

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΕΩΣ: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ, ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ & ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΙΑΣ



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΦΕΡΕΝΤΙΝΟΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ
ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ**

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΘΕΟΔΩΡΟΠΟΥΛΟΥ ΜΑΡΙΑ

ΠΑΤΡΑ 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την πτυχιακή εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και έχει ως αντικείμενο τα υλικά αλλαγής φάσης

Σκοπός της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η μελέτη των ιδιοτήτων, των εφαρμογών καθώς και των μεθόδων βελτίωσης των ιδιοτήτων των υλικών αλλαγής φάσης.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια κ. Μαρία Θεοδοροπούλου για την υπόδειξη του θέματος καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Φερεντίνος Γρηγόριος

Παπαθανασίου Αθανάσιος

Αύγουστος 2014

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής
Φερεντίνος Γρηγόριος

Ο σπουδαστής
Παπαθανασίου Αθανάσιος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει σαν θέμα την τεχνολογία των υλικών αλλαγής φάσης.

Στο πρώτο κεφάλαιο δίνεται ο ορισμός, οι βασικές λειτουργίες καθώς και οι ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία ταξινόμηση των υλικών που χρησιμοποιούνται σήμερα ως υλικά αλλαγής φάσης και επίσης γίνεται μία σύγκριση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων που παρουσιάζει κάθε κατηγορία.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι σημαντικότερες τεχνικές μέτρησης των ιδιοτήτων των υλικών αλλαγής φάσης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο δίνονται οι μέθοδοι συσκευασίας των υλικών αλλαγής φάσης και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την αύξηση της θερμικής τους αγωγιμότητας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το τεράστιο εύρος εφαρμογών των υλικών αλλαγής φάσης σε όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας με υλικά αλλαγής φάσης.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία αυτή.

**1. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ
ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ**

1.1 Γενικά	9
1.2 Ορισμός Υλικών Αλλαγής Φάσης.....	9
1.3 Κριτήρια Επιλογής ΥΑΦ.....	12
1.4 Ιστορική Αναδρομή.....	15

2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

2.1 Γενικά.....	19
2.2 Οργανικά Υλικά.....	20
2.2.1 Γενικά.....	20
2.2.2 Παραφίνες.....	21
2.2.3 Λιπαρά Οξέα.....	23
2.3 Ανόργανα Υλικά.....	24
2.4 Εύτηκτα Μίγματα.....	26
2.5 Υλικά Αλλαγής Στερεής Φάσης.....	26
2.6 Προβλήματα κατά τη Χρήση των ΥΑΦ.....	27
2.6.1 Διαχωρισμός Φάσεων.....	27
2.6.2 Μικρή Τιμή της Θερμικής Αγωγιμότητας.....	28
2.6.3 Υπόψυξη-Υπέρψυξη.....	28
2.6.4 Διάβρωση.....	29
2.6.5 Συμβατότητα των ΥΑΦ με Άλλα Υλικά.....	29
2.6.6 Σταθερότητα Θερμικών Ιδιοτήτων.....	30
2.7 Σύγκριση των Κατηγοριών ΥΑΦ.....	30

3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΥΑΦ

3.1 Γενικά.....	32
3.2 Ψηφιακό Θερμιδόμετρο.....	33
3.3 Η Μέθοδος T-History... ..	35
3.4 Η Μέθοδος Double Cell.....	38

4. ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ ΤΩΝ ΥΑΦ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΥΛΙΚΑ

4.1 Γενικά.....	40
4.2 Ενσωμάτωση σε Κάψουλες.....	40
4.3 Εγκλωβισμός σε Πορώδη Υλικά.....	42
4.3.1 Γενικά.....	42
4.3.2 Πορώδη Υλικά.....	43
4.3.3 Παραγωγή Σύνθετων Υλικών.....	44
4.3.4 Οικοδομικά Υλικά.....	50

5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

5.1 Γενικά.....	51
5.2 Συστήματα Αποθήκευσης μη Άμεσης Επαφής με το Μέσο Μεταφοράς.....	51
5.3 Συστήματα Αποθήκευσης Άμεσης Επαφής με το Μέσο Μεταφοράς.....	52
5.4 Φωτοβολταϊκά Πλαίσια.....	53
5.5 Συστήματα Κλιματισμού.....	53
5.6 Ηλιακά Συστήματα.....	54
5.7 Ηλεκτρονικά Εξαρτήματα.....	55
5.8 Χρήση σε Ηλεκτρονικούς Υπολογιστές.....	56
5.9 Μονάδα Επείγουσας Ψύξης.....	57
5.10 Τηλεπικοινωνίες.....	59
5.11 Οχήματα.....	60
5.12 Μεταφορές Αγαθών.....	62
5.13 Θερμική Ένδυση.....	64
5.14 Δομικά Υλικά.....	67

6. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

6.1 Γενικά.....	70
6.2 Κλιματιστικές Εγκαταστάσεις.....	71
6.3 Συστήματα Βελτίωσης Απόδοσης Στροβιλομηχανών.....	72
6.4 Συστήματα Αποθήκευσης Θερμότητας με Πάγο.....	72
6.5 Σύστημα Αποθήκευσης Ψύξης Τύπου Σπειρώματος.....	73
6.5.1 Εξωτερική Τήξη.....	75
6.5.2 Εσωτερική Τήξη.....	78
6.5.3 Φόρτιση και Αποφόρτιση.....	80
6.6 Σύστημα Sheet Ice Harvester.....	81
6.7 Πάγος σε Μικροκάψουλες	83
6.8 Διφασικό Μίγμα.....	85
6.8.1 Σύστημα Διανεμημένης Αποθήκευσης.....	85
6.8.2 Σύστημα Κεντρικής Αποθήκευσης.....	86
6.8.3 Φόρτιση και Αποφόρτιση.....	87
6.9 Εύτηκτα Άλατα.....	88

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... 89

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....91

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή θερμότητας είναι μια τεχνολογία που μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας και την εξισορρόπηση παροχής και ζήτησης ενέργειας ιδιαίτερα στον τομέα της θέρμανσης ή ψύξης χώρων. Η αποθήκευση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας διάφορες χημικές ή φυσικές διεργασίες που η κάθε μια έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος αποθήκευσης θερμότητας είναι υπό τη μορφή της αισθητής θερμότητας. Καθώς αποθηκεύεται θερμότητα υπό τη μορφή αισθητής θερμότητας παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού. Η αύξηση θερμοκρασίας μπορεί να ανιχνευθεί από έναν αισθητήρα και η θερμότητα που αποθηκεύεται ονομάζεται αισθητή θερμότητα (sensible heat). Η αποθήκευση θερμότητας υπό μορφή αισθητής θερμότητας γίνεται κατά κύριο λόγο σε στερεά δομικά στοιχεία, όπως τούβλο, πέτρα κα, καθώς επίσης και σε υγρά, όπως το νερό. Τα αέρια λόγω της χαμηλής θερμοχωρητικότητάς τους δεν χρησιμοποιούνται για αποθήκευση αισθητής θερμότητας.

Στα σύγχρονα κτίρια το μεγάλο κόστος είναι ο κύριος παράγοντας που εμποδίζει την ανάπτυξη τεχνικών αποθήκευσης με τη μέθοδο της αισθητής θερμότητας καθώς απαιτείται μεγάλη μάζα υλικού για την επίτευξη ικανοποιητικής χωρητικότητας αποθήκευσης.

Μια άλλη τεχνική αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι η αποθήκευση με τη μορφή λανθάνουσας ενέργειας (latent heat), δηλαδή με την αλλαγή φάσης του υλικού στο οποίο αποθηκεύουμε θερμότητα. Όσο και αν αυτό φαίνεται παράξενο, αυτή είναι μια πανάρχαια τεχνική αφού ένα από τα πρώτα μέσα αποθήκευσης θερμότητας (κρύου) υπήρξε ο πάγος.

Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι αποθήκευσης που χαρακτηρίζονται από τον τύπο της αλλαγής φάσης. Γενικά για εφαρμογές κτιρίων η μετάβαση από στερεό ή υγρό σε αέριο δεν εφαρμόζεται λόγω των υψηλών πιέσεων (ή του μεγάλου όγκου) που απαιτούνται όταν το υλικό είναι στην αέρια φάση. Η μετάβαση από στερεό σε στερεό (όταν η αποθηκευόμενη ενέργεια αλλάζει την κρυσταλλική δομή του υλικού) αφορά μικρή αλλαγή όγκου και παρέχει μεγαλύτερη ευχέρεια στους σχεδιαστές, ωστόσο αφορά συνήθως μικρές ποσότητες λανθάνουσας θερμότητας που την καθιστούν ασύμφορη. Η μετάβαση από στερεό σε υγρό αποθηκεύει συγκριτικά μικρότερα ποσά λανθάνουσας ενέργειας σε σχέση με τη μετάβαση από υγρό σε αέριο, ωστόσο οι μικρότερες μεταβολές όγκων που εμπλέκονται την καθιστούν οικονομικά πιο συμφέρουσα. Όλες οι παραπάνω αλλαγές φάσης πρέπει να είναι αντιστρέψιμες με σχεδόν ισοθερμική μετάβαση.

Τα υλικά που αλλάζουν φάση στο εύρος των θερμοκρασιών της εφαρμογής που χρησιμοποιούνται ονομάζονται Υλικά Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ). Τα ΥΑΦ είναι υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, που χρησιμοποιούν χημικούς δεσμούς για να αποθηκεύσουν και να απελευθερώσουν θερμότητα, ωστόσο αποθηκεύουν και αισθητή θερμότητα. Κάθε ΥΑΦ έχει μια θερμοκρασία τήξης στην οποία αλλάζει φάση αποθηκεύοντας ενέργεια σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Όταν η θερμοκρασία κατέβει χαμηλότερα από το σημείο τήξης το υλικό στερεοποιείται εκλύοντας την αποθηκευμένη ενέργεια στο περιβάλλον σε σταθερή θερμοκρασία. Σε θερμοκρασίες μακριά από το σημείο τήξης το ΥΑΦ λειτουργεί όπως και τα συμβατικά υλικά αποθηκεύοντας αισθητή θερμότητα. Σε αντίθεση ωστόσο με τα συμβατικά υλικά όπως το τούβλο, το μπετόν ή το νερό, μπορεί να αποθηκεύσει 5-14 φορές περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα όγκου.

Είναι προφανές ότι προκειμένου ένα ΥΑΦ να χρησιμοποιηθεί εμπορικά για κάποια εφαρμογή, θα πρέπει να ικανοποιεί κάποια κριτήρια και να επιδεικνύει συγκεκριμένες θερμοδυναμικές, κινητικές και χημικές ιδιότητες. Επιπλέον κριτήρια οικονομικής φύσης όπως η διαθεσιμότητα του υλικού και το κόστος θα πρέπει οπωσδήποτε να εξετάζονται.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν εξετάζονται διεξοδικά ο τρόπος με τον οποίο αποθηκεύεται θερμότητα στα υλικά αλλαγής φάσης καθώς επίσης οι ιδιότητες και οι σημαντικότερες εφαρμογές των υλικών αυτών.

1. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας έχουν μεγάλη απήχηση κυρίως λόγω της ικανότητάς τους να αποθηκεύουν μεγάλα ποσά ενέργειας σε σχετικά μικρό χώρο αλλά και λόγω της χαρακτηριστικής τους ιδιότητας να αποθηκεύουν τη θερμότητα σε μια συγκεκριμένη σταθερή θερμοκρασία που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης της αποθηκευτικής ουσίας.

Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας τα οποία συνδυάζουν τη χρήση Υλικών Αλλαγής Φάσης, θεωρούνται ιδιαίτερος σημαντικά για την έρευνα, λόγω της μεγάλης αποθηκευτικής (από ενεργειακή άποψη) ικανότητάς τους.

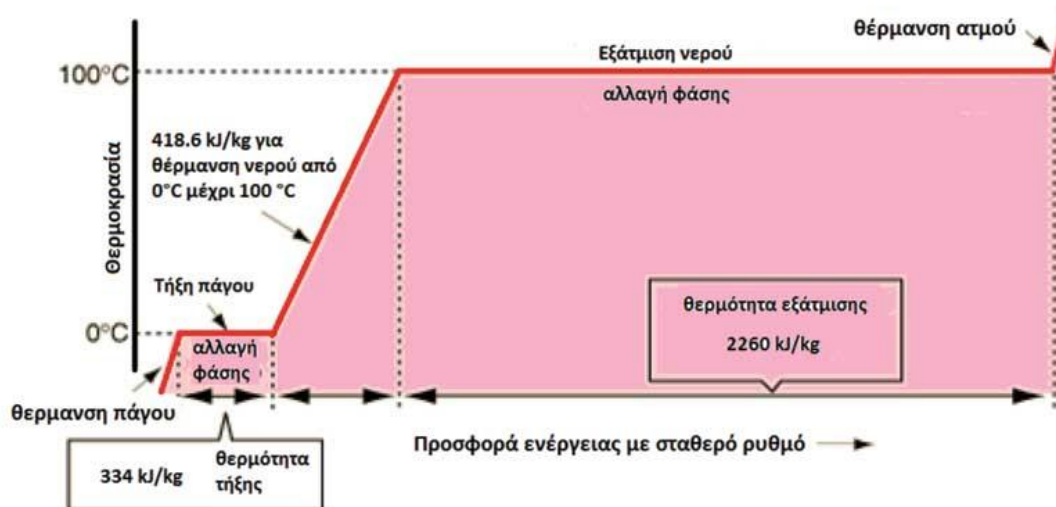
1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

Είναι γνωστό ότι η αλλαγή φάσης ενός υλικού από στερεό σε υγρό η από υγρό σε αέριο ακολουθείται από ταυτόχρονη ανταλλαγή ενέργειας με το περιβάλλον, η οποία είναι αποτέλεσμα της αναδιάταξης της μοριακής του κατάταξης. Με τον όρο υλικά αλλαγής φάσης (ΥΑΦ, phase change material, PCM) ορίζονται εκείνα τα υλικά τα οποία μπορούν να αποθηκεύουν και να ελευθερώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας, ως αποτέλεσμα της αλλαγής φάσης στη μοριακή τους δομή. Πρόκειται δηλαδή για αποθηκευτικά υλικά λανθάνουσας θερμότητας που χρησιμοποιούν χημικούς δεσμούς για να αποθηκεύσουν και έπειτα για να απελευθερώσουν θερμότητα.

Η ιδέα για τα υλικά αλλαγής φάσης προήλθε από το νερό, το οποίο μπορεί να αποθηκεύσει μεγάλα ποσά θερμότητας κατά την αλλαγή φάσης του σε πάγο. 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 ονομάζεται 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.

Αντίστροφα, κατά την ψύξη του νερού, στις θερμοκρασίες αλλαγής φάσης, οι κατά περίπτωση λανθάνουσες θερμότητας ελευθερώνονται. Στο διάγραμμα του σχήματος 1.1 φαίνεται ότι με

συνεχή και σταθερό ρυθμό θέρμανση 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. Το ίδιο διάγραμμα ισχύει και κατά την αντίστροφη διαδικασία, της ψύξης, όπου πλέον κατά την αλλαγή φάσης (από ατμό σε υγρό και από υγρό σε πάγο) η αποθηκευμένη λανθάνουσα θερμότητα επιστρέφεται στο περιβάλλον.



Σχήμα 1.1 Διάγραμμα μεταβολής φάσης του νερού [7].

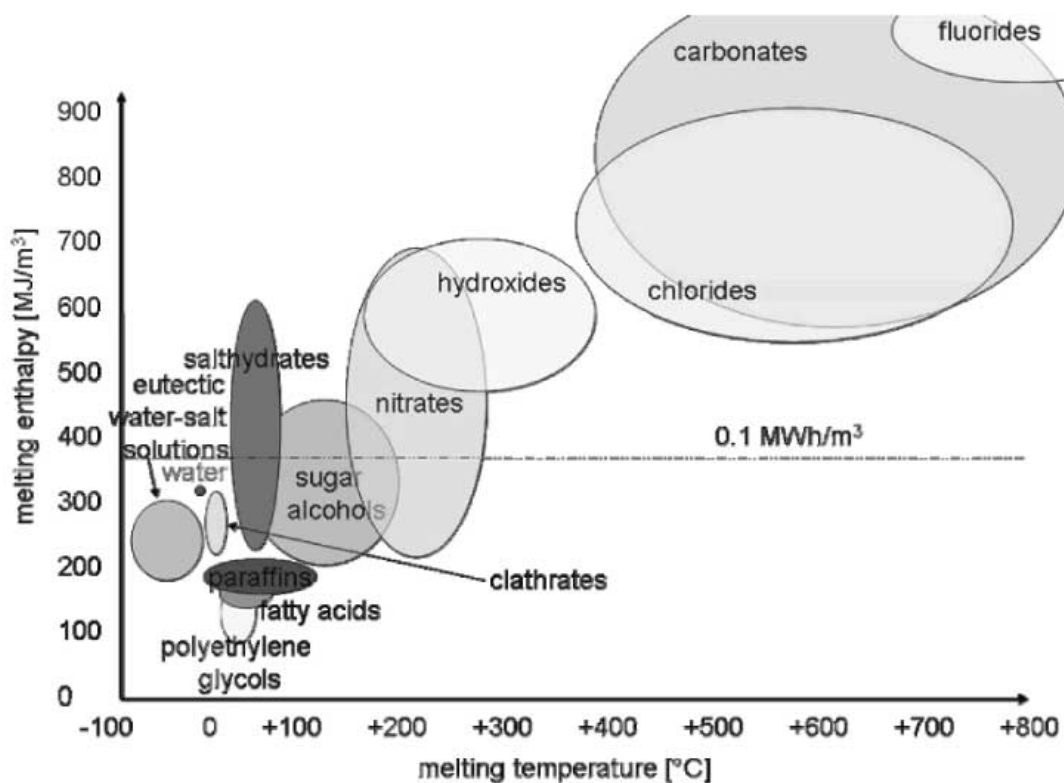
Οι ανταλλαγές ενέργειας με το περιβάλλον που συνοδεύουν τις μεταβολές φάσης των υλικών εκδηλώνονται σε φυσικά φαινόμενα και, ακόμη, αξιοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα που βασίζεται και πάλι στο νερό είναι η χρήση πάγου για την ψύξη ενός ποτού σε ποτήρι. Το λιώσιμο του πάγου συνοδεύεται με απορρόφηση λανθάνουσας θερμότητας τήξης από το ποτό που έτσι ψύχεται.

Παρατηρήθηκε όμως ότι η χρήση του πάγου παρουσιάζει αρκετά προβλήματα κυρίως λόγω των ιδιοτήτων του νερού. Αυτά τα προβλήματα επικεντρώνονται κυρίως στη θερμοκρασία τήξεώς του, στη μεγάλη μεταβολή της πυκνότητας με τη θερμοκρασία, καθώς και στο γεγονός ότι η θερμοκρασία προσαγωγής στο σύστημα αποθήκευσης είναι χαμηλή.

Ωστόσο η μεγάλη αποθήκευση θερμότητας κατά την αλλαγή φάσης του νερού ήταν αυτό που οδήγησε σε έρευνες για εύρεση υλικών

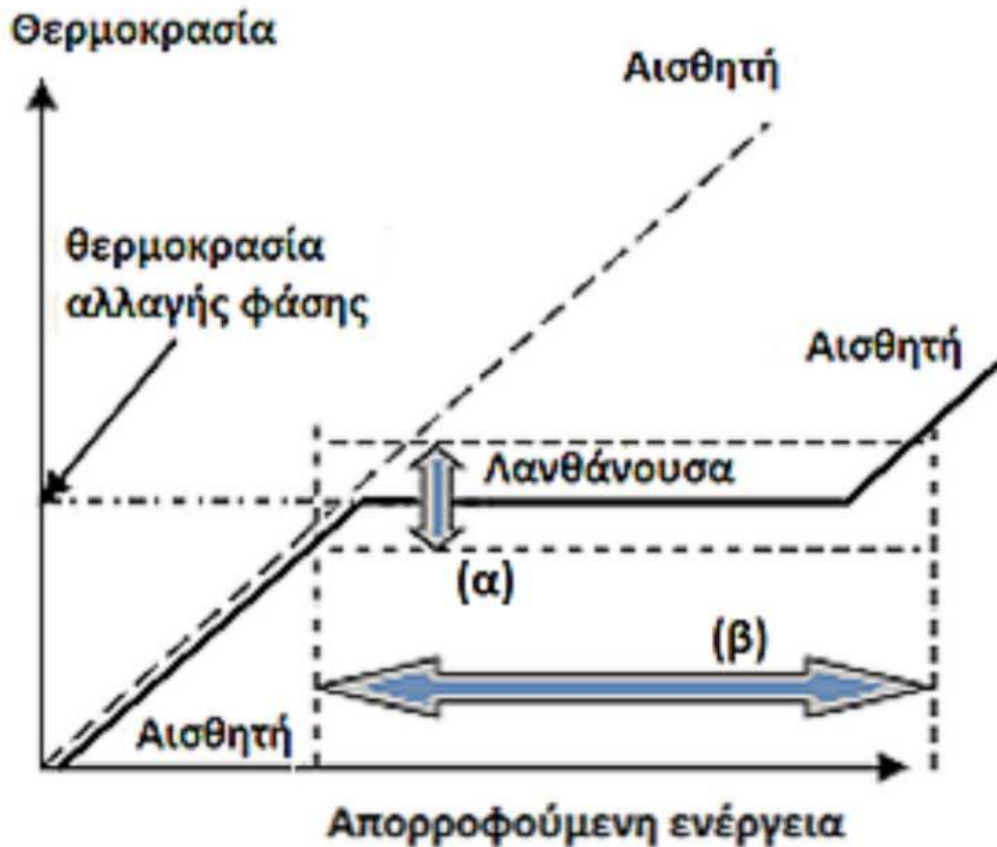
αλλαγής φάσης τα οποία θα παρουσίαζαν τα πλεονεκτήματα του νερού και στα οποία θα ελαχιστοποιούνταν τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα και κυρίως η πολύ χαμηλή και καθόλου λειτουργική θερμοκρασία τήξεως. Έτσι οδηγηθήκαμε στην ανακάλυψη πολλών ΥΑΦ τα οποία παρουσιάζουν ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών αλλαγής φάσης κάνοντας πιο λειτουργική την χρήση τους.

Οι διαθέσιμες τεχνολογίες αξιοποίησης του φαινομένου της αλλαγής φάσης υλικών περιορίζονται στην αλλαγή στερεού-υγρού. Η αξιοποίηση της μεταβολής υγρού-αέριου συναντά δυσεπίλυτες δυσκολίες και για το λόγο αυτό δε βρίσκει πρακτικές εφαρμογές. Ήδη, διατίθενται πολλά υλικά αλλαγής φάσης με θερμοκρασίες τήξης που κλιμακώνονται σε ευρέα όρια (Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2 Κλάσεις υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ΥΑΦ και τα αντίστοιχα τυπικά εύρη τιμών θερμοκρασίας τήξης και λανθάνουσας θερμότητας τήξης (melting enthalpy) [7].

Η τεχνολογία αξιοποίησης των ΥΑΦ σε πρακτικές εφαρμογές ακολουθεί δύο βασικές κατευθύνσεις. Η πρώτη στοχεύει στον έλεγχο της θερμοκρασίας και η δεύτερη στην αποθήκευση θερμότητας. Στο διάγραμμα του σχήματος 1.3 που παριστάνει τη μεταβολή θερμοκρασίας ενός υλικού αλλαγής φάσης συναρτήσει της απορροφούμενης (ή αποδιδόμενης) θερμικής ενέργειας, σημειώνονται οι δύο αυτές επιλογές.



Σχήμα 1.3 Εφαρμογές των ΥΑΦ
 (α) για έλεγχο της θερμοκρασίας και
 (β) για αποθήκευση θερμότητας (ή ψύχους) [7].

1.3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΥΑΦ

Για να επιτυγχάνονται τα αναμενόμενα αποτελέσματα της χρήσης των ΥΑΦ ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή είναι απαραίτητη η γνώση των φυσικών, τεχνικών και των άλλων ιδιοτήτων του. Η επιλογή του γίνεται με βάση αυτές. Για την επιλογή του σωστού υλικού αλλαγής φάσης, δεν υπάρχει πάντα ένα κριτήριο επιλογής. Αντιθέτως ανάλογα με την εφαρμογή οι μηχανικοί πρέπει να λαμβάνουν υπόψη ένα μεγάλο αριθμό κριτηρίων επιλογής υλικού και να προβούν σε προσεκτική εξέταση των ιδιοτήτων των διαφόρων υποψηφίων, ζυγίζοντας τα σχετικά πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες τους. Βέβαια η εύρεση ενός ιδανικού μέσου θερμικής αποθήκευσης είναι δύσκολη για αυτό κάθε φορά επιδιώκεται ο καλύτερος συνδυασμός των ιδιοτήτων του. Επίσης ο σκοπός χρήσης του ΥΑΦ είναι ένας σημαντικός παράγοντας καθώς

αυτός θέτει την ιεράρχηση των σημαντικότερων ιδιοτήτων που πρέπει να ληφθούν υπόψη σε κάθε περίπτωση.

Οι ιδιότητες που πρέπει να έχουν κατά κύριο λόγο όλα τα υλικά αλλαγής φάσεις προκειμένου να αποτελεί ένα ιδανικό μέσο αποθήκευσης καθώς και άλλα κριτήρια που πρέπει να πληρούν αναφέρονται αναλυτικά παρακάτω.

Θερμικές και φυσικές ιδιότητες

Η θερμοκρασία αλλαγής φάσης του ΥΑΦ είναι σημαντικό να βρίσκεται μέσα στο εύρος θερμοκρασιών της συγκεκριμένης εφαρμογής. Η διαδικασία τήξης που λαμβάνει χώρα στη θερμοκρασία αυτή θα πρέπει επιπλέον να παράγει αρκετή λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα όγκου ώστε να ικανοποιήσει τις ανάγκες αποθήκευσης της συγκεκριμένης εφαρμογής περιορίζοντας ταυτόχρονα τον όγκο του υλικού που απαιτείται. Πέρα από τη λανθάνουσα θερμότητα ωστόσο και η αισθητή θερμότητα που μπορεί να αποθηκευτεί από το ΥΑΦ θα πρέπει να ληφθεί υπόψη.

Άλλη μια σημαντική ιδιότητα είναι η ενθαλπία αλλαγής φάσης την οποία επιθυμούμε να είναι αρκετά υψηλή ώστε να επιτευχθεί υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης σε σύγκριση με την αποθήκευση αισθητής θερμότητας. Βέβαια πρέπει να ληφθεί υπόψη και η αποδοτικότητα με την οποία η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί και να επανακτηθεί. Η μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας αυτής μπορεί να γίνει με την επιλογή ενός υλικού με υψηλή θερμική αγωγιμότητα.

Χημικές ιδιότητες

Για εφαρμογές υλικών αλλαγής φάσης σε κτήρια μία από τις θεμελιώδεις παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι η ασφάλεια. Η μακροχρόνια χημική σταθερότητα του υλικού ΥΑΦ θα πρέπει να εκτιμηθεί πριν την εφαρμογή του στη δομή του κτηρίου. Η ελάχιστη εκφύλιση του υλικού και η ολοκληρωτική αντιστρεψιμότητά του είναι παράγοντες υψηλής προτεραιότητας καθώς το υλικό ΥΑΦ πρόκειται να εκτελέσει πολλούς κύκλους αλλαγής φάσης στη διάρκεια της ζωής του.

Επίσης το ΥΑΦ θα πρέπει να είναι συμβατό με τα υπόλοιπα κατασκευαστικά υλικά και να μην προκαλεί δομικές ζημιές. Δεν πρέπει να είναι τοξικό ή εύφλεκτο και να μην αποτελεί κίνδυνο για τους χρήστες του κτιρίου κατά τη διάρκεια της ζωής του.

Η αλλαγή φάσης του υλικού ΥΑΦ κατά τους κύκλους της φόρτισης και αποφόρτισης θα πρέπει να είναι ολοκληρωτική και ομογενής. Ένα πρόβλημα που αναγνωρίστηκε στη συμπεριφορά αρκετών υλικών αλλαγής φάσης είναι το φαινόμενο της υπερ-ψύξης ή υπό-ψύξης (supercooling ή sub-cooling). Το φαινόμενο αυτό δεν επιτρέπει στο ΥΑΦ

να στερεοποιηθεί αμέσως κατά την ψύξη στη θερμοκρασία τήξης αλλά αρχίζει να κρυσταλλοποιείται όταν η θερμοκρασία φτάσει αρκετά χαμηλότερα, με αποτέλεσμα η έκλυση της αποθηκευμένης ενέργειας να γίνεται σε ένα εύρος θερμοκρασιών 5-10°C χαμηλότερα από το σημείο τήξης.

Οικονομικά κριτήρια

Η διαθεσιμότητα των διαφόρων τύπων ΥΑΦ θα είναι ουσιαστικός παράγοντας που θα καθορίσει τη χρήση τους στο μέλλον σε διάφορες εφαρμογές. Το ίδιο σημαντικοί είναι παράγοντες όπως το κόστος των υλικών και η ευκολία εφαρμογής τους. Το κόστος των υλικών προς το παρόν για τα εμπορικά διαθέσιμα ΥΑΦ είναι αρκετά υψηλό (ενδεικτική τιμή 0,5-10 €/kg). Χρησιμοποιώντας τυπικές τιμές ενθαλπίας αλλαγής φάσης φτάνουμε στο συμπέρασμα ότι η αποθήκευση 1kWh δηλαδή 3600kJ απαιτεί περίπου 20kg ΥΑΦ (με πυκνότητα αποθήκευσης 180kJ/kg). Συνεπώς το χαμηλότερο δυνατό κόστος αποθήκευσης θα είναι $20 \cdot 0,5 = 10 \text{ €/kWh}$. Αν υποθέσουμε ότι η συμβατική ενέργεια κοστίζει 0,05 €/kWh, η αποπληρωμή της επένδυσης απαιτεί $10/0,05 = 200$ κύκλους χρήσης. Συνεπώς η εποχική αποθήκευση θερμότητας είναι προς το παρόν ασύμφορη και για να είναι οικονομικά ανταγωνιστική η αποθήκευση με ΥΑΦ θα πρέπει η φόρτιση και αποφόρτισή τους να γίνεται στη διάρκεια του 24ώρου.

Η σημερινή τιμή των ΥΑΦ ωστόσο δεν είναι αντιπροσωπευτική για το άμεσο μέλλον αφού θα επηρεαστεί από το εύρος εφαρμογής των υλικών και τη διάδοση της χρήσης τους. Σε κάθε περίπτωση πάντως η επίτευξη θερμικού ελέγχου των χώρων είναι κρίσιμη για την αιεφόρο ανάπτυξη στον κτιριακό τομέα και εφόσον η εφαρμογή ΥΑΦ μπορεί να συντελέσει αποτελεσματικά στην εξοικονόμηση ενέργειας, το αρχικό κόστος εγκατάστασης μπορεί να εξισορροπηθεί από την εξοικονόμηση αυτή.

Όπως προαναφέραμε το υλικό αλλαγής φάσης δεν είναι δυνατό για κάθε εφαρμογή να ικανοποιεί όλες τις παραπάνω προϋποθέσεις και ιδιότητες για αυτό η επιλογή ενός υλικού γίνεται συνήθως σε σχέση με τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, την ενθαλπία, τη σταθερότητα σε κυκλική φόρτιση, και την υπόψυξη οι οποίοι είναι σημαντικοί παράγοντες για την σωστή λειτουργία του.

Πίνακας 1.1 Ιδιότητες συνηθισμένων υλικών αλλαγής φάσης [1]

Υλικό	Σημείο Τήξης(°C)	Λανθάνουσα Θερμότητα (W/mK)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK) (κατάσταση, °C)	Πυκνότητα (kg/m ³) (κατάσταση, °C)
Ανόργανα Υλικά				
H ₂ O	0	333	0,612(υγρό,20)	998(υγρό,20) 917(στερεό, 0)
MgCl ₂ *6H ₂ O	117	168,6	0,570(υγρό, 120) 0,694(στερεό,90)	1450(υγρό,120) 1569(στερεό,20)
Mg(NO ₃)*6H ₂ O	89	162,8	0,490(υγρό,95) 0,611(στερεό,37)	1550(υγρό,94) 1636(στερεό,25)
Zn(NO ₃) ₂ *6H ₂ O	36	146,9	0,464(υγρό,39,9)	1828(υγρό,36) 1937(στερεό,24)
CaCl ₂ *6H ₂ O	27	190,8	0,540(υγρό,38,7) 1,088(στερεό,23)	1562(υγρό,32) 1802(στερεό,24)
Na ₂ SO ₄ *H ₂ O (Άλας Glauber)	32	254	0,544	1485(στερεό)
Οργανικά Υλικά				
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 ₁₈	28	244	0,148(υγρό,40) 0,358(στερεό,25)	774(υγρό,70) 814(στερεό,20)
Λιπαρά Οξέα				
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)

1.4 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η χρήση ΥΑΦ για αποθήκευση θερμότητας είναι γνωστή και εφαρμόζεται εδώ και πολλά χρόνια. Η χρήση του πάγου για τη διατήρηση των τροφίμων είναι σχεδόν αρχαία. Η χρήση λοιπόν του πάγου σαν ΥΑΦ είναι η πρώτη χρήση τέτοιων συστημάτων. Τα ιγκλού (σπίτια από πάγο) κατασκευάζονταν χρησιμοποιώντας μεγάλα κομμάτια πάγου από την παγωμένη επιφάνεια ποταμών, τα οποία μετά αποθηκεύονταν σε πριονίδι για μετέπειτα χρήση κατά την περίοδο της Άνοιξης.

Η βιομηχανία τροφίμων πέρα από τον πάγο μετέπειτα χρησιμοποίησε και άλλες μεθόδους για τη διατήρηση των τροφίμων σε επιθυμητή θερμοκρασία. Για παράδειγμα, κατά τη μεταφορά ή

αποθήκευση τροφίμων, χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικά δοχεία μεγάλου πλάτους και μικρού αντίστοιχα πάχους, γεμάτα με στερεοποιημένα μίγματα αλάτων, τα οποία άλλαζαν φάση κατά τη μεταφορά ή αποθήκευση του τροφίμου, απορροφώντας θερμότητα και διατηρώντας το εσωτερικό στην επιθυμητή θερμοκρασία.

Τα ίδια υλικά χρησιμοποιήθηκαν και στη βιομηχανία φαρμάκων, σε πλαστικά δοχεία, ώστε να διατηρούν τα θερμοκρασιακά επίπεδα χημικών και φαρμάκων, κατά τη μεταφορά ή την αποθήκευσή τους. Το βασικό ΥΑΦ που χρησιμοποιήθηκε σε τέτοιες εφαρμογές, ήταν κάποιο μίγμα ανόργανων αλάτων, όπως Θεϊκό Νάτριο, Θεϊκό Μαγνήσιο, Θεϊκό Κάλιο, Θεϊκό Αμμώνιο, Θεϊκό Ασβέστιο και κάποια χλωρίδια του Μαγνησίου.

Από τη στιγμή που η επιστημονική κοινότητα κατάλαβε τις προοπτικές των ΥΑΦ, άρχισαν να διεξάγονται μελέτες και πειράματα για την εύρεση και ανάπτυξη όλο και καλύτερων ΥΑΦ, με διάφορα σημεία τήξης και υψηλές θερμότητες υγροποίησης.

Σε πρώτη φάση το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στους μεμονωμένους χρήστες των συστημάτων αυτών και όχι σε τεχνολογικώς ανεπτυγμένα θερμικά συστήματα. Μερικά δείγματα δουλειάς, ήταν κάποια συστήματα, τα οποία προορίζονταν για εστιατορες και ξενοδόχους και ήταν σχεδιασμένα να διατηρούν τα ζεστά πιάτα σε ικανοποιητική θερμοκρασία όση ώρα διαρκούσε το σερβίρισμα. Άλλες εφαρμογές ήταν προϊόντα για τη διατήρηση ζεστών ροφημάτων, αλλά η εφεύρεση του "Θερμός" ήταν πολύ αποτελεσματική, οπότε αυτό το προϊόν δεν έτυχε απήχησης, και διάφορα προϊόντα σε ρούχα διαβίωσης (ρούχα για ακραίες συνθήκες).

Στα τέλη της δεκαετίας του 1940 διατέθηκε στην αγορά ένα φαρμακευτικό προϊόν, μία θερμαντική ζώνη που προοριζόταν για θεραπευτικούς σκοπούς, το οποίο βασιζόταν στη θερμική συμπεριφορά του Βορικού Θείου. Το πρώτο προϊόν το οποίο αναπτύχθηκε για θεραπευτικό σκοπό ήταν μία συσκευασία παροχής ψύξης, ονομαζόταν γενικά "cool pack" και αναπτύχθηκε από αθλίατρος σε συνεργασία με νοσοκομειακές μονάδες και η κύρια χρήση του ήταν να περιορίζει το μωλώπισμα σε περίπτωση τραυματισμού. Το προϊόν αποτελείται από μία σακούλα που λειτουργεί σαν εξωτερική συσκευασία, η οποία είναι εσωτερικά χωρισμένη σε δύο τμήματα. Το ένα και μεγαλύτερο περιέχει το υλικό αλλαγής φάσης, το οποίο έχει σταθεροποιηθεί σε υπέρψυκτη κατάσταση. Το άλλο τμήμα περιέχει έναν παράγοντα πυρηνοποίησης, δηλαδή ένα πηκτικό. Μια απότομη κίνηση καταστρέφει το διαχωριστικό εντός της συσκευασίας και επιτρέπει την ανάμιξη των δύο υλικών, με αποτέλεσμα το ΥΑΦ να σταθεροποιείται, απελευθερώνοντας την αποθηκευμένη θερμότητα.

Ομοίως αναπτύχθηκαν και άλλα πακέτα με υλικά υψηλότερου σημείου τήξης για παραγωγή υψηλότερης θερμοκρασίας για ιατρικές εφαρμογές όπου ζητούμενο είναι να θερμανθεί η πληγή. Τα λεγόμενα "hot packs" βρήκαν εφαρμογή και σε στρατιωτικά πακέτα εξοπλισμού επιβίωσης, όπως και σε ειδικά ενδύματα για συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας.

Η εξέλιξη των προϊόντων ήταν φυσική εξέλιξη λόγω της τεχνολογικής προόδου και διατέθηκαν στην αγορά πολλά ακόμη προϊόντα επιβίωσης, χρησιμοποιώντας διαφορετικά ΥΑΦ με μεγάλη ποικιλία σημείων τήξης. Παρόλο που η πρόοδος στη μελέτη και εφαρμογή των υλικών αυτών ήταν σε προχωρημένα στάδια, είχαν γίνει ελάχιστα βήματα για τη χρήση αυτών των υλικών σε σπίτια και στην ουσιαστική συμβολή τους στη θερμική συμπεριφορά των τελευταίων.

Οι πρώτες προσπάθειες έγιναν μόλις από τη δεκαετία του 1920, ενώ κάποιες πειραματικές κατασκευές σπιτιών για πειράματα μεγάλης κλίμακας παρατηρήθηκαν από το 1940 έως το 1970. Αν και τα συστήματα αυτά θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν επιτυχημένα, δεν υπήρξε περαιτέρω εξέλιξη ή μελέτη, αφού δεν υπήρξε σημαντική χρηματοδότηση, λόγω κυρίως έλλειψης πίστης στην επιτυχία του όλου εγχειρήματος.

Το πρώτο μεγάλο ερευνητικό πρόγραμμα έλαβε χώρα στο πανεπιστήμιο της Πενσυλβάνια το 1971. Σε αυτό συμμετείχαν πολύ σημαντικοί ερευνητές που δραστηριοποιούνταν στην έρευνα των ΥΑΦ, όπως οι S.Freedman, M.Telkes και M.Altman. Ο ερευνητικός σκοπός ήταν να ανακαλυφθεί αριθμός ΥΑΦ κατάλληλων για ψυκτικές και θερμαντικές εφαρμογές, με ενδεδειγμένη ανάλυση παράπλευρων παραγόντων, όπως τα διάφορα κόστη (κτήσης, εγκατάστασης, συντήρησης), οικονομική ανάλυση επένδυσης και αποθηκευτική ικανότητα υλικού.

Η έρευνα βασίστηκε στις βασικές ομάδες ΥΑΦ:

- Ø Ένυδρα άλατα
- Ø Οργανικά ΥΑΦ
- Ø Ανόργανα ΥΑΦ
- Ø Εύτηκτα μίγματα (οργανικά/ανόργανα)

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το $K_2HPO_4 \cdot 6H_2O$ (ανόργανο ΥΑΦ) και ορισμένα μίγματα παραφίνης (οργανικό ΥΑΦ) είναι κατάλληλα για εφαρμογές κλιματισμού, ενώ για θέρμανση χώρου τα πιο ελπιδοφόρα ΥΑΦ είναι τα: $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ και $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$.

Η δεκαετία του 1970 ήταν ορόσημο για τα ΥΑΦ και γενικότερα για τις εναλλακτικές μορφές ενέργειας. Συγκεκριμένα το 1973 εμφανίζεται η πρώτη πετρελαϊκή κρίση. Αυτό ώθησε τις κυβερνήσεις διάφορων χωρών να αναζητήσουν τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας.

Το πεδίο μεγάλου ενδιαφέροντος ήταν οι τομείς της ηλιακής ενέργειας και της αποδοτικής αποθήκευσης θερμότητας.

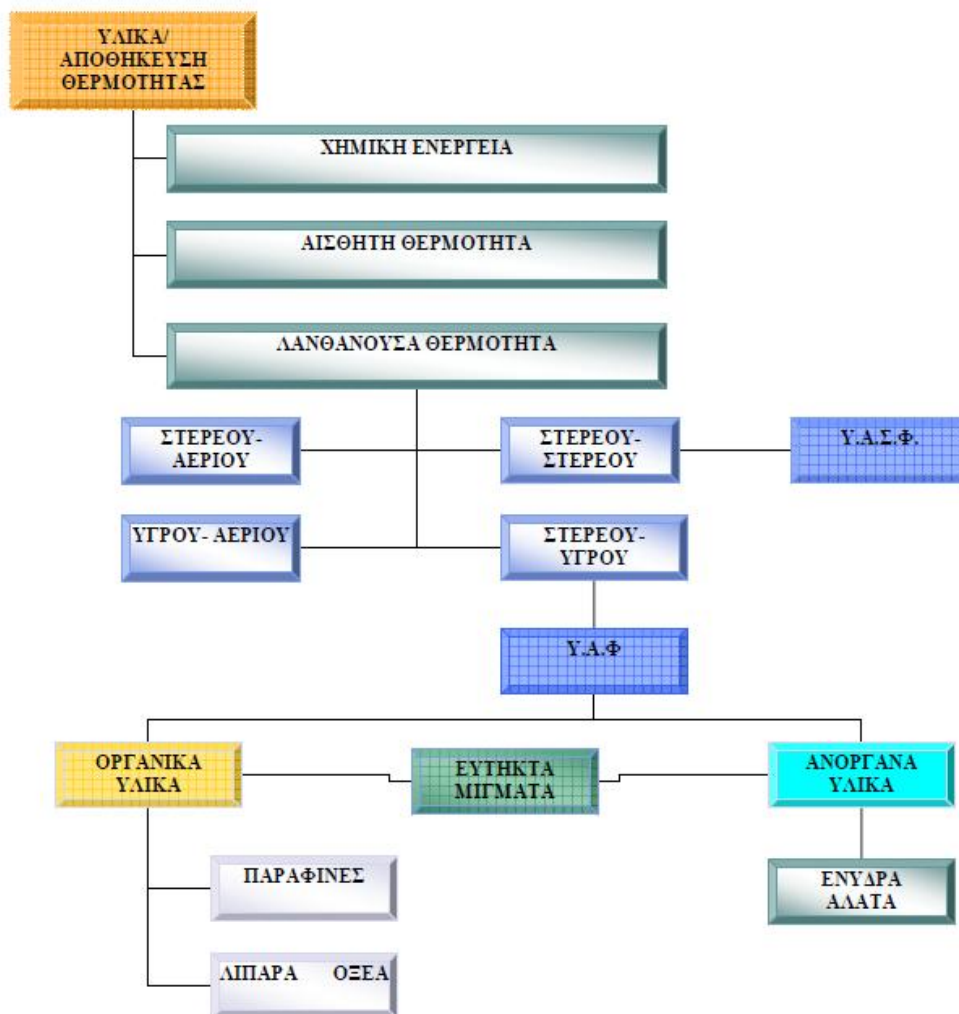
Από το σημείο αυτό και μετά η μέθοδοι αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας έγιναν σημαντικό κομμάτι του προγράμματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και άρχισαν να επενδύονται σημαντικά κονδύλια στην έρευνα και ανάπτυξη των συστημάτων αυτών. Από το 1973 και μετά ξεκινά η κυβερνητική χρηματοδότηση ερευνητικών προγραμμάτων πάνω στα ΥΑΦ σε χώρες όπως οι Η.Π.Α., η Αγγλία, η Γερμανία και η Γαλλία.

Αποτέλεσμα της ανάγκης για εύρεση ΥΑΦ, στα τέλη της δεκαετίας του 1970, κυβερνητικοί επιστημονικοί οργανισμοί των ΗΠΑ διεξήγαγαν πειράματα ελέγχοντας 20000 διαφορετικά υλικά ως προς τις προοπτικές που έδιναν για χρήση ως ΥΑΦ. Μόλις το 1% θεωρήθηκε υποψήφιο υλικό και συγκεκριμένα κάποια ένυδρα άλατα με την ιδιότητα της ομογενούς τήξης και συγκεκριμένες κατηγορίες οργανικών υλικών. Η μετέπειτα ερευνητική δραστηριότητα παγκοσμίως απέδειξε ότι όντως αυτά τα υλικά είναι τα πλέον κατάλληλα για τέτοιου είδους εφαρμογές.

2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα υλικά που αλλάζουν φάση και ειδικότερα αυτά που από στερεά μεταπίπτουν σε υγρά ομαδοποιούνται με βάση τη σύστασή τους σε οργανικά και ανόργανα υλικά.



Σχήμα 2.1 Ταξινόμηση υλικών αλλαγής φάσης [1].

Η κατηγορία των οργανικών υλικών αντιπροσωπεύεται κυρίως από τις παραφίνες (κορεσμένοι υδρογονάνθρακες) και τα μικροκρυσταλλικά κεριά (μίγματα παραφινών με αριθμό ατόμων άνθρακα από 19 έως και 25) καθώς και από τα λιπαρά οξέα, εστέρες και αλκοόλες λιπαρών οξέων ή και μίγματα αυτών, ενώ των ανόργανων υλικών κυρίως από τα διαλύματα των ένυδρων αλάτων.

Μία κατηγορία ΥΑΦ που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και βρίσκεται υπό έρευνα είναι η κατηγορία που περιλαμβάνει υλικά προερχόμενα από ανακυκλωμένα φυτικά ή ζωικά έλαια των οποίων η διαθεσιμότητα αυξάνεται, καθώς αυξάνεται ολοένα και περισσότερο η παγκόσμια παραγωγή απορριμμάτων τα οποία εμφανίζουν μεγάλη περιεκτικότητα σε τρόφιμα.

Άλλου τύπου κατηγοριοποίηση μπορεί να γίνει σύμφωνα με τις εφαρμογές που καλύπτουν. Τα ΥΑΦ μπορούν να ομαδοποιηθούν σύμφωνα με τη θερμοκρασία ή το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης, σε υλικά που αλλάζουν φάση κάτω από τους 15 °C και χρησιμοποιούνται για αποθήκευση ψύξης σε εφαρμογές κλιματισμού ή σε μεταφορά ευπαθών υλικών (ιατρικές εφαρμογές) και σε υλικά που αλλάζουν φάση πάνω από τους 90 °C και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ψύξης με απορρόφηση. Όλα τα άλλα υλικά με ενδιάμεσες τιμές θερμοκρασίας αλλαγής φάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές θέρμανσης σε συνεργασία με ηλιακά συστήματα ή εφαρμογές εξομάλυνσης των φορτίων κλιματισμού καθώς και για αποθήκευση θερμότητας.

2.2 ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

2.2.1 Γενικά

Τα οργανικά υλικά αντιπροσωπεύονται, όπως αναφέρθηκε ήδη, κυρίως από τις παραφίνες και τα μικροκρυσταλλικά κεριά, τα οποία είναι μίγματα παραφινών με αριθμό ατόμων άνθρακα από 19 έως 25. Εξίσου σημαντικές κατηγορίες οργανικών υλικών είναι τα λιπαρά οξέα, εστέρες και αλκοόλες λιπαρών οξέων ή και μίγματα αυτών. Τα εμπορικά προϊόντα οργανικών υλικών είναι αρκετά φθηνότερα από τα ένυδρα άλατα με μέτριες τιμές λανθάνουσας θερμότητας (περίπου 150 kJ/kg) και δυνατότητα παραγωγής 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, δυστυχώς όμως εμφανίζουν χαμηλή τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας, ιδιότητα που περιορίζει τις εφαρμογές τους (περίπου 0,2 W/mK). Γι' αυτό το λόγο έχουν εξεταστεί πολλές περιπτώσεις εμπλουτισμού του υλικού με μεταλλικά αντικείμενα διαφόρων σχημάτων

ή χρήση δοχείων και σωλήνων με πτερύγια με σκοπό την αύξηση του ρεύματος θερμότητας μέσα στο υλικό.

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). Επίσης μειονέκτημα είναι η αναφλεξιμότητά τους, παρόλο που είναι κοινή άποψη των ερευνητών της περιοχής, ότι η χαμηλή τάση ατμών της παραφίνης, δεν εγκυμονεί κινδύνους ανάφλεξης.

2.2.2 Παραφίνες

Παραφίνες ή αλκάνια ονομάζονται οι κορεσμένοι υδρογονάνθρακες με γενικό μοριακό τύπο C_nH_{2n+2} . Με τον όρο παραφίνη συνήθως αναφερόμαστε σε ένα γραμμικό (κανονικό) αλκάνιο, ενώ τα ισοαλκάνια ονομάζονται ισοπαραφίνες.

Το πλέον απλό αλκάνιο είναι το μεθάνιο, CH_4 . Δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των ατόμων που σχηματίζουν την ανθρακική αλυσίδα. Η ανθρακική αλυσίδα των κορεσμένων υδρογονανθράκων μπορεί να είναι γραμμική, ή με διακλαδώσεις, ή κυκλικού σχήματος.

Η κατά IUPAC ονοματολογία των αλκανίων, ονομάζει υπό τον γενικό τίτλο αλκάνια, όλες τις περιπτώσεις που υποπίπτουν στις δύο πρώτες κατηγορίες, ενώ ονομάζει κυκλοαλκάνια αυτές που σχηματίζουν βρόχο. Αντίστοιχα τα αλκύλια, είναι μέρη ανθρακικής αλυσίδας, με έναν ελεύθερο δεσμό και ακολουθούν πιστά την ονοματολογία των αλκανίων (μεθύλιο, αιθύλιο, κ.τ.λ.). Παρατηρούνται σαν πρόσθετα σε κύριες ανθρακικές αλυσίδες.

Σε κανονικές συνθήκες από CH_4 έως C_4H_{10} τα αλκάνια είναι αέρια. Από C_5H_{12} έως $C_{17}H_{36}$ είναι υγρά και από $C_{18}H_{38}$ και μετά είναι στερεά. Το σημείο βρασμού των αλκανίων γενικά αυξάνεται με το μοριακό βάρος, και μάλιστα η σχέση 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 περιέχονται στο μόριο του αλκανίου, τόσο υψηλότερο είναι 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, πράγμα που συνεπάγεται υψηλότερη απαιτούμενη προσθήκη θερμότητας για να σπάσουν οι δεσμοί και να επιτευχθεί η μετάβαση στην υγρή φάση.

Το σημείο τήξης των παραφινών εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των ατόμων άνθρακα του μορίου. Αλκάνια με αριθμό ατόμων άνθρακα από 14-40 έχουν σημεία τήξης από 6 έως 80°C.

Αυτές ονομάζονται καθαρές παραφίνες και δεν έχουν σχέση με τα κεριά παραφίνης, όπως ονομάζονται οι παραφίνες με αριθμό ατόμων άνθρακα από 8 έως 15, και χαμηλότερα σημεία τήξης από τις καθαρές παραφίνες, από 2 έως 45°C. Δεν είναι διαλυτές στο νερό, αλλά διαλύονται στους αιθέρες, στο βενζόλιο, και σε συγκεκριμένους εστέρες. Δεν αντιδρούν με τα περισσότερα χημικά αντιδραστήρια, αλλά στην υγρή φάση τους είναι ιδιαίτερος εύφλεκτες.

Οι παραφίνες είναι ιδανικά υλικά για χρήση ως ΥΑΦ. Έχουν μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος και μπορούν να δημιουργηθούν, μέσω μιγμάτων, υλικά κατάλληλα να καλύψουν οποιοδήποτε εύρος θερμοκρασιών, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Είναι οργανικές ουσίες, επομένως είναι 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, πράγμα που από μόνο του 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.

Οι παραφίνες παρουσιάζουν χαμηλή πίεση ατμοποίησης, γεγονός που ερμηνεύει τις ελάχιστες απώλειες υλικού σε ένα μεγάλο βάθος χρόνου χρήσης. Το πλεονέκτημα αυτό κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό για τις εφαρμογές όπου απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός κυκλικών φορτίσεων του υλικού. Για παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε την εφαρμογή στην τοιχοποιία, όπου απαιτούμε περισσότερα από 25 έτη ζωής. Επιπλέον δεν παρουσιάζουν προβλήματα διάβρωσης με κανένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μέταλλο.

Θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο ότι οι παραφίνες πραγματοποιούν ολοκληρωμένα την αλλαγή φάσης σε θερμοκρασιακό εύρος περίπου 10°C (περίπου 9 °C πριν το σημείο τήξης και 1°C μετά από αυτό). Ένα τέτοιο φαινόμενο αν δεν ληφθεί υπόψη μπορεί να οδηγήσει σε μη σωστή εκλογή υλικού με αποτέλεσμα μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με τις αναμενόμενες τιμές. Η ύπαρξη πληθώρας ουσιών 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 ΥΑΦ, όταν αυτό βρίσκεται στην υγρή φάση.

2.2.3 Λιπαρά Οξέα

Στην Οργανική Χημεία και ειδικότερα στη Βιοχημεία, λιπαρό οξύ ονομάζεται ένα καρβοξυλικό οξύ, συνήθως με μακρά 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.

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.

Ενδεικτικά κορεσμένα λιπαρά οξέα είναι:

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

- Ø Άλφα-λινολεϊκό οξύ:
 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
- Ø Λινολεϊκό οξύ: $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
- Ø 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. Το Βουτυρικό οξύ για παράδειγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κτιριακές εφαρμογές και έχει χρησιμοποιηθεί σε πειράματα, όμως το κόστος του είναι τουλάχιστον 2 με 2,5 φορές μεγαλύτερο από την παραφίνη με αντίστοιχες θερμικές

ιδιότητες. Αντίστοιχα, υπάρχουν λίγα λιπαρά οξέα τα οποία να είναι κατάλληλα για κτιριακές εφαρμογές, πράγμα που γίνεται εύκολα κατανοητό ότι είναι σημαντικό μειονέκτημα έναντι των παραφινών.

Οι δύο επικρατέστεροι υποψήφιοι από αυτά τα υλικά για χρήση σε κτιριακές θερμικές εφαρμογές είναι το Καπρικό Οξύ (σημείο τήξης 31.5°C) και το Καπριλικό Οξύ (σημείο τήξης 16.5°C).

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 που όπως γίνεται κατανοητό περιορίζει δραματικά τη χρησιμότητα του χώρου στον οποίο αυτά εγκαθίστανται.

Παρόλα αυτά, τα παραπάνω προβλήματα θα μπορούσαν να ξεπεραστούν με κάποιου είδους συσκευασία, δίνοντας έτσι ένα ΥΑΦ φτηνό, χημικά σταθερό, ιδανικό για κτιριακές εφαρμογές.

2.3 ΑΝΟΡΓΑΝΑ ΥΛΙΚΑ

Τα ένυδρα άλατα είναι ο κύριος εκπρόσωπος ανόργανων υλικών και παρουσιάζουν αρκετά καλές ιδιότητες (τιμή λανθάνουσας θερμότητας περίπου 250 kJ/kg και αγωγιμότητας 0.6 W/mK περίπου), μέτριο κόστος παραγωγής σε σχέση με 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.

Τα ένυδρα άλατα έλαβαν μέρος σε αναρίθμητες μελέτες γύρω από τη χρησιμοποίησή τους σαν ΥΑΦ. Ο κύριος λόγος είναι το σχετικά μεγάλο εύρος σημείων τήξης που διαθέτουν, σχεδόν από 0 έως 120°C, πράγμα που τα κάνει κατάλληλα για πολλές θερμικές εφαρμογές και όχι μόνο για κτίρια. Ο χημικός τύπος (γενικός) είναι $M \cdot nH_2O$, όπου M είναι μία ανόργανη ουσία, ενυδατωμένη με n μόρια νερού, και σχηματίζει μία σύνθετη ουσία ικανή να αποθηκεύσει μεγάλο ποσό θερμότητας υπό μορφή λανθάνουσας.

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

Βασικά μειονεκτήματα των ανόργανων ΥΑΦ είναι, κυρίως για τα ένυδρα άλατα, η ασυμβατότητα του ΥΑΦ με τα υλικά συσκευασίας, γεγονός που οδηγεί σε διαβρωτικά φαινόμενα στο δοχείο, καθώς τα ένυδρα άλατα είναι ιδιαίτερα διαβρωτικά.

Τα ένυδρα άλατα εμφανίζουν και άλλα προβλήματα όπως για παράδειγμα η αφυδάτωση του ένυδρου άλατος, λόγω συνεχούς και μακράς χρήσης, κατά την οποία οι φάσεις του ΥΑΦ διαχωρίζονται κυρίως λόγω της πίεσης των ατμών του νερού, φαινόμενο το οποίο αντιμετωπίζεται με τη χρήση αεροστεγών δοχείων αποθήκευσης. Το φαινόμενο της αποσύνθεσης του ΥΑΦ ή αλλιώς του διαχωρισμού των φάσεών του, είναι σοβαρό πρόβλημα και συμβαίνει λόγω της ανομοιομορφίας στην τήξη του υλικού, διαδικασία η οποία είναι μη αντιστρεπτή.

Το άλας του Glauber ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), με τυπική κατά βάρος σύσταση 44% Na_2SO_4 και 56% H_2O είναι ένα από τα πλέον μελετημένα υλικά με θερμοκρασία τήξης $32,4^\circ\text{C}$ και λανθάνουσα θερμότητα 254 kJ/kg. Αν και είναι ένα από τα φθηνότερα υλικά που κυκλοφορούν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση ενέργειας, τα προβλήματα διαχωρισμού των φάσεων, ο σχηματισμός ιζήματος και το φαινόμενο 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 αυτού έχει χρησιμοποιηθεί πληθώρα υλικών για την σταθεροποίηση του ΥΑΦ, προσπαθώντας παράλληλα να αυξηθεί η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας.

Συμπερασματικά, 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. Προφανώς, βασικό πλεονέκτημα των ένυδρων αλάτων έναντι των παραφινών όσον αφορά στις κτιριακές κυρίως εγκαταστάσεις είναι η μη αναφλεξιμότητά τους.

Στο πλαίσιο αναφοράς των ιδιοτήτων δεν θα πρέπει να παραλειφθεί ο ρόλος της πυκνότητας των υλικών, σημαντικός παράγοντας όταν τα υλικά χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις ή εφαρμογές που από τη φύση τους απαιτούν οικονομία χώρου.

Σε γενικές γραμμές τα ένυδρα άλατα είναι πυκνότερα υλικά από τα υπόλοιπα ΥΑΦ και παρουσιάζουν ιδιαίτερα αυξημένες τιμές αποθήκευσης ενέργειας ανά μονάδα όγκου υλικού.

Ενδεικτικές τιμές πυκνότητας των βασικών κατηγοριών ΥΑΦ:

- Ø Ένυδρα άλατα περίπου 1500 kg/m^3
- Ø Λιπαρά οξέα περίπου 900 kg/m^3
- Ø Παραφίνες περίπου 800 kg/m^3

Μια άλλη κατηγορία ανόργανων ΥΑΦ είναι τα μεταλλικά. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τα χαμηλής θερμοκρασίας τήξης μέταλλα και ευτηκτικά μεταλλικά μείγματα. Τα μεταλλικά ΥΑΦ δεν έχουν ακόμη εξεταστεί σοβαρά λόγω του βάρους. Ωστόσο, όταν απαιτούνται υλικά με μεγάλη συγκέντρωση όγκου, είναι πιθανοί υποψήφιοι λόγω της υψηλής θερμότητας τήξης ανά μονάδα όγκου. Μερικά από τα πλεονεκτήματα τους είναι ότι έχουν υψηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας, χαμηλή θερμοκρασία τήξης ανά μονάδα βάρους, υψηλή θερμοκρασία τήξης ανά μονάδα όγκου και σχετικά χαμηλή πίεση ατμού.

2.4 ΕΥΤΗΚΤΑ ΜΙΓΜΑΤΑ

Εύτηκτα ονομάζονται τα μίγματα ΥΑΦ, τα οποία μπορεί να είναι είτε οργανικά, είτε ανόργανα ή ακόμα και μίγμα ανόργανων με οργανικά ΥΑΦ. Προφανές είναι πως τα εύτηκτα ΥΑΦ αναπτύχθηκαν λόγω των δυνατοτήτων που παρέχουν στους σχεδιαστές ώστε να επιτύχουν τα επιθυμητά σημεία τήξης για την κάθε εφαρμογή.

Θεωρείται δε ότι συμπεριφέρονται και αντιμετωπίζονται σαν ένυδρα άλατα. Βασικό πλεονέκτημα με τα εύτηκτα ΥΑΦ είναι ότι εμφανίζουν την τάση να συγκεντρώνουν τα πλεονεκτήματα και των δύο ομάδων, ενώ παράλληλα δεν έχουν την τάση να κάνουν το ίδιο με τα μειονεκτήματα. Το βασικό τους μειονέκτημα όμως είναι το κόστος παραγωγής, το οποίο είναι διπλάσιο έως τριπλάσιο απ' ότι των οργανικών και ανόργανων ΥΑΦ.

2.5 ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΕΡΕΗΣ ΦΑΣΗΣ

Σε περιπτώσεις αλλαγής φάσης στερεού-στερεού (ΥΑΣΦ), η θερμότητα αποθηκεύεται καθώς το υλικό μεταπίπτει από τη μία κρυσταλλική δομή σε κάποια άλλη. Παρόλο που οι περισσότερες τέτοιες μεταπτώσεις εμφανίζουν μικρή αποθηκευτική ικανότητα υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας και μικρή ογκομετρική αλλαγή, υπάρχουν μεταπτώσεις οι οποίες περιλαμβάνουν μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα, σχεδόν όσο και μία μετάπτωση από στερεό σε υγρό.

Τα πλεονεκτήματα αυτών των ΥΑΦ είναι προφανή, καθώς δεν περιλαμβάνεται κανένας από τους περιορισμούς των υπολοίπων υλικών, όπως για παράδειγμα της μεγάλης ογκομετρικής αλλαγής, της τάσης ατμών, της διαρροής ή της διάβρωσης. Δεν είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα και ακόμη βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο.

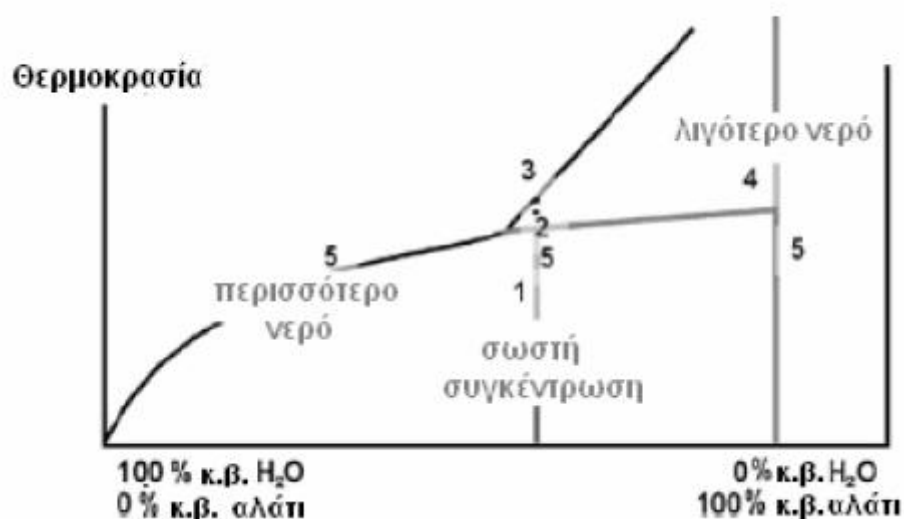
2.6 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΥΑΦ

Στη συνέχεια αναλύονται ορισμένα από τα βασικότερα προβλήματα που εμφανίζονται κατά τη χρήση των υλικών που μελετήθηκαν παραπάνω ως υλικά αλλαγής φάσης.

2.6.1 Διαχωρισμός φάσεων

Το φαινόμενο του διαχωρισμού φάσης (ή δυσαρμονική τήξη), στη διεθνή βιβλιογραφία είναι γνωστό ως phase separation ή semi congruent melting. Είναι ένα από τα βασικότερα προβλήματα που εμφανίζονται στα ΥΑΦ, ιδιαίτερα μάλιστα σε αυτά που αποτελούνται από παραπάνω από δύο συστατικά όπως τα ένυδρα άλατα. Το φαινόμενο του διαχωρισμού φάσης οφείλεται στην μεγάλη θερμοαποθηκευτική ικανότητα των ένυδρων αλάτων που είναι δύσκολο να διατηρηθεί καθώς μειώνεται με τους κύκλους φόρτισης του υλικού. Κύρια αιτία εκφυλισμού των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών είναι ο διαχωρισμός των φάσεων του υλικού και ο πιθανός σχηματισμός άνυδρων αλάτων με δημιουργία ιζήματος. Το φαινόμενο λαμβάνει χώρα λόγω του ότι τα ένυδρα άλατα τήκονται σύμφωνα με το κατώτερο συστατικό του μίγματος, δημιουργώντας μη αναστρέψιμη διαδικασία που οδηγεί σε συνεχή εξασθένηση των ιδιοτήτων τους.

Το φαινόμενο του διαχωρισμού των φάσεων γίνεται κατανοητό αν μελετήσουμε το διάγραμμα ισορροπίας φάσεων ενός ένυδρου αλάτος (σχήμα 2.2)



Σχήμα 2.2 Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων σε ένυδρο αλάτι [10].

Το μονοφασικό μίγμα κατάστασης 1 (στερεό) θερμαίνεται μέχρι τη θερμοκρασία στο σημείο 2. Από το σημείο 3 και πάνω, έχουμε τμήσει την γραμμή *liquidus* οπότε το υλικό είναι εξολοκλήρου σε υγρή κατάσταση. Κατά τη θέρμανση ή ψύξη μεταξύ των σημείων 2 και 3, σχηματίζονται δύο φάσεις, μία υγρή και μια άλλη φάση με κάποιο μικρό ποσοστό νερού (σημείο 4). Αν αυτές οι δύο φάσεις διαφέρουν σε πυκνότητα, τότε υπάρχει περίπτωση να έχουμε μακροσκοπικό διαχωρισμό των φάσεων και συνεπώς οι δύο φάσεις θα έχουν διαφορετικές συγκεντρώσεις στη δομή του ΥΑΦ (σημείο 5).

Για την αποφυγή τέτοιων φαινομένων διαχωρισμού φάσεων χρησιμοποιούνται κολλοειδή προσθετικά (*gelling additives*), τα οποία δημιουργούν μια δομή γύρω από τις φάσεις των συστατικών του υλικού και δεν επιτρέπουν τη διέλευση φάσεων με διαφορετικές πυκνότητες διαμέσου της δομής τους.

Σε κάποιες περιπτώσεις το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με τη χρήση χημικών ουσιών στο αρχικό ΥΑΦ. Η προσθήκη των ουσιών αυτών αλλάζει το διάγραμμα φάσεων του ΥΑΦ με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτρέπεται εντελώς η εμφάνιση των διαφορετικών φάσεων.

2.6.2 Μικρή τιμή της θερμικής αγωγιμότητας

Η χαμηλή τιμή της θερμικής αγωγιμότητας του ΥΑΦ είναι μια εγγενής ιδιότητα των μη μεταλλικών υγρών. Το πρόβλημα έγκειται στο ότι το ΥΑΦ 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. Τρόποι βελτίωσης της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας του υλικού είναι οι ακόλουθοι:

- Ø Χρήση του μηχανισμού της συναγωγής η οποία μπορεί να ενισχύσει σημαντικά τη μεταφορά θερμότητας. Αυτό μπορεί να γίνει κατά την υγρή φάση μόνο άρα δεν είναι αρκετό καθώς στη στερεά φάση, δεν υπάρχει συναγωγή.
- Ø Βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας μέσω της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη αντικειμένων με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα στο ΥΑΦ. Παραδείγματα τέτοιων αντικειμένων είναι οι μεταλλικές πλάκες, τα πτερύγια, τα μεταλλικά πλέγματα κ.τ.λ.

2.6.3 Υπόψυξη-Υπέρψυξη

Ένα βασικό πρόβλημα που εμφανίζεται κυρίως στα ανόργανα ένυδρα άλατα αλλά και σε κάποια οργανικά ΥΑΦ είναι το φαινόμενο της υπέρψυξης (*supercooling*) ή υπόψυξης (*subcooling*). Ένα ιδανικό υλικό αλλαγής φάσης θα έπρεπε να στερεοποιείται και να τήκεται στην ίδια θερμοκρασία. Κάποια υλικά δεν στερεοποιούνται αμέσως, εάν η

θερμοκρασία του υλικού είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία τήξης, το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υπόψυξη ή υπέρψυξη. Κατά τη διάρκεια της υπέρψυξης το υλικό βρίσκεται σε μια μετασταθή κατάσταση.

Το φαινόμενο της υπόψυξης όσο εντείνεται κάνει λιγότερο αποδοτική τη λειτουργία του ΥΑΦ και κατά συνέπεια την αξιοποίηση της αποθηκευμένης ενέργειας. Λόγω του supercooling η λανθάνουσα θερμότητα αποδίδεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από την επιθυμητή ή σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών. Η ένταση του φαινομένου supercooling σε ένα υλικό μετράται με μία παράμετρο που λέγεται βαθμός του supercooling. Η παράμετρος αυτή δεν είναι φυσική ιδιότητα του υλικού με σταθερή τιμή αλλά εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως ο όγκος του δείγματος, η «καθαρότητα» του υλικού, ο ρυθμός ψύξης, η επιφάνεια του δοχείου αποθήκευσης.

Το φαινόμενο είναι δυνατόν να περιορισθεί με χρήση ενός πυρήνα (nucleator), ο οποίος προστίθεται στο ΥΑΦ για να εξασφαλίσει ότι η στερεή φάση θα σχηματισθεί με μηδαμινή ή ακόμα και καθόλου υπόψυξη.

2.6.4 Διάβρωση

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

Σε πολλές θερμικές εφαρμογές με ΥΑΦ ο γραφίτης χρησιμοποιείται για την βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας. Παρόλα αυτά ενισχύει και το φαινόμενο της οξειδωσης, όπου και όταν αυτό εμφανίζεται.

2.6.5 Συμβατότητα των ΥΑΦ με άλλα υλικά

Η συμβατότητα των ΥΑΦ με άλλα υλικά είναι σημαντική τόσο για τη διάρκεια ζωής του δοχείου ή της κάψουλας που φέρει το ΥΑΦ όσο και για μία πιθανή διαρροή του τήγματος προς τον περιβάλλοντα χώρο όπου μπορεί να προξενήσει προβλήματα. Τα πιο συνήθη προβλήματα αναφορικά με τη συμβατότητα των υλικών και τα ΥΑΦ είναι τα ακόλουθα :

- ⊗ Διάβρωση των μετάλλων όταν έρθουν σε επαφή με ανόργανα ΥΑΦ.
- ⊗ Απώλεια σταθερότητας δομής των πλαστικών όταν έρχονται σε επαφή με οργανικά ΥΑΦ..

- Ø Μετακίνηση υγρών ή αερίων διαμέσου πλαστικών δοχείων, τα οποία επηρεάζουν τη δομή του περιεχόμενου ανόργανου ή οργανικού ΥΑΦ.

2.6.6 Σταθερότητα θερμικών ιδιοτήτων

Το σοβαρότερο κριτήριο για την αξιοποίηση των ΥΑΦ σε βιομηχανικές εφαρμογές είναι ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών, χωρίς εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους, ο οποίος μετριέται καλύτερα σε κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης του υλικού παρά σε πραγματικό χρόνο. Η ανεπάρκεια σταθερότητας των υλικών οφείλεται σε δύο λόγους:

- Ø Στη χαμηλή σταθερότητα της χημικής σύνθεσης του υλικού ή των υλικών που αποτελούν το ΥΑΦ.
- Ø Στο φαινόμενο της διάβρωσης που πιθανόν να λάβει χώρα μεταξύ του ΥΑΦ και των υλικών που έρχεται σε επαφή.

Το μεγαλύτερο μέρος των ερευνών που ως αντικείμενο αναφοράς έχουν την διατήρηση των ιδιοτήτων των ΥΑΦ κατά την περιοδική φόρτιση και αποφόρτισή τους ή τη διαβρωτική τους ικανότητα αφορούν τα ένυδρα άλατα. Για τις παραφίνες και τα παράγωγα υλικά τους έχει βρεθεί ότι έχουν άριστη σταθερότητα στις θερμικές τους ιδιότητες καθώς επίσης και καμία επίδραση όταν έρχονται σε επαφή με τα περισσότερα υλικά (μέταλλα αλλά και δομικά υλικά). Αντιθέτως τα ένυδρα άλατα παρουσιάζουν διαβρωτικές τάσεις όταν έρχονται σε άμεση επαφή με τα περισσότερα διαδεδομένα μέταλλα.

2.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΩΝ ΥΑΦ

Συγκεντρωτικά για τις δύο βασικές κατηγορίες ΥΑΦ παρατίθενται τα σημαντικότερα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα της κάθε κατηγορίας. Σημειώνεται εδώ ότι κάθε εφαρμογή στην οποία εισάγεται ένα ΥΑΦ, έχει ξεχωριστές παραμέτρους και ιδιαιτερότητες, οπότε τα ακόλουθα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα έχουν διαφορετική βαρύτητα από εφαρμογή σε εφαρμογή.

Οργανικά ΥΑΦ

Πλεονεκτήματα:

- Ø Μη διαβρωτικά με τα περισσότερα υλικά
- Ø Μικρός κίνδυνος ρύπανσης του νερού
- Ø Μικρής τάξης ή καθόλου εμφάνιση του φαινομένου supercooling
- Ø Χημική και θερμική σταθερότητα
- Ø Χαμηλό κόστος αγοράς σχετικά με τις υπόλοιπες κατηγορίες ΥΑΦ
- Ø Παραγωγή υλικών σε διάφορες εμπορικές εφαρμογές (σκόνη, κόκκοι, πλάκες)

Μειονεκτήματα:

- Ø Λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης χαμηλότερη από τα ανόργανα
- Ø Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας χαμηλότερος από τα ανόργανα
- Ø Αναφλέξιμα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (200 °C)
Πυκνότητα χαμηλότερη από τα ανόργανα

Ανόργανα ΥΑΦ

Πλεονεκτήματα:

- Ø Μεγαλύτερη τιμή λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης (σε σύγκριση με τα οργανικά)
- Ø Μη αναφλέξιμα
- Ø Πυκνότητα υψηλότερη από τα οργανικά

Μειονεκτήματα:

- Ø Διαβρωτικά (απαραίτητη αποθήκευση υλικών σε ενισχυμένη συσκευασία)
- Ø Εμφάνιση supercooling
- Ø Διαχωρισμός των φάσεων (μεταβλητή τιμή διαλυτότητας με τη θερμοκρασία), δυνατή δημιουργία ιζήματος
- Ø Αβέβαιη θερμική σταθερότητα σε κυκλική φόρτιση
- Ø Αρκετά μεγαλύτερο κόστος αγοράς από τα οργανικά
- Ø Υδροσκοπικά υλικά με αποτέλεσμα εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους σε βάθος χρόνου αν μείνουν εκτεθειμένα σε περιβάλλον με υγρασία

3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΥΑΦ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ο υπολογισμός των ιδιοτήτων ενός ΥΑΦ είναι εξαιρετικής σημασίας ζήτημα για την επιλογή του κατάλληλου υλικού για κάθε εφαρμογή. Οι κυριότερες ιδιότητες του υλικού που πρέπει να εξετάζονται είναι:

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

Οι ιδιότητες των ΥΑΦ εξετάζονται με δύο κατηγορίες μεθόδων:

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

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

- Ø Συμβατική θερμιδομετρική μέθοδος (Conventional Calorimetry Method)
- Ø Ψηφιακό Θερμιδόμετρο (Differential Scanning Calorimetry - DSC)
- Ø Διαφορική θερμική ανάλυση (Differential Thermal Analysis - DTA)
- Ø Μέθοδος T-history
- Ø Μέθοδος double-cell

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

- Ø Το δείγμα που χρησιμοποιείται είναι πολύ μικρό, γεγονός που είναι αντίθετο με τη γνώση ότι ορισμένες 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.

- Ø Σε μία μέτρηση δεν μπορούν να μετρηθούν ταυτόχρονα πολλά δείγματα αλλά θα πρέπει να επαναλαμβάνεται το πείραμα για κάθε καινούριο δείγμα.
- Ø Ο εξοπλισμός που απαιτείται για τη διεξαγωγή των πειραμάτων και των μετρήσεων είναι πολύπλοκος και πολυδάπανος.

Στην περίπτωση που έχουμε εγκατάσταση θερμικής αποθήκευσης για θέρμανση και ψύξη με εγκλεισμένο σε κέλυφος ΥΑΦ (encapsulated), είναι δύσκολη η ακριβής μαθηματική ανάλυση της μεταφερόμενης θερμότητας. Για τον λόγο αυτό είναι αναγκαίο να γίνει και μακροσκοπική ανάλυση με μια μετρητική εγκατάσταση.

Βασικό τμήμα της πειραματικής διάταξης είναι ο θάλαμος όπου τοποθετείται το ΥΑΦ. Στον θάλαμο αυτό εισέρχεται αέρας με γνωστή θερμοκρασία και παροχή ώστε να είναι δυνατή η διερεύνηση της μεταφοράς θερμότητας και άλλων παραγόντων που επηρεάζουν την μεταφερόμενη ισχύ, όπως η επίδραση της υπόψυξης και η επίδραση διαφόρων υλικών κελύφων.

3.2 ΨΗΦΙΑΚΟ ΘΕΡΜΙΔΟΜΕΤΡΟ

Το Θερμιδόμετρο Διαφορικής Ανάλυσης (DSC) είναι ένα όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών των ΥΑΦ. Μπορεί να αποδώσει γραφήματα θερμορροής-θερμοκρασίας, με την παρακάτω διαδικασία:

Γνωστή ποσότητα μάζας ΥΑΦ τοποθετείται σε κλειστό δοχείο με γνωστό όγκο. Αυτό το δοχείο, όπως και άλλο ένα ίδιο, άδειο, τοποθετούνται ρυθμό, μετράται πόσο περισσότερη θερμότητα απαιτεί το υπό μελέτη δοχείο ώστε να διατηρεί τη θερμοκρασία του σταθερή και ίδια με του άδειου δοχείου. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνει συνεχώς, σε κάποιο σημείο θα φτάσει τη θερμοκρασία τήξης του ΥΑΦ.

Η μετάβαση στην υγρή φάση είναι μία ενδόθερμη διαδικασία, δηλαδή απαιτείται απορρόφηση θερμότητας από το ΥΑΦ, και απαιτείται πρόσθετη θερμότητα για την τήξη του υλικού, σε σύγκριση πάντα με το άδειο δοχείο. Η στερεοποίηση του ΥΑΦ συμβαίνει όταν το υλικό ψύχεται με σταθερό ρυθμό, και εμφανίζεται επίσης σαν τοπικό ακρότατο στο παραπάνω διάγραμμα. Η στερεοποίηση είναι εξώθερμη διαδικασία. Οι λανθάνουσες θερμότητες τήξης και στερεοποίησης προσδιορίζονται ποσοτικά από το εμβαδό του γραφήματος στα δύο ακρότατα αντίστοιχα, και το αποτέλεσμα δίνεται από τη διαίρεση του

εμβαδού αυτού δια του γινομένου του ρυθμού θέρμανσης (ψύξης) επί τη μάζα του δείγματος. Η διαφορά της θερμοκρασίας στο ακρότατο με την αντίστοιχη θεωρητική θερμοκρασία αλλαγής φάσης, δίνει το βαθμό της υπέρψυξης.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι θερμοκρασιακού προγράμματος οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια.

DSC με σταθερό ρυθμό ψύξης και θέρμανσης (δυναμική μέτρηση θερμοχωρητικότητας, dynamic DSC)

Γίνεται εφαρμογή θερμοκρασιακού προγράμματος σταθερού ρυθμού ψύξης ή θέρμανσης για τον υπολογισμό της ειδικής θερμοχωρητικότητας C_p . Για τις συνήθεις εφαρμογές, οι τυπικές τιμές του ρυθμού ψύξης ή θέρμανσης κυμαίνονται στο διάστημα 2 έως 10 °C/min . Το σήμα που λαμβάνεται, κατά την μέτρηση, είναι ανάλογο προς την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ μετρούμενου δείγματος και δείγματος αναφοράς. Έτσι, με την βοήθεια ενός δείγματος αναφοράς, του οποίου είναι επακριβώς γνωστή η καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας σε σχέση με την θερμοκρασία, υπολογίζεται η αντίστοιχη $C_p(T)$ για το μετρούμενο δείγμα.

Η εφαρμογή της μεθόδου DSC σταθερού ρυθμού ψύξης και θέρμανσης δεν ενδείκνυται για την μέτρηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας των ΥΑΦ, γιατί κατά την αλλαγή φάσης, το δείγμα δεν βρίσκεται σε θερμική ισορροπία και έχουμε σημαντική κατανομή της θερμοκρασίας, μέσα σε αυτό. Για αυτό τον λόγο οδηγούμαστε σε εσφαλμένα αποτελέσματα, των οποίων η απόκλιση εξαρτάται από το μέγεθος του δείγματος, από τον ρυθμό θέρμανσης, από το μέγεθος της θερμοχωρητικότητας και από την θερμική αγωγιμότητα.

DSC ισόθερων βημάτων (isothermal steps mode)

Στην περίπτωση αυτή το δείγμα θερμαίνεται βηματικά ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Το δείγμα ακολουθεί τα βήματα με κάποια χρονική υστέρηση και έτσι παράγεται το σήμα εξόδου. Όταν θα φτάσει το δείγμα σε θερμική ισορροπία, το σήμα μηδενίζεται και ακολουθεί το επόμενο ισόθερμο βήμα. Το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη του σήματος είναι ανάλογο της, εκ του δείγματος, απορροφούμενης θερμότητας, στο συγκεκριμένο ισόθερμο βήμα.

Η εφαρμογή της DSC ισόθερων βημάτων είναι πιο χρονοβόρα και πιο περίπλοκη κατά την επεξεργασία από ότι η δυναμική μέτρηση θερμοχωρητικότητας. Το μεγάλο πλεονέκτημα, σε σύγκριση με την δυναμική μέτρηση, είναι ότι η απόκλιση στην μέτρηση της θερμοκρασίας του δείγματος είναι επακριβώς γνωστή αφού σχετίζεται με το μέγεθος του ισόθερου βήματος. Έτσι με ελάττωση του μεγέθους του βήματος επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια.

Παράγοντες οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν της μετρήσεις της μεθόδου, είναι:

- Ø Λανθασμένη τοποθέτηση του δείγματος στην πλατφόρμα του DSC
- Ø Μη καθαρότητα και μη ικανή ποσότητα μάζας υλικού.
- Ø Ρυθμός θέρμανσης. Ένας γρήγορος ρυθμός θέρμανσης μπορεί να ελαχιστοποιήσει τα λαμβανόμενα αποτελέσματα και να έχει σαν αποτέλεσμα να μην αποδοθούν σωστά οι ιδιότητες του υπό μελέτη υλικού.

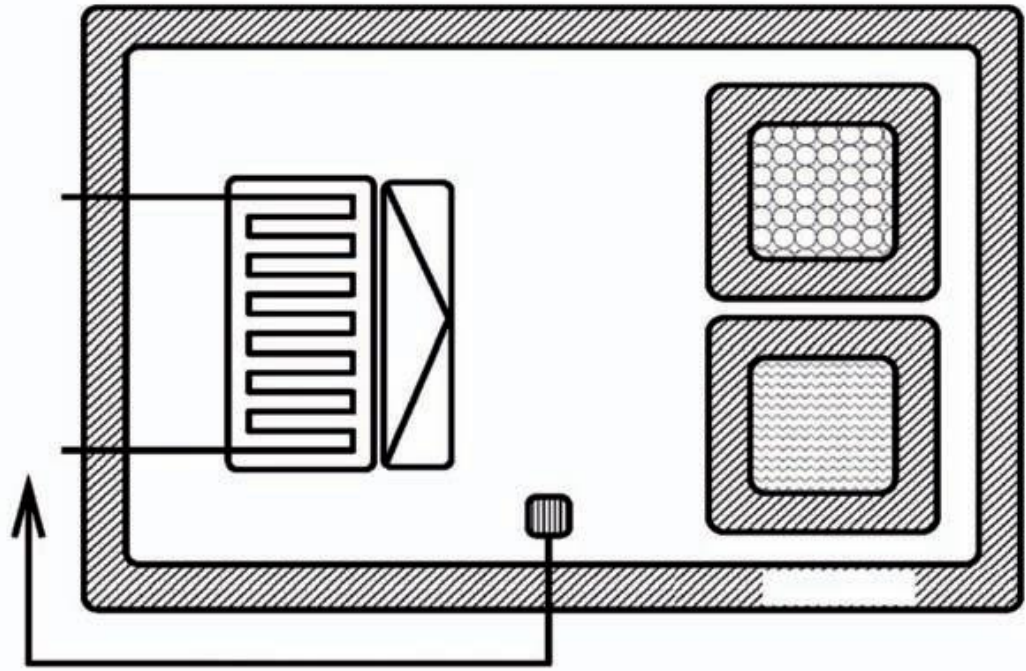
Ο πρωταρχικός σχεδιασμός της συσκευής αυτής δεν αναφερόταν στα ΥΑΦ. Η χρήση του ψηφιακού θερμοδομέτρου για τη θερμική ανάλυση των ΥΑΦ τίθεται υπό αμφισβήτηση γιατί κυρίως αδυνατεί να παράσχει χρήσιμες πληροφορίες για το φαινόμενο της υπέρψυξης. Η λανθάνουσα θερμότητα και το σημείο τήξης προσδιορίζονται καλύτερα με τη μέθοδο της θερμικής ανάλυσης. Με βάση την επιτυχημένη εφαρμογή των ένυδρων αλάτων σαν ΥΑΦ σε εμπορικές εφαρμογές, η αποτυχία στην επίτευξη σταθερότητας στις μετρήσεις με ψηφιακό θερμοδομέτρο, κατέστησε ύποπτη την ίδια τη μέθοδο.

Στη μέθοδο του ψηφιακού θερμοδομέτρου οι θερμοκρασιακές αλλαγές είναι πολύ γρήγορες και το δείγμα πολύ μικρό, για να μπορεί να συσχετιστεί καλά με τις συνθήκες που επικρατούν στην πράξη. Επίσης, η θέση του αισθητήρα θερμοκρασίας στο ψηφιακό θερμοδομέτρο είναι επίσης θέμα προς εξέταση.

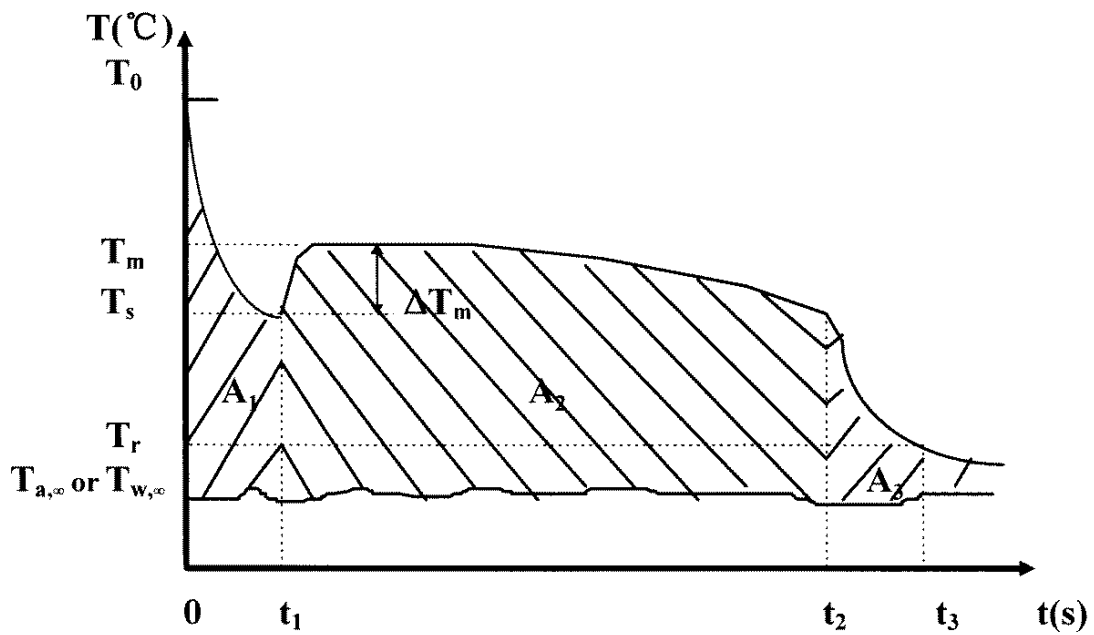
3.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ T-HISTORY

Μία μέθοδος μετρήσεων που χρησιμοποιείται επιτυχώς είναι η μέθοδος t-history, η οποία προτάθηκε από τους Zhang Yinping και Jiang Li [11]. Για την εφαρμογή της μεθόδου, αναμένονται θετικά αποτελέσματα, μόνο στις περιπτώσεις όπου ο αριθμός Biot είναι μικρότερος του 0.1, περιορισμός που τίθεται εξαιτίας της υπόθεσης μιας ομοιόμορφης θερμοκρασίας του ΥΑΦ σε έναν σωλήνα δοκιμής κατά την αποφόρτιση.

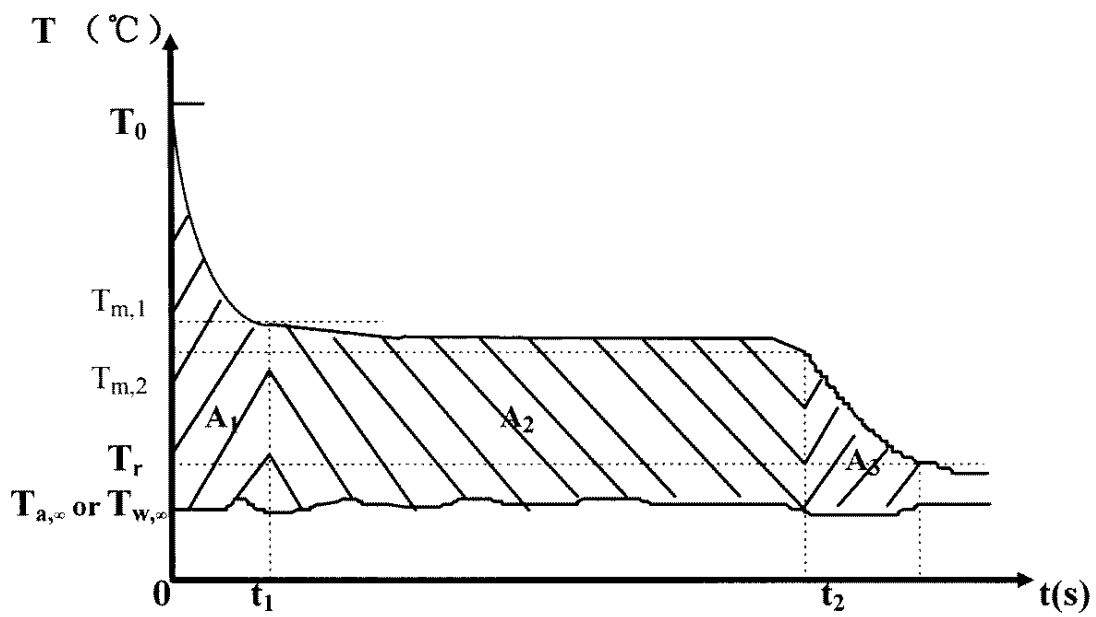
Οι σωλήνες δοκιμής γεμίζονται αντίστοιχα με το ΥΑΦ και με το υλικό αναφοράς (συνήθως χρησιμοποιείται καθαρό νερό) του οποίου οι θερμοκρασίες παραμένουν αρχικά ίδιες και μεγαλύτερες από τη χαμηλή θερμοκρασία του ΥΑΦ. Το πείραμα της μεθόδου t-history είναι πολύ απλό.



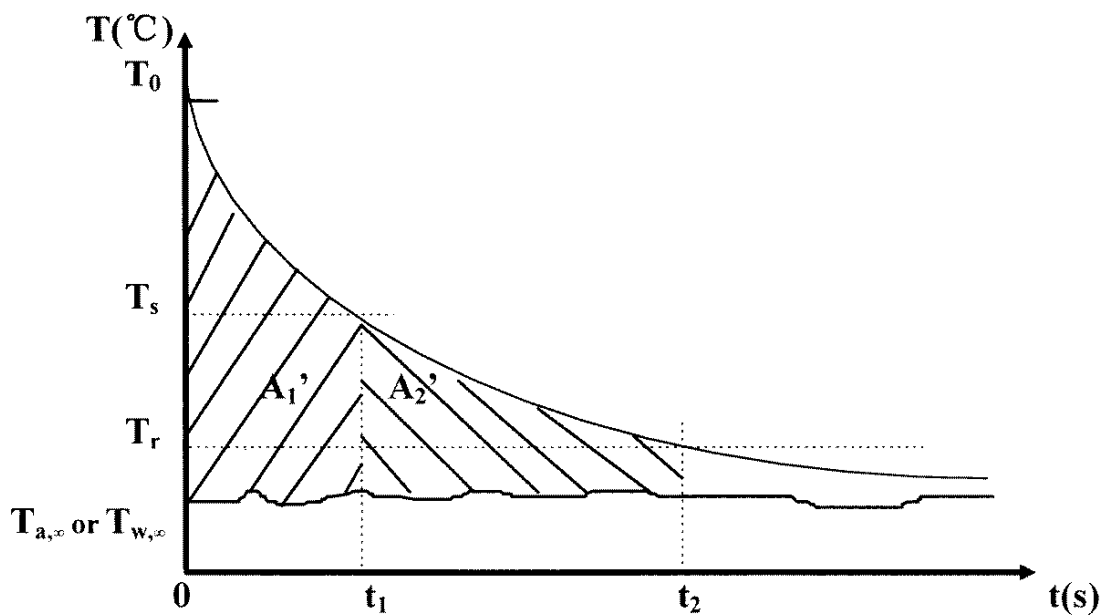
Σχήμα 3.1 Διάγραμμα της μεθόδου t-history [12].



Σχήμα 3.2 Τυπική καμπύλη t-history για ένα ΥΑΦ κατά τη διάρκεια διαδικασίας ψύξης με υπέρψυξη. $\Delta T_m = T_m - T_s$ είναι ο βαθμός υπέρψυξης [11].



Σχήμα 3.3 Τυπική καμπύλη t-history για ένα ΥΑΦ κατά τη διάρκεια διαδικασίας ψύξης (χωρίς υπέρψυξη) [11].



Σχήμα 3.4 Τυπική καμπύλη t-history για το νερό κατά τη διάρκεια διαδικασίας ψύξης [11].

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.

Από τον ισολογισμό της ενέργειας είναι δυνατός ο υπολογισμός της θερμότητας τήξης και της ειδικής θερμότητας του ΥΑΦ. Στον υπολογισμό χρησιμοποιούνται τα εμβαδά που είναι σημειωμένα στα σχήματα 3.2-3.4. Επίσης με την μέθοδο t-history μπορεί να προσδιοριστεί η θερμική αγωγιμότητα ενός ΥΑΦ.

Το σημαντικότερο πρόβλημα στη μέθοδο t-history, είναι η αντιμετώπιση του φαινομένου supercooling. Πρέπει αρχικά να οριστεί το σημείο απελευθέρωσης του supercooling ως το ένα άκρο της περιόδου αλλαγής φάσης. Ο βαθμός εμφάνισης του supercooling ποικίλλει και σχετίζεται με όρους όπως η ταχύτητα, η καθαρότητα και είναι απολύτως ανεξάρτητος από το τέλος της αλλαγής φάσης. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού έχουν αναπτυχθεί διάφορες τροποποιήσεις της μεθόδου.

Άσχετα από τον βαθμό εμφάνισης του φαινομένου του supercooling, η θερμότητα τήξης που λαμβάνεται με την τροποποιημένη μέθοδο t-history συμφωνεί με αυτήν από DSC, όπως έχει διαπιστωθεί σε πολλές πειραματικές διαφορές. Άλλα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η απλότητα και το χαμηλό κόστος του εξοπλισμού, το, συγκριτικά με άλλες μεθόδους, μεγάλο μέγεθος του δείγματος, η ταυτόχρονη μέτρηση πολλών δειγμάτων σε ένα πείραμα καθώς και η οπτική παρατήρηση του φαινομένου. Το μειονέκτημά της είναι ότι το σφάλμα των μετρήσεων επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την προσεκτική κατασκευή της διάταξης και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται, καθώς και από τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας. Επίσης, στη μέθοδο αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντικό να μετρηθεί επακριβώς η λανθάνουσα θερμότητα που απορροφά ο δοκιμαστικός σωλήνας με το ΥΑΦ.

3.4 Η ΜΕΘΟΔΟΣ DOUBLE CELL

Μία ακόμα μέθοδος που έχει αναπτυχθεί για την μελέτη της μακροχρόνιας συμπεριφοράς των ΥΑΦ που εφαρμόζονται για αποθήκευση θερμότητας, ονομάζεται 'double cell'. Η τελευταία έχει δημιουργηθεί για μακροχρόνιες δοκιμές των ΥΑΦ, είναι μία μέθοδος θερμιδικού τύπου που επιτρέπει την μέτρηση και σύγκριση της θερμικής αποθηκευτικής ικανότητας σε πολλούς κύκλους. Η στρατηγική των δοκιμών με βασίζεται στην εναλλακτική συμμετρική θέρμανση και ψύξη

κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες ενός σχετικά μεγάλου δείγματος ΥΑΦ (1-2kg) που βρίσκεται τοποθετημένο στο εσωτερικό ενός πολύ καλά μονωμένου καλύμματος.

Αν και δεν θεωρείται τόσο ακριβής σαν μέθοδος καθορισμού της θερμικής αποθηκευτικής ικανότητας των μικρών δειγμάτων, πιστεύεται ότι παρέχουν καλές πληροφορίες για τους ερευνητές και τους κατασκευαστές εμπορικών ή και μεγαλύτερης κλίμακας προϊόντων που επιθυμούν να εξετάσουν την συνολική συμπεριφορά της θερμικής αποθηκευτικής ικανότητας των δειγμάτων μεγάλων διατάσεων σε ένα μεγάλο αριθμό κύκλων.

4. ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ ΤΩΝ ΥΑΦ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΥΛΙΚΑ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Σε γενικές γραμμές οι απαιτήσεις της συσκευασίας των ΥΑΦ είναι οι παρακάτω [6]:

- Ø Αύξηση της αντοχής, της αντίστασης στη διάβρωση και της θερμικής σταθερότητας
- Ø Προστασία του ΥΑΦ από επιβλαβή αλληλεπίδραση με το περιβάλλον
- Ø Παροχή ικανοποιητικής επιφάνειας για τη μεταφορά θερμότητας
- Ø Παροχή δομικής σταθερότητας και διευκόλυνσης και ευελιξίας κατά το χειρισμό του ΥΑΦ

Όπως είναι φυσικό, η συμβατότητα του υλικού κατασκευής της συσκευασίας με το ΥΑΦ είναι απαραίτητη. Ως υλικά κατασκευής για τα συστήματα που περιέχουν ΥΑΦ χρησιμοποιούνται μέταλλα, πλαστικά, και λιγότερο συχνά το τσιμέντο ή το γυαλί. Σε γενικές γραμμές τα ένυδρα άλατα είναι συμβατά με τα πλαστικά ενώ τα οργανικά υλικά με τα μέταλλα. Στη συνέχεια περιγράφονται οι πιο συνηθισμένοι τρόποι συσκευασίας και ενσωμάτωσης των ΥΑΦ.

4.2 ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΣΕ ΚΑΨΟΥΛΕΣ

Η ενσωμάτωση σε κάψουλες του ΥΑΦ παρουσιάζει ενδιαφέροντα πλεονεκτήματα ιδιαίτερης αξίας σε πληθώρα εφαρμογών. Η ενσωμάτωση σε κάψουλες γίνεται για τη συγκράτηση της υγρής φάσης του ΥΑΦ και για να αποφευχθεί η επαφή του ΥΑΦ με το περιβάλλον, αφού η επαφή αυτή θα μπορούσε είτε να βλάψει το περιβάλλον είτε να μεταβάλλει τη σύσταση του ΥΑΦ. Επιπλέον η επιφάνεια των καψουλών δρα ως επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας ενώ πολλές φορές η ενσωμάτωση σε κάψουλες προσφέρει μηχανική σταθερότητα.

Ανάλογα με το μέγεθος των καψουλών έχουμε την ενσωμάτωση σε κάψουλες διαμέτρου μεγαλύτερης του 1cm (μακροενσωμάτωση, macroencapsulation) και την ενσωμάτωση σε κάψουλες διαμέτρου μικρότερης από 1 mm (μικροενσωμάτωση, microencapsulation).

Μακροενσωμάτωση

Κατά την ενσωμάτωση σε κάψουλες με διάμετρο πάνω από 1cm μπορούν να συσκευαστούν ποσότητες ΥΑΦ από λίγα ml έως και μερικά λίτρα. Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται μεταλλικά ή πλαστικά

δοχεία. Αποτελεί τον πιο δημοφιλή τρόπο συσκευασίας λόγω της ευκολίας στην εφαρμογή του. Προσφέρει συγκράτηση του υγρού ΥΑΦ, προστασία της σύστασης του ΥΑΦ και σε πολλές εφαρμογές δίνει μηχανική σταθερότητα στο σύστημα.

Μικροενσωμάτωση

Η ενσωμάτωση σε κάψουλες διαμέτρου από 1μm έως 1mm πραγματοποιείται με διάφορες φυσικές διεργασίες, όπως ξήρανση με ψεκασμό και επίστρωση. Τα σωματίδια του ΥΑΦ περιβάλλονται από μία λεπτή μεμβράνη. Οι κάψουλες που σχηματίζονται μπορούν στη συνέχεια να ενσωματωθούν σε οποιαδήποτε μήτρα υπό την προϋπόθεση ότι το υλικό της είναι συμβατό με το υλικό της μικροκάψουλας.

Εκτός από τη συγκράτηση της υγρής φάσης οι μικροκάψουλες έχουν και άλλα πλεονεκτήματα. Λόγω της μεγάλης τιμής του λόγου επιφάνεια/όγκος βελτιώνεται η μεταφορά θερμότητας προς το περιβάλλον και ο διαχωρισμός των φάσεων περιορίζεται

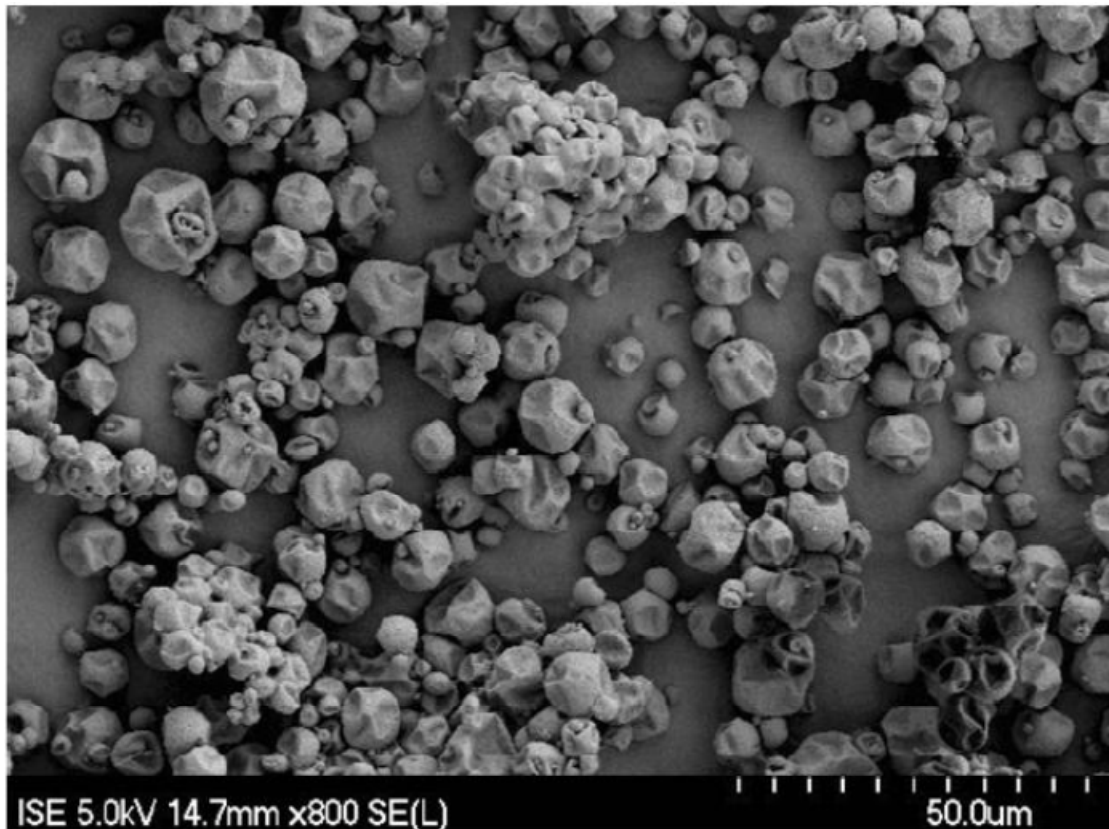
Λόγω του μικρού όγκου που έχει η κάθε μονάδα του ΥΑΦ, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στη υπόψυξη, κατά συνέπεια και στο υλικό που θα επιλεγεί. Ένα άλλο μειονέκτημα των ΥΑΦ σε μικροκάψουλες είναι η μεγάλη αναλογία το υλικού κατασκευής ως προς το ΥΑΦ. Αυτό μειώνει την ενεργειακή πυκνότητα και αυξάνει το κόστος.

Η μεταφορά θερμότητας μπορεί να παρουσιάσει επίσης προβλήματα καθώς η μήτρα που περιέχει τις μικροκάψουλες μπορεί να εμποδίζει τη μεταφορά με συναγωγή. Έτσι πρέπει να επιλεγεί μήτρα με υψηλή τιμή θερμικής αγωγιμότητας γιατί η μεταφορά θερμότητας γίνεται ουσιαστικά μόνο με αγωγή.

Για την ώρα μικροενσωμάτωση σε κάψουλες εφαρμόζεται εμπορικά μόνο σε ΥΑΦ τα οποία δεν είναι ευδιάλυτα στο νερό λόγω περιορισμών της υπάρχουσας τεχνολογίας. Τα προϊόντα που κυκλοφορούν χρησιμοποιούν σχεδόν αποκλειστικά παραφίνες. Στο σχήμα 4.1 που ακολουθεί απεικονίζονται μικροκάψουλες παραφίνης με τυπική διάμετρο από 2μm έως 20μm της εταιρείας BASF.

Άμεση Ενσωμάτωση

Αυτή πρέπει να είναι η πιο οικονομική μέθοδος ενσωμάτωσης που υπάρχει αφού απαιτεί ελάχιστο εξοπλισμό. Υγρό ΥΑΦ ή ΥΑΦ σε πούδρα προστίθενται και ανακατεύεται με τα κατασκευαστικά υλικά, όπως είναι ο γύψος και το τσιμέντο, κατά την παραγωγή.



Σχήμα 4.1 Μικροκάψουλες παραφίνης [6].

4.3 ΕΓΚΛΩΒΙΣΜΟΣ ΣΕ ΠΟΡΩΔΗ ΥΛΙΚΑ

4.3.1 Γενικά

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των ΥΑΦ είναι όπως έχει ήδη αναφερθεί οι χαμηλές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας. Χαμηλή τιμή της θερμικής αγωγιμότητας έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλους χρόνους φόρτισης (τήξης, melting) και εκφόρτισης (στερεοποίησης, solidification) του ΥΑΦ. Για την αντιμετώπιση αυτού του μειονεκτήματος έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές όπως η προσθήκη πτερυγίων, η διασπορά μικρών μεταλλικών αντικειμένων μέσα στο ΥΑΦ κ.τ.λ. Πολλές από αυτές τις τεχνικές προκαλούν αύξηση του βάρους και του κόστους του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας ενώ σε κάποιες περιπτώσεις το υλικό που προστίθεται δεν είναι συμβατό με το ΥΑΦ.

Μία πολύ διαδεδομένη μέθοδος που χρησιμοποιείται για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας είναι ο εγκλωβισμός των ΥΑΦ σε πορώδη υλικά υψηλής θερμικής αγωγιμότητας. Από τον εγκλωβισμό αυτό προκύπτουν σύνθετα υλικά με υψηλότερες τιμές θερμικής αγωγιμότητας. Τα πορώδη υλικά μπορεί να είναι είτε μεταλλικές μήτρες από αλουμίνιο ή χαλκό είτε φυσικά πορώδη υλικά όπως ο γραφίτης. Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα σχετίζεται με το πορώδες.

4.3.2 Πορώδη Υλικά

Τα πορώδη υλικά είναι μία ειδική κατηγορία σύνθετων υλικών που εμφανίζονται σε πληθώρα διεργασιών με μεγάλο τεχνολογικό και επιστημονικό ενδιαφέρον. Είναι ετερογενή, πολυφασικά υλικά με την ιδιότητα να επιτρέπουν τη ροή, τη μεταφορά μάζας, την αλλαγή φάσης και την προσρόφηση ρευστών μέσα στη δομή τους. Στη βιβλιογραφία δεν υπάρχει ακριβής ορισμός για το ποια υλικά μπορούν να χαρακτηριστούν πορώδη και ποια όχι. Έχει επικρατήσει ένα υλικό να χαρακτηρίζεται πορώδες όταν έχει το ακόλουθο σύνολο χαρακτηριστικών [5]:

- Ø Αποτελείται από μία τουλάχιστον στερεή φάση που εκτείνεται σε όλο το πεδίο που καταλαμβάνει το πορώδες υλικό στο χώρο και μία τουλάχιστον ρευστή φάση (υγρό ή αέριο).
- Ø Τα διάκενα στη στερεή φάση, στην οποία περιέχεται η ρευστή, έχουν διάσταση της τάξης μεγέθους του μm ή και μικρότερη. Τα διάκενα ονομάζονται πόροι.
- Ø Κάποιοι πόροι του υλικού συνδέονται μεταξύ τους ώστε να διασφαλίζεται η δυνατότητα του ρευστού να κινείται μέσα στο πορώδες υλικό. Υπάρχουν όμως και πόροι που είναι απομονωμένοι («τυφλοί» πόροι).

Ο παραπάνω ορισμός βασίζεται στη φαινομενολογική περιγραφή της δομής του υλικού και εξαρτάται από την κλίμακα μεγέθους στην οποία εξετάζεται το υλικό. Τα πορώδη υλικά συνήθως κατηγοριοποιούνται κατά IUPAC (1972) ανάλογα με το χαρακτηριστικό μέγεθος, d , των πόρων τους σε τρεις κατηγορίες:

- Ø Μικροπορώδη $d \leq 2\text{nm}$
- Ø Μεσοπορώδη $2\text{nm} < d \leq 50\text{nm}$
- Ø Μακροπορώδη $50\text{nm} < d$

Βάση για την ταξινόμηση αυτή αποτελεί το γεγονός ότι κάθε κατηγορία μεγέθους παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά κατά την προσρόφηση αερίων, με συνέπεια διαφορετική φυσικοχημική συμπεριφορά.

Οι ιδιότητες των πορωδών υλικών εξαρτώνται τόσο από τη σύσταση του υλικού όσο και από την πορώδη δομή. Ιδιότητες δομής των πορωδών υλικών ονομάζονται αυτές που εξαρτώνται μόνο από τη γεωμετρία και την τοπολογία των πόρων του και καμία άλλη ιδιότητα του υλικού, όπως π.χ. η χημική σύσταση. Στην πλειονότητα των πορωδών υλικών οι πόροι δεν είναι ορατοί δια γυμνού οφθαλμού. Η γεωμετρία της επιφάνειας των πόρων και η κατανομή μεγέθους των πόρων είναι μερικά χαρακτηριστικά της μικροσκοπικής δομής ενός πορώδους μέσου. Μία πολύ σημαντική μακροσκοπική ιδιότητα των

πορωδών υλικών είναι το πορώδες (porosity). Πορώδες φ ορίζεται το κλάσμα (ή ποσοστό) του όγκου του υλικού που καταλαμβάνουν οι πόροι του. Όσο μεγαλύτερο πορώδες έχουν τα υλικά αυτά τόσο υψηλότερη είναι η θερμική αγωγιμότητα.

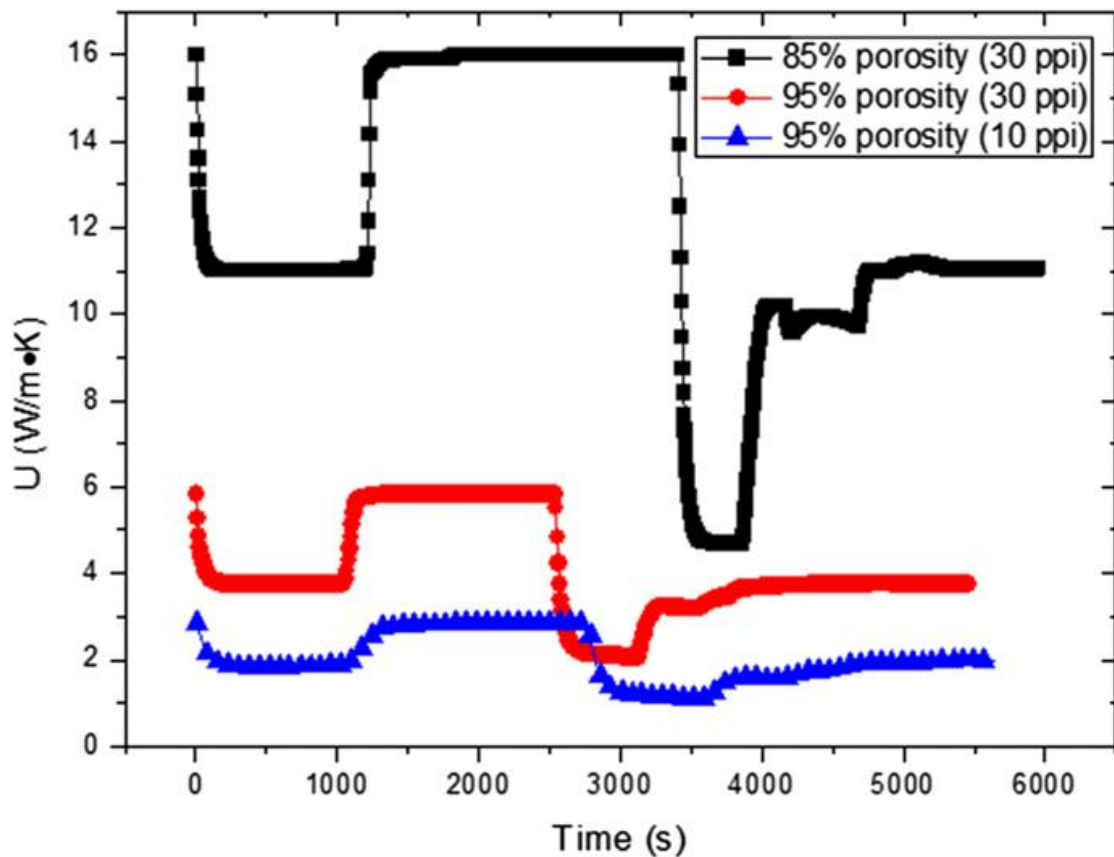
Μία ειδική κατηγορία πορωδών υλικών είναι οι μεταλλικοί αφροί (metal foams). Οι αφροί προκύπτουν από μία ομοιόμορφη διασπορά της αέριας φάσης σε υγρή ή στερεή. Οι μεταλλικοί αφροί έχουν κυψελοειδή δομή, χαμηλή πυκνότητα και αρκετούς ενδιαφέροντες συνδυασμούς φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων. Οι ιδιότητές τους διαφέρουν πολύ από αυτές των μετάλλων. Προς το παρόν οι αφροί αλουμινίου παράγονται από λίγες εταιρίες ανά τον κόσμο, σε μικρή κλίμακα και για συγκεκριμένες εφαρμογές.

4.3.3 Παραγωγή Σύνθετων Υλικών

Με τον όρο σύνθετα υλικά (composite materials) αναφερόμαστε σε κάθε υλικό το οποίο δεν απαντάται στη φύση και προκύπτει ως αποτέλεσμα της επιστημονικής και τεχνολογικής δράσης του ανθρώπου. Προκύπτουν από δύο ή περισσότερα υλικά ή φάσεις με σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους ενώ και τα ίδια τα σύνθετα υλικά έχουν επίσης σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συστατικών τους. Το ένα, από τα συστατικά μέρη, χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης. Η ταχύτητα με την οποία η βιομηχανία υιοθετεί τα σύνθετα υλικά, δείχνει ξεκάθαρα πως το μέλλον ανήκει σε αυτά.

Έχει αναφερθεί από πολλούς ερευνητές ότι η χρήση μεταλλικών πλεγμάτων ή μετάλλων σε μορφή σκόνης μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη θερμική αγωγιμότητα του ΥΑΦ. Για παράδειγμα οι Mettawee and Assassa [19] αναφέρουν ότι η προσθήκη σκόνης αλουμινίου σε παραφίνη μείωσε κατά 60% το χρόνο φόρτισης του ΥΑΦ. Ακόμη, οι Bugaje et al [19] αναφέρουν ότι η θερμική απόκριση της παραφίνης γίνεται ταχύτερη με την προσθήκη μεταλλικών πλεγμάτων. Οι συγκεκριμένοι ερευνητές πρόσθεσαν πλέγματα αλουμινίου σε παραφίνη και παρατήρησαν μείωση του χρόνου τήξης κατά 2,2 φορές και του χρόνου στερεοποίησης κατά 4,2 φορές. Βρέθηκε επίσης ότι η παρουσία του μετάλλου έχει μεγαλύτερη επίδραση στο χρόνο στερεοποίησης από ότι στο χρόνο τήξης γιατί η αγωγή θερμότητας παίζει το σημαντικότερο ρόλο κατά την στερεοποίηση ενώ κατά την τήξη η φυσική συναγωγή γίνεται ιδιαίτερα σημαντική. Επίσης ο Vadwala [19] χρησιμοποίησε αφρό χαλκού υψηλού πορώδους (95%) και πέτυχε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας της παραφίνης από 0,21 W/mK σε 3,8 W/mK.

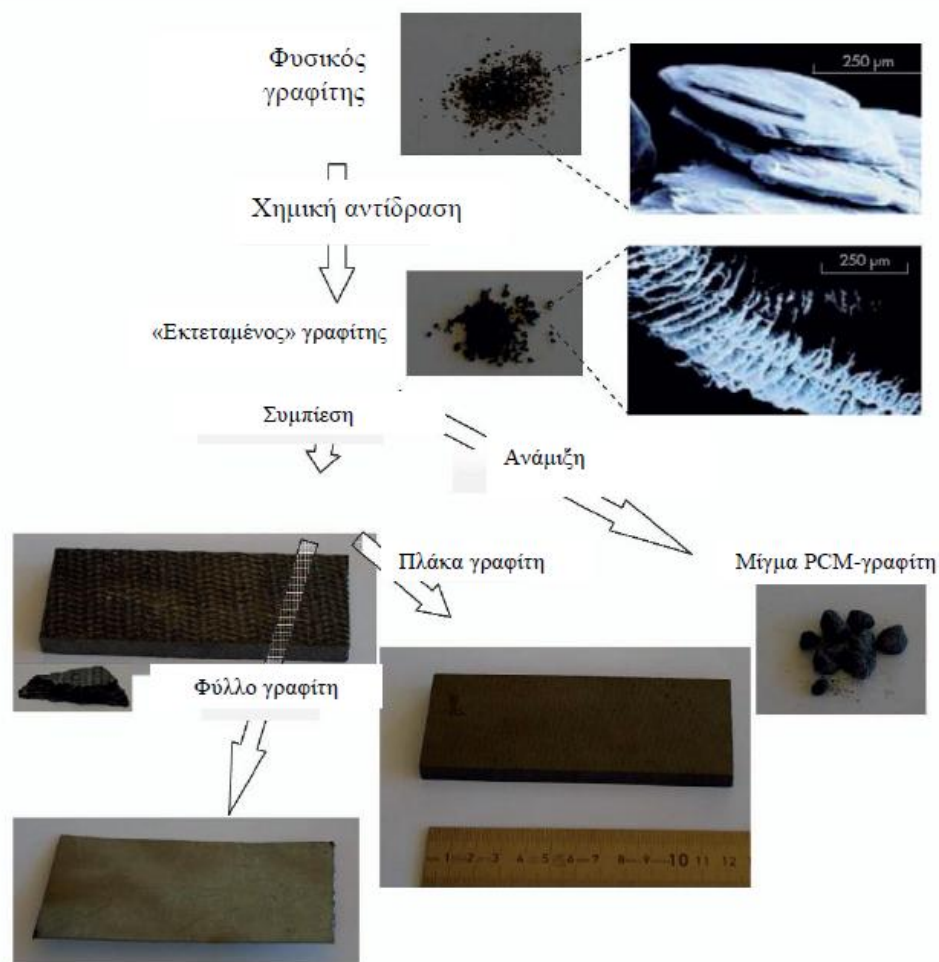
Όσον αφορά την εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας από το πορώδες οι Tian and Zhao [20] μέσω υπολογιστικού μοντέλου κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται με το πορώδες, φτάνει σε ένα μέγιστο και στη συνέχεια αύξηση του πορώδους έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της. Επιπλέον από τα αποτελέσματά τους φαίνεται ότι η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται όσο μειώνεται το μέγεθος των πόρων. Στο σχήμα 4.2 φαίνονται τα αποτελέσματα των παραπάνω ερευνητών. Το σύμβολο ppi σημαίνει pores per inch. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τόσο μικρότερο είναι το μέγεθος των πόρων.



Σχήμα 4.2 Εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας από το πορώδες και το μέγεθος των πόρων [20].

Τα αποτελέσματα που φαίνονται στο σχήμα 4.2 συμφωνούν ποιοτικά με τα συμπεράσματα των Khodabandeh and Shokouhmand [21] οι οποίοι επίσης τονίζουν τη σημασία της τιμής της θερμικής αγωγιμότητας του πορώδους υλικού. Όσο μεγαλύτερη είναι τόσο μεγαλύτερη είναι και η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας του σύνθετου υλικού που προκύπτει.

Η χρήση του γραφίτη για την επίτευξη υψηλότερης τιμής θερμικής αγωγιμότητας προσφέρει επίσης σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες και διαβρωτικά περιβάλλοντα. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι σύνθετων υλικών από ΥΑΦ και γραφίτη: σε μορφή πλάκας και μίγματος που είναι διαθέσιμα από την εταιρεία SGL TECHNOLOGIES GmbH.



Σχήμα 4.3 Μετασχηματισμός του γραφίτη από τη φυσική του σύνθεση σε διάφορα προϊόντα [14].

Στο σχήμα 4.3 φαίνεται η διαδικασία επεξεργασίας του φυσικού γραφίτη για την παραγωγή διαφόρων προϊόντων. Αρχικά ο φυσικός γραφίτης έχει πυκνότητα περίπου 2200 kg/m^3 . Κατά την χημική επεξεργασία του παράγονται αέρια που οδηγούν στην επέκταση της δομής του γραφίτη. Τα σωματίδια του εκτεταμένου γραφίτη έχουν εξαιρετικά πορώδη δομή και οι διαστάσεις τους μπορεί να είναι της τάξης του ενός έως αρκετών mm. Η πυκνότητα του εκτεταμένου γραφίτη είναι περίπου 3 kg/m^3 , λιγότερο δηλαδή από το 0,2 % της πυκνότητας του φυσικού γραφίτη. Αυτό σημαίνει ότι το 99,8 του όγκου του εκτεταμένου γραφίτη είναι πόροι.

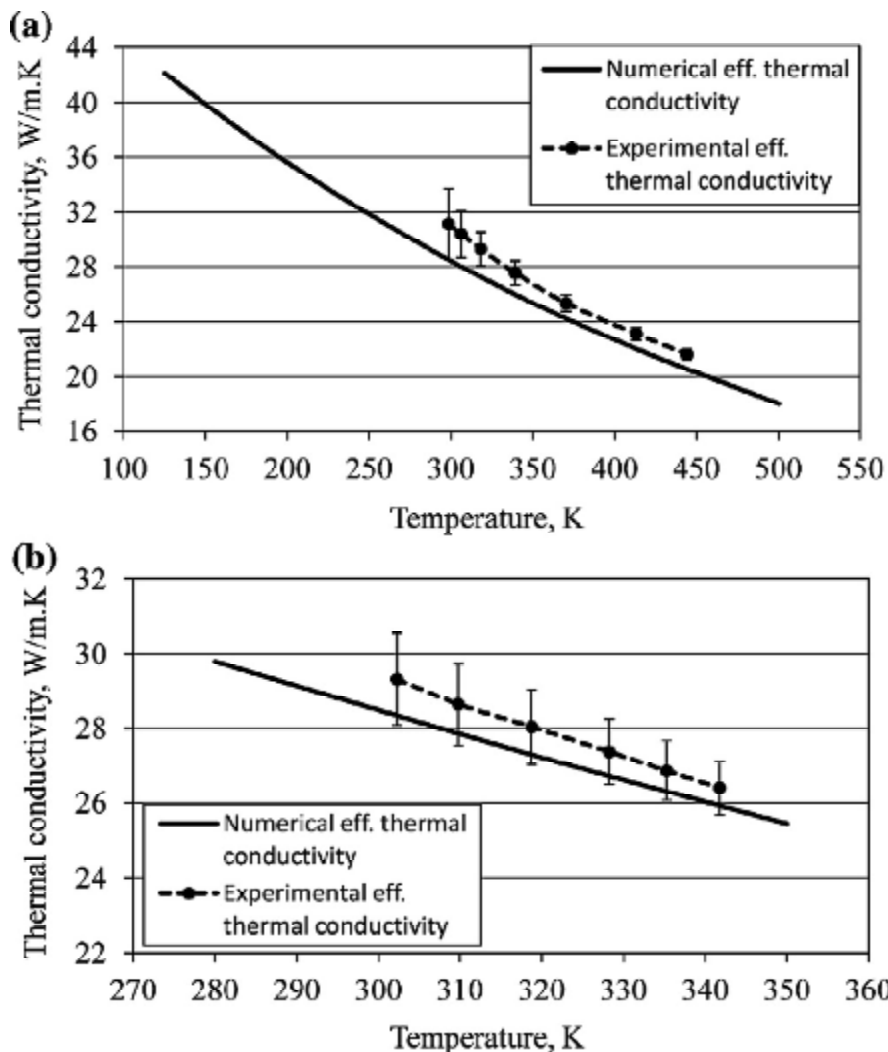
ΥΑΦ/γραφίτης σε μορφή πλάκας

Κατά τη διαδικασία παραγωγής ΥΑΦ/γραφίτη σε μορφή πλάκας ο εκτεταμένος γραφίτης συμπιέζεται σε αρκετά βήματα για να σχηματιστεί ένα φύλλο γραφίτη. Ο γραφίτης αποκτά το σχήμα πλακών πλάτους περίπου 10 mm. Αυτές οι πλάκες εξακολουθούν να έχουν περίπου 90% πορώδες κατ' όγκο. Έχουν καλή μηχανική σταθερότητα και η θερμική τους αγωγιμότητα παίρνει τιμές από 20 έως 25 W/mK παράλληλα και από 5 έως 8 W/mK κάθετα στην επιφάνεια της πλάκας. Οι τιμές αυτές είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές των συνηθισμένων ΥΑΦ. Για την παραγωγή του σύνθετου υλικού το ΥΑΦ γεμίζει τους πόρους του γραφίτη σε ποσοστό 80 έως 85%.

Μίγμα ΥΑΦ/γραφίτη

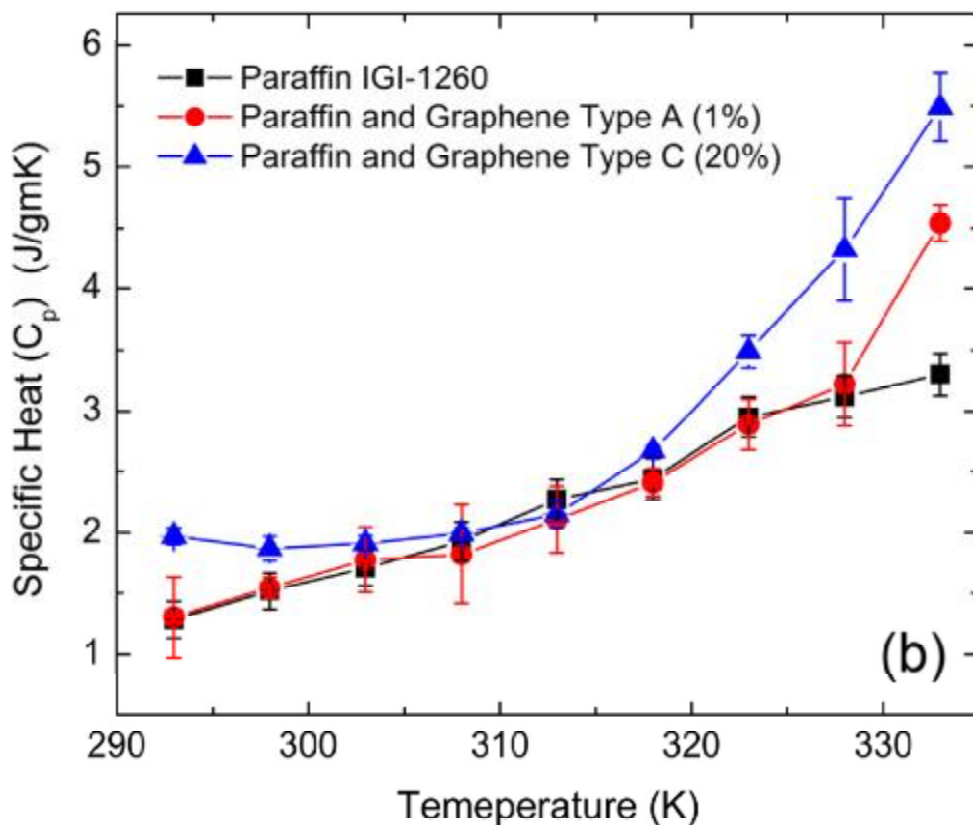
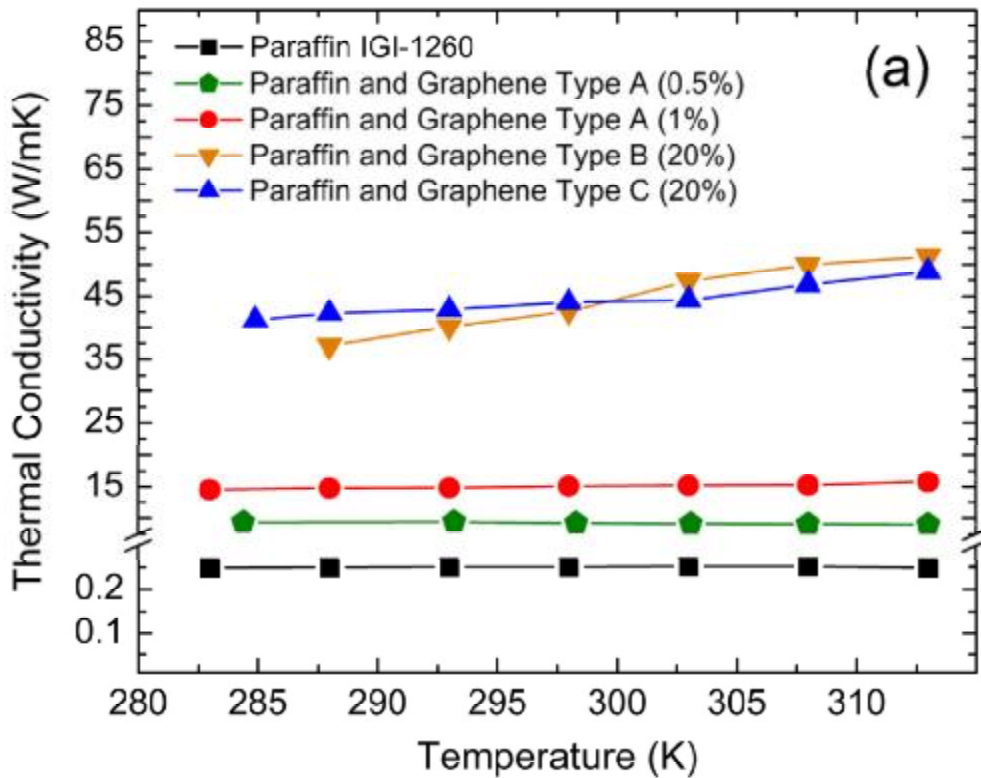
Για την παραγωγή του μίγματος το ΥΑΦ αναμιγνύεται με τον εκτεταμένο γραφίτη. Το αποτέλεσμα είναι ένα μίγμα σε κοκκώδη μορφή. Τα πλεονεκτήματα του μίγματος είναι ότι μπορεί να παραχθεί από οποιοδήποτε ΥΑΦ και σε οποιοδήποτε σχήμα σε αντίθεση με τις πλάκες. Η ογκομετρική σύσταση του μίγματος είναι 10% γραφίτης, 80% ΥΑΦ και 10% αέρας. Η θερμική αγωγιμότητα είναι χαμηλότερη από αυτή της πλάκας. Παίρνει τιμές από 4 έως 5 W/mK σε όλες τις κατευθύνσεις. Αυτό οφείλεται στη χαλαρή επαφή που υπάρχει μεταξύ των σωματιδίων γραφίτη στο μίγμα. Παρόλα αυτά η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας σε σχέση με το καθαρό ΥΑΦ είναι από 5 έως 20 φορές.

Στο σχήμα 4.4 φαίνονται οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας για το σύνθετο υλικό αφρός γραφίτη/κυκλοεξάνιο συναρτήσει της θερμοκρασίας. Να σημειωθεί ότι η θερμική αγωγιμότητα του κυκλοεξανίου (ΥΑΦ) είναι μόνο 0.13 W/mK.



Σχήμα 4.4 Πειραματικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας σε σύγκριση με τιμές που υπολογίστηκαν από αριθμητικό μοντέλο για a) αφρό γραφίτη και b) σύνθετο υλικό αφρός γραφίτη/κυκλοεξάνιο [17].

Ένα άλλο υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία σύνθετων υλικών με παραφίνη είναι το γραφένιο. Το γραφένιο είναι γνωστό ότι έχει πολύ υψηλή θερμική αγωγιμότητα και είναι τέλεια συμβατό με πολλά μητρικά υλικά. Το σύνθετο υλικό γραφένιο/παραφίνη παρουσιάζει θερμική αγωγιμότητα δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή της καθαρής παραφίνης διατηρώντας τη δυνατότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας [18]. Στο σχήμα 4.5 φαίνονται πειραματικά αποτελέσματα για τη θερμική αγωγιμότητα και την ειδική θερμότητα του σύνθετου υλικού γραφένιο/παραφίνη. Στα διαγράμματα αυτά το γραφένιο τύπου A είναι κυρίως μονοστρωματικό γραφένιο, το γραφένιο τύπου B αποτελείται από τρία ατομικά επίπεδα και το γραφένιο τύπου C αποτελείται από 20-30 ατομικά επίπεδα.



Σχήμα 4.5 Θερμικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού γραφένιο/παραφίνη συναρτήσει της θερμοκρασίας με παράμετρο το ποσοστό του γραφενίου (a) θερμική αγωγιμότητα, (b) ειδική θερμότητα [18].

Επίσης, η χρήση ινών άνθρακα για την ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητας της παραφίνης είναι πολύ διαδεδομένη [16]. Οι ίνες άνθρακα έχουν μικρότερη πυκνότητα από τις μεταλλικές αλλά παραπλήσια θερμική αγωγιμότητα. Επίσης προστατεύουν τα ΥΑΦ από τη διάβρωση και βελτιώνουν τη συμβατότητα των ΥΑΦ με άλλα υλικά. Οι ίνες άνθρακα προστίθενται στην παραφίνη για να συνθέσουν υλικά δύο διαφορετικών τύπων.

Στην πρώτη περίπτωση οι ίνες είναι τυχαία προσανατολισμένες ενώ στη δεύτερη περίπτωση οι ίνες άνθρακα είναι προσανατολισμένες κατά μήκος της ακτίνας μιας κυλινδρικής κάψουλας ΥΑΦ. Στη δεύτερη περίπτωση η θερμική αγωγιμότητα προκύπτει περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη από ότι στην περίπτωση των τυχαία προσανατολισμένων ινών. Αυτό συμβαίνει γιατί οι ίνες είναι προσανατολισμένες κατά μήκος της διεύθυνσης στην οποία γίνεται η μεταφορά θερμότητας με αγωγή.

4.3.4 Οικοδομικά Υλικά

Κατά τη μέθοδο της εμβάπτισης το πορώδες κατασκευαστικό υλικό, δηλαδή η γυψοσανίδα, το τούβλο ή το μπλόκ τσιμέντου, βυθίζεται σε ζεστό και λιωμένο ΥΑΦ, το οποίο απορροφάται από τους πόρους μέσω της τριχοειδούς δράσης. Στη συνέχεια, το πορώδες υλικό απομακρύνεται από το υγρό ΥΑΦ, αφήνεται να κρυώσει και το ΥΑΦ παραμένει στους πόρους του κατασκευαστικού υλικού.

Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι καθιστά εύκολη την μετατροπή ενός απλού πάνελ, σε πάνελ με ΥΑΦ, όπως ζητείται, εφόσον η εμβάπτιση μπορεί να πραγματοποιηθεί πρακτικά οποιαδήποτε ώρα και σε οποιοδήποτε σημείο.

5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας είναι αρκετά εκτεταμένες αφού η αποθήκευση θερμότητας είναι ένα πολύ σημαντικό μέσο εξοικονόμησης ενέργειας. Παρακάτω θα δούμε τις σημαντικότερες εφαρμογές που χρησιμοποιούν συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, εκμεταλλευόμενα τις ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης.

5.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕ ΤΟ ΜΕΣΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των υλικών αλλαγής φάσης είναι η μεγάλη πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας με μικρότερη διακύμανση κατά την ανάκτησή της με μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά από την πηγή θερμότητας (μέχρι και ισοθερμοκρασιακά). Οι πρακτικές δυσκολίες που προκύπτουν οφείλονται στη χαμηλή τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας, στη μεταβολή της πυκνότητας, στην αξιοπιστία-σταθερότητα των ιδιοτήτων σε μακρόχρονη χρήση καθώς και στο διαχωρισμό των φάσεων με ενδεχόμενη αλλαγή χημικής σύστασης των υλικών και εμφάνιση φαινομένου υπερψύξης.

Η ελευθερία που δίνει το εύρος θερμοκρασιών που παράγονται τα υλικά δίνει την ευχέρεια εφαρμογής των υλικών αλλαγής φάσης σε πλήθος περιπτώσεων έμμεσης ή άμεσης αποθήκευσης θερμότητας όπου έχουν ως σκοπό την καλύτερη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας όπου η απαιτούμενη θερμότητα αποθηκεύεται την ημέρα για να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε ώρες μη ηλιοφάνειας.

Όπως προαναφέρθηκε η χαμηλή τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας δεν βοηθάει την ταχεία απορρόφηση της προσφερόμενης θερμότητας και γι' αυτό το λόγο εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές ενίσχυσής της. Οι εναλλάκτες που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι:

- Ø Το υλικό αλλαγής φάσης τοποθετείται μεταξύ παραλλήλων πλακών σε λεπτά και διαδοχικά στρώματα αφήνοντας μεταξύ τους ικανό κενό για τη ροή του μέσου (συνήθως αέρας, νερό, διάλυμα νερού-γλυκόλης, λάδι κ.τ.λ.)
- Ø Το υλικό αλλαγής φάσης τοποθετείται εντός σωλήνων μικρής διαμέτρου σχηματίζοντας δέσμες σωλήνων και το ρευστό κινείται κάθετα ή παράλληλα στη δέσμη. Οι σωλήνες είναι πολλές φορές και πτερυγιοφόροι.
- Ø Το υλικό αλλαγής φάσης τοποθετείται στο κέντρο ενός δοχείου αποθήκευσης διπλού κελύφους και το ρευστό κυκλοφορεί περιφερειακά.

- Ø Σε μικρή κλίμακα μόνο έχουν χρησιμοποιηθεί και διατάξεις παρόμοιες του πλακοειδή εναλλάκτη. Στην κυψελοειδή διάταξη αντιμετωπίζονται προβλήματα από τις τάσεις που δημιουργούνται με την αύξηση του όγκου κατά την τήξη του υλικού, φαινόμενο που θέτει όρια στις εφαρμογές της.
- Ø Το υλικό αλλαγής φάσης τοποθετείται σε δοχείο το οποίο το διαπερνούν πτερυγοφόροι σωλήνες. Κατ' αυτή τη διάταξη το υλικό καλύπτει όλη την περιοχή μεταξύ δοχείου και σωλήνα καθώς και τα κενά μεταξύ των πτερυγίων. Τέτοια διάταξη είναι αποδοτική μόνο αν το ρευστό που περνά από τους σωλήνες είναι υγρό και όχι αέριο.
- Ø Το υλικό αλλαγής φάσης βρίσκεται σε μορφή μικρής σφαίρας συνήθως με πλαστικό κέλυφος και τοποθετείται εντός δοχείου. Το ρευστό που μεταφέρει τη θερμότητα, εισέρχεται και εξέρχεται από το δοχείο μέσω σωληνώσεων εισαγωγής και εξαγωγής αεραγωγών εάν πρόκειται για αέριο. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μεγάλη πτώση πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου. Επιπλέον με την χρήση σφαιριδίων ενισχυμένων με υλικό αλλαγής φάσης παρακάμπτεται και το πρόβλημα της αλλαγής όγκου των υλικών αλλαγής φάσης (περίπου 10% είναι μια τυπική τιμή) όπου δεν δημιουργεί προβλήματα μόνο κατά την τήξη του υλικού (αύξηση του όγκου) αλλά και κατά τη στερεοποίηση (μείωση του όγκου) διότι υπάρχει περίπτωση να σχηματιστούν κοιλότητες στο υλικό ή ακόμα και μερική αποκόλληση του υλικού από την επιφάνεια συναλλαγής, φαινόμενο που θα μειώσει δραματικά το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

5.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕ ΤΟ ΜΕΣΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Η ιδέα έχει πραγματοποιηθεί μόνο σε ερευνητικό επίπεδο χρησιμοποιώντας ένυδρο άλας για υλικό αλλαγής φάσης και λάδι για μέσο μεταφοράς θερμότητας από την πηγή στο σύστημα αποθήκευσης. Στην πειραματική διάταξη φυσαλίδες λαδιού διαπερνούν το υλικό αλλαγής φάσης μεταφέροντας την απαιτούμενη θερμότητα. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι αναταράξεις που προκαλούν οι φυσαλίδες στη ροή τους μειώνουν το φαινόμενο του supercooling καθώς και αυτό του διαχωρισμού των φάσεων.

5.4 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ

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.

Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα κρίθηκε απαραίτητη η εισαγωγή υλικών αλλαγής φάσης σε φωτοβολταϊκά στοιχεία. Το υλικό αλλαγής φάσης τοποθετημένο σε αδιαβατικό προς το περιβάλλον πλαίσιο, απορροφά την θερμότητα που περισσεύει, διατηρώντας το φωτοβολταϊκό στοιχείο σε σταθερή θερμοκρασία, εξασφαλίζοντας έτσι την αποδοτική λειτουργία του.

5.5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ

Τα παραδοσιακά συστήματα κλιματισμού λειτουργούν σπάνια στο μέγιστο φορτίο, γεγονός που αναδεικνύει την υπερδιαστασιολόγηση των συστημάτων αυτών, καθώς έχουν επιλεγεί για να καλύψουν το μέγιστο φορτίο. Με άλλα λόγια, η λειτουργία τους περιορίζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας για να καλύψουν τις μέγιστες απαιτήσεις, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας παραμένουν απενεργοποιημένα.

Επιπρόσθετα, οι βιομηχανικές ψυκτικές διατάξεις διαστασιολογούνται για να ικανοποιήσουν τη μέγιστη στιγμιαία ζήτηση ψύξης, η οποία εμφανίζεται σε λίγες μόνο μέρες το χρόνο. Τα βιομηχανικά συστήματα ψύξης, παρέχουν την ψύξη για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, εκ των οποίων αρκετές απαιτούν μεγάλα ψυκτικά φορτία σε μικρό χρονικό διάστημα.

Ένα σύστημα αποθήκευσης ψύξης, είναι ικανό να μειώσει το μέγιστο φορτίο (το φορτίο για το οποίο διαστασιολογείται η εγκατάσταση) μέχρι και 70%. Αν ληφθεί υπόψη και το χαμηλό κοστολόγιο του ηλεκτροπαραγωγού κατά τις νυχτερινές ώρες, γίνεται αντιληπτό το ότι τα συστήματα αυτά είναι ιδιαίτερα φιλικά προς τους οικονομικούς επενδυτές.

5.6 ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Αν ληφθεί υπόψη η περιοδικότητα που εμφανίζουν οι πηγές ενέργειας στη φύση, τότε πρέπει να γίνει πρόβλεψη για την αποθήκευση της ενέργειας που δεν χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της ημέρας, ιδιαίτερα τις ώρες με έντονη ηλιοφάνεια, κατά τις οποίες η ενέργεια που απορροφάται είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για κατανάλωση. Συνεπώς θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης της πλεονάζουσας ενέργειας και η αντίστοιχη δυνατότητα ανάκτησής της προς ικανοποίηση των θερμικών αναγκών του συστήματος.

Η λειτουργία του συστήματος που περιλαμβάνει τα υλικά αλλαγής φάσης, διαφέρει από τις συνήθειες ηλιακές εφαρμογές, μόνο στο δοχείο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Στις ηλιακές εφαρμογές, χρησιμοποιούνται σήμερα περισσότερο τα ένυδρα άλατα. Η αρχή λειτουργίας του συστήματος, στηρίζεται στη θέρμανση του εργαζόμενου μέσου (το οποίο μπορεί να είναι υγρή σιλικόνη ή ορυκτέλαιο) από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που παίρνει ο συλλέκτης. Το εργαζόμενο μέσο, αφού θερμανθεί, οδηγείται στο δοχείο θερμικής αποθήκευσης, όπου βρίσκεται και το υλικό αλλαγής φάσης.

Η θερμότητα που μεταφέρει το εργαζόμενο μέσο, διαβιβάζεται στο ένυδρο άλας και απελευθερώνει το κρυσταλλικό νερό. Με τη διαδικασία αυτή, σχηματίζεται κορεσμένο υδατικό διάλυμα του άλατος, στερεό υπόλειμμα του αδιάλυτου άλατος και επίπλευση του εργαζόμενου μέσου σε αυτό. Το εργαζόμενο μέσο οδηγείται κατά ένα μέρος στο συλλέκτη και κατά ένα άλλο μέρος στο δοχείο ανάδευσης, όπου αναδεύεται με το υπόλοιπο μέσο και παραλαμβάνει θερμότητα από μια ηλεκτρική αντίσταση, αν κριθεί σκόπιμο.

Για την ανάκτηση της αποθηκευμένης ενέργειας, το εργαζόμενο μέσο οδηγείται στον εναλλάκτη, όπου μεταφέρει θερμότητα σε ένα άλλο μέσο (συνήθως νερό), για τη χρήση της αποθηκευμένης θερμικής ενέργειας. Αφού το εργαζόμενο μέσο ψυχθεί στον εναλλάκτη, διαβιβάζεται στο κορεσμένο διάλυμα για να προσλάβει θερμότητα. Καθώς το κορεσμένο διάλυμα ψύχεται, επανακρυσταλλώνεται και αποδίδει την αποθηκευμένη θερμική ενέργεια.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται οργανικό υλικό αλλαγής φάσης, η λειτουργία του συστήματος είναι πανομοιότυπη, με μοναδική διαφορά εκείνη της λειτουργίας των οργανικών υλικών αλλαγής φάσης, καθώς αυτά όταν φορτίζονται λειώνουν και μεταβαίνουν από τη στερεή στην υγρή φάση και όταν αποφορτίζονται το αντίστροφο. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί η αποδοτική χρήση αυτών των συστημάτων, σε εφαρμογές με μικρές θερμοκρασιακές διαφορές, αλλά και μικρό αποθηκευτικό όγκο.

Η ηλιακή ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη κάθε στιγμή, οπότε οι ηλιακές εγκαταστάσεις απαιτούν μία ενδιάμεση αποθηκευτική μονάδα

για την παρεχόμενη από τον Ήλιο ενέργεια, ρόλο τον οποίο συνήθως παίζει το νερό σε συστήματα θέρμανσης. Ένα σύστημα βασισμένο σε υλικό αλλαγής φάσης προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με ένα συμβατικό σύστημα.

Μικρότερο όγκο σε σύγκριση με ένα συμβατικό σύστημα νερού και μεγαλύτερη αποδοτικότητα χάρη στην μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ φόρτισης και αποφόρτισης της ενέργειας. Συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας μπορούν επίσης να συνδυαστούν με συμβατικά συστήματα θέρμανσης. Ένα ενισχυμένο με υλικό αλλαγής φάσης σύστημα ζεστού νερού, παρέχει καλύτερο έλεγχο της θερμοκρασίας του νερού.

Τέλος για να συγκρίνουμε το νερό, που είναι το πιο διαδεδομένο μέσο για την αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή αισθητής θερμότητας με ένα άλλο υλικό που αλλάζει φάση, αρχικά χρειάζεται να καθορίσουμε την αύξηση θερμοκρασίας του νερού κατά τη λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης.

Ας υποθέσουμε εδώ ότι από τους 32°C το νερό ζεσταίνεται έως τους 50 °C. Υπό αυτές τις συνθήκες το νερό μπορεί να απορροφήσει:

$$Q = rC_p \Delta T = 988 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4182 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 18\text{K} = 74,37 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \quad (5.1)$$

Αντίστοιχα, το υλικό $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Glauber's salt), το οποίο τήκεται στους 32°C μπορεί να απορροφήσει:

$$Q = rL = 1485 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 254 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 377,19 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \quad (5.2)$$

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι το $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ μπορεί να αποθηκεύσει περίπου 5,2 φορές περισσότερη ενέργεια από ότι ο ίδιος όγκος νερού με μια ανύψωση θερμοκρασίας 18 °C.

5.7 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ

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 υλικών αλλαγής φάσης σε αυτά τα συστήματα για την απομάκρυνση των σημείων αιχμής που παρουσιάζει η χρονική κατανομή της θερμοκρασίας του εξαρτήματος, είναι απολύτως αξιόπιστη, καθώς το υλικό αλλαγής φάσης 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.

Όπως είναι γνωστό τα υλικά αλλαγής φάσης δρουν σε τρεις φάσεις:

Κατά την πρώτη φάση η θερμοκρασία του στερεού υλικού αλλαγής φάσης αυξάνεται μέχρι το σημείο τήξης του, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντός του.

Κατά τη δεύτερη φάση, η θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης παραμένει σταθερή καθώς το υλικό αλλαγής φάσης λιώνει.

Κατά την τρίτη φάση η θερμοκρασία υγρού υλικού αλλαγής φάσης συνεχίζει να αυξάνεται.

Για να εισαχθούν τα υλικά αλλαγής φάσης 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 ειδικά σχεδιασμένα για τοποθέτηση σε ηλεκτρονικές διατάξεις, ιδιαίτερος αποδοτικά. Τα περισσότερα από αυτά τα προϊόντα, που θυμίζουν δεσμίδες με μικρά αυτοκόλλητα χαρτιά, έρχονται σε άμεση επαφή με το εξάρτημα για το οποίο προορίζονται.

5.8 ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ

Οι εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης στην ψύξη των επεξεργαστών των ηλεκτρονικών υπολογιστών, περιλαμβάνουν προϊόντα όπως τα παραπάνω, αν και πλέον έχουν αναπτυχθεί προϊόντα τα οποία αντικαθιστούν πλήρως τα μεταλλικά πτερύγια ψύξης του επεξεργαστή. Αν και το κόστος τους είναι αρκετά αυξημένο, λόγω κυρίως του μικρού μεγέθους τους, η λειτουργία τους είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και συμφέρουσα από οικονομικής άποψης, ιδίως όσο αυξάνεται ο αριθμός των επεξεργαστών και η αντίστοιχη επεξεργαστική ισχύς, οπότε και η αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας από το σύστημα.

Αρκετά πρωτότυπη και έξυπνη είναι η ιδέα ανάπτυξης μιας εύκαμπτης επιφάνειας πάχους 8-10mm, η οποία περιέχει υλικά αλλαγής φάσης στο εσωτερικό της και προορίζεται για χρήση σε φορητούς υπολογιστές. Η λειτουργία της είναι πολύ απλή, απλώς τοποθετείται ο φορητός υπολογιστής επάνω της και το προϊόν αναλαμβάνει να απορροφήσει μεγάλο μέρος των θερμικών φορτίων που αναπτύσσονται στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας του Η/Υ.

Πρόσθετο πλεονέκτημα του προϊόντος σε περίπτωση εκτός γραφείου χρήσης (όπου συνήθως ο υπολογιστής εναποτίθεται στους μηρούς του χρήστη), είναι ότι προστατεύει τη βουβωνική χώρα του χρήστη από έκθεση σε αυξημένες θερμοκρασίες, που σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες, είναι επικίνδυνο τόσο για τη σεξουαλική υγεία όσο και για την αναπαραγωγική δυνατότητα του τελευταίου.

Στο σύνολό τους αυτά τα προϊόντα είναι αποτελεσματικά και συντελούν σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Επιγραμματικά τα χαρακτηριστικά τους:

- Ø Αύξηση του χρονικού διαστήματος πρώτης εκκίνησης του ανεμιστήρα από τα 20 λεπτά στις τέσσερις ώρες, οπότε επιτυγχάνονται καλύτερες συνθήκες εργασίας στον υπολογιστή (π.χ. αθόρυβη λειτουργία) .
- Ø Μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του υπολογιστή κατά 25%.
- Ø Αύξηση της ζωής του επεξεργαστή.
- Ø Αύξηση των επιδόσεων του επεξεργαστή, λόγω της ελάττωσης της μέσης θερμοκρασία λειτουργίας του.

5.9 ΜΟΝΑΔΑ ΕΠΕΙΓΟΥΣΑΣ ΨΥΞΗΣ

Μια ιδιαίτερα επιτυχής εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης, είναι η μονάδα επείγουσας ψύξης (cooling emergency unit). Η μονάδα αυτή, αποτελείται από ένα εξωτερικό μεταλλικό πλαίσιο, στο εσωτερικό του οποίου υπάρχουν συσκευασίες με υλικά αλλαγής φάσης και σωληνώσεις που συνδέουν τη μονάδα με το κεντρικό σύστημα κλιματισμού μιας αίθουσας.

Τα υλικά αλλαγής φάσης, βρίσκονται μέσα σε σακούλες τοποθετημένες πάνω σε πλάκες αλουμινίου. Η ανάγκη μιας τέτοιας μονάδας, είναι επιθυμητή για χώρους που στεγάζονται ηλεκτρονικές συσκευές, καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες στο χώρο μπορούν να αποβούν καταστροφικές για έναν αρκετά δαπανηρό εξοπλισμό. Η εμφάνιση των μεγάλων θερμοκρασιών, οφείλεται κυρίως στις υψηλές θερμοκρασίες του εξωτερικού περιβάλλοντος και στη μεγάλη αποβολή θερμότητας των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.



Σχήμα 5.1 Μονάδα επείγουσας ψύξης [4].

Τα υλικά αλλαγής φάσης που υπάρχουν στη μονάδα, βρίσκονται αρχικά στη στερεή φάση, είναι δηλαδή θερμικά αφόρτιστα. Μόλις η θερμοκρασία του χώρου αυξηθεί πέραν του φυσιολογικού και ο κλιματισμός της αίθουσας δεν είναι αρκετός για να διατηρήσει τη θερμοκρασία στα επιθυμητά επίπεδα για τη λειτουργία των ηλεκτρονικών συσκευών, μπαίνει σε λειτουργία η μονάδα επείγουσας ψύξης. Το ψυκτικό υγρό περνά μέσα από τη μονάδα και φορτίζει θερμικά το υλικό αλλαγής φάσης, το οποίο μπορεί να απορροφήσει μεγάλες ποσότητες θερμότητας και να τις αποθηκεύσει.

Μόλις μπει σε λειτουργία η μονάδα, αυξάνεται κατά ένα μεγάλο βαθμό η απόδοση του συστήματος κλιματισμού. Πρέπει βέβαια να προβλέπεται πάντα στο τέλος της λειτουργίας της μονάδας, να αποφορτίζονται τα υλικά αλλαγής φάσης, για να είναι πάντα διαθέσιμη η μονάδα. Η αποφόρτιση της μονάδας μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους, με πιο αποδοτικό την απευθείας ψύξη των υλικών αλλαγής φάσης μέσω του συστήματος κλιματισμού, σε λειτουργία όπου αποκόπτεται ο κλιματισμός της αίθουσας, κυρίως σε περιόδους ύφεσης της επεξεργαστικής δραστηριότητας, ή κατά τη διάρκεια της νύχτας.

5.10 ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός λειτουργεί γενικώς καλύτερα μεταξύ συγκεκριμένων θερμοκρασιακών ορίων και μειώνεται ο χρόνος ζωής του ή αστοχεί σε πολύ υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες. Για παράδειγμα οι εταιρίες τηλεφωνίας χρησιμοποιούν μπαταρίες για να τροφοδοτήσουν με ενέργεια εξοπλισμό, και επειδή πολλές φορές ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός πρέπει να βρίσκεται και να χρησιμοποιείται υπαίθρια, υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες που κυμαίνονται από $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα.

Οι μπαταρίες έχουν πολύ μεγάλη ενεργειακή απώλεια όταν η θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλή ή αστοχούν όταν είναι πολύ υψηλή και επιπλέον η διάρκεια ζωής μίας μπαταρίας εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται. Η χρήση υλικών αλλαγής φάσης οδηγεί σε μία πιο σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας των μπαταριών απορροφώντας τα μεγάλα φορτία κατά τις ώρες αιχμής και απορρίπτοντάς τα αργότερα όταν οι συνθήκες του περιβάλλοντος το επιτρέπουν.

Επομένως τα συστήματα των τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών, περιέχουν μηχανήματα και ηλεκτρονικά εξαρτήματα τα οποία είναι υπεύθυνα για την εύρυθμη λειτουργία του αντίστοιχου δικτύου. Τέτοια εξαρτήματα περιέχουν εξεζητημένα ηλεκτρονικά κυκλώματα, ιδιαίτερα ακριβά και καταναλωτικά από άποψης ενέργειας, όπως επίσης και πολύ ευαίσθητα στις υψηλές θερμοκρασίες. Πολλά από αυτά δε, είναι διασκορπισμένα ανά την επικράτεια για την κατά τόπους ενίσχυση και σωστή διανομή του σήματος του δικτύου.

Το καλύτερο δυνατό σημείο τοποθέτησης των κουβουκλίων που περιέχουν τέτοια μηχανήματα είναι σε ανοιχτούς χώρους (κοιλιάδες) και κατά το δυνατόν υψηλότερα (υψώματα, βουνά, κ.τ.λ.). Ως εκ τούτου, είναι συνήθως τοποθετημένα σε εύκολα προσβάσιμες μεν περιοχές, αλλά γενικά μακριά από κατοικημένους χώρους, οπότε είναι δύσκολη η συνεχής επιτήρηση της θερμοκρασιακής τους κατάστασης.

Τα ΥΑΦ έχουν βρει εφαρμογή και σε αυτά τα συστήματα και παραδειγματικά περιγράφεται παρακάτω μία τέτοια εφαρμογή. Τα τηλεπικοινωνιακά κουβούκλια είναι μονωμένα, και κλιματιζόμενα φυλάκια, τα οποία προστατεύουν την καρδιά της κινητής τηλεφωνίας, τον Πομποδέκτη Βάσης (Base Station Subsystem, BSS). Είναι το κομμάτι εκείνο ενός κλασσικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας το οποίο διαχειρίζεται την κίνηση και το σήμα του δικτύου. Εκτελεί, μάλιστα, διάφορες εργασίες σχετικά κυρίως με το δίκτυο, όπως την αποκωδικοποίηση της συνομιλίας, το διαχωρισμό των καναλιών του δικτύου από άλλα δίκτυα (ραδιοφωνικά, αεροπορικά, τηλεοπτικά, κ.τ.λ.) και τη διαχείριση του σήματος για εξυπηρέτηση όλης της περιοχής κάλυψης.

Ο πομποδέκτης βάσης, καθώς επίσης και η αντίστοιχη μπαταρία είναι ιδιαιτέρως θερμοευαίσθητα και ο περιβάλλον χώρος τους πρέπει να διατηρείται διαρκώς κάτω από τους 35°C. Σε υποανάπτυκτες και υπό ανάπτυξη χώρες, εμφανίζεται συχνά το φαινόμενο της διακοπής του ρεύματος, καθώς και μονοφασικού ρεύματος, αναγκάζοντας τις εταιρίες κινητής τηλεφωνίας να εφοδιάζουν τα καταλύματα αυτά με ντιζελογεννήτριες για να υποστηρίξουν το σύστημα κλιματισμού του κουβουκλίου στην περίπτωση διακοπής ή μονοφασικού ρεύματος. Τα ΥΑΦ που εγκαθίστανται σε αυτά τα κουβούκλια απορροφούν θερμότητα από το εσωτερικό (θερμότητα η οποία παράγεται από τη λειτουργία του BSS) ελαχιστοποιώντας ή ακόμα και εξαλείφοντας την ανάγκη χρήσης της γεννήτριας για κλιματισμό, επομένως έχοντας οικονομικό όφελος λόγω της μικρότερης ποσότητας καυσίμου που καταναλώνει η γεννήτρια.

Το ΥΑΦ θα επαναφορτιστεί όποτε είναι διαθέσιμη η πηγή ενέργειας, οπότε θα δουλεύει το κανονικό σύστημα κλιματισμού, άρα και θα αποβάλλει την αποθηκευμένη θερμότητα.

5.11 ΟΧΗΜΑΤΑ

Πολύ ενδιαφέροντα στοιχεία προκύπτουν από την αυτοκινητοβιομηχανία, στα πλαίσια της οποίας έχουν δοκιμαστεί ΥΑΦ σε πληθώρα εφαρμογών. Δύο από τα πλέον ενδιαφέροντα και επιτυχημένα παραδείγματα περιγράφονται παρακάτω.

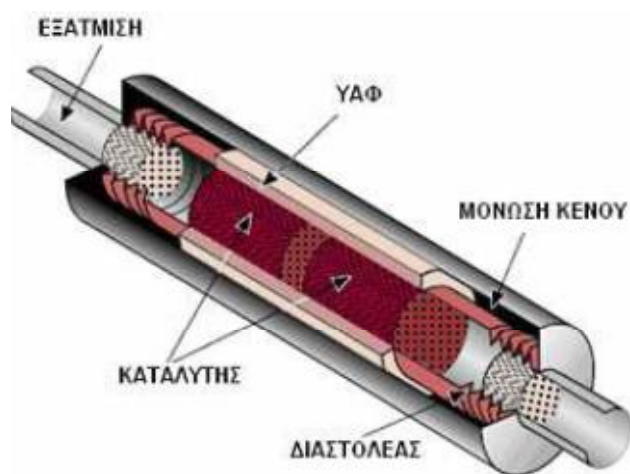
Τα ΥΑΦ χρησιμοποιούνται ήδη σήμερα σε μία μπαταρία λανθάνουσας θερμότητας, την οποία προσφέρει η BMW σαν προαιρετικό εξοπλισμό στα μοντέλα της σειράς 5. Η αρχή λειτουργίας είναι αρκετά απλή. Το υλικό αποθήκευσης ενέργειας είναι συνδεδεμένο με το ψυγείο του αυτοκινήτου και αποθηκεύει την πλεονάζουσα θερμότητα όταν ο κινητήρας λειτουργεί στα θερμοκρασιακά όρια σχεδίασης. Αυτή η θερμότητα είναι μετά διαθέσιμη στο επόμενο ξεκίνημα του οχήματος με κρύο κινητήρα, ώστε να θερμανθεί ο κινητήρας γρηγορότερα, οπότε βελτιώνει το συνολικό συντελεστή κατανάλωσης καυσίμου (km/lit καυσίμου), όπως επίσης και για τη θέρμανση της καμπίνας του οχήματος (οδηγική άνεση-θερμική άνεση).

Χάρη στην εξαιρετική μόνωση της μπαταρίας λανθάνουσας θερμότητας, μπορεί να διατηρήσει την αποθηκευμένη ενέργεια με το όχημα σταματημένο σε περιβάλλον -20°C για τουλάχιστον δύο εικοσιτετράωρα.

Μία ακόμη εφαρμογή των ΥΑΦ είναι στο σύστημα εξαγωγής του οχήματος. Με χρήση ΥΑΦ διατηρείται ο καταλύτης στη θερμοκρασία σχεδιασμού, ελαττώνοντας τις –αναγκαστικά – αυξημένες εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων κατά το ξεκίνημα του κρύου κινητήρα. Ο καταλύτης (καταλυτικός μετατροπέας) που πλέον είναι αναφαιρέτο εξάρτημα όλων των σύγχρονων αυτοκινήτων, μετατρέπει μέσω

οξειδωσης τα μονοξειδια αζωτου και ανθρακα απο την καυση του καυσιμου στον κυλινδρο, σε λιγοτερο βλαβερα και σιγουρα οχι δηλητηριωδη διοξειδια. Για να επιτευχθει αυτο, θα πρεπει η θερμοκρασια του καταλυτη να ειναι πολυ υψηλη, καθως για την εν λογω χημικη διαδικασια η μεγαλη θερμοκρασια ειναι απαραίτητος παραγοντας. Αυτη ομως η θερμοκρασια δεν αναπτυσσεται αμεσα κατα την εκκινηση του αυτοκινητου, αλλα μετα απο λιγα λεπτα. Έχει παρατηρηθει οτι κατα την περιοδο της κρυας εκκινησης εκλυεται το 60%-80% των τοξικων καυσαεριων.

Για την αντιμετωπιση του προβληματος αυτου σχεδιαστηκε ενας τριοδικος καταλυτης ενισχυμενος με ΥΑΦ, με σκοπο να αποθηκευουν θερμοτητα κατα την κινηση του αυτοκινητου και να την απελευθερωνουν στην επομενη εκκινηση του Σε οχηματα που εφαρμωστηκε το εν λογω συστημα τα αποτελεσματα ειναι εντυπωσιακα. Οι κινητηρες τεθηκαν σε λειτουργια μετα 24 ωρες απο την προηγουμενη εκκινηση τους και μετρηθηκαν οι εκπομπες των καυσαεριων τους. Διαπιστωθηκε οτι οι εκπομπες υδρογονανθρακων και μονοξειδιου του ανθρακα ηταν μειωμενες κατα 84% και 91% αντιστοιχα, συγκρινόμενες με τις εκπομπες κινητηρων με συμβατικο καταλυτη.

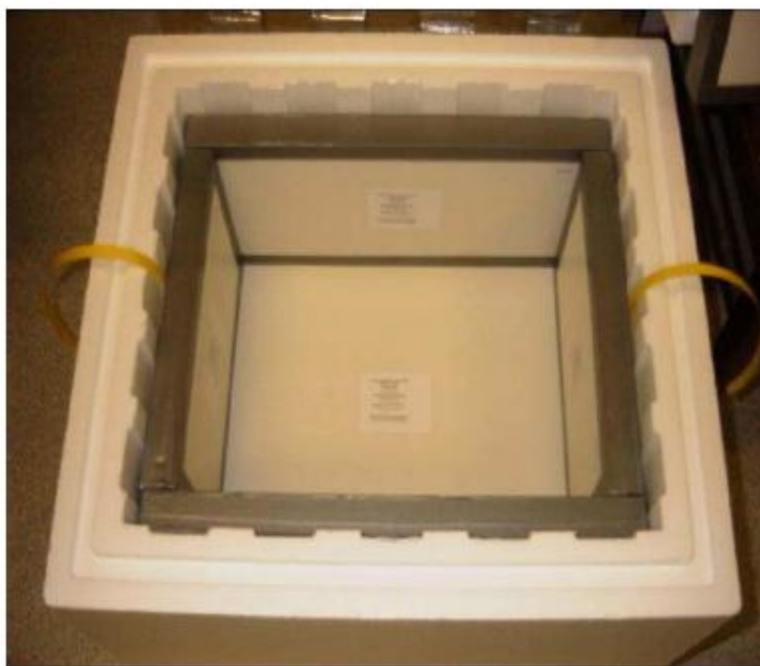


Σχήμα 5.2 Υλικά αλλαγής φάσης σε καταλύτη αυτοκινητού [4].

5.12 ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ ΑΓΑΘΩΝ

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 θερμοαντική διάταξη.

Η μεταφορά ευαίσθητων νωπών τροφίμων, ευαίσθητων στις θερμοκρασιακές αλλαγές φαρμακευτικών ειδών, 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.



Σχήμα 5.3 Πλάκες ΥΑΦ για ενίσχυση συσκευασίας μεταφοράς προϊόντων [1].

Το τεράστιο πλεονέκτημα των ΥΑΦ είναι ότι μπορούν να απορροφήσουν ή να αποδώσουν σεβαστά ποσά θερμότητας σχεδόν ισοθερμοκρασιακά. Είναι προφανές ότι ανάλογα με τις θερμοκρασιακές απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής επιλέγεται και υλικό με αντίστοιχο σημείο τήξης.

Σε γενικές γραμμές, πριν από τη μεταφορά φορτίζονται τα υλικά αλλαγής φάσης είτε σε ψυγείο, είτε σε φούρνο, ώστε να είναι έτοιμα για χρήση. Το πολύ θετικό εδώ είναι ότι το υλικό αλλαγής φάσης παρέχει τη δυνατότητα φόρτισής του καταναλώνοντας ηλεκτρική ενέργεια μη αιχμής, που ως γνωστό, είναι φθηνότερη. Η μεταφορά ζεστών γευμάτων για παράδειγμα, απαιτεί μία πηγή θερμότητας, διαφορετικά δεν θα ικανοποιήσει τους πελάτες-καταναλωτές. Μία ηλεκτρική θερμαντική μονάδα δεν μπορεί να είναι διαθέσιμη κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες, και σε αυτές τις περιπτώσεις τα υλικά αλλαγής φάσης προσφέρουν ιδανική λύση, αφού επιτρέπουν την κατασκευή ενός αυτό-θερμαινόμενου σκεύους μεταφοράς.

Η κατασκευή των δοχείων μεταφοράς προβλέπει την προθέρμανση των πλακών που περιέχουν τα υλικά αλλαγής φάσης σε ένα κοινό φούρνο ή μέσω ηλεκτρικών αντιστάσεων. Μόλις οι πλάκες με το υλικό αλλαγής φάσης φορτιστούν, αποθηκεύοντας ένα μεγάλο ποσό λανθάνουσας θερμότητας τοποθετούνται στα θερμικά μονωμένα δοχεία σαν εσωτερική επένδυση.

Επιπρόσθετα πρέπει να σημειωθεί, ότι ένα μεγάλο πλεονέκτημα των υλικών αλλαγής φάσης στην εφαρμογή αυτή είναι η αποφόρτιση του υλικού αλλαγής φάσης σε σταθερή θερμοκρασία, χωρίς να υπερθερμαίνει το εσωτερικό περιβάλλον του δοχείου. Πλέον οι εταιρίες που δραστηριοποιούνται στο χώρο, έχουν αναπτύξει πλήθος τυποποιημένων προϊόντων μεταφοράς, τα οποία είναι εφοδιασμένα με εγκοπές. Αυτές οι εγκοπές πέραν της ευελιξίας και ευκολίας στον τομέα της συναρμολόγησης του κιβωτίου μεταφοράς, εμφανίζουν το πρόσθετο πλεονέκτημα της αεροστεγούς κατά το δυνατόν μεταφοράς των αγαθών, γεγονός το οποίο ελαχιστοποιεί τις θερμικές απώλειες. Πέρα όμως από αυτές τις συσκευασίες προσφέρονται και έτοιμα κιβώτια ενισχυμένα με υλικά αλλαγής φάσης για τη μεταφορά οσοδήποτε μεγάλου όγκου προϊόντων, ώστε να ικανοποιηθούν οι ανάγκες οποιουδήποτε πελάτη ή επιχείρησης.

Επίσης η αποθήκευση και η μεταφορά ιατροφαρμακευτικών προϊόντων είναι μία κατάλληλη εφαρμογή για τα ΥΑΦ. Ο λόγος είναι ότι πολλά από αυτά τα προϊόντα είναι πολύ ακριβά και η ποιότητά τους εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες θερμοκρασίας κατά την μεταφορά και την αποθήκευση. Η θερμοκρασίες που διατηρούνται τέτοιου είδους προϊόντα είναι από 20°C έως 24°C από 2°C έως 6°C και άλλα από -30°C έως -26°C. Είναι δυνατό τα οχήματα που μεταφέρουν τα προϊόντα να έχουν κάποιο σύστημα ψύξης όμως το πρόβλημα είναι στη μεταφορά ανάμεσα στο νοσοκομείο και το όχημα και μετά ανάμεσα στο όχημα και τον τελευταίο προορισμό. Για παράδειγμα το αίμα απαγορεύεται να παγώσει όπως και να ανέβει πάνω από κάποιο όριο η θερμοκρασία του διότι μετά δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Η παραδοσιακή μέθοδος διατήρησης της θερμοκρασίας σε κάποια προκαθορισμένα όρια είναι η χρήση πολύπλοκων και ακριβών συστημάτων ψύξης. Παρακάτω βλέπουμε ειδικές συσκευασίες για την μεταφορά αίματος που διατηρούν την θερμοκρασία μεταξύ 2°C και 10°C έως και για 12 ώρες χωρίς περαιτέρω τεχνικό εξοπλισμό κλίνοντας έτσι τα κενά στην αλυσίδα των μεταφορών.

5.13 ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΔΥΣΗ

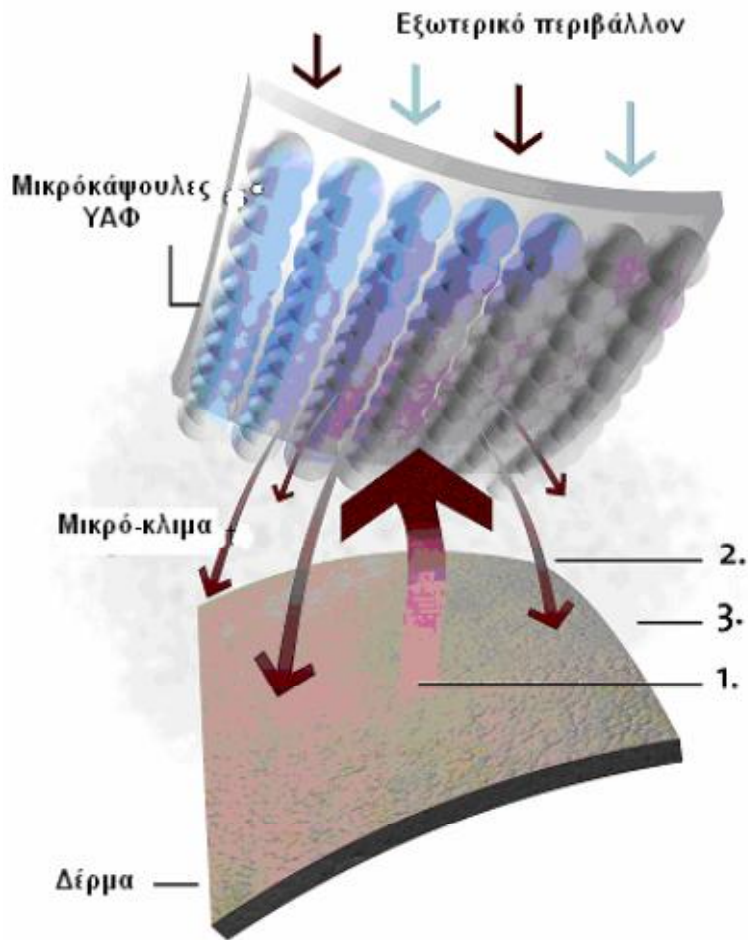
Η εισαγωγή υλικών αλλαγής φάσης στα ρούχα έχει ως στόχο να παρέχουν θερμική άνεση, ομοιόμορφα κατανεμημένη θερμοκρασία και λιγότερο ιδρώτα. Η εισαγωγή των ΥΑΦ σε ρούχα ξεκίνησε από διαστημικές εφαρμογές, στις στολές των αστροναυτών, για τη προστασία τους από τις απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές. Σήμερα 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 κ.τ.λ.

Στα ενδύματα χρησιμοποιούνται κυρίως οργανικά ΥΑΦ σε μικροκάψουλες, για να μην εμφανίζονται διαρροές κατά τη μετάβαση στην υγρή φάση. Τα μικρο-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 εμβαπτισμό των ινών του υφάσματος σε διάλυμα που περιέχει μικροσκοπικές μονάδες ΥΑΦ (μικρο-ΥΑΦ) ή με την προσθήκη των μικρο-ΥΑΦ σε πολυμερή, τα οποία μετά οδηγούνται σε εξολκείς για σχηματισμό πολυμερών ινών.

Συνήθως οι μικροκάψουλες με τα ΥΑΦ, τοποθετούνται κατά στρώματα και σε σχετικά πειράματα έχει αποδειχθεί η αποδοτικότερη χρήση δύο στρωμάτων με ΥΑΦ.

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. Τα παραφινούχα ΥΑΦ που χρησιμοποιούνται συνήθως εμφανίζουν το φαινόμενο της τήξης στους 28-300 °C.



Σχήμα 5.4 Αρχή λειτουργίας των ενισχυμένων με ΥΑΦ ενδυμάτων.

- 1) Το ΥΑΦ απορροφά την πλεονάζουσα θερμότητα
- 2) Η αποθηκευμένη θερμότητα ελευθερώνεται προς το ανθρώπινο σώμα όποτε κάτι τέτοιο είναι επιθυμητό
- 3) Το αποτέλεσμα είναι ένα μικρόκλιμα σταθερής θερμοκρασίας [1].

Προφανώς για θερμοκρασίες χαμηλότερες από το σημείο τήξης των ΥΑΦ, το υλικό βρίσκεται εξ ολοκλήρου στη στερεή του φάση, αν και επειδή το ανθρώπινο σώμα βρίσκεται σε συνήθεις συνθήκες στους 36 °C, προσφέρει συνήθως ένα ποσό θερμότητας στο ΥΑΦ, το οποίο μπορεί να επανακτήσει στην περίπτωση που η θερμοκρασία του ελαττωθεί. Αν η θερμοκρασία τείνει να αυξηθεί, τότε το ΥΑΦ απορροφά θερμότητα για να μην υπερθερμανθεί το ανθρώπινο σώμα.



Σχήμα 5.5 Εμπορικά ενδύματα ενισχυμένα με ΥΑΦ [1].

Με αυτή τη μέθοδο προσθήκης μικρο-ΥΑΦ στα ρούχα, είναι δυνατός ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των λεγόμενων έξυπνων ενδυμάτων. Στις εφαρμογές που αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι πολλές, από βαριά ένδυση, μπουφάν, αδιάβροχα, κουβέρτες, προστατευτικά φωτιάς για πυροσβέστες, στολές κατάδυσης και πολλά άλλα.

Η χρήση των ΥΑΦ έχει πλέον εδραιωθεί στον τομέα της ένδυσης, με πολύ αξιόπιστα αποτελέσματα και για τον πιο απαιτητικό χρήστη. Προϊόντα όπως στολές για σκι, κυνηγετικά γιλέκα και θερμικά εσώρουχα, είναι μία θερμομονωτική μέθοδος πολύ διαφορετική με ό,τι έχει επικρατήσει μέχρι σήμερα, μεθόδους δηλαδή που βασίζονται στην αποθήκευση αέρα μεταξύ των ινών ή στρωμάτων υλικού. Χάρη στα μικρο-ΥΑΦ, η θερμότητα που απορροφάται οδηγεί το υλικό να αλλάξει φάση (από στερεό σε υγρό) σε μοριακό επίπεδο, αποθηκεύοντας ή απελευθερώνοντας ενέργεια, ανάλογα με τη θερμοκρασία του δέρματος. Η θερμότητα αυτή διατηρείται στο ΥΑΦ και όταν έρθει η ώρα ελευθερώνεται ομοιόμορφα και σταδιακά, δημιουργώντας ένα πολύ πιο αποτελεσματικό θερμομονωτικό στρώμα σταθερής θερμοκρασίας μεταξύ του δέρματος και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Αυτό σταδιακά θα οδηγήσει στην εξαφάνιση των δύσχρηστων και καθόλου πρακτικών θερμομονωτικών ρούχων που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα.

Αξιοσημείωτη είναι η χρήση των ΥΑΦ σε υποδήματα και πάτους υποδημάτων προσφέροντας στο χρήστη, ένα άνετο περιβάλλον για τα πόδια του. Με την εξομαλυσμένη θερμοκρασία εντός του υποδήματος, επιτυγχάνεται πέραν της θερμικής άνεσης, λιγότερη κόπωση, και λιγότερο ιδρώτα, ο συνδυασμός του οποίου με υψηλές θερμοκρασίες οδηγεί σε μυκητιάσεις και άλλες δερματοπάθειες. Τα τελευταία είναι ιδιαίτερα σημαντικά σε περιπτώσεις όπως των αθλητών ή άλλων

επαγγελματιών που είναι υποχρεωμένοι να φορούν συγκεκριμένα υποδήματα.

5.14 ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

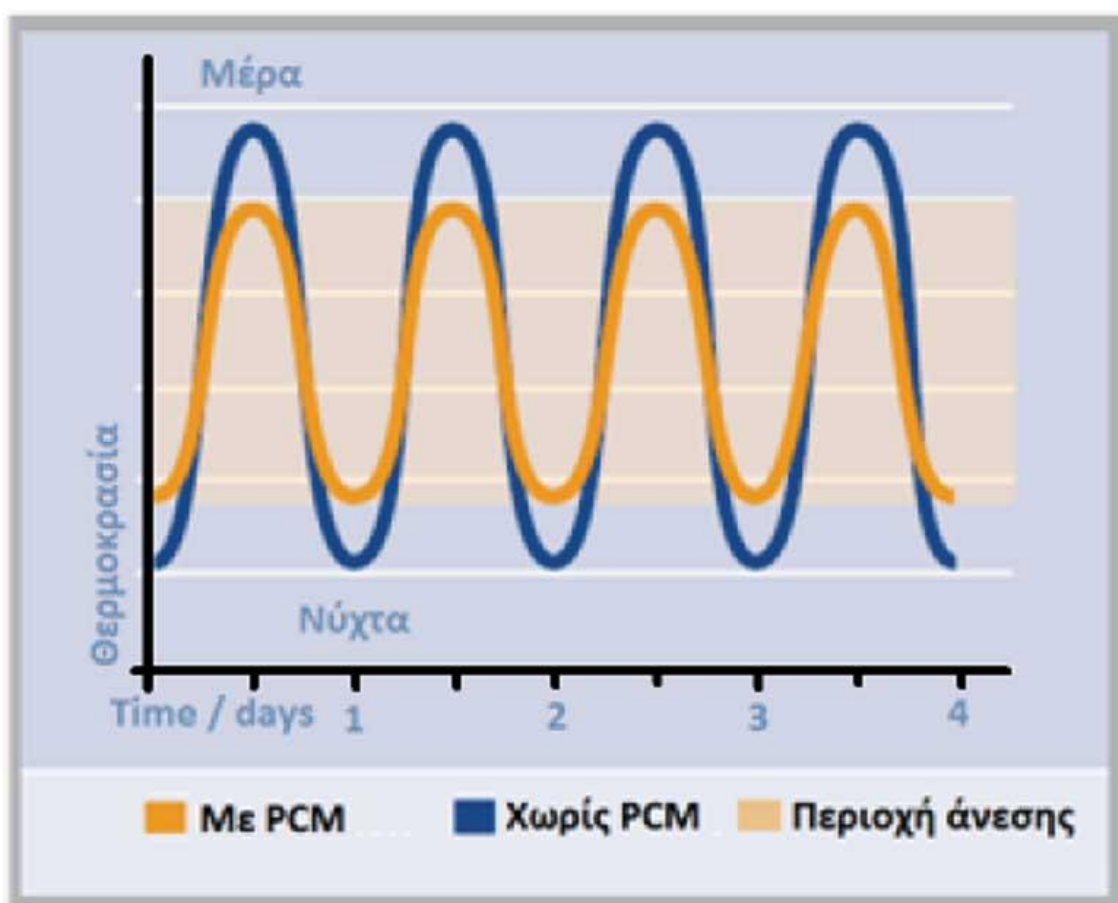
Τα ΥΑΦ χρησιμοποιούνται και σε εφαρμογές στα κτίρια. Μεταξύ αυτών, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν οι εφαρμογές που στοχεύουν στην αύξηση της ικανότητας αποθήκευσης θερμότητας του κελύφους.

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

Οι μηχανισμοί ανταλλαγών θερμότητας μεταξύ των υλικών μεγάλης θερμικής μάζας και του περιβάλλοντος αξιοποιούνται ανέκαθεν για τον έλεγχο της εσωτερικής θερμοκρασίας στα κτίρια. Ήδη, τα ΥΑΦ, με την ικανότητά τους να αποθηκεύουν (και να αποδίδουν) λανθάνουσα θερμότητα, αυξάνουν σημαντικά την απόδοσή τους.

Αυτό μπορούμε να το κατανοήσουμε με το παρακάτω παράδειγμα. Θεωρούμε ένα κτίριο στο κέλυφος του οποίου υπάρχουν ποσότητες ΥΑΦ με θερμοκρασία αλλαγής φάσης έστω τους 25°C . Αν η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του κτιρίου υπερβεί τους 25°C , τα ΥΑΦ θα αρχίσουν να τήκονται απορροφώντας παράλληλα θερμική ενέργεια από το περιβάλλον. Η απορροφούμενη στο στάδιο αυτό θερμότητα είναι λανθάνουσα, δηλαδή, δε συνεπάγεται αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού. Όμως, αφαιρούμενη από το περιβάλλον, εμποδίζεται από το να προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας άλλων υλικών και του αέρα. Έχουμε με άλλα λόγια συγκράτηση της ανόδου της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Αν (και όταν) ολοκληρωθεί η διαδικασία αλλαγής φάσης (τήξη) του υλικού και η θερμοκρασία περιβάλλοντος εξακολουθεί να παραμένει μεγαλύτερη των 25°C , τότε το (τηγμένο πλέον) υλικό θα συνεχίσει να συμπεριφέρεται συμβατικά, δηλαδή, να απορροφά θερμότητα και να αυξάνει η θερμοκρασία του. Κατά την αντίστροφη διαδικασία, της ψύξης, όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους 25°C , τα ΥΑΦ αρχίζουν να στερεοποιούνται και παράλληλα να αποδίδουν την αποθηκευμένη λανθάνουσα θερμότητα στο περιβάλλον.

Η απελευθερούμενη ποσότητα θερμικής ενέργειας συγκρατεί την πτώση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος (Σχήμα 5.6).



Σχήμα 5.6 Η επίδραση των ΥΑΦ στην εσωτερική θερμοκρασία ενός κτιρίου [7]

Μολονότι το αποτέλεσμα στο παράδειγμα είναι ποιοτικά παρόμοιο με αυτό του επιτυγχάνεται με συμβατικά υλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας (και στις δύο περιπτώσεις έχουμε εξομάλυνση των θερμοκρασιακών μεταβολών στο εσωτερικό του κτιρίου), η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η λανθάνουσα θερμότητα των ΥΑΦ είναι, γενικά, σημαντικά μεγαλύτερη από την ικανότητα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας των συμβατικών δομικών υλικών (π.χ. η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του πάγου ισοδυναμεί με τη θερμότητα που προκαλεί την άνοδο της θερμοκρασίας ίδιας ποσότητας νερού κατά 80°C). Ως αποτέλεσμα, απαιτούνται μικρότερες ποσότητες ΥΑΦ για το ίδιο αποτέλεσμα στον έλεγχο της εσωτερικής θερμοκρασίας σε ένα κτίριο.

Έτσι, ενδεικτικά, η απορροφούμενη θερμότητα από γυψοσανίδα πάχους 3cm που περιέχει στη μάζα του ΥΑΦ σε ποσοστό 30% (πρόκειται για προϊόν που ήδη κυκλοφορεί στο εμπόριο) ισοδυναμεί περίπου με τη θερμότητα που αποθηκεύει στα όρια των θερμοκρασιών άνεσης ένα τοίχος 18cm από μπετό ή 23cm από τούβλα.

Τα κριτήρια επιλογής των ΥΑΦ για εφαρμογές στα κτίρια μπορούν να διακριθούν σε Φυσικά, Τεχνικά και Οικονομικά:

Φυσικά:

Κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης (στα όρια θερμικής άνεσης)

Σταθερή θερμοκρασία αλλαγής φάσης

Μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης

Μεγάλη θερμική αγωγιμότητα

Τεχνικά:

Ø Χαμηλή τάση ατμών

Ø Μικρή μεταβολή όγκου κατά την αλλαγή φάσης

Ø Χημική ευστάθεια

Ø Συμβατότητα με άλλα δομικά υλικά

Ø Ασφάλεια στη χρήση τους (π.χ. ευφλεκτότητα)

Οικονομικά:

Ø Χαμηλό κόστος

Ø Δυνατότητα ανακύκλωσης

6. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Με τον όρο αποθήκευση θερμικής ενέργειας αναφερόμαστε στο πλήθος εκείνων των τεχνολογικών εφαρμογών που σκοπός τους είναι η αποθήκευση ενέργειας υπό μορφή θερμότητας σε κατάλληλους θερμικούς ταμιευτήρες με σκοπό την χρησιμοποίησή της σε κάποια άλλη χρονική στιγμή. Χρησιμοποιούνται για να εξομαλύνουν την ενεργειακή ζήτηση μεταξύ ημέρας και νύχτας. Ο θερμικός ταμιευτήρας μπορεί να διατηρεί μια θερμοκρασία μεγαλύτερη ή μικρότερη από αυτή του περιβάλλοντος.

Τα συστήματα Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας (ΑΘΕ) περιλαμβάνουν και εφαρμογές ψύξης και θέρμανσης. Ένα ΑΘΕ θέρμανσης προσθέτει ενέργεια στο μέσο αποθήκευσης, ενώ ένα ΑΘΕ ψύξης, αφαιρεί ενέργεια από το μέσο, το οποίο είναι συνήθως περιορισμένο σε κάποιο ταμιευτήρα ή κάποιο δοχείο.

Τα ΑΘΕ ψύξης χρησιμοποιούνται, για παράδειγμα, σε κλιματιστικές εφαρμογές. Τη νύχτα η φθηνή ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για να φορτιστεί το δοχείο με κρύο υλικό, το οποίο κατά τη διάρκεια της ημέρας, θα ικανοποιήσει σημαντικό μέρος του ψυκτικού φορτίου. Το μέσο αποθήκευσης ψύχεται στον ψύκτη και αποθηκεύεται στο μονωμένο δοχείο για μετέπειτα χρήση. Όταν απαιτείται ψύξη, το ΑΘΕ ψύξης την παράγει εκμεταλλευόμενο τη θερμοδυναμική κατάσταση του μέσου αποθήκευσης.

Τα συστήματα με ΥΑΦ είναι περισσότερο ακριβά από τα συστήματα ψυχρού νερού, αλλά είναι εύκολα στη χρήση και στη συντήρηση και απαιτούν πολύ λιγότερο χώρο.

Η επικρατούσα σήμερα εφαρμογή είναι αυτή η οποία κατά τη διάρκεια της νύχτας παράγεται πάγος, ή διαφορετικά κρύο νερό ή κάποιο εύτηκτο διάλυμα, το οποίο μετά χρησιμοποιείται κυρίως σε κλιματιστικές εγκαταστάσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας κατέστη δυνατή εξαιτίας της μεγάλης λανθάνουσας θερμότητας τήξης του νερού. Ένας μετρικός τόνος νερού, δηλαδή ένα κυβικό μέτρο μπορεί να αποθηκεύσει 334 MJ ενέργειας.

6.2 ΚΛΙΜΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

Η πλέον διαδεδομένη εφαρμογή είναι αυτή της μεγάλης κλίμακας κλιματιστικών εφαρμογών (μεγάλα κτίρια ή ολόκληρα συγκροτήματα εγκαταστάσεων). Οι κλιματιστικές εγκαταστάσεις τέτοιου είδους κτιρίων είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για το φορτίο αιχμής, ιδίως τις ζεστές καλοκαιρινές ημέρες, όπου έτσι κι αλλιώς οι κλιματιστικές εγκαταστάσεις από την κατασκευή τους αποδίδουν σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

Σε τέτοιες εγκαταστάσεις ένας σχετικά μικρός ψύκτης μπορεί να παράξει μία ποσότητα πάγου. Κατά τη διάρκεια της ημέρας το νερό κυκλοφορεί διαμέσου του πάγου με αποτέλεσμα να υπάρχει κρύο νερό, το οποίο υπό άλλες συνθήκες θα ήταν το φορτίο που θα καλείτο να καλύψει η κλιματιστική εγκατάσταση.

Ένα επιμέρους σύστημα αποθήκευσης ελαττώνει το κόστος της εγκατάστασης αν οι ψύκτες δουλεύουν σε εικοσιτετράωρη βάση. Τη νύχτα παράγουν πάγο, ο οποίος κατά τη διάρκεια της ημέρας χρησιμοποιείται για να ψύξει το νερό ανακυκλοφορίας του κλιματιστικού συστήματος. Ένα τέτοιο σύστημα συνήθως λειτουργεί σε φάση δημιουργίας πάγου 16 με 18 ώρες την ημέρα και σε φάση ψύξης νερού περίπου 6. Το κόστος ελαττώνεται αφού πλέον οι ψύκτες χρειάζεται να έχουν το μισό μέγεθος σε σχέση με μία κλασική εγκατάσταση.

Η απόδοση ψυκτών κλιματισμού μετριέται μέσω του συντελεστή λειτουργίας τους (COP) που εξαρτάται από τα θερμοκρασιακά όρια μεταξύ των οποίων εργάζεται η εγκατάσταση. Θεωρητικά, τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μπορούν να έχουν ακόμα πιο αποδοτικούς ψύκτες επειδή η θερμότητα απορρίπτεται στον περισσότερο δροσερό νυχτερινό αέρα, παρά στον θερμότερο ημερήσιο. Στην πράξη όμως αυτό το πλεονέκτημα αντισταθμίζεται από τις θερμικές απώλειες κατά τη διαδικασία σχηματισμού και τήξης του πάγου.

Ακόμα μερικά πλεονεκτήματα αυτών των μεθόδων είναι ότι από τη στιγμή που υπάρχει εξοικονόμηση ενέργειας με τη χρήση αυτής της μεθόδου, μειώνεται η κατανάλωση καυσίμων με επακόλουθο την ελάττωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος.

Μία νέα άποψη σε αυτές τις τεχνολογίες χρησιμοποιεί τον πάγο σαν συμπυκνωτικό για το ψυκτικό μέσο μιας διάταξης. Σε αυτή την περίπτωση, κλασικό ψυκτικό μέσο εισάγεται σε σωλήνες όπου και χρησιμοποιείται. Αντί λοιπόν να υπάρχει χρήση μηχανικού συμπιεστή για την επαναφορά του ψυκτικού στην υγρή φάση, όπως συνηθίζεται, χρησιμοποιείται η χαμηλή θερμοκρασία του πάγου για να εκτελέσει αυτή τη διαδικασία. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει στα υπάρχοντα κλασικά συστήματα κλιματισμού να μετατραπούν σε συστήματα αποθήκευσης, κάτι το οποίο ήταν δύσκολο να επιτευχθεί με την έως τώρα τεχνολογία συστημάτων κρύου νερού.

6.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε εφαρμογές ψύξης του αέρα εισαγωγής σε στροβιλομηχανές. Αντί να αυξάνεται η ηλεκτρική ζήτηση τις νυχτερινές ώρες, αυτή η τεχνική αυξάνει την παραγωγική ικανότητα της εγκατάστασης. Για την παραγωγή του πάγου κατά τις νυχτερινές ώρες, ο στρόβιλος είναι συχνά συνδεδεμένος με τον μηχανικό συμπιεστή ενός μεγάλου ψύκτη. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, νερό κυκλοφορεί διαμέσου του πάγου, ψύχεται και οδηγείται μέσω σωλήνων στην είσοδο της μηχανής σε έναν εναλλάκτη θερμότητας. Έτσι επιτυγχάνεται η ψύξη του αέρα εισαγωγής σε θερμοκρασίες κοντά στο σημείο στερεοποίησης του νερού, πράγμα που σημαίνει ότι η πυκνότητα του αέρα αυξάνει, άρα ο στρόβιλος απορροφά μεγαλύτερη ποσότητα εργαζόμενου μέσου, άρα επιτυγχάνεται περισσότερη παραγωγή ενέργειας και επομένως περισσότερο αποδοτική παραγωγή ενέργειας.

6.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΠΑΓΟ

Η αποθήκευση θερμότητας με τη βοήθεια πάγου, είναι σήμερα ένας τεχνητός και βιομηχανικός τρόπος αποθήκευσης ψυκτικής ισχύος στο σημείο τήξης του νερού, δηλαδή στους 0°C. Για την παραγωγή αυτής της ενέργειας τα ψυκτικά μηχανήματα πρέπει να λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από τις συνήθειες, ώστε να είναι διαθέσιμο ψυκτικό υγρό στους -6 έως -3°C, ανάλογα με τη διάρκεια του κύκλου.

Στην αποθήκευση θερμότητας με πάγο, ο στόχος είναι η τεχνολογία να μπορεί να εκμεταλλευτεί τη λανθάνουσα θερμότητα πήξης του νερού. Οι ψυκτικές εγκαταστάσεις που λαμβάνουν μέρος στη διαδικασία είναι υποχρεωτικό να λειτουργούν σε θερμοκρασίες κατά πολύ χαμηλότερες από αυτές που λαμβάνουν χώρα σε μία εφαρμογή κλιματισμού. Ανάλογα με την τεχνολογία της μονάδας, μπορεί να χρησιμοποιούνται είτε ειδικά μηχανήματα παραγωγής πάγου, ή συνηθισμένοι ψύκτες, διαμορφωμένοι κατάλληλα για χαμηλές θερμοκρασίες.

Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου παραγωγής ψύξης είναι η πιθανή ελάττωση του ηλεκτρικού φορτίου αιχμής που απαιτείται και η ελάττωση της χωρητικότητας του απαραίτητου εγκατεστημένου ψύκτη. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με συνδυασμό αποθήκευσης και κρύου νερού και πάγου. Γενικά, τα συστήματα αποθήκευσης πάγου έχουν ένα κατά 15-20% υψηλότερο αρχικό κόστος (εγκατάστασης) από τα συστήματα αποθήκευσης κρύου νερού.

Όμως το σύστημα πάγου απαιτεί 4-6 φορές μικρότερο όγκο αποθήκευσης σε σχέση με το αντίστοιχο σύστημα νερού και μπορεί να αποδειχτεί ιδανική λύση για εφαρμογές όπου οι περιορισμοί του χώρου είναι ιδιαίτερα αυστηροί.

Τα συστήματα αποθήκευσης πάγου μπορούν επίσης να εμφανίσουν πλεονεκτήματα όταν η διαφορά στην τιμή της ηλεκτρικής μονάδας μεταξύ ημέρας και νύχτας είναι σημαντική και συνεπώς να υπάρχει ένα επιπλέον κριτήριο για να αναλάβει το σύστημα πάγου μεγαλύτερο κομμάτι της ψυκτικής παραγωγής στο ενδιάμεσο περιόδων αιχμής και μη-αιχμής.

Κυρίως λόγω της μεγαλύτερης ψυκτικής ικανότητας ανά μονάδα επιφανείας σε σχέση με τα συστήματα αποθήκευσης κρύου νερού, τα συστήματα πάγου μπορούν να προτιμηθούν παρόλο το κόστος της αρχικής επένδυσης.

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες συστημάτων αποθήκευσης ψύξης με πάγο, μερικές από τις οποίες παρουσιάζονται παρακάτω:

- Ø Σύστημα τύπου σπειρώματος
- Ø Σύστημα Sheet ice harvester
- Ø Πάγος σε μικροκάψουλες
- Ø Διφασικό μίγμα νερού-πάγου

Ακόμη, σε λίγες εφαρμογές έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται εύτηκτα άλατα ως ΥΑΦ στη θέση του πάγου.

6.5 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΨΥΞΗΣ ΤΥΠΟΥ ΣΠΕΙΡΩΜΑΤΟΣ

Αυτή η τεχνολογία είναι η πρώτη που χρησιμοποιήθηκε σε εφαρμογές αποθήκευσης ψύξης. Υπάρχουν δύο βασικές τεχνικές της τεχνολογίας αποθήκευσης ψύξης τύπου σπειρώματος (Ice on Coil), η εξωτερική και η εσωτερική τήξη. Και οι δύο εναλλακτικές χρησιμοποιούν την τεχνική όπου ο πάγος σχηματίζεται στην εξωτερική επιφάνεια σωλήνων ή σερπαντίνων, οι οποίες είναι βυθισμένες σε δεξαμενή νερού. Κατά την περίοδο φόρτισης το ψυκτικό μέσο (τυπικά σε αυτές τις εφαρμογές χρησιμοποιείται μίγμα 25% προπυλογλυκόλη και 75% νερό) περνάει μέσα από τους σωλήνες και δημιουργεί στην εξωτερική τους επιφάνεια ένα στρώμα πάγου.

Για την εφαρμογή εξωτερικής τήξης το σύστημα αποθήκευσης πάγου χρειάζεται ψύκτη ικανό να παράξει θερμοκρασίες φόρτισης από -7 έως -3°C για το σχηματισμό 40 mm πάγου. Για σύστημα σχηματισμού 65 mm πάγου, οι αντίστοιχες θερμοκρασίες θα πρέπει να είναι -12 έως -9°C. Το σύστημα χρησιμοποιεί συνήθεις ψύκτες, οι οποίοι εμφανίζουν θερμοκρασίες φόρτισης από -6 ως -3°C.



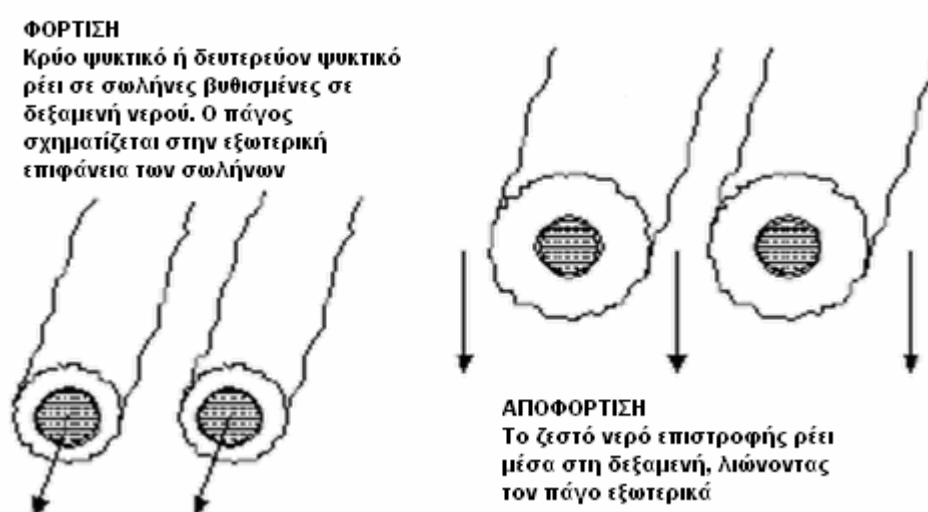
Σχήμα 6.1 Εγκατάσταση Ice on Coil [6].



Σχήμα 6.2 Τομή της δεξαμενής αποθήκευσης ψύξης τύπου σπειρώματος [6].

6.5.1 Εξωτερική τήξη

Κατά την αποφόρτιση του συστήματος εξωτερικής τήξης το ζεστό νερό που επιστρέφει από το σύστημα επανακυκλοφορεί στη δεξαμενή, αυξάνοντας τη μέση θερμοκρασία του νερού με αποτέλεσμα να λιώσει ο πάγος από έξω προς τα μέσα, και ως άμεση συνέπεια, το νερό ψύχεται και πάλι. Αέρας οδηγείται μέσα στη δεξαμενή και απελευθερώνεται μέσα σε αυτήν κατά την εκκίνηση του κύκλου φόρτισης και κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης, ώστε να ευνοηθεί η ομοιόμορφη δημιουργία του στρώματος πάγου και η εξομάλυνση των τοπικών διαφορών θερμοκρασίας στη δεξαμενή.



Σχήμα 6.3 Σύστημα εξωτερικής τήξης [1].

Ο πάγος διαμορφώνεται γύρω από τους σωλήνες κατά τη φάση της θερμικής φόρτισης σε πάχος έως και 65 mm. Συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται για να περιοριστεί το πάχος αυτού του στρώματος πάγου και να αποφευχθεί το φαινόμενο της "γεφύρωσης" του στρώματος μεταξύ δύο διαδοχικών σωλήνων, γεγονός το οποίο εμποδίζει την ελεύθερη κυκλοφορία του νερού στη δεξαμενή και ελαττώνει το βαθμό απόδοσης, καθώς η θερμοκρασία εξόδου του νερού είναι υψηλότερη λόγω της μικρότερης επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας.

Δεξαμενές

Οι δεξαμενές για τα συστήματα εξωτερικής τήξης είναι ανοιχτές άρα βρίσκονται σε ατμοσφαιρική πίεση, πράγμα το οποίο απαιτεί κάποιο σύστημα ελέγχου και σταθεροποίησης της στατικής πίεσης του συνολικού συστήματος ώστε να αποφευχθεί το ενδεχόμενο υπερχειλίσσης στην ανοιχτή δεξαμενή. Αυτός ο έλεγχος μπορεί να επιτευχθεί είτε με εναλλάκτες θερμότητας είτε με βαλβίδες σταθερής πίεσης και αντλίες.

Το σύστημα επεξεργασίας του νερού φυσιολογικά δεν χρειάζεται κάποια ιδιαίτερη μετατροπή, πέραν των κλασσικών εφαρμογών. Κάποια ιδιαίτερη φροντίδα και προστασία εναντίον της διάβρωσης μπορεί να χρειαστεί σε εγκαταστάσεις εξωτερικής τήξης, όπου το νερό στη δεξαμενή αερίζεται, αφού η τελευταία είναι ανοιχτή. Και σε αυτή την περίπτωση όμως, αν χρησιμοποιηθούν εναλλάκτες θερμότητας για τη σταθεροποίηση της στατικής πίεσης, το σύστημα διανομής του νερού παραμένει κλειστό και έτσι δεν χρειάζεται κάποια περεταίρω μέριμνα.

Το σύστημα αποθήκευσης με εξωτερική τήξη μπορεί επίσης να συνδυαστεί με περισσότερες δεξαμενές. Πολλαπλές δεξαμενές στις περισσότερες εφαρμογές είναι συνδεδεμένες παράλληλα. Η εν σειρά σύνδεση των δεξαμενών χρησιμοποιείται μερικές φορές όταν απαιτείται μεγάλος ρυθμός αποφόρτισης από το σύστημα, όπου ζητούμενο είναι η για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα παραμονή του νερού στη δεξαμενή. Όμως η ροή του νερού μεταξύ των εν σειρά συνδεδεμένων δεξαμενών κυβερνάται μόνο από την υψομετρική διαφορά στάθμης στις αντίστοιχες δεξαμενές.

Μία σύνδεση με μεγάλη διατομή είναι απαραίτητη ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πτώση πίεσης και η διαφορά στάθμης μεταξύ των δεξαμενών. Παρόλα αυτά η σε σειρά σύνδεση περισσότερων από δύο δεξαμενών γενικά δεν συνιστάται.

Λειτουργία

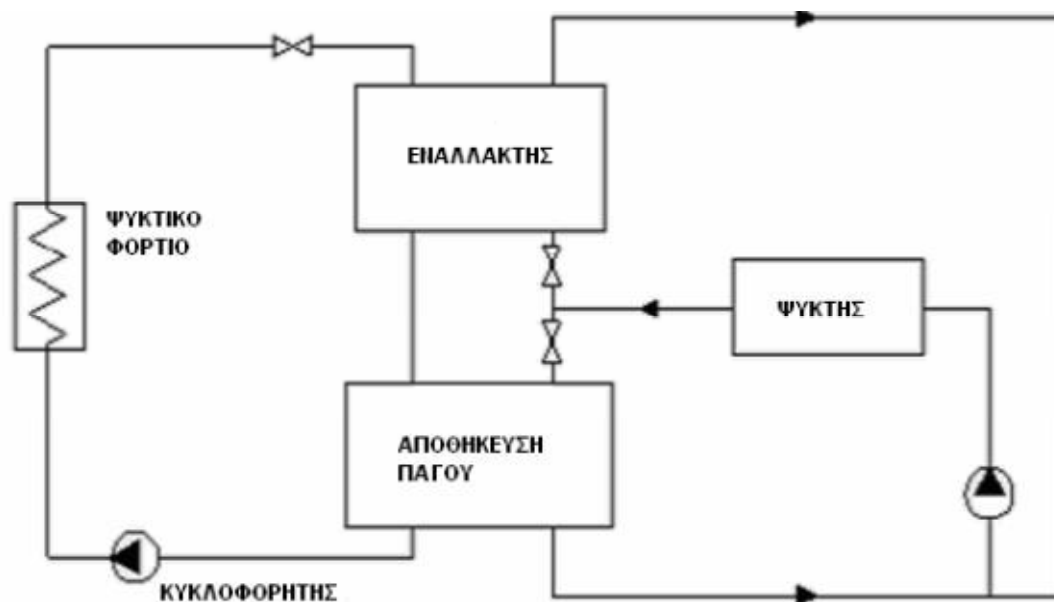
Συστήματα αποθήκευσης πάγου εξωτερικής τήξης είναι ιδανικά για εφαρμογές και συστήματα που απαιτούν καθαρό νερό χωρίς πρόσθετα στον ψυκτικό κύκλο ή απαιτούν παροχή νερού σε θερμοκρασία 1-2°C. Χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές διατάξεις συστημάτων εξωτερικής τήξης:

- Ø Συστήματα που χρησιμοποιούν το ψυκτικό μέσο κατευθείαν μέσα στις σωληνώσεις
- Ø Συστήματα που δημιουργούν πάγο έμμεσα χρησιμοποιώντας ένα δευτερεύον ψυκτικό το οποίο ψύχεται από ένα ψύκτη (chiller).

Το σύστημα άμεσης ψύξης δημιουργεί πάγο με τις σωληνώσεις να λειτουργούν σαν ατμοποιητής, εννοώντας ότι το ψυκτικό περνάει μέσα από τη μονάδα αποθήκευσης. Αυτή η εφαρμογή χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία. Το δευτερεύον ψυκτικό σύστημα είναι πολύ σύνηθες για εφαρμογές θέρμανσης-ψύξης-κλιματισμού-εξαερισμού, καθώς είναι περισσότερο εύκολο και απλούστερο σε σχεδιασμό, εγκατάσταση και συντήρηση και επίσης λόγω του μειωμένου όγκου του ψυκτικού μέσου. Το σύστημα άμεσης ψύξης είναι περισσότερο αποδοτικό καθώς υπάρχει συγκριτικά λιγότερη μεταφορά θερμότητας μεταξύ ψυκτικού και επιφάνειας σχηματισμού πάγου.

Το σχήμα 6.4 παρουσιάζει μία εγκατάσταση δευτερεύοντος ψυκτικού με εξωτερική τήξη. Εδώ η δεξαμενή είναι συνδεδεμένη με το σύστημα διανομής. Κατά την αποφόρτιση του συστήματος, ένας εναλλάκτης θερμότητας επιτρέπει στον ψύκτη να ενισχύσει την ψύξη της δεξαμενής.

Ένας πιθανός δεύτερος ψύκτης στο κύκλωμα του κρύου νερού μπορεί να βοηθήσει ακόμη περισσότερο.



Σχήμα 6.4 Διάταξη εξωτερικής τήξης με δευτερεύον ψυκτικό μέσο [1].

Η ελαχιστοποίηση του φαινομένου της γεφύρωσης των στρωμάτων πάγου καθώς και ο περιορισμός του πάχους αυτών κατά τη φάση της φόρτισης του συστήματος, είναι οι δύο βασικές έννοιες του συστήματος ελέγχου για εγκατάσταση αποθήκευσης με σωληνώσεις και εξωτερική τήξη.

Για να μεγιστοποιηθεί την απόδοση και να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας και τα κόστος γενικότερα, όλη η ποσότητα του σχηματιζόμενου πάγου πρέπει να λιώνει τουλάχιστον μία φορά την εβδομάδα. Σε περιπτώσεις όπου η εγκατάσταση λειτουργεί σε μερικό φορτίο, ο ψυκτικός κύκλος πρέπει να περιορίζεται, ώστε να αποθηκεύεται μόνο η απαραίτητη ενέργεια.

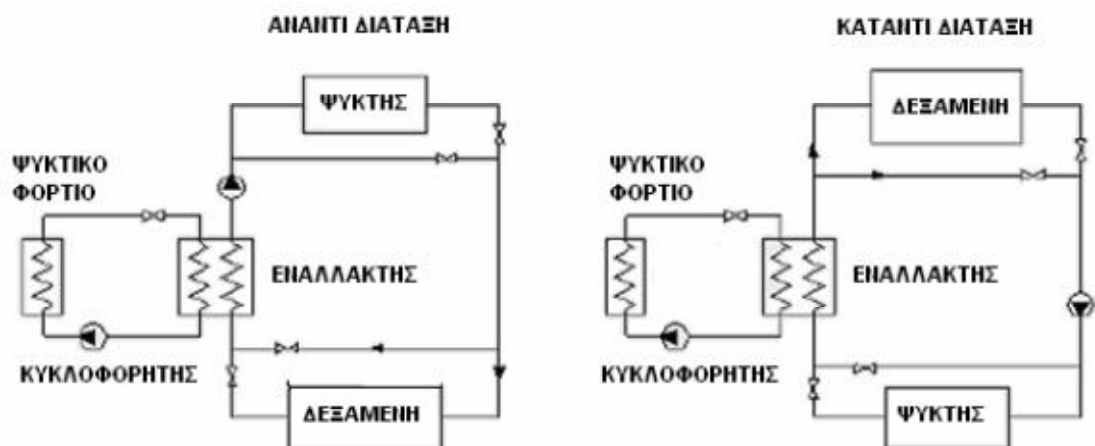
Το σύστημα ελέγχου του πάχους του πάγου πρέπει να διαθέτει αισθητήρα πάχους, και να μπορεί να σταματά τη φόρτιση του συστήματος όταν επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι τέτοιου ελέγχου, και ο πιο απλός από αυτούς βασίζεται στο γεγονός ότι ο πάγος έχει μεγαλύτερο όγκο από το νερό, οπότε ένας αισθητήρας στάθμης του νερού στη δεξαμενή μπορεί να ελέγξει τον αποθηκευμένο πάγο.

Μια άλλη μέθοδος αποτελείται από καθετήρα γεμάτο με υγρό που τοποθετείται σε συγκεκριμένη απόσταση από τους σωλήνες του συστήματος. Καθώς σχηματίζεται πάγος αγκαλιάζει τον καθετήρα προκαλώντας την πήξη του υγρού στο εσωτερικό του, τότε αυξάνεται η πίεση, η οποία μπορεί τελικά να μετρηθεί. Κάθε μονάδα παραγωγής πάγου πρέπει να έχει και ένα τέτοιο σύστημα ελέγχου του παραγόμενου πάγου.

6.5.2 Εσωτερική τήξη

Το σύστημα εσωτερικής τήξης αποφορτίζεται καθώς το ζεστό νερό που επιστρέφει περνά μέσα από τους σωλήνες και λειώνει τον πάγο από μέσα προς τα έξω. Πρώτα τήκεται ο πάγος στο όριο του σωλήνα δημιουργώντας ένα στρώμα νερού μεταξύ του σωλήνα και του πάγου. Καθώς η διαδικασία προχωρά, το στρώμα του νερού διογκώνεται εις βάρος του πάγου έως ότου φτάσουμε στην κατάσταση που ο πάγος φτάνει σε οριακό πάχος σπάει και τα κομμάτια ανακατεύονται με το νερό στη δεξαμενή αποθήκευσης.

Υπάρχουν δύο συστήματα εσωτερικής τήξης (σχήμα 6.5) όπου η αποθήκευση συνδέεται σε σειρά με τον ψύκτη με διάταξη είτε ανάντι είτε κατάντι. Για την ανάντι διάταξη ο ψύκτης προ-ψύχει το ζεστό νερό επιστροφής προτού αυτό εισέλθει στη δεξαμενή. Αποτέλεσμα είναι μια περισσότερο αποδοτική λειτουργία ψύξης λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας λειτουργίας. Από την άλλη η χαμηλότερη θερμοκρασία εισόδου στη δεξαμενή ελαττώνει την αποθηκευτική ικανότητα.



Σχήμα 6.5 Ανάντι και κατάντι διάταξη [1].

Στην κατάντι διάταξη το νερό επιστροφής εισέρχεται στον ψύκτη αφού έχει ψυχθεί στη δεξαμενή αποθήκευσης. Αυτή η διάταξη παρέχει μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα, καθώς επίσης εξασφαλίζει και μία σταθερή θερμοκρασία παροχής. Ωστόσο, η απόδοση του ψύκτη είναι χαμηλότερη και ο ψύκτης λειτουργεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία εισόδου.

Υλικά Σωληνώσεων

Το πλέον συνηθισμένο υλικό το οποίο χρησιμοποιείται για τις σωληνώσεις στο σύστημα Ice on Coil με εσωτερική ψύξη είναι το πολυαιθυλένιο με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα (0,31 W/mK).

Αναλύσεις συγκρίνουν το πολυαιθυλένιο με άλλα υλικά με διαφορετική θερμική αγωγιμότητα. Υλικά με υψηλή αγωγιμότητα όπως ο χαλκός (372 W/mK) καθώς και με χαμηλή αγωγιμότητα (1-2 W/mK) όπως το νικέλιο, το μαγνήσιο, ή μίγμα τιτανίου καθώς και διάφορα πλαστικά υλικά. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης έδειξε ότι τα μεταλλικά κράματα (πχ νικελίου, μαγνησίου, τιτανίου) ή διάφορα πλαστικά (πχ ούριο-φορμαλδεΰδη, μελαμίνη, πλαστικά φαινόλης, πολυεστέρες), βελτιώνουν τη μεταφορά θερμότητας, ελαττώνοντας τους χρόνους φόρτισης και αποφόρτισης της δεξαμενής. Το κόστος όμως τέτοιων υλικών είναι σε γενικές γραμμές υψηλότερο από αυτό του πολυαιθυλενίου.

Σκοπός της εξέλιξης είναι η δημιουργία μεταλλικών κραμάτων φτηνών και καταλλήλων για τη διαμόρφωση τέτοιων σωλήνων.

Δεξαμενές

Στις εφαρμογές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας ο ψυκτικός κύκλος της εγκατάστασης μπορεί να συνδεθεί κατευθείαν με τον ψυκτικό κύκλο ενός κτιρίου, ή μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας.

Σε συστήματα ψύξης κατοικιών προτιμάται η μέθοδος του εναλλάκτη. Παρόλα αυτά σαν σύστημα εσωτερικής τήξης χρησιμοποιεί ένα διάλυμα γλυκόλης στους σωλήνες και είναι κατάλληλο σε συστήματα που χρησιμοποιούν γλυκόλη στον ψυκτικό κύκλο του κτιρίου και μπορούν να είναι περισσότερο αποδοτικά από τα συστήματα εξωτερικής τήξης.

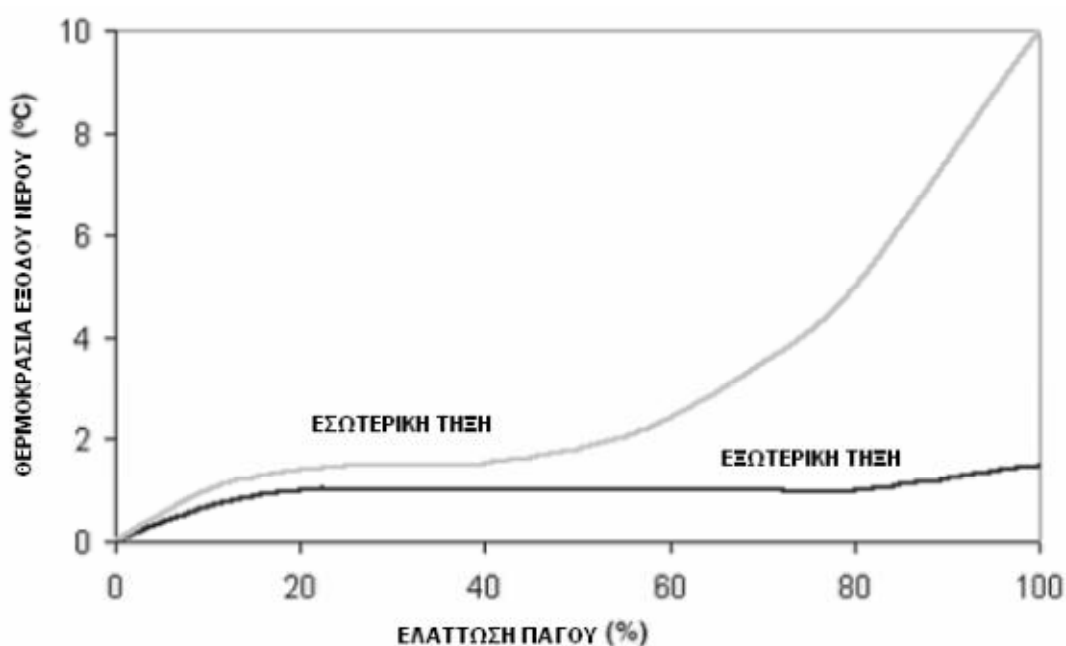
Είναι περισσότερο αποδοτικό να υπάρχουν περισσότερες μικρές δεξαμενές συνδεδεμένες, από το να υπάρχει μία μεγάλη δεξαμενή εξαιτίας των πολλών σε αριθμό και μεγάλων σε μήκος σωλήνων που είναι απαραίτητες σε μία μεγάλη δεξαμενή. Το μεγάλο μήκος των σωλήνων είναι επιζήμιο στη θερμική απόδοση αφού η κλίση της θερμοκρασίας μεταξύ του δευτερεύοντος ψυκτικού και της διεπιφάνειας νερού/πάγου, ελαττώνεται όσο αυξάνει το μήκος του σωλήνα.

Αύξηση του αριθμού των σωλήνων προκαλεί μείωση της αντίστοιχης παροχής με αποτέλεσμα την μειωμένη μεταφορά θερμότητας του δευτερεύοντος υγρού. Από την άλλη με μικρότερες δεξαμενές οι χρόνοι φόρτισης και αποφόρτισης ελαττώνονται.

Η δεξαμενή του συστήματος εσωτερικής ψύξης έχει μικρό κόστος συντήρησης λόγω έλλειψης εσωτερικών κινούμενων εξαρτημάτων. Πέρα απ' αυτό, ο τρόπος σύνδεσης του συστήματος παρέχει τη δυνατότητα να προστεθεί εύκολα δεξαμενή σε παράλληλη με μικρό κόστος εγκατάστασης.

6.5.3. Φόρτιση και Αποφόρτιση

Η διαφορά μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής τήξης φαίνεται στο σχήμα 6.6 το οποίο αποδίδει τη θερμοκρασιακή αλλαγή κατά τη διάρκεια της καταστροφής του πάγου. Η εξωτερική τήξη παρέχει σταθερή θερμοκρασία αποφόρτισης περίπου στον $+1^{\circ}\text{C}$, κάτι που είναι αποτέλεσμα των φυσαλίδων αέρα που οδηγείται στη δεξαμενή για να προωθήσει την ομοιόμορφη δημιουργία και τήξη του πάγου, ομοιομορφία η οποία βελτιώνει τη μεταφορά θερμότητας. Για την εσωτερική τήξη ο πάγος γύρω από το σωλήνα λιώνει δίνοντας τη θέση του σε ένα υδάτινο δαχτυλίδι, μεταξύ του σωλήνα και του πάγου το οποίο συνεχώς μεγαλώνει. Καθώς το νερό απομονώνει τους σωλήνες, πράγμα το οποίο αυξάνει την αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας, η θερμοκρασία της γλυκόλης αυξάνεται με το χρόνο.

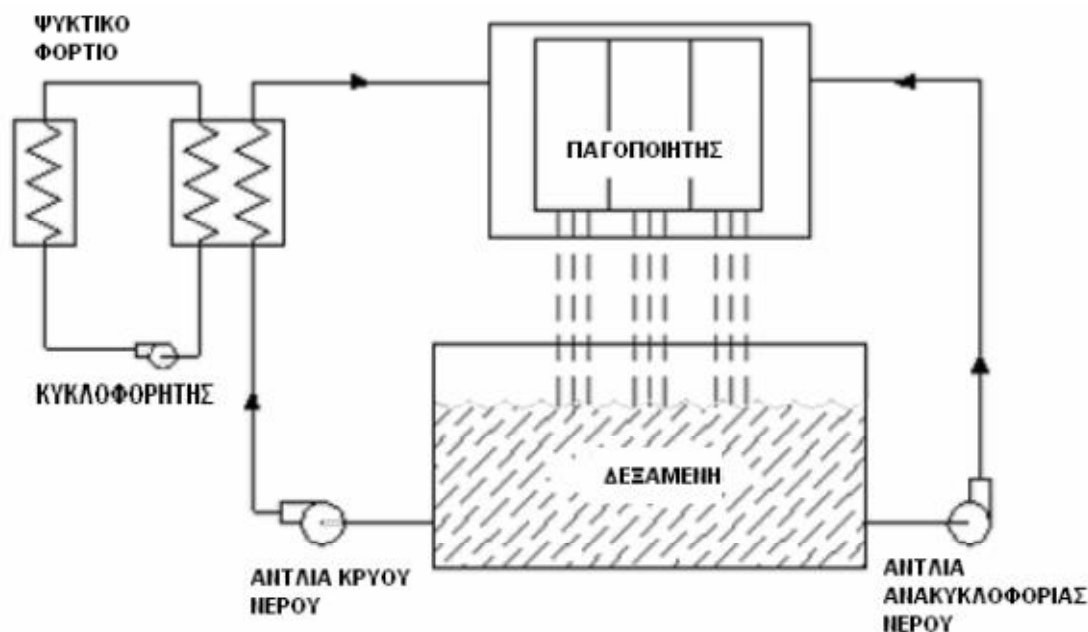


Σχήμα 6.6 Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού κατά την αποφόρτιση του συστήματος [1].

6.6 ΣΥΣΤΗΜΑ SHEET ICE HARVESTER

Το σύστημα sheet ice harvester φτιάχνει πάγο πάνω σε μία μεγάλη επίπεδη επιφάνεια ενός ατμοποιητή ή στο εσωτερικό ή εξωτερικό ενός κυλινδρικού ατμοποιητή, ο οποίος και στις δύο περιπτώσεις βρίσκεται πάνω από μία δεξαμενή νερού/ πάγου. Ο πάγος δημιουργείται από την ανακυκλοφορία νερού 0°C από τη δεξαμενή αποθήκευσης στην κορυφή των επιπέδων επιφανειών του ατμοποιητή, όπου κυλά ελεύθερο σχηματίζοντας ένα λεπτό φιλμ πάνω στις επιφάνειες αυτές. Τα κομμάτια πάγου που δημιουργούνται από αυτή τη διαδικασία απελευθερώνονται, συνήθως με την κυκλοφορία ζεστού ψυκτικού αερίου στον ατμοποιητή, και πέφτουν μέσα στη δεξαμενή όπου και ανακατεύεται με το ψυχρό νερό.

Άλλοι τύποι ice harvesters χρησιμοποιούν μηχανικές μεθόδους απελευθέρωσης του πάγου. Ο πάγος απελευθερώνεται περιοδικά όταν το πάχος του φιλμ φτάσει τα 6-10 mm. Το σχήμα 6.6 παρουσιάζει σχηματικά ένα ice harvester. Μία αντλία ανακυκλοφορίας χρησιμοποιείται για να παρέχει ελάχιστη ροή για τη βροχή του παγοποιητή.



Σχήμα 6.7 Διάταξη ice harvester [1].

Η επίδοση του συστήματος ice harvester κατά τη φόρτισή του παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την ποσότητα του πάγου στη δεξαμενή, χαρακτηριστικό που δεν συναντάται σε άλλες εφαρμογές αποθήκευσης πάγου. Ο κύκλος φόρτισης διαρκεί από 10 έως 30 min. Ο χρόνος αποφόρτισης εξαρτάται από το σύστημα ελέγχου, την εγκατάσταση του ατμοποιητή και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες αυτή λαμβάνει χώρα και κυμαίνεται από 20 έως 90 sec. Ο αποθηκευμένος πάγος μπορεί να λειώσει πού γρήγορα, αν είναι κατάλληλα βρεγμένος. Ο πάγος που παράγεται από 24ωρη φόρτιση της εγκατάστασης μπορεί να λειώσει σε λιγότερο από 3 λεπτά αν υπάρχει άμεση ανάγκη ψυκτικού φορτίου.

Οι θερμοκρασίες αποφόρτισης από μία καλά σχεδιασμένη δεξαμενή αποθήκευσης παραμένουν περίπου μεταξύ 1 και 2°C έως ότου το 80-90% του δημιουργημένου πάγου έχει αφαιρεθεί. Σε αυτό το σημείο η επιφάνεια επαφής μεταξύ πάγου και του νερού στη δεξαμενή έχει ελαττωθεί αρκετά, οπότε η θερμοκρασία αυξάνεται.

Το σύστημα ice harvester μπορεί να λειτουργήσει και σαν παραγωγός πάγου και σαν ψύκτης νερού. Η επιλογή μεταξύ των δύο λειτουργιών γίνεται αυτόματα και εξαρτάται από τη θερμοκρασία του νερού που εισέρχεται στον ατμοποιητή. Αν το νερό βρίσκεται κοντά στο σημείο πήξης του, επιλέγεται η λειτουργία του παγοποιητή και ο κύκλος απόψυξης ενεργοποιείται περιοδικά ώστε να απελευθερώνεται ο πάγος.

Το σύστημα ice harvester ξεχωρίζει τις λειτουργίες παραγωγής πάγου και αποθήκευσης ενέργειας, πράγμα που κάνει την εγκατάσταση εύελικτη ώστε να χρησιμοποιείται σε περιόδους μη-αιχμής. Αφού ο πάγος δεν αποθηκεύεται πάνω στην επιφάνεια παραγωγής, δεν είναι απαραίτητη η πλήρης τήξη του πάγου κάθε μέρα για τη διατήρηση υψηλού βαθμού απόδοσης λειτουργίας.

Το σύστημα και η δεξαμενή αποθήκευσης είναι εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα πράγμα το οποίο σημαίνει ότι συστήματα ελέγχου ποιότητας του νερού και συστήματα προστασίας ενάντια στη διάβρωση είναι απαραίτητα, αφού το νερό στη δεξαμενή έρχεται συνεχώς σε επαφή με τον αέρα λόγω της ανακυκλοφορίας.

Η δεξαμενή είναι γενικά απλή, χωρίς εσωτερικά εξαρτήματα σε σχέση με άλλα συστήματα αποθήκευσης. Η γεωμετρία της δεξαμενής παρόλα αυτά μπορεί να επηρεάσει την αποθηκευτική ικανότητα της μονάδας, καθώς η γωνία με την οποία τα φίλμ του πάγου πέφτουν στη δεξαμενή μπορεί να έχουν σαν συνέπεια όταν η τελευταία γεμίζει, να αφήνουν κενά στο εσωτερικό της όπου δεν υπάρχει καθόλου πάγος, πράγμα που προφανώς ελαττώνει την ποσότητα του πάγου που τελικά δέχεται η δεξαμενή. Οι δεξαμενές αυτές είναι αρκετά συχνά χτισμένες στον τόπο της εγκατάστασης, τσιμεντένιες και παραλληλεπίπεδες.

6.7 ΠΑΓΟΣ ΣΕ ΜΙΚΡΟΚΑΨΟΥΛΕΣ

Αυτή η τεχνική βασίζεται σε μικρά δοχεία (μικροκάψουλες) τα οποία είναι γεμάτα με νερό και εμβαπτισμένα σε δεξαμενή αποθήκευσης. Το νερό στο εσωτερικό της κάψουλας παγώνει και ο πάγος λιώνει όταν το δευτερεύον ψυκτικό π.χ. γλυκόλη/νερό, κυκλοφορεί μέσα στη δεξαμενή. Η θερμοκρασία φόρτισης είναι από -6 έως -3°C .

Τα πλαστικά αυτά δοχεία μπορεί να είναι παραλληλεπίπεδα, σφαιρικά ή δακτυλιοειδή. Στις ΗΠΑ υπάρχουν διαθέσιμα δύο σχέδια παραλληλεπίπεδα δοχεία (17 και 4,2 lt) και σφαιρίδια με πτυχώσεις ή λακκάκια διαμέτρου περίπου 100mm. Στην Ευρώπη σκληρές άκαμπτες σφαίρες χρησιμοποιούνται επίσης με διαμέτρους 95mm και 75mm. Ο αριθμός των δοχείων που απαιτούνται για την εκάστοτε εφαρμογή εξαρτάται από την απαιτούμενη αποθηκευτική ικανότητα. Για παράδειγμα, 3,5kW αποθηκευτικής ικανότητας μπορούν να παραχθούν με περίπου 70 σφαίρες διαμέτρου 10cm. Το σχήμα 6.8 παρουσιάζει την αρχή λειτουργίας του συστήματος αυτού.



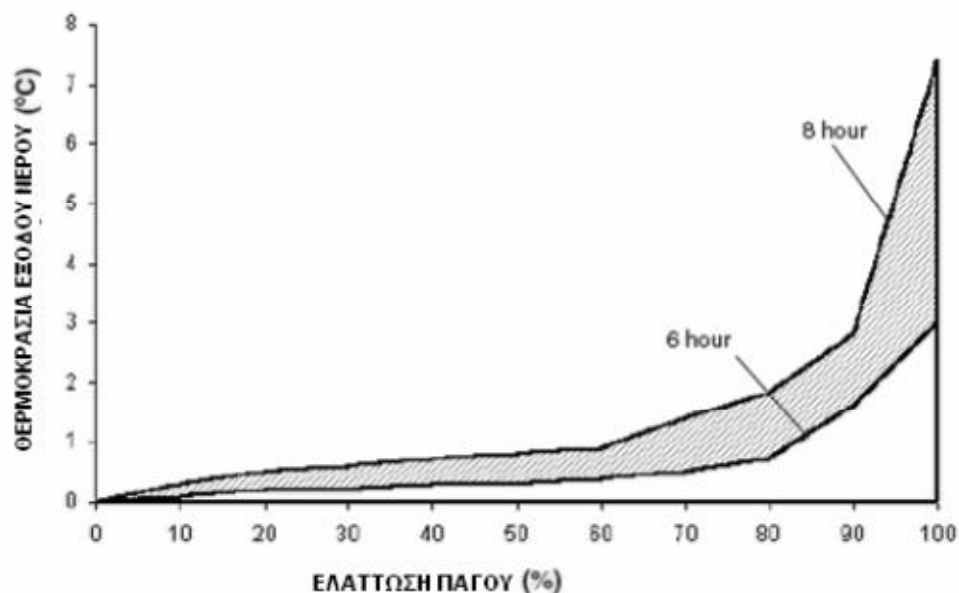
Σχήμα 6.8 Αρχή λειτουργίας συστήματος με πάγο σε μικροκάψουλες [1].

Η αποθήκευση πάγου σε κάψουλες απαιτεί περίπου 0.019 με 0.023m³ δεξαμενής ανά kWh διαθέσιμης αποθηκευτικής ικανότητας. Η δεξαμενή μπορεί να είναι ανοικτή και σε ατμοσφαιρική πίεση, ή κλειστή και υπό πίεση, κατασκευασμένη από χάλυβα, τσιμέντο, υαλοβάμβακα κ.τ.λ. Οι κάψουλες είναι κατασκευασμένες από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο και είναι σχεδιασμένες να ακολουθούν την διαστολή του παγωμένου νερού. Σε δεξαμενές με σφαιρικές κάψουλες το δευτερεύον

ψυκτικό ρέει κάθετα στη δεξαμενή, ενώ για παραλληλεπίπεδες κάψουλες ρέει οριζόντια. Το σχήμα και το μέγεθος της δεξαμενής περιορίζεται μόνο από την τελική ικανότητα της δεξαμενής να εξασφαλίζει ίδια θερμική ροή μεταξύ των δοχείων (κάψουλες).

Φόρτιση και αποφόρτιση

Ο πάγος σε μικροκάψουλες έχει ένα σταθερά ελαττούμενο ρυθμό αποφόρτισης, αν διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία αποφόρτισης, ή μια σταθερά αυξανόμενη θερμοκρασία, αν διατηρείται σταθερός ο ρυθμός αποφόρτισης. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι αποτέλεσμα της συνεχώς ελαττούμενης επιφάνειας πάγου η οποία έρχεται σε επαφή με τα τοιχώματα του δοχείου καθώς λιώνει ο πάγος. Το σχήμα 6.9 παρουσιάζει ένα τυπικό εύρος θερμοκρασιών αποφόρτισης για σταθερούς ρυθμούς αποφόρτισης για περιόδους από 6 έως 8 ώρες με θερμοκρασία εισόδου 10°C. Οι κάψουλες αυτές είναι ευαίσθητες στο φαινόμενο supercooling ή στην ψύξη του νερού πιο κάτω από το σημείο πήξης του, πριν ξεκινήσει η παραγωγή πάγου. Το φαινόμενο supercooling, το οποίο λαμβάνει χώρα μόνο σε πλήρως αποφορτισμένες δεξαμενές όπου δεν υπάρχει καθόλου πάγος στο εσωτερικό τους, έχει σαν αποτέλεσμα ελαττωμένους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας στην αρχή της φόρτισης. Προσθέτοντας συμπυκνωτικούς παράγοντες η επίδραση του φαινομένου της υπέρψυξης μπορεί να εξομαλυνθεί.



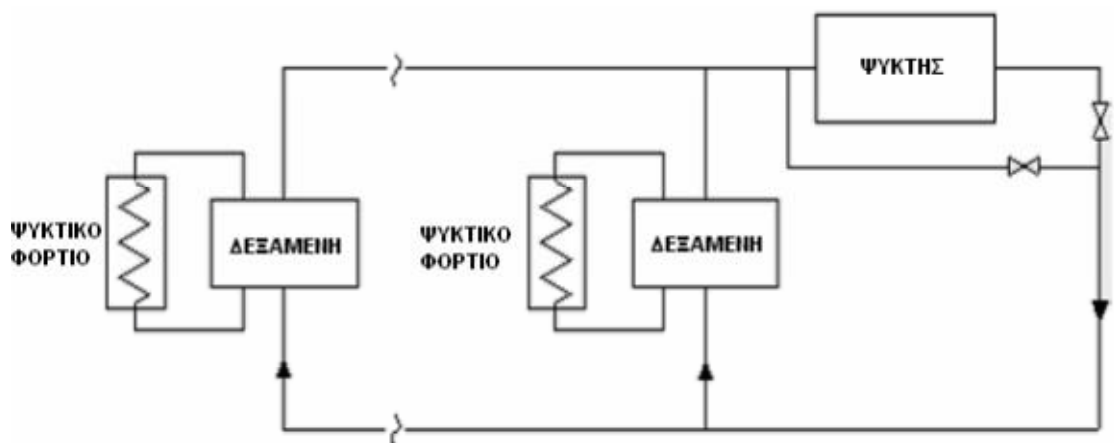
Σχήμα 6.9 Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού κατά την αποφόρτιση του συστήματος [1].

6.8 ΔΙΦΑΣΙΚΟ ΜΙΓΜΑ

Σε ένα σύστημα διφασικού μίγματος πάγου/νερού, κομμάτια πάγου δημιουργούνται από μία γεννήτρια πάγου σε διμερές υγρό μίγμα (π.χ. νερό και γλυκόλη) και μεταφέρονται στη δεξαμενή αποθήκευσης, όπου και τα κομμάτια πάγου αποθηκεύονται μαζί με νερό. Αυτό το διφασικό μίγμα οδηγείται από τη δεξαμενή σε σημεία ανάγκης ψυκτικού φορτίου μέσω αντλιών, όπου και ο πάγος του μίγματος λιώνει. Το ζεστό νερό επιστροφής επανατροφοδοτείται είτε στην παγογεννήτρια διάταξη είτε κατευθείαν στη δεξαμενή για να ψυχθεί εκ νέου. Το σύστημα αποθήκευσης μπορεί να έχει διάφορες διατάξεις, οι περισσότερες συνηθισμένες εκ των οποίων είναι οι μέθοδοι διανεμημένης και κεντρικής αποθήκευσης.

6.8.1 Συστήματα διανεμημένης αποθήκευσης

Σε ένα σύστημα διανεμημένης αποθήκευσης το διφασικό μίγμα πάγου μέσω αντλιών οδηγείται σε ένα αριθμό από δεξαμενές και αποθηκεύεται. Κάθε τέτοια δεξαμενή βρίσκεται εγκατεστημένη σε κάθε ξεχωριστό κτίριο του δικτύου της ψυκτικής εγκατάστασης. Το διφασικό μίγμα πάγου εισέρχεται στη δεξαμενή όπου τα κομμάτια πάγου διαχωρίζονται από το νερό λόγω βαρύτητας. Το σύστημα έτσι έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί νερό χωρίς πάγο για τις ψυκτικές του ανάγκες, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.10.



Σχήμα 6.10 Διάταξη συστήματος διανεμημένης αποθήκευσης [1].

Οι δεξαμενές αποθήκευσης του διανεμημένου συστήματος παρέχουν μία ρύθμιση του συστήματος διανομής και του επιμέρους ψυκτικού φορτίου κάθε κτιρίου. Η απόζευξη του συστήματος ψύξης επιτρέπει στο σύστημα διανομής να παρέχει το μέσο ψυκτικό φορτίο, παρά το ψυκτικό φορτίο αιχμής. Εάν το μέσο ψυκτικό φορτίο είναι αισθητά χαμηλότερο από το φορτίο αιχμής, μπορεί να εγκατασταθεί δίκτυο σωληνώσεων διανομής μικρότερης διαμέτρου. Για να μπορέσει το σύστημα να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις του μέγιστου ψυκτικού φορτίου πρέπει η παραγωγή διφασικού μίγματος νερού/πάγου να είναι συνεχής. Αυτό το μίγμα οδηγείται μέσω αντλιών στις επιμέρους δεξαμενές. Ανάλογα με την ώρα της ημέρας, αν το φορτίο του κτιρίου είναι χαμηλό, το μίγμα θα συγκεντρωθεί στη δεξαμενή. Αργότερα, όταν το ψυκτικό φορτίο θα αυξηθεί, η δεξαμενή φορτίζεται από το σύστημα διανομής και ταυτόχρονα αποφορτίζεται για να ικανοποιήσει τις αυξημένες ψυκτικές ανάγκες.

Σε περιόδους όπου το ψυκτικό φορτίο είναι γενικά χαμηλό, το νερό επιστροφής ενδέχεται να βρίσκεται σε θερμοκρασία αρκετά χαμηλότερη από το σημείο σχεδίασης, αφήνοντας έτσι αχρησιμοποίητη ψυκτική ικανότητα. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί χρησιμοποιώντας σωλήνες για ψυκτική ικανότητα λίγο μεγαλύτερη από τη μέση υπολογισμένη, ώστε οι προαναφερθείσες απώλειες να περιορίζονται κατά το δυνατόν.

Γενικά το σύστημα διανεμημένης αποθήκευσης είναι βέλτιστα οικονομικό όταν ο λόγος φορτίου αιχμής/μέσου είναι μεγαλύτερος του 2 και όταν ο λόγος λανθάνουσας/αισθητής θερμότητας μεγαλύτερος του 1.

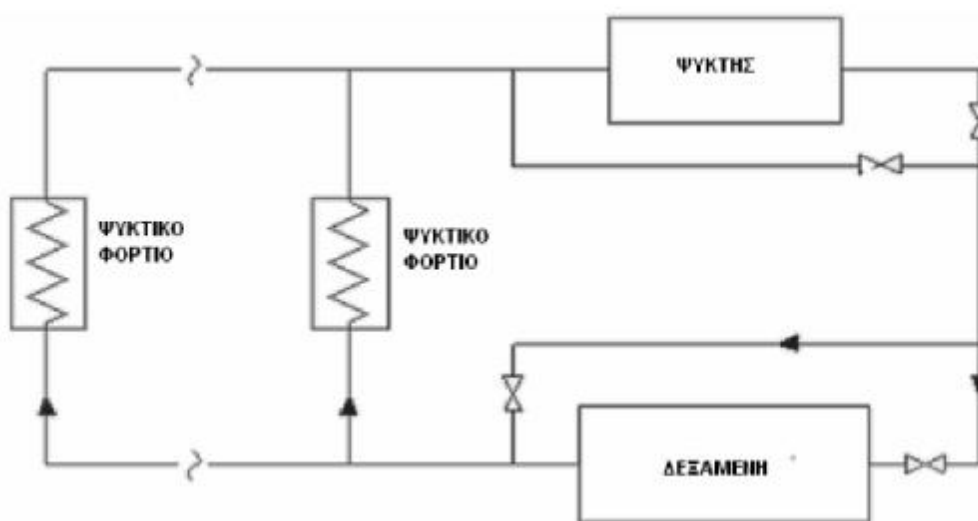
6.8.2 Συστήματα κεντρικής αποθήκευσης

Στο σύστημα κεντρικής αποθήκευσης, η ψυκτική εγκατάσταση εφοδιάζεται με μία κεντρική δεξαμενή, η οποία είναι τοποθετημένη κοντά στη μονάδα παραγωγής της ψύξης., όπως φαίνεται στο σχήμα 6.11. Και σε αυτή τη διάταξη υπάρχει το πλεονέκτημα της ρύθμισης μεταξύ της μονάδας παραγωγής ψύξης και της πραγματικής ψυκτικής απαίτησης. Στο σύστημα κεντρικής αποθήκευσης το σύστημα διανομής δεν είναι αποχωρισμένο από το φορτίο του επιμέρους κτιρίου και ακολουθεί την πραγματική ψυκτική απαίτηση του κάθε κτιρίου ξεχωριστά.

Ως εκ τούτου οι διάμετρος των σωλήνων διανομής θα είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τους σωλήνες του συστήματος διανεμημένης αποθήκευσης.

Τα συστήματα κεντρικής αποθήκευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν βάσει δύο στρατηγικών λειτουργίας. Το διφασικό μίγμα νερού/πάγου μπορεί να βρίσκεται αποθηκευμένο σε συγκεκριμένο σημείο και να μην κυκλοφορεί στο σύστημα και να χρησιμοποιείται για την ψύξη του

θερμού νερού επιστροφής, ώστε επιτυγχάνεται η συνεχής ανακυκλοφορία νερού στην ψυκτική εγκατάσταση σε θερμοκρασία πολύ κοντά στο σημείο στερεοποίησής του. Εναλλακτικά, το μίγμα μπορεί να αποθηκεύεται και να κυκλοφορεί στο σύστημα κατά τις ώρες ψυκτικού φορτίου αιχμής. Με οποιαδήποτε από τις δύο στρατηγικές, ο όγκος της αποθήκευσης είναι ελαττωμένος σε σχέση με ένα σύστημα κρύου νερού. Οι δε δεξαμενές αποθήκευσης για το διφασικό μίγμα μπορούν από άποψης κόστους να ελαττωθούν κατά 60% σε σύγκριση με τις δεξαμενές μιας συμβατικής ψυκτικής διάταξης



Σχήμα 6.11 Διάταξη συστήματος κεντρικής αποθήκευσης [1].

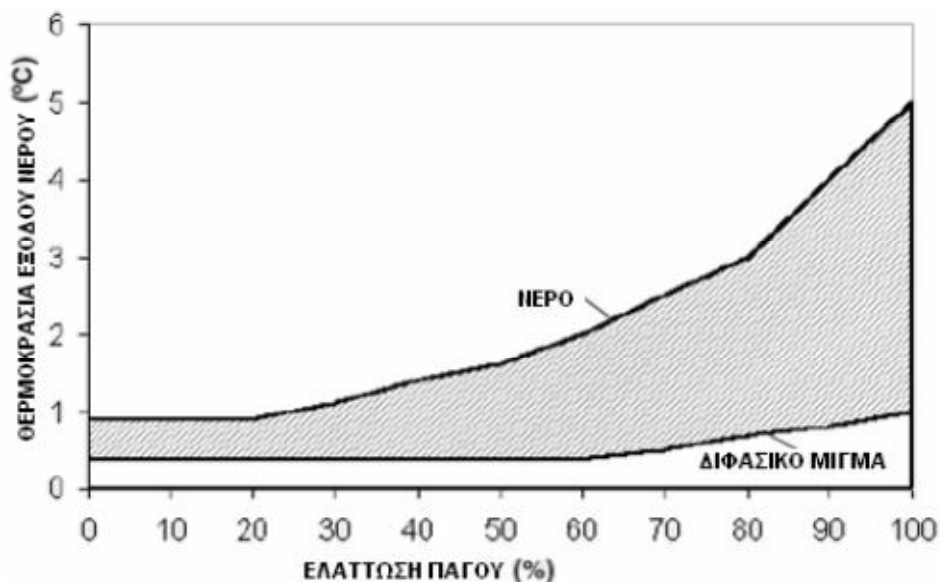
Προκειμένου για να αντιμετωπίσει το σύστημα το μέγιστο φορτίο σχεδίασης, το σύστημα ψύξης πρέπει να λειτουργεί συνεχώς. Σε περιόδους μικρής ψυκτικής απαίτησης το παραγόμενο διφασικό μίγμα οδηγείται στη δεξαμενή αποθήκευσης, από όπου απάγεται είτε μίγμα είτε κρύο νερό κατά περίπτωση, για την αντιμετώπιση αυτών των χαμηλών απαιτήσεων. Άρα για φορτία μικρότερα από το μέσο φορτίο λειτουργίας, η δεξαμενή φορτίζεται. Αντίστοιχα σε περιόδους υψηλού ψυκτικού φορτίου, η δεξαμενή αδειάζει για να ικανοποιηθεί το φορτίο αυτό, οπότε επιτυγχάνεται και η αποφόρτισή της.

6.8.3 Φόρτιση και αποφόρτιση

Η θερμοκρασία του διφασικού μίγματος εξαρτάται από το ποσοστό πάγου που περιέχεται στη δεξαμενή. Συστήματα τα οποία ανακυκλοφορούν διφασικό μίγμα, έχουν θερμοκρασία εξόδου πολύ κοντά στους 0°C.

Σε συστήματα στα οποία στην έξοδό τους κυκλοφορεί νερό, η θερμοκρασία του είναι συνάρτηση του πάγου που υπάρχει στη δεξαμενή. Οι θερμοκρασίες αυτές είναι παρόμοιες με τις προηγούμενες απλώς λίγο υψηλότερες. Όλες οι παραπάνω θερμοκρασίες εξόδου πάντως είναι χαμηλότερες εάν χρησιμοποιείται κάποια ουσία καταστολής του σημείου τήξης.

Το διφασικό μίγμα συνήθως παράγεται μέσα σε διμερές υγρό νερού και γλυκόλης. Άλλα πιθανά κατασταλτικά του σημείου τήξης εκτός από τη γλυκόλη είναι τα άλατα. Για παράδειγμα το θαλασσινό νερό χρησιμοποιείται σε πολλά σκάφη ως ψυκτικό μέσο. Άλλη χρησιμοποιούμενη εφαρμογή είναι η χρήση νιτρικών και νιτρωδών αλάτων, η οποία εμφανίζει το πρόσθετο πλεονέκτημα να προστατεύει συγκεκριμένα μέταλλα από τη διάβρωση.



Σχήμα 6.12 Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του νερού κατά την αποφόρτιση του συστήματος [1].

6.9 ΕΥΤΗΚΤΑ ΑΛΑΤΑ

Τα εύτηκτα άλατα έχουν χρησιμοποιηθεί για θερμικές εφαρμογές ήδη από το 19^ο αιώνα, αλλά μόλις πρόσφατα χρησιμοποιήθηκαν για ψυχρή αποθήκευση. Το πιο σύνηθες υλικό για ψυχρές εφαρμογές είναι ένα μίγμα ανόργανου άλατος, νερού και σταθεροποιητικών παραγόντων, το οποίο αλλάζει φάση στους 8.3°C. Αυτό το ΥΑΦ έχει λανθάνουσα θερμότητα 5.4 kJ/mol και πυκνότητα 1490 kg/m³ και μπορεί να ενσωματωθεί σε παραλληλεπίπεδα πλαστικά δοχεία, ή ακόμα σε

σφαιρικές και δακτυλιοειδείς κάψουλες. Η δεξαμενή αποθήκευσης μπορεί να είναι ελεύθερη σε ατμοσφαιρική πίεση (ανοικτή) ή κλειστή και υπό πίεση, και να είναι από τσιμέντο, χάλυβα ή υαλοβάμβακα.

Το εύτηκτο άλας μπορεί να φορτιστεί με συμβατικούς ψύκτες και να δώσει κρύο νερό από 4 έως 6°C. Αυτό επιτρέπει στο σύστημα αποθήκευσης ψύξης να συνδεθεί με ένα υπάρχον σύστημα χωρίς μεταβολές στους υπάρχοντες ψύκτες και με ελάχιστες ή καθόλου αλλαγές στο σύστημα διανομής, όπως επίσης να συνδυαστεί σε ανάντι ή κατάντι συνδέσεις.

Συστήματα ice-on-coil με εσωτερική τήξη χρησιμοποιούν ΥΑΦ με κατάλληλα πρόσθετα, και έτσι είναι δυνατή η επίτευξη θερμοκρασιών στερεοποίησης από -2 έως -11°C. Οι κάψουλες που περιέχουν τα ΥΑΦ δεν επιπλέουν αφού η πυκνότητα του εύτηκτου άλατος είναι περίπου 1,5 φορά αυτής του νερού. Ακόμη, δεν διαστέλλεται με την στερεοποίηση, οπότε δεν εμφανίζεται πίεση στα τοιχώματα της κάψουλας.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ως υλικά αλλαγής φάσης (ΥΑΦ) ορίζονται εκείνα τα υλικά τα οποία μπορούν να αποθηκεύουν και να ελευθερώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας, ως αποτέλεσμα της αλλαγής φάσης στη μοριακή τους δομή. Κατά τα τελευταία χρόνια η χρήση των υλικών αλλαγής φάσης παρουσιάζει διεθνώς έντονο ενδιαφέρον λόγω του πολλαπλάσιου θερμοαποθηκευτικού δυναμικού τους έναντι των άλλων υγρών ή στερεών υλικών.

Για να επιλεγεί ένα υλικό για να χρησιμοποιηθεί ως ΥΑΦ πρέπει να έχει συγκεκριμένες ιδιότητες. Τα ανόργανα ΥΑΦ έχουν μεγαλύτερες τιμές λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης αλλά από την άλλη μεριά είναι περισσότερο διαβρωτικά, εμφανίζουν supercooling, δεν είναι αρκετά σταθερά ως προς τις θερμικές τους ιδιότητες και γενικά στοιχίζουν περισσότερο. Τα οργανικά ΥΑΦ δεν είναι διαβρωτικά, είναι φθηνότερα από τα ανόργανα και δεν παρουσιάζουν supercooling αλλά από την άλλη μεριά παρουσιάζουν μικρότερες τιμές λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης και θερμικής αγωγιμότητας.

Η ενσωμάτωση των ΥΑΦ σε κάψουλες παρουσιάζει ενδιαφέροντα πλεονεκτήματα ιδιαίτερης αξίας σε πληθώρα εφαρμογών. Η ενσωμάτωση σε κάψουλες γίνεται για τη συγκράτηση της υγρής φάσης του ΥΑΦ και για να αποφευχθεί η επαφή του ΥΑΦ με το περιβάλλον, αφού η επαφή αυτή θα μπορούσε είτε να βλάψει το περιβάλλον είτε να μεταβάλλει τη σύσταση του ΥΑΦ. Επιπλέον η επιφάνεια των καψουλών δρα ως επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας αυξάνοντας το ρυθμό ροής της θερμότητας, άρα και την ταχύτητα απόκρισης του ΥΑΦ, ενώ πολλές φορές η ενσωμάτωση σε κάψουλες προσφέρει μηχανική σταθερότητα.

Μία πολύ διαδεδομένη μέθοδος που χρησιμοποιείται για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας είναι ο εγκλωβισμός των ΥΑΦ σε πορώδη υλικά υψηλής θερμικής αγωγιμότητας. Από τον εγκλωβισμό αυτό προκύπτουν σύνθετα υλικά με υψηλότερες τιμές θερμικής αγωγιμότητας. Τα πορώδη υλικά μπορεί να είναι είτε μεταλλικές μήτρες από αλουμίνιο ή χαλκό είτε φυσικά πορώδη υλικά όπως ο γραφίτης. Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα σχετίζεται με το πορώδες.

Το εύρος των εφαρμογών είναι τεράστιο. Χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά, συστήματα κλιματισμού, σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα, σε οχήματα, στις μεταφορές αγαθών, σε ενδύματα ενώ ιδιαίτερης σημασίας είναι η ενσωμάτωσή τους σε δομικά υλικά.

Οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης ενέργειας με ΥΑΦ είναι περισσότερο ακριβές από τις συμβατικές αλλά είναι εύκολες στη χρήση και στη συντήρηση και απαιτούν πολύ λιγότερο χώρο. Η επικρατούσα σήμερα εφαρμογή είναι αυτή η οποία κατά τη διάρκεια της νύχτας παράγει πάγο, ή διαφορετικά κρύο νερό ή κάποιο άλλο εύτηκτο διάλυμα, το οποίο μετά χρησιμοποιείται κυρίως σε κλιματιστικές εγκαταστάσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας κατέστη δυνατή εξ αιτίας της μεγάλης λανθάνουσας θερμότητας τήξης του νερού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1] Δ. Λύκος, *Αριθμητικές Μέθοδοι Μοντελοποίησης Υλικών Αλλαγής Φάσης*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ 2007.
- 2] Μ. Νούρκα, *Προσομοίωση και παραμετρική μελέτη ηλιακής φόρτισης τοιχοποιίας με στρώμα υλικών αλλαγής φάσης (PCM), μέσω έναντι υαλοστασίου διάφορων προσανατολισμών για την επίτευξη συνθηκών θερμικής άνεσης καθόλο το τυπικό έτος Αθηνών*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ 2013.
- 3] Μ. Παπαδόπουλος-Βέντλινγκ, *Μέτρηση Θερμικών Ιδιοτήτων Υλικών Αλλαγής Φάσης*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ.
- 4] Μ. Φλώρου, *Παθητικό Σύστημα Θέρμανσης Χώρου με τη Χρήση PCM*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ 2011.
- 5] Α. Γιώτης, *Προσομοίωση Διεργασιών Ξήρανσης σε Μακροπορώδη Υλικά με το Πρότυπο Δικτύου Πόρων*, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ 2003.
- 6] Θ. Μακρή, *Αξιολόγηση Θερμικής Αποθήκης Δημοτικού Αθλητικού Κέντρου Ευόσμου*, Διπλωματική Εργασία Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΠΘ 2012.
- 7] http://www.econ3.gr/readmore.php?article_id=51771295788153.
- 8] Γ. Λημναίος, *Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων με χρήση Υλικών Αλλαγής Φάσης ενσωματωμένων στη δομή του κτηρίου*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης 2010.
- 9] Ε. Ντάβου, *Τα Υλικά Αλλαγής Φάσης ως μέσα Διαχείρισης και Εξοικονόμησης Ενέργειας. Εφαρμογή τους στη Μόνωση Κτιρίων*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ 2009.
- 10] Ε. Μαχαίρα, *Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας με Χρήση Υλικών Αλλαγής Φάσης PCM*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ 2010.
- 11] Zhang Yinping, Jiang Yi and Jiang Yi, *A simple method, the T – history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials*, Meas. Sci. Technol. **10** 201–205 (1999).
- 12] <http://ktirio.gr/innet/UsersFiles/sa/documents/articles/2011-03-79.pdf>

- 13] Β. Καζάνη, *Παθητική ηλιακή θέρμανση κτιρίων με χρήση στρώματος υλικών αλλαγής φάσης (PCM) στους εσωτερικούς τοίχους*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ 2011.
- 14] Μ. Καλαδάμη, *Μέθοδοι Προσομοίωσης Αλλαγής Φάσης για Υλικά Κτιριακών Εφαρμογών (PCM) με έμφαση στη Μέθοδο της Ενεργού Θερμοχωρητικότητας*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ 2011.
- 15] V. Tyagi and D. Buddhi, *PCM thermal storage in buildings: A state of art*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **11** 1146–1166 (2007).
- 16] Α. Φωτίκα, *Ηλιακή Θέρμανση Νερού για Οικιακές Εφαρμογές με Χρήση Υλικών Αλλαγής Φάσης (PCM) σε Μικροκάψουλες*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ 2011.
- 17] M. Sedeh and J. Khodadadi, *Thermal conductivity improvement of phase change materials/graphite foam composites*, *Carbon* **60** 117-128 (2013).
- 18] P. Goli et al, *Graphene-enhanced hybrid phase change materials for thermal management of Li-ion batteries*, *Journal of Power Sources* **248** 37-43 (2014).
- 19] P. Vadwala, *Thermal Energy Storage in Copper Foams filled with Paraffin Wax*, Master Thesis, Mechanical & Industrial Engineering University of Toronto (2011).
- 20] Y. Tian and C. Zhao, *A numerical investigation of heat transfer in phase change materials (PCMs) embedded in porous metals*, *Energy* **36** 5539-5546 (2011).
- 21] N. Khodabandeh and H. Shokouhmand, *Two-Temperature Model for Improvement of Heat Transport in PCMs Using Porous Matrix*, *World Applied Sciences Journal* **18** 208-213 (2012).