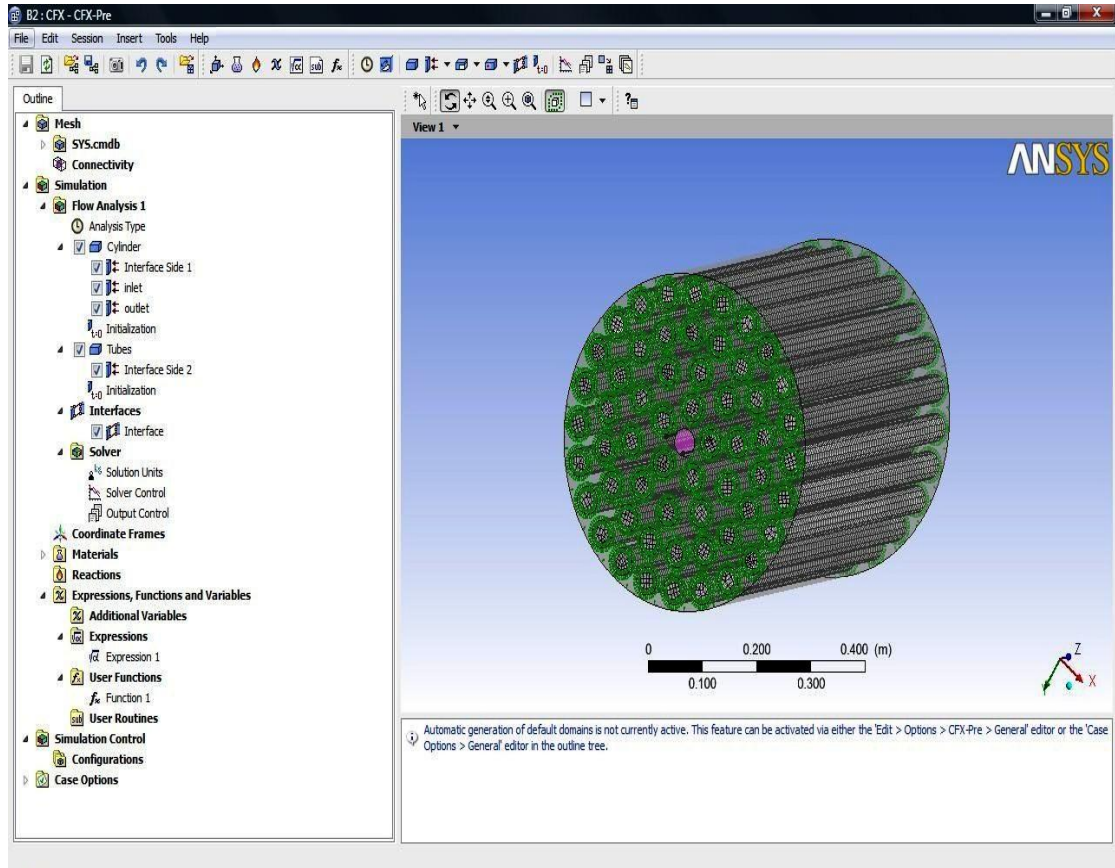
### **3.5.2 Ορισμός Φυσικών Ιδιοτήτων και Οριακών Συνθηκών (Physics definition)**

Αποτελεί το δεύτερο τμήμα του Pre Processing σταδίου. Το CFX-Pre τίθεται σε λειτουργία μέσω του Setup και έχει τελικό στόχο τη δημιουργία ενός προκατασκευασμένου αρχείου εισόδου στον Solver. Στο στάδιο αυτό αναγνωρίζεται από τον Pre Processor το υπολογιστικό πλέγμα και παρουσιάζονται όλα τα τμήματα (σώματα – λεπτά στρώματα - επιφάνειες, λοιπά τμήματα ) του όγκου ελέγχου χωριστά για να καθορίσει ο χρήστης τα χαρακτηριστικά τους.

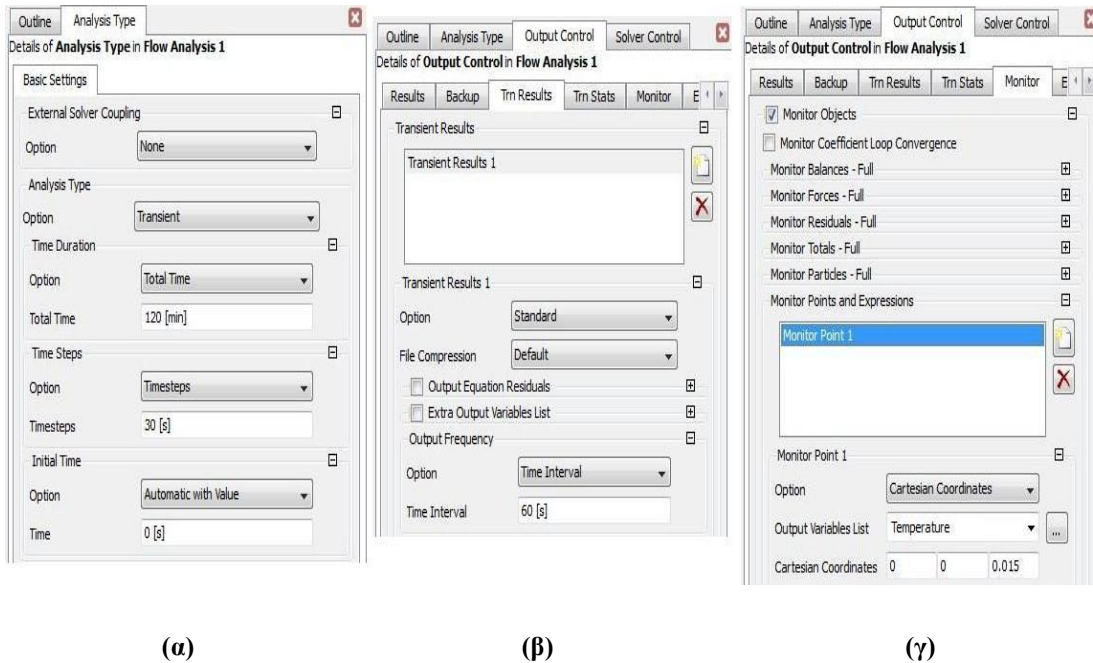
Αρχικά εισάγονται τα υλικά, τα σώματα που μετέχουν στην προσομοίωση καθώς και η κατάσταση της ύλης στην οποία βρίσκονται ( ρευστά – στερεά) και καθορίζεται η συμπεριφορά τους στο συγκεκριμένο πεδίο ροής. Εισάγονται φυσικές, θερμικές και χημικές ιδιότητες των υλικών, των ρευστών, συναρτήσεις που μπορεί να εκφράζουν κάποια ιδιότητα και τυχόν αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους . Ύστερα, ορίζονται οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες στα τμήματα της γεωμετρίας του προβλήματος στα οποία απαιτείται.

Επιπλέον, από αυτό το τμήμα του υπολογιστικού προγράμματος μπορεί να καθοριστεί το είδος της κατάστασης την οποία θα προσομοιώσει και θα επιλύσει ο κώδικας, δηλαδή αν πρόκειται για μόνιμη (σταθερή) κατάσταση ή για χρονικά μεταβαλλόμενη. Μπορεί να οριστεί η χρονική διάρκεια της διαδικασίας, ο αριθμός των επαναλήψεων που θα κάνει ο Solver, το χρονικό βήμα με το οποίο θα πραγματοποιεί την επαναληπτική διαδικασία καθώς και το περιοδικό χρονικό διάστημα λήψης δεδομένων για χαρακτηριστικά μεγέθη.(Εικόνα 3.7.α,β)

Επίσης, μπορούν να εισαχθούν από το χρήστη χαρακτηριστικά σημεία του όγκου ελέγχου ή του πεδίου ροής στα οποία είναι αναγκαία η λήψη πληροφοριών για κάποιο μέγεθος, τα λεγόμενα User monitor points (Εικόνα 3.7.γ). Η πληροφορία για τα σημεία αυτά κατά την επίλυση θα βρίσκεται στο αριστερό τμήμα της οθόνης του Solver και μ αυτό τον τρόπο θα παρακολουθείται η πορεία σύγκλισης κ λύσης της συγκεκριμένης μεταβλητής οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Στην ακόλουθη εικόνα απεικονίζεται το τμήμα Setup του ANSYS-CFX στο οποίο καταστρώνονται όλες οι φυσικές ιδιότητες, συνθήκες και χαρακτηριστικά, εξισώσεις, συναρτήσεις και παράμετροι που διέπουν την υπό μελέτη περίπτωση.



Εικόνα 3.6: Ορισμός Φυσικών Ιδιοτήτων και Οριακών Συνθηκών (CFX – Pre Outline)



(α)

(β)

(γ)

Εικόνα 3.7: (α) Ορισμός κατάστασης και χρονικής διάρκειας φαινομένου, (β) ορισμός συχνότητας λήψης δεδομένων, (γ) εισαγωγή σημείου παρακολούθησης της πορείας ενός μεγέθους (user points)



### 3.5.3 Επίλυση (Solver)

Μόλις τελειώσει το Pre Processing στάδιο το πρόγραμμα είναι σε θέση να τρέξει το αρχείο εισόδου από το Solution (με καθορισμένη τη φυσική και τη γεωμετρία του προβλήματος) και να δώσει προσεγγιστική αριθμητική λύση σε κάθε σημείο (κόμβο) του υπολογιστικού πλέγματος για μια σειρά από χαρακτηριστικά μεγέθη που εκφράζουν το πεδίο ροής. Αν ο Solver σταματήσει τότε το αρχείο εισόδου έχει κάποιο πρόβλημα δηλαδή κάτι δεν έχει ορίσει σωστά ο χρήστης και το πρόγραμμα αδυνατεί να δώσει λύση.

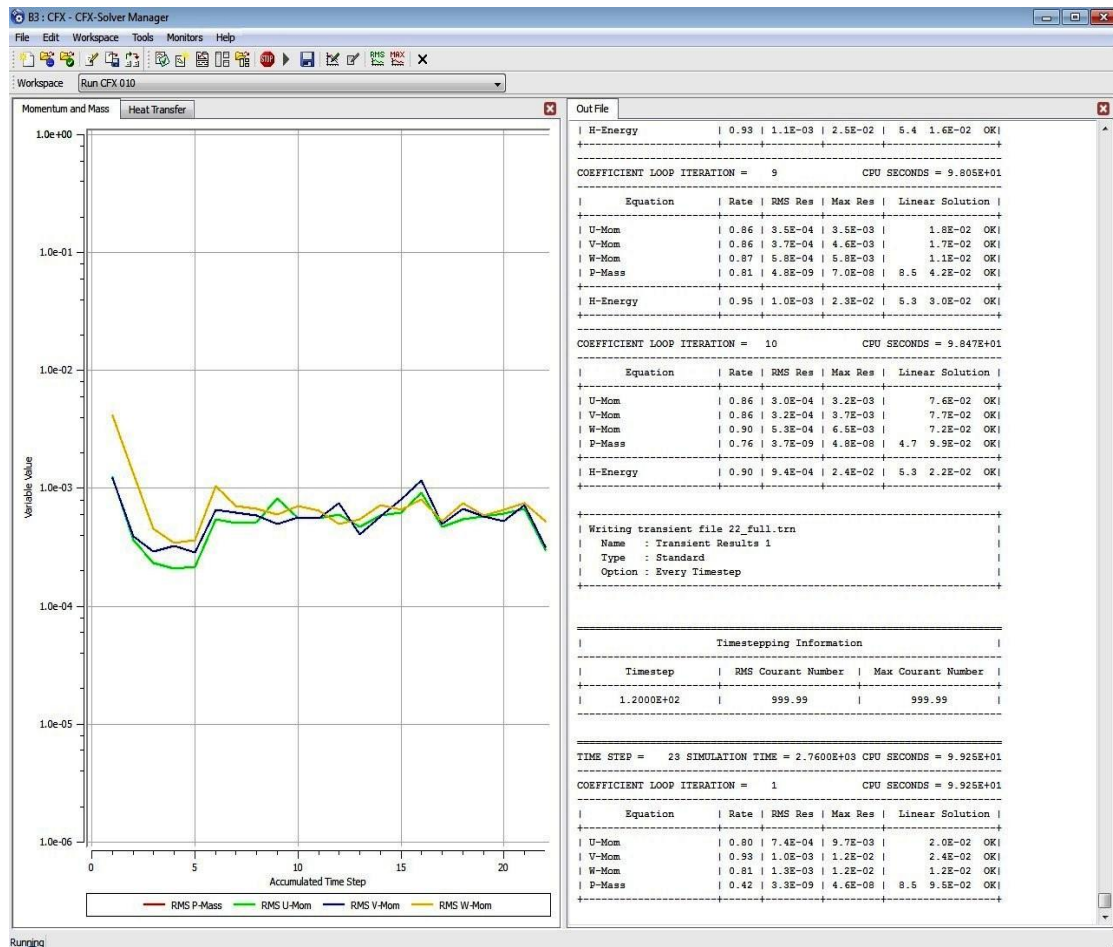
Τα βήματα επίλυσης που ακολουθεί ο Solver είναι τα ακόλουθα.

- Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις ολοκληρώνονται σε ολόκληρο τον όγκο ελέγχου. Με τον τρόπο αυτό εφαρμόζονται οι βασικοί νόμοι διατήρησης σε κάθε επιμέρους επιφάνεια και όγκο ελέγχου.
- Αυτές οι ολοκληρωτικές εξισώσεις μετατρέπονται σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων δημιουργώντας μια ομάδα προσεγγίσεων για τους σταθερούς όρους των ολοκληρωτικών εξισώσεων.
- Οι αλγεβρικές εξισώσεις επιλύονται επαναληπτικά.

Απαιτείται επαναληπτική διαδικασία εξαιτίας της μη γραμμικής φύσης των εξισώσεων και όταν η αριθμητική λύση προσεγγίζει την ακριβή λύση τότε λέμε ότι έχουμε σύγκλιση. Σε κάθε επανάληψη ένα σφάλμα ή υπόλοιπο καταγράφεται ως τιμή της συνολικής σε όλο τον όγκο ελέγχου διατήρησης των ιδιοτήτων του ρευστού.

Η σύγκλιση της τελικής λύσης στην ακριβή λύση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Αυτοί μπορεί να είναι το μέγεθος και το σχήμα των επιμέρους όγκων ελέγχου και διεπιφανειών (Domains & Interfaces) , το μέγεθος και ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων στο πλέγμα, ο ανεπιτυχής ορισμός των οριακών συνθηκών, η μη σωστή αριθμητική τιμή εισαγωγή κάποιας φυσικής παραμέτρου (π.χ. θερμοκρασία) , και οι τιμές των τελικών σφαλμάτων (residuals).

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται η πορεία επίλυσης από τον CFX Solver Manager. Αριστερά, δίνεται γραφικά η πορεία σύγκλισης των χαρακτηριστικών διαφορικών εξισώσεων και η απεικόνιση των ανηγμένων υπολοίπων για κάθε χρονικό βήμα, και δεξιά δίνονται είτε αριθμητικά είτε με μορφή σημειώσεων όλες οι πληροφορίες που περιγράφουν το πρόβλημα που επιλύεται για κάθε χρονικό βήμα. Στην αρχή της διαδικασίας επίλυσης ο χρήστης μπορεί να ελέγξει τον κώδικα που θα επιλύσει ο Solver και τιμές των διαφόρων παραμέτρων και ιδιοτήτων που έχει ορίσει.



Εικόνα 3.8 : Πλατφόρμα του CFX Solver εν ώρα «τρεξίματος»

Στο τέλος αυτού του σταδίου (Run conclusion) ο Solver δημιουργεί το αρχείο αποτελεσμάτων Results (.res) το οποίο στη συνέχεια εισάγεται στο τελευταίο τμήμα του κώδικα (Post Processor) στο οποίο γίνεται η επεξεργασία και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα μπορούν να αποθηκευτούν για να είναι διαθέσιμα για εκ νέου χρήση σε αρχεία της μορφής .cst.

### 3.5.4 Επεξεργασία και Παρουσίαση Αποτελεσμάτων (Post Processor)

Στον τμήμα αυτό γίνεται κατάλληλη επεξεργασία και απεικόνιση των αποτελεσμάτων χρωματικά ή διαγραμματικά στην οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Ο χρήστης μπορεί να λάβει αποτελέσματα τα οποία περιέχουν πληροφορίες για τη ροή και γενικότερα για τη λύση του προβλήματος, σε οποιαδήποτε επιφάνεια, επίπεδο, σημείο, περιοχή ή τμήμα που κρίνει σημαντικό και με ποικίλους τρόπους. Οι τρόποι αυτοί είναι :

- Contours
- Διανύσματα για το πεδίο ροής (vectors) ,
- Γραμμές Ροής (streamlines)
- Επίπεδα κάθετα στους τρεις άξονες δηλαδή τομείς του όγκου ελέγχου (planes)
- Όγκοι οι οποίοι τοποθετούνται στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου και απεικονίζονται πάνω σε αυτούς οι κατανομές ζητούμενων μεγεθών αλλά και επιφάνειες

Ακόμη, μπορούν να αποθηκευτούν εικόνες οι οποίες θα παρουσιάζουν τα αποτελέσματα αλλά και videos (animation) στα οποία μπορεί να παρουσιαστεί η μεταβολή ενός μεγέθους.

Επιπλέον, το τμήμα Post Processor δίνει τη δυνατότητα εξαγωγής των αποτελεσμάτων σε αρχεία διάφορων τύπων (.txt, .dat, .csv) τα οποία περιέχουν υπολογισμένες τιμές διάφορων μεγεθών σε οποιοδήποτε τμήμα του όγκου ελέγχου οριστεί. Στη συνέχεια τα δεδομένα των αρχείων αυτών μπορούν να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία σε στατιστικά προγράμματα (MS Excel, SPSS) και να οδηγήσουν σε χρήσιμα συμπεράσματα τα οποία θα βοηθήσουν στη μελέτη, επεξήγηση και κατανόηση των αποτελεσμάτων. (References<sup>1</sup>)

<sup>1</sup> References – Chapter 3 :

[www.ansys.com](http://www.ansys.com)

[http://courseware.mech.ntua.gr/ml22058/DPMS/3a-DPMS-YpolMhx-Kwdikas\\_CFX.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml22058/DPMS/3a-DPMS-YpolMhx-Kwdikas_CFX.pdf) (Μαρία Φούντη, Δημήτρης Κατσουρίνης, Υπολογιστικές μέθοδοι σε πολυφασικά πολυσυστατικά αντιδρώντα συστήματα, παρουσίαση υπολογιστικού κώδικα ANSYS-CFX)

[www.mie.uth.gr/labs/lte/grk/pubs/Diploma\\_Tziourtzioumis.pdf](http://www.mie.uth.gr/labs/lte/grk/pubs/Diploma_Tziourtzioumis.pdf)

<http://www.cfd-online.com>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

### 4.1 Εισαγωγικά

---

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας έχει καταστεί ένα σημαντικό ζήτημα στην παγκόσμια ενεργειακή σκηνή και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας διαφόρων εφαρμογών. Τα υλικά αλλαγής φάσης έχουν εφαρμοστεί για αύξηση της ικανότητας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας διαφόρων συστημάτων. Τα σημαντικά πλεονεκτήματα της χρήσης ΥΑΦ στα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης είναι η υψηλή θερμοχωρητικότητα και η σχεδόν ισόθερμη συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια διαδικασιών φόρτισης και αποφόρτισης.

Οι δεξαμενές αποθήκευσης θερμού νερού είναι συστήματα θέρμανσης που χρησιμοποιούνται ευρέως για την παροχή ζεστού νερού σε κατοικίες, βιομηχανίες κ.ά. Πολλοί ερευνητές έχουν αναλύσει τη θερμική απόδοση κυλινδρικών αγωγών θερμού νερού τα τελευταία χρόνια. Ένα από τα κύρια θέματα που έχει μελετηθεί είναι η θερμική διαστρωμάτωση του νερού μέσα στον αγωγό. Οι Ievers & Lin (2009) χρησιμοποίησαν 7 διαφορετικά τρισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα για να αξιολογήσουν το επίπεδο της διαστρωμάτωσης ενώ, οι Hahne & Chen (1998) εκτίμησαν αριθμητικά τη διαστρωμάτωση σε δοχείο αποθήκευσης θερμού νερού κατά τη διαδικασία φόρτισης υπό αδιαβατικές οριακές συνθήκες. Ένα άλλο θέμα που έχει αναλυθεί πρόσφατα στην εργασία των Cabeza *et al* (2003) είναι η προσθήκη PCM μέσα στις αποθηκευτικές μονάδες για αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας.

Η χρήση PCM σε διάφορες εφαρμογές δοχείων αποθήκευσης έχει εξίσου αναλυθεί και προσομοιωθεί και υπολογιστικά. Οι Padmanabhan and Murthy (1986) έχουν αναπτύξει ένα αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών για να περιγράψουν τη διαδικασία αλλαγής φάσης που συμβαίνει σε ένα κυλινδρικό σωλήνα. Οι Farid *et al* (1988) χρησιμοποίησαν μια αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα για την αντιμετώπιση της φυσικής συναγωγής κατά τη διάρκεια της διαδικασίας τήξης και στερεοποίησης σε ένα κατακόρυφο κύλινδρο.

## 4.2 Περιγραφή Φυσικού Προβλήματος

Διάφορα αριθμητικά μοντέλα που σχετίζονται με τις δεξαμενές αποθήκευσης θερμού νερού έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία και σε πολλές περιπτώσεις είχαν αποτελέσματα που ήταν σε καλή συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις.

Το σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας το οποίο θα προσομοιωθεί υπολογιστικά είναι ένας κυλινδρικός αγωγός θέρμανσης και παροχής ζεστού νερού που περιέχει κυλινδρικούς σωλήνες έγκλειστους με PCM. Θα μελετηθούν διάφορες περιπτώσεις της διαδικασίας αποφόρτισης του νερού στον αγωγό. Βασικοί στόχοι της μοντελοποίησης είναι:

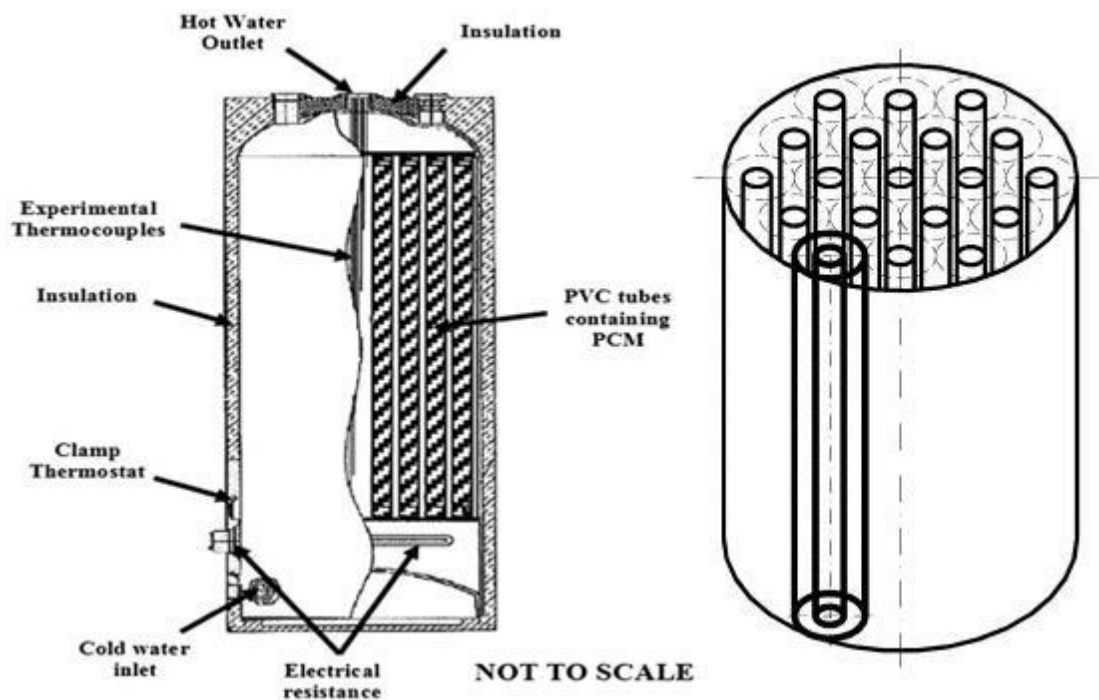
- Η μελέτη του πεδίου ροής εντός του κυλινδρικού αγωγού.
- Η ανάλυση του θερμικού πεδίου που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του κυλινδρικού αγωγού και η παρατήρηση των επιπέδων θερμοκρασίας κατά το πέρασμα του χρόνου.
- Ο έλεγχος της αξιοπιστίας του μοντέλου προσομοίωσης, με σύγκριση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα πειραματικά.
- Η αξιολόγηση της επίδρασης του PCM στην αποθήκευση θερμικής ενέργειας στο δοχείο και στη διατήρηση της θερμοκρασίας του νερού σε υψηλά επίπεδα.
- Η μελέτη διαφορετικών τιμών παροχής νερού στον αγωγό για την ανάδειξη του ρόλου της παροχής στη μεταβολή της θερμοκρασίας και την αποφόρτιση του νερού.
- Μελέτη η οποία αφορά τον αριθμό και τη θέση των σωλήνων που περιέχουν το PCM για παρατήρηση των διαφορών που επιφέρουν στην απόδοση του συστήματος.

Τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα των Gracia *et al* (2011), έχουν αποδείξει την αποτελεσματικότητα της χρήσης PCM στα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και θα χρησιμοποιηθούν για σύγκριση με την υπολογιστική προσομοίωση που θα πραγματοποιηθεί μέσω του ANSYS-CFX 13.0.

Η μοντελοποίηση θα πρέπει να αναδείξει την ικανότητα αποθήκευσης του PCM και τη μεταφορά της θερμότητάς του στο νερό. Μετά την επικύρωση πειραματικών-υπολογιστικών αποτελεσμάτων θα διεξαχθούν οι παραμετρικές μελέτες. Το πρώτο βήμα της προσομοίωσης είναι ο σχεδιασμός της γεωμετρίας στον Design Modeler του ANSYS-CFX.

### 4.3 Γεωμετρία της μονάδας αποθήκευσης

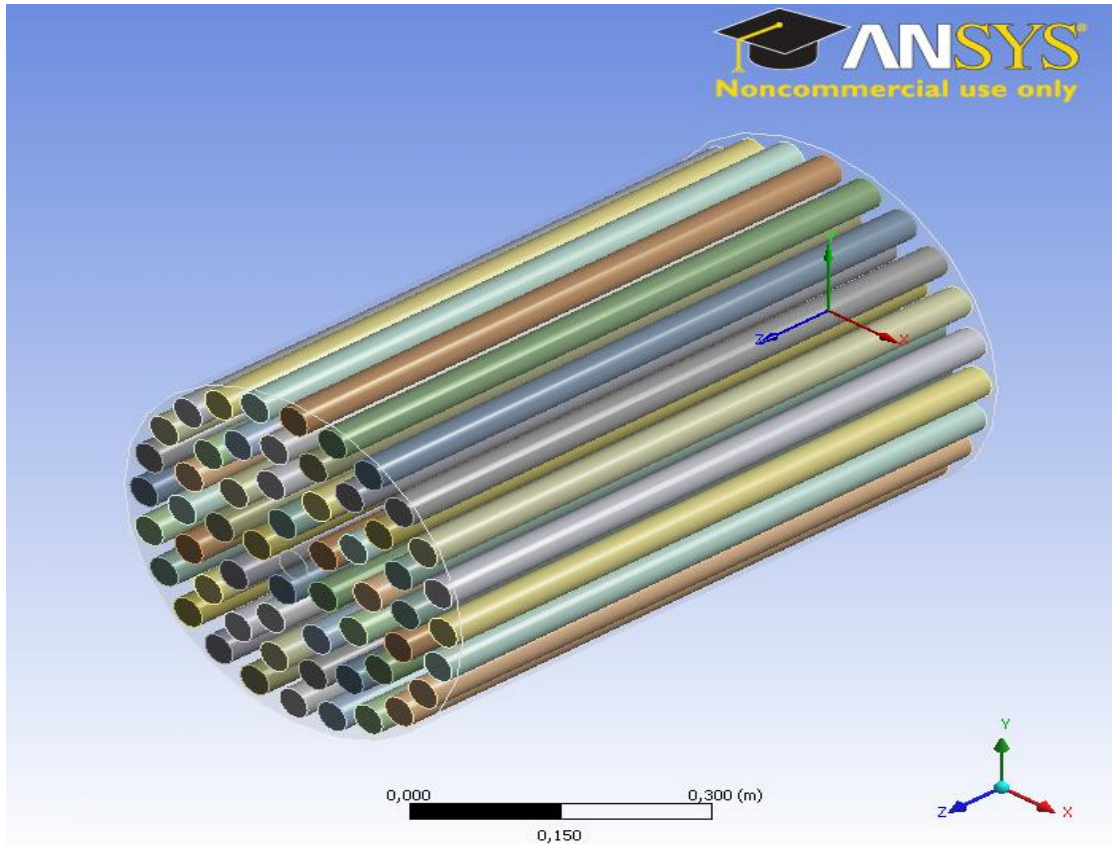
Ο οικιακός κυλινδρικός αγωγός θερμού νερού (**Hot water cylinder**) που μελετάται, εμπεριέχει PCMs ενσωματωμένα σε 57 κατακόρυφους κυλινδρικούς σωλήνες (Tubes). Ο αγωγός θέρμανσης νερού έχει εσωτερική διάμετρο 0.474 m και μήκος 0.75 m. Το σύστημα είναι μονωμένο εξωτερικά με θερμομονωτικό υλικό πολουρεθάνης (PU) πάχους 5 cm και συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (heat transfer coefficient)  $h=0.4 \text{ W/m K}$ .



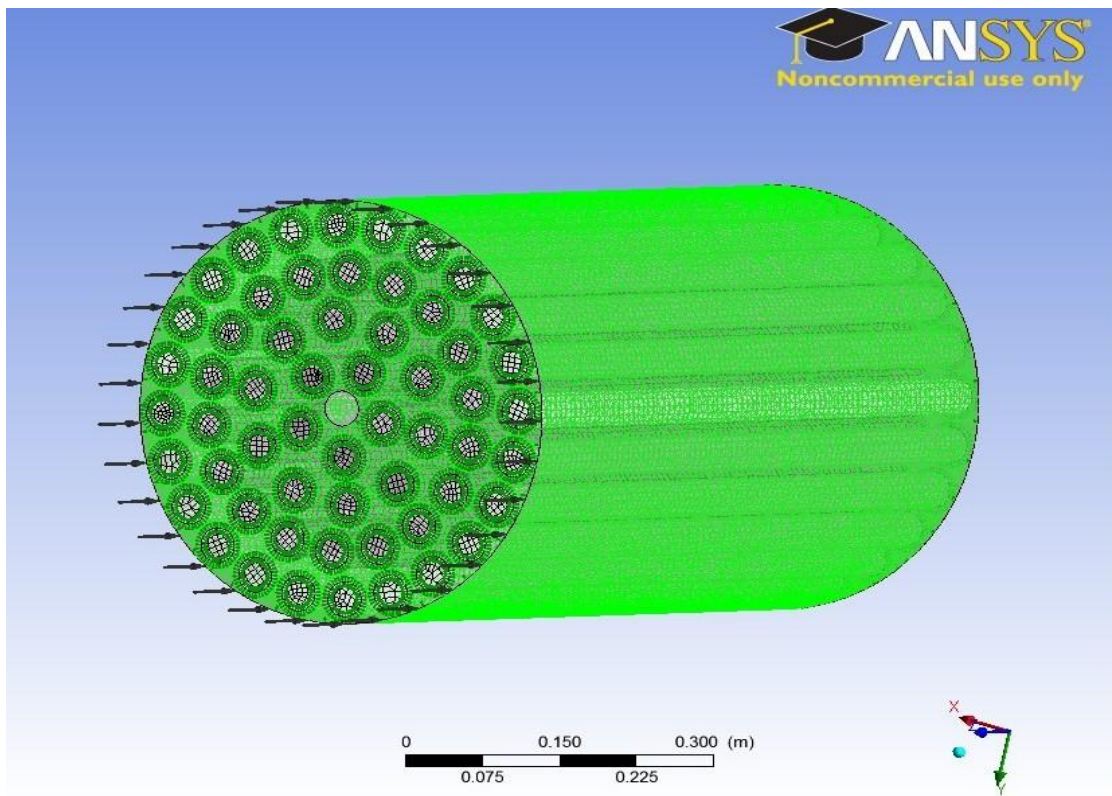
Σχήμα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση της γεωμετρίας του προβλήματος

Οι 57 σωλήνες είναι συμμετρικά κατανομημένοι μέσα στον αγωγό, μήκους 0.75 m ο καθένας και περιέχουν έγκλειστο το PCM (Εικόνα 4.1). Οι κυλινδρικοί σωλήνες έχουν διάμετρο 40 mm αλλά με μια λεπτή εξωτερική επιφάνεια πάχους 2.95 mm από υλικό PVC (Polyvinyl chloride) το οποίο έχει συγκεκριμένες φυσικές ιδιότητες και το υπόλοιπο εσωτερικό μέρος αποτελείται από υλικό αλλαγής φάσης PCM συγκεκριμένου εύρους θερμοκρασίας τήξης και λανθάνουσας θερμότητας τήξης.

Το κρύο νερό εισέρχεται από το κάτω μέρος του κυλίνδρου (είσοδος, εικόνα 4.2) σε θερμοκρασία  $14.5^{\circ}\text{C}$  ενώ το ζεστό νερό φεύγει από την κορυφή (έξοδος). Το νερό καθώς εισέρχεται στο σύστημα θερμαίνεται. Η άντληση νερού υπάρχει δυνατότητα να γίνει μέχρι μια ορισμένη θερμοκρασία, αν ρυθμίζεται από έναν θερμοστάτη.



Εικόνα 4.1: Γεωμετρία κυλινδρικού δοχείου αποθήκευσης θερμού νερού το οποίο περιέχει 57 tubes με ενσωματωμένο το PCM στο εσωτερικό τους

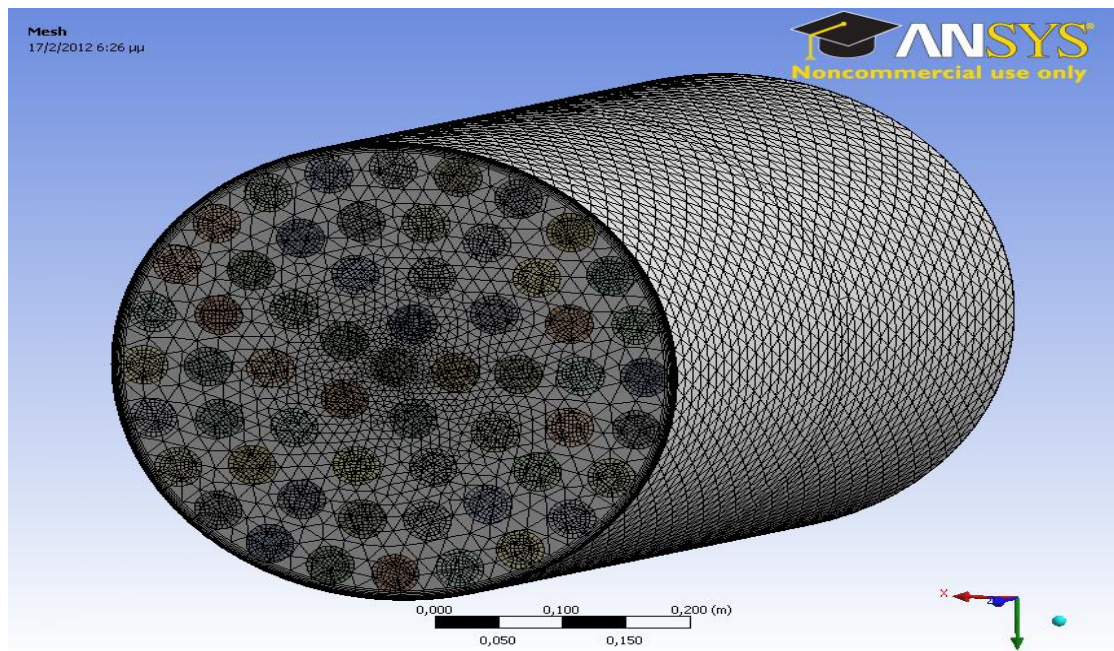


Εικόνα 4.2 : Είσοδος κυλινδρικού δοχείου αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με PCM



## 4.4 Υπολογιστικό Πλέγμα

Με τη βοήθεια του Meshing του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS-CFX κατασκευάστηκε μη δομημένο πλέγμα με τετράεδρα και πρίσματα και με ελάχιστο μήκος πλευράς  $9.138e-03$  m. Το πλέγμα ήταν πιο πυκνό στο εσωτερικό των 57 tubes και στα χαρακτηριστικά τμήματα της γεωμετρίας (είσοδος, έξοδος, σύνορα) ενώ έγινε και εξομάλυνση του πλέγματος κοντά στα τοιχώματα (inflation). Ο αριθμός κόμβων που προέκυψε είναι 267410 ενώ ο αριθμός πεπερασμένων στοιχείων 849211. Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται το υπολογιστικό πλέγμα της προσομοίωσης.



Εικόνα 4.3: Υπολογιστικό πλέγμα προσομοίωσης δοχείου αποθήκευσης θερμού νερού με PCM

Details of "Mesh"	
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
<input type="checkbox"/> Relevance	0
<b>Sizing</b>	
Use Advanced Si...	On: Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Nor...	Default (18.0 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	9.138e-003 m
<input type="checkbox"/> Max Face Size	5.138e-002 m
<input type="checkbox"/> Max Size	0.150 m
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.20 )
Minimum Edge L...	0.125660 m
<b>Inflation</b>	
<b>Advanced</b>	
<b>Defeaturing</b>	
<b>Statistics</b>	
<input type="checkbox"/> Nodes	267410
<input type="checkbox"/> Elements	849211
Mesh Metric	None

Εικόνα 4.4: λεπτομερή στοιχεία του υπολογιστικού πλέγματος



## 4.5 Μοντελοποίηση

Η μοντελοποίηση αφορά τη ροή ενός ρευστού (νερό) μέσα σε μια δεξαμενή θερμικής αποθήκευσης η οποία περιέχει στερεούς σωλήνες γεμάτους με PCM. Πρόκειται για τρισδιάστατη μονοφασική ροή (ελαφρά τυρβώδη). Η αριθμητική προσομοίωση του πεδίου ροής από τον κώδικα ANSYS CFX γίνεται με επίλυση των εξισώσεων διατήρησης της μάζας και των ορμών, Navier-Stokes :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (\text{N-S})$$

Κατά την αλληλεπίδραση ρευστού-στερεού πραγματοποιείται **μεταφορά θερμότητας** στο νερό με αγωγή, όσον αφορά τα κοντινά στους σωλήνες στρώματα, και με φυσική συναγωγή, η οποία αποτελεί και τον κυρίαρχο μηχανισμό λόγω ρευμάτων, στα υπόλοιπα μέρη του ρευστού. Οι βασικές εξισώσεις ενέργειας που επιλύονται είναι οι ακόλουθες, με την ενθαλπία  $H$  να εκφράζει την ολική ενέργεια του συστήματος :

- Εξίσωση μεταφοράς με αγωγή :  $\frac{\partial H}{\partial t} = k \nabla^2 T$  (Heat Conduction equation)
- Φυσική Συναγωγή :  $\frac{\partial H}{\partial t} + w \frac{\partial H}{\partial z} = k \nabla^2 T$  (Heat Convection equation in z-axis)

Για τη **μοντελοποίηση της τύρβης** το CFX παρέχει μια σειρά από «turbulence models». Για την περίπτωση έγινε χρήση του μοντέλου K-ε. Πρόκειται για ένα μοντέλο που περιλαμβάνει 2 επιπλέον εξισώσεις μεταφοράς για να αντιπροσωπεύουν τις ταραχώδεις ιδιότητες της ροής. Αυτό επιτρέπει στο μοντέλο να υπολογίζει για τις επιπτώσεις, αποτελέσματα τύπου history, όπως συναγωγή και διάχυση της τυρβώδους ενέργειας. (**K** κινητική ενέργεια, **ε** διάχυση). Έχει αποδειχθεί ότι είναι χρήσιμο για ροές με σχετικά μικρές κλίσεις πίεσης. Για ροές που οριοθετούνται εντός τοίχων και εσωτερικές ροές, το μοντέλο δίνει καλά αποτελέσματα μόνο σε περιπτώσεις όπου η μέση κλίση πίεσης είναι μικρή. Το K-ε μοντέλο είναι καλή επιλογή για προβλήματα, όπως στόμια εισόδου. Οι 2 εξισώσεις του μοντέλου είναι :

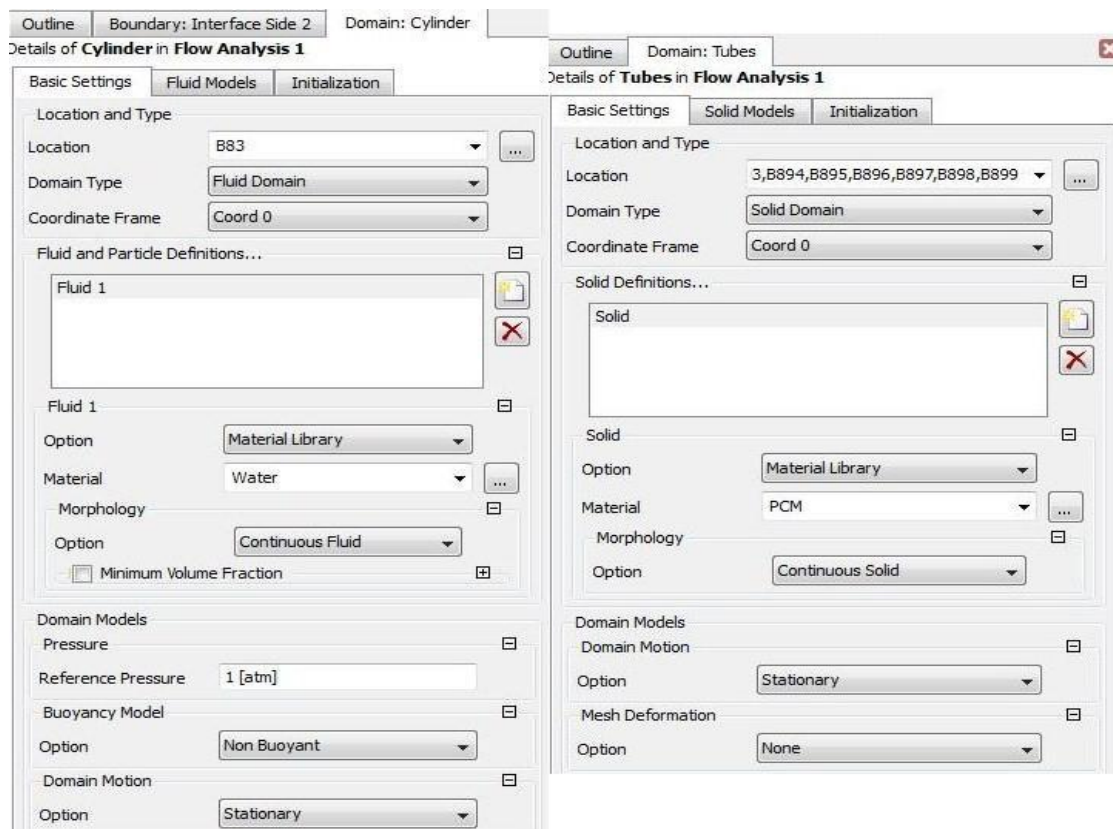
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{3\epsilon} P_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon$$

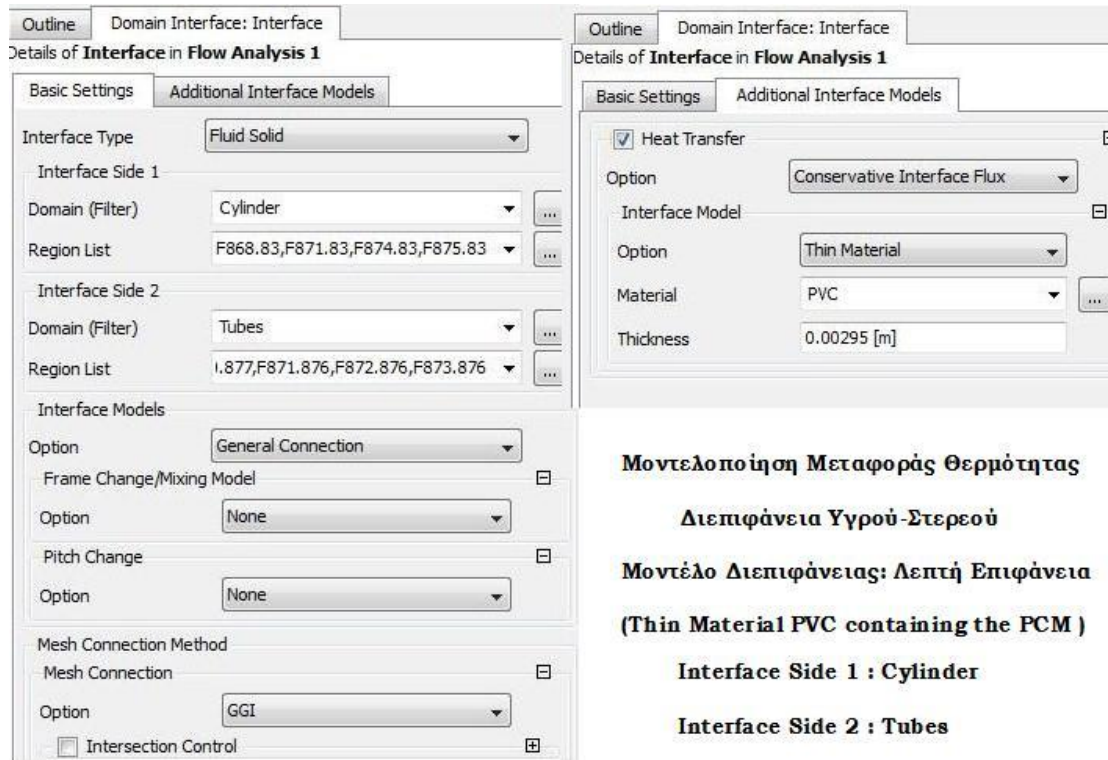
Η πρώτη μεταβλητή είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια, καθορίζει την ενέργεια στη δίνη και η δεύτερη είναι η τυρβώδης διάχυση, καθορίζει το μέγεθος της αναταραχής.

Η διαδικασία αποφόρτισης είναι ένα χρονικά μεταβαλλόμενο, παροδικό φαινόμενο με μεταφορά θερμότητας, η οποία εξαρτάται από το PCM. Στο CFX-Pre καθορίζεται από το Analysis Type στο Outline ο τύπος του φαινομένου (transient), η χρονική του διάρκεια και το χρονικό βήμα επίλυσης του κώδικα. (Εικόνα 3.7.α)

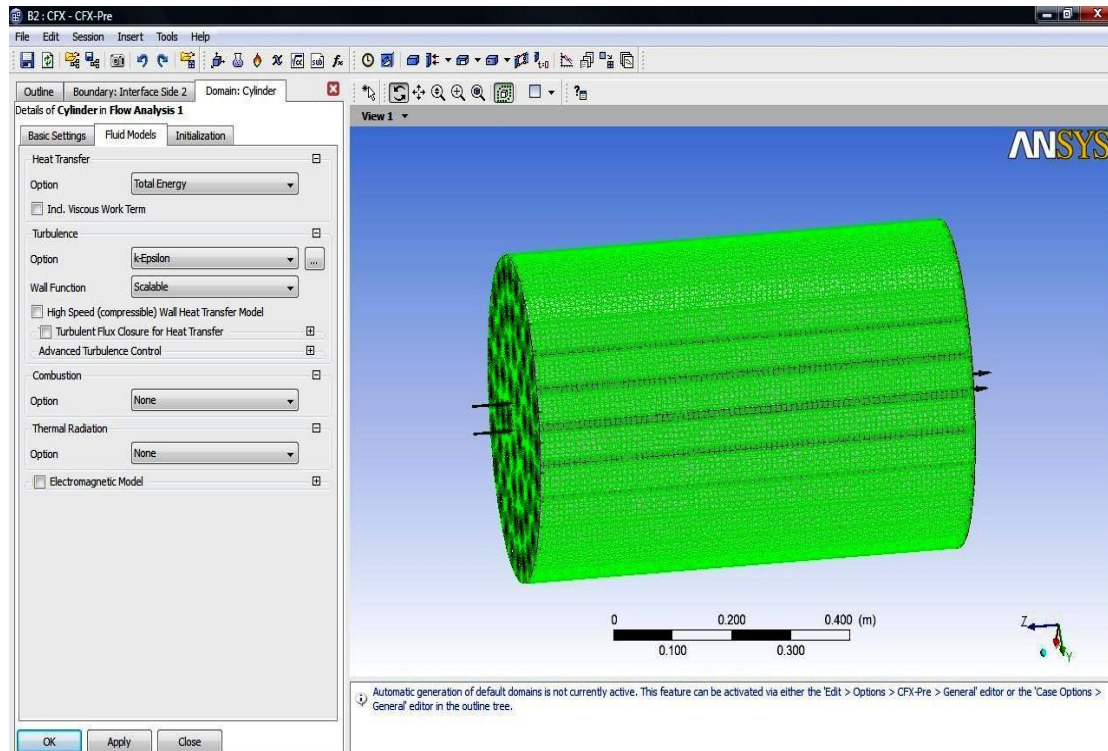
Το ANSYS CFX έχει τη δυνατότητα να μοντελοποιεί σύζευξη μεταφοράς θερμότητας για τη μεταφορά της θερμικής ενέργειας από ένα θερμαινόμενο (PCM) στερεό μέσω λεπτής επιφάνειας (Thin Material) στο νερό που ρέει γύρω από αυτή. Το μοντέλο περιέχει ένα υγρό domain για το νερό και ένα στερεό domain για τους σωλήνες (tubes), τμήματα τα οποία ανταλλάσσουν θερμότητα στη διεπιφάνεια (Interface). Το υγρό domain είναι ο κύλινδρος ο οποίος διαθέτει νερό που ρέει στον αγωγό κάθετα με ταχύτητα 0.04 m / min και αντλείται από την είσοδο σε θερμοκρασία 14.5° C. Οι σωλήνες στο εσωτερικό του αγωγού έχουν αρχική θερμοκρασία 80° C. Η διαδικασία μοντελοποίησης παρουσιάζεται στις επόμενες εικόνες.



Εικόνα 4.5 : Τα δύο βασικά τμήματα του όγκου ελέγχου της μοντελοποίησης, αριστερά το fluid domain (Cylinder) και δεξιά το solid domain (Tubes)



Εικόνα 4.6 : Μοντελοποίηση σύζευξης μεταφοράς θερμότητας από τα PCM στο νερό



Εικόνα 4.7 : Μοντελοποίηση τύρβης και θερμικής ενέργειας στον αγωγό θερμού νερού

Η προσομοίωση θέλει να αναδείξει τη βελτίωση που παρουσιάζεται στη θερμική απόδοση λόγω της εισαγωγής έγκλειστων PCM μέσα στο δοχείο ζεστού νερού. Ακόμα κι αν η ποσότητα του νερού μέσα στη δεξαμενή μειώνεται λόγω της εισαγωγής των σωλήνων που περιέχουν το PCM, τα συστήματα με PCM έχουν υψηλότερη ικανότητα φόρτισης θερμού νερού και η κάλυψη των αναγκών σε ενέργεια αυξάνεται.

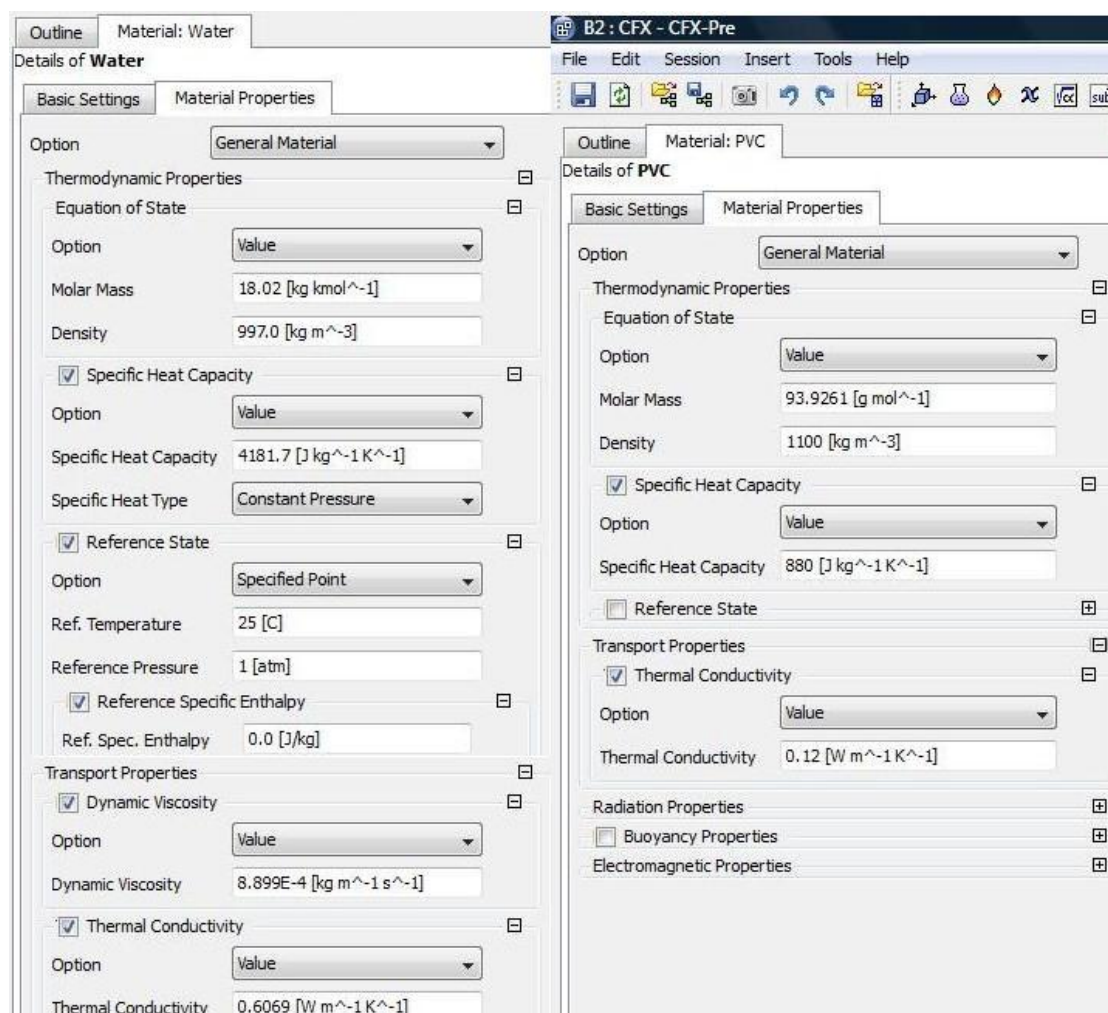
Για την απλοποίηση της υπολογιστικής ανάλυσης έχουν γίνει οι ακόλουθες παραδοχές :

- Η ανάμιξη του νερού μετά τις αποφορτίσεις περιορίζεται από τη θερμική αγωγιμότητα του νερού . Στην πραγματικότητα η θερμότητα που μεταφέρεται στο νερό από το PCM δημιουργεί ένα φυσικό αποτέλεσμα συναγωγής και αύξηση της ανάμιξης του νερού ενώ από την άλλη πλευρά η θερμική διαστρωμάτωση στο εσωτερικό του αγωγού μειώνει την έκταση της ανάμιξης.
- Το PCM θεωρείται ομοιογενές και ισότροπο μέσα στο container.
- Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας από το PCM προσομοιώνεται θεωρώντας την ενεργό θερμοχωρητικότητα ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.
- Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ νερού και PCM γίνεται με φυσική συναγωγή κατά τις περιπτώσεις αποφόρτισης του νερού.
- Η τύρβη εντός της δεξαμενής θεωρήθηκε μέτριας έντασης και προσομοιώθηκε από το μοντέλο τύρβης **K-ε** .
- Το νερό έχει ταχύτητα μόνο στην κατακόρυφη διεύθυνση  $w = 0.000667$  m/s.
- Η μεταφορά θερμότητας από τα PCM στο νερό κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης του νερού περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση ενέργειας την οποία επιλύει ο κώδικας CFX :
 
$$\frac{\partial H}{\partial t} + U_z \frac{\partial H}{\partial z} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$
- Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος έξω από τον όγκο ελέγχου ορίζεται στους 21°C.
- Η πίεση αναφοράς του συστήματος (Relative Pressure) θεωρείται ίση με  $P=1$ atm

### 4.5.1 Φυσικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες

• Το νερό έχει συγκεκριμένη μοριακή μάζα και πυκνότητα, μια ενιαία θερμική αγωγιμότητα και μία συγκεκριμένη ειδική θερμοχωρητικότητα, οι οποίες είναι προκαθορισμένες (ευρέως χρησιμοποιούμενο ρευστό σε προβλήματα CFD) στη Materials Library του CFX.

• Η λεπτή επιφάνεια από υλικό PVC έχει συγκεκριμένες ιδιότητες που φαίνονται στον Πίνακα 4.1 . Το υλικό καταχωρήθηκε στο CFX από την επιλογή Insert Material και έπειτα καθορίστηκαν οι τιμές για τις συγκεκριμένες ιδιότητες που το αντιπροσωπεύουν από την οθόνη Material Properties.



Εικόνα 4.8 : Φυσικές και θερμοδυναμικές ιδιότητες του Νερού και του PVC

• Το PCM στην στερεή φάση έχει τιμή ειδικής θερμοχωρητικότητας  $C_{P,Solid}$  ενώ όταν βρίσκεται στην υγρή φάση έχει μία τιμή  $C_{P,Liquid}$  οι οποίες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα όπως και οι υπόλοιπες φυσικές του ιδιότητες. Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του PCM είναι  $\lambda = 185.13 \text{ KJ/kg}$ .

*Πίνακας 4.1 : Φυσικές ιδιότητες των υλικών*

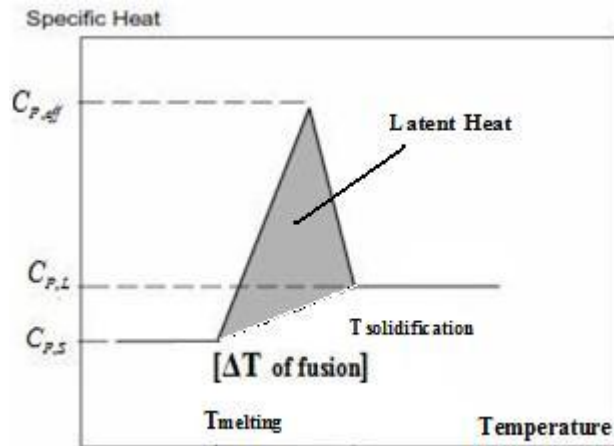
Material	Physical properties	
PVC	$\rho$	1100 kg/m <sup>3</sup>
	$C_p$	880 J/kg·K
	$K$	0.12 W/m·K
	$\rho_s$	1400 kg/m <sup>3</sup>
	$C_{p_s}$	2880 J/kg·K
	$K_s$	0.54 W/m·K
PCM	$\rho_L$	1290 kg/m <sup>3</sup>
	$C_{pL}$	4190 J/kg·K
	$K_L$	1.09 W/m·K
	$\lambda$	185.13 kJ/kg
	$T \text{ of fusion}$	57 - 61°C

Στο εύρος θερμοκρασιών αλλαγής φάσης, όπου λαμβάνει χώρα αποθήκευση ή απελευθέρωση θερμότητας, η θερμοχωρητικότητα του PCM και η μεταφορά θερμότητας προσεγγίζονται από τη **μέθοδο ενεργού θερμοχωρητικότητας** χρησιμοποιώντας συνάρτηση τριγωνικού σχήματος (Σχ. 4.2 και Σχ. 2.15 σελ.102).

Κάτω από τη θερμοκρασία τήξης το PCM έχει αποφορτιστεί πλήρως και πάνω από τη θερμοκρασία στερεοποίησης είναι πλήρως φορτισμένο. Στο CFX ο τρόπος που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη προσέγγιση ήταν ο ορισμός μιας συνάρτησης παρεμβολής δεδομένων (user function με interpolation data) η οποία βασίζεται στις αριθμητικές τιμές που προκύπτουν για τις επίμαχες θερμοκρασίες από τη τριγωνική συνάρτηση της ενεργού θερμοχωρητικότητας (εικόνα 4.9).

Μετά την πρώτη αποφόρτιση του νερού το ΥΑΦ θα μεταφέρει τη θερμότητα την οποία έχει αποθηκεύσει κατά την αλλαγή φάσης, στο νέο-εισαγόμενο κρύο νερό και θα οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας του νερού (χωρίς τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας).





Σχήμα 4.2 : Μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας

Basic Settings

Option: Interpolation (Data Input)

Argument Units: C

Result Units: J/(kg·K)

Interpolation Data

Option: One Dimensional

	Coordinate	Value
1	0	2880
2	57	2880
3	58	13940
4	58.5	25000
5	59	32500
6	59.5	40000

Coordinate:

Value:

Add Remove

Extend Min

Extend Max

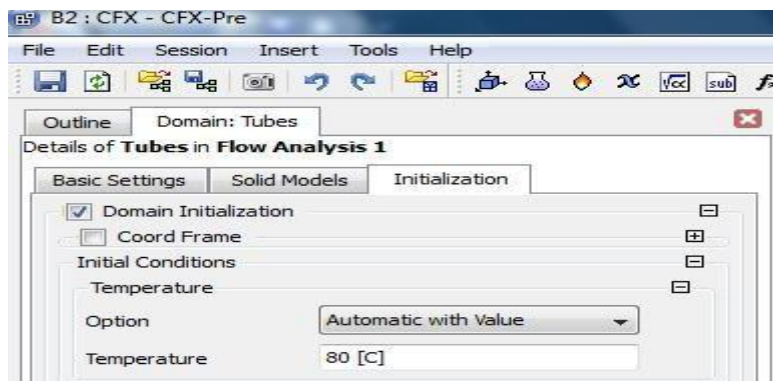
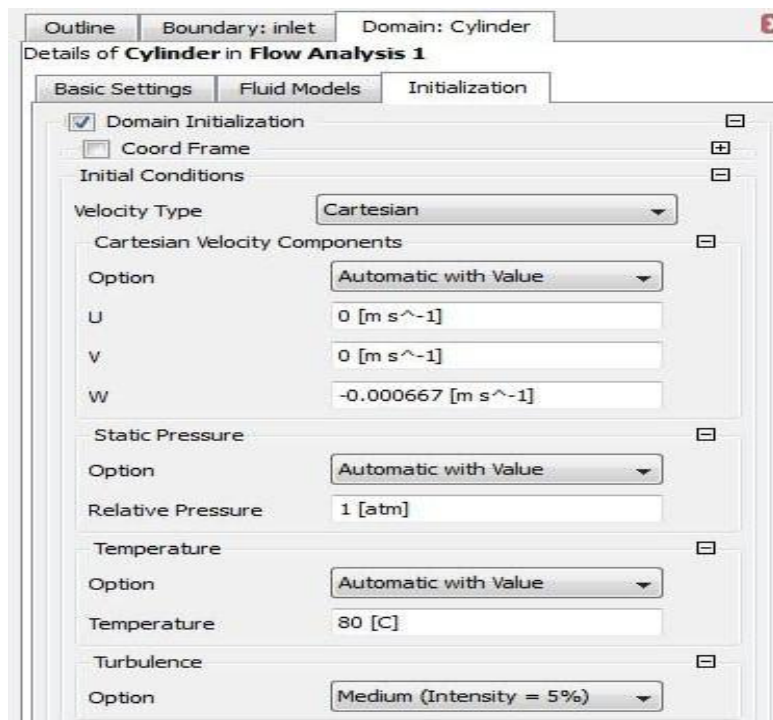
OK Apply Close

Εικόνα 4.9 : Φυσικές ιδιότητες του PCM και Προσομοίωση μεταφοράς θερμότητας του PCM με τη μέθοδο της ενεργού θερμοχωρητικότητας (Interpolation Data)

## 4.5.2 Αρχικές και Οριακές Συνθήκες

### Αρχικές Συνθήκες

- Το νερό εισέρχεται στον κυλινδρικό αγωγό κατακόρυφα στη διεύθυνση του άξονα συμμετρίας z. Η αρχική τιμή της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας είναι , σύμφωνα με την γεωμετρία ,  $w = 0.000667 \text{ m/s}$
- Η θερμοκρασία των σωλήνων και η θερμοκρασία του νερού που βρίσκεται στο εσωτερικό του κυλίνδρου βρίσκεται αρχικά στους  $T = 80^\circ\text{C}$  με το σύστημα να είναι φορτισμένο και το νερό ζεστό.
- Ορίζεται ως πίεση αναφοράς  $P = 1 \text{ atm}$



Εικόνα 4.10 : Εισαγωγή Αρχικών Συνθηκών στο μοντέλο του CFX



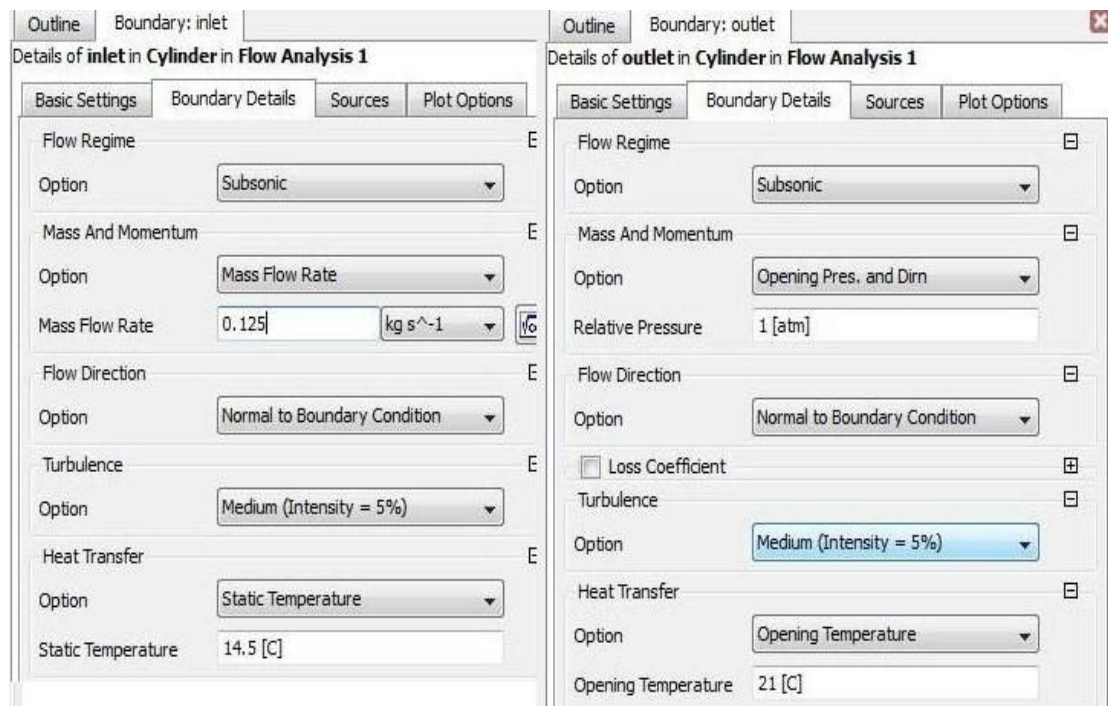
## Οριακές Συνθήκες

➤ ΕΙΣΟΔΟΣ ( Inlet ) : Το κρύο νερό εισέρχεται στον αγωγό από κάτω έχοντας θερμοκρασία 14.5 °C , με συγκεκριμένη ή ελεγχόμενη παροχή κάθε φορά.

- Θερμοκρασία Εισόδου του Νερού  $T_{in} = 14.5^{\circ}\text{C}$
- Σταθερή Παροχή Μάζας 0.125 kg/sec

Η παράμετρος αυτή διαφοροποιήθηκε για να μελετηθούν οι επιδράσεις της στο θερμικό πεδίο του συστήματος σε σχέση με το PCM. Μελετήθηκε η αποφόρτιση για διάφορες τιμές παροχής νερού στον αγωγό καθώς και η περίπτωση ρύθμισης από θερμοστάτη δηλαδή διακοπής της παροχής όταν η θερμοκρασία του νερού γίνει μικρότερη από 45°C. Ο περιπτώσεις εξηγούνται αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο.

- Μέσω του μοντέλου K-ε θεωρήθηκε Τυρβώδης Ροή με τύρβη μέτριας έντασης 5%
- ΕΞΟΔΟΣ ( Opening ) : Ορίστηκε η θερμοκρασία και η πίεση έξω από τον όγκο ελέγχου. Η τύρβη στην έξοδο θεωρήθηκε πάλι εντάσεως 5%.
- Θερμοκρασία Περιβάλλοντος  $T_{env} = 21^{\circ}\text{C}$
- Η πίεση εξωτερικού περιβάλλοντος είναι  $P = 1 \text{ atm}$



Εικόνα 4.11 : Επιβολή Οριακών Συνθηκών του προβλήματος (Είσοδος-Έξοδος)

## 4.6 Περιπτώσεις της μελέτης αποφόρτισης του συστήματος θέρμανσης νερού

Κατά τη διαδικασία υπολογιστικής προσομοίωσης της αποφόρτισης του κυλινδρικού δοχείου αποθήκευσης θερμικής ενέργειας εξετάζονται οι παρακάτω περιπτώσεις :

### • Έλεγχος αξιοπιστίας του μοντέλου - Επαλήθευση υπολογιστικής προσομοίωσης

Πραγματοποιείται διαδικασία αποφόρτισης του συστήματος με PCM μέσα στον αγωγό αλλά το νερό αντλείται μέχρι η θερμοκρασία του να γίνει χαμηλότερη από 45°C. Ο περιορισμός για την άντληση νερού περιγράφει ουσιαστικά ένα θερμοστάτη ο οποίος έχει τοποθετηθεί για να σταματά η παροχή του νερού όταν η θερμοκρασία του στη δεξαμενή πέσει κάτω από 45°C. Το PCM κατά τη διαδικασία στερεοποίησης, αποδίδει τη θερμότητα που έχει αποθηκεύσει κατά την τήξη και θερμαίνει το νερό.

Στην περίπτωση αυτή η υπολογιστικά προβλεπόμενη θερμοκρασία αποφόρτισης και ο χρόνος αποφόρτισης θα συγκριθούν με τα πειραματικά δεδομένα. Έτσι μπορεί να γίνει αξιολόγηση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Από το βαθμό συμφωνίας των αποτελεσμάτων θα εκτιμηθούν οι δυνατότητες του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε.

Στη συνέχεια θα γίνει ανάλυση κάποιων ποιοτικών χαρακτηριστικών και μελέτη διαφόρων σημαντικών παραμέτρων που επηρεάζουν το σύστημα και το θερμικό πεδίο εντός του αγωγού.

• **Σύγκριση των διαδικασιών αποφόρτισης** του δοχείου με ΥΑΦ (προσομοιωμένης μεταφοράς θερμότητας με τη μέθοδο ενεργού θερμοχωρητικότητας), με αποθηκευτικό μέσο κάποιο στερεό υλικό συγκεκριμένης θερμοχωρητικότητας και χωρίς καθόλου υλικά (χωρίς Tubes) μέσα στη δεξαμενή θερμού νερού δηλαδή :

1) Πλήρης αποφόρτιση με **PCM** μέσα στον αγωγό , με τη θερμοκρασία του νερού να είναι αρχικά στους 80° C και να αντλείται με σταθερή παροχή 7,5 L / min δηλαδή 0.125 kg/sec . Η θερμοκρασία του PCM έχει αρχική τιμή επίσης 80°C .

2) Αποφόρτιση του νερού με τον αγωγό να περιέχει Tubes με υλικό σταθερής θερμοχωρητικότητας  $C_p = 2880 \text{ J/kg K}$  για την ίδια παροχή.

3) Αποφόρτιση χωρίς σωλήνες μέσα στον αγωγό για την ίδια παροχή.

• **Παραμετρική μελέτη διαφορετικών σταθερών παροχών νερού**

- 1) Αποφόρτιση νερού με PCM με σταθερή παροχή 0.05 kg/sec
- 2) Αποφόρτιση νερού με PCM με σταθερή παροχή 0.10 kg/sec
- 3) Αποφόρτιση νερού με PCM με σταθερή παροχή 0.125 kg/sec

• **Παραμετρική μελέτη διαφορετικών εισόδων του ρευστού** - Σύγκριση της αποφόρτισης συστήματος εισόδου μεγάλης διαμέτρου και εισόδου μικρής διαμέτρου, με θερμοστάτη στους 45°C. Σε αυτή την παραμετρική ανάλυση επιλέγονται δύο διαφορετικοί τρόποι για την εισαγωγή του νερού στον κυλινδρικό αγωγό. Εννοώντας είσοδο μεγάλης διαμέτρου το νερό εισάγεται κάθετα στον κυλινδρικό αγωγό από όλη την κάτω κυκλική επιφάνεια (διαμέτρου 47.4 cm), ενώ η διατομή της μικρής εισόδου νερού έχει διάμετρο μόλις 4 cm.

• **Παραμετρική Μελέτη που αφορά τον αριθμό και τη θέση των σωλήνων με PCM στον κυλινδρικό αγωγό.** Η δεξαμενή αποφορτίζεται και πάλι έχοντας θερμοστάτη στους 45°C αλλά περιλαμβάνει μικρότερο αριθμό σωλήνων που εμπεριέχουν το PCM. Σε όλες τις περιπτώσεις της προσομοίωσης (εκτός από εκείνη χωρίς Tubes) οι σωλήνες είναι 57 και έχουν διάμετρο 40 mm. Στην περίπτωση αυτής της παραμετρικής μελέτης ο αγωγός περιέχει λιγότερες σειρές σωλήνων ίδιου όμως μεγέθους. Ο αριθμός των σωλήνων μειώνεται σε 28 και σε 42 σωλήνες αντίστοιχα οι οποίοι κάθε φορά βρίσκονται σε διαφορετική θέση αλλά η διάμετρος των σωλήνων παραμένει ίδια.

▪ **Αναφορές Κεφαλαίου 4:** [References<sup>1</sup>]

---

<sup>1</sup> References – Chapter 4

S. Ievers, W. Lin, Numerical simulation of three-dimensional flow dynamics in a hot water storage tank, Applied Energy 86 (2009) p.2604-2614.

E. Hahne, Y. Chen, Numerical study of flow and heat transfer characteristics in hot water stores, Solar Energy 64 (1998) p.9-18.

H. Mehling, L.F. Cabeza, S. Hippeli, S. Hiebler, PCM-module to improve hot water heat stores with stratification, Renewable Energy 28 (2003) p.699-711

P.V. Padmanabhan, M.V.K. Murthy, Outward phase change in a cylindrical annulus with axial fins on the inner tube, International Journal of Heat and Mass Transfer 29 (1986) p 1855-1868.

M.M. Farid, K. Yongsik, H. Takuya, K. Atsushi, The role of natural convection during melting and solidification of PCM in a vertical cylinder, Chemical Engineering Communications 84 (1988) p.43-60.

A.de Gracia, E. Oró, M.M. Farid, L.F. Cabeza : Thermal analysis of including phase change material in a domestic hot water cylinder, Applied Thermal Engineering 31 (2011) p.3938-3945

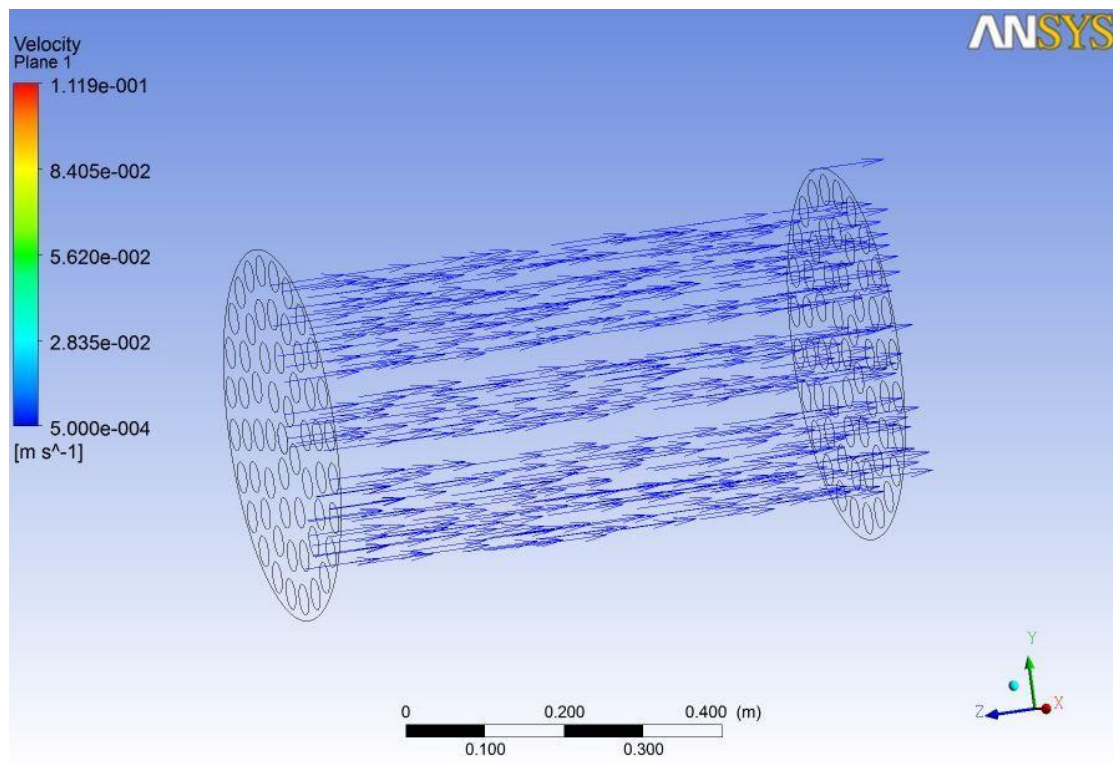
Harald Mehling and Luisa F. Cabeza: Phase Change Materials and their Basic Properties, Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption, Springer, Part V (2007)

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

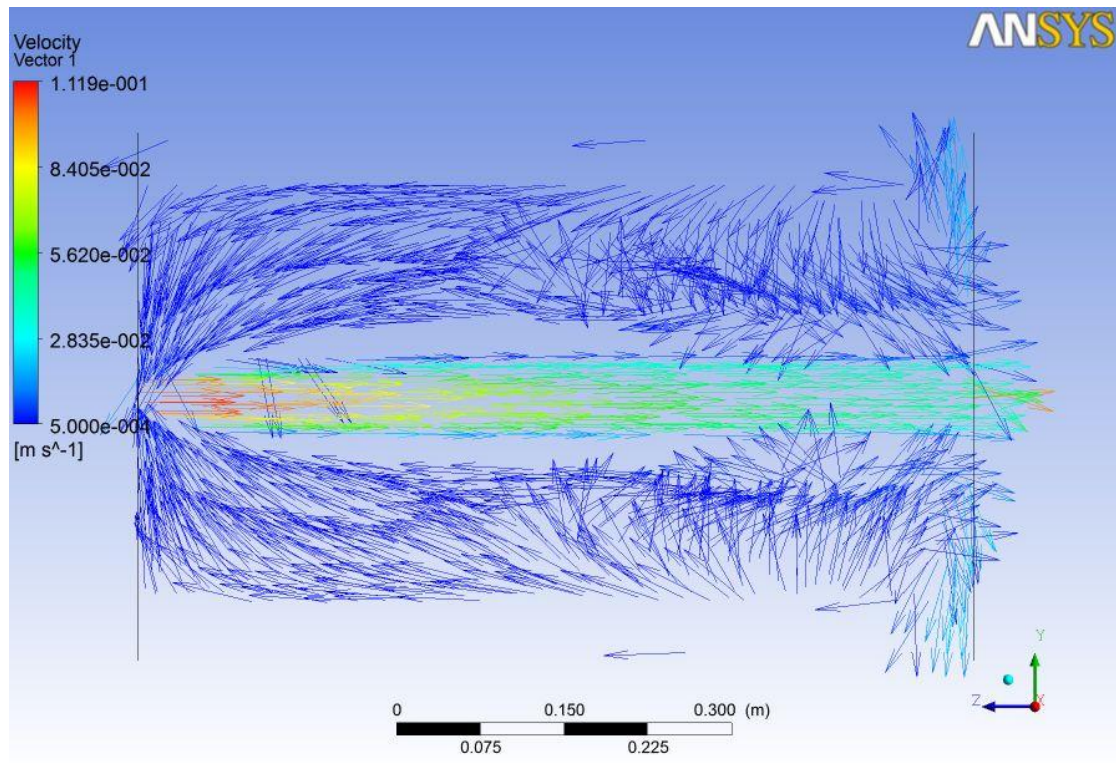
### 5.1 Πεδίο Ροής

Η περιγραφή του χώρου μέσα στον οποίο κινείται το ρευστό (το νερό) που μελετάμε δίνει πληροφορίες για την κινητική και τη δυναμική του κατάσταση. Για την οπτικοποίηση του πεδίου ροής παρουσιάζονται εικόνες του ρευστού εντός του κυλινδρικού αγωγού που δείχνουν τη μεταβολή της ταχύτητας του από σημείο σε σημείο και για διαφορετικές χρονικές στιγμές. Το νερό εισέρχεται κατακόρυφα (z-άξονα) στον κυλινδρικό αγωγό έχοντας αρχική ταχύτητα  $w = 0.000667$  m/sec. Η απεικόνιση του πεδίου ροής έχει γίνει με διανύσματα ταχύτητας (vectors) σε όλο τον όγκο ελέγχου, με προβολή στο επίπεδο κίνησης (plane) καθώς και με ροϊκές γραμμές (streamlines), οι οποίες είναι συνεχείς γραμμές μέσα στο πεδίο ροής που σε κάθε θέση τους το διάνυσμα της ταχύτητας είναι εφαπτόμενο.

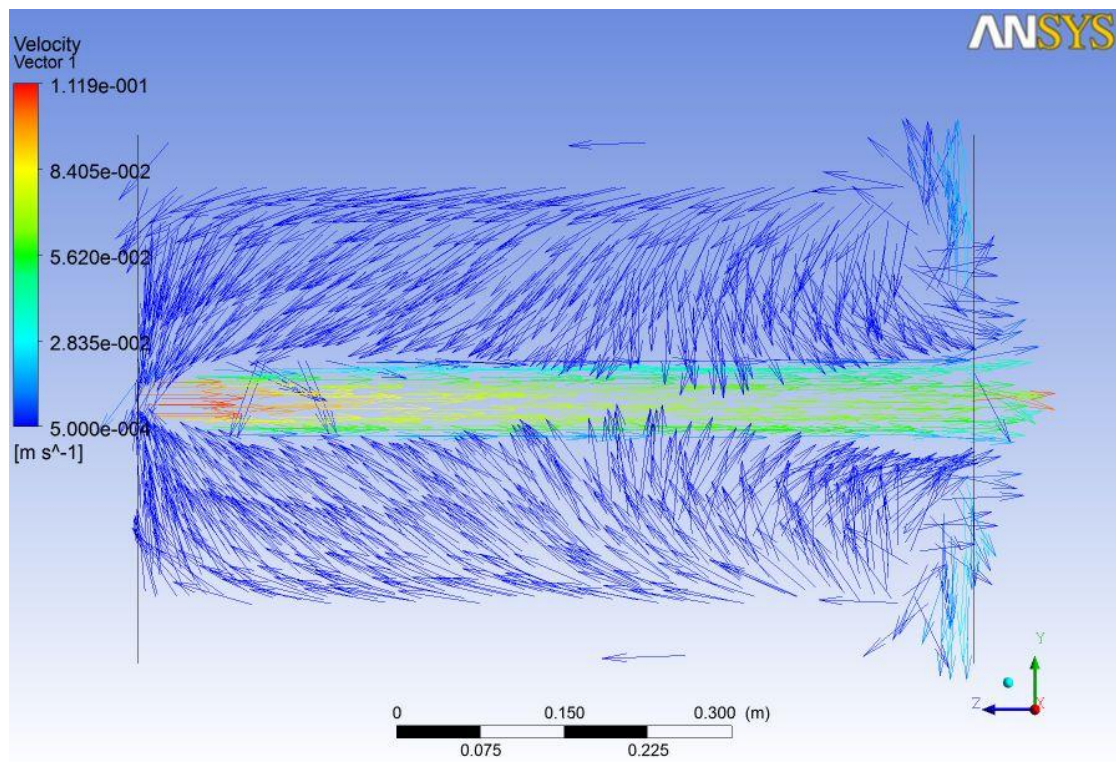


Εικόνα 5.1 : Πεδίο ροής (Vectors) εντός του κυλινδρικού αγωγού τη χρονική στιγμή  $t = 0$

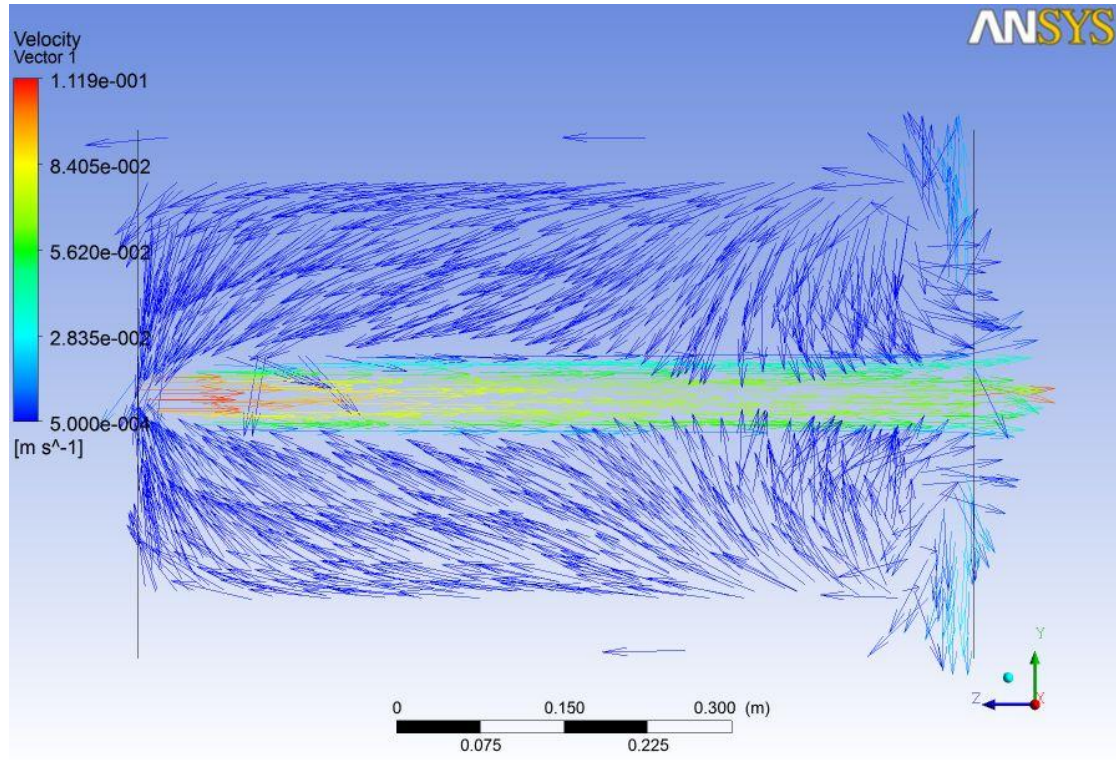




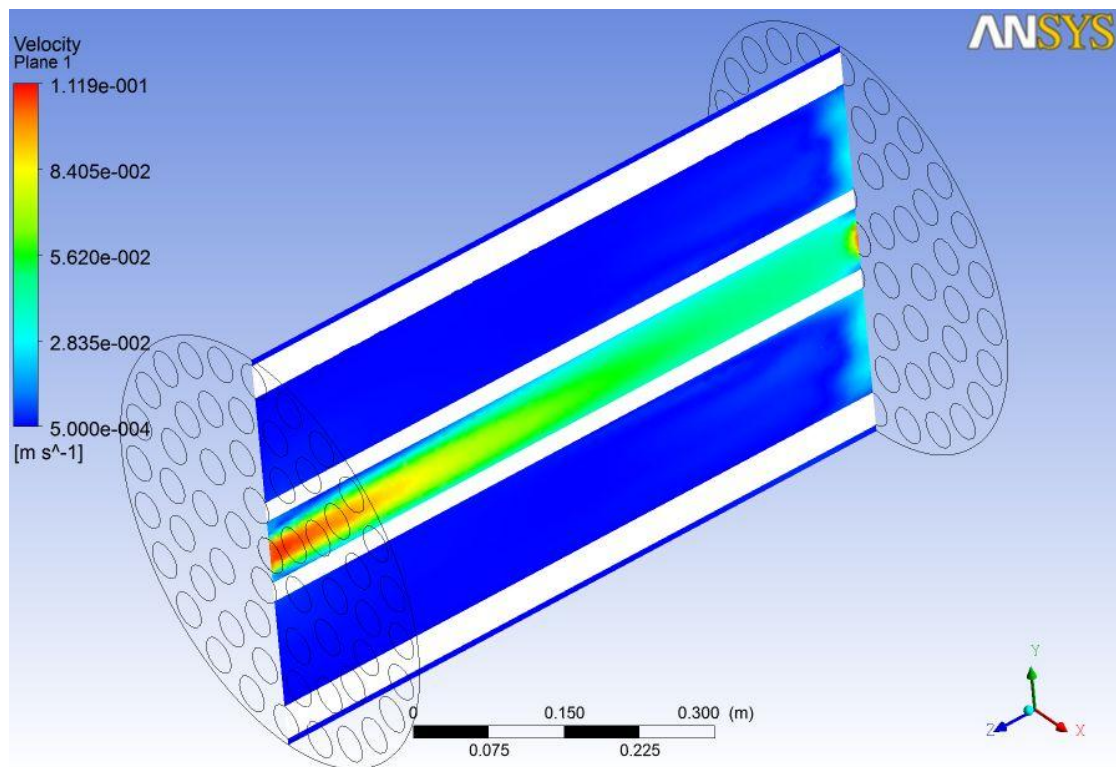
Εικόνα 5.2 : Πεδίο ροής (Vectors) εντός του κυλινδρικού αγωγού τη χρονική στιγμή  $t = 10 \text{ min}$



Εικόνα 5.3 : Πεδίο ροής (Vectors) εντός του κυλινδρικού αγωγού τη χρονική στιγμή  $t = 30 \text{ min}$

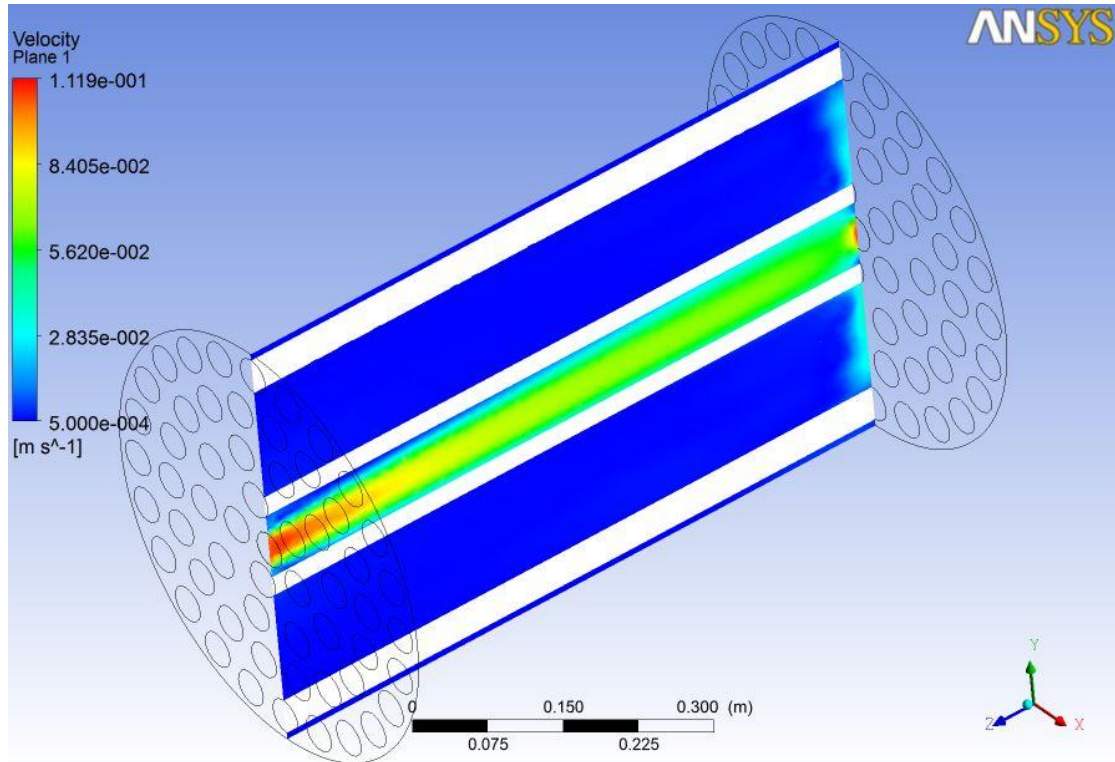


Εικόνα 5.4 : Πεδίο ροής (Vectors) εντός του κυλινδρικού αγωγού τη χρονική στιγμή  $t = 150 \text{ min}$

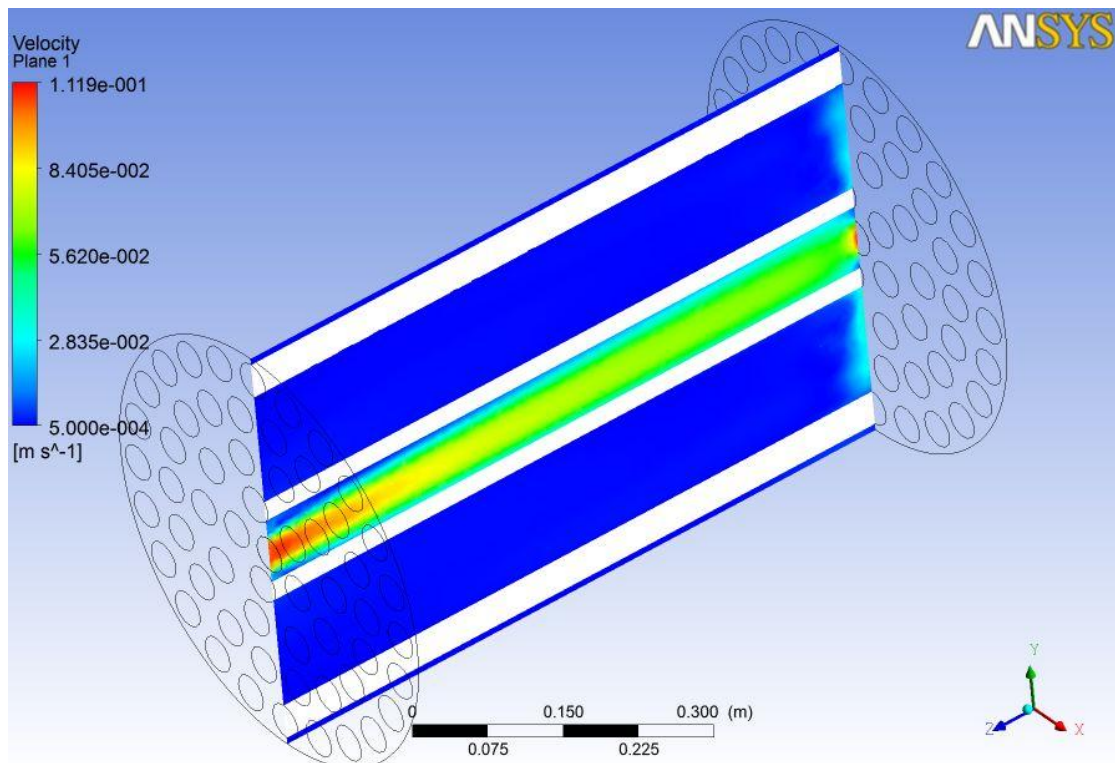


Εικόνα 5.5: Πεδίο ροής (Plane) εντός του κυλινδρικού αγωγού τη χρονική στιγμή  $t = 10 \text{ min}$

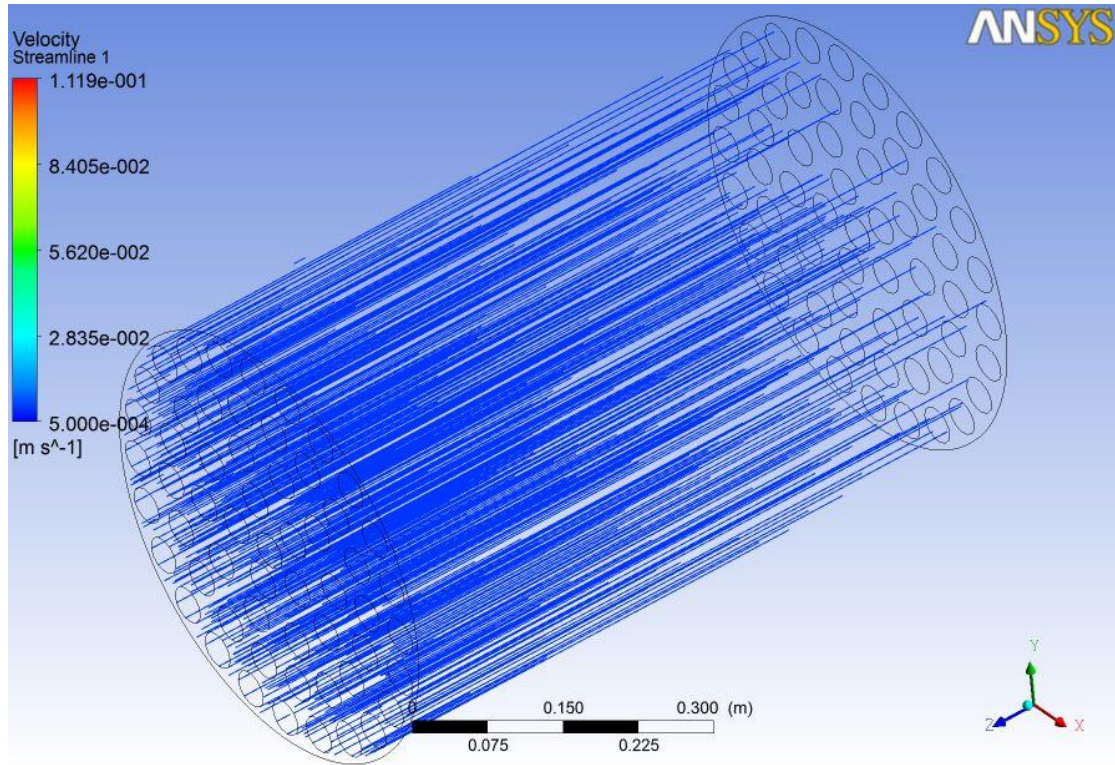




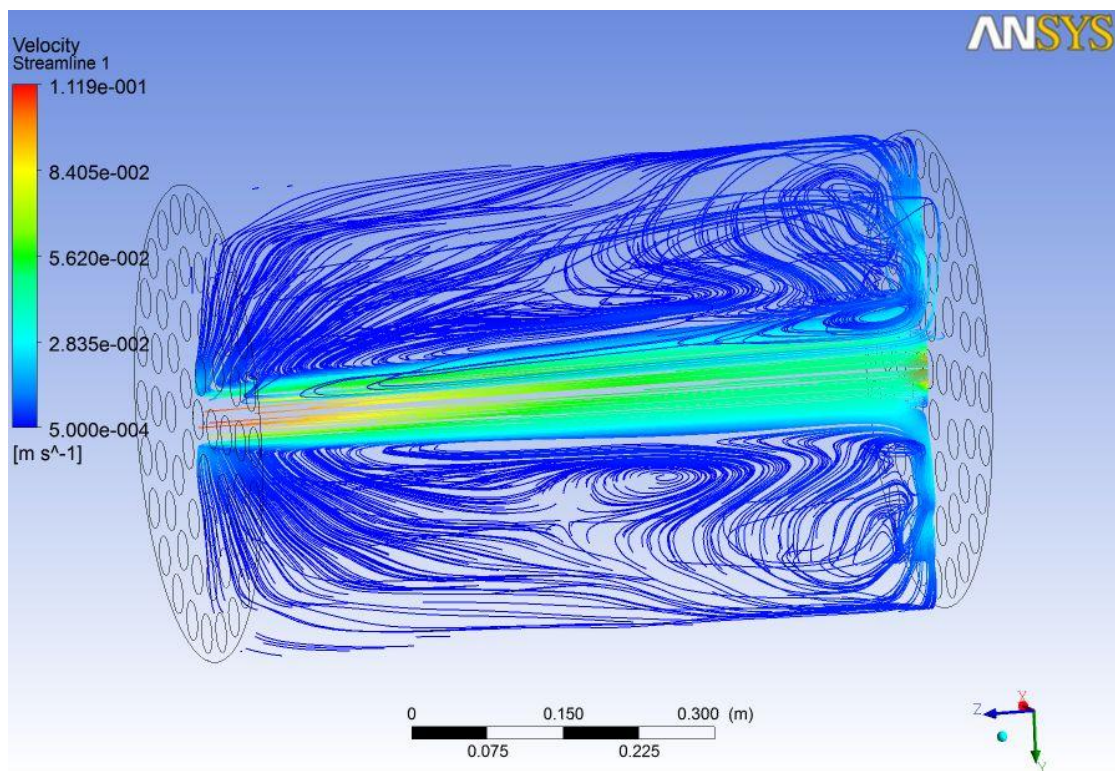
Εικόνα 5.6: Πεδίο ροής (Plane) εντός του κυλινδρικού αγωγού τη χρονική στιγμή  $t = 30 \text{ min}$



Εικόνα 5.7: Πεδίο ροής (Plane) εντός του κυλινδρικού αγωγού τη χρονική στιγμή  $t = 150 \text{ min}$

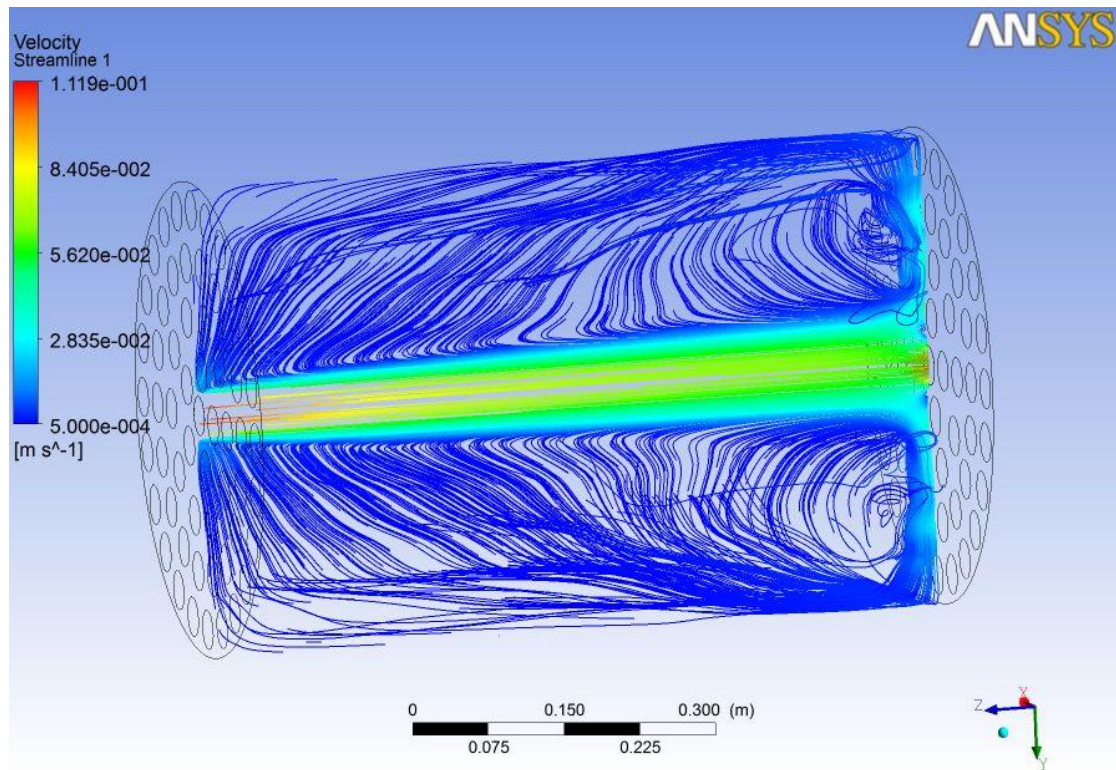


Εικόνα 5.8 : Γραμμές ροής (Streamlines) εντός του κυλινδρικού αγωγού τη χρονική στιγμή  $t = 0$

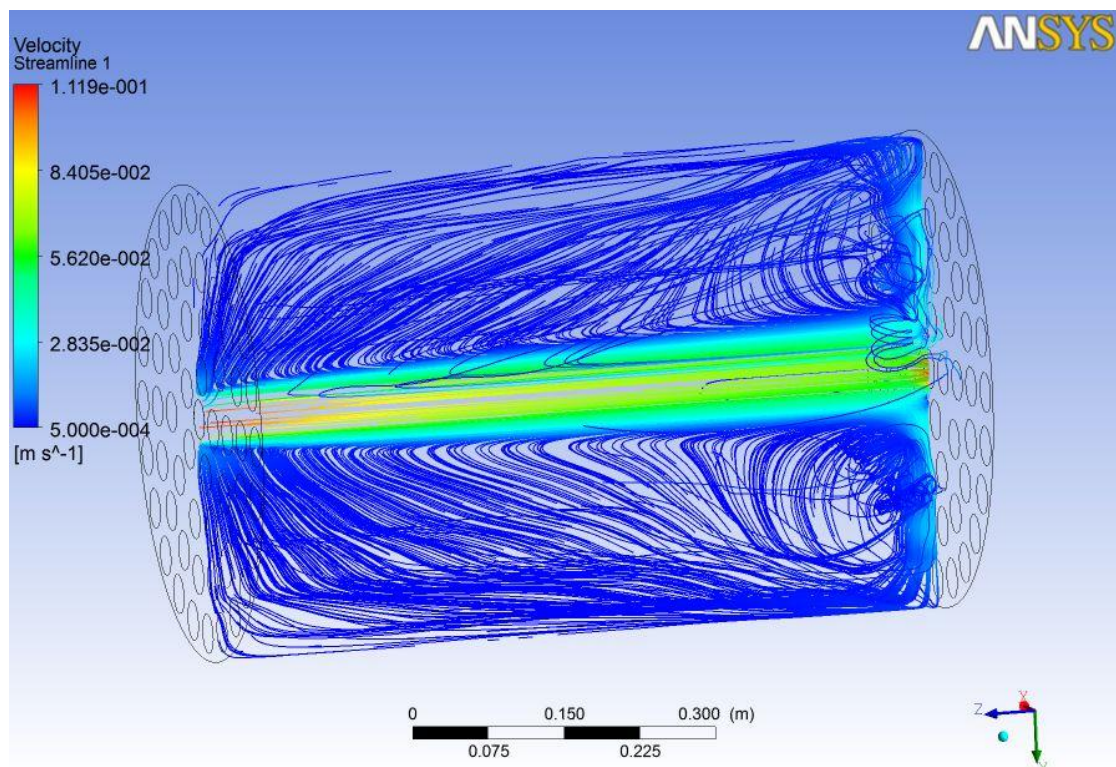


Εικόνα 5.9 : Γραμμές ροής (Streamlines) εντός του αγωγού τη χρονική στιγμή  $t = 10 \text{ min}$

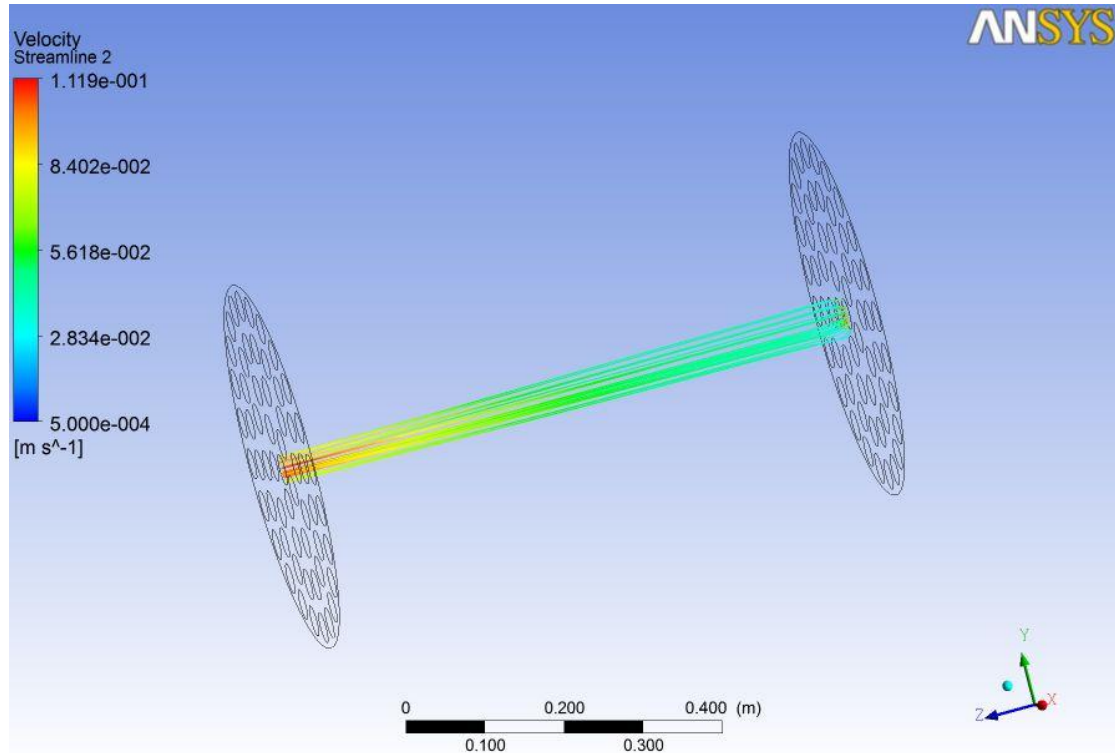




Εικόνα 5.10 : Γραμμές ροής (Streamlines) εντός του αγωγού τη χρονική στιγμή  $t = 30 \text{ min}$



Εικόνα 5.11 : Γραμμές ροής (Streamlines) εντός του αγωγού τη χρονική στιγμή  $t = 150 \text{ min}$



Εικόνα 5.12 : Streamlines όπως διαμορφώνονται στην ευθεία εισόδου-εξόδου μετά από 10 min

Οι παραπάνω εικόνες παριστάνουν το πεδίο ροής του συστήματος του κυλινδρικού αγωγού με 57 σωλήνες από PVC που περιέχουν PCM. Προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για το πεδίο ροής :

Στο χώρο όπου υπάρχουν σωλήνες προφανώς δεν υπάρχει ροή. Η ταχύτητα του πεδίου ροής αποκτά υψηλότερες τιμές στην ευθεία εισόδου-εξόδου επειδή σ αυτό το τμήμα του αγωγού δεν υπάρχει στερεό υλικό να εμποδίσει τη ροή. Παρατηρούνται έντονες ανακυκλοφορίες λόγω της απότομης αύξησης της διατομής στην είσοδο και λόγω της απότομης στένωσης στην έξοδο. Επιπλέον, η ύπαρξη των στερεών σωλήνων (tubes) επηρεάζει τη ροή, αφού λειτουργούν ως στερεά εμπόδια και δημιουργούν ανακυκλοφορίες μέσα στο χώρο. Παρατηρείται μια μεγάλη ζώνη ανακυκλοφορίας στο κεντρικό τμήμα του κυλινδρικού αγωγού η οποία επηρεάζει το θερμικό πεδίο. Οι σωλήνες με το PCM αποφορτίζονται πρώτα στο κέντρο τους και μεταδίδουν τη θερμότητα που χάνουν στο νερό. Λόγω της παρουσίας τύρβης προκαλείται έντονη ανάμειξη από τον συνδυασμό των ισχυρών διακυμάνσεων της ταχύτητας με διάχυση σε μοριακό επίπεδο. Γενικά οι ταχύτητες που αναπτύσσονται είναι μικρές με μέγιστη τιμή 0.1119 m/sec.

## 5.2 Έλεγχος αξιοπιστίας μοντέλου

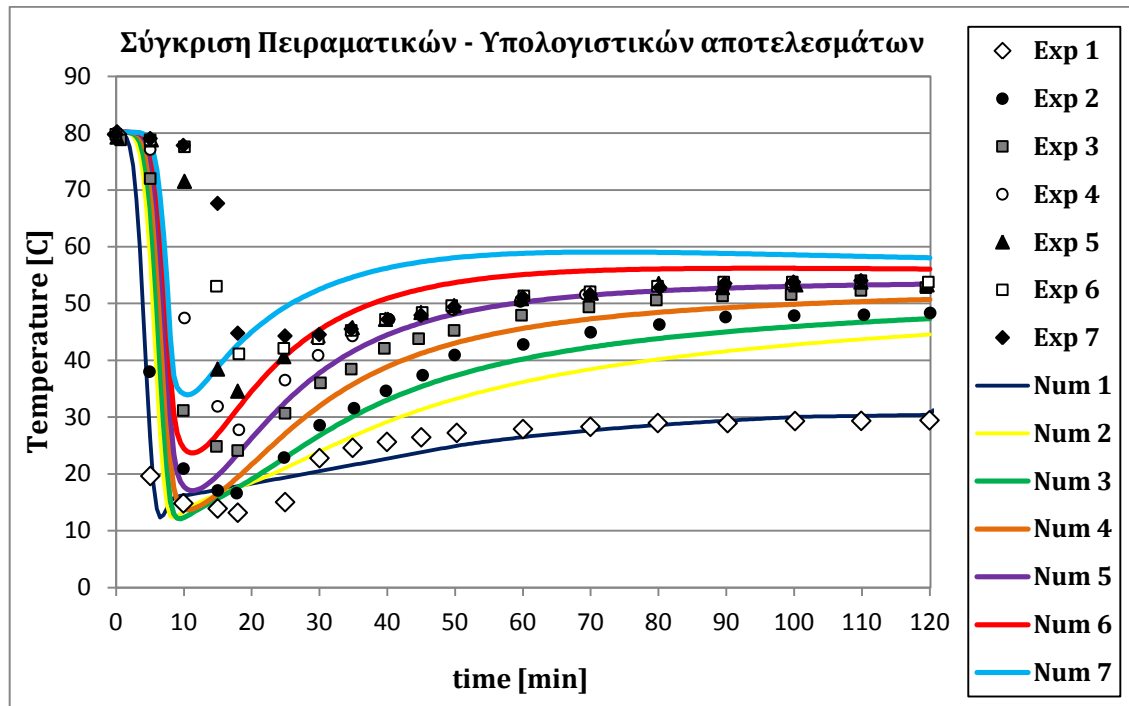
Για την αξιολόγηση της επιτυχίας της υπολογιστικής μοντελοποίησης στην περιγραφή του φαινομένου πραγματοποιήθηκε σύγκριση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων της θερμικής ανάλυσης του συστήματος με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα των Gracia *et al* (2011).

Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η διαδικασία αποφόρτισης του συστήματος με PCM μέσα στον κυλινδρικό αγωγό για παροχή 0.125 kg/sec, **αλλά με έλεγχο από θερμοστάτη** ο οποίος σταματούσε την παροχή του νερού όταν η θερμοκρασία του έπεφτε κάτω από 45°C. Κατά την πειραματική διαδικασία είχαν τοποθετηθεί 7 θερμοστοιχεία μέσα στη κυλινδρική δεξαμενή για να καταγράψουν την κατανομή της θερμοκρασίας. Το πειραματικό προφίλ της θερμοκρασίας του νερού μετρήθηκε κατά μήκος του κατακόρυφου επιπέδου.

Στην υπολογιστική προσομοίωση ορίστηκαν 7 σημεία στον άξονα συμμετρίας της κατακόρυφης διεύθυνσης του πεδίου ροής στα οποία συλλέχθηκαν αποτελέσματα της μεταβολής της θερμοκρασίας. Οι πειραματικές μετρήσεις είχαν διεξαχθεί για χρονική διάρκεια 120 λεπτών οπότε η διαδικασία αποφόρτισης προσομοιώθηκε για 120 min. Η εισαγωγή του θερμοστάτη στο υπολογιστικό μοντέλο έγινε με προσθήκη κατάλληλης συνάρτησης βήματος (step function) από το Setup του ANSYS CFX. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι ο αγωγός στη συγκεκριμένη διαδικασία έχει προσομοιωθεί με το νερό να εισέρχεται μέσα σε αυτόν κάθετα από όλη την κάτω κυκλική επιφάνεια του κυλίνδρου δηλαδή έχει είσοδο διαμέτρου 0.474 m.

Στην περίπτωση αυτή ενδιαφέρει η υπολογιστικά προβλεπόμενη θερμοκρασία αποφόρτισης και ο χρόνος αποφόρτισης του συστήματος. Έτσι μπορεί να γίνει αξιολόγηση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Η μετρούμενη (πειραματικά) συνολική χρονική διάρκεια αποφόρτισης είναι 16 λεπτά.

Στο διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας τόσο για τα υπολογιστικά όσο και για τα πειραματικά αποτελέσματα των 7 σημείων του κατακόρυφου z- άξονα συμμετρίας μεταξύ εισόδου και εξόδου του δοχείου.



Σχήμα 5.1 : Μεταβολή Θερμοκρασίας του νερού σε χαρακτηριστικά σημεία του άξονα συμμετρίας

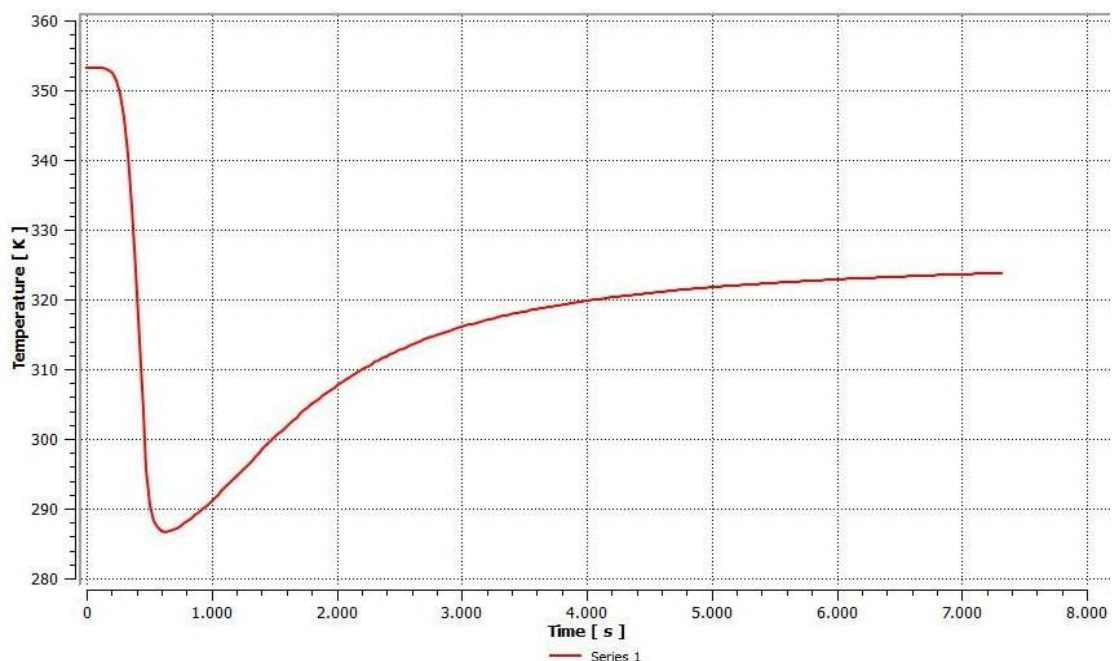
Το μοντέλο δείχνει πολύ καλή **συμφωνία** με τις πειραματικές μετρήσεις στην κατανομή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του χρόνου μέσα στον αγωγό και σχετικά καλή συμφωνία ως προς το χρόνο που απαιτείται για να φθάσει το σύστημα στην πρώτη αποφόρτιση, δηλαδή τη στιγμή κατά την οποία η θερμοκρασία του νερού πέφτει στο χαμηλότερο σημείο λόγω απωλειών θερμότητας. Ο **υπολογιστικά προβλεπόμενος χρόνος** που περνά για να συμβεί η αποφόρτιση είναι **11 λεπτά**.

Η μικρή αυτή διαφοροποίηση πιθανόν να οφείλεται στην ακρίβεια της μεθόδου ενεργού θερμοχωρητικότητας για το PCM η οποία δεν μπορεί να προσομοιάσει με το βέλτιστο τρόπο την αλλαγή φάσης ενώ πειραματικά το PCM που χρησιμοποιείται είναι πιστοποιημένο υλικό παραγωγής κάποιας εταιρίας. Επίσης δε δίνονται ακριβή στοιχεία για τη διατομή της εισόδου του νερού. Επιπρόσθετα, ίσως έπαιξαν ρόλο οι συνθήκες του πειράματος π.χ. αν τα πειράματα έγιναν μια ηλιόλουστη μέρα σίγουρα το σύστημα δέχτηκε την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η μεγάλη ομοιότητα μεταξύ των αριθμητικών αποτελεσμάτων και των πειραματικών δεδομένων αντικατοπτρίζει την επαλήθευση του μοντέλου στην πρόβλεψη της πραγματικής θερμικής απόδοσης της δεξαμενής αποθήκευσης θερμού νερού συμπεριλαμβανόμενων των απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον τα οποία καθορίζουν τον κύκλο φόρτισης.



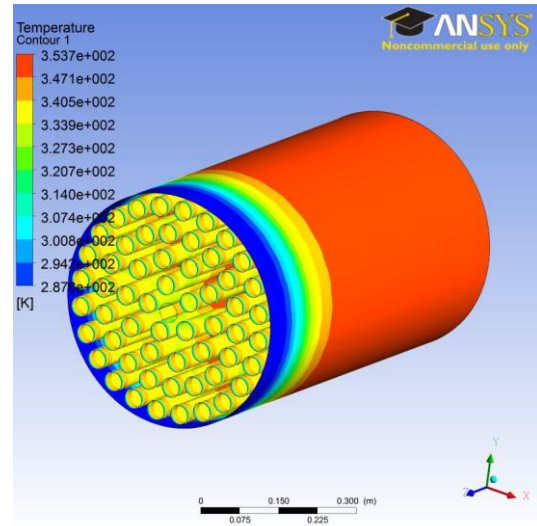
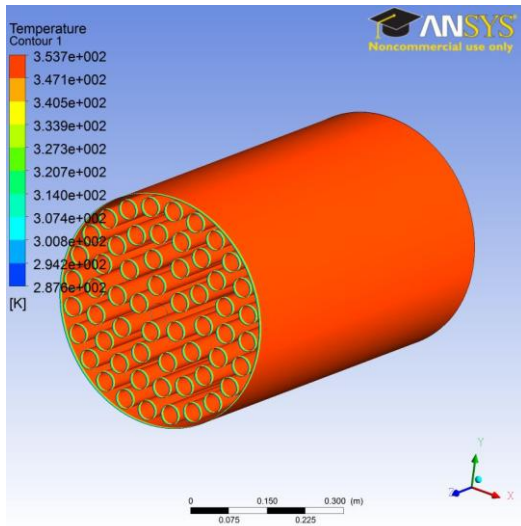
Το PCM βελτιώνει τη θερμική απόδοση του συστήματος. Τόσο **τα υπολογιστικά** όσο και τα πειραματικά αποτελέσματα κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης **δείχνουν την αποτελεσματική επίδραση** της ενσωμάτωσης του PCM στο σύστημα, αφού, όταν ξεκινά η αποφόρτιση, το PCM είναι πλήρως φορτισμένο και αρχίζει να τήκεται αποδίδοντας θερμότητα. Η θερμότητα που λαμβάνει το σύστημα από το PCM διατηρεί τη θερμοκρασία του προσωρινά στους 80 °C και καθυστερεί την πτώση της για ένα ορισμένο μέσο χρονικό διάστημα 6 λεπτών. Όταν η θερμοκρασία του συστήματος πέφτει στους 45°C ο θερμοστάτης ενεργοποιείται και σταματά η παροχή. Μόλις η αποφόρτιση τελειώσει, η θερμοκρασία του νερού έχει κατέβει στους 14.5 °C οπότε τότε αναλαμβάνει δράση και πάλι το PCM και επαναφορτίζει το κρύο νερό. Η θερμοκρασία του νερού μετά την φόρτιση από το PCM έχει αυξηθεί αρκετά σχηματίζοντας θερμοκρασιακά στρώματα. Συγκεκριμένα στην είσοδο η θερμοκρασία ανεβαίνει για να σταθεροποιηθεί στους 30°C, στο κέντρο του αγωγού αποκτά σταθερή τιμή 50 °C ενώ στην έξοδο έχει ανέβει στους 59 °C.



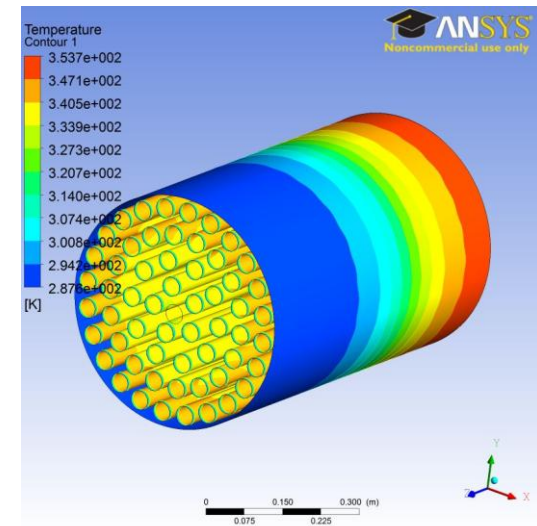
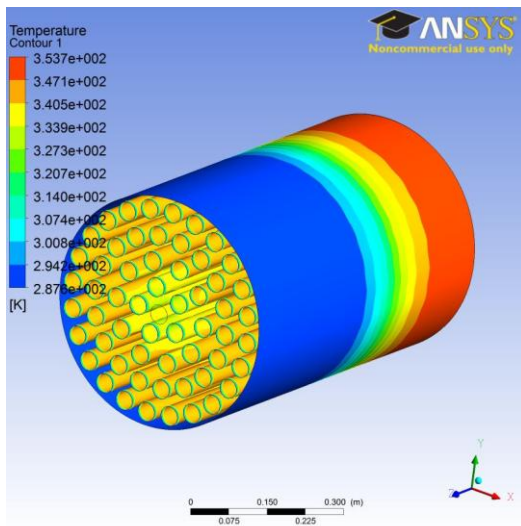
*Σχήμα 5.2: Μεταβολή της Θερμοκρασίας στο κέντρο ( Σημείο 4) των αξόνων συμμετρίας κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης - φόρτισης με θερμοστάτη στους 45°C*

Από τα παραπάνω σχήματα (5.1 κυρίως αλλά και 5.2) φαίνεται χαρακτηριστικά ότι ο χρόνος πλήρους αποφόρτισης της δεξαμενής είναι περίπου 11 min .

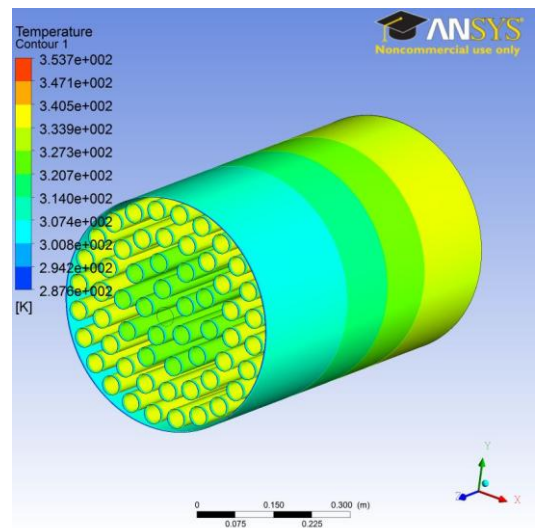
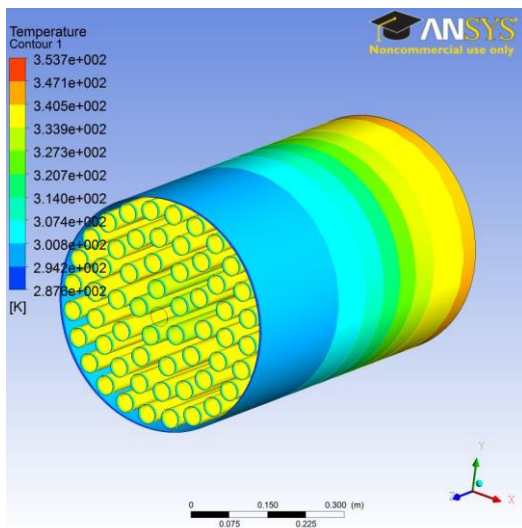
Στις εικόνες που ακολουθούν , απεικονίζεται η χωρική κατανομή της θερμοκρασίας με contours από τον Post-Processor του ANSYS CFX για χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές της διαδικασίας αποφόρτισης της δεξαμενής με θερμοστάτη στους 45°C .



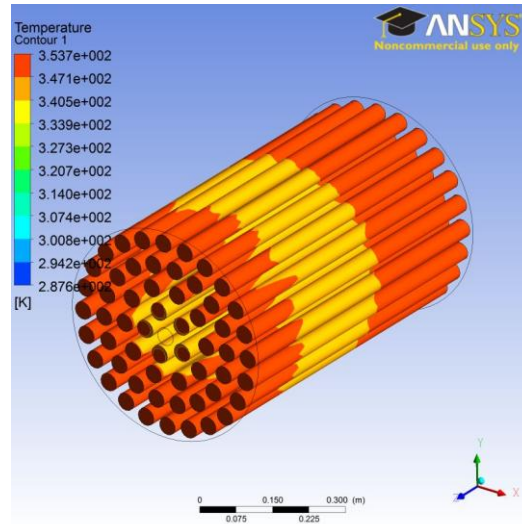
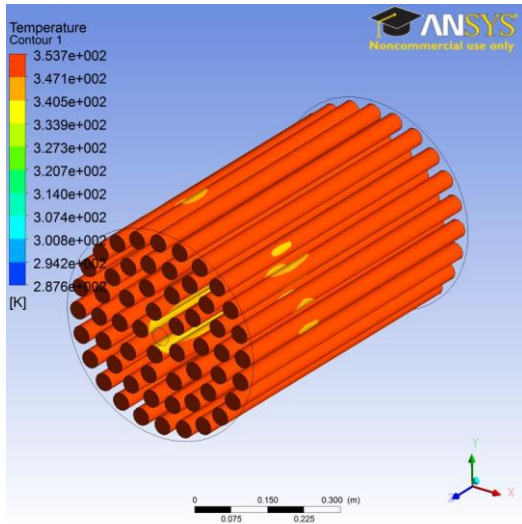
Εικόνα 5.13 : Χωρική κατανομή Θερμοκρασίας Νερού την  $t = 0$  (αριστερά) και  $t = 2 \text{ min}$  (δεξιά)



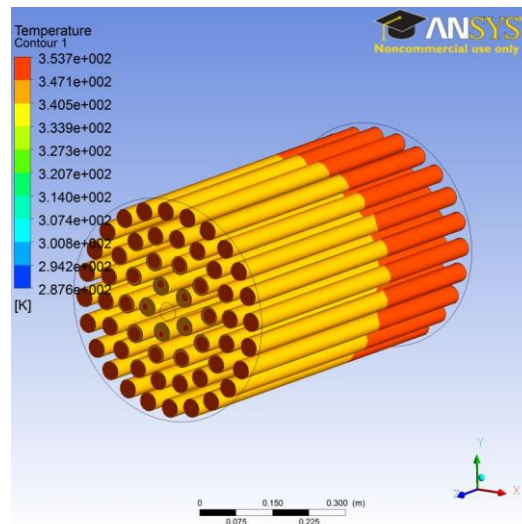
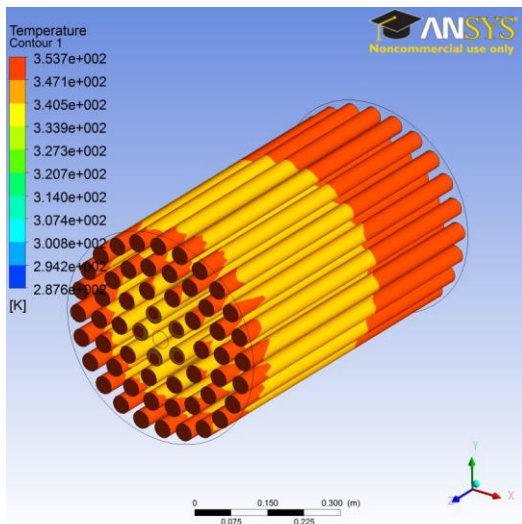
Εικόνα 5.14 : Χωρική κατανομή Θερμοκρασίας Νερού -χρονική στιγμή  $t = 11 \text{ min}$  και  $t = 20 \text{ min}$



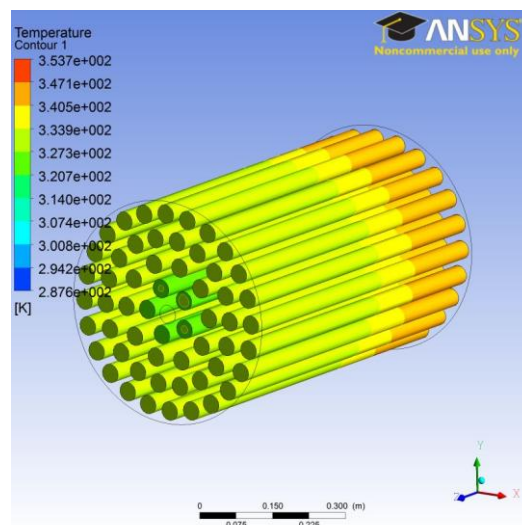
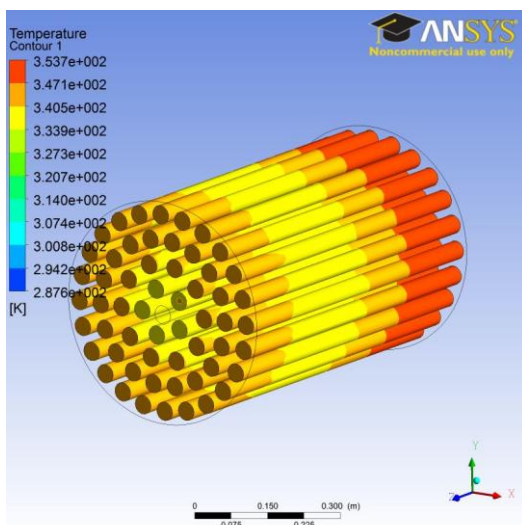
Εικόνα 5.15 : Χωρική κατανομή Θερμοκρασίας Νερού -χρονική στιγμή  $t = 40 \text{ min}$  και  $t = 120 \text{ min}$



Εικόνα 5.16 : Χωρική κατανομή Θερμοκρασίας σωλήνων με PCM -  $t = 5 \text{ min}$  και  $t = 8 \text{ min}$

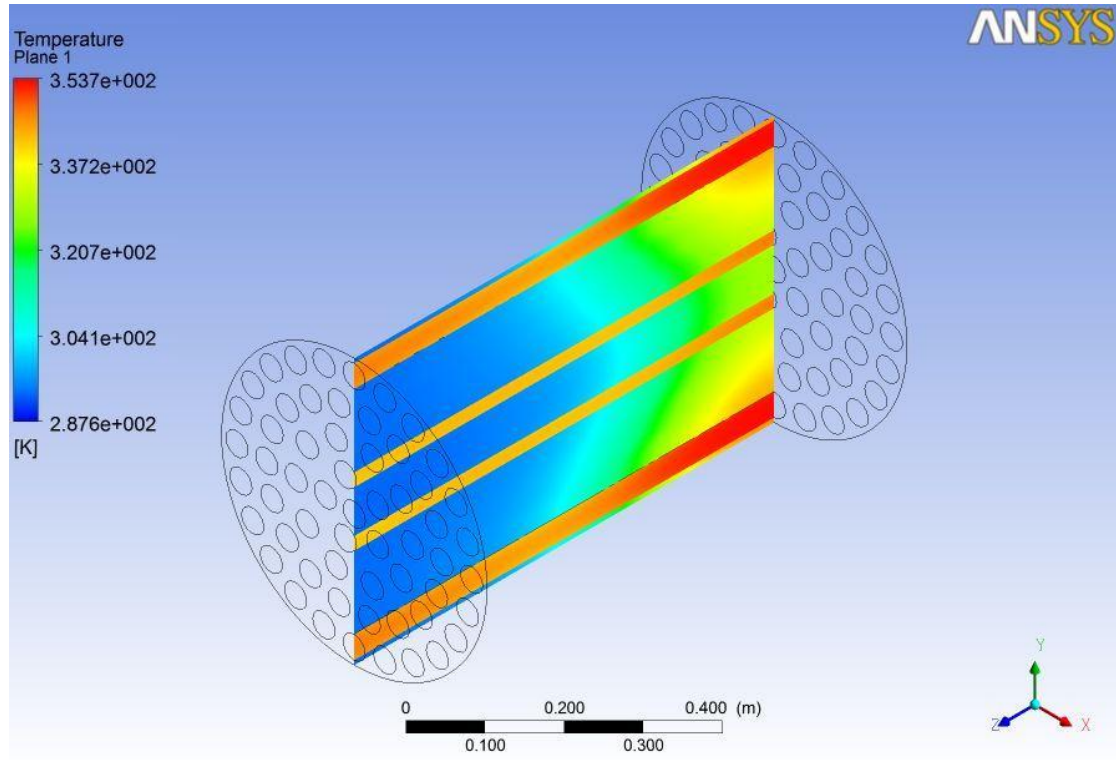


Εικόνα 5.17 : Χωρική κατανομή Θερμοκρασίας σωλήνων με PCM -  $t = 11 \text{ min}$  και  $t = 20 \text{ min}$

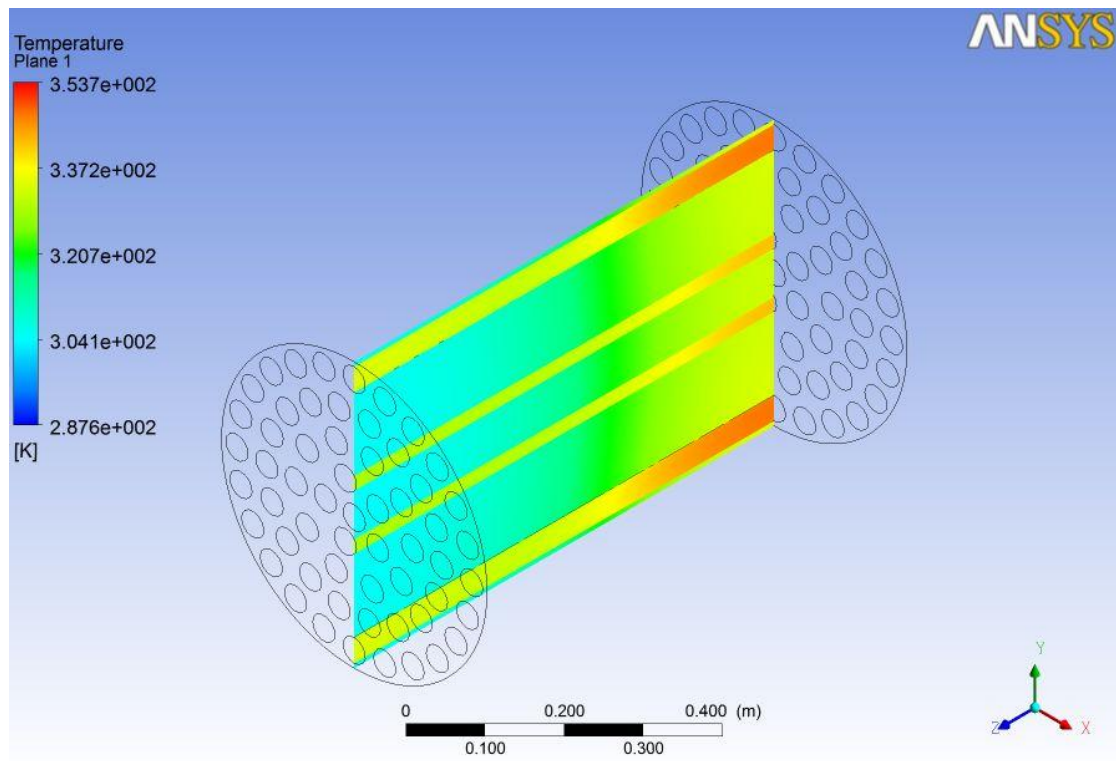


Εικόνα 5.18 : Χωρική κατανομή Θερμοκρασίας σωλήνων με PCM -  $t = 40 \text{ min}$  και  $t = 120 \text{ min}$





*Εικόνα 5.19: Κατακόρυφο συμμετρικό επίπεδο κατανομής της θερμοκρασίας για το σύστημα με PCM την  $t = 12 \text{ min}$*



*Εικόνα 5.20: Κατακόρυφο συμμετρικό επίπεδο κατανομής της θερμοκρασίας για το σύστημα με PCM την  $t = 120 \text{ min}$*



Από τα contours παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια αποφόρτισης στη δεξαμενή θερμού νερού υπάρχει **θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση**. Το νερό έχει κατά τμήματα θερμοκρασιακή ομοιομορφία από το κάτω μέρος της εισόδου μέχρι την κορυφή όπου είναι η έξοδος. Μετά την  $t = 11 \text{ min}$  κατά την οποία πραγματοποιείται η αποφόρτιση, οι θερμοκρασίες του νερού αυξάνονται εκ νέου μέσα στη δεξαμενή επειδή η θερμότητα που αποθηκεύτηκε (υπό μορφή λανθάνουσας) από το PCM επαναδιοχετεύεται στο σύστημα και κυκλοφορεί στο νερό. Το σύστημα αποφορτίζεται πρώτα από την **είσοδο** παρουσιάζοντας **χαμηλότερες θερμοκρασίες** γιατί εκεί έχουμε μεγαλύτερες ταχύτητες ροής, οπότε υψηλότερη μεταφορά ορμής με άμεσο επακόλουθο την υψηλότερη μεταφορά θερμότητας από το θερμό PCM στο νερό. Η θερμοκρασία στην είσοδο κυμαίνεται από  $14.5-30^{\circ}\text{C}$  ενώ στην έξοδο μεταξύ  $34-59^{\circ}\text{C}$ .

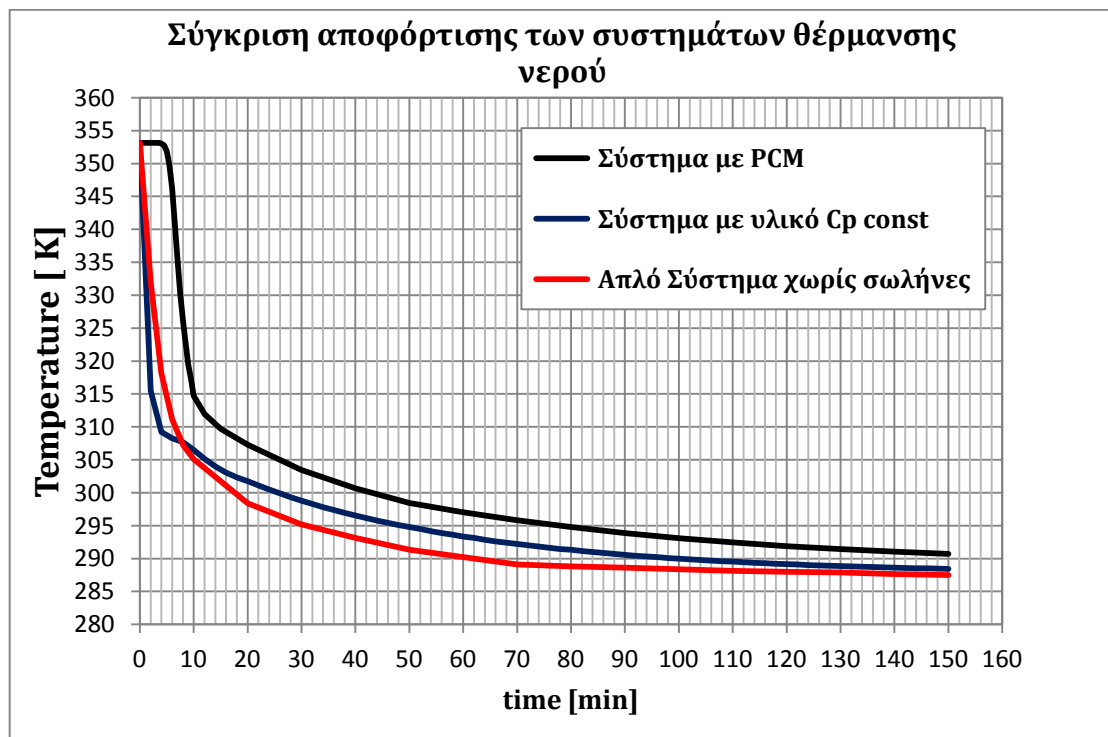
Οι σωλήνες που έχουν ενσωματωμένο στο εσωτερικό τους το PCM παρουσιάζουν κάποια ελάττωση στη θερμοκρασία τους, η οποία από  $80^{\circ}\text{C}$  στην αρχή της διαδικασίας κατεβαίνει μέχρι τους  $45^{\circ}\text{C}$ . Η ελάττωση αυτή οφείλεται στη μετάδοση μέρους της θερμότητας, την οποία είχαν αποθηκεύσει τα PCM, στο νερό που τα περιβάλλει εντός της δεξαμενής. Η **πτώση της θερμοκρασίας των σωλήνων** που περιέχουν το PCM (των tubes) αρχικά πραγματοποιείται **συμμετρικά** στο κέντρο τους λόγω μεγάλης ζώνης ανακυκλοφορίας του ρευστού εκεί επειδή δεν μπορεί να κινηθεί, όπως παρατηρήθηκε κατά τη μελέτη του πεδίου ροής. Στη συνέχεια αφού το νερό έχει κυκλοφορήσει σε όλα τα σημεία της δεξαμενής και έχει έρθει σε επαφή με όλους το σωλήνες με το PCM η θερμοκρασία μειώνεται συμμετρικά, σταδιακά από την είσοδο προς την έξοδο του κυλινδρικού αγωγού μέχρι το τέλος της αποφόρτισης. Αφού τελειώσει η αποφόρτιση, το PCM θερμαίνει ξανά το νερό οπότε η θερμοκρασία του νερού αρχίζει να αυξάνεται μέχρι μια ορισμένη τιμή στην οποία και σταθεροποιείται κατά στρώματα μέσα στον αγωγό και είναι διαθέσιμο για χρήση. Λόγω της απορρόφησης της θερμότητας του PCM και της ανταλλαγής μάζας και ορμής μεταξύ όλων των μορίων, το νερό αποκτά εκ νέου υψηλές θερμοκρασίες.

Κατά τη διαδικασία παρατηρούνται μέσα στο δοχείο θερμοκρασιακές διαφορές που βρίσκονται στο εύρος των  $20^{\circ}\text{C}$  μέχρι  $30^{\circ}\text{C}$ .

### 5.3 Μελέτη ποιοτικών χαρακτηριστικών της αποφόρτισης Συστημάτων κυλινδρικού αγωγού με σωλήνες που περιέχουν PCM, με σωλήνες υλικού σταθερής $C_p$ και χωρίς σωλήνες

Για να αναδειχθεί όσο δυνατόν καλύτερα η ικανότητα του PCM στην αποθήκευση θερμότητας, μελετήθηκαν ως προς την αποφόρτιση 3 περιπτώσεις συστημάτων θέρμανσης νερού. Τα 2 συστήματα που μελετήθηκαν είχαν ακριβώς την ίδια γεωμετρία αλλά διαφορετικό υλικό ως αποθηκευτικό μέσο. Συγκεκριμένα, το ένα σύστημα περιελάμβανε τους 57 σωλήνες γεμάτους με PCM ενώ στο άλλο οι σωλήνες περιείχαν υλικό σταθερής θερμοχωρητικότητας  $C_p = 2880 \text{ J/kg K}$ . Το τελευταίο σύστημα είναι διαφορετικής γεωμετρίας αφού δεν περιέχει σωλήνες, αλλά μόνο νερό σε όλο τον όγκο του κυλινδρικού αγωγού.

Η αποφόρτιση των 3 συστημάτων θέρμανσης νερού πραγματοποιήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις για σταθερή παροχή μάζας νερού  $0.125 \text{ kg/sec}$ , θερμοκρασίας  $14.5^\circ \text{ C}$ , ενώ η θερμοκρασία εντός δεξαμενής ήταν αρχικά στους  $80^\circ \text{ C}$ . Το ποσό της αποθηκευμένης θερμικής ενέργειας μειώνεται συναρτήσει της θερμοκρασίας αποφόρτισης του συστήματος. Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας των συστημάτων μέχρι την πλήρη αποφόρτιση.



Σχήμα 5.3: Αποφόρτιση νερού στην έξοδο και για τα 3 συστήματα /με PCM/με  $C_p$  solid/χωρίς tubes

Από τη θερμική ανάλυση προκύπτει ότι η εισαγωγή σωλήνων που περιέχουν PCM μέσα στη δεξαμενή θερμού νερού μπορεί να μειώνει τον όγκο του νερού, ωστόσο **αυξάνει το συνολικό ποσό θερμότητας** που αποθηκεύεται η οποία στη συνέχεια αποδίδεται από τα PCM στο νερό.

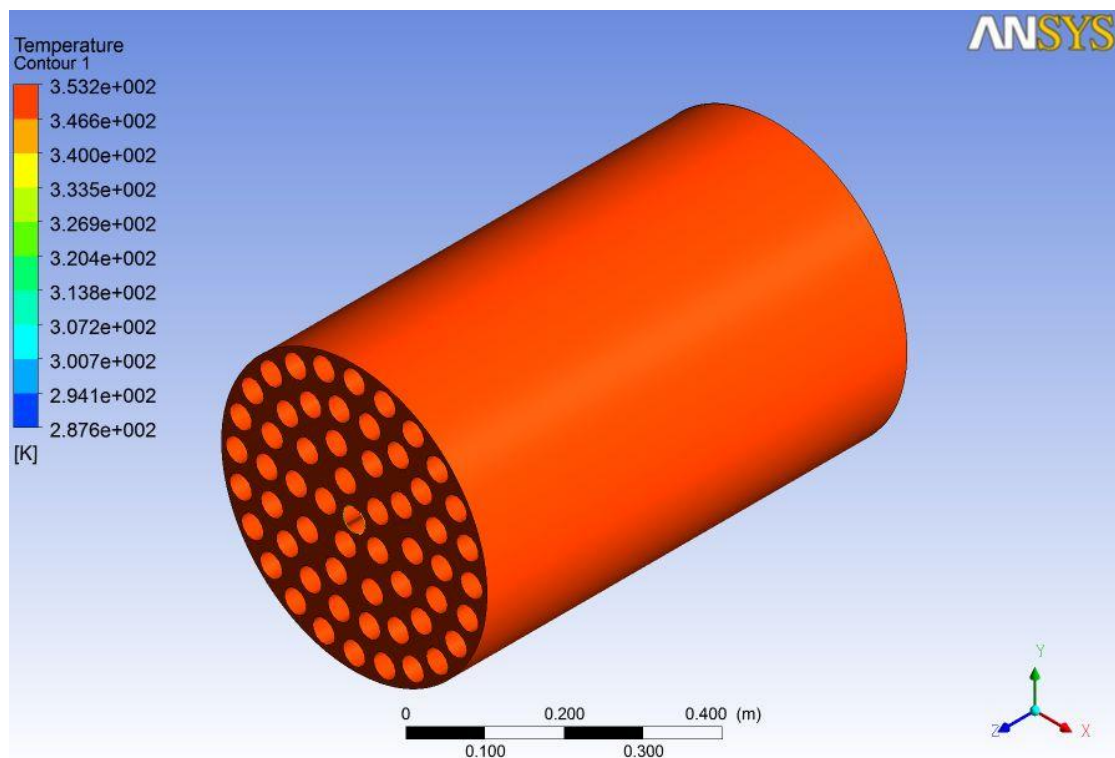
Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι, κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης στο σύστημα με PCM η θερμοκρασία παραμένει σταθερή στους 80°C κατά τη διάρκεια μιας ορισμένης περιόδου και αρχίζει να μειώνεται, μετά από αυτό το διάστημα. Συνεπώς, τα PCM δημιουργούν μια **χρονική καθυστέρηση** στη μείωση της θερμοκρασίας του νερού του συστήματος όταν αποφορτίζεται, η οποία εκτιμήθηκε (από το διάγραμμα 5.3) ότι είναι περίπου 6 min. Επιπλέον, στο σύστημα με τα PCM η θερμοκρασία που λαμβάνει το νερό από τα PCM εκτός του ότι κρατά τη **θερμοκρασία** του νερού **υψηλή** για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, τη διατηρεί **σε υψηλότερα επίπεδα** τιμών κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, από 8°C παραπάνω την  $t=10\text{min}$  μέχρι 3°C παραπάνω στο τέλος της αποφόρτισης.

Το εύρος θερμοκρασιών αλλαγής φάσης του PCM είναι 57-61°C ή 330-334K . Το PCM όταν ξεκινά η αποφόρτιση βρίσκεται στους 80 °C (353K) δηλαδή πάνω από αυτή τη θερμοκρασία, επομένως έχει στερεοποιηθεί, είναι πλήρως φορτισμένο και η θερμοχωρητικότητά του ισούται με  $C_{P,Liquid} = 4190\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}$  . Με την πτώση λοιπόν της θερμοκρασίας έχει αρχίσει η διαδικασία υγροποίησης του PCM . Το PCM τότε αποδίδει στο σύστημα τη λανθάνουσα θερμότητα. Για το στερεό υλικό αποθήκευσης θεωρήθηκε ειδική θερμοχωρητικότητα  $C_p = 2880\text{ J/kg K}$  ενώ το νερό έχει τιμή ειδικής θερμοχωρητικότητας  $C_{p\text{ νερού}} = 4180.7\text{ J/kg K}$

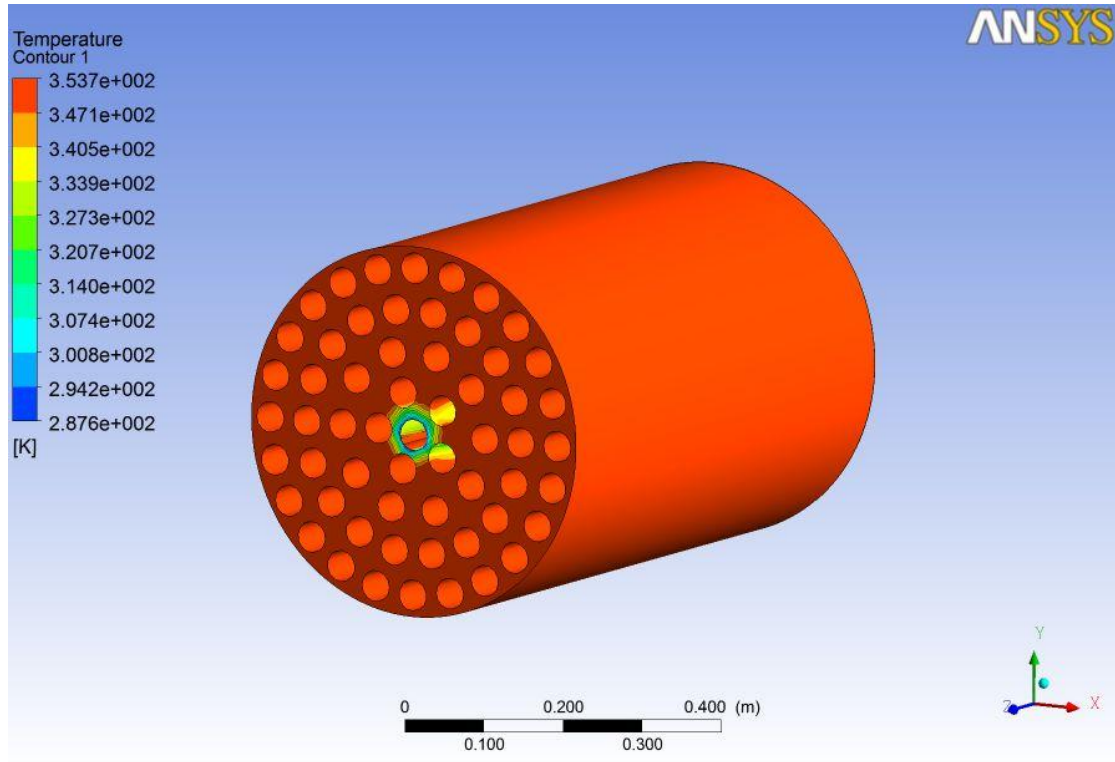
Στο σύστημα με υλικό σταθερής θερμοχωρητικότητας, η θερμοκρασία αρχικά πέφτει πολύ απότομα, αρκετά πιο γρήγορα από το σύστημα με PCM και λίγο πιο γρήγορα από το σύστημα χωρίς σωλήνες. Η **διαφοροποίηση στη μεταβολή της θερμοκρασίας** που έχει αυτό το υλικό σε σχέση με το PCM κατά την έναρξη της διαδικασίας, οφείλεται στη μικρότερη τιμή θερμοχωρητικότητας. Αν τα υλικά είχαν την ίδια τιμή θερμοχωρητικότητας (δηλαδή 4190 J/kg K) θα αναμέναμε η διαφοροποίηση αυτή να συμβεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία και συγκεκριμένα στους 334K (61°C), όπου για το PCM ξεκινά το φαινόμενο αλλαγής φάσης και αποκτά τιμή θερμοχωρητικότητας  $C_{p\text{ effective}}$  . Το PCM έχει ενεργοποιηθεί. Γι αυτό το λόγο στη συνέχεια η θερμοκρασία του συστήματος με PCM παραμένει σε υψηλότερα επίπεδα καθ' όλη τη διάρκεια της αποφόρτισης.

Το σύστημα χωρίς σωλήνες διαφέρει ως προς τη γεωμετρία και τον όγκο νερού που περιέχει. Αρχικά, η θερμοκρασία του νερού πέφτει με μικρότερο ρυθμό σε σχέση με το σύστημα σωλήνων με υλικό σταθερής  $C_p$ . Συγκεκριμένα η θερμοκρασία του πέφτει στους  $40^\circ\text{C}$  στα 4min σε σχέση με τα 2min στο άλλο σύστημα. Αυτό συμβαίνει γιατί η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού είναι μεγαλύτερη από αυτή του συγκεκριμένου υλικού. Λίγο αργότερα, από την  $t=8\text{min}$  κι έπειτα, η θερμοκρασία στο σύστημα αυτό αρχίζει να πέφτει σε χαμηλότερα επίπεδα 1 έως και  $4^\circ\text{C}$  από του συστήματος με σωλήνες υλικού σταθερής  $C_p$ , μέχρι την τελική αποφόρτισή του. Η εξήγηση που μπορεί να δοθεί είναι ότι το στερεό υλικό χρειάζεται κάποιο χρόνο απόκρισης για να μεταφέρει τη θερμότητα στο νερό που το περιβάλλει. Στη συνέχεια, οι σωλήνες λειτουργούν ως στερεά εμπόδια στη ροή του νερού οπότε αυτό έχει ως αποτέλεσμα το νερό να αποκτά υψηλότερη θερμοκρασία.

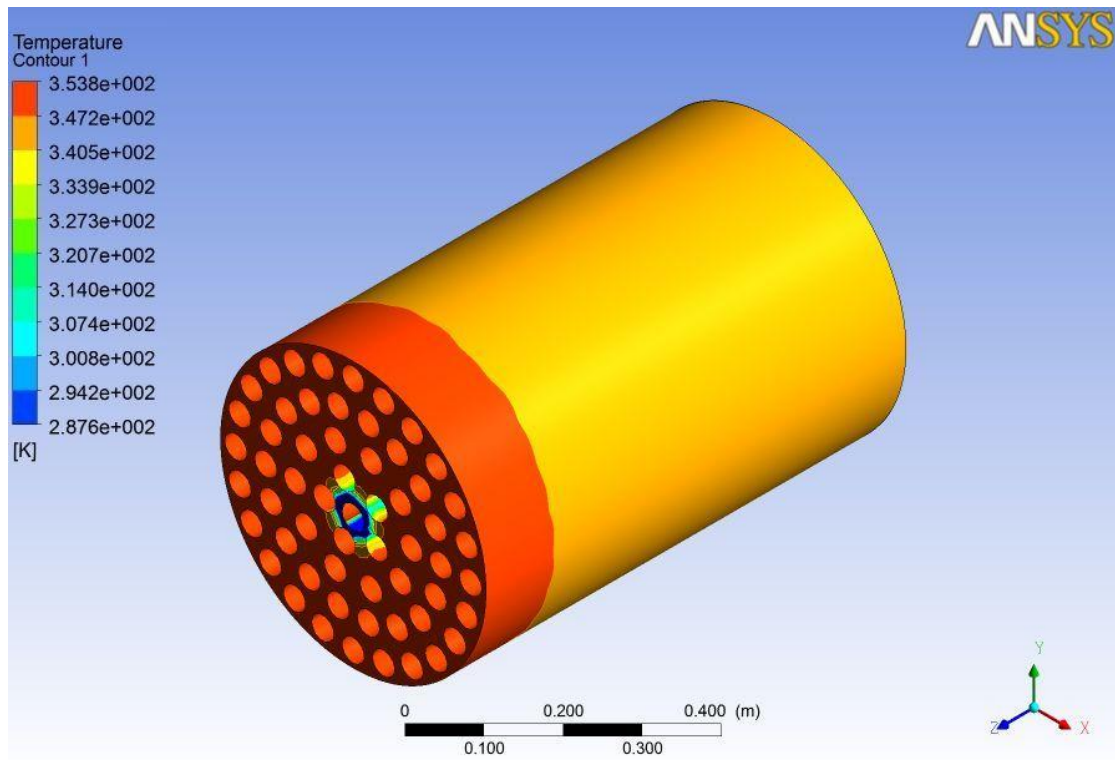
Στις επόμενες εικόνες από το CFX, παρουσιάζεται το θερμικό πεδίο των συστημάτων με PCM και με στερεό υλικό αποθήκευσης και συγκρίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας τους για ίδιες χρονικές στιγμές. Πρώτα παρουσιάζεται το ρευστό domain με το νερό και στη συνέχεια το τμήμα των στερεών σωλήνων που περιέχουν τα υλικά αποθήκευσης (solid domain).



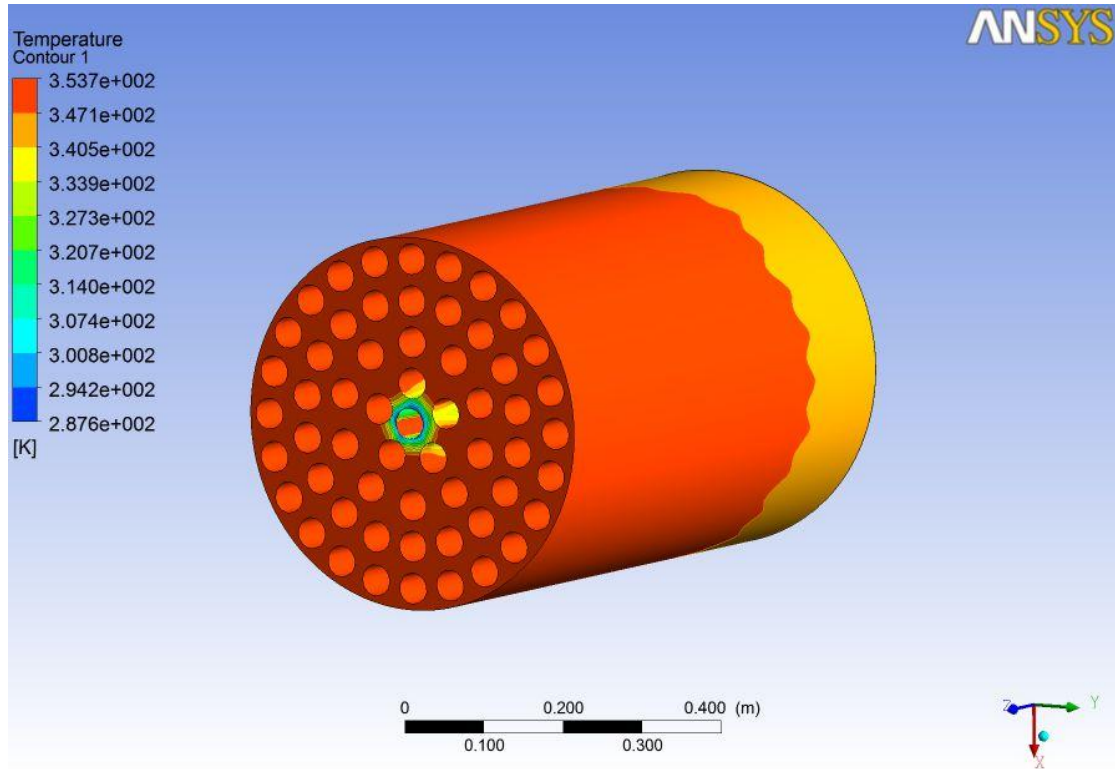
Εικόνα 5.21 : Θερμοκρασία νερού και των δύο συστημάτων τη χρονική στιγμή  $t = 0$



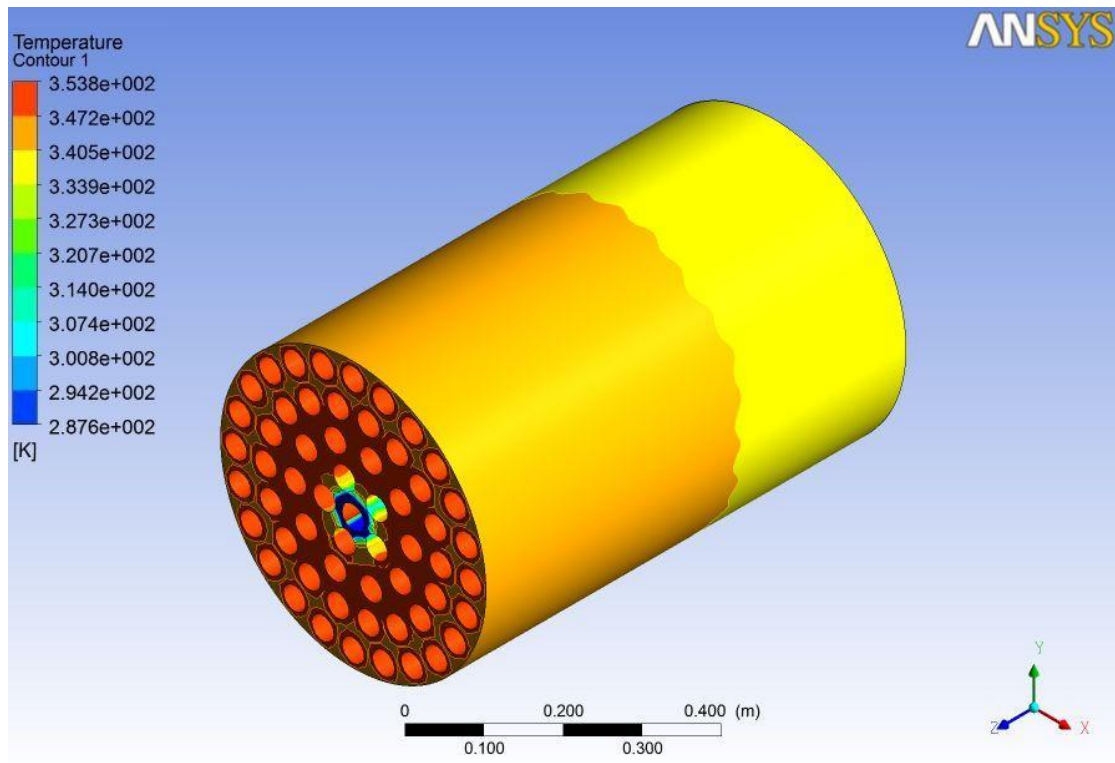
Εικόνα 5.22 : Θερμοκρασία νερού συστήματος με PCM τη χρονική στιγμή  $t = 2 \text{ min}$



Εικόνα 5.23 : Θερμοκρασία νερού συστήματος με  $C_p \text{ solid}$  τη χρονική στιγμή  $t = 2 \text{ min}$

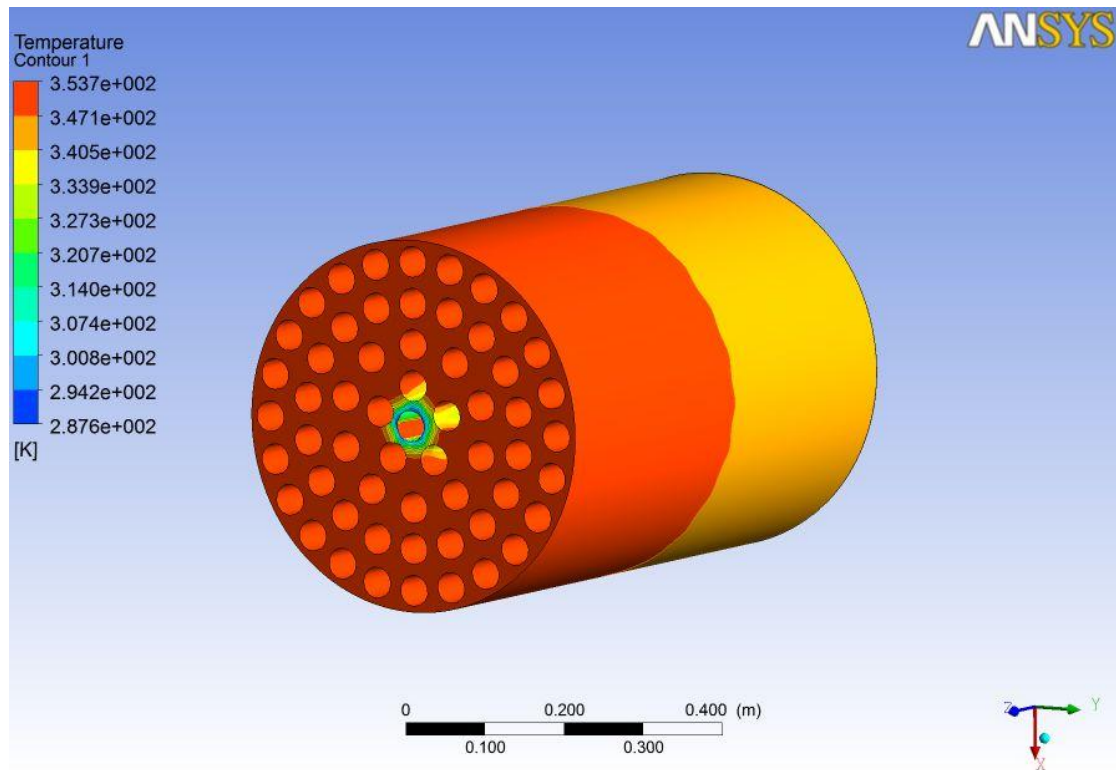


Εικόνα 5.24: Θερμοκρασία νερού συστήματος με PCM τη χρονική στιγμή  $t = 5 \text{ min}$

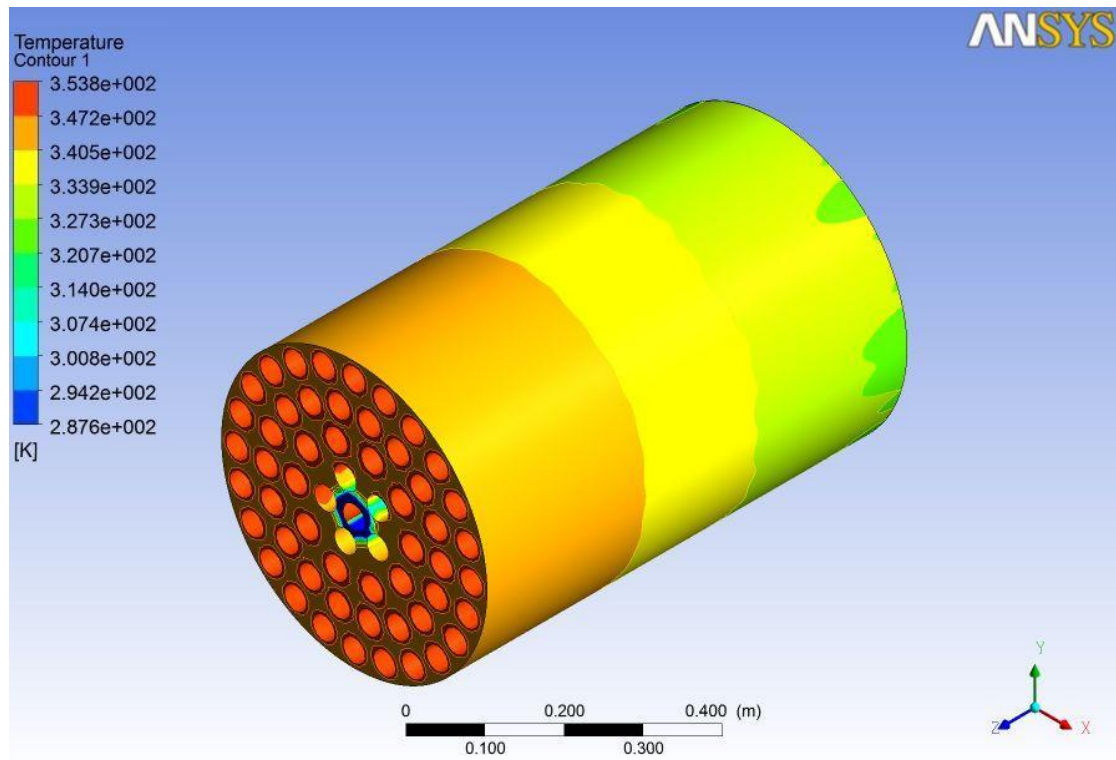


Εικόνα 5.25 : Θερμοκρασία νερού συστήματος με  $C_p \text{ solid}$  τη χρονική στιγμή  $t = 5 \text{ min}$

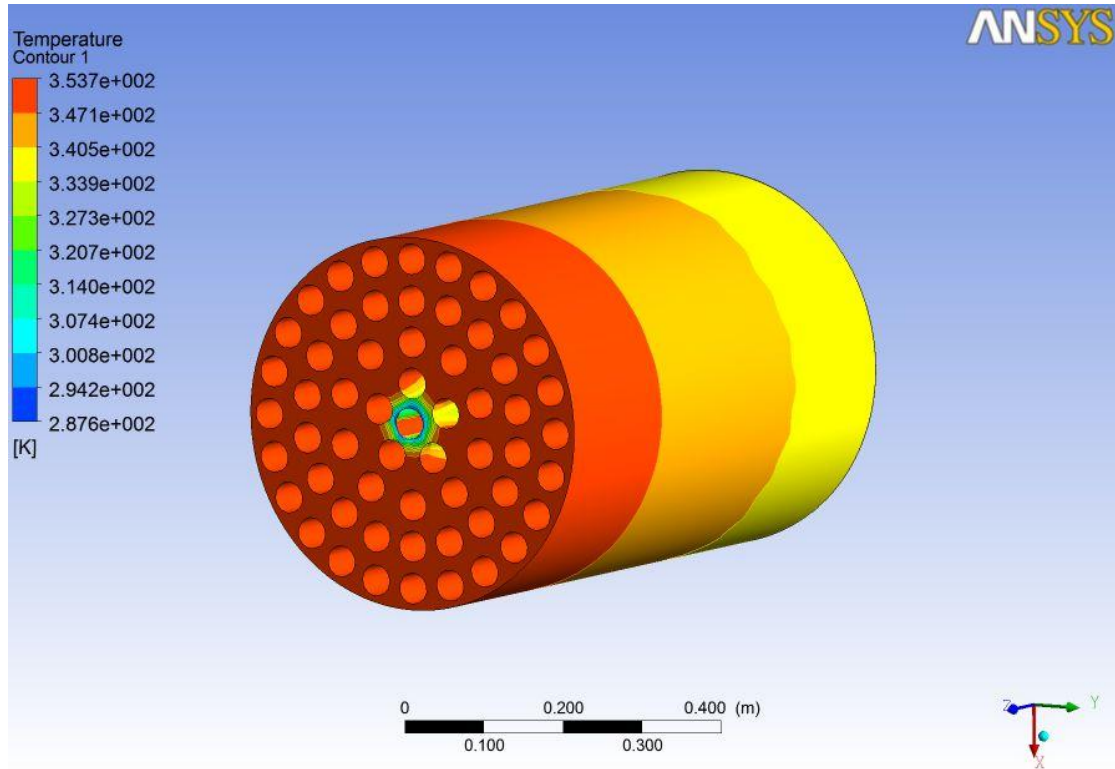




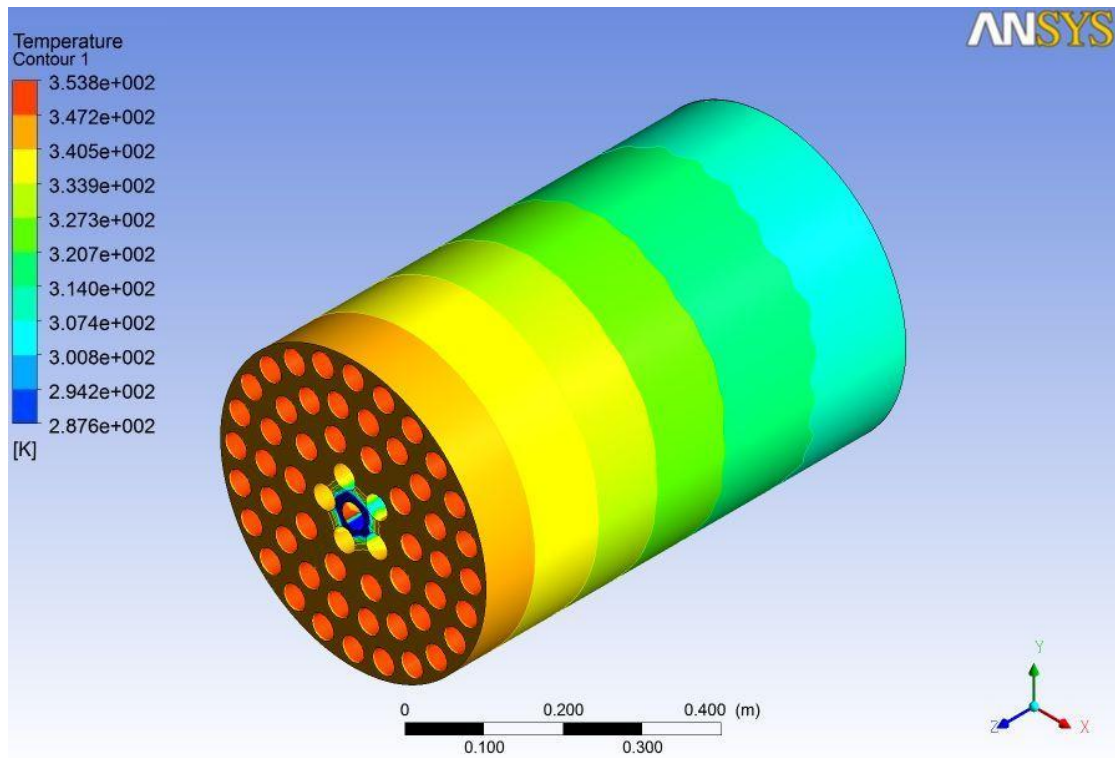
Εικόνα 5.26 : Θερμοκρασία νερού συστήματος με PCM τη χρονική στιγμή  $t = 8 \text{ min}$



Εικόνα 5.27 : Θερμοκρασία νερού συστήματος με  $C_p \text{ solid}$  τη χρονική στιγμή  $t = 8 \text{ min}$

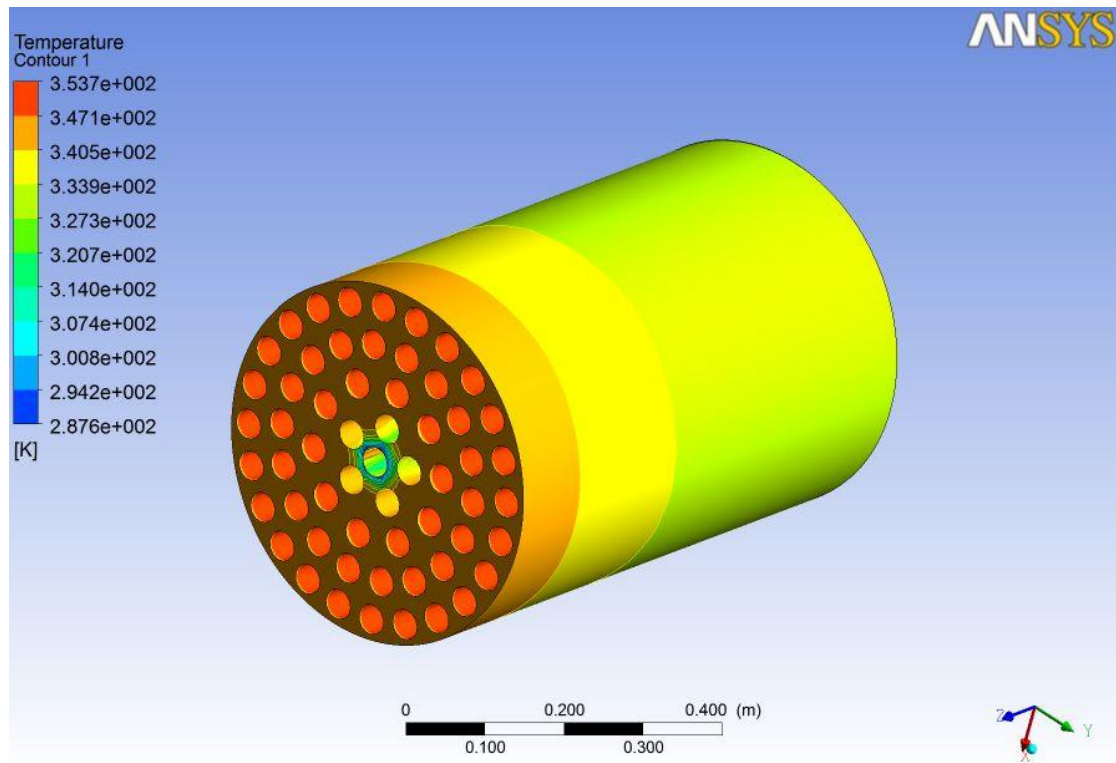


Εικόνα 5.28 : Θερμοκρασία νερού συστήματος με PCM τη χρονική στιγμή  $t = 12 \text{ min}$

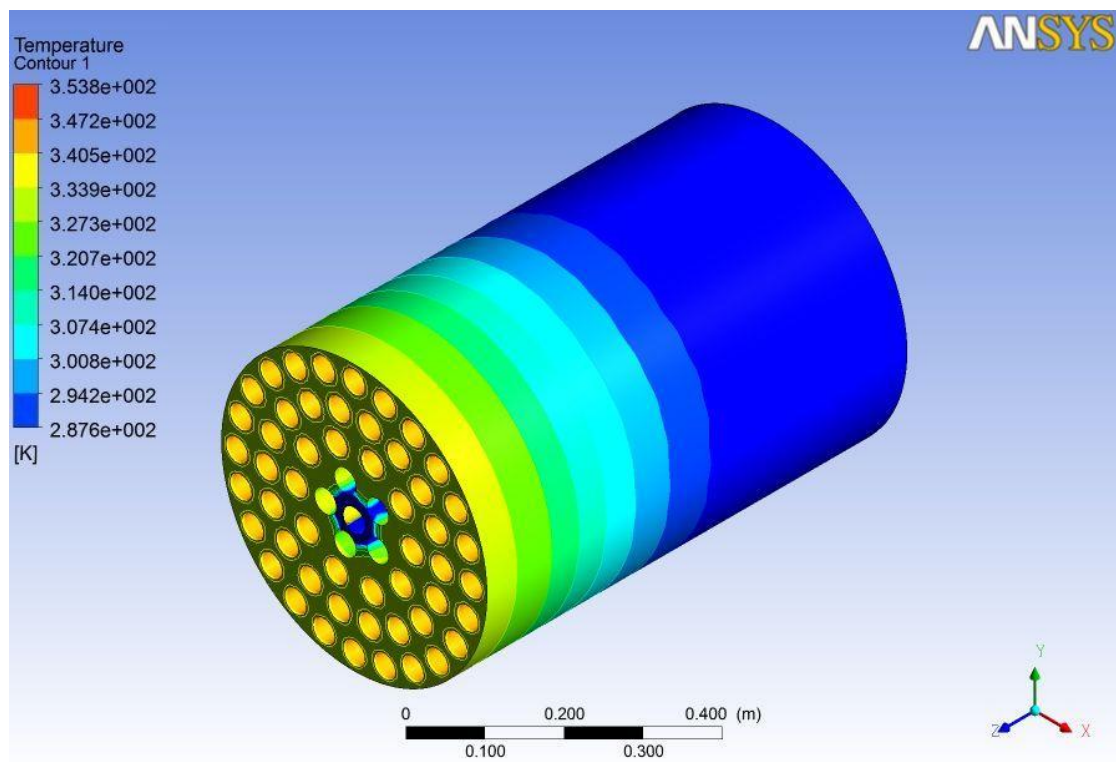


Εικόνα 5.29 : Θερμοκρασία νερού συστήματος με  $C_p \text{ solid}$  τη χρονική στιγμή  $t = 12 \text{ min}$

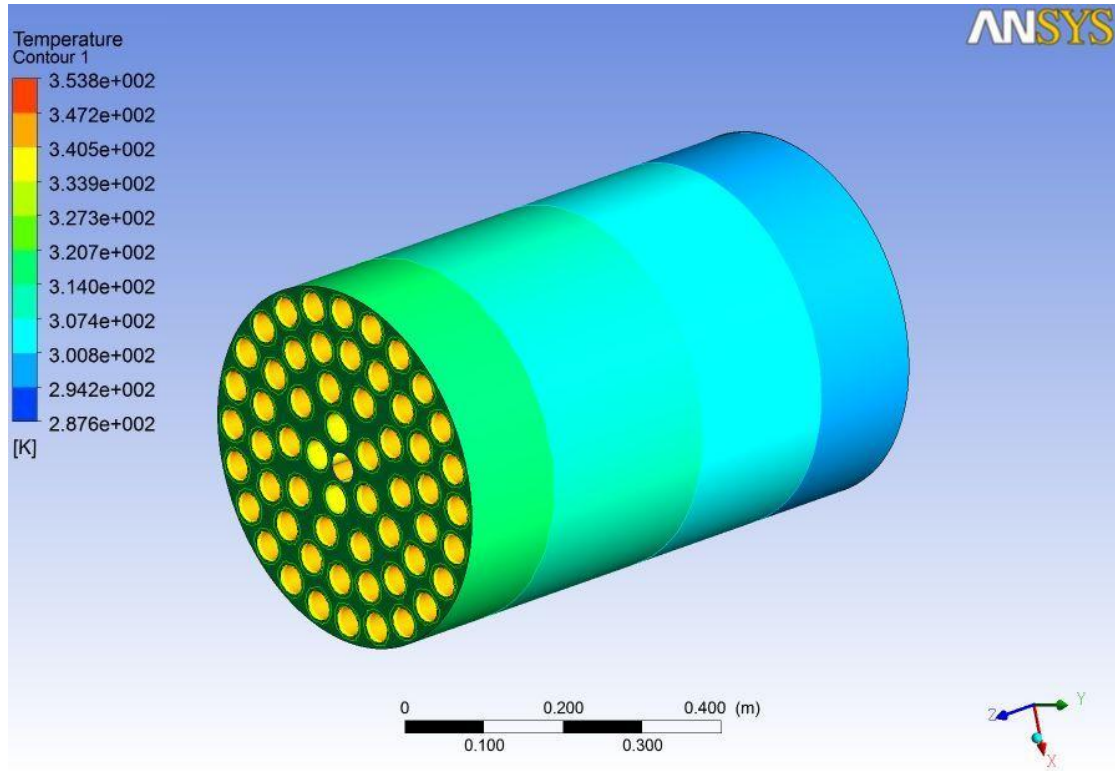




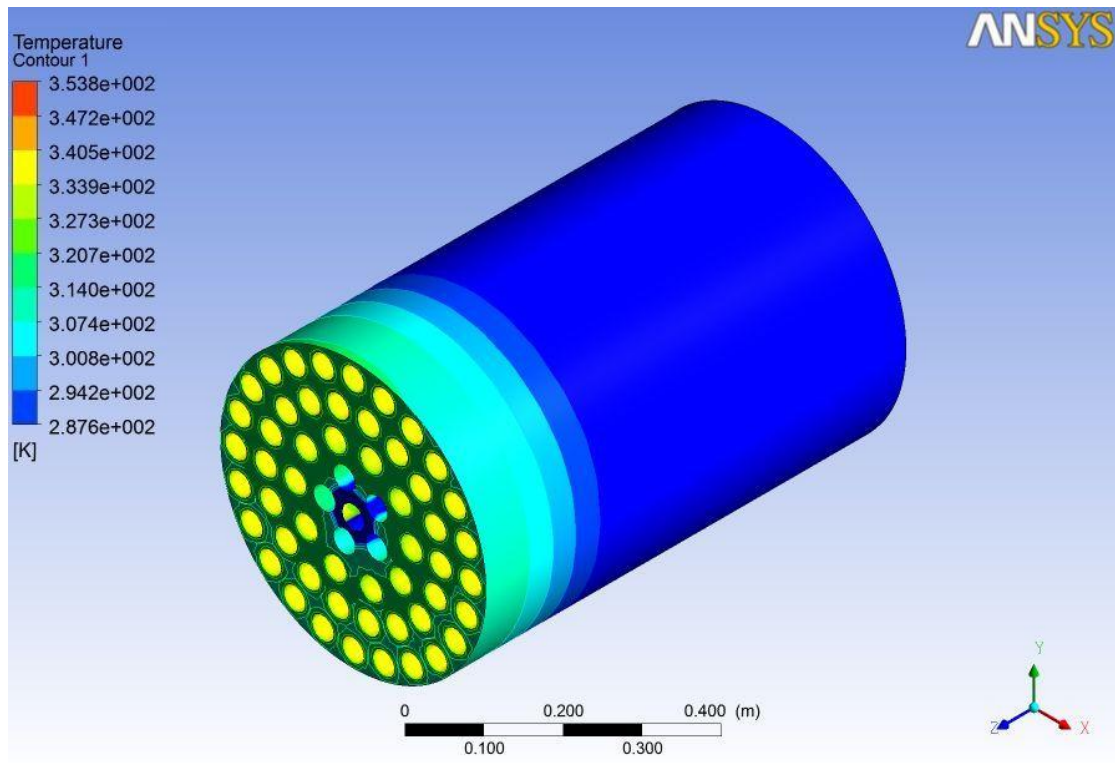
Εικόνα 5.30 : Θερμοκρασία νερού συστήματος με PCM τη χρονική στιγμή  $t = 20 \text{ min}$



Εικόνα 5.31 : Θερμοκρασία νερού συστήματος με  $C_p \text{ solid}$  τη χρονική στιγμή  $t = 20 \text{ min}$



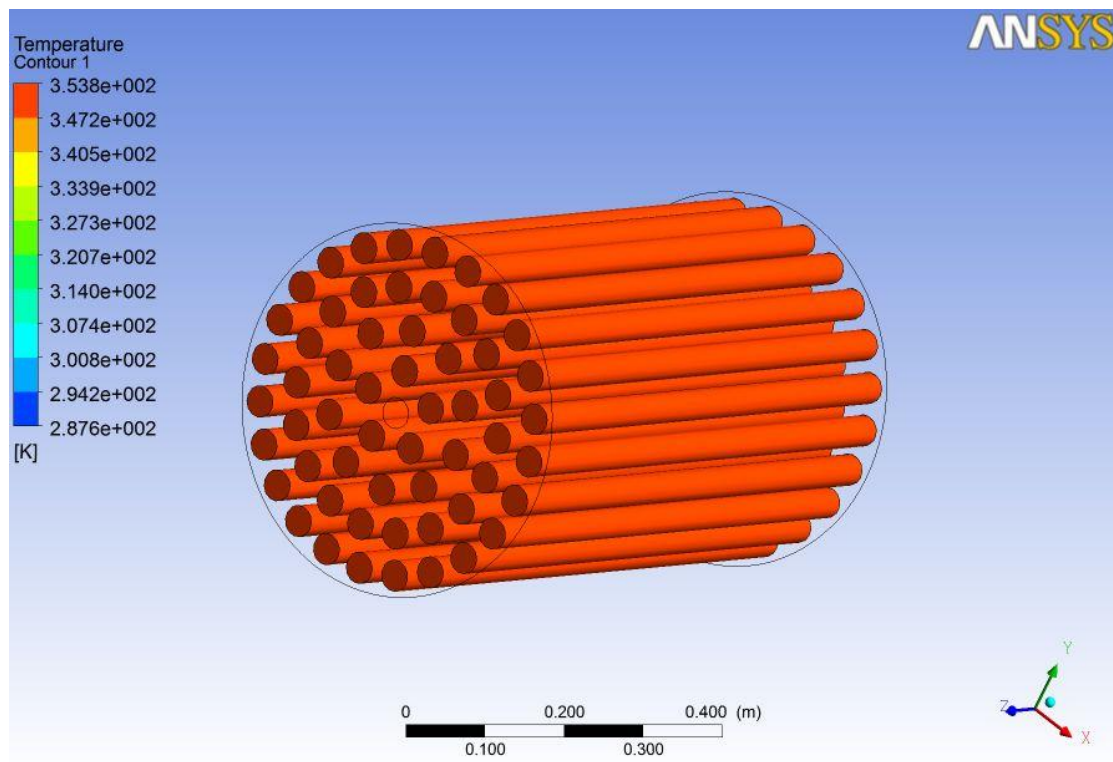
Εικόνα 5.32 : Θερμοκρασία νερού συστήματος με PCM τη χρονική στιγμή  $t = 120 \text{ min}$



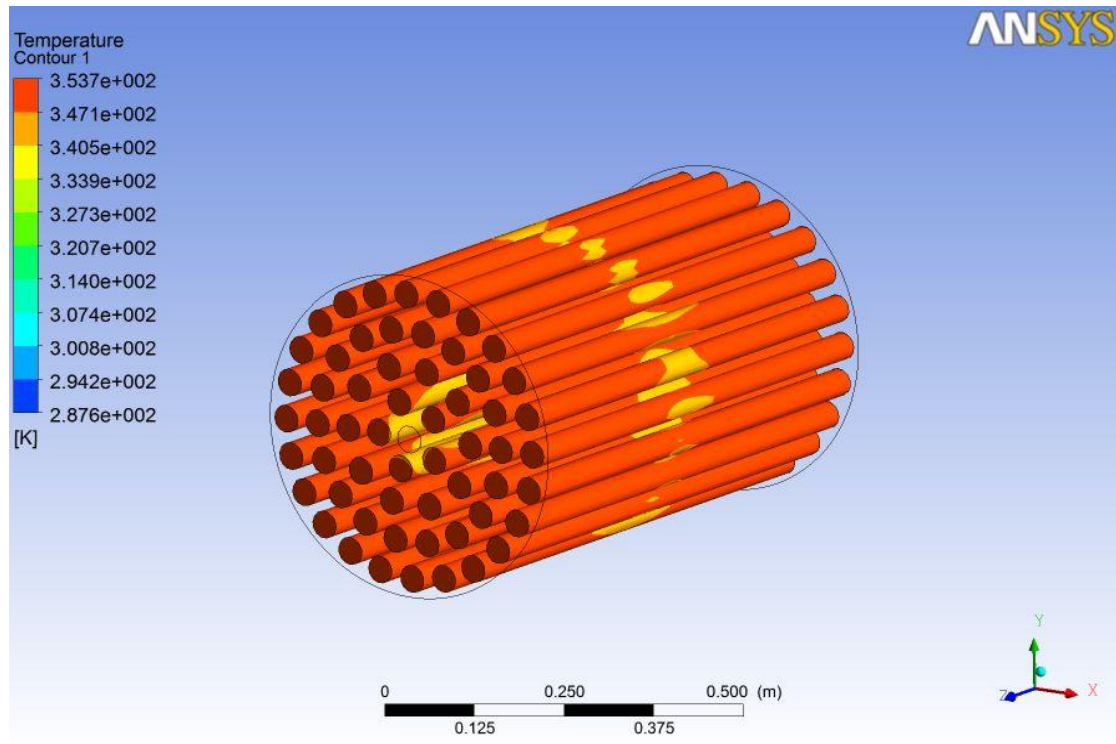
Εικόνα 5.33 : Θερμοκρασία νερού συστήματος με  $C_p \text{ solid}$  τη χρονική στιγμή  $t = 120 \text{ min}$

Από τις εικόνες εύκολα διαπιστώνεται η **χρονική καθυστέρηση** στην πτώση της θερμοκρασίας του νερού του συστήματος με PCM καθώς και η **θερμοκρασιακή διαφορά** σε όλη τη διάρκεια της αποφόρτισης μεταξύ των δύο συστημάτων. Το PCM λοιπόν, συμβάλλει στη διατήρηση της θερμοκρασίας του νερού σε υψηλότερα επίπεδα μέσα στη δεξαμενή, κάνοντας το δοχείο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας αποδοτικότερο. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά οποιαδήποτε χρονική στιγμή συγκρίνουμε τα δύο συστήματα. Επιπλέον, στον κυλινδρικό αγωγό ιδίως όταν υπάρχει PCM, παρατηρείται ομοιόμορφη πτώση της θερμοκρασίας και εμφανή τμήματα θερμικής διαστρωμάτωσης.

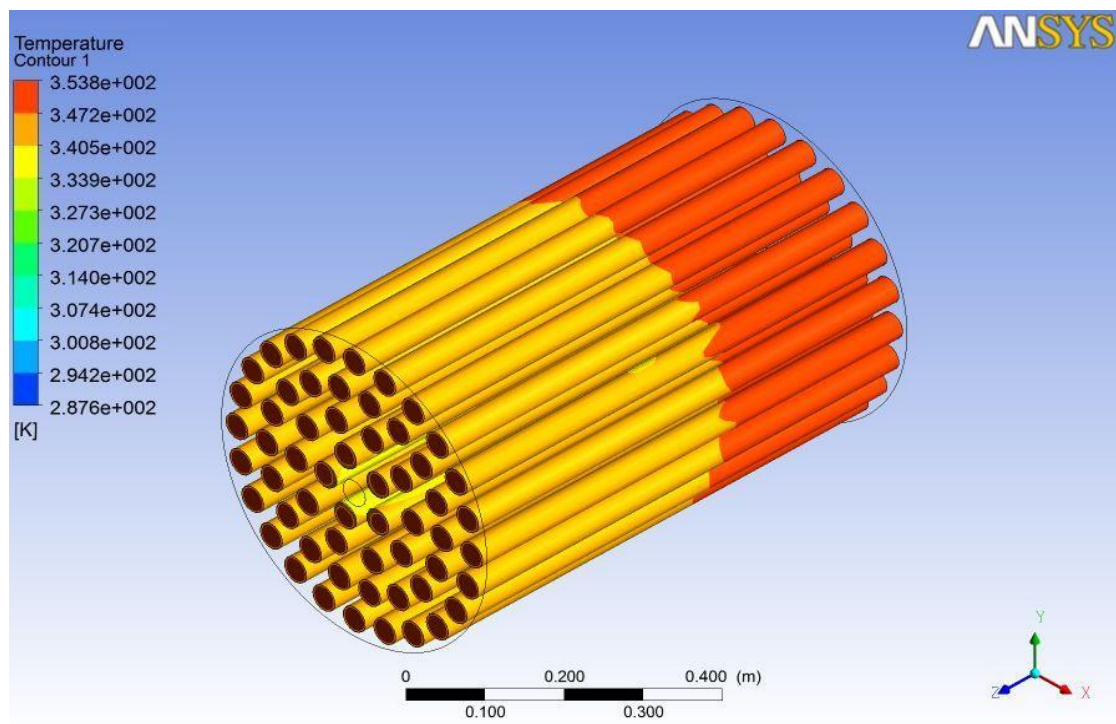
Οι ακόλουθες εικόνες αναφέρονται στους σωλήνες που βρίσκονται εντός του κυλινδρικού αγωγού και περιέχουν το υλικό αποθήκευσης. Είναι εμφανής η γρηγορότερη μείωση στη θερμοκρασία των σωλήνων που περιέχουν υλικό με  $C_p$  σταθερό σε σχέση με τους σωλήνες που έχουν ενσωματωμένο PCM στο εσωτερικό τους. Η μείωση της θερμοκρασίας ξεκινά πρώτα από τους σωλήνες που βρίσκονται στο κέντρο της δεξαμενής, δηλαδή σε αυτούς που έχουν άμεση επαφή με το πεδίο ροής και επηρεάζονται περισσότερο από τις διεργασίες ανταλλαγής ορμής και θερμότητας με το νερό. Στη συνέχεια, πλήττονται συμμετρικά όλοι στο κέντρο τους και κατόπιν με διάχυση λόγω ανακυκλοφοριών και ρευμάτων σε όλο τους το μήκος.



Εικόνα 5.34 : Θερμοκρασία Σωλήνων και των 2 συστημάτων τη χρονική στιγμή  $t = 0$



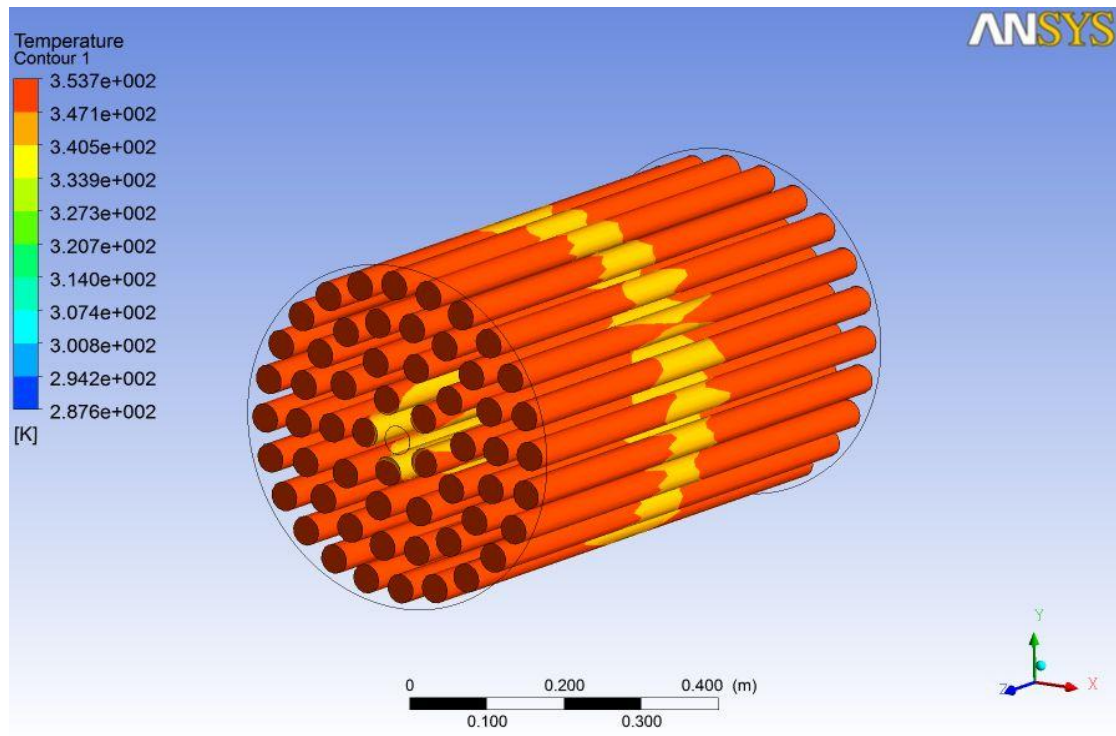
Εικόνα 5.35 : Θερμοκρασία Σωλήνων με PCM τη χρονική στιγμή  $t = 5 \text{ min}$



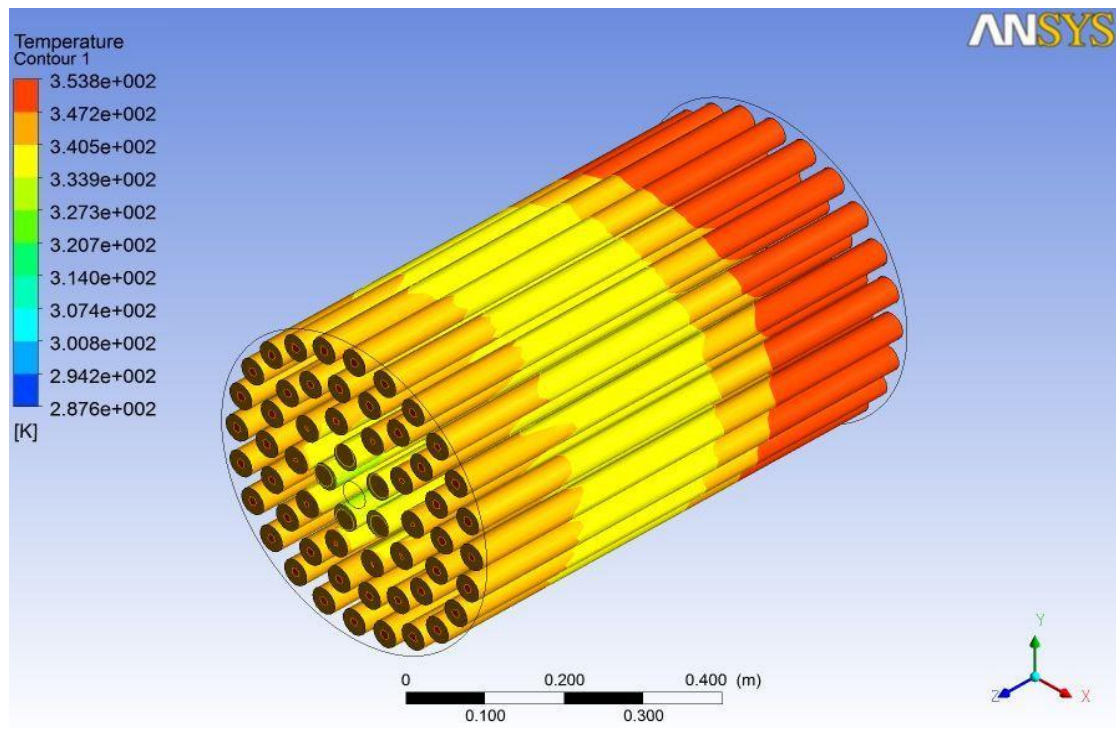
Εικόνα 5.36 : Θερμοκρασία Σωλήνων με υλικό σταθερής  $C_p$  τη χρονική στιγμή  $t = 5 \text{ min}$

Από τις 2 προηγούμενες εικόνες διαπιστώνεται η συμμετρικά ομοιόμορφη πτώση της θερμοκρασίας των σωλήνων πρώτα στο κέντρο και μετά από την είσοδο προς την έξοδο, και η διαφορά θερμοκρασίας των σωλήνων ανάμεσα στα 2 συστήματα.



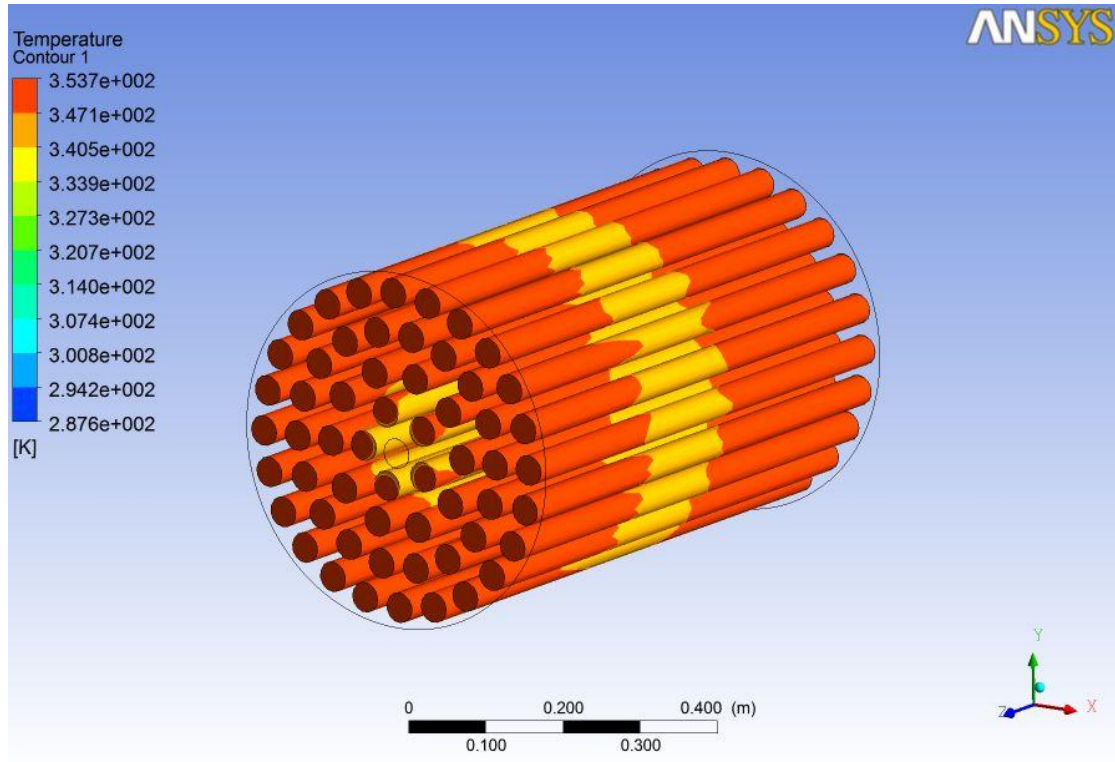


Εικόνα 5.37 : Θερμοκρασία Σωλήνων με PCM τη χρονική στιγμή  $t = 8 \text{ min}$

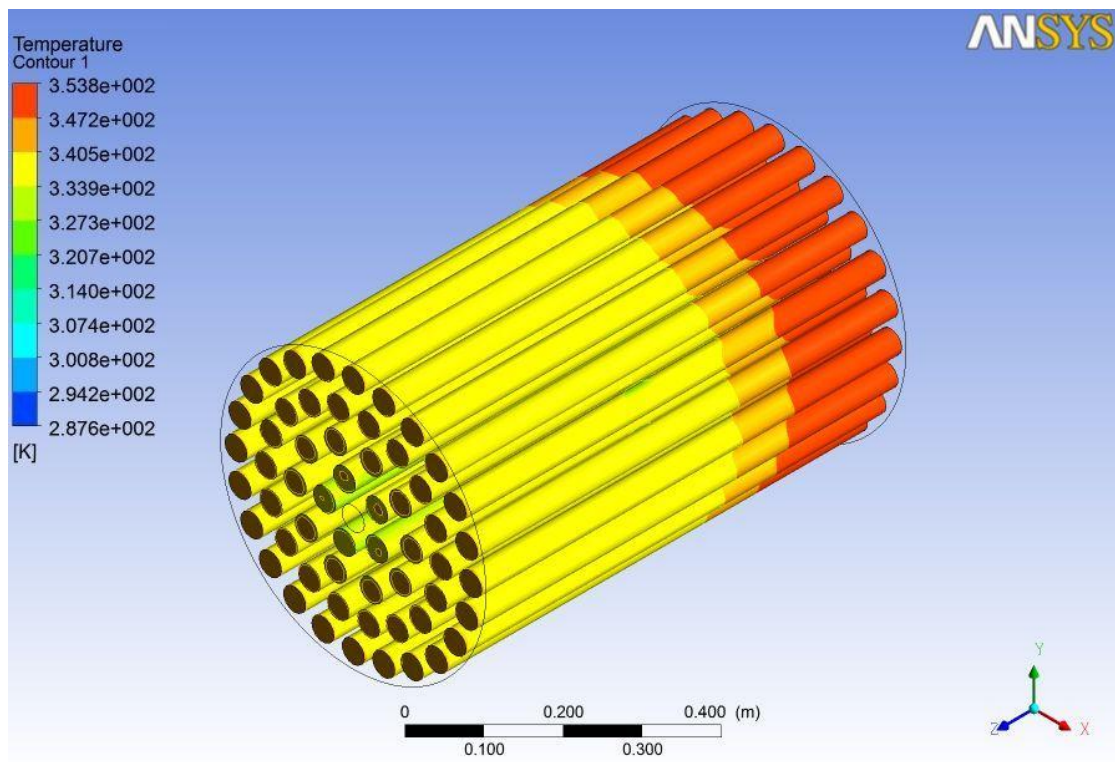


Εικόνα 5.38 : Θερμοκρασία Σωλήνων με υλικό σταθερής  $C_p$  τη χρονική στιγμή  $t = 8 \text{ min}$

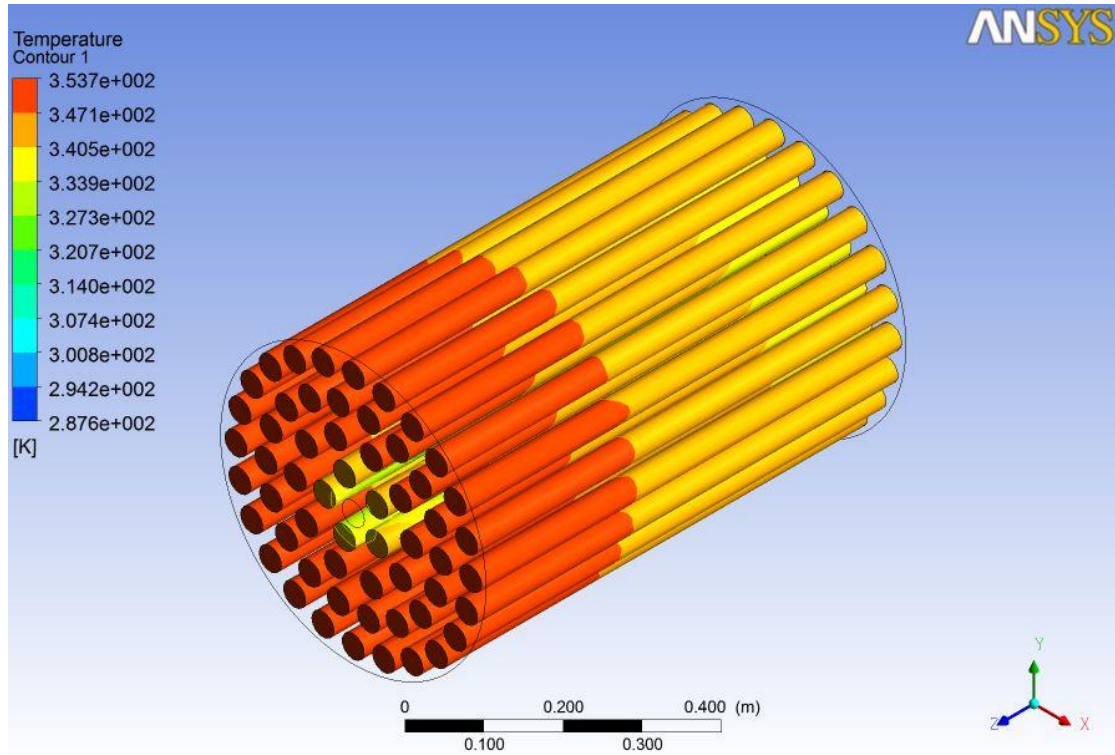
Μετά από 12 min η θερμοκρασία των σωλήνων με PCM έχει μειωθεί περίπου στους 70°C μόνο στο κέντρο τους ενώ οι σωλήνες με υλικό σταθερής  $C_p$  έχουν θερμοκρασία 60°C σε όλη την περιοχή από την είσοδο ως και μετά το κέντρο τους.



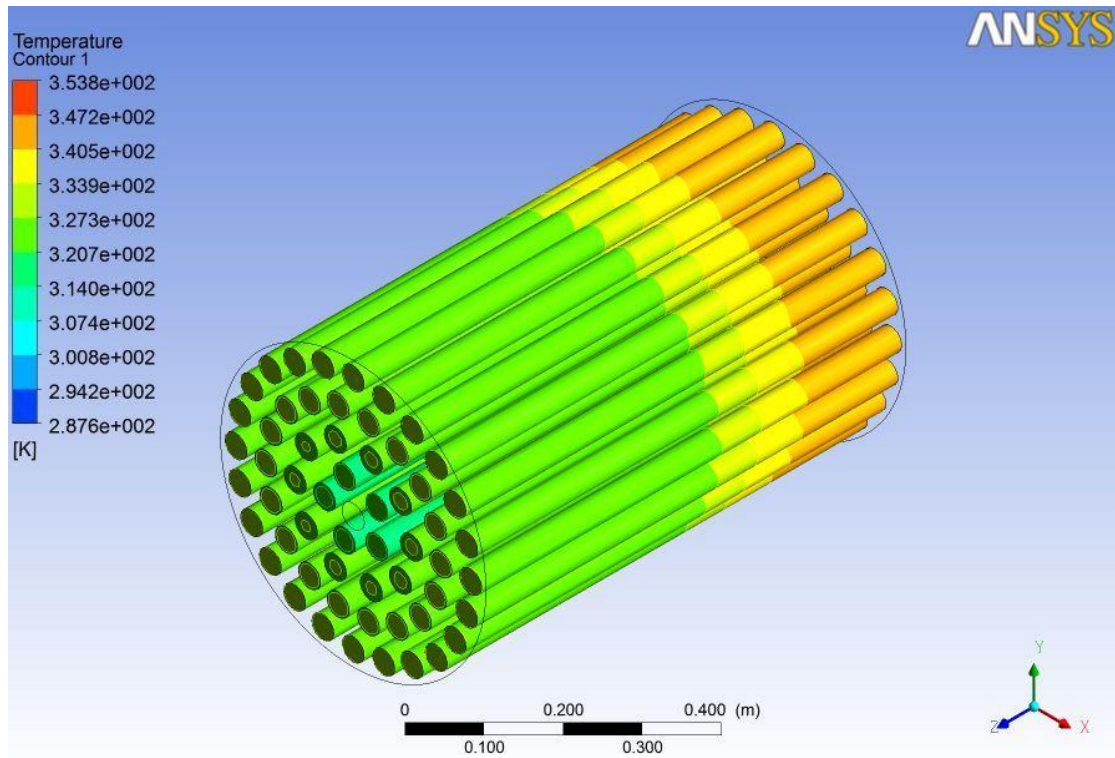
Εικόνα 5.39: Θερμοκρασία Σωλήνων με PCM τη χρονική στιγμή  $t = 12 \text{ min}$



Εικόνα 5.40 : Θερμοκρασία Σωλήνων με υλικό σταθερής  $C_p$  τη χρονική στιγμή  $t = 12 \text{ min}$

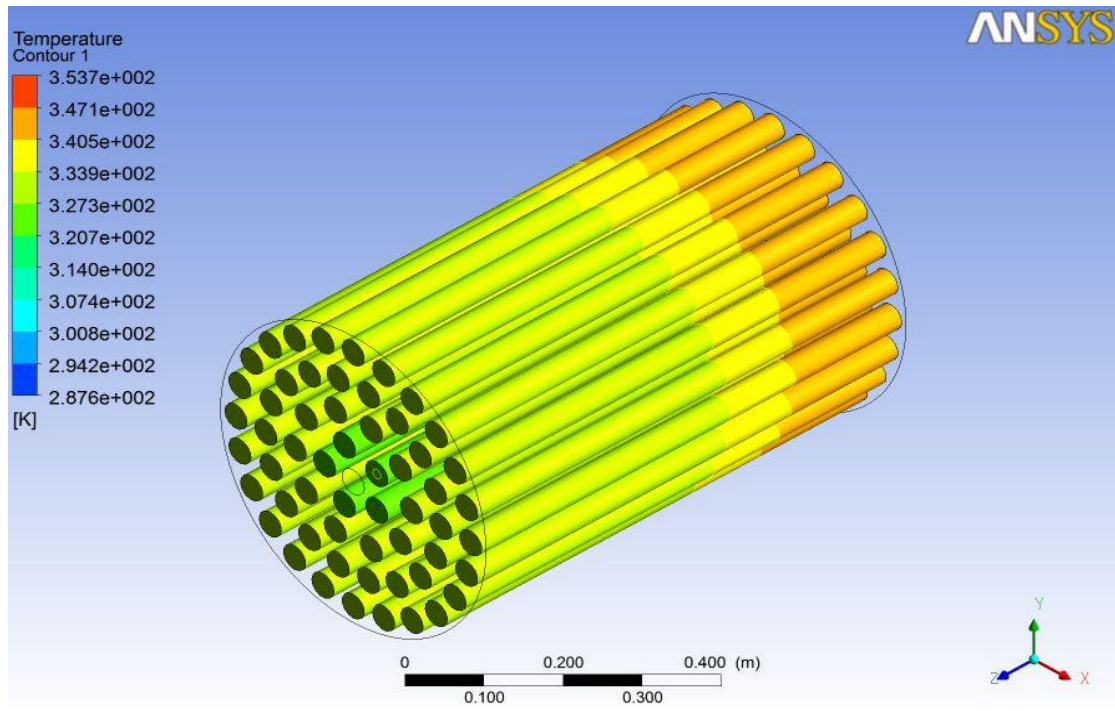


Εικόνα 5.41 : Θερμοκρασία Σωλήνων με PCM τη χρονική στιγμή  $t = 20 \text{ min}$

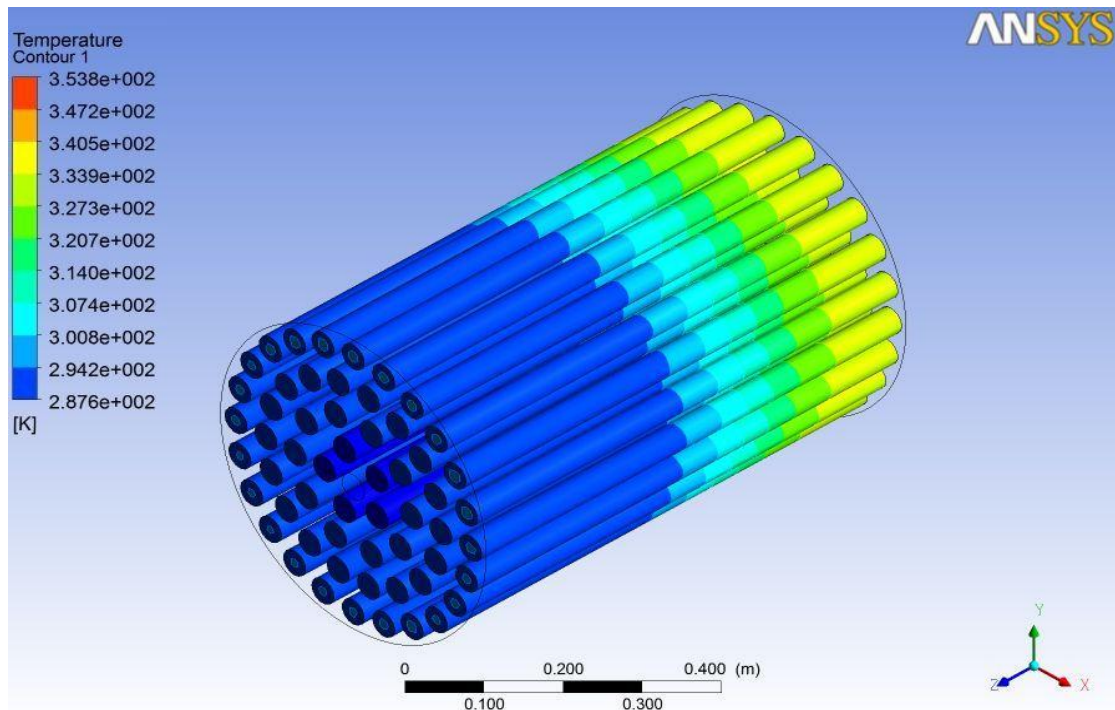


Εικόνα 5.42 : Θερμοκρασία Σωλήνων με υλικό σταθερής  $C_p$  τη χρονική στιγμή  $t = 20 \text{ min}$





Εικόνα 5.43 : Θερμοκρασία Σωλήνων με PCM τη χρονική στιγμή  $t = 120 \text{ min}$



Εικόνα 5.44 : Θερμοκρασία Σωλήνων με υλικό σταθερής  $C_p$  τη χρονική στιγμή  $t = 120 \text{ min}$

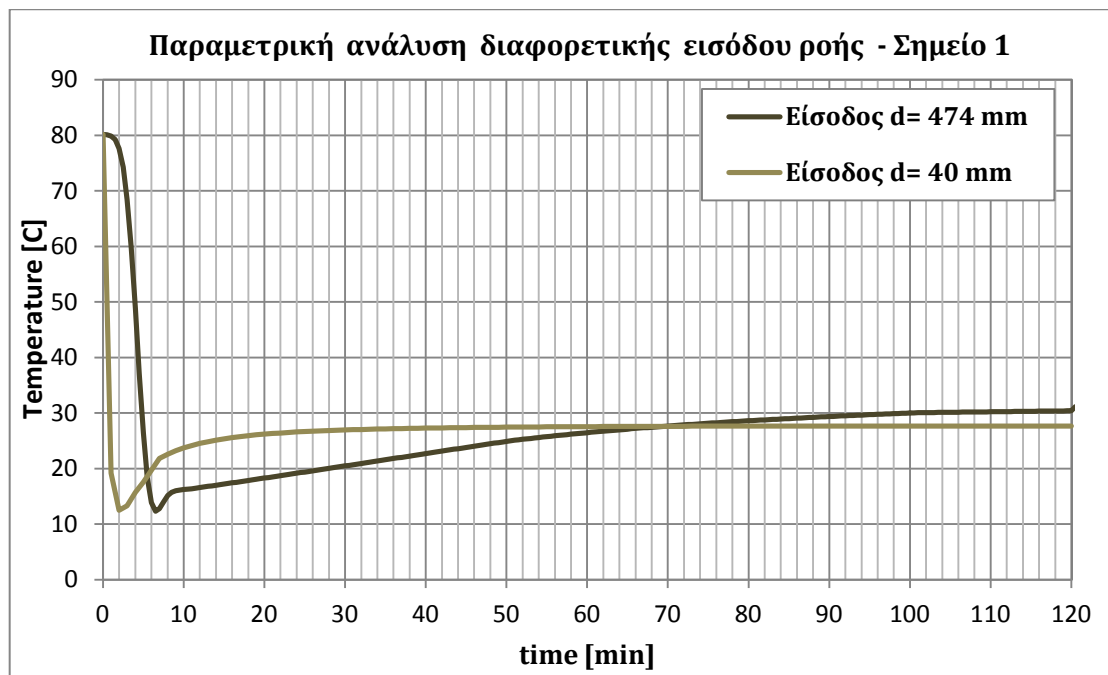
Το τέλος της αποφόρτισης βρίσκει ένα μεγάλο μέρος των σωλήνων του συστήματος με  $C_p \text{ solid}$  να έχει χάσει πλήρως τη θερμότητά του και να έχει θερμοκρασία  $14.5^\circ\text{C}$  ενώ στο σύστημα με PCM η θερμοκρασία των σωλήνων δεν πέφτει κάτω από  $40^\circ\text{C}$ .



## 5.4 Παραμετρικές αναλύσεις

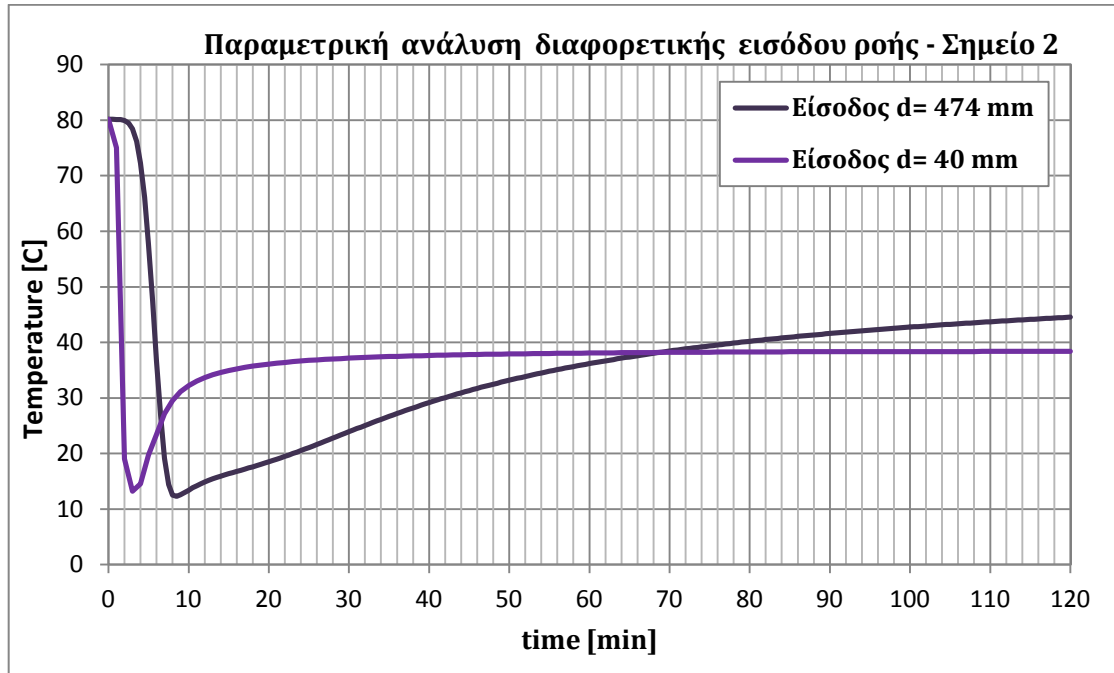
### 5.4.1 Παραμετρική Μελέτη διαφορετικών εισόδων ροής

Η πρώτη παραμετρική ανάλυση που μελετήθηκε ήταν η αποφόρτιση του συστήματος αποθήκευσης με διαφορετική είσοδο για την παροχή του νερού. Συγκεκριμένα προσομοιώθηκε για την ίδια παροχή 0.125 kg/sec η οποία σταματούσε στους 45°C από θερμοστάτη, η αποφόρτιση της κυλινδρικής δεξαμενής έχοντας είσοδο διαμέτρου 0.474 m (δηλαδή όλη τη βάση του κυλίνδρου) και η αποφόρτιση με είσοδο διαμέτρου 4 cm. Εφόσον η παροχή νερού ήταν ίδια για τις δύο περιπτώσεις, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι, στο σύστημα με την είσοδο μικρής διαμέτρου η ταχύτητα ροής που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ήταν πολύ μεγαλύτερη. Επομένως η αποφόρτιση πραγματοποιήθηκε σε πολύ λιγότερο χρόνο και οι θερμοκρασίες που σημειώθηκαν χαμηλότερες. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη θερμική ανάλυση του πεδίου ροής για 7 σημεία της κατακόρυφης διεύθυνσης παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα :

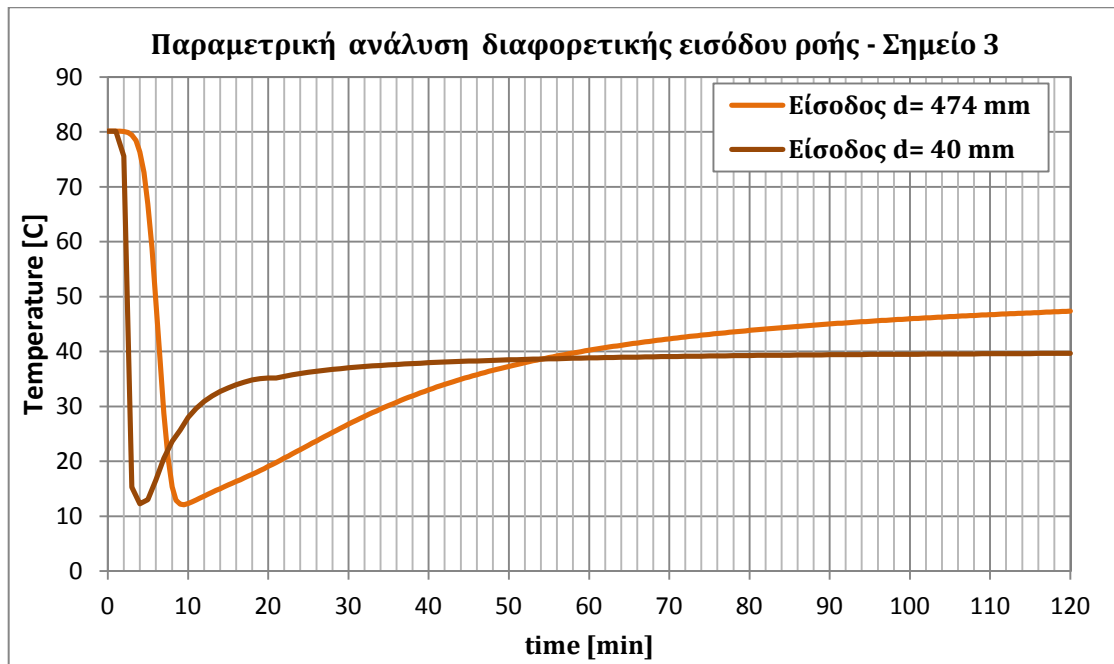


Σχήμα 5.4: Χρονική Μεταβολή της Θερμοκρασίας για τις 2 εισόδους – Σημείο 1

Ο χρόνος αποφόρτισης στην είσοδο είναι μόλις 2 min για είσοδο 4 cm και 7 min για είσοδο διαμέτρου 0.474 m. Η θερμοκρασία μετά την αποφόρτιση ανεβαίνει στους 27.5°C και στους 30°C αντίστοιχα.

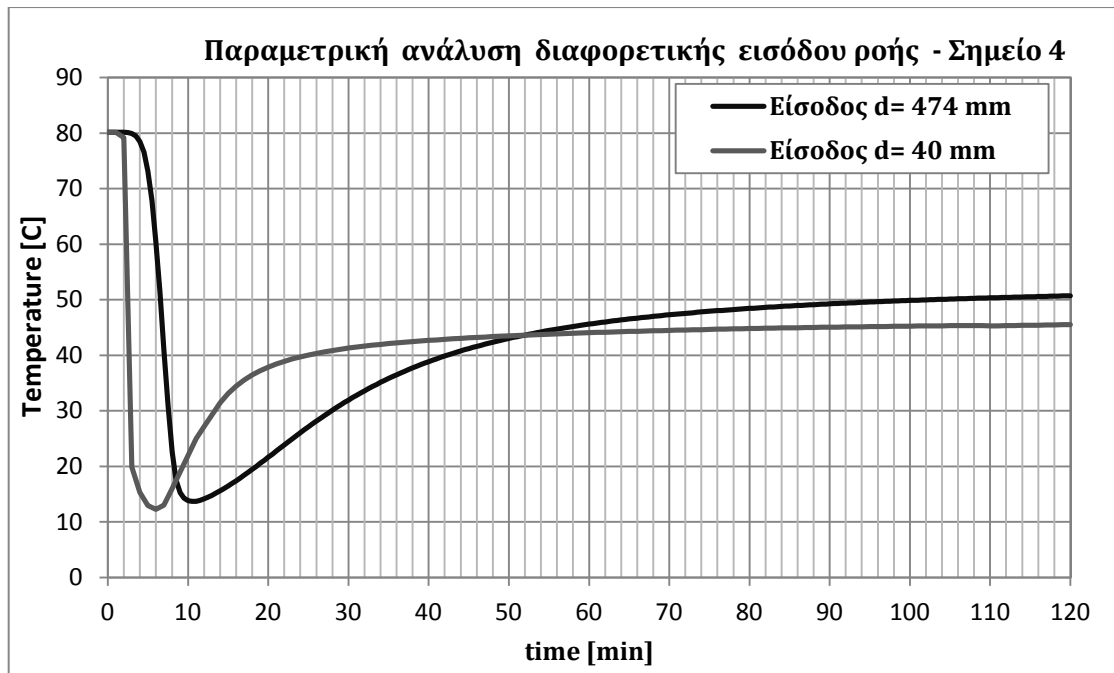


Σχήμα 5.5: Χρονική Μεταβολή της Θερμοκρασίας για τις 2 εισόδους – Σημείο 2

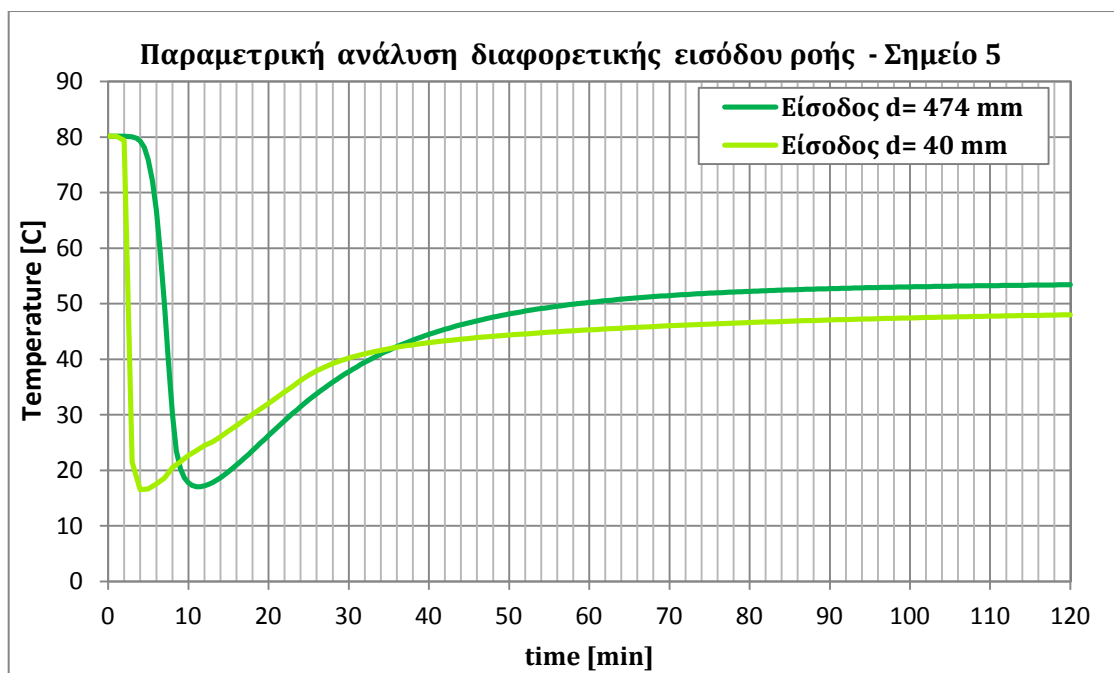


Σχήμα 5.6 : Χρονική Μεταβολή της Θερμοκρασίας για τις 2 εισόδους – Σημείο 3

Ο χρόνος αποφόρτισης στο σημείο 3 του κατακόρυφου άξονα συμμετρίας είναι 4 min για είσοδο 4 cm και 10 min για είσοδο διαμέτρου 0.474 m. Η θερμοκρασία μετά την αποφόρτιση ανεβαίνει στους 40°C και στους 48.1°C αντίστοιχα.

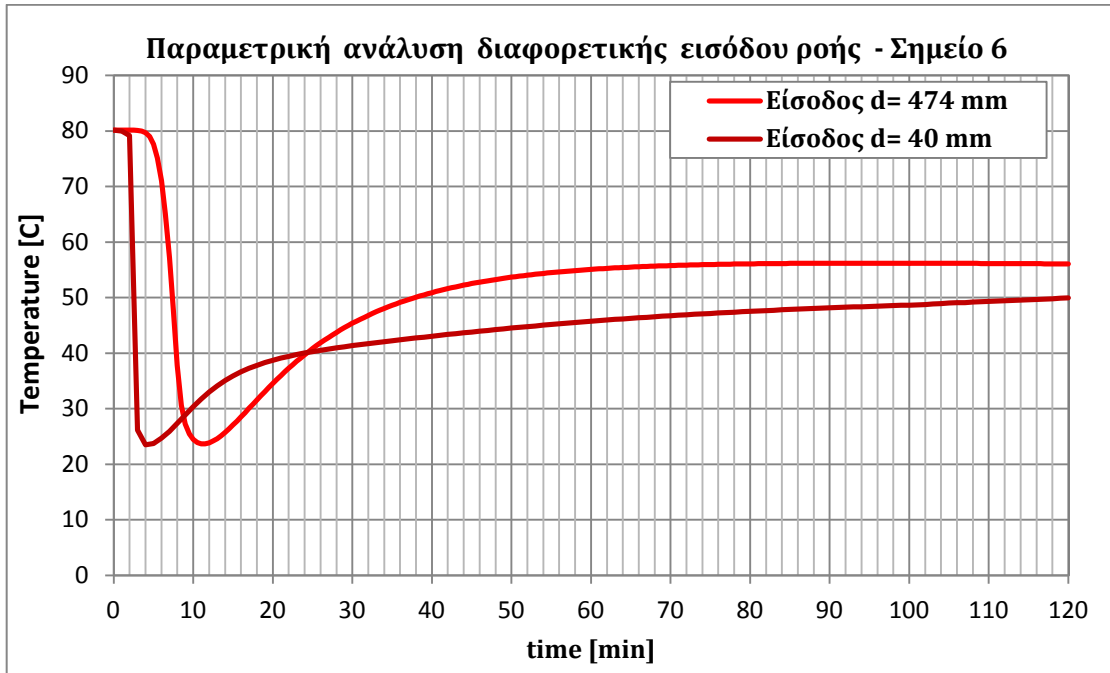


Σχήμα 5.7: Χρονική Μεταβολή της Θερμοκρασίας για τις 2 εισόδους – Σημείο 4

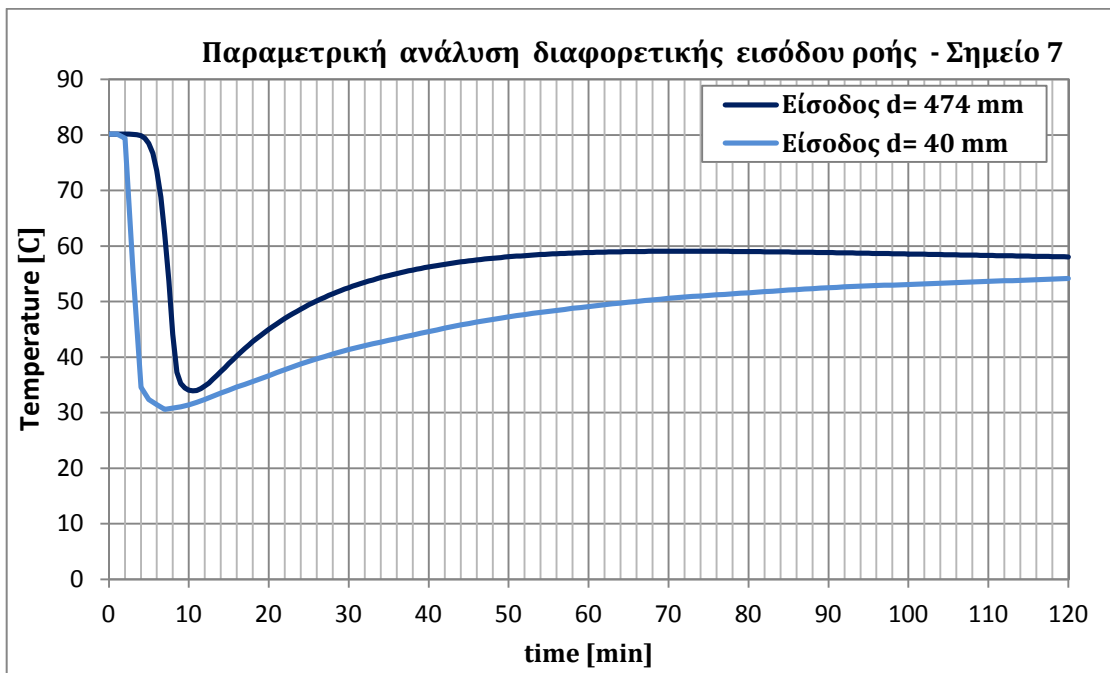


Σχήμα 5.8: Χρονική Μεταβολή της Θερμοκρασίας για τις 2 εισόδους – Σημείο 5

Ο χρόνος αποφόρτισης στο σημείο 5 του κατακόρυφου άξονα συμμετρίας είναι 4 min για είσοδο 4 cm και 11 min για είσοδο διαμέτρου 0.474 m. Η θερμοκρασία μετά την αποφόρτιση ανεβαίνει στους 48.8°C και στους 53.2°C αντίστοιχα.



Σχήμα 5.9: Χρονική Μεταβολή της Θερμοκρασίας για τις 2 εισόδους – Σημείο 6

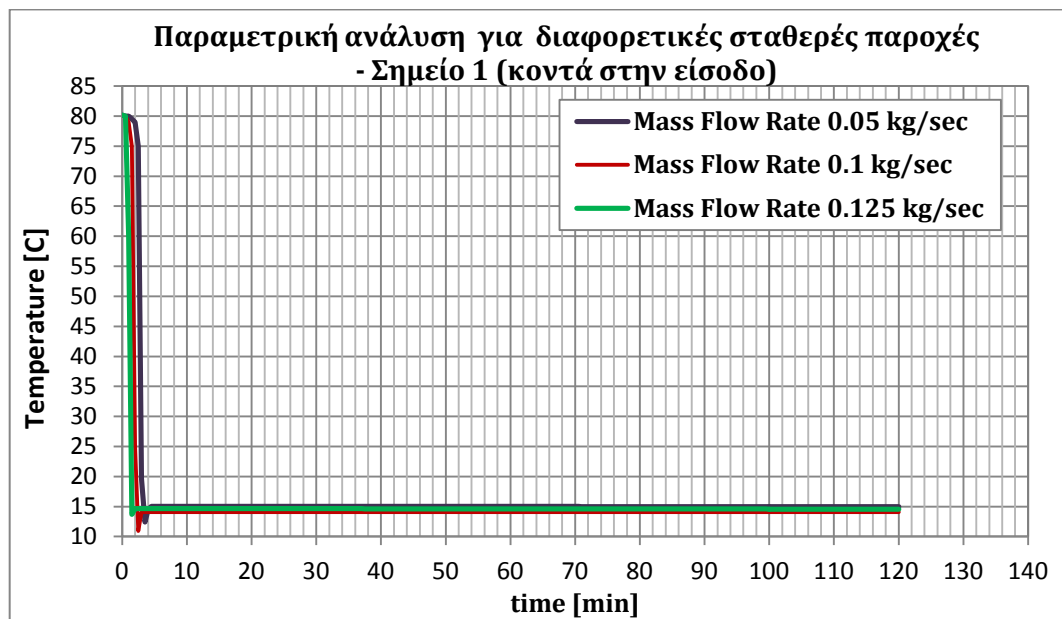


Σχήμα 5.10: Χρονική Μεταβολή της Θερμοκρασίας για τις 2 εισόδους – Σημείο 7

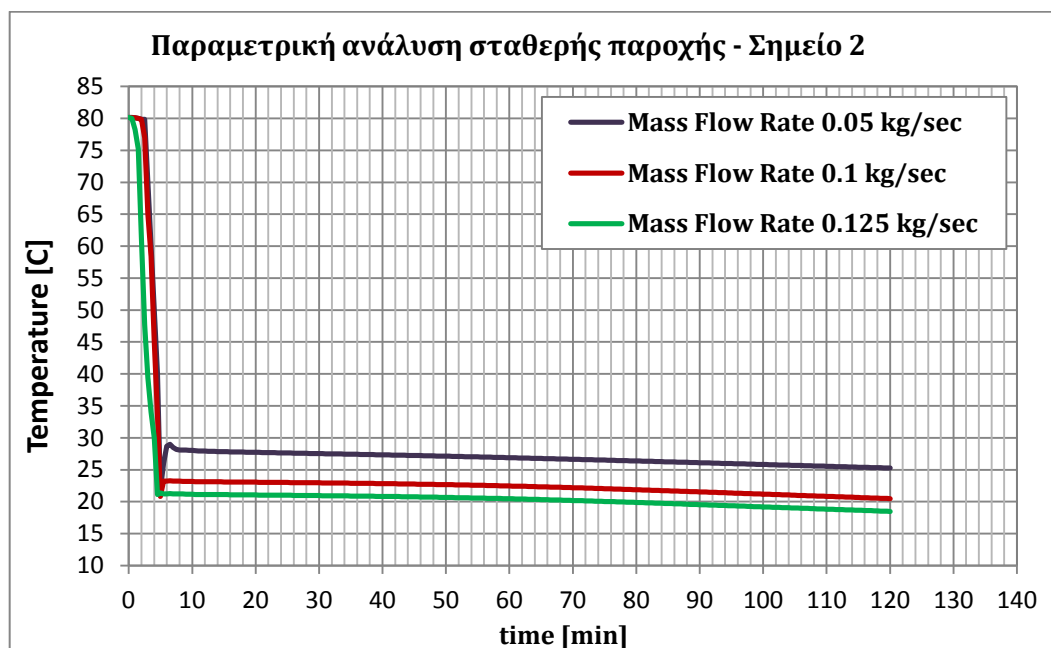
Ο χρόνος αποφόρτισης στην έξοδο είναι 5.5 min για είσοδο 4 cm και 11 min για είσοδο διαμέτρου 0.474 m. Η θερμοκρασία μετά την αποφόρτιση ανεβαίνει στην έξοδο στους 54.4°C και στους 59.1°C αντίστοιχα. Η μέση χρονική καθυστέρηση που επιβάλλει το PCM στην πτώση της θερμοκρασίας είναι 2 min και 6 min αντίστοιχα.

### 5.4.2 Παραμετρική Μελέτη διαφορετικών παροχών νερού

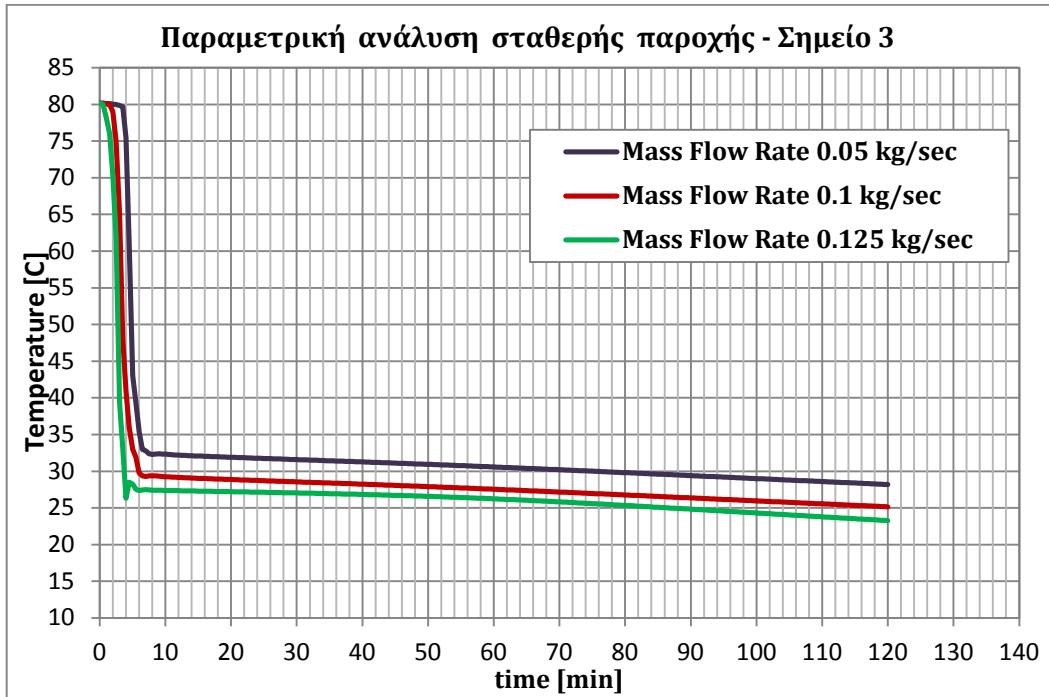
Σε αυτή την παραμετρική μελέτη παριστάνεται η διαδικασία πλήρους αποφόρτισης του κυλινδρικού αγωγού όταν τροφοδοτείται με νερό σταθερής παροχής, για 120min. Συγκρίνονται τα αποτελέσματα για τρεις διαφορετικές τιμές της παροχής. Μελετήθηκαν οι παροχές 0.05kg/sec , 0.10kg/sec και 0.125kg/sec. Επιλέγοντας 5 σημεία στην κατακόρυφη διεύθυνση , πάνω στην οποία αναπτύσσονται και οι μεγαλύτερες ταχύτητες ροής, προκύπτουν τα παρακάτω γραφήματα :



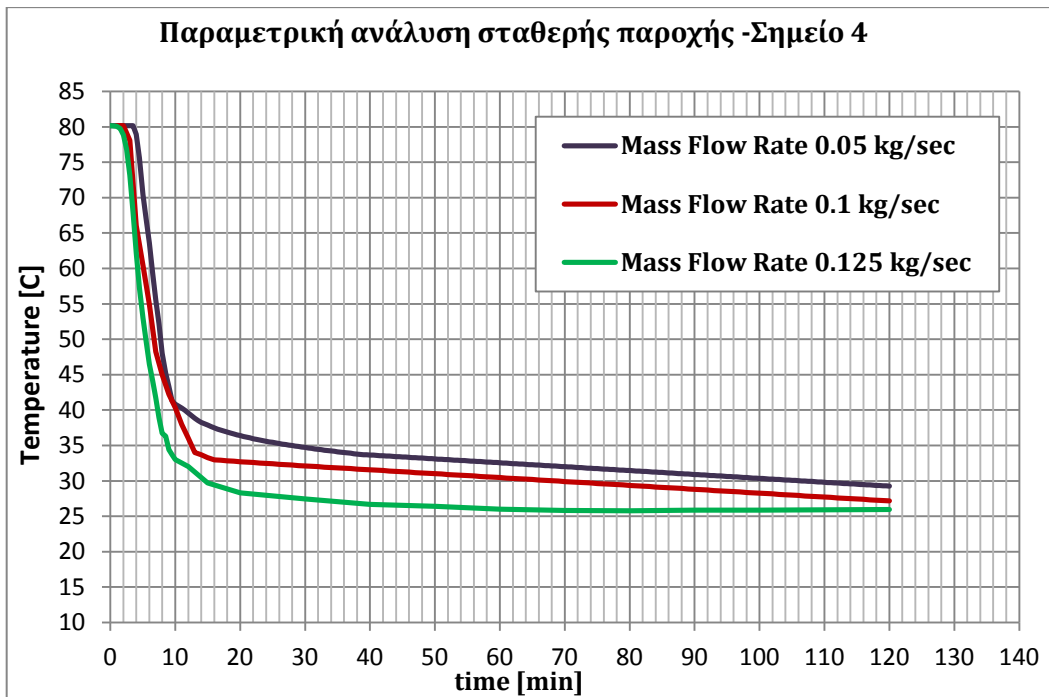
Σχήμα 5.11: Αποφόρτιση για 3 διαφορετικές παροχές νερού – Σημείο 1



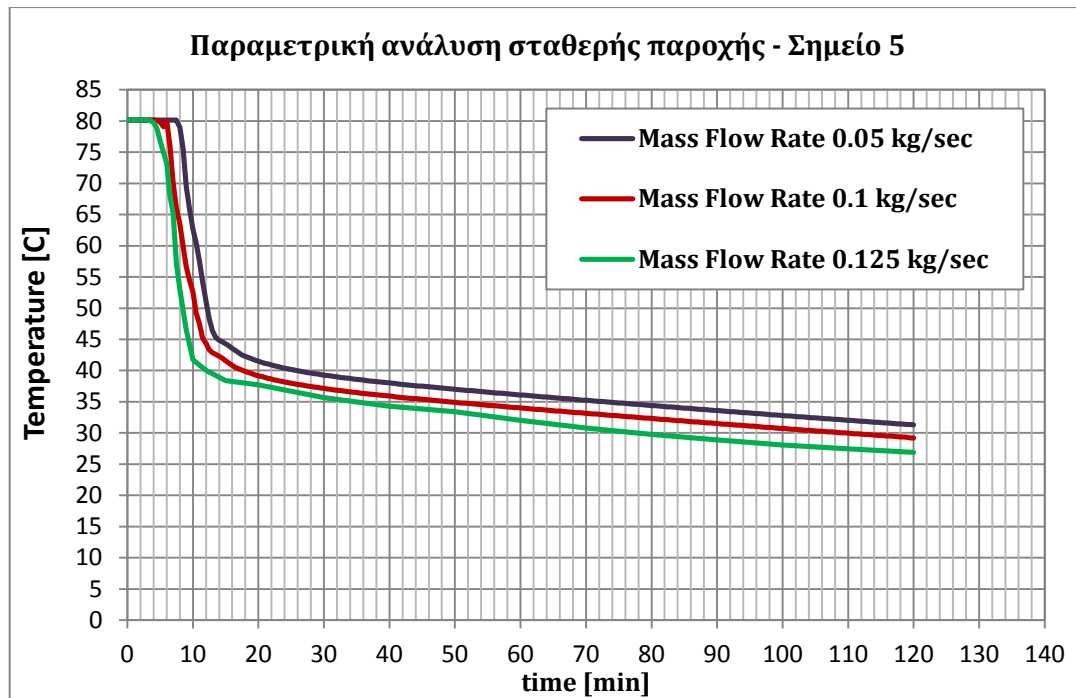
Σχήμα 5.12: Αποφόρτιση για 3 διαφορετικές παροχές νερού – Σημείο 2



Σχήμα 5.13 : Αποφόρτιση για 3 διαφορετικές παροχές νερού – Σημείο 3(κέντρο)



Σχήμα 5.14 : Αποφόρτιση για 3 διαφορετικές παροχές νερού – Σημείο 4



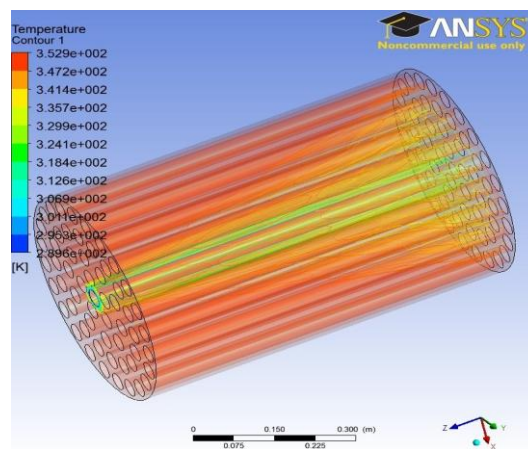
Σχήμα 5.15: Αποφόρτιση για 3 διαφορετικές παροχές νερού – Σημείο 5

Όταν αυξηθεί η παροχή στη δεξαμενή αποθήκευσης θερμού νερού, εισέρχεται **περισσότερη ποσότητα κρύου νερού** θερμοκρασίας 14.5°C. Είναι εμφανές από τα διαγράμματα ότι για μεγαλύτερη τιμή παροχής, η **θερμότητα από το PCM** κρατά θερμό το νερό για **μικρότερο χρονικό διάστημα**. Η θερμοκρασία του νερού θα πέσει πιο γρήγορα καθώς και σε χαμηλότερα επίπεδα. Συγκεκριμένα, για τη μικρότερη παροχή 0.05kg/sec η θερμοκρασία είναι σε όλη τη διάρκεια αποφόρτισης υψηλότερη με τελικές τιμές αποφόρτισης από 14.5°C στην είσοδο(Σημείο 1) μέχρι 32°C στην έξοδο (Σημείο 5). Η χρονική καθυστέρηση στη μείωση της θερμοκρασίας λόγω θερμότητας από το PCM παρατηρείται από το διάγραμμα του σημείου της εξόδου ότι είναι γύρω στα 9 min.

Αντίστοιχα, για παροχή 0.10 kg/sec η χρονική καθυστέρηση της πτώσης της θερμοκρασίας λόγω της επίδρασης του PCM είναι 7 min και για 0.125kg/sec είναι 6 min. Η τελική τιμή της θερμοκρασίας σε κάθε περίπτωση είναι από 14.5°C στην είσοδο μέχρι 29°C στην έξοδο για παροχή 0.10 kg/sec και από 14.5°C στην είσοδο μέχρι 26°C στην έξοδο για παροχή 0.125 kg/sec. Η θερμοκρασιακή διαφορά κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης είναι της τάξης των 2-5°C για τις παροχές 0.05 kg/sec και 0.10 kg/sec, και των 1-3.5°C για τις παροχές 0.10 kg/sec και 0.125 kg/sec

Η μεγαλύτερη παροχή δημιουργεί μεγαλύτερες ταχύτητες ροής στη δεξαμενή απότομες μεταβολές στο σύστημα και επηρεάζει τη μεταφορά ενέργειας και ορμής από τα PCM στο νερό με αποτέλεσμα να μειώνεται η θερμοκρασία του.

Κατά τη διαδικασία αποφόρτισης, πάνω στον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας ,από την είσοδο του νερού προχωρώντας προς τα μέσα, διακρίνονται υψηλότερες τιμές για τη θερμοκρασία του νερού από σημείο σε σημείο. Δηλαδή η μείωση της θερμοκρασίας του νερού εντός της δεξαμενής είναι διαφορετική για κάθε σημείο, με τις χαμηλότερες θερμοκρασίες να παρατηρούνται στην είσοδο και τις υψηλότερες στην έξοδο. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά και από την παρακάτω εικόνα.



*Εικόνα 5.45 : Θερμικό πεδίο στο Εσωτερικό του κυλινδρικού αγωγού τη χρονική στιγμή  $t= 6min$*

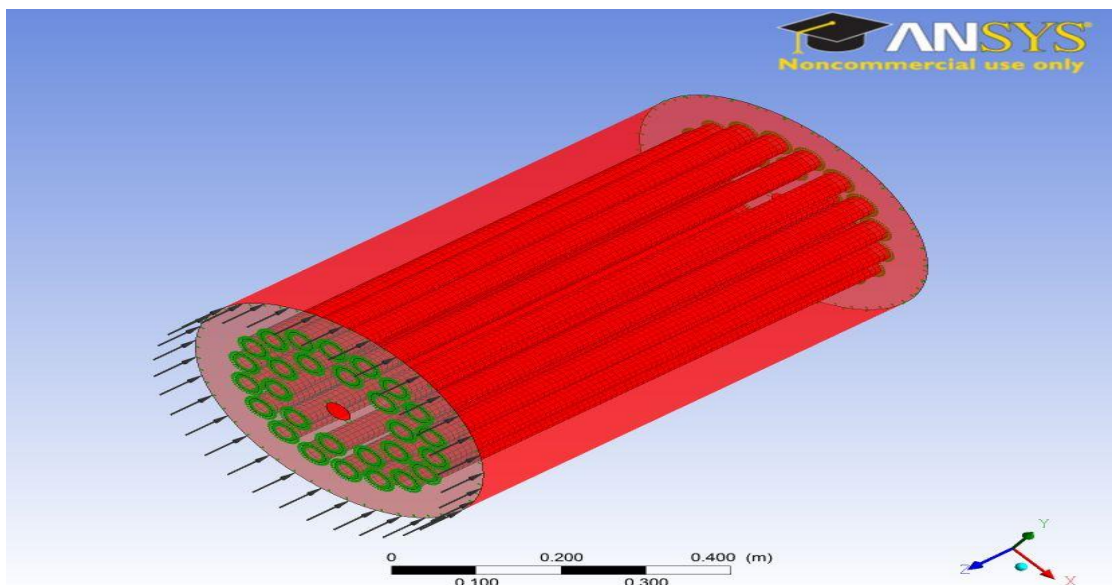
Το 5<sup>ο</sup> σημείο αποτελεί το σημείο που βρίσκεται κοντά στο άνοιγμα εξόδου, στο οποίο παρατηρείται ότι η θερμοκρασία του νερού μετά την αποφόρτιση βρίσκεται σε υψηλότερα επίπεδα από τα υπόλοιπα σημεία της κατακόρυφης ευθείας στα οποία καταγράφηκε η μεταβολή της θερμοκρασίας και τουλάχιστον 10°C πάνω από την είσοδο.

Το γεγονός αυτό δικαιολογείται αφού το νερό καθώς αντλείται για χρήση, χωρίς να υπάρχει περιορισμός (δυνατότητα συνεχούς παροχής), μεταβαίνει σε στενότερη διατομή η οποία δημιουργεί ανακυκλοφορίες, αναγκάζεται να ανταλλάξει εκ νέου ενέργεια με άλλα τμήματα στο εσωτερικό της δεξαμενής και αυξάνει εκ νέου την ταχύτητα του για να μπορέσει να διαφύγει με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του στην έξοδο. Επιπρόσθετα το νερό σε αυτό το σημείο έχει απορροφήσει περισσότερη θερμότητα από τα PCM την οποία προσφέρουν στο σύστημα στα πρώτα λεπτά της διαδικασίας αποφόρτισης και εφόσον το νερό από εκείνη την περιοχή θα χρησιμοποιηθεί από το δίκτυο, είναι θερμότερο.

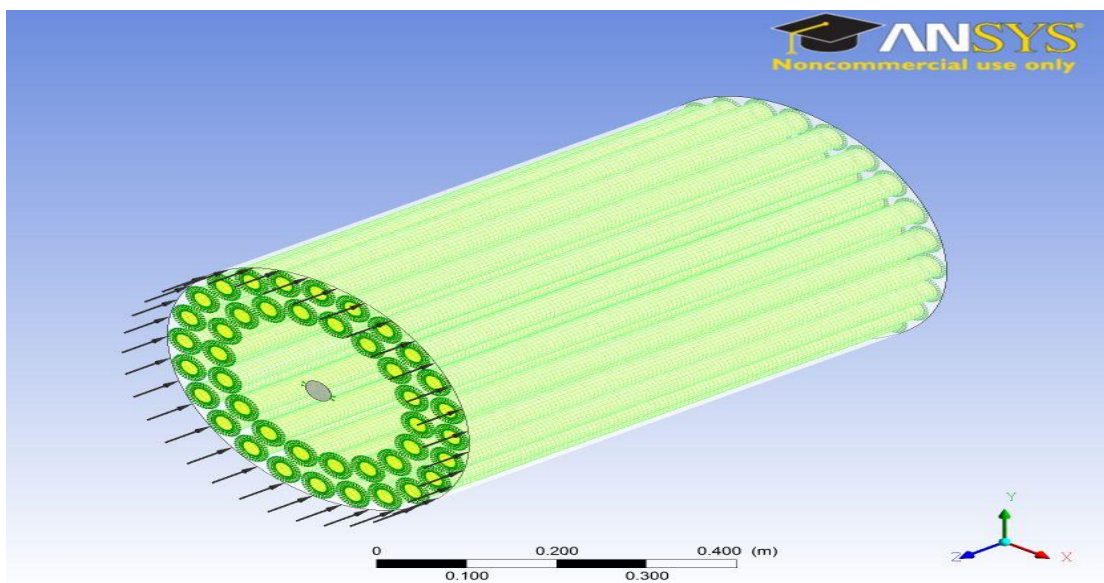


### 5.4.3 Παραμετρική Μελέτη της Θέσης και του αριθμού των σωλήνων με PCM

Σ αυτή την παραμετρική μελέτη εξετάστηκε η επιρροή που έχει ο αριθμός και η θέση των σωλήνων με PCM, που τοποθετούνται μέσα στη δεξαμενή, στη θερμική απόδοση του συστήματος. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση των συστημάτων με 57 σωλήνες, με **28 σωλήνες** τοποθετημένους **κοντά στο κέντρο** της δεξαμενής (δηλαδή τις 2 ενδιάμεσες σειρές) και με **42 σωλήνες** τοποθετημένους σε διαφορετική θέση μακριά από τον άξονα συμμετρίας-κέντρο της δεξαμενής (κρατώντας τις 2 εξωτερικές σειρές). Η αποφόρτιση των συστημάτων έγινε με θερμοστάτη στους 45°C.

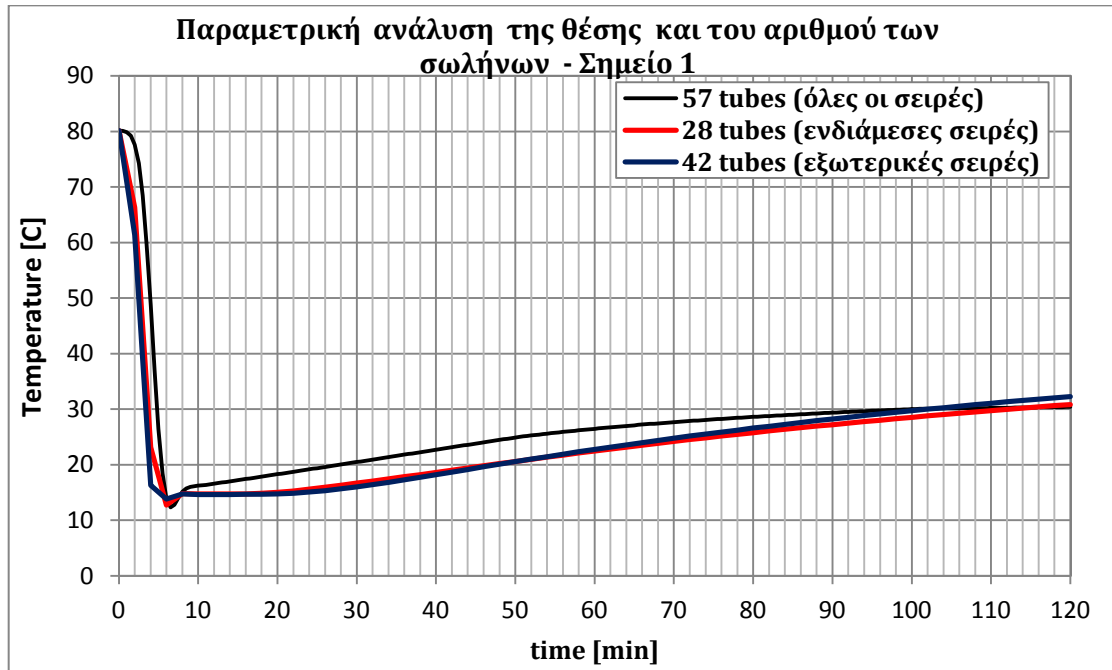


Εικόνα 5.46 : Γεωμετρία του κυλινδρικού αγωγού όταν περιείχε 28 σωλήνες με PCM

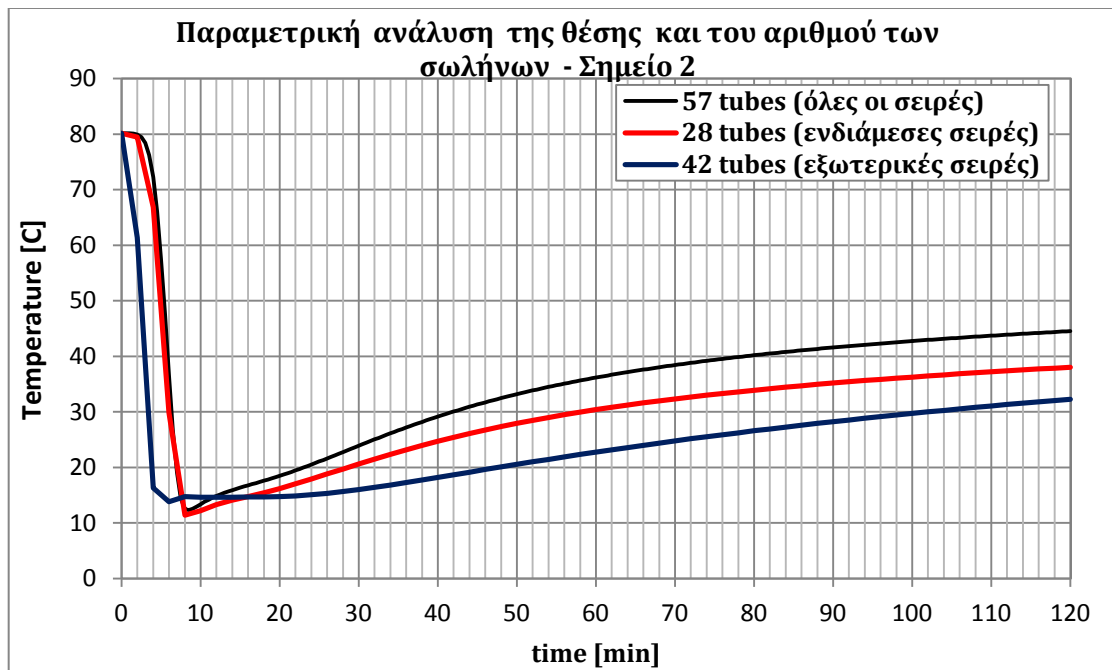


Εικόνα 5.47 : Γεωμετρία του κυλινδρικού αγωγού όταν περιείχε 42 σωλήνες με PCM

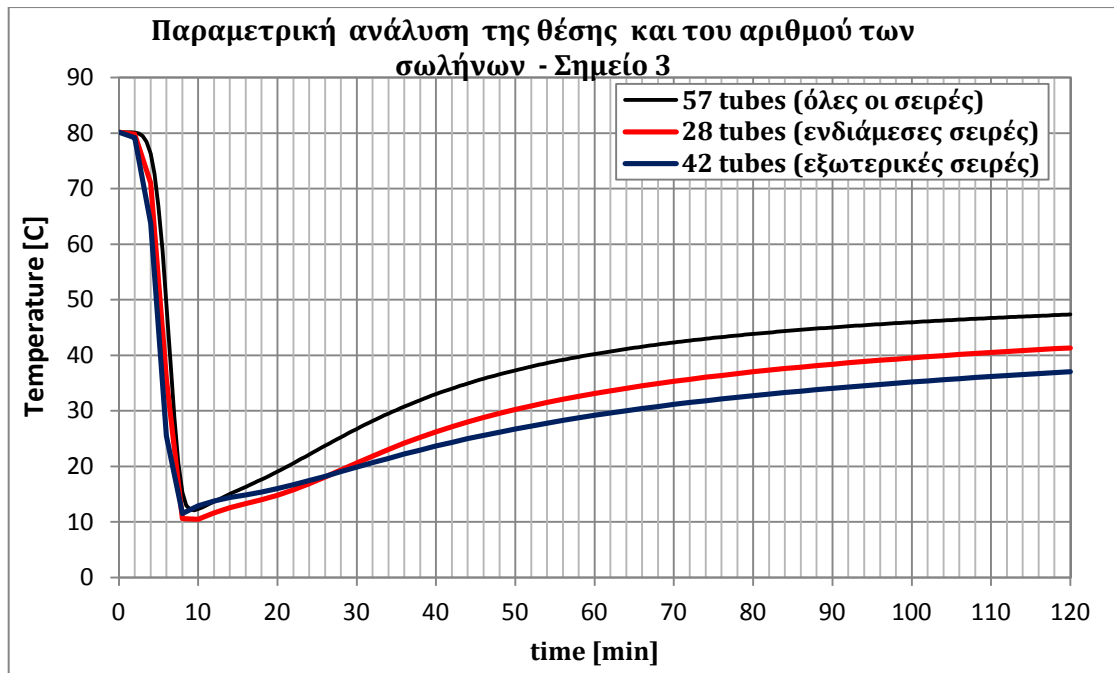
Στα διαγράμματα παριστάνεται για 7 σημεία της κατακόρυφης διεύθυνσης του πεδίου ροής (ευθεία εισόδου-εξόδου) η χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας του συστήματος για όλες τις περιπτώσεις αριθμού και θέσης των σωλήνων με PCM μέσα στη δεξαμενή. Ακολουθούν τα αντίστοιχα με τη χωρική κατανομή της θερμοκρασίας.



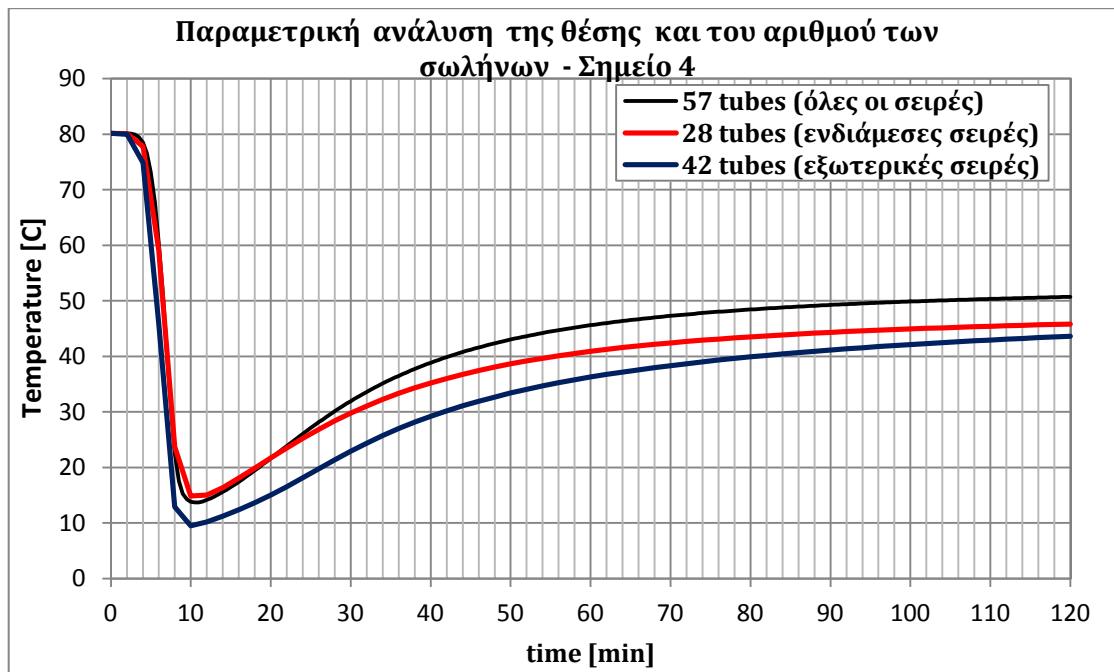
Σχήμα 5.16 : Αποφόρτιση του αγωγού για 3 διαφορετικούς αριθμούς σωλήνων με PCM τοποθετημένοι και σε διαφορετικές θέσεις με – Σημείο 1



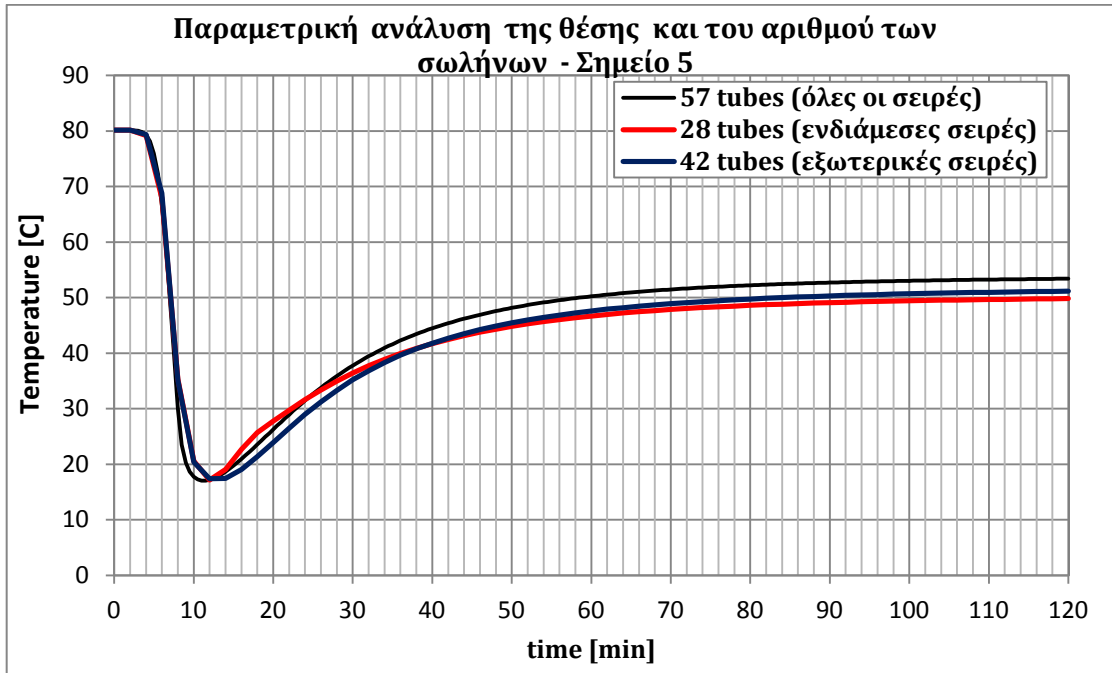
Σχήμα 5.17 : Αποφόρτιση του αγωγού για 3 διαφορετικούς αριθμούς σωλήνων με PCM τοποθετημένοι και σε διαφορετικές θέσεις με – Σημείο 2



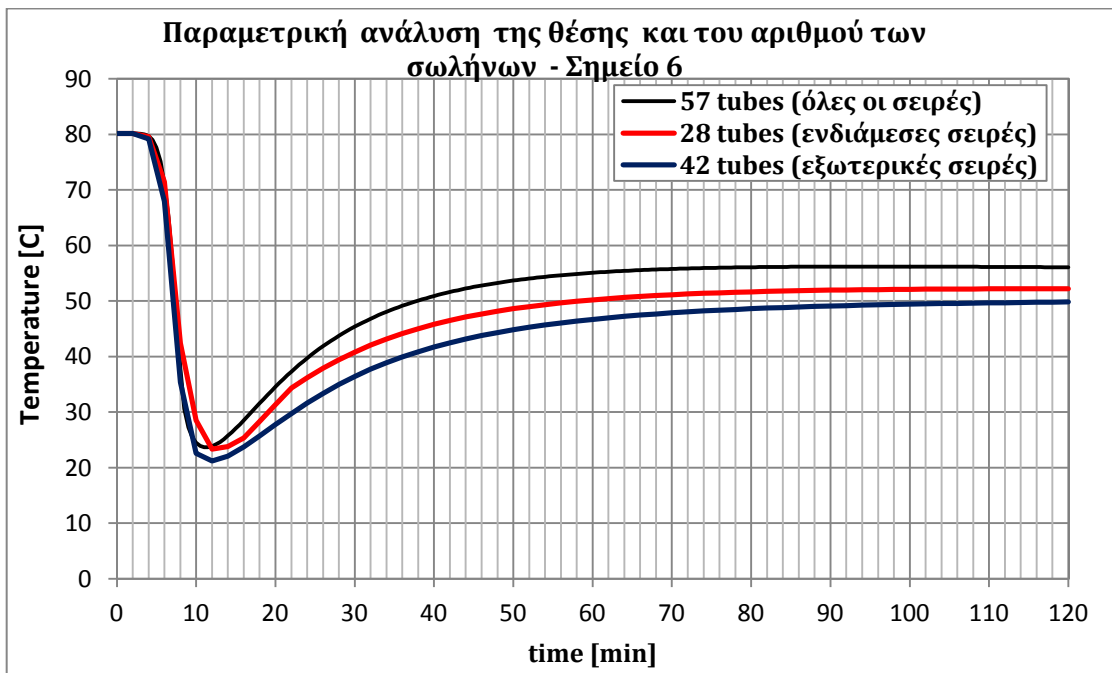
Σχήμα 5.18 : Αποφόρτιση του αγωγού για 3 διαφορετικούς αριθμούς σωλήνων με PCM τοποθετημένοι και σε διαφορετικές θέσεις με – Σημείο 3



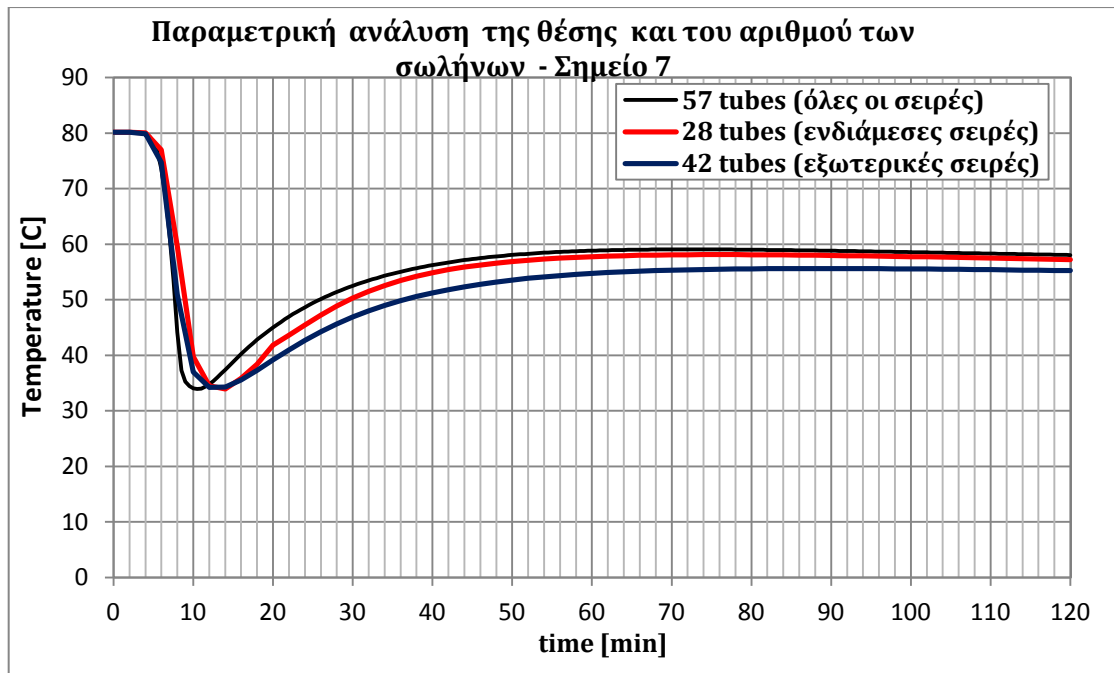
Σχήμα 5.19 : Αποφόρτιση του αγωγού για 3 διαφορετικούς αριθμούς σωλήνων με PCM τοποθετημένοι και σε διαφορετικές θέσεις με – Σημείο 4



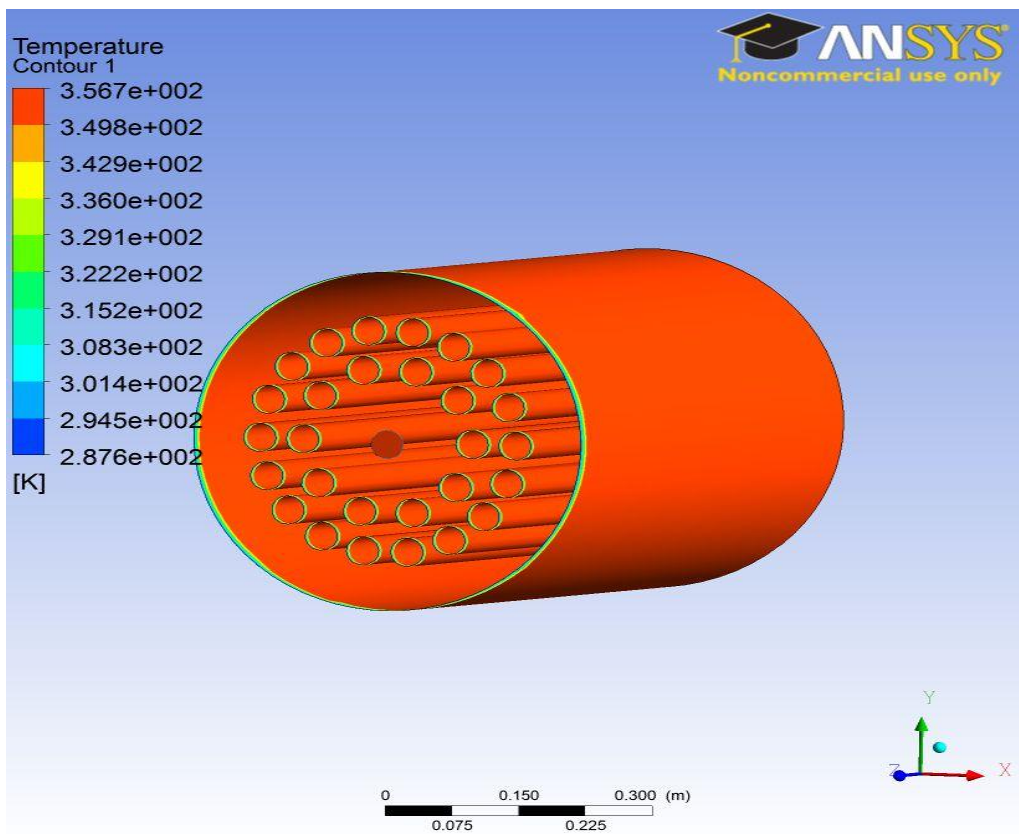
Σχήμα 5.20 : Αποφόρτιση του αγωγού για 3 διαφορετικούς αριθμούς σωλήνων με PCM τοποθετημένοι και σε διαφορετικές θέσεις με – Σημείο 5



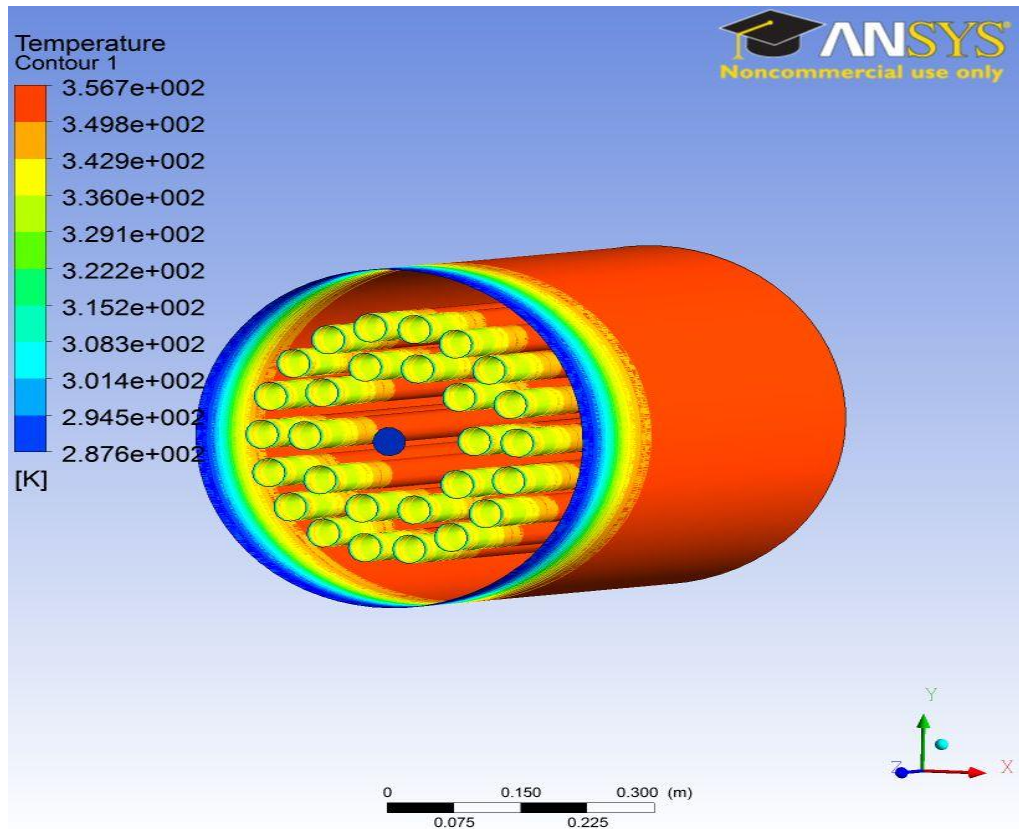
Σχήμα 5.21 : Αποφόρτιση του αγωγού για 3 διαφορετικούς αριθμούς σωλήνων με PCM τοποθετημένοι και σε διαφορετικές θέσεις με – Σημείο 6



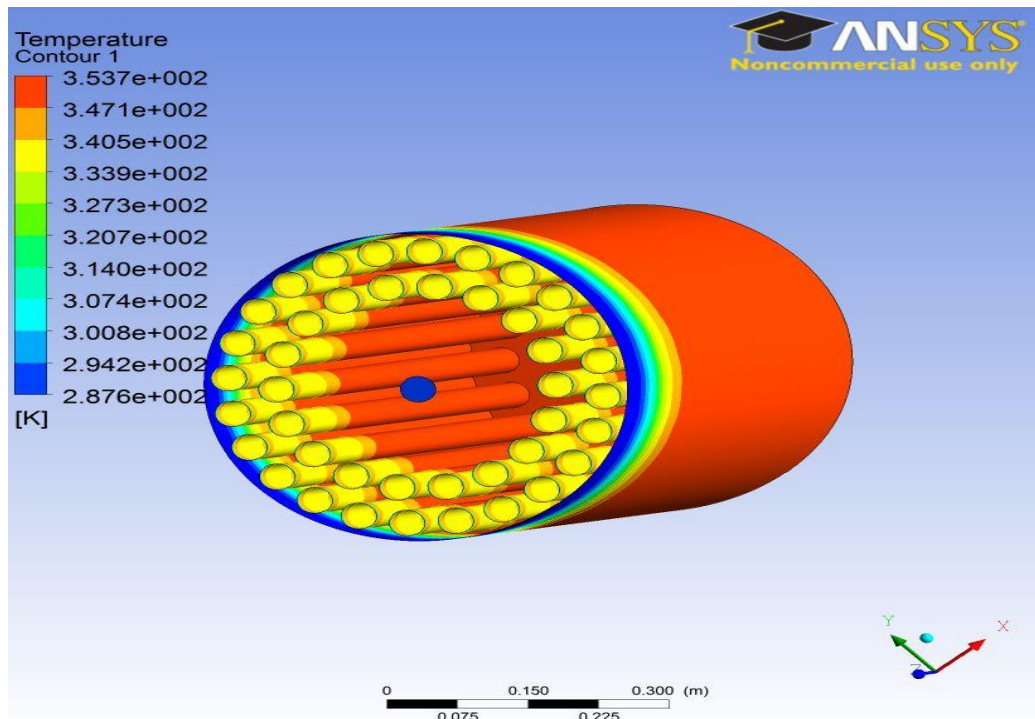
Σχήμα 5.22 : Αποφόρτιση του αγωγού για 3 διαφορετικούς αριθμούς σωλήνων με PCM τοποθετημένοι και σε διαφορετικές θέσεις με – Σημείο 7



Εικόνα 5.48 : Αρχική θερμοκρασία όλων των συστημάτων (ενδεικτικά για το σύστημα με 28tubes)

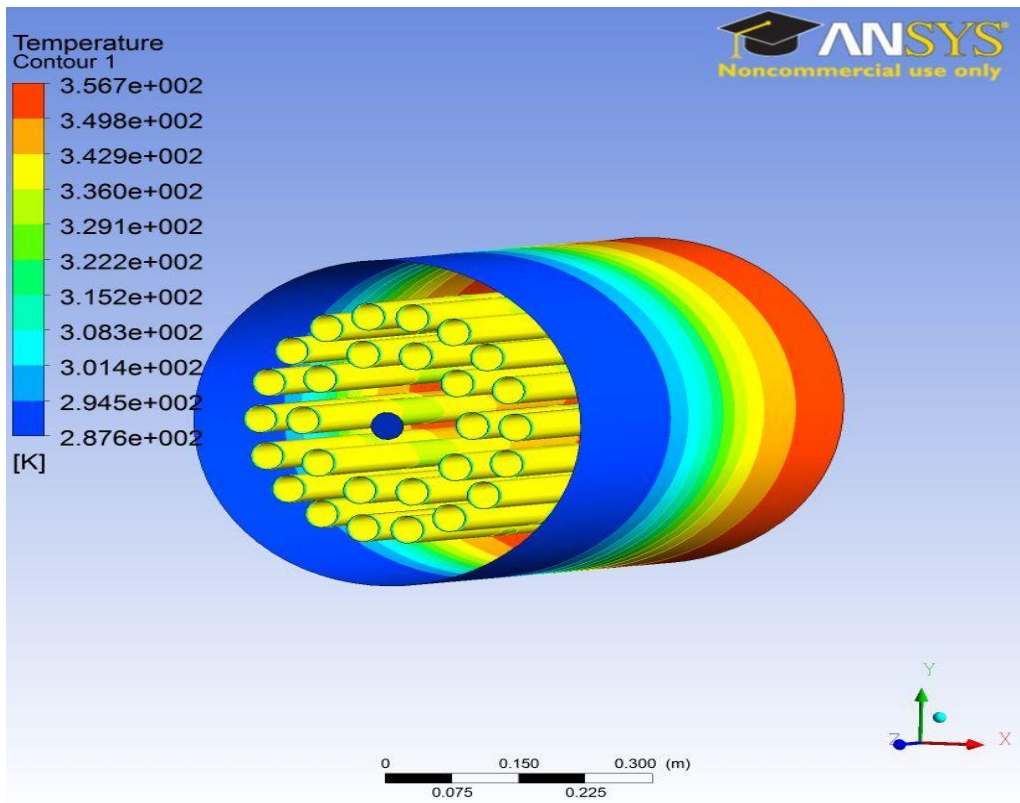


Εικόνα 5.49 : θερμοκρασία νερού και σωλήνων με PCM για το σύστημα με 28 tubes την  $t = 2 \text{ min}$

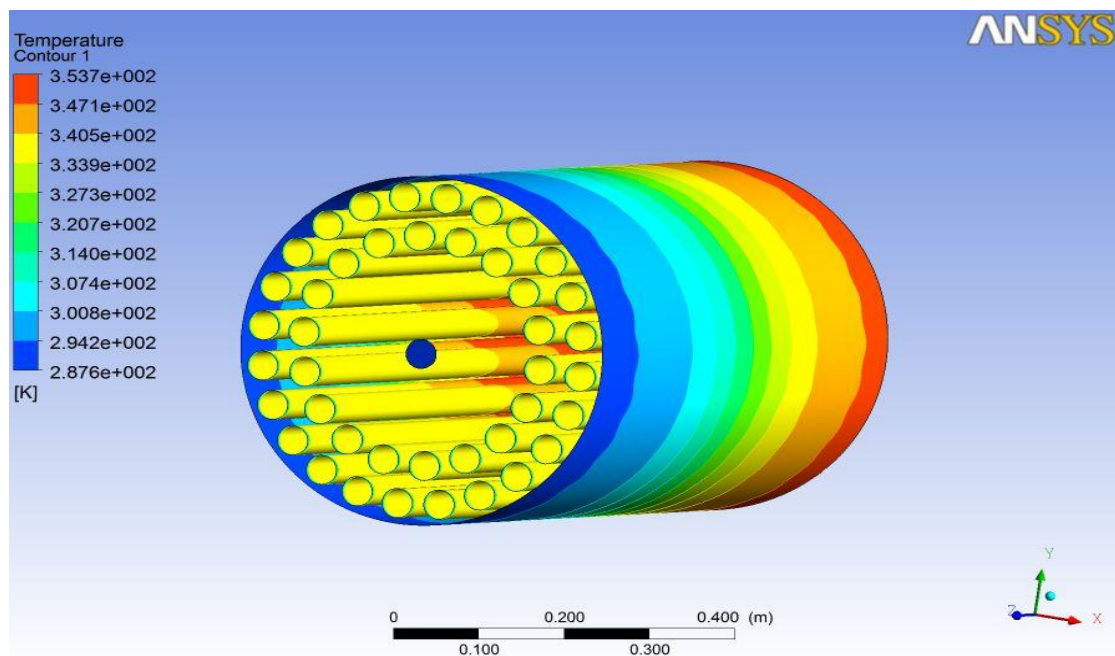


Εικόνα 5.50 : θερμοκρασία νερού και σωλήνων με PCM για το σύστημα με 42 tubes την  $t = 2 \text{ min}$

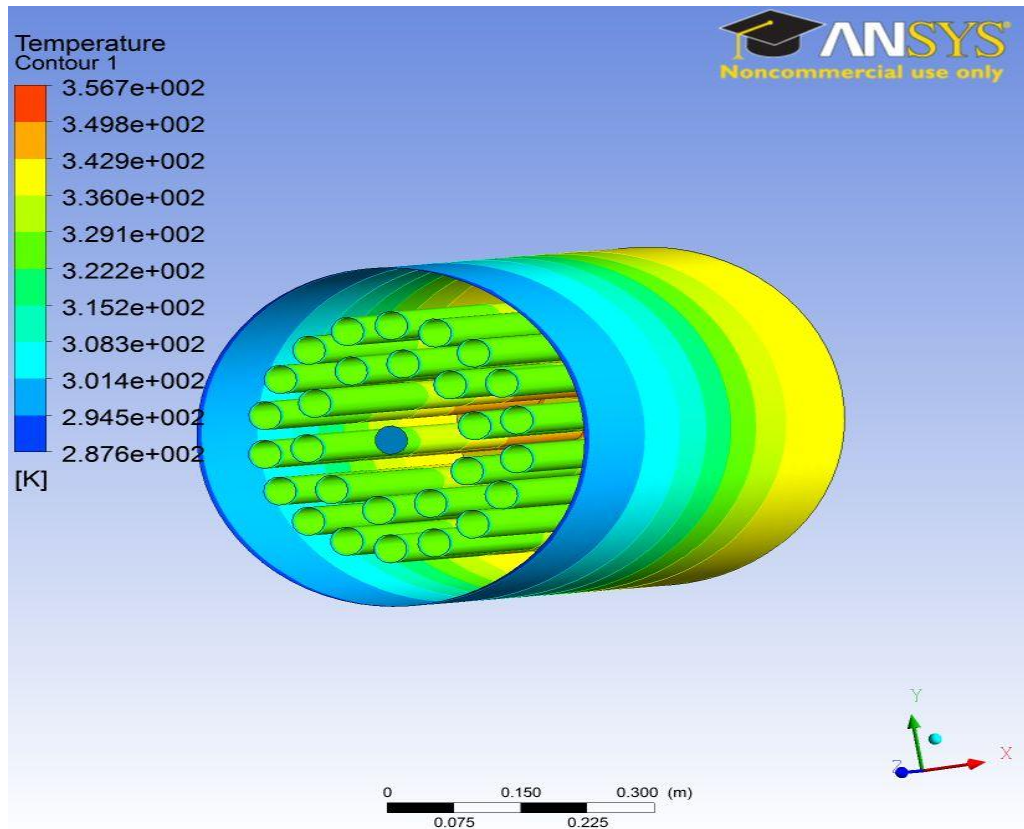




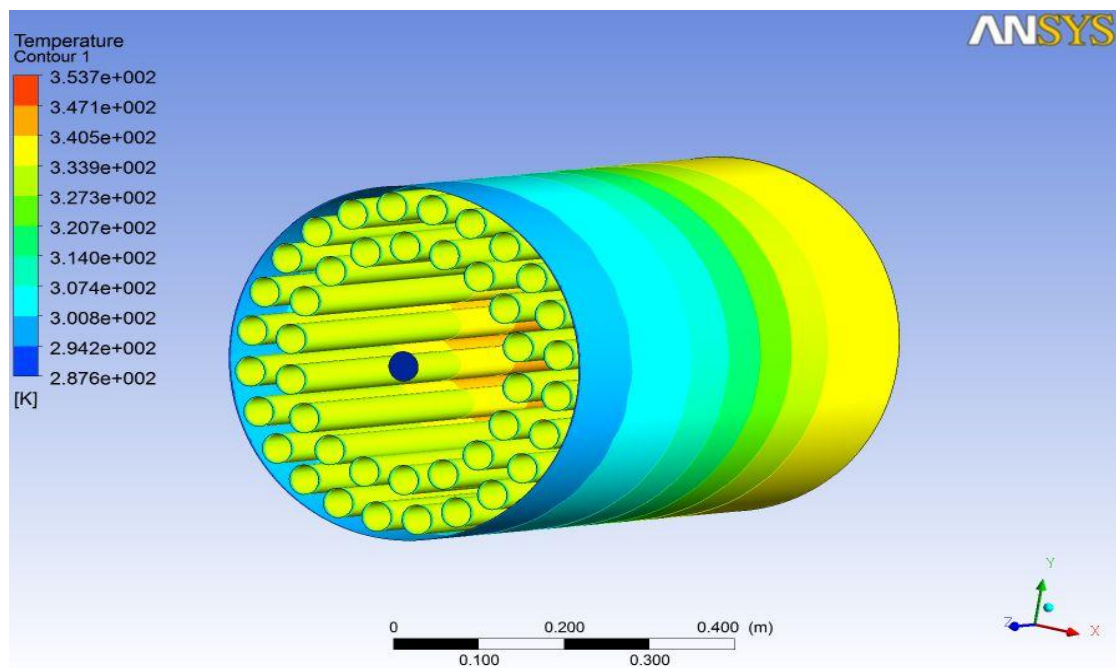
Εικόνα 5.51 : θερμοκρασία νερού και σωλήνων με PCM για το σύστημα με 28 tubes την  $t = 12 \text{ min}$



Εικόνα 5.52 : θερμοκρασία νερού και σωλήνων με PCM για το σύστημα με 42 tubes την  $t = 12 \text{ min}$

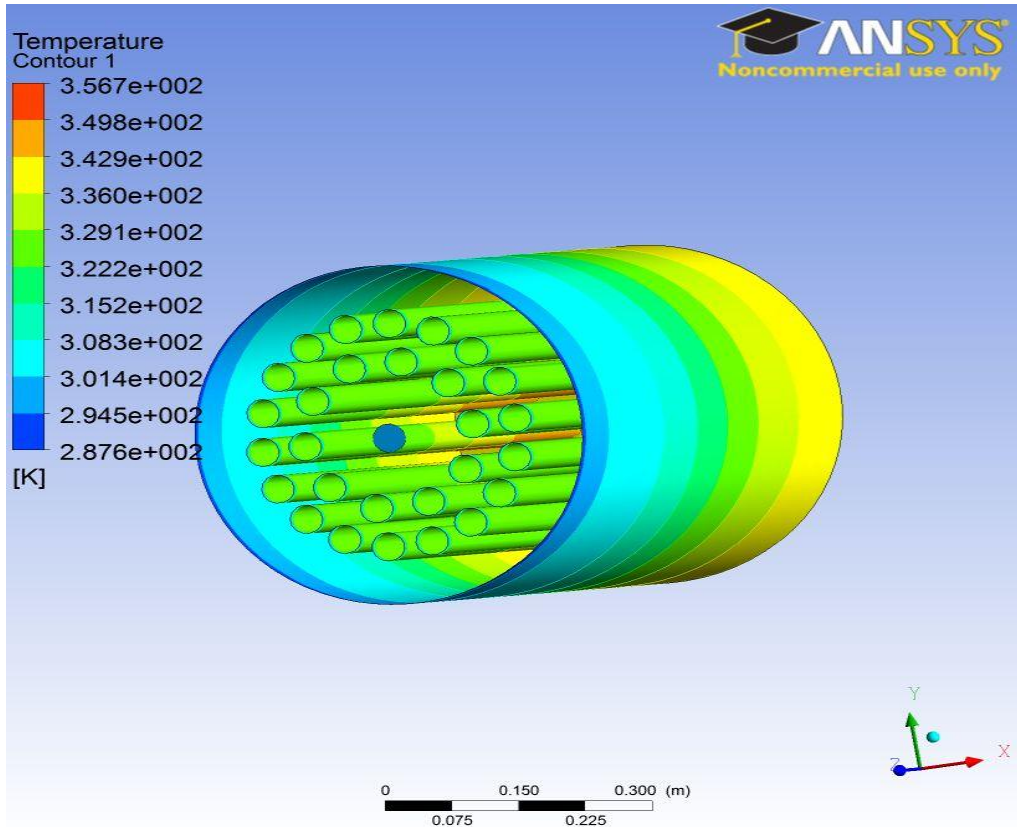


Εικόνα 5.53 : θερμοκρασία νερού και σωλήνων με PCM για το σύστημα με 28 tubes την  $t = 70 \text{ min}$

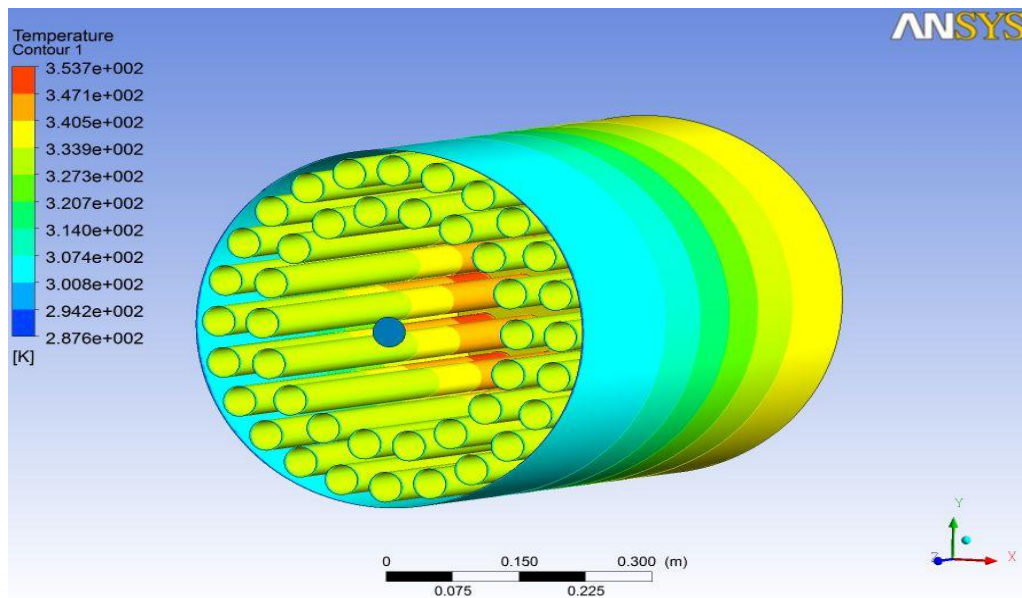


Εικόνα 5.54 : θερμοκρασία νερού και σωλήνων με PCM για το σύστημα με 42 tubes την  $t = 70 \text{ min}$

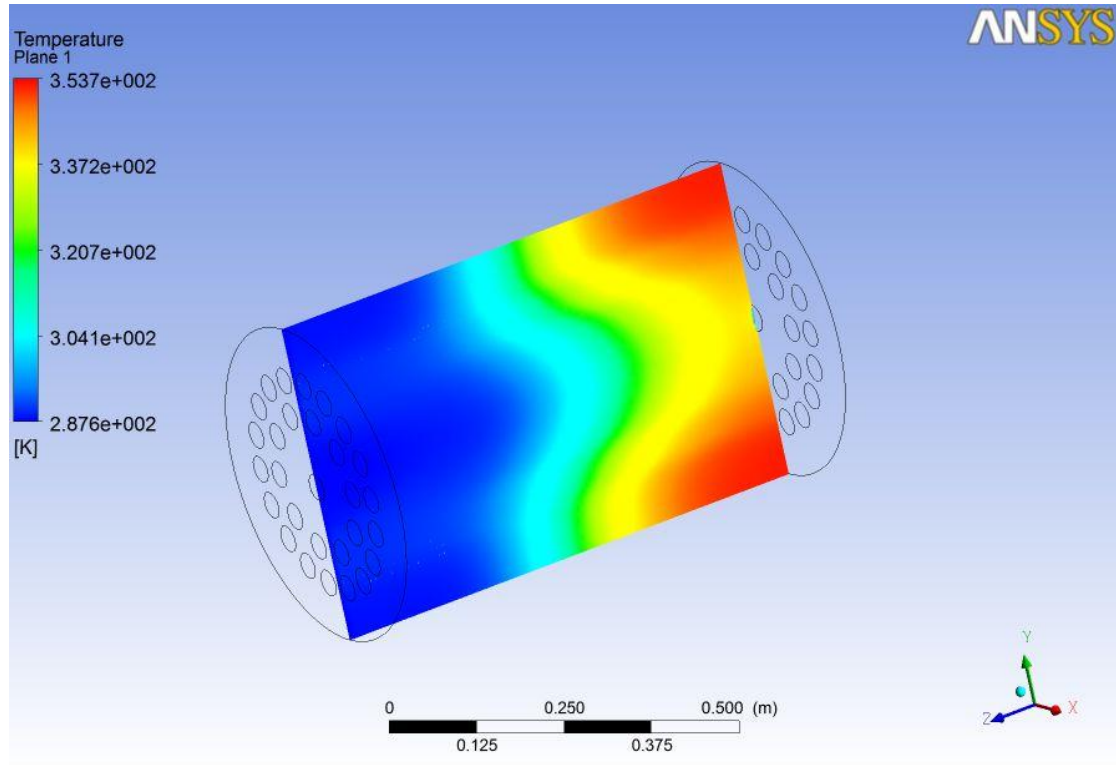




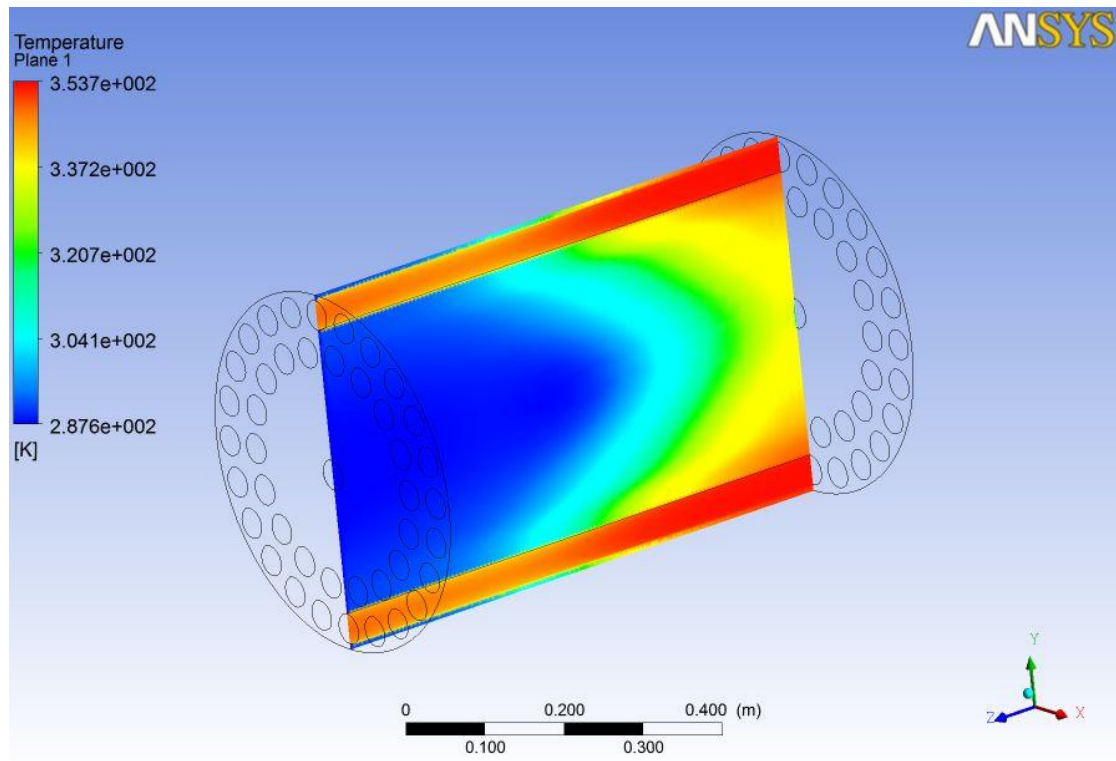
Εικόνα 5.55 : θερμοκρασία νερού και σωλήνων με PCM για το σύστημα με 28 tubes την  $t = 120 \text{ min}$



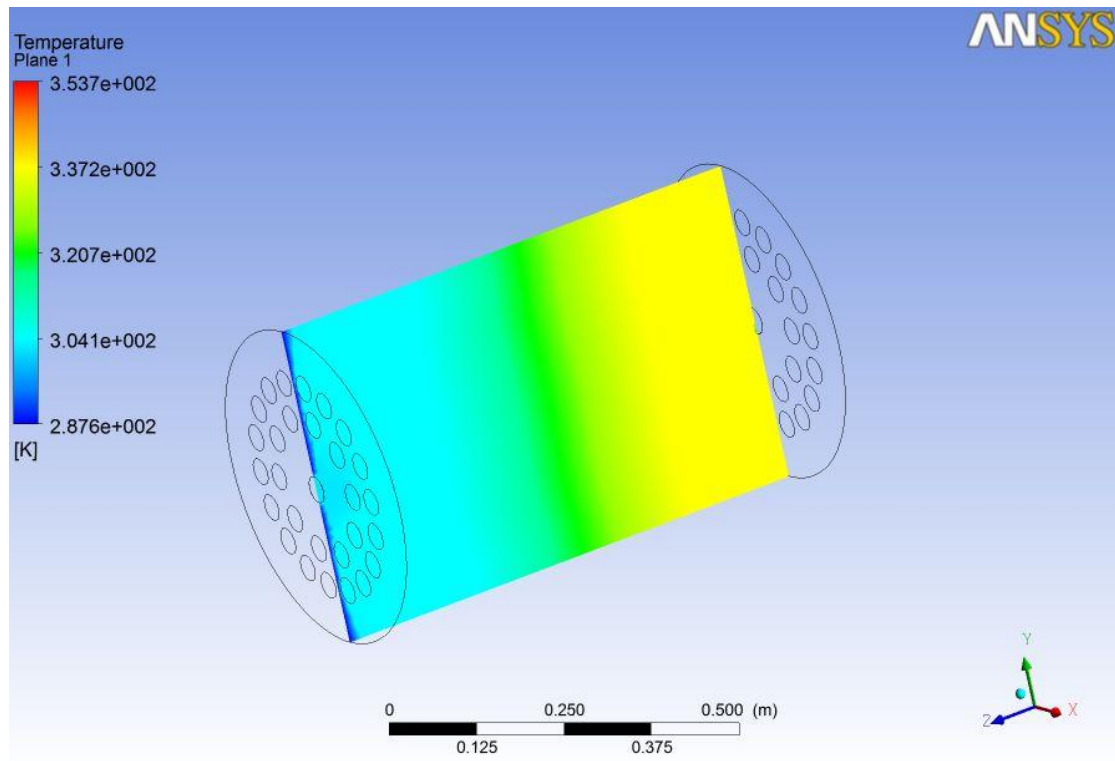
Εικόνα 5.56 : θερμοκρασία νερού και σωλήνων με PCM για το σύστημα με 42 tubes την  $t = 120 \text{ min}$



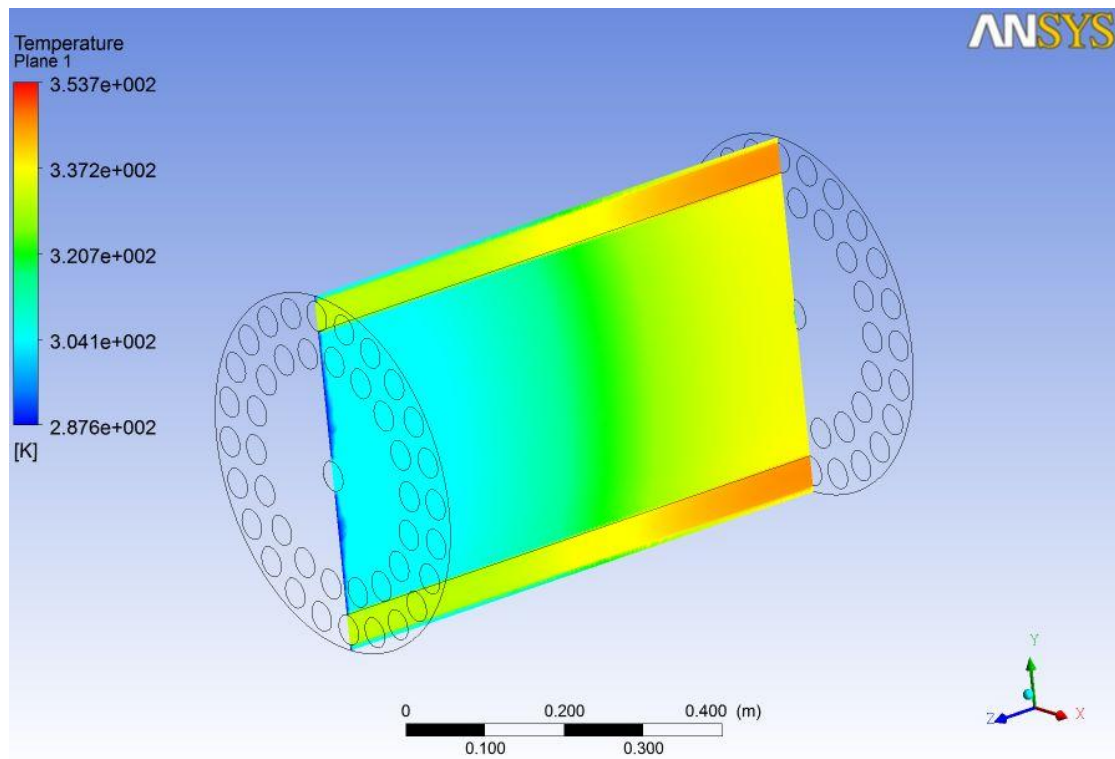
*Εικόνα 5.57 : Κατακόρυφο επίπεδο κατανομής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κυλινδρικού αγωγού για το σύστημα με 28 tubes την  $t = 12 \text{ min}$*



*Εικόνα 5.58 : Κατακόρυφο επίπεδο κατανομής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κυλινδρικού αγωγού για το σύστημα με 42 tubes την  $t = 12 \text{ min}$*



*Εικόνα 5.59 : Κατακόρυφο επίπεδο κατανομής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κυλινδρικού αγωγού για το σύστημα με 28 tubes την  $t = 120 \text{ min}$*



*Εικόνα 5.60 : Κατακόρυφο επίπεδο κατανομής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κυλινδρικού αγωγού για το σύστημα με 42 tubes την  $t = 120 \text{ min}$*

Η αριθμητική παραμετρική ανάλυση καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η κατανομή του PCM μέσα στη δεξαμενή για βέλτιστη θερμική απόδοση καθορίζεται και από τη θέση αλλά και από τον αριθμό των σωλήνων .

Ένα σύστημα με λιγότερους σωλήνες PCM ίδιας διαμέτρου μπορεί να δώσει ζεστό νερό για μικρότερο χρονικό διάστημα από αυτό που περιέχει το μέγιστο δυνατό αριθμό για τον συγκεκριμένο όγκο ελέγχου. Όταν συμπεριλαμβάνεται PCM στη δεξαμενή , το νερό θερμαίνεται από το PCM και η δεξαμενή λόγω του κύκλου φορτίσεων-αποφορτίσεων-επαναφορτίσεων μπορεί να παρέχει ζεστό νερό για παραπάνω χρόνο. Επομένως, συστήματα με **μεγαλύτερο αριθμό σωλήνων** μπορούν να παρέχουν **ζεστό νερό για περισσότερο χρόνο**.

Σε αυτά τα συστήματα μέρος της θερμότητας που αποθηκεύεται από τα PCM απελευθερώνεται στο νερό κατά τη διάρκεια αποφόρτισης λόγω υψηλής περιοχής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ PVC σωλήνων και νερού. Στο σύστημα με μεγαλύτερο αριθμό σωλήνων το PCM μεταφέρει τη θερμότητα του πιο γρήγορα στο νερό και αυξάνει τη θερμοκρασία του ταχύτερα και περισσότερο. Οι **θερμοκρασίες** του νερού στον αγωγό που περιέχει 57 σωλήνες με PCM είναι από 1°C έως και 10°C **υψηλότερες** ανάλογα με τη χρονική στιγμή, το σύστημα με το οποίο γίνεται σύγκριση και το τμήμα του αγωγού το οποίο παρατηρείται.

Όμως σε συστήματα με μικρότερο αριθμό σωλήνων ίδιας διαμέτρου από το δυνατό παρατηρείται ότι και η **θέση** των σωλήνων επηρεάζει σε κάποιο βαθμό τη μεταφορά θερμότητας. Όταν οι σωλήνες με το PCM βρίσκονται πιο μακριά από το κέντρο της δεξαμενής (περίπτωση 42 εξωτερικών tubes) ενώ, η ποσότητα του PCM είναι περισσότερη εντός της δεξαμενής υπάρχει μια μικρή καθυστέρηση στο να μεταφερθεί η θερμότητα στο νερό που βρίσκεται στο κέντρο κατά μήκος της κατακόρυφης διεύθυνσης του άξονα συμμετρίας.

Για τη χωρική κατανομή της θερμοκρασίας παρατηρείται από τα διαγράμματα της παραμετρικής ανάλυσης και από τα planes της θερμοκρασίας στην κατακόρυφη διεύθυνση πως το σύστημα με τους 28 σωλήνες παρουσιάζει μια ελαφρά μεγαλύτερη περιοχή χαμηλής θερμοκρασίας στα σημεία κοντά στην είσοδο δηλαδή στην κάτω κυκλική βάση του κυλινδρικού αγωγού κατά το τέλος της διαδικασίας, ενώ γενικά παρουσιάζει υψηλότερες θερμοκρασίες από το κέντρο του αγωγού ως την έξοδο σε όλη τη χρονική διάρκεια του φαινομένου .

Όσον αφορά τη χρονική κατανομή της θερμοκρασίας, όπως προαναφέρθηκε, το σύστημα με τους 28 σωλήνες παρέχει, όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, υψηλότερες θερμοκρασίες από αυτό με τους 42 σωλήνες τοποθετημένους κοντά στην παράπλευρη επιφάνεια. Συγκεκριμένα το σύστημα των 42 σωλήνων κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης παρουσιάζει τιμές θερμοκρασίας έως και 5.5°C κάτω από αυτές για το σύστημα των 28 σωλήνων. Το πεδίο ροής του συγκεκριμένου συστήματος βρίσκεται πιο κοντά στα tubes με το PCM επομένως συντελείται εντονότερα το φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας από το θερμό tube στο νερό γιατί η θερμότητα μεταφέρεται με μηχανισμό φυσικής συναγωγής και έχει να διανύσει μικρότερες αποστάσεις.

Στο τέλος της διαδικασίας, μετά την επαναφόρτιση από το PCM, τα tubes του συστήματος αυτού έχουν μικρότερη θερμοκρασία γιατί την έχουν δώσει στο νερό για να το θερμάνουν, γεγονός που επιβεβαιώνεται από τα contours για  $t = 120 \text{ min}$ .

Τα συστήματα παρουσιάζουν παρόμοιους χρόνους αποφόρτισης και μικρές διαφορές στις θερμοκρασίες αποφόρτισης.

### 5.5 Γενικά Συμπεράσματα

Η υπολογιστική προσομοίωση δοχείου αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, αφορά έναν κυλινδρικό αγωγό θερμού νερού με ΥΑΦ ο οποίος μοντελοποιήθηκε στο **ANSYS CFX**. Για το μοντέλο, που δημιουργήθηκε και χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει την **αποθήκευση και τη μεταφορά θερμότητας από τα PCM στο νερό**, συνάγονται τα εξής :

- Το υπολογιστικό μοντέλο πιστοποιήθηκε ότι παρουσιάζει **ικανοποιητική συμφωνία** με τα πειραματικά αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης αποφόρτισης του συστήματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας με θερμοστάτη στους 45 °C τόσο στις θερμοκρασίες του νερού που παρατηρούνται όσο και στο χρόνο αποφόρτισης, και **περιγράφει αποτελεσματικά** την επίδραση του PCM στη διαμόρφωση του θερμικού πεδίου εντός του κυλινδρικού αγωγού. Η προσέγγιση που πραγματοποιήθηκε μέσω του κώδικα CFX είναι, τηρουμένων των αναλογιών και των πρακτικών δυσκολιών του προβλήματος, αρκετά καλή για τη θερμοκρασιακή λειτουργία της δεξαμενής θέρμανσης νερού.

- Ο **χρόνος αποφόρτισης** του συστήματος υπολογίστηκε ότι είναι **11min**. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες του νερού μέσα στον αγωγό μετά την αποφόρτιση και την εκ νέου φόρτιση καταγράφονται σε σημεία κοντά στην έξοδο όπου βρίσκονται μεταξύ 34°C και 59°C και οι χαμηλότερες στην είσοδο όπου από 14.5°C φθάνουν μέχρι τους 30°C . Το εύρος θερμοκρασιακών διαφορών εντός του αγωγού είναι της τάξης των 20°C με 30°C.
- Η **προσθήκη PCM** στο σύστημα αποθήκευσης αυξάνει τις δυνατότητες αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και **βελτιώνει τη θερμική απόδοση** του συστήματος. Από τη θερμική ανάλυση προκύπτει ότι, η επίδραση του PCM και η μεταφορά της θερμότητας στο νερό επιφέρει στον κυλινδρικό αγωγό **χρονική καθυστέρηση 6 λεπτών στην αποφόρτιση** σε σχέση με τα άλλα συστήματα και άνοδο της θερμοκρασίας του νερού με διαφορά έως και 8°C. Επομένως, η χρήση PCM στον αγωγό θέρμανσης νερού οικιακής χρήσης αποδεικνύεται συμφέρουσα.
- Για τη θερμοκρασία του νερού εντός του κυλινδρικού αγωγού παρατηρούνται **θερμοκρασίες αρκετά υψηλότερες** στην περίπτωση που το μέσο αποθήκευσης είναι PCM. Συγκεκριμένα, τα πρώτα 6 min , η θερμοκρασία του νερού όταν περιλαμβάνεται PCM στο σύστημα , διατηρείται σταθερή στους 79-80°C ενώ στις άλλες περιπτώσεις των 2 συστημάτων χωρίς PCM έχει μειωθεί στους 40°C σε χρονικό διάστημα 2 min και 4 min αντίστοιχα. Στη συνέχεια, από τη χρονική στιγμή  $t= 10$  min μέχρι το τέλος της διαδικασίας οι θερμοκρασίες του νερού στο σύστημα με PCM βρίσκονται καθ όλη τη διάρκεια σε υψηλότερα επίπεδα της τάξης των 3-8 °C. Αναλυτικότερα, την  $t=10$  min η θερμοκρασία του νερού στο σύστημα με PCM βρίσκεται λίγο πάνω από τους 40°C, στο σύστημα με υλικό αποθήκευσης σταθερής θερμοχωρητικότητας στους 34°C και στο σύστημα που περιέχει μόνο νερό (χωρίς σωλήνες) μέσα στον κυλινδρικό αγωγό στους 32°C , ενώ την  $t=150$  min οι θερμοκρασίες είναι αντίστοιχα 18°C στο σύστημα με PCM και γύρω στους 15°C στα άλλα συστήματα.
- Η θερμοκρασία των σωλήνων που περιέχουν PCM δεν κατέβηκε σε καμία περίπτωση από αυτές που μελετήθηκαν κάτω από τους 40 °C . Αυτό υποδηλώνει ότι τα PCM αποθηκεύουν θερμότητα η οποία ακόμα και σε κατάσταση αποφόρτισης δεν χάνεται πλήρως.

- Οι θερμοκρασίες στην έξοδο του κυλινδρικού αγωγού είναι (ακόμα και για μεγάλη παροχή) τουλάχιστον 10°C πιο υψηλές από της εισόδου όταν γίνεται χρήση PCM.
- Η συμπεριφορά του συστήματος με το PCM αλλάζοντας παράμετρο όπως η παροχή είναι σαφώς διαφορετική. Η **αύξηση της παροχής** εισάγει στον κυλινδρικό αγωγό περισσότερη ποσότητα κρύου νερού θερμοκρασίας 14.5°C δημιουργώντας μεγαλύτερη ανανέωση του όγκου του νερού. Αυτό προκαλεί πιο άμεση πτώση της θερμοκρασίας του νερού και πιο γρήγορη αποφόρτιση του συστήματος. Έτσι, όταν η παροχή είναι μεγαλύτερη, η **θερμότητα** που αποδίδεται στο σύστημα από το PCM **καταναλώνεται πιο γρήγορα** και η χρονική διάρκεια υψηλών τιμών της θερμοκρασίας μειώνεται. Η χρονική καθυστέρηση στη μείωση της θερμοκρασίας λόγω θερμότητας από το PCM παρατηρείται από το διάγραμμα του σημείου της εξόδου ότι είναι γύρω στα 9 min για σταθερή παροχή 0.05 kg/sec, 7 min για παροχή 0.10 kg/sec και 6 min για 0.125kg/sec. Η τελική τιμή της θερμοκρασίας σε κάθε περίπτωση είναι 14.5°C στην είσοδο μέχρι 32°C στην έξοδο για παροχή 0.05 kg/sec, 14.5°C στην είσοδο μέχρι 29°C στην έξοδο για παροχή 0.10 kg/sec και 14.5°C στην είσοδο μέχρι 26°C στην έξοδο για παροχή 0.125 kg/sec. Η θερμοκρασιακή διαφορά κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης είναι της τάξης των 2-5°C για τις παροχές 0.05 kg/sec και 0.10 kg/sec, και των 1-3.5°C για τις παροχές 0.10 kg/sec και 0.125 kg/sec.
- Η παραμετρική μελέτη της εισόδου (της διατομής) δείχνει ότι η μεγαλύτερη είσοδος κατανέμει με καλύτερο τρόπο το νερό στον κυλινδρικό αγωγό και βοηθά αποτελεσματικά στη μετάδοση της θερμότητας των PCM στο νερό συμμετρικά σε όλο τον όγκο ελέγχου. Η χρονική διάρκεια διατήρησης σταθερής της θερμοκρασίας, ο χρόνος αποφόρτισης και οι θερμοκρασίες που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας είναι όλα σε υψηλότερα επίπεδα. Συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας ως είσοδο του νερού όλη την κυκλική επιφάνεια του κυλινδρικού αγωγού (διαμέτρου 0.474m) το PCM διατηρεί το σύστημα στη θερμοκρασία των 80°C για 6 min ενώ με είσοδο διαμέτρου μόλις 0.04 m αυτό συμβαίνει για 2 min. Ο μέσος υπολογιστικά προβλεπόμενος χρόνος αποφόρτισης ήταν μόλις 4 min για τη μικρή είσοδο. Οι θερμοκρασιακές διαφορές ζεστού νερού χρήσης είναι της τάξης των 5-10 °C.



- Η απόδοση του PCM εξαρτάται από την ποσότητα του PCM που μπορεί να ενσωματωθεί μέσα στη δεξαμενή **αλλά και από τη θέση** την οποία κατέχουν οι σωλήνες που περιέχουν το PCM μέσα σε αυτή. Η εισαγωγή πολλών σωλήνων συμμετρικά κατανεμημένων σε όλο τον όγκο του δοχείου και σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους αυξάνει τις θερμοκρασίες του νερού. Η περίπτωση αυτή περιγράφεται από το σύστημα της δεξαμενής με την εισαγωγή σε αυτό των 57 σωλήνων. Οι θερμοκρασίες του νερού στον αγωγό που περιέχει 57 σωλήνες με PCM είναι από 1°C έως και 5.5 °C υψηλότερες ανάλογα με τη χρονική στιγμή και το τμήμα του αγωγού το σε σχέση με συστήματα με μικρότερο αριθμό σωλήνων. Σε περίπτωση μείωσης των σωλήνων για μείωση του κόστους κατασκευής, πρέπει να εξετάζεται λεπτομερώς το πώς αυτοί θα κατανεμηθούν μέσα στο χώρο για να δώσουν τη μέγιστη δυνατή απόδοση. Σύστημα με 28 σωλήνες τοποθετημένους στο κέντρο του κυλινδρικού αγωγού κοντά στον άξονα συμμετρίας παρατηρήθηκε ότι δίνει λίγο υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας 0 - 4 °C σε σύγκριση με σύστημα 42 σωλήνων οι οποίοι έχουν τοποθετηθεί μακριά από τον άξονα συμμετρίας , κοντά στην παράπλευρη επιφάνεια του κυλινδρικού αγωγού.
- Οι αριθμητικές προσεγγίσεις σε επίπεδο αποθήκευσης θερμότητας στην αλλαγή φάσης του PCM απαιτούν βελτιώσεις . Η μέθοδος της ενεργού θερμοχωρητικότητας αποτελεί μια μέθοδο προσομοίωσης η οποία δε μπορεί να περιγράψει με μεγάλη ακρίβεια το φαινόμενο της αλλαγής φάσης παρά μόνο δίνει τιμές της θερμοχωρητικότητας για συγκεκριμένες της θερμοκρασίας. Ανάλογα με το εύρος λειτουργίας του συστήματος , η συμπεριφορά του PCM ενδέχεται να διαφέρει και η θερμοκρασία αλλαγής φάσης το ίδιο.
- Μια πρόταση για μελλοντική μελέτη θα μπορούσε να είναι η κατασκευή ενός διφασικού κώδικα ο οποίος θα χρησιμοποιεί ένα μοντέλο αλλαγής φάσης για τη μεταβολή στερεού-υγρού μέσα σε κάθε σωλήνα μέσω υπολογισμού της ενθαλπίας αλλαγής φάσης για κάθε νέο φαινόμενο αλλαγής φάσης και σε κάθε σημείο εντός του σωλήνα. Το εύρος θερμοκρασιών αλλαγής φάσης είναι σημαντικό για τη μοντελοποίηση του PCM και αυτό που καθιστά το σύστημα λειτουργικό ή όχι. Έτσι στη συνέχεια, θα μπορούσε να γίνει μια τεχνικο-οικονομική μελέτη για το αν μπορεί να χρησιμοποιηθεί το συγκεκριμένο PCM.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Harald Mehling and Luisa F. Cabeza: *Phase Change Materials and their Basic Properties* , Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption, Springer Part V (2007)

A.de Gracia, E. Oró, M.M. Farid , L.F. Cabeza : *Thermal analysis of including phase change material in a domestic hot water cylinder* , Applied Thermal Engineering 31 (2011) p.3938-3945

H. Mehling, L. F. Cabeza, *Heat and Cold Storage with PCM*. Springer, XVI, 2008, 308 p

Luisa F. Cabeza, Manuel Ibanez, Cristian Sole, Joan Roca, Miquel Nogues: *Experimentation with a water tank including a PCM module* , (2005)

Atul Sharma , V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi : *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009), p. 318–345

R.Velraj, R.V.Seeniraj, B. Hafner, C. Faber, K. Schwarzer, *Heat Transfer Enhancement in a latent heat storage system*, Solar Energy 1999, Vol. 65, No 3, p.171-180

Daniel R. Rouse, Nizar Ben Salah, and Stéphane Lassue: *An Overview of Phase Change Materials and their Implication on Power Demand*.

Ghoneim.A.A. & Klein.S.A : *Phase Change Materials Analysis*, Solar Energy, Vol.47, No.3., 1991

Mohammed M. Farid, Amar M. Khudhair, Siddique Ali K. Razack, Said Al-Hallaj : *A review on phase change energy storage: materials and applications*, Energy Conversion and Management 45 (2004) 1597–1615

M Fatih Demirbas, *Thermal Energy Storage and Phase Change Materials: An Overview*, Energy Sources, Part B, 1:85–95, 2006

S.M. Hasnain. *Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part 1: Heat storage materials and techniques*, 1996.

István Péter Szabó Department of Technical and Process Engineering, Faculty of Engineering University of Szeged: *Design of an Experimental PCM Solar Tank*

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, 2008, vol. 12, issue 9, pages 2438-2458

Ibrahim Dincer, Marc Rosen, *Thermal Energy storage, systems and Applications*, John Wiley and sons, West Sussex, 2002

Pillai KK, Brinkwarth BJ. *The storage of low grade thermal energy using phase change materials*. Appl Energy (1976) Vol 2, p. 205-216.

Belen Zalba, Jose Marin, Luisa F. Cabeza, Harald Mehling. *Review on thermal energy storage with phase change: materials heat transfer analysis and applications*, Applied Thermal Engineering 23 (2003) p. 251–283

A. Abhat, *Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials*, Solar Energy 30, 1983, 313-332.

Amrit Om Nayak, M.Gowtham, R.Vinod, and G.Ramkumar, *Analysis of PCM Material in Thermal Energy Storage System* , International Journal of Environmental Science and Development, Vol. 2, No. 6, December 2011

A. Heinz, W. Streicher, Institute of Thermal Engineering, Graz University of Technology , *Application of phase change materials and pcm slurries for thermal energy storage*, (2007)

R.Meenakshi Reddy, N.Nallusamy, B.Anjaneya Prasad K. Hemachandra Reddy *Thermal Energy Storage System using Phase Change Materials – Constant Heat Source* , Thermal Science 2010, Issue 1, p.78

David MacPhee , A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Applied Science in Mechanical Engineering Faculty of Engineering and Applied Science , July 2008, University of Ontario Institute of Technology : *Performance Investigation of Various Cold Thermal Energy Storages*

A. Felix Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini , *An analysis of a packed bed latent heat thermal energy storage system using PCM capsules: Numerical investigation* , Renewable Energy 34 (2009) p. 1765–1773

J .M. Bailey - M. A. Sc. Thesis Department of Mechanical Engineering , (2010) - McMaster University : *Modeling Phase Change Material Thermal Storage Systems*

S. Mondal, *Phase change materials for smart textiles – An overview*, Applied Thermal Engineering 28 (2008) 1536–1550

Piia Lamberg , Reijo Lehtiniemi , Anna-Maria Henell, *Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage* , International Journal of Thermal Sciences 43 (2004) 277–287

S. Ievers, W. Lin, *Numerical simulation of three-dimensional flow dynamics in a hot water storage tank*, Applied Energy 86 (2009) p.2604-2614.

E. Hahne, Y. Chen, *Numerical study of flow and heat transfer characteristics in hot water stores*, Solar Energy 64 (1998) p.9-18

P.V. Padmanabhan, M.V.K. Murthy, *Outward phase change in a cylindrical annulus with axial fins on the inner tube*, International Journal of Heat and Mass Transfer 29 (1986) p 1855-1868.

M.M. Farid, K. Yongsik, H. Takuya, K. Atsushi, *The role of natural convection during melting and solidification of PCM in a vertical cylinder*, Chemical Engineering Communications 84 (1988) p.43-60.

Dariusz Heim, Department of Building Physics and Building Materials, Technical University of Lodz, *Two Solution Methods of Heat Transfer with Phase Change Within Whole Building Dynamic Simulation*, Ninth International IBPSA Conference (2005)

D. Zhou, C.Y. Zhao, Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, *Applied Energy* 92 (2012) p. 593–605

Cao Sunliang, *State of the art thermal energy storage solutions for high performance buildings*, Master's Thesis , University of Jyväskylä ,Department of Physics , Master's Degree Programme in Renewable Energy , 3.6.2010

Φωκιανού Π.(2011), Διπλωματική Εργασία : *Παραμετρική Μελέτη Συστήματος Ηλιακής Θέρμανσης Νερού Χρήσης με Υλικά Αλλαγής Φάσης (P.C.Ms)*. Τομέας Θερμότητας , Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π

Πατρικίου Ε.(2011), Διπλωματική Εργασία : *Χρήση Υλικών Αλλαγής Φάσης σε πάνελ οροφής για ηλιακή ψύξη χώρου στην περιοχή της Αθήνας*. Τομέας Θερμότητας , Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π

## Ηλεκτρονικές Πηγές

<http://www.pcmproducts.net>

<http://www.rubitherm.de/>

<http://www.bioclima.com.gr/>

<http://www.greenbuilding.gr>

<http://www.econ3.gr>

<http://climatetechwiki.org/technology/jiqweb-pcm-0>

<http://www.technicalreview.gr>

<http://www.rgees.com>

<http://www.thermoplanart.gr>

<http://www.va-q-tec.de>

<http://www.deltat.de>

<http://www.sciencedirect.com>

<http://www.mjm-engineering.com>

<http://www.climator.com>

<http://www.daikin.gr/faq/items/sensible-latent-heat.jsp>

<http://en.wikipedia.org/wiki>

[http://www.ecofinder.gr/learn/Ηλιακός\\_Θερμοσίφωνας](http://www.ecofinder.gr/learn/Ηλιακός_Θερμοσίφωνας)

[www.ansys.com](http://www.ansys.com)

[http://courseware.mech.ntua.gr/ml22058/DPMS/3a-DPMS-YpolMhx-Kwdikas\\_CFX.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml22058/DPMS/3a-DPMS-YpolMhx-Kwdikas_CFX.pdf)

(Μαρία Φούντη, Δημήτρης Κατσουρίνης, Υπολογιστικές μέθοδοι σε πολυφασικά πολυσυστατικά αντιδρώντα συστήματα, παρουσίαση υπολογιστικού κώδικα ANSYS-CFX)

[www.mie.uth.gr/labs/lte/grk/pubs/Diploma\\_Tziourtzioumis.pdf](http://www.mie.uth.gr/labs/lte/grk/pubs/Diploma_Tziourtzioumis.pdf)

<http://www.cfd-online.com>