

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΧΡΗΣΗΣ ΝΑΝΟΡΕΥΣΤΩΝ SiO₂ ΣΕ μ-ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ι.Α. Στογιάννης, Μ.Ε. Μπαντή, Α.Α. Μουζά

*Εργαστήριο Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
tel.: +30 2310 994161; email: mouza@auth.gr*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάται η απόδοση αιωρημάτων νανοσωματιδίων ως ψυκτικών μέσων σε μικρο-εναλλάκτες θερμότητας, δηλαδή εναλλάκτες τα κανάλια ροής των οποίων η χαρακτηριστική διάσταση είναι μικρότερη από 1mm. Με τον όρο νανορευστά αναφερόμαστε σε σταθερά αιωρήματα νανο-σωματιδίων, τα οποία εμφανίζουν αυξημένη θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με το φέρον ρευστό. Ως νανοσωματίδια επιλέγονται τα χαμηλού τους κόστους σωματίδια SiO₂ (*Aerosil A200*). Ο μ-εναλλάκτης σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ώστε να λειτουργεί σε συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας επιφανείας. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με χρήση απεσταγμένου νερού και νανορευστού διαφόρων συγκεντρώσεων SiO₂. Για σύγκριση της απόδοσης των ρευστών υπολογίζονται ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και ο αριθμός *Nu*. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των νανορευστών μπορούν να υπολογιστούν με αποδεκτή προσέγγιση με χρήση αναλυτικών εξισώσεων με εξαίρεση το ιξώδες, το οποίο υπολογίζεται πειραματικά. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν δείχνουν ότι όταν χρησιμοποιείται νανορευστό ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αυξάνεται κατά 18-27% σε σχέση με τη χρήση νερού ως ψυκτικού μέσου.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συνεχής τεχνολογική ανάπτυξη, οδηγεί σε αυξανόμενες απαιτήσεις ενέργειας και στην ανάγκη εντατικοποίησης των διεργασιών. Με άξονα το σχεδιασμό εξοπλισμού και συστημάτων μεγαλύτερης απόδοσης και εξοικονόμησης ενέργειας, γίνεται εντονότερη η στρόφη στις συσκευές μικρών διαστάσεων, με συνεχή έρευνα που αφορά τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους. Στα πλαίσια αυτά, μελετάται η χρήση εναλλακτών με χαρακτηριστικές διαστάσεις στην περιοχή της μικρο-κλίμακας με παράλληλη χρήση ρευστών με βελτιωμένες ιδιότητες ως προς τη μεταφορά θερμότητας.

Η αποδοτικότητα μίας διεργασίας εναλλαγής θερμότητας στηρίζεται σε τρία κύρια σημεία, δηλαδή τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εναλλάκτη, το είδος των ρευστών που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα χαρακτηριστικά της ροής τους. Στην περίπτωση εναλλακτών με κανάλια ροής χαρακτηριστικής διάστασης μικρότερης του ενός χιλιοστού (μ-εναλλάκτες), η ροή είναι συνήθως στρωτή, δηλαδή χαρακτηρίζεται από μικρούς αριθμούς *Reynolds*.

Η χρήση στερεών σωματιδίων μεγέθους της τάξης των νανομέτρων (νανοσωματίδια) είναι δυνατόν να επιφέρει σημαντική αύξηση στη θερμική αγωγιμότητα συμβατικών ρευστών. Τα αιωρήματα νανοσωματιδίων, γνωστά ως νανορευστά, παρουσιάζουν ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητας σε σχέση με το φέρον ρευστό. Παράλληλα όμως υπάρχει μείωση της ειδικής θερμότητας και αύξηση του ιξώδους και της πυκνότητάς τους. Η αντικατάσταση των συμβατικών ρευστών με νανορευστά, έχοντας ως στόχο την αύξηση της απόδοσης ενός εναλλάκτη, αποτελεί νέο τομέα εφαρμογών με σημαντική ερευνητική δραστηριότητα τη τελευταία δεκαετία. Η χρήση αυτών των ρευστών σε εναλλάκτες έχει υπάρξει σημαντικό αντικείμενο έρευνας^[1-3] αφήνοντας ωστόσο ακόμα μεγάλα περιθώρια βελτιστοποίησης της λειτουργίας εναλλακτών που χρησιμοποιούν νανορευστά ως ψυκτικό μέσο.

Οι Huminic και Huminic^[4] παρουσιάζουν ευρεία ανασκόπηση σχετικά με τη χρήση νανορευστών σε εναλλάκτες θερμότητας και δίνουν συσχετισμούς για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των νανορευστών. Οι Li και Kleinstreuer^[5] οι οποίοι μελέτησαν τη ροή σε μικρο-κανάλια ψύξης, αναφέρουν ότι τα νανοσωματίδια αυξάνουν τη θερμική απόδοση με μικρή μόνο αύξηση της ενέργειας άντλησης. Επιπλέον, η ανάπτυξη εμπειρικών συσχετισμών για τη μεταφορά θερμότητας με νανορευστά αποτελεί σημαντικό σημείο μελέτης^[6-7], καθώς χρησιμοποιούνται ως η κυριότερη μέθοδος σχεδιασμού εναλλακτών. Τέλος, αντίστοιχες μελέτες για την θερμική απόδοση μ-εναλλακτών θερμότητας με χρήση νανορευστών έχουν γίνει και με χρήση κώδικα Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (*Computational Fluid Dynamics, CFD*)^[2-3].

Όπως προαναφέρθηκε σημαντικό μειονέκτημα της χρήσης των νανορευστών είναι η αύξηση της πτώσης πίεσης και κατά συνέπεια η απαίτηση για μεγαλύτερη ενέργεια άντλησης. Επιπλέον, συχνά εμφανίζονται προβλήματα συσσωμάτωσης και κατακράτησης των σωματιδίων στα κανάλια με αποτέλεσμα την περαιτέρω επιβάρυνση του αντλητικού συστήματος. Σημαντικό πρόβλημα κατά την παρασκευή των διαλυμάτων είναι η σταθεροποίηση του αιωρήματος, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες μεθόδους αλλά συνήθως όχι για μεγάλο χρονικό διάστημα. Από τη βιβλιογραφία προκύπτει ότι η χρήση υπερήχων αποτελεί ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο σταθεροποίησης για νανορευστά με διάφορα είδη σωματιδίων όπως *CuO*, *Al₂O₃*, *MWCNT*^[8-10]. Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις η χρήση προσθέτων για τη ρύθμιση του ζ-δυναμικού και του *pH* είναι απαραίτητη για τη σταθεροποίηση του διαλύματος. Τέλος, η πλειοψηφία των νανορευστών που έχουν μελετηθεί, όπως π.χ. *CuO*, *Al₂O₃*^[11-12], έχουν υψηλό κόστος, κάνοντας τη χρήση τους οικονομικά ασύμφορη.

Στην παρούσα εργασία επιλέγεται η μελέτη νανοσωματιδίων *SiO₂* σε νερό εξαιτίας του χαμηλού τους κόστους αλλά και αντίστοιχης μελέτης που επιβεβαιώνει την καλή διασπορά αυτών των σωματιδίων^[13] σε νερό. Πειραματικές μελέτες μεταφοράς θερμότητας με χρήση νανορευστών *SiO₂* σε μ-εναλλάκτες είναι πολύ περιορισμένες στη βιβλιογραφία. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί πειραματικά η χρήση νανορευστών *SiO₂* σε έναν μ-εναλλάκτη θερμότητας και να συγκριθεί με την περίπτωση χρήσης νερού ως ψυκτικού μέσου.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Ο μ-εναλλάκτης που σχεδιάστηκε για τις ανάγκες της μελέτης λειτουργεί σε συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας επιφανείας (*constant surface temperature*) με χρήση βοηθητικού ρευστού γνωστής σταθερής θερμοκρασίας και υψηλής ογκομετρικής παροχής ώστε να παραμένει η θερμοκρασία του πρακτικά σταθερή μεταξύ εισόδου και εξόδου.

Η πειραματική διάταξη (**Σχήμα 1α**) αποτελείται από το μ-κανάλι, περισταλτική αντλία (*FMI RP-G400*) για την άντληση του ρευστού με ταυτόχρονη ρύθμιση της παροχής με μεταβολή των στροφών της, λουτρό σταθερής θερμοκρασίας (*Neslab RTE-221*) για ρύθμιση της θερμοκρασίας του νανορευστού που εισέρχεται στον μ-εναλλάκτη, θερμολουτρό (*Neslab RTE-220*) για ρύθμιση της θερμοκρασίας του βοηθητικού ρευστού και τέλος-δοχείο συλλογής και επανακυκλοφορίας. Η περισταλτική αντλία, βαθμονομήθηκε με ζυγό ακριβείας στο επιθυμητό εύρος παροχών λειτουργίας και για κάθε ρευστό (νερό, διάφορες συγκεντρώσεις νανορευστών) που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη.

Το υπό μελέτη μ-κανάλι (**Σχήμα 1β**) είναι ορθογωνικής διατομής με βάθος 500μm, πλάτος 76.5cm και συνολικό μήκος 76.5cm και είναι κατασκευασμένο από *PMMA*. Ειδική διαμόρφωση του καναλιού στα δύο άκρα του εξασφαλίζουν ομαλές συνθήκες εισόδου και εξόδου. Το μ-κανάλι τοποθετείτε κατακόρυφα και το ρευστό εισέρχεται από το κάτω μέρος και απομακρύνεται με υπερχειλίση, ώστε να αποφευχθεί η παραμονή φυσαλίδων αέρα στο εσωτερικό του.

μεταφορά θερμότητας. Για την συγκεκριμένη μελέτη πρέπει να είναι γνωστή η πυκνότητα και το ιξώδες του νανορευστού που μετέχει σε κάθε μέτρηση, καθώς τα δυο αυτά μεγέθη επηρεάζουν τη ρεολογική συμπεριφορά του ρευστού. Για το λόγο αυτό μετρήθηκαν στο Εργαστήριο το ιξώδες και η πυκνότητα του νανορευστού στις διάφορες συγκεντρώσεις και συγκρίθηκαν με τις **Εξ. 1-2** που χρησιμοποιούνται συχνά στη βιβλιογραφία για τον προσδιορισμό τους^[1].



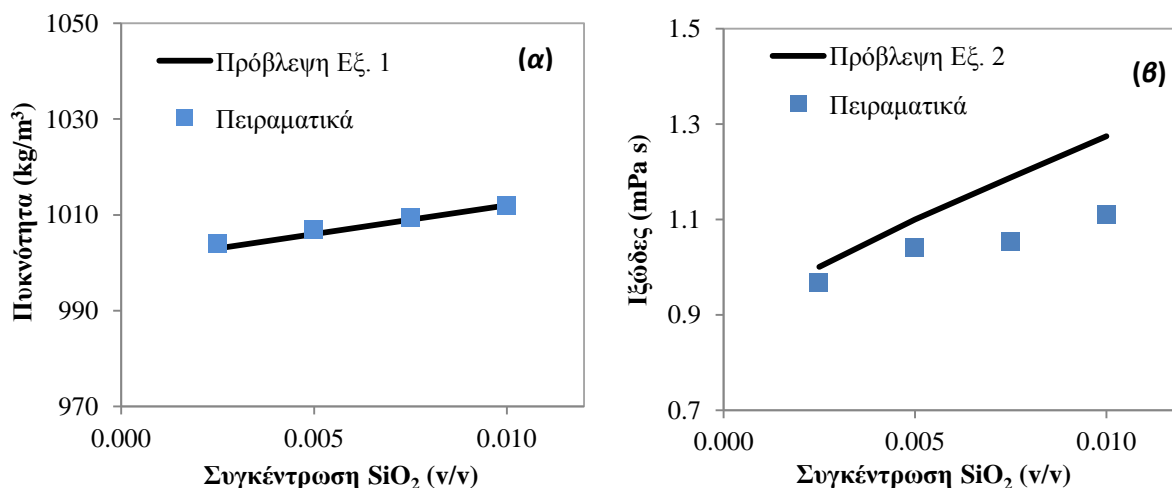
Σχήμα 2: Οπτική παρατήρηση για τον έλεγχο της σταθερότητας του αιωρήματος:
α) 1^η μέρα και β) 25^η μέρα χωρίς μηχανική ανάδευση.

$$\rho_{n,t} = \varphi\rho_p + (1-\varphi)\rho_w \quad (1)$$

$$\mu = \mu_w [1 + 2,8\varphi(10,92)^{3-1,9}] \quad (2)$$

όπου $\rho_{n,t}$, ρ_p και ρ_w είναι η πυκνότητα του νανορευστού, του νανοσωματιδίου και του φέροντος υγρού αντίστοιχα, μ και μ_w είναι το ιξώδες του νανορευστού και του φέροντος υγρού αντίστοιχα, ενώ φ είναι η συγκέντρωση v/v του νανορευστού.

Οι πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι η πυκνότητα ακολουθεί ικανοποιητικά την **Εξ. 1** με μέγιστη απόκλιση $\pm 1\%$. Αντιθέτως, στο **Σχήμα 3β** όπου απεικονίζεται το ιξώδες του διαλύματος, παρατηρείται αισθητή απόκλιση από την αντίστοιχη τιμή που προέκυψε από την **Εξ. 2**, φτάνοντας στο 13%, όπως έχει παρατηρηθεί και σε προηγούμενες μελέτες στο Εργαστήριό μας^[1].



Σχήμα 3: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της πυκνότητας και του ιξώδους για διάφορες συγκεντρώσεις νανορευστού SiO₂.

Σταθερή θερμοκρασία επιφάνειας

Όπως προαναφέρθηκε για την επίτευξη σταθερής θερμοκρασίας στην επιφάνεια του μ-καναλιού χρησιμοποιείται ρεύμα μεγάλης παροχής (σε σύγκριση με την παροχή στο μ-

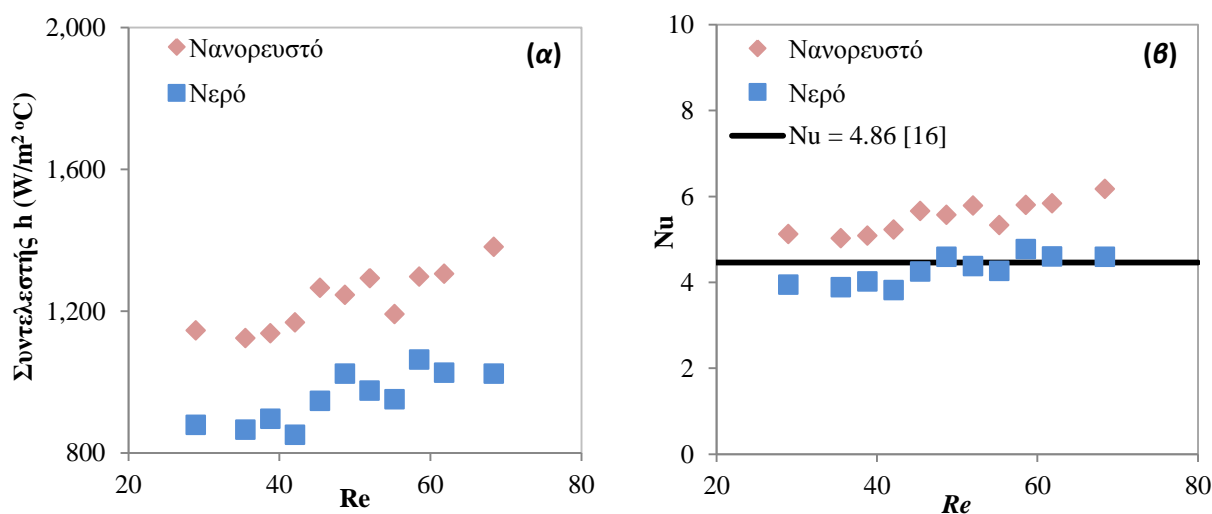
κανάλι). Το ρεύμα αυτό είναι νερό στους 5°C, το οποίο προέρχεται από λουτρό σταθερής θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία του ρευστού που ρέει στο μ -κανάλι ρυθμίζεται με χρήση δεύτερου λουτρού στους 35°C, ώστε να υπάρχει σημαντική διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δυο ρευμάτων και να ελαχιστοποιηθούν, κατά το δυνατόν, οι απώλειες προς το περιβάλλον. Το σύστημα αφήνεται να ισορροπήσει για 30-45 λεπτά. Έπειτα λαμβάνονται οι τιμές της θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου του υπό μελέτη ρευστού και του ψυκτικού ρευστού. Οι θερμοκρασίες του ψυκτικού παρουσιάζουν διαφορά λιγότερη από 0.2°C, γεγονός που επιβεβαιώνει την παραδοχή της σταθερής θερμοκρασίας του ρευστού και κατ' επέκταση τη σταθερή θερμοκρασία επιφάνειας της μίας πλάκας του μ -καναλιού. Συνδυάζοντας τα παραπάνω δεδομένα και λαμβάνοντας υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μ -καναλιού, υπολογίζονται ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, h και ο αριθμός Nu :

$$h = \frac{q}{A\Delta T_{ln}} \quad (3)$$

$$Nu = \frac{hd_H}{k} \quad (4)$$

όπου q είναι το συνολικό ποσό θερμότητας που μεταφέρεται, A η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας, ΔT_{ln} η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας, d_H η υδραυλική διάμετρος του καναλιού και k η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού.

Στο **Σχήμα 4** παρουσιάζεται τυπική σύγκριση για νανορευστό 1% v/v και απεσταγμένο νερό. Είναι εμφανής η επίδραση των νανοςωματιδίων στο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και στον αριθμό Nu .

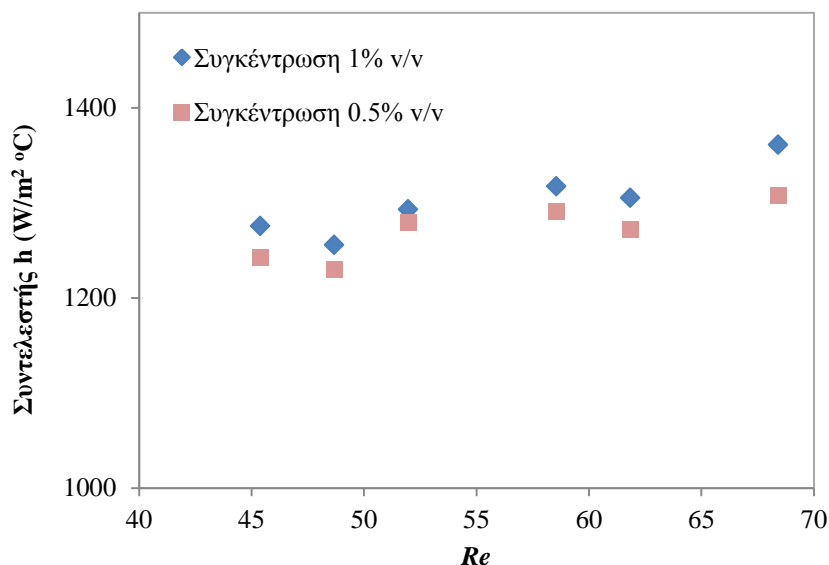


Σχήμα 4: Τυπική επίδραση νανοςωματιδίων α) στο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και β) τον αριθμό Nu , για διάφορες τιμές του Re (συγκέντρωση $SiO_2 = 1\%$ v/v).

Η αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας είναι 15-30% σε σχέση με αυτόν του ρευστού αναφοράς, ενώ όπως αναμένεται από την αναλυτική επίλυση των εξισώσεων διατήρησης ορμής και ενέργειας για στρωτή ροή^[16], ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για τη περίπτωση του απεσταγμένου νερού δεν εξαρτάται σημαντικά από τη μεταβολή του αριθμού Re , όπως αναμένεται για την περίπτωση της στρωτής ροής.

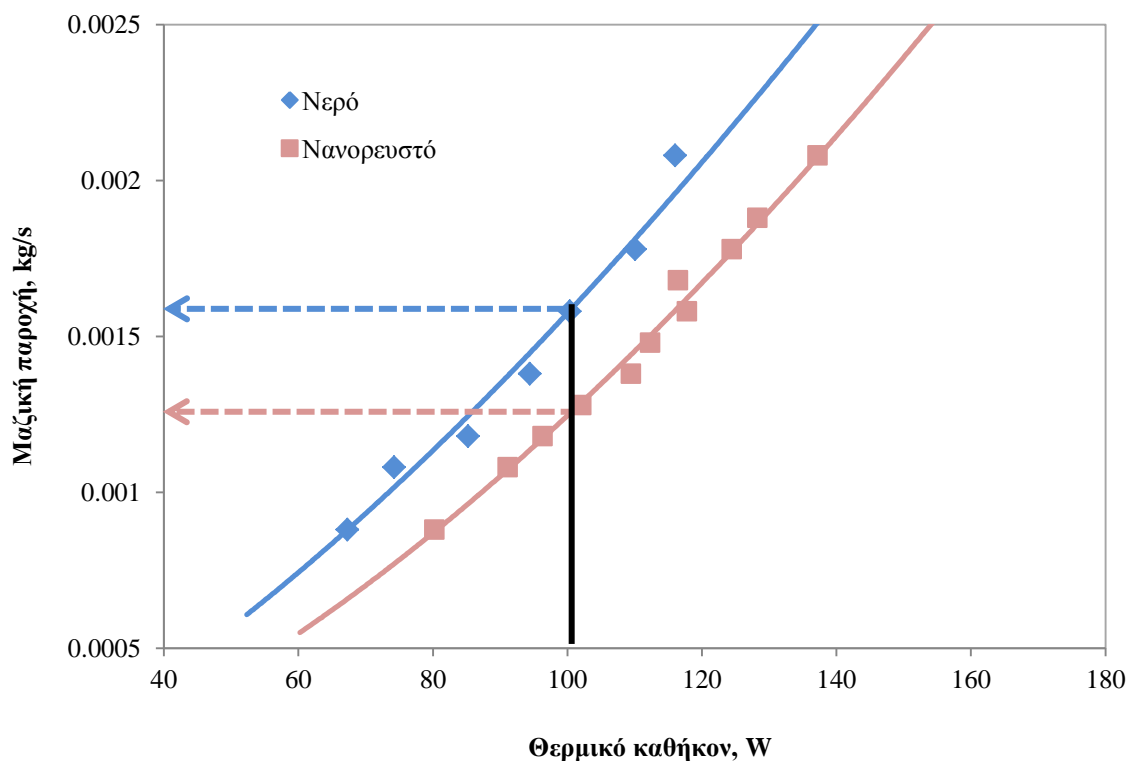
Αντίστοιχα αποτελέσματα εξάγονται στην περίπτωση νανορευστού 0.5% v/v, όπου ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αυξάνεται κατά 15-30% σε σχέση με τον αντίστοιχο του απεσταγμένου νερού. Η συγκέντρωση των σωματιδίων στο φέρον ρευστό δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά την αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από τις παραπάνω μετρήσεις και φαίνεται συγκριτικά για τις δυο συγκεντρώσεις νανορευστού που μελετήθηκαν στο **Σχήμα 5**.

Η αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας οδηγεί σε υψηλότερη απόδοση του εναλλάκτη, αφού στον ίδιο χρόνο μεταφέρεται μεγαλύτερο ποσό θερμότητας. Επιπλέον, ένας μ-εναλλάκτης χαρακτηρίζεται από μεγάλη επιφάνεια εναλλαγής, χαρακτηριστικό που ευνοεί την ταχεία μεταφορά θερμότητας. Συνδυάζοντας τα δυο παραπάνω, καταλήγουμε σε μια συσκευή εναλλαγής θερμότητας με σαφώς καλύτερα χαρακτηριστικά σε σχέση με τους συμβατικούς εναλλάκτες.



Σχήμα 5: Επίδραση συγκέντρωσης σωματιδίων SiO_2 στο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

Για να γίνει σαφής η βελτίωση της απόδοσης ενός συστήματος μεταφοράς θερμότητας όταν ένα συμβατικό ρευστό αντικατασταθεί από ένα νανορευστό, συγκρίνονται οι αποδόσεις των δύο ρευστών όταν η απαίτηση από τον εναλλάκτη είναι να μεταφερθεί η ίδια ποσότητα θερμότητας (**Σχήμα 6**).



Όταν π.χ. είναι επιθυμητή η απαγωγή 100 W θερμικής ενέργειας (**Σχήμα 6**, μαύρη συνεχής γραμμή), η απαιτούμενη ποσότητα νερού είναι 0.0175 kg/s ενώ στην περίπτωση χρήσης νανορευστού ως ψυκτικού μέσου η απαιτούμενη ποσότητα μειώνεται κατά περίπου 35% και φτάνει τα 0.0117 kg/s. Στη συνέχεια, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η θεωρητικά αναμενόμενη πτώση πίεσης για στρωτή ροή ρευστών σε κανάλι ορθογωνικής διατομής αντίστοιχων διαστάσεων ($f = 96/Re$) όταν ο αριθμός Re υπολογίζεται με τις ιδιότητες του νανορευστού SiO_2 1% v/v και η συνολική παροχή του ρευστού, για σταθερή απαίτηση θερμικής ενέργειας, υπολογίζεται από το **Σχήμα 6**. Συνοψίζοντας, με χρήση του προτεινόμενου νανορευστού αντί νερού στον μ -εναλλάκτη, για δεδομένη απαγωγή θερμικής ενέργειας, η απαιτούμενη ποσότητα ρευστού μειώνεται κατά 35% και η συνολική απαίτηση ενέργειας άντλησης μειώνεται κατά 15%.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη, αξιολογείται η χρήση νανορευστών SiO_2 σε μ -εναλλάκτες θερμότητας με στόχο τη βελτίωση της απόδοσής τους. Το νανορευστό της παρούσας εργασίας σταθεροποιήθηκε με επιτυχία για μεγάλο χρονικό διάστημα και σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις. Βασισμένοι σε οπτικές παρατηρήσεις, έπειτα από 25 μέρες διατήρησης του αιωρήματος σε ηρεμία, δεν σημειώθηκε σημαντική κατακάθιση των σωματιδίων.

Παρατηρήθηκε αύξηση στο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και τον αριθμό Nu η οποία φτάνει και το 30% για συγκέντρωση σωματιδίων SiO_2 1% v/v. Με μεταβολή της συγκέντρωσης των σωματιδίων στο ρευστό, δεν παρατηρήθηκε αξιόλογη μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για το υπό μελέτη εύρος συγκεντρώσεων.

Η παρούσα εργασία, η οποία αποτελεί μέρος διπλωματικής εργασίας^[17], αναμένεται να συνεισφέρει στην οικονομική αξιολόγηση της χρήσης νανορευστών SiO_2 σε εφαρμογές μεταφοράς θερμότητας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τον Καθηγητή κ. Σ.Β. Παρά (ΑΠΘ) για τα εποικοδομητικά του σχόλια και τους τεχνικούς του Τμήματος κ.κ. Α. Λέκκα και Τ. Τσιλιπύρα, για τη βοήθειά τους στην κατασκευή και λειτουργία της πειραματικής διάταξης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Pantzali, M.N., Mouza, A.A., Paras, S.V., 2009 Investigating the efficacy of nanofluids as coolants in plate heat exchangers (PHE). *Chemical Engineering Science* **64**:3290–300
- [2] Kamyar, A., Saidur, R., Hasanuzzaman, M., 2012 Heat transfer enhancement of nanofluids in a double pipe heat exchanger with louvered strip inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. **40**:36–46
- [3] Mohammed, H.A., Bhaskaran, G., Shuaib, N.H., Abu-Mulaweh, H.I., 2011 Influence of nanofluids on parallel flow square microchannel heat exchanger performance. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. **38**:1–9
- [4] Humnic, G., Humnic, A., 2012 Application of nanofluids in heat exchangers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **16**:5625–5638
- [5] Li, J., Kleinstreuer, C., 2008 Thermal performance of nanofluid flow in microchannels. *Heat and Flow Fluid*. **29**:1221–1232
- [6] Sarkar, J., 2011 A critical review on convective heat transfer correlations of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **15**:3271–3277
- [7] Sohel Murshed, S. M., Nieto de Castro, C. A., 2011 Forced Convective Heat Transfer of Nanofluids in Minichannels, Two Phase Flow, Phase Change and Numerical Modeling, InTech.
- [8] Yang, X.F., Liu, Z.H., Zhao, J., 2008 Heat transfer performance of a horizontal micro-grooved heat pipe using CuO nanofluid. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. **18**:035038

- [9] Pandey, S.D., Nema, V.K., 2012 Experimental analysis of heat transfer and friction factor of nanofluid as a coolant in a corrugated plate heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*. **38**:248–256
- [10] Akhavan-Behabadi, M.A., Fakoor Pakdaman, M., Ghazvini, M., 2012 Experimental investigation on the convective heat transfer of nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes under uniform wall temperature condition. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. **39**:556–564
- [12] Pantzali, M.N., Kanaris, A.G., Antoniadis, K.D., Mouza, A.A., Paras S.V., 2009 Effect of nanofluids on the performance of a miniature plate heat exchanger with modulated surface. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. **30**:691–699
- [13] Wengeler, R., Teleki, A., Vetter, M., Pratsinis, S.E., Nirschl, H., 2006 *High-pressure liquid dispersion and fragmentation of flame-made silica agglomerates*. *Langmuir* **22**:4928–4935
- [14] Anoop, K., Sadr, R., Yu, J., Kang, S., Jeon, S., Banerjee, D., Experimental study of forced convective heat transfer of nanofluids in a microchannel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. **39**:1325–1330 (2012)
- [15] Anoop, K., Sadr, R., nPIV velocity measurement of nanofluids in the near-wall region of a microchannel. *Nanoscale Research Letters*. **7**:284 (2012)
- [16] Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L. & Lavine, A. S.. Principles of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, Inc. (2012).
- [17] Μπαντή, Μ.Ε., Μελέτη μεταφοράς θερμότητας σε μ-εναλλάκτες με χρήση νανορευστών, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Α.Π.Θ. (2013).