

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΠΟΘΗΚΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΣΤΡΩΜΑ ΥΛΙΚΩΝ ΠΟΥ ΑΛΛΑΖΟΥΝ ΦΑΣΗ (P.C.M.)

A.Χ.Χριστοφορίδης, Μηχανολόγος Μηχανικός, Ερευνητ. Συνεργάτης ΑΠΘ
B.Χρυσάφιδης, Μηχανολόγος Μηχανικός ΑΠΘ
B.Σωτηρόπουλος, Καθηγητής του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών ΑΠΘ

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Πολυτεχνική Σχολή - Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Ενεργειακός Τομέας
Εργαστήριο Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών
54006 Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή αναλύεται ένα μοντέλο προσομοίωσης της δυναμικής θερμικής συμπεριφοράς μιας αποθήκης λανθάνουσας θερμότητας, η οποία έχει τη μορφή ενός στρώματος συσσωρευμένων υλικών. Η αποθήκη είναι μία πολύ καλά μονωμένη δεξαμενή, γεμάτη με σφαίρες ενός υλικού που αλλάζει φάση (Phase Change Material, PCM, π.χ. παραφίνη, ένυδρο άλας κ.λ.π.). Το μοντέλο της θερμικής συμπεριφοράς της αποθήκης αυτής περιγράφεται από τρεις εξισώσεις, μια για τον αέρα, μια για το πληρωτικό υλικό σε κάθε μονοφασική κατάσταση (στερεά-υγρή) και μία για την περιοχή αλλαγής φάσης, οι οποίες λύνονται με την μέθοδο fully implicit των πεπερασμένων διαφορών. Έγινε προσπάθεια ώστε να συμπεριληφθούν στις διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το φαινόμενο όροι, οι οποίοι αγνοούνται συνήθως κατά την αριθμητική επίλυση τέτοιων προβλημάτων από αντίστοιχες εργασίες της διεθνούς βιβλιογραφίας. Η αντιμετώπιση αυτή του προβλήματος είναι φανερό ότι προσεγγίζει περισσότερο το φυσικό φαινόμενο. Το πρόγραμμα προσομοίωσης αναπτύχθηκε για τη διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων του συστήματος όπως η διάμετρος των σφαιρών, η παροχή, τα χαρακτηριστικά του πληρωτικού υλικού και η γεωμετρία του συστήματος αποθήκευσης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση του προγράμματος συμφωνούν με πειραματικές μετρήσεις που έχουν δημοσιευθεί στην διεθνή βιβλιογραφία.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αποθήκες θερμότητας που χρησιμοποιούν την λανθάνουσα θερμότητα ενός υλικού αποθήκευσης (P.C.M.) έχουν βρεί τα τελευταία χρόνια ευρεία εφαρμογή και συναντώνται συνήθως στα ηλιακά συστήματα θέρμανσης με αέρα. Η ολοένα και πιο διαδεδομένη χρήση των αποθηκών αυτών οφείλεται στην ικανότητα αποθήκευσης μεγαλύτερων ποσών θερμότητας αλλά και στις σχετικά σταθερές θερμοκρασίες απορρόφησης-δέσμευσης και απόδοσης των ποσών θερμότητας.

Σπανίζουν οι δημοσιευμένες πληροφορίες που αφορούν στην μελέτη της αποθήκευσης θερμότητας σε στρώμα συσσωρευμένων υλικών (packed bed of encapsulated P.C.Ms) στα οποία να συμβαίνει αλλαγή φάσης. Αντίθετα υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός εργασιών που αφορούν συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας και συγκεκριμένα αποθήκες στις οποίες χρησιμοποιούνται πέτρες σαν πληρωτικό υλικό (rock bed).

Γενικά τα μοντέλα για την διερεύνηση της συγκεκριμένης αποθήκης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες που συνίστανται σε μονο- ή δι- διάστατη ανάλυση μονής ή χωριστής φάσης. Τα μονοδιάστατα μοντέλα υποθέτουν ότι υπάρχει μία ομοιόμορφη κατάσταση σε κάθε διατομή της στρωμάτωσης. Τα διδιάστατα μοντέλα επιτρέπουν την εξέταση της ανομοιομορφίας της ροής στη διατομή του στρώματος. Η

υπόθεση ότι τα συσσωρευμένα υλικά και το ρευστό υπάρχουν σε διαφορετικές θερμοκρασίες και συνδέονται με ένα ογκομετρικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συνιστά ένα μοντέλο χωριστής φάσης [1,2,3]. Η πρόβλεψη μιάς μοναδικής θερμοκρασίας για ένα ψευδο-ομογενές μέσο συνιστά ένα μοντέλο μονής φάσης (μοντέλο Schumann)[4].

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής θα ασχοληθούμε με τα μονοδιάστατα μοντέλα χωριστής φάσης.

2. ΑΝΑΛΥΣΗ

Στη γενική της μορφή, η μεταβατική συμπεριφορά μιάς μονάδας θερμικής αποθήκευσης, που έχει την μορφή μιας πολύ καλά μονωμένης κυλινδρικής δεξαμενής και περιέχει το πληρωτικό υλικό αποθήκευσης (PCM) μορφοποιημένο σε σφαίρες (καψούλες), διέπεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

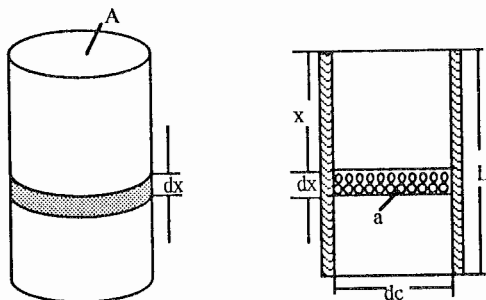
- (i) την διδιάστατη εξίσωση διατήρησης ενέργειας σε κυλινδρικές συντεταγμένες για το εργαζόμενο ρευστό (αέρας) η οποία παίρνει υπόψη τις θερμοκρασιακές μεταβολές τόσο στην αξονική όσο και στην ακτινική διεύθυνση και από την
- (ii) μονοδιάστατη εξίσωση μεταβατικής αγωγής θερμότητας σε σφαιρικές συντεταγμένες για το υλικό αποθήκευσης που υφίσταται αλλαγή φάσης.

2.1 Μοντέλο για το ρευστό

Αν δεχθούμε ότι το τοίχωμα της αποθήκης θερμότητας είναι καλά μονωμένο οπότε οι απώλειες προς το περιβάλλον μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες τότε οι θερμοκρασιακές μεταβολές κατά την ακτινική διεύθυνση γίνονται ασήμαντες. Επίσης αν δεχθούμε ότι σε κάθε διατομή της στρωμάτωσης δεν υπάρχουν και διακυμάνσεις στην ταχύτητα ροής και στην πτώση πίεσης κατά την ακτινική διεύθυνση τότε οδηγούμαστε σε μονοδιάστατα μοντέλα. Και τα μονοδιάστατα μοντέλα χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τη θεώρηση των φαινομένων μετάδοσης θερμότητας και τις παραδοχές που κάνουμε. Οι κυριότερες παραδοχές που γίνονται σχετίζονται με τη ροή του ρευστού και το προφίλ θερμοκρασιών μέσα στο πληρωτικό υλικό. Οι παραδοχές αυτές συνοψίζονται στα παρακάτω [1,2,3]:

- (i) Η ροή του ρευστού είναι τύπου εμβόλου (plug flow) και ισχύουν τα φαινόμενα διασποράς του ρευστού διαμέσου των συσσωρευμένων υλικών (dispersion model).
- (ii) Υπάρχει αγωγή θερμότητας με ομοκεντρικό προφίλ θερμοκρασιών μέσα στο πληρωτικό υλικό (intra-particle conduction).

Η παραδοχή (i) σχετίζεται και επηρεάζει την διαφορική εξίσωση που περιγράφει το θερμοκρασιακό πεδίο του αέρα, ενώ η παραδοχή (ii) αφορά το πληρωτικό υλικό.



Σχήμα 1. Στοιχειώδης όγκος ελέγχου

Το ενεργειακό ισοζύγιο που ισχύει για ένα στοιχειώδη όγκο μιας στήλης (σχήμα 1) με πληρωτικό υλικό που διαρρέεται από αέρα είναι:

$$- A \frac{\partial \dot{q}_x}{\partial x} dx dt - \dot{m} c_{pf} \frac{\partial T}{\partial x} dx dt - ha A dx dt (T - T_{sur}) = \rho_f c_{pf} A \frac{\partial T}{\partial t} dx dt \quad (1)$$

όπου ο α' όρος στα αριστερά δίνει το ποσό θερμότητας που μεταφέρεται με αγωγή διαμέσου των σφαιρών-αέρα, ο β' τη θερμότητα που μεταφέρεται (μεταβολή ενθαλπίας) από το ρευστό λόγω συναγωγής, ο γ' το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται από τον αέρα προς τις σφαίρες και ο όρος στα δεξιά την μεταβολή της ενέργειας που αποθηκεύεται στο ρευστό (τοπική μεταβολή εσωτερικής ενέργειας).

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι $\dot{m} = \rho_f u A = G_0 A$, διαιρούμε με $\rho_f c_{pf}$ και έχουμε:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_{ax} \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{ha}{\rho_f c_{pf}} (T - T_{sur}) \quad (2)$$

οι οριακές συνθήκες είναι:

$$\begin{aligned} x = 0 & : T(0, t) = T_{in}(t) \\ x = L & : \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \end{aligned}$$

οι αρχικές συνθήκες είναι:

$$t = 0 : T(x, 0) = T_0(x)$$

Αν αγνοηθούν οι επιδράσεις της διασποράς στο ρευστό τότε η διαφορική εξίσωση του ρευστού γίνεται:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{ha}{\rho_f c_{pf}} (T - T_{sur}) = 0 \quad (3)$$

Συγκρίνοντας στο μοντέλο αυτό την εξίσωση του ρευστού (3) με την (2), παρατηρούμε ότι έχει αγνοηθεί ο όρος της δεύτερης προαγωγής ως προς x (dispersion effects). Η επιλογή ενός από τα δύο αυτά μοντέλα εξαρτάται μόνο από τον αριθμό Peclet. Για τιμές του αριθμού Peclet μεγαλύτερες από 200, η διαφορά ανάμεσα στα αποτελέσματα των δύο μοντέλων είναι τυπικά μικρότερη από 10% για τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν [1].

Οι διάφοροι μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας, είναι τόσο αλληλένδετοι που είναι πολύ δύσκολη η απομόνωση και ο υπολογισμός ξεχωριστών συντελεστών για κάθε περίπτωση. Έτσι δεχόμαστε ότι ο συντελεστής συναγωγής είναι σταθερός και κοινός μακριά ή κοντά στο τοίχωμα, και δίνεται από τη σχέση [5,6]:

$$h = \frac{j_h c_{pf} G_0}{Pr^{2/3}}$$

όπου :

$$j_h = \frac{2}{Re_0 Pr^{1/3}} + \frac{2.031}{Re_0^{1/2}} + 0.049 Pr^{1/6}$$

2.2 Μοντέλο για το πληρωτικό υλικό αλλαγής φάσης (PCM)

Για το υλικό αλλαγής φάσης (PCM) οι υποθέσεις που γίνονται είναι :

- (i) το μέτωπο τήξης/πλήξης είναι οξύ (δεν υπάρχει διφασική περιοχή ανάμεσα στο στερεό-υγρό).
- (ii) οι επιδράσεις της φυσικής συναγωγής στην υγρή περιοχή του υλικού αγνοούνται.

- (iii) έχουμε σφαιρικά συμμετρική τήξη/πύξη
 (iv) η αύξηση/μείωση του όγκου του υλικού εξαιτίας της αλλαγής φάσης είναι αμελητέες.

Η εξίσωση που περιγράφει το θερμοκρασιακό πεδίο σε μιά σφαίρα, σαν συνάρτηση της θέσης και του χρόνου, σε σφαιρικές συντεταγμένες, για ουσιαστική μεταβολή της θερμοκρασίας μόνο κατά την ακτινική διεύθυνση είναι:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \alpha_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) \quad (4)$$

όπου ο δείκτης $i = s$ για την στερεά περιοχή, l για την υγρή περιοχή με οριακές συνθήκες:

$$\begin{aligned} r = 0 & \quad : \quad \frac{\partial T_i}{\partial r} = 0 \\ r = R & \quad : \quad h(T - T_{\text{sur}}) = K_i \frac{\partial T_i}{\partial r} \end{aligned}$$

Η οριακή συνθήκη στην κινούμενη επιφάνεια διαχωρισμού της υγρής/στερεάς φάσης είναι:

$$\rho \Delta h_f \left(\frac{dr_i}{dt} \right)_s = K_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial r} \right) - K_l \left(\frac{\partial T_l}{\partial r} \right) \quad (5)$$

Η εξίσωση (5) ισχύει κατά την τήξη στη διεπιφάνεια υγρού/στερεού για:

$$r = r_i \quad : \quad T_s = T_l = T_m$$

Το σύστημα των εξισώσεων (3 και 4) για την υγρή/στερεά περιοχή του υλικού μαζί με την εξίσωση (5) και τις οριακές και αρχικές συνθήκες αποτελούν ένα σετ διαφορικών εξισώσεων με μερικές παραγώγους που μπορεί να λυθεί μόνο με αριθμητικές μεθόδους. Το σύστημα αυτό των διαφορικών εξισώσεων μετατρέπεται κάθε φορά σε σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων με τη βοήθεια πεπερασμένων διαφορών, σύμφωνα με το σύστημα fully implicit. Κατά την επίλυση, λαμβάνεται σε κάθε βήμα η εξάρτηση των ιδιοτήτων του αέρα από την θερμοκρασία, με την μέθοδο trial & error. Η εξάρτηση αυτή όμως εισάγει την μή γραμμικότητα των διαφορικών εξισώσεων. Πρακτικά η τεχνική των πεπερασμένων διαφορών είναι η μόνη που μπορεί να δώσει λύσεις στο πρόβλημα.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ο υπολογισμός του θερμοκρασιακού πεδίου του αέρα και των δύο φάσεων του πληρωτικού υλικού γίνεται για τρεις διαφορετικές μορφές θερμοκρασίας εισόδου του αέρα στην αποθήκη [3, 7]:

- (i) Η θερμοκρασία εισόδου του αέρα είναι σταθερή ($T_{in}=60^\circ\text{C}$). Η λειτουργία αυτού του είδους παρουσιάζεται σε πειραματικές διατάξεις.
- (ii) Η θερμοκρασία εισόδου είναι τυχαία, όπως συμβαίνει στην πραγματικότητα στις ηλιακές εφαρμογές.
- (iii) Η θερμοκρασία εισόδου είναι κάθε φορά η τιμή που δίνεται από την ημιτονοειδή συνάρτηση:

$$T_{in}(t) = T_{περ} + (T_{\max} - T_{περ}) \left[\sin \left(\frac{\pi t}{t_{\text{col}}} \right)^2 \right]$$

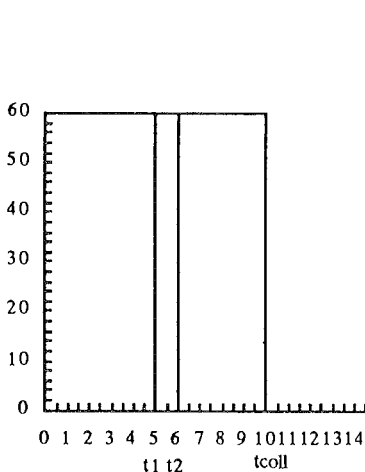
$T_{περ} = \text{Θερμοκρ. περιβάλλοντος} = 20^{\circ}\text{C}$
 $T_{\max} = \text{μέγιστη θερμοκρασία ημέρας} = 35^{\circ}\text{C}$
 $t_{\text{coil}} = \text{χρόνος φόρτισης} = 4 \text{ h}$

Δίνονται ορισμένα τυπικά αποτελέσματα, από την επίλυση του μοντέλου με χρήση Η/Υ. Στα σχήματα 3 και 5 δίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για ένα σύστημα αποθήκευσης μιας κυλινδρικής δεξαμενής, $L = 1.3 \text{ m}$, που περιέχει σε σφαίρες $d_p = 0.03 \text{ m}$ το υλικό PCM: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ με θερμοκρασία τήξης $T_m = 32^{\circ}\text{C}$ και λανθάνουσα θερμότητα $\Delta h_f = 250 \text{ KJ/Kg}$. Η παροχή μάζας του αέρα ανά μονάδα μετωπικής επιφάνειας είναι $G_0 = 800 \text{ Kg/hm}^2$. Το θερμοκρασιακό πεδίο του αέρα στο σχήμα 3 προκύπτει για σταθερή θερμοκρασία εισόδου $T_{in} = 60^{\circ}\text{C}$ (σχήμα 2), ενώ το πεδίο του σχήματος 5 προκύπτει για ημιτονοειδή θερμοκρασία εισόδου του αέρα (σχήμα 4). Το σχήμα 6 παρουσιάζει την επίδραση του μεγέθους της σφαίρας, d_p , στην κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα στον χρόνο $t = 6 \text{ h}$ στην αποθήκη με τα ίδια χαρακτηριστικά που δόθηκαν παραπάνω. Στο σχήμα 7 παρουσιάζεται η μεταβατική διακύμανση της θερμοκρασίας εξόδου του αέρα από την αποθήκη σε σχέση με μια ορισμένη θερμοκρασία εισόδου.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

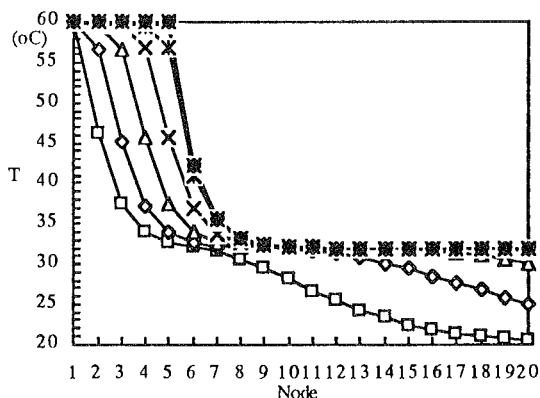
Το πρόγραμμα προσομοίωσης που αναπτύχθηκε χρησιμοποιείται για την εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας και της διαμέτρου των σφαιρών μιας αποθήκης λανθάνουσας θερμότητας. Ο βέλτιστος χρόνος φόρτισης μπορεί να βρεθεί από τη μέγιστη φόρτιση της δεξαμενής για διαφορετικές παραμέτρους, μήκος, διάμετρος, πορώδες, παροχή αέρα, όταν δηλαδή το μεγαλύτερο μέρος της αποθήκης έχει τακεί.

Το μοντέλο αυτό μπορεί επίσης να ενταχθεί σε γενικώτερα προγράμματα δυναμικής θερμικής συμπεριφοράς ηλιακών συστημάτων με σκοπό την αξιολόγηση και βελτιστοποίησή τους.

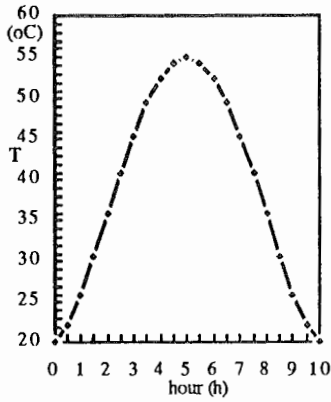


Σχήμα 2. Σταθερή θερ/σία εισόδου του αέρα ($T_{in} = 60^{\circ}\text{C}$)

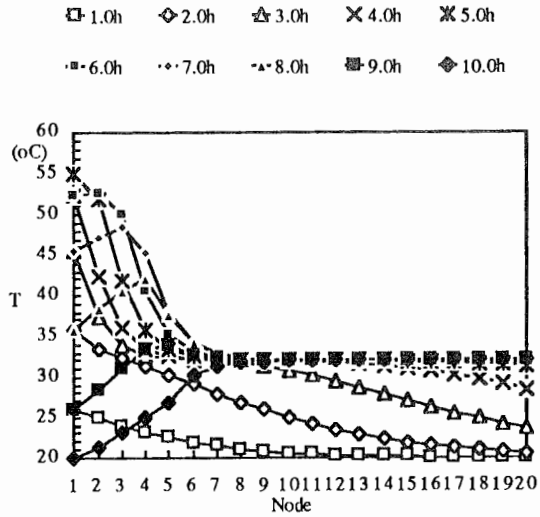
□ 1.0h ◇ 2.0h △ 3.0h × 4.0h * 5.0h
 ■ 6.0h × 7.0h * 8.0h — 9.0h ◆ 10.0h



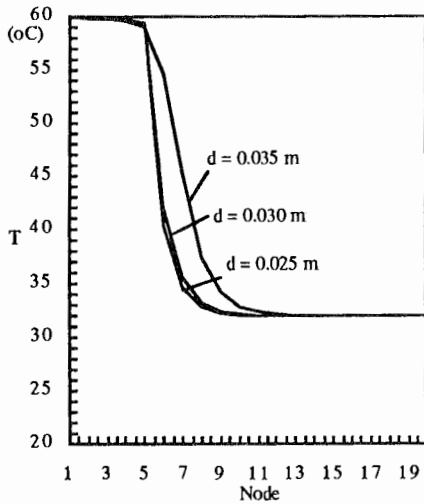
Σχήμα 3. Θερμικό πεδίο αέρα στην απόθηκη PCM για σταθερή θερ/σία εισόδου



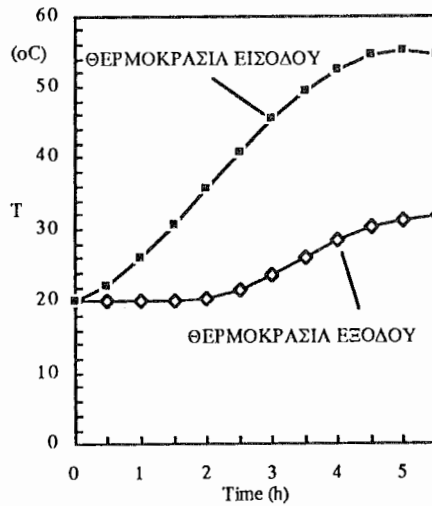
Σχήμα 4. Ημιτονοειδής συνάρτηση θερ/σίας εισόδου αέρα



Σχήμα 5. Θερ/κό πεδίο αέρα στην αποθήκη PCM για ημιτονοειδή θερ/σία εισόδου αέρα



Σχήμα 6. Επίδραση του μεγέθους των σφαιρών PCM στο θερ/κό πεδίο του αέρα.



Σχήμα 7. Μεταβατική διακύμανση θερ/σίας εξόδου αέρα από την αποθήκη ως προς την θερ/σία εισόδου

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

A	=	μετωπική επιφάνεια	[m ²]
a	=	διαθέσιμη επιφάνεια ροής ανά μονάδα όγκου = 6(1-ε)/d _p	[m ² /m ³]
A _h	=	επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας σε κάθε όγκο ελέγχου	[m ²]
c _p	=	ειδική θερμότητα	[KJ/KgK]
d _p	=	διάμετρος σφαιράς PCM	[m]
d _r	=	ακτινικό βήμα	[m]
d _t	=	χρονικό βήμα	[sec]
d _x	=	αξονικό βήμα	[m]
G _o	=	παροχή μάζας ανά μονάδα μετωπικής επιφάνειας = ρ/u _o	[kg/m ² h]
h	=	συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ανάμεσα στο ρευστό (αέρα) και το PCM	[W/m ² k]
K	=	συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	[W/mK]
L	=	μήκος δεξαμενής	[m]
\dot{m}	=	ροή μάζας αέρα	[m ³ /h]
Pe	=	αριθμός Peclet = (ρc _p u) ² ALe/KAh	
Pr	=	αριθμός Prandtl = μc _p /K _f	
R	=	ακτίνα σφαιράς PCM	[m]
Re	=	αριθμός Reynolds = d _p G _o /μ	
T	=	θερμοκρασία ρευστού	[°C]
t	=	χρόνος	[sec]
t _{coll}	=	ολικός χρόνος λειτουργίας φάσης φόρτισης	[sec]
T _m	=	θερμοκρασία τήξης υλικού	[°C]
T _{sur}	=	θερμοκρασία της επιφάνειας του PCM	[°C]
u _o	=	μετωπική ταχύτητα του αέρα = u ε	[m/sec]
u	=	ταχύτητα του αέρα	[m/sec]

Greek Letters

α _{αχ}	=	πραγματικός συντελεστής διαχυτότητας του διαρρεόμενου υλικού στην αξονική διεύθυνση	[m ² /s]
Δh _f	=	λανθάνουσα θερμότητα υλικού	[Kj/KgK]
ε	=	πορώδες	[-]
ρ	=	πυκνότητα	[kg/m ³]

Δείκτες

s	=	στερεά φάση
l	=	υγρή φάση
f	=	αέρας
i	=	ανάλογα με φάση υλικού, παίρνει τιμές s,l
in	=	είσοδος
o	=	αρχική τιμή

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. D.R.Pitts, Ji Shi Hohg, "Analysis of Transient Thermal Performance of a Latent Heat Storage Packed bed", Winter annual meeting of the ASME Dec. 13/18/1987
2. H.Torab, D.E.Beasley, "Optimization of a packed-bed of encapsulated P.C.M. for Thermal Energy Storage", Proceeding of the 21st Intersociety Energy Conversion Eng. Conf. 1986.
3. Ν.Παπαγεωργίου, Κ.Δημητριάδης, "Αποθήκευση θερμότητας σε στρώμα στερεών (rock-bed)", Διπλωματική εργασία ΑΠΘ, 1988.
4. H. Torab, D.E.Beasley, "Dynamic Response, of a packed bed of encapsulated P.C.M.", Proceedings of the 20st Intersociety Energy Conversion Eng. Conf. 1985.
5. G.Lane, "Solar heat storage: Latent heat materials", Volume 2, Technology, C.R.C. Press, Inc., U.S.A.
6. D.E.Beasley, A.Clark, "Transient Response of a Packed Bed for Thermal Energy Storage", Int.J.Heat Mass Transfer, Vol. 27, No 9, pp 1659-1669, 1984
7. Β.Α.Χρυσαιφίδης, "Αποθήκευση θερμότητας σε υλικά που αλλάζουν φάση P.C.M.", Διπλωματική εργασία, ΑΠΘ, 1991.
8. M.Amdjadi, "Étude d'un accumulateur thermique utilisant la chaleur latente de fusion d' un metériau encapsule dans de petites sphaires", Ph.D.These, Universite de Perpignan, 1986.