

Υλικά αλλαγής φάσης (PCM's)

Μια προηγμένη πρόταση διαχείρισης της θερμικής ενέργειας

Τα υλικά αλλαγής φάσης (Phase change materials use in thermal energy management - PCM's) χρησιμοποιούνται με ανταγωνιστική αποδοτικότητα, για την εξοικονόμηση ενέργειας σε κτίρια και εγκαταστάσεις και για την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ).

Άρθρο του κ. Μιχαήλ Γρ. Βραχόπουλου και της κ. Μαρίας Κ. Κούκου*

Όλα τα υλικά στη φύση μπορούν να βρεθούν σε μία από τις τρεις γνωστές φάσεις και να είναι «στερεά», «υγρά» ή «αέρια». Οι φάσεις αυτές οφείλονται στην ιδιότητα του ιξώδους, η οποία σχετίζεται με τη συνοχή των μορίων και των ατόμων του υλικού όταν κινείται με μικρές σχετικές ταχύτητες.

Η σύγχρονη Φυσική, μετά την επανάσταση που έφερε ο Αϊνστάιν αποδεικνύοντας την απόλυτη ισοδυναμία της ενέργειας και της ύλης και την αποκλειστική συσχέτισή τους με το χρόνο, απέδειξε με τη σειρά της ότι κατά τα φαινόμενα αυτά αναπτύσσονται μικρές σχετικές ταχύτητες.

Τα υλικά, ανάλογα με την αναπτυσσόμενη σε αυτά εσωτερική ενέργεια (θερμοκρασία), μπορούν να βρεθούν είτε στη στερεά είτε στην υγρή φάση χωρίς εξάρτηση από την εξωτερική πίεση, ενώ με επιπλέον αύξηση της εσωτερικής τους ενέργειας και σε συνδυασμό με την πίεση μπορούν να μεταβούν στην αέρια φάση τους.

Σε κάθε μετάβαση (από στερεά σε υγρά [και αντίθετα] και από υγρά σε αέρια [και αντίθετα]) συναλλάσσονται θερμότητα (μεταβάλλουν, δηλαδή, την εσωτερική τους ενέργεια) χωρίς να μεταβάλλουν τη θερμοκρασία τους (ή, για να είμαστε ακριβείς, χωρίς να μεταβάλλουν σημαντικά τη



θερμοκρασία τους ή χωρίς η θερμοκρασιακή τους κατάσταση να δείχνει το μέγεθος της εσωτερικής τους ενέργειας). Οι περιοχές αυτές αναφέρονται ως περιοχές αλλαγής φάσης ή λανθάνουσες περιοχές (λόγω της αδυναμίας προσδιορισμού της θερμότητας από τη θερμοκρασία) και η συναλλασσόμενη θερμότητα καλείται «λανθάνουσα» θερμότητα. Η παγκόσμια επιστήμη των υ-

λικών προσπαθεί να αξιοποιήσει ακριβώς αυτή την ιδιότητα (την απορρόφηση ή την απόδοση θερμότητας υπό σταθερή [ή υπό περίπου σταθερή] θερμοκρασία), με σκοπό αφενός την αποθήκευση ενέργειας και αφετέρου τη διαχείριση της θερμότητας προς όφελος των χρηστών, με σημαντική μείωση του κόστους (ενεργειακού και οικονομικού) και μεγάλη συμβολή στην προστα-

σία του περιβάλλοντος. Όλα τα υλικά στη φύση είναι υλικά αλλαγής φάσης, αλλά μερικά από αυτά μπορούν να αλλάζουν φάση σε συνθήκες περιβάλλοντος ικανές για τη χρήση τους. Για παράδειγμα, το κερί (είτε της μέλισσας είτε το εκκλησιαστικό) αλλάζει φάση σε θερμοκρασία περίπου 55°C και συνεπώς μπορεί να αποθηκεύσει θερμότητα σε αυτό το επίπεδο θερμοκρασι-

ας, για τη μετέπειτα θέρμανση χώρων. Το νερό, αντίστοιχα, αλλάζει φάση στους 0°C, αποθηκεύοντας ψύχος. Σήμερα, παράγονται στη βιομηχανία πολλά αντίστοιχα υλικά που παρουσιάζουν θερμοκρασιακά επίπεδα αλλαγής φάσης σε θερμοκρασίες από 0°C έως 100°C, κατάλληλες για κάθε αξιοποίηση. Τέτοια υλικά, πέραν των κεριών, είναι π.χ. τα ένυδρα άλατα.

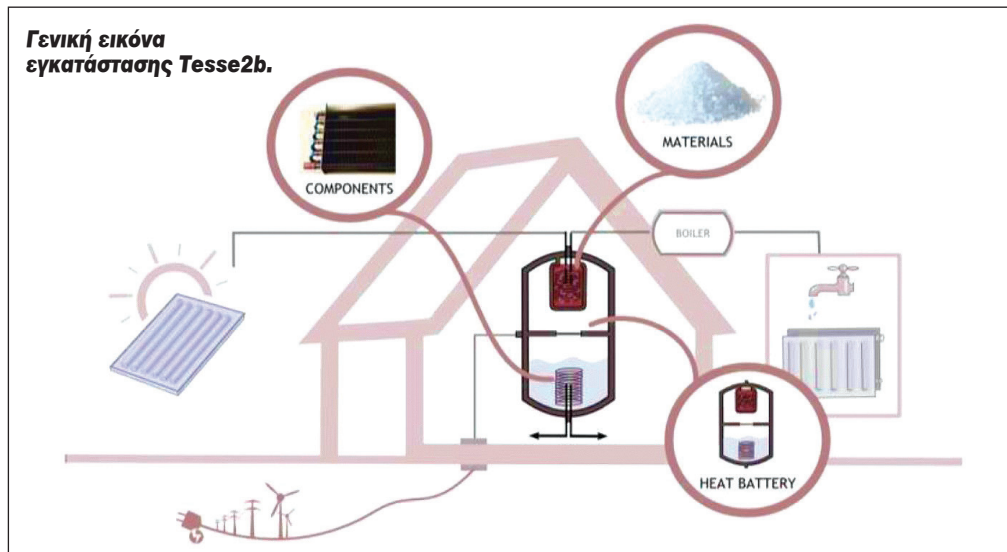
Ανάγκες θέρμανσης ή θερμικού κλιματισμού

Στη σύγχρονη ζωή ο άνθρωπος περνάει πολύ χρόνο σε κλειστούς χώρους (κατοικίες, επαγγελματικούς χώρους, χώρους διασκέδασης κλπ.) και βεβαίως υπό συνθήκες μικρής ή καθόλου κίνησης. Παράλληλα, το ανθρώπινο σώμα ως θερμική μηχανή παράγει συνεχώς θερμότητα και διατηρεί τη θερμοκρασία του στους 37°C. Η θερμότητα αυτή αποδίδεται στο περιβάλλον (με ρυθμό που σχετίζεται με τη δραστηριότητα), με συναγωγή (έως 35%), ακτινοβολία (έως 40%) και εξάτμιση (έως 25%).

Το χειμώνα, λόγω του βαρέως ρουχισμού, η ικανοποιητική θερμοκρασία περιβάλλοντος ώστε το σώμα να βρίσκεται σε θερμική ισορροπία, να αποδίδει την απαιτούμενη θερμότητα με ρυθμό και να νιώθει άνετα και υγιεινά, είναι κατά μέσο όρο οι 20°C (αυτό είναι το μέσο ποσοστό των ανθρώπων που δηλώνουν ότι νιώθουν άνετα και υγιεινά υπό αυτές τις συνθήκες), ενώ κατά τη θερινή περίοδο η θερμοκρασία αυτή κυμαίνεται γύρω στους 26°C. Η σχετική υγρασία για αίσθηση άνεσης και υγιεινής και στις δύο περιόδους ανέρχεται κατά μέσο όρο στο 50%.

Για τη διατήρηση, όμως, αυτών των συνθηκών το χειμώνα, απαιτείται θέρμανση των χώρων, λόγω του ότι η αναπνυσόμενη στο περιβάλλον θερμοκρασία είναι πολύ μικρότερη από αυτή της θερμικής άνεσης, ενώ το καλοκαίρι είναι αρκετά μεγαλύτερη – και η αίσθηση της θερμοκρασίας είναι ακόμη μεγαλύτερη, λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι, για τη δημιουργία συν-

Γενική εικόνα εγκατάστασης Tesse2b.



θηκών υγιεινής και άνεσης χρησιμοποιούνται συστήματα παραγωγής θερμότητας ή ψύξης, τα οποία λειτουργούν καταναλώνοντας ενεργειακούς πόρους που προέρχονται κυρίως από συμβατικά καύσιμα, ενώ βεβαίως εκλύουν ρύπους στο περιβάλλον.

Η παγκόσμια κοινότητα, για να ελαχιστοποιήσει τις επιπτώσεις προς το περιβάλλον από τη χρήση της ενέργειας, αλλά και για να μειώσει το ενεργειακό κόστος επιβίωσης των ανθρώπων, προσπαθεί να αναπτύξει παράλληλα δύο τεχνολογίες. Η πρώτη είναι η τεχνολογία εξοικονόμησης ενέργειας, με σκοπό τη μείωση των ενεργειακών αναγκών

μεν (το χειμώνα σε υψηλότερη θερμοκρασία, ενώ το καλοκαίρι σε χαμηλότερη). Από τις ΑΠΕ, όμως, δεν παράγεται θερμότητα (ή εν γένει ενέργεια) όλες τις ώρες που χρησιμοποιείται ένας χώρος ή που την έχει ανάγκη ο άνθρωπος για τη διαβίωσή του.

Αποθήκευση ενέργειας (θερμικής ή και ψυκτικής)

Για την αξιοποίηση της περιβαλλοντικής θερμότητας σε ώρες που αυτή δεν είναι διαθέσιμη, αλλά και για την αξιοποίηση στο μέγιστο της συμβατικής ενέργειας (μέσω της βελτίωσης της αποτελεσματικότητας), έχουν αναπτυχθεί διά-

θερμοκρασίας, δηλαδή μέσω της αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Το πρόβλημα που δημιουργείται είναι ότι η θερμότητα διαρρέει λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς (μάλιστα είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η διαφορά), και αυτό δημιουργεί σημαντικές απώλειες και κόστος. Παράλληλα, τη θερμότητα προσπαθούμε να την αποθηκεύσουμε είτε εντός του κτιριακού κελύφους (παθητικά συστήματα) είτε σε επιμέρους δοχεία (ενεργητικά συστήματα).

Και στις δύο περιπτώσεις, τα υλικά αλλαγής φάσης παρουσιάζουν κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Λόγω της σταθερής θερμοκρασίας τους δεν δημιουργούν μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά, και με τον τρόπο αυτό μειώνονται οι απώλειες. Ταυτόχρονα μπορούν να αποθηκεύσουν πολύ περισσότερη ενέργεια στον όγκο τους από αυτή που αποθηκεύεται μέσω της αισθητής θερμότητας.

Το σύστημα θερμικής αποθήκευσης TESSE2b

Την τελευταία δεκαετία η συνεχής αύξηση του ενεργειακού κόστους, η ανησυχία για την επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου, καθώς και η ενεργειακή εξάρτηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης από τρίτες χώρες, εντείνουν το ενδιαφέρον για βιώσιμη ενεργειακή ανάπτυξη με την αποδοτική εφαρμογή των ΑΠΕ. Στον οικιακό τομέα της θέρμανσης και της παραγωγής

Λόγω της σταθερής θερμοκρασίας τους, τα υλικά αλλαγής φάσης (PCM's) δεν δημιουργούν μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά, κι έτσι μειώνονται οι απώλειες. Ταυτόχρονα μπορούν να αποθηκεύσουν πολύ περισσότερη ενέργεια στον όγκο τους από αυτή που αποθηκεύεται μέσω της αισθητής θερμότητας

με παράλληλη διατήρηση των συνθηκών άνεσης. Η δεύτερη είναι η εκμετάλλευση της περιβαλλοντικής θερμότητας μέσω της αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), με κυρίαρχη την ηλιακή ενέργεια.

Σε όλες τις περιπτώσεις, για την πρόοδοση ή την αφαίρεση θερμότητας, τα θερμικά ή ψυκτικά μέσα παράγουν ενέργεια σε θερμοκρασία διαφορετική από την απαιτού-

μεν (το χειμώνα σε υψηλότερη θερμοκρασία, ενώ το καλοκαίρι σε χαμηλότερη). Από τις ΑΠΕ, όμως, δεν παράγεται θερμότητα (ή εν γένει ενέργεια) όλες τις ώρες που χρησιμοποιείται ένας χώρος ή που την έχει ανάγκη ο άνθρωπος για τη διαβίωσή του.

Τα περισσότερα από αυτά τα συστήματα μέχρι σήμερα αποθηκεύουν θερμότητα (ή ψύχος) μέσω της αύξησης (ή αντίστοιχα της μείωσης) της

ζεστού νερού χρήσης (ZNX) αναπτύσσονται συνεχώς, μεταξύ άλλων, συστήματα αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας και της βιομάζας, καθώς και αντλίες θερμότητας υψηλής απόδοσης.

Το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα TESSe2b (ενταγμένο στο πρόγραμμα «Ορίζοντας 2020») έχει στόχο τη βέλτιστη χρήση των ΑΠΕ στον οικιακό τομέα, τη διόρθωση της χρονικής απόκλισης μεταξύ της παραγόμενης θερμικής ενέργειας και της ζήτησής της μέσω της θερμικής αποθήκευσης, καθώς και την αποδοτικότερη λειτουργία των συστημάτων ΑΠΕ.

Στόχος του προγράμματος υπήρξε ο σχεδιασμός, η ανάπτυξη, η επιτύρωση και η επίδειξη τεχνολογίας θερμικής αποθήκευσης χαμηλού κόστους και υψηλής απόδοσης, η οποία θα εκμεταλλεύεται ως πηγές ενέργειας ηλιακούς συλλέκτες και υψηλής απόδοσης γεωθερμικές αντλίες θερμότητας για οικιακή θέρμανση, ψύξη και παραγωγή ζεστού νερού χρήσης.

Το πρόγραμμα εστίασε στη χρήση υλικών αλλαγής φάσης (που έχουν «ντοπαριστεί» με νανοσωματίδια για τη βελτίωση των θερμικών χαρακτηριστικών τους) για τη θερμική αποθήκευση στα εξελιγμένα δοχεία αδράνειας που σχεδιάστηκαν. Στόχος του TESSe2b ήταν επίσης η αποδοτικότερη λειτουργία των γεωεναλλακτών, με τη βελτίωση του ενέματός τους με τη χρήση PCM's. Τέλος, έχει αναπτυχθεί ένα ολοκληρωμένο και έξυπνο σύστημα ελέγχου του συστήματος αποθήκευσης TESSe2b (φόρτιση - αποφόρτιση δοχείων θερμικής αποθήκευσης), αλλά και όλων των συστημάτων οικιακής θέρμανσης, ψύξης και παραγωγής ζεστού νερού χρήσης.

Η δεξαμενή αποτελείται από ένα σύστημα εναλλακτών θερμότητας, οι οποίοι εγκιβωτίζονται σε PCM's και συναλλάσσονται θερμότητα με το υλικό, με αποτέλεσμα την αποθήκευση της πολλαπλάσιας θερμότητας από αυτή που μπορούν να αποθηκεύσουν οι δεξαμενές που χρησιμοποιούνται. Έτσι ελαχιστοποιείται ο όγκος και



Εγκατάσταση δεξαμενών αποθήκευσης ενέργειας Tesse2b.

το βάρος της αποθήκευσης. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, χρησιμοποιούνται δεξαμενές που αποθηκεύουν θερμότητα σε διαφορετικές θερμοκρασίες, κι έτσι έχουμε δεξαμενή θερμού νερού χρήσης, δεξαμενή θέρμανσης αλλά και δεξαμενή αποθήκευσης ψυκτικής ενέργειας. Μετά από εκτεταμένες θεωρητικές και εργαστηριακές έρευνες αποδείχθηκε ότι το νέο σύστημα μπορεί να αποθηκεύσει πολλαπλάσια ενέργεια από το νερό -που μέχρι σήμερα κατά κόρον χρησιμοποιείται για

ζεστού νερού χωρητικότητας 1.000 λίτρων. Δηλαδή μια δεξαμενή με συνολικό όγκο 307 λίτρα και βάρος που δεν ξεπερνά τα 300 κιλά αντικαθιστά δεξαμενές που μόνο το βάρος του νερού είναι περίπου 1.000 κιλά και ο όγκος του νερού είναι περίπου 1.000 λίτρα.

Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται λειτουργεί επίσης θετικά για την αύξηση του βαθμού απόδοσης των ηλιακών συστημάτων παραγωγής ζεστού νερού χρήσης και θέρμανσης κτιρίων. Η μεθοδολογία είναι απλή, με την ενσω-

μάχτη με περύγιο που αποτρέπουν την μετακίνηση του PCM, καθώς και μόνωση για την ελαχιστοποίηση θερμικών απωλειών όταν η εξωτερική θερμοκρασία μειώνεται τη νύχτα.

Τα αποτελέσματα είναι εκπληκτικά, καθώς με την τεχνική αυτή ελαχιστοποιείται ο όγκος και το βάρος των δεξαμενών αποθήκευσης θερμότητας. Αντί για το γνωστό σε όλους boiler, τώρα πλέον η αποθηκευτική δεξαμενή βρίσκεται μέσα στο χώρο του μηχανοστασίου και προστατεύεται από τις προσβολές του περιβάλλοντος. Το βάρος του συγκροτήματος είναι κατά 30-45% μικρότερο από το συνολικό βάρος των σημερινών συστημάτων αποθήκευσης ζεστού νερού χρήσης, ενώ η απόδοση του συνολικού συστήματος είναι κατά 15-20% υψηλότερη. □

Το σύστημα TESSe2b εστιάζει στη χρήση PCM's (που έχουν «ντοπαριστεί» με νανοσωματίδια για τη βελτίωση των θερμικών χαρακτηριστικών τους) για τη θερμική αποθήκευση σε εξελιγμένα δοχεία αδράνειας. Τα PCM's αξιοποιούνται επίσης για την αποδοτικότερη λειτουργία των γεωεναλλακτών, με τη βελτίωση του ενέματός τους

το σκοπό αυτό. Επίσης σημαντικό είναι ότι επειδή στο νέο σύστημα δεν υπάρχει δοχείο αποθήκευσης νερού, αποφεύγεται απόλυτα η πιθανότητα ανάπτυξης μικροβίων στο ζεστό νερό χρήσης.

Η νέα συσκευή έχει παραλληλόγραμμο σχήμα (αν και μπορεί να κατασκευαστεί σε όποιο σχήμα θέλουμε), με αποτέλεσμα να εντάσσεται πολύ πιο εύκολα, καταλαμβάνοντας λιγότερο χώρο από κάθε άλλη που χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα. Δεξαμενή με διαστάσεις 1.240 x 300 x 840mm (μήκος, πλάτος, ύψος) μπορεί να αποθηκεύσει θερμότητα αντίστοιχη με μια δεξαμενή

μάτωση υλικών αλλαγής φάσης τα οποία αξιοποιούν τη λανθάνουσα θερμότητα κατά την τήξη ή την πήξη τους για να αυξήσουν την ποσότητα ενέργειας που μπορούν να αποθηκεύσουν. Η μεγάλη τους ικανότητα για θερμική αποθήκευση μπορεί να επεκτείνει το χρόνο λειτουργίας των ηλιακών συστημάτων παραγωγής ζεστού νερού χρήσης. Η ισοθερμοκρασιακή συμπεριφορά τους κατά τη διαδικασία της αλλαγής φάσης βελτιστοποιεί το σύστημα για λειτουργία σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και όχι σε εύρος θερμοκρασιών. Η σχεδίαση της δεξαμενής περιλαμβάνει εναλ-

*Ο κ. Μιχάλης Γρ. Βραχόπουλος είναι διδάκτορας μηχανολόγος μηχανικός στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ) και καθηγητής στο Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ) σε θέματα ΑΠΕ. Η κ. Μαρία Κούκου είναι επίκουρος καθηγήτρια ΕΚΠΑ σε θέματα βιομηχανικών εγκαταστάσεων, διευθύντρια του Εργαστηρίου Ενεργειακών & Περιβαλλοντικών Ερευνών (e2relab.uoa). Στη ομάδα εργασίας του e2relab.uoa μετέχουν επίσης οι κ. Νικ. Τάχος (δρ. μηχανολόγος μηχανικός Παν/μίου Πατρών), Γεώρ. Ευαγγελάκης (καθηγητής Παν/μίου Πατρών, ειδικός στη Νανοτεχνολογία), Ζήνων και Χρύσης Χρυσάνθου (μηχανολόγοι μηχανικοί), Γεώρ. Δόγκας (δρ. φυσικός), Ιωάννης Κωνσταντάρας (ηλεκτρολόγος μηχανικός Msc), Κωνστ. Λυμπέρης (πολιτικός μηχανικός Τ.Ε.) και Χρ. Πάγκαλος (μηχανολόγος μηχανικός ΕΜΠ).