

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΚΕΛΙΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Ι.Α. Στογιάννης, Α.Γ. Κανάρης, Σ.Β. Παράς

Εργαστήριο Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΑΠΘ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη συνεχώς αναπτυσσόμενη τεχνολογία των κελιών καυσίμων η διαχείριση θερμότητας είναι ένα από τα σημαντικά σημεία που χρήζουν ερευνητικής προσοχής, έχοντας ως στόχο τη βελτίωση της λειτουργίας τους και παράλληλα την αύξηση της συνολικής απόδοσης του κελιού καυσίμου. Στην παρούσα εργασία με απώτερο σκοπό τη μελέτη της αποτελεσματικής διαχείρισης της εκλυόμενης θερμότητας κατά τη λειτουργία ενός κελιού καυσίμου κατασκευάστηκε πειραματική διάταξη που προσομοιάζει επιτυχώς τη θερμική λειτουργία του. Οι πειραματικές μετρήσεις, σε συνδυασμό με έναν επιτυχώς αξιολογημένο κώδικα *CFD*, έδειξαν ανομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό ενός κελιού, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική μείωση της απόδοσής του. Παράλληλα, έδειξαν ότι είναι δυνατή η ανάκτηση σημαντικής ποσότητας της εκλυόμενης θερμότητας σε ικανοποιητικό θερμοκρασιακό επίπεδο για περαιτέρω αξιοποίησή της σε διάφορες εφαρμογές. Τέλος, έγινε προκαταρκτική προσπάθεια βελτίωσης της κατανομής της θερμοκρασίας με τη δημιουργία αυλακώσεων στην επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας και τα πρώτα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά για τη συνέχιση και ολοκλήρωση της προσπάθειας.

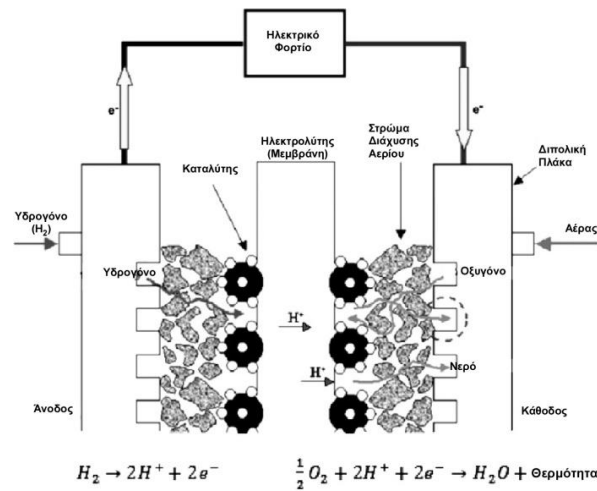
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παγκόσμια αγορά ενέργειας, επηρεασμένη κυρίως από τη συνεχή ανησυχία για την εξάντληση των αποθεμάτων των παραδοσιακών υδρογόνο-ανθρακικών καυσίμων, στρέφεται τα τελευταία χρόνια σε εναλλακτικές, καθαρές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας. Το υδρογόνο έχει αναδειχθεί από την επιστημονική κοινότητα ως ένας από τους σημαντικότερους ενεργειακούς φορείς, ικανό να παραχθεί από συμβατικές αλλά και ανανεώσιμες πηγές. Η χρήση κελιών καυσίμου (*fuel cells*) είναι ο συνήθης τρόπος μετατροπής της εσωτερικής ενέργειας του υδρογόνου σε ηλεκτρική και ειδικότερα οι κυψελίδες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης (*Polymer Exchange Membrane Fuel Cells – PEMFC*) μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε κινητές (*mobile*) όσο και μεσαίου μεγέθους σταθερές (*stationary*) εφαρμογές. Η λειτουργία ενός κελιού καυσίμου περιγράφεται συνοπτικά στο **Σχήμα 1**.

Η ερευνητική δραστηριότητα στην περιοχή των κελιών καυσίμων είναι ιδιαίτερα έντονη τις τελευταίες δυο δεκαετίες, ωστόσο έχει επικεντρωθεί κυρίως στη μελέτη των πολυμερικών μεμβρανών και των ηλεκτροχημικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό της κυψελίδας. Παρόλα αυτά υπάρχει ένα σημαντικό σύνολο τεχνικών προβλημάτων που είναι απαραίτητο να μελετηθούν και να επιλυθούν καταλλήλως πριν την ευρεία εμπορική χρησιμοποίηση των κελιών καυσίμων, ενώ έχει αναγνωριστεί ότι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα εφαρμογής είναι η διαχείριση θερμότητας σε συστοιχίες κελιών καυσίμων [1].

Η παραγωγή θερμότητας από ένα κελί καυσίμου οφείλεται στους παρακάτω παράγοντες:

- Η θεωρητική θερμοδυναμική απόδοση ενός ιδεατού κελιού δεν είναι 100%, με το υπόλοιπο της εσωτερικής ενέργειας του υδρογόνου να μετατρέπεται σε θερμότητα (*entropy losses*).
- Μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης λόγω ηλεκτροχημικών απωλειών, όπως απώλειες ενεργοποίησης των αντιδράσεων (*activation losses*) και μείωση της συγκέντρωσης των αντιδρώντων στα ηλεκτρόδια (*concentration losses*).
- Παραγωγή θερμότητας λόγω της ωμικής αντίστασης στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος από τα στοιχεία του κελιού καυσίμου (*ohmic losses*).



Σχήμα 1: Γραφική αναπαράσταση ενός κελιού καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης και των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του [1].

Τυπικά οι παραπάνω πηγές θερμότητας συνεισφέρουν στη συνολική εκλυόμενη θερμότητα στο 55%, 35% και 10% αντιστοίχως. Το άθροισμα της παραγόμενης θερμότητας είναι περίπου ίσο με την ηλεκτρική ισχύ του κελιού σε συνήθεις συνθήκες λειτουργίας [2]. Αυτό σημαίνει ότι σε ένα κελί καυσίμων για οικιακή χρήση το οποίο παράγει ισχύ της τάξεως των 5 kW υπάρχει η δυνατότητα ανάκτησης επιπλέον 5 kW θερμικής ενέργειας, μια ποσότητα που μπορεί να υπερκαλύψει τις ανάγκες μιας τυπικής κατοικίας [3]. Η ανάκτηση της θερμότητας προϋποθέτει χρήση ενός κυκλώματος ψύξης με ψυκτικό ρευστό αντί της αποβολής της θερμότητας στο περιβάλλον, όπως είναι ο τυπικός σχεδιασμός των κελιών καυσίμων μικρής και μεσαίας ισχύος έως σήμερα. Σημαντικό είναι να τονιστεί ότι τα θερμοκρασιακά όρια λειτουργίας ενός κελιού καυσίμου είναι 60-80 °C. Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός του κυκλώματος ψύξης είναι εξαιρετικά απαιτητικός λόγω της μικρής κινούσας δύναμης μεταξύ του ψυκτικού ρευστού και του κελιού καυσίμου και απαιτεί εναλλάκτες μικρού όγκου και υψηλής απόδοσης. Σε ερευνητικό ακόμα επίπεδο έχουν παρουσιαστεί διαφορετικά συστήματα αξιοποίησης της παραγόμενης θερμότητας, όπως η χρησιμοποίησή της για τη θέρμανση συσκευών αποθήκευσης υδρογόνου [4-5], για την παραγωγή θερμού νερού σε οικιακές εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [3, 6-7] καθώς και σε πιλοτικές μονάδες παραγωγής υδρογόνου και ηλεκτρικής ενέργειας.

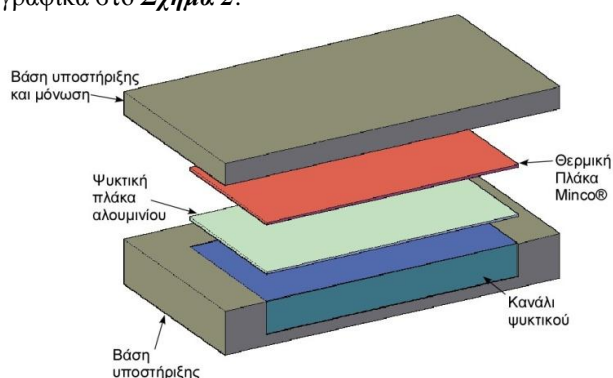
Μια ακόμα παράμετρος, που συχνά δεν λαμβάνεται ιδιαίτερα υπόψη, είναι η κατανομή θερμοκρασιών πάνω στην πολυμερική μεμβράνη, η οποία είναι εξαιρετικής σημασίας για τη διάρκεια ζωής και την απόδοσή της. Η κατανομή αυτή οφείλεται τόσο στη φύση της ηλεκτρο-

χημικής αντίδρασης - καθώς περισσότερη θερμότητα παράγεται στην κάθοδο - όσο και στην αδυναμία ομοιόμορφης απαγωγής της θερμότητας από τα κυκλώματα ψύξης. Οι ερευνητικές μελέτες που έχουν εξετάσει τις διαφορετικές γεωμετρίες ψυκτικών διατάξεων με πιθανές εφαρμογές στην ψύξη κελιών καυσίμων είναι περιορισμένες. Χρησιμοποιώντας υπολογιστικές μεθόδους έχουν μελετηθεί εφαρμογές μ -καναλιών στη διαμόρφωση της ψυκτικής πλάκας, [8] ενώ πειραματικά έχουν χρησιμοποιηθεί θερμογραφικές τεχνικές [9] αλλά μόνο σε αερόψυκτα κελιά καυσίμων.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται αρχικώς στη συνοπτική βιβλιογραφική ανασκόπηση των εργασιών που αφορούν τη διαχείριση θερμότητας σε κελιά καυσίμων. Στη συνέχεια περιγράφεται η λειτουργία της πειραματικής διάταξης που προσομοιάζει επιτυχώς τη θερμική συμπεριφορά ενός κελιού καυσίμου και επιτρέπει την αποτελεσματική ψύξη του με ψυκτικό ρευστό. Τα πειραματικά αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση μιας προκαταρκτικής υπολογιστικής μελέτης της ανάκτησης θερμότητας από κελιά καυσίμων, χρησιμοποιώντας κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (*Computational Fluid Dynamics, CFD*).

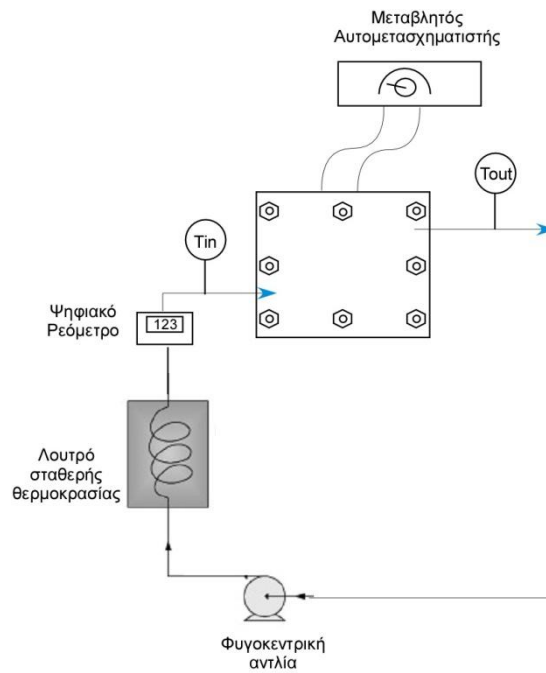
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Για τις ανάγκες του πειράματος κατασκευάστηκε διάταξη που προσομοιάζει τη γεωμετρία ενός κελιού καυσίμου και “μιμείται” τη θερμική συμπεριφορά της ηλεκτροχημικής αντίδρασης που λαμβάνει χώρα στην πολυμερική μεμβράνη του κελιού. Έτσι δίνεται η δυνατότητα να απομονωθεί η μεταφορά θερμότητας από τα υπόλοιπα πολύπλοκα φαινόμενα στο εσωτερικό ενός κελιού. Στη θέση της πολυμερικής μεμβράνης και των καταλυτικών στρωμάτων έχει τοποθετηθεί πολύ λεπτή θερμική πλάκα επιφάνειας 84.5 cm^2 , γνωστής ωμικής αντίστασης. Είναι έτσι εφικτό να μεταβληθεί η τάση στα άκρα της αντίστασης και αντιστοίχως η θερμική ροή που επιβάλλεται στο σύστημα από την “ιδεατή” πολυμερική μεμβράνη. Η μεταφορά θερμότητας από την θερμική πλάκα στο ψυκτικό γίνεται μέσω μιας πλάκας αλουμινίου πάχους 3 mm αντίστοιχης θερμικής αγωγιμότητας με τις μεταλλικές διπολικές πλάκες που χρησιμοποιούνται στις συστοιχίες κελιών καυσίμων. Χρησιμοποιώντας ένα θερμοπλαστικό υλικό (*Polyoxymethylene Acetal*) δημιουργήθηκε κανάλι πάχους 3 mm μέσα στο οποίο ρέει το ψυκτικό ρευστό βρισκόμενο σε επαφή με την πλάκα αλουμινίου. Η υπόλοιπη διάταξη, με γεωμετρία και διάταξη όμοια μιας συστοιχίας κελιών καυσίμων (*fuel cell stack*) κατασκευάστηκε από το ίδιο θερμοπλαστικό υλικό για εύκολη καταργασία και μείωση των απωλειών θερμότητας και παρουσιάζεται γραφικά στο **Σχήμα 2**.



Σχήμα 2: Γραφική απεικόνιση της πειραματικής συσκευής προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς ενός κελιού καυσίμου και αποτελεσματικής ψύξης του.

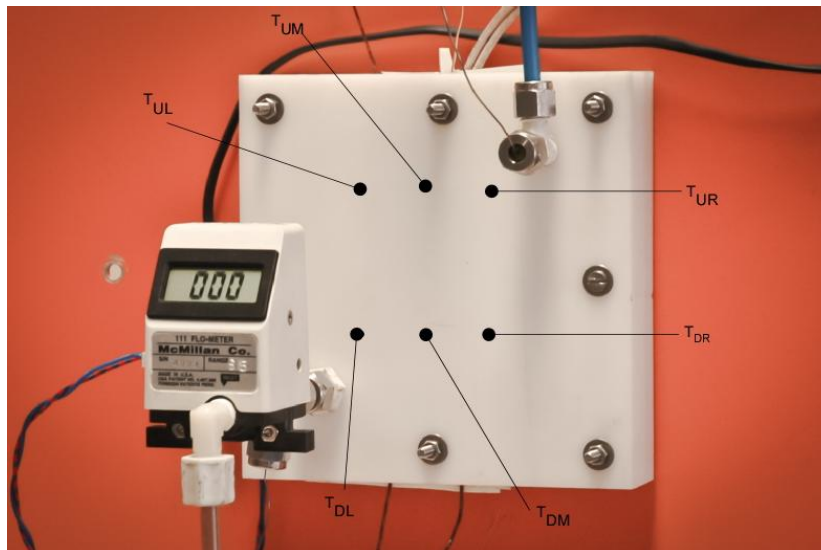
Η κυκλοφορία του ψυκτικού επιτυγχάνεται μέσω ενός θερμολουτρού (*Neslab RTE-221*) με κυκλοφορητή το οποίο επιτρέπει τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του τροφοδοτούμενου ψυκτικού με ακρίβεια $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Το λουτρό γεμίζεται με νερό ύδρευσης που χρησιμοποιείται ως ψυκτικό ρευστό του πειράματος. Η παροχή του νερού μεταβάλλεται με χρήση βάννας υψηλής ακρίβειας και μετράται με χρήση ενός ηλεκτρο-οπτικού ροόμετρου (*McMillan, S-111*). Το διάγραμμα ροής που περιλαμβάνει το κύκλο του ψυκτικού ρευστού και την τροφοδοσία της θερμαντικής πλάκας φαίνονται στο **Σχήμα 3**.



Σχήμα 3: Σχηματική αναπαράσταση του κυκλώματος ψύξης της θερμαντικής πλάκας.

Οι μετρήσεις θερμοκρασίας λαμβάνονται με ειδικά θερμοστοιχεία επιφανείας (*Surface Mount CO1*) τύπου *K* (*Omega[®]*) τοποθετημένα σε έξι σημεία πάνω στην πλάκα του αλουμινίου. Επίσης, με χρήση ενός θερμοστοιχείου τύπου *K* γίνεται μέτρηση της θερμοκρασίας του ψυκτικού ρευστού στο ρεύμα εξόδου. Τα θερμοστοιχεία, των οποίων η ακρίβεια έχει εκτιμηθεί στους $\pm 0.2\text{ K}$, συνδέονται μέσω ενός μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (*A/D converter*) (*Advantech[®], PCI-1710HG*) σε έναν Η/Υ για καταγραφή των αποτελεσμάτων. Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης εγκατεστημένης σε κάθετη θέση και με σημειωμένες τις θέσεις των θερμοστοιχείων επιφανείας φαίνεται στο **Σχήμα 4**.

Πριν τη διεξαγωγή κάθε πειράματος, η ροή του ψυκτικού ρυθμιζόταν στην επιθυμητή τιμή και εφαρμοζόταν τάση στη θερμαντική πλάκα. Στη συνέχεια οι τιμές της θερμοκρασίας καταγράφονταν στον Η/Υ ενώ το σύστημα θεωρούνταν σε μόνιμη κατάσταση όταν για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των 5 min δεν υπήρχε διακύμανση της θερμοκρασίας μεγαλύτερη των 0.2 K . Τα πειράματα διεξήχθησαν για ένα εύρος παροχών ψυκτικού από $100\text{-}250\text{ ml/min}$.



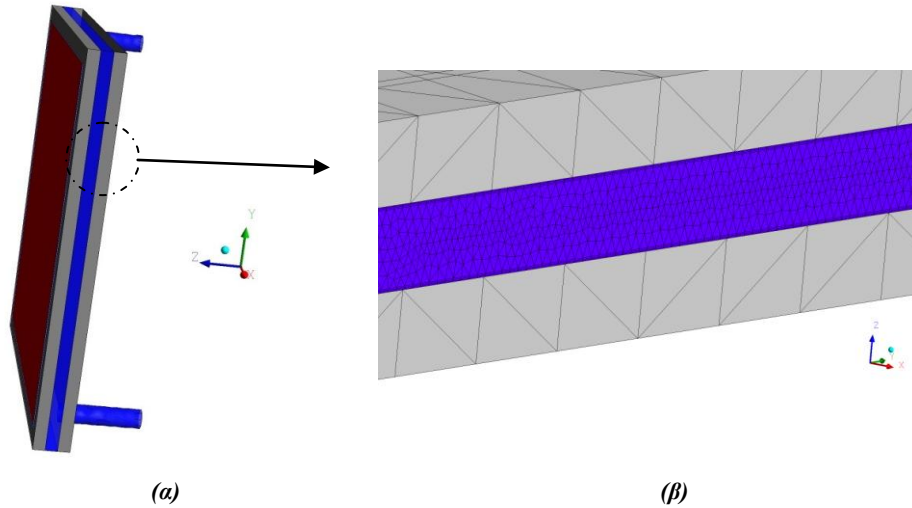
Σχήμα 4: Φωτογραφία της κυρίας πειραματικής διάταξης. Διακρίνεται η σύνδεση της αντίστασης με τον μεταβλητό αυτό-μετασχηματιστή. Σημειώνονται οι θέσεις των θερμοστοιχείων.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Για την προσομοίωση της ψύξης μιας σταθερής πηγής θερμότητας σε γεωμετρία αντίστοιχη της πειραματικής διάταξης που κατασκευάστηκε χρησιμοποιήθηκε κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (*ANSYS CFX 12.1*). Η ροή εισόδου του ψυκτικού θεωρήθηκε πλήρως ανεπτυγμένη (*fully developed flow*), ενώ ως οριακή συνθήκη για τα τοιχώματα χρησιμοποιήθηκε η συνθήκη της μη-ολίσθησης (*no-slip condition*). Καθώς στις υπό μελέτη παροχές ψυκτικού ο αριθμός *Reynolds*, *Re*, δεν υπερέβαινε ποτέ το 100, για την προσομοίωση της ροής εφαρμόστηκε απευθείας αριθμητική προσομοίωση (*Direct Numerical Simulation, DNS*).

Το υπολογιστικό πλέγμα (*computational grid*), το οποίο κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας τις παραμετρικές δυνατότητες του *ANSYS Workbench*, αποτελείται από τρία διακριτά υπολογιστικά πεδία (*computational domains*): ένα για την προσομοίωση της ροής του ψυκτικού, ένα για τα στερεά μέρη της γεωμετρίας και ένα που προσομοιάζει τη θερμαντική πλάκα. Γραφική αναπαράσταση της υπό μελέτης γεωμετρίας όπως επίσης και η πυκνότητα του υπολογιστικού πλέγματος, παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5**.

Η χρήση διαφορετικών πεδίων επιτρέπει την παραμετρική κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος, όπως επίσης και τον ορισμό κατάλληλων μηχανικών και θερμοφυσικών ιδιοτήτων, ανάλογα με τις απαιτήσεις της προσομοίωσης. Για την επιλογή της πυκνότητας του υπολογιστικού πλέγματος γίνεται ανάλυση της εξάρτησης της λύσης από την πυκνότητά του (*grid dependence study*) η οποία παρουσιάζεται στον **Πίνακα 1**. Το πλέγμα που κατασκευάστηκε είναι μη-δομημένο (*unstructured grid*), χρησιμοποιεί τετραεδρικά στοιχεία και αποτελείται από περίπου 1,700,000 κελιά για την περιγραφή του πεδίου ροής του ψυκτικού και περίπου 15,000 κελιά για τα στερεά μέρη και τη θερμαντική πλάκα. Κοντά στα τοιχώματα έχουν χρησιμοποιηθεί εξαεδρικά κελιά για την καλύτερη προσομοίωση του πεδίου ροής και τον αρτιότερο υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας. Αντίστοιχες υπολογιστικές μελέτες, που έχουν γίνει στο ίδιο Εργαστήριο, έχουν δείξει την αποτελεσματικότητα του κώδικα στη μελέτη εναλλακτών θερμότητας [10], ακόμα και πολύ μικρών διαστάσεων [11].



Σχήμα 5: Απεικόνιση της γεωμετρίας που χρησιμοποιείται για την υπολογιστική προσομοίωση: με κόκκινο η θερμαντική πλάκα, μπλε το κανάλι του ψυκτικού ρευστού και γκρι οι βάσεις υποστήριξης. **α)** πλήρης προβολή, **β)** λεπτομέρεια του πλέγματος.

Πίνακας 1: Εξάρτηση των αποτελεσμάτων του *CFD* από τη πυκνότητα του υπολογιστικού πλέγματος.

Πυκνότητα πλέγματος τομέα ρευστού	Θερμοκρασία εξόδου ψυκτικού ($^{\circ}C$)	Πτώση πίεσης (Pa)
650,000	45.4	11
1,250,000	45.7	8
1,700,000	46.1	7
2,300,000	46.1	7

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στη θερμαντική πλάκα της πειραματικής διάταξης εφαρμόζεται κατάλληλη τάση με χρήση του μεταβλητού αυτο-μετασχηματιστή, ώστε η εφαρμοζόμενη θερμική ροή να είναι ίση με 0.5 W/cm^2 . Η παραγόμενη θερμότητα αντιστοιχεί σε ένα κελί καυσίμου ηλεκτρικής ισχύος 42 W , η οποία είναι μια τυπική ισχύς για κελιά καυσίμων που φέρουν πολυμερικές μεμβράνες αντιστοιχών διαστάσεων.

Αρχικά υπολογίζεται η συνολική θερμότητα που ανακτάται μέσω του ψυκτικού, Q , και ελέγχεται η αποτελεσματικότητα της διάταξης ως προς την ψύξη του κελιού καυσίμου, από το ισοζύγιο θερμότητας:

$$Q = mC_p\Delta T \quad (1)$$

όπου m είναι η μαζική παροχή του ψυκτικού, C_p η θερμοχωρητικότητα του νερού και ΔT η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των ρευμάτων εισόδου και εξόδου του νερού ψύξης.

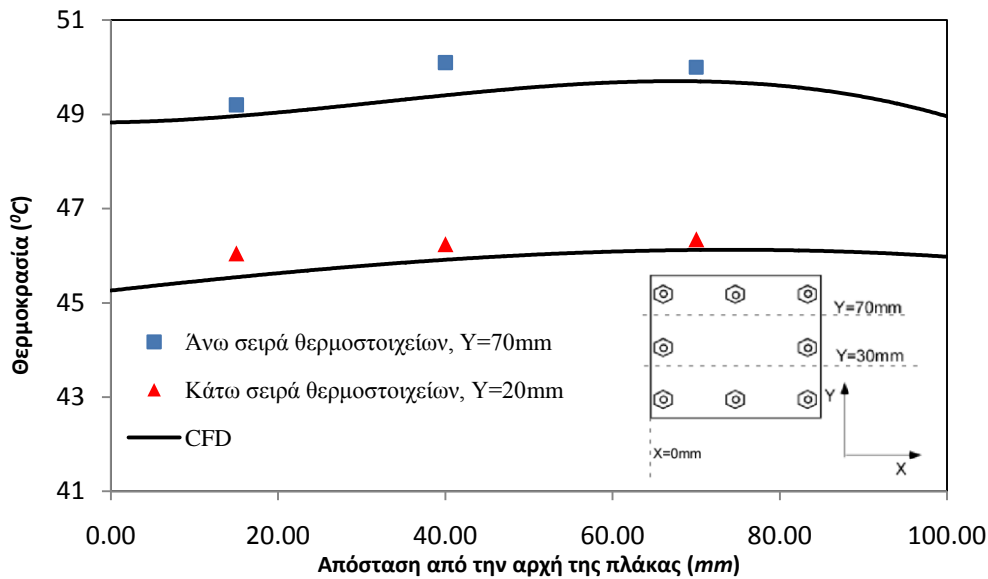
Είναι εμφανές από τον **Πίνακα 2** ότι είναι εφικτή η αποτελεσματική ψύξη της διάταξης με χρήση ενός ψυκτικού ρευστού όταν εφαρμόζεται θερμικό φορτίο αντίστοιχο ενός που συναντάται σε τυπικές συστοιχίες κελιών καυσίμων.

Πίνακας 2: Ανακτηθείσα θερμότητα μέσω του ψυκτικού για διαφορετικές παροχές νερού.

Μαζική παροχή ψυκτικού (ml/min)	Θερμοκρασία Εισόδου Ψυκτικού ($^{\circ}C$)	Θερμοκρασία Εξόδου Ψυκτικού ($^{\circ}C$)	Ποσοστό ανακτηθείσας θερμότητας
100	40.0	45.9	97.2 %
150	40.0	44.0	99.2 %
250	40.0	42.4	98.1 %

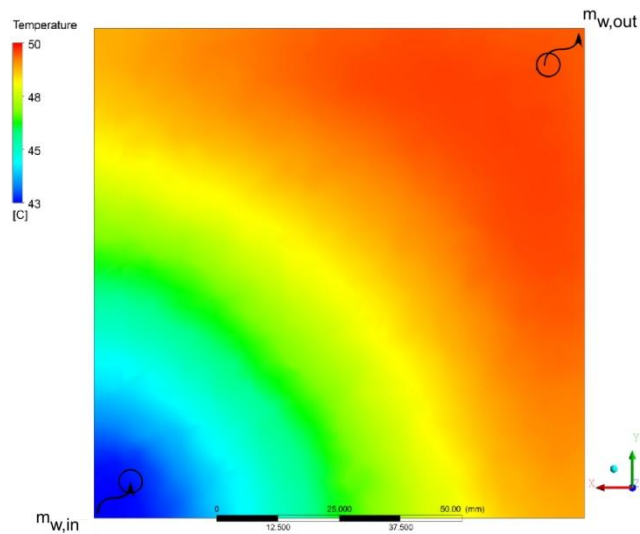
Οι τοπικές μετρήσεις θερμοκρασίας πάνω στη ψυκτική πλάκα έχουν διττό σκοπό· αφενός προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες για την ύπαρξη θερμών σημείων (*hot spots*) που μπορούν να οδηγήσουν σε αλλοίωση της πολυμερικής μεμβράνης και αφετέρου δίνουν αποτελέσματα που αξιοποιούνται για την αξιολόγηση και επικύρωση του κώδικα *CFD* που χρησιμοποιήθηκε παράλληλα.

Τα αποτελέσματα του κώδικα *CFD* είναι σε *πολύ καλή συμφωνία* με τα πειραματικά αποτελέσματα των τοπικών μετρήσεων θερμοκρασίας. Στο **Σχήμα 6** παρουσιάζεται μια τυπική σύγκριση των θερμοκρασιών για παροχή ψυκτικού 100 ml/min, μετρημένων από τα θερμοστοιχεία και των προβλέψεων των θερμοκρασιών από τον κώδικα *CFD*. Η θέση των θερμοστοιχείων έχει παρουσιαστεί στο **Σχήμα 4**.

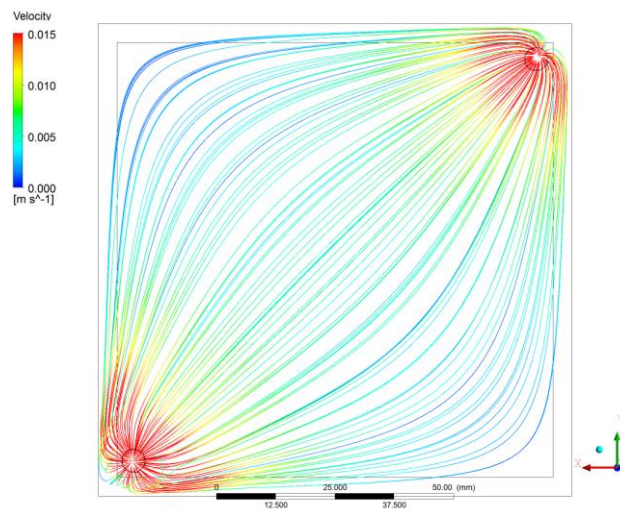


Σχήμα 6: Τοπικές μετρήσεις θερμοκρασίας στη μεμβράνη και σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα από το κώδικα *CFD*, για παροχή ψυκτικού 100 ml/min.

Μια τυπική κατανομή της θερμοκρασίας πάνω στην “ιδεατή” πολυμερική μεμβράνη φαίνεται στο **Σχήμα 7** και δείχνει την ανομοιομορφία στην ψύξη της μεμβράνης. Επίσης παρατηρείται ισχυρή εξάρτηση της εμφάνισης των θερμών σημείων στην επιφάνεια της πολυμερικής μεμβράνης με το πεδίο ροής της ταχύτητας. Ένα τυπικό πεδίο ροής του ψυκτικού στο εσωτερικό του καναλιού φαίνεται στο **Σχήμα 8**. Ανάλογη εξάρτηση της κατανομής θερμοκρασίας με το πεδίο ροής έχει προβλεφθεί και στους συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας με χρήση κώδικα *CFD* [12]. Με αύξηση της παροχής δεν παρατηρείται ουσιαστική βελτίωση της κατανομής θερμοκρασίας, καθώς δεν επηρεάζεται σημαντικά το πεδίο ροής του ψυκτικού.



Σχήμα 7: Κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της “ιδεατής” πολυμερικής μεμβράνης για παροχή ψυκτικού 100 ml/min.



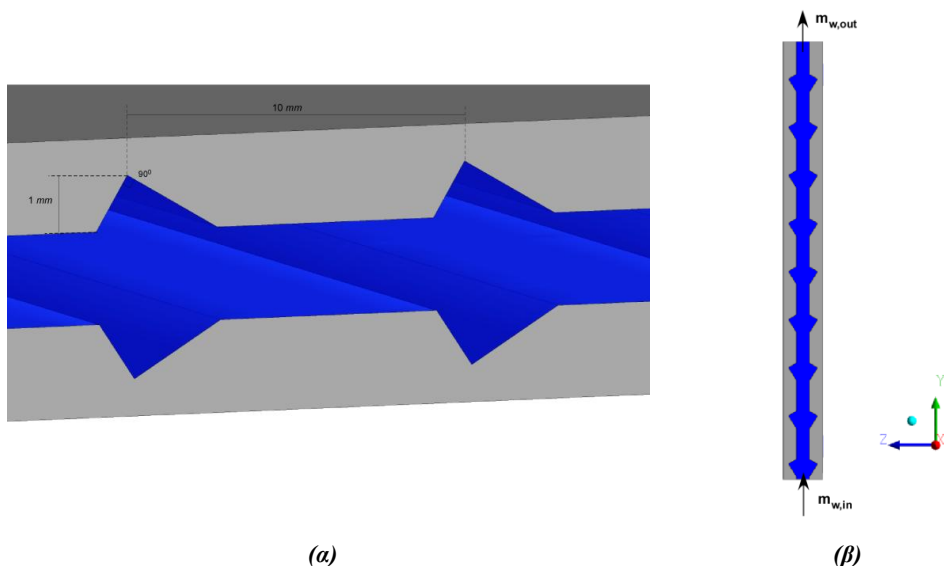
Σχήμα 8: Τυπικό πεδίο ροής στο εσωτερικό της ψυκτικής πλάκας. Διακρίνονται τα τυφλά σημεία στα δύο άκρα της πλάκας στα οποία το ψυκτικό ρέει με πολύ χαμηλές ταχύτητες.

Η προσπάθεια βελτίωσης της ψύξης στην υπό μελέτη διάταξη μπορεί να γίνει μέσω της τροποποίησης της επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας, δηλαδή της ψυκτικής πλάκας αλουμινίου της πειραματικής συσκευής. Σε αυτήν την περίπτωση, η ψυκτική πλάκα είναι δυνατό να υποστεί μηχανουργική κατεργασία ώστε να δημιουργηθούν στην επιφάνειά της αυλακώσεις με στόχο την αύξηση της επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας αλλά και την τροποποίηση του πεδίου ροής του ψυκτικού. Έχει αποδειχθεί ότι η εισαγωγή αυλακώσεων – και γενικά η δημιουργία

διαμόρφωσης – βελτιώνει την απόδοση των εναλλακτών θερμότητας και μεταβάλλει σημαντικά την κατανομή θερμοκρασιών στο εσωτερικό τους [10]. Ταυτόχρονα βέβαια αυξάνεται η πτώση πίεσης του ρευστού.

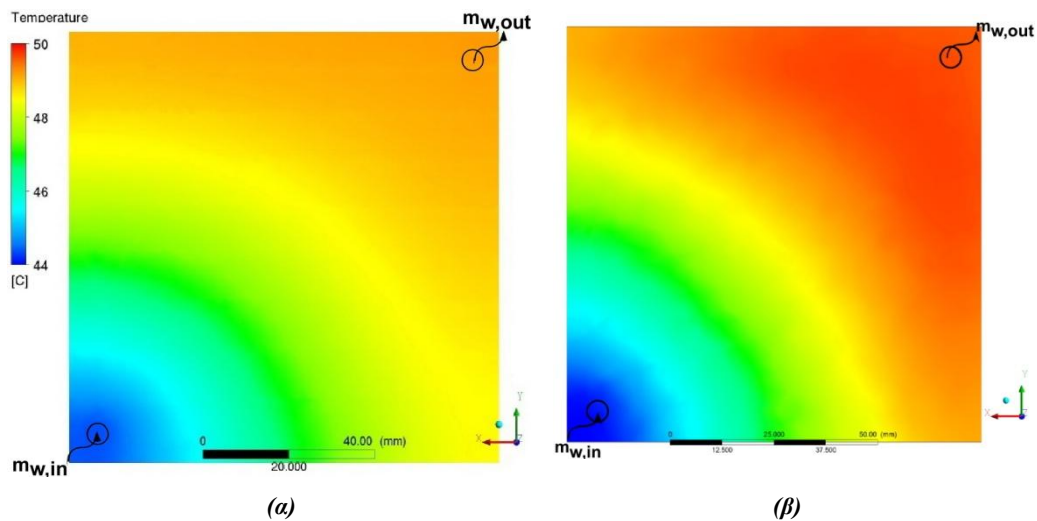
Τα αυλάκια που κατασκευάστηκαν έχουν τριγωνοειδή μορφή, με βάθος καναλιού 1 mm και απόσταση 10 mm μεταξύ κάθε διαμόρφωσης. Η σχηματική αναπαράσταση της υπό μελέτη γεωμετρίας φαίνεται στο **Σχήμα 9**. Όπως έχει παρουσιαστεί και σε άλλες εργασίες (π.χ. [13]) η εφαρμογή διαμόρφωσης μόνο στη μία επιφάνεια του καναλιού που ρέει το ρευστό δεν επηρεάζει σημαντικά το πεδίο ροής και κατά συνέπεια δεν βελτιώνει τη μεταφορά θερμότητας. Ως εκ τούτου, οι αυλακώσεις κατασκευάστηκαν και στις δυο πλευρές του καναλιού, με τελικό στόχο την ισχυρή τροποποίηση του πεδίου ροής.

Στόχος της δημιουργίας διαμόρφωσης είναι να μειώσει τις περιοχές εστίασης υψηλών θερμοκρασιών, κυρίως στο άνω αριστερό και κάτω δεξιό άκρο της μεμβράνης. Μια τυπική κατανομή θερμοκρασίας για ψυκτική πλάκα με αυλακώσεις παρουσιάζεται στο **Σχήμα 10** και συγκρίνεται με αυτή που έχει παρουσιαστεί στο **Σχήμα 7** για πλάκα χωρίς αυλακώσεις.



Σχήμα 9: α) Μερική άποψη της τροποποιημένης γεωμετρίας και των σημαντικών διαστάσεων των αυλακώσεων που έχουν δημιουργηθεί στην επιφάνεια των πλακών, β) ροή του ψυκτικού εντός της διαμορφωμένης γεωμετρίας

Η συνολική ανακτηθείσα θερμότητα από το ψυκτικό ρευστό παραμένει πρακτικά στα ίδια επίπεδα και για τις δύο περιπτώσεις. Η μέγιστη θερμοκρασία στην επιφάνεια της μεμβράνης για την περίπτωση της διαμορφωμένης πλάκας έχει μειωθεί περισσότερο από 1°C και η κατανομή της θερμοκρασίας είναι σχεδόν ομοιόμορφη στα $\frac{3}{4}$ της επιφάνειας. Όπως είναι επίσης εμφανές, υπάρχει σχετική βελτίωση της τοπικά μέγιστης θερμοκρασίας στο κάτω δεξιό άκρο της μεμβράνης. Παρόλα αυτά σημαντική ποσότητα ψυχρού ρεύματος εξακολουθεί να συγκεντρώνεται στην είσοδο του ψυκτικού μειώνοντας τοπικά τη θερμοκρασία, ενώ οι αυλακώσεις δεν επιτυγχάνουν αποτελεσματική κατανομή του ρευστού στο άνω κομμάτι της μεμβράνης.



Σχήμα 10: Κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της “ιδεατής” πολυμερικής μεμβράνης για *a)* ψυκτική πλάκα με τριγωνοειδείς αυλακώσεις και *β)* επίπεδη ψυκτική πλάκα, παροχή ψυκτικού 100 ml/min.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία, η οποία αποτελεί τμήμα ευρύτερης μελέτης με στόχο τη βέλτιστη διαχείριση της εκλυόμενης θερμότητας κατά τη λειτουργία συστοιχίας κελιών καυσίμου, κατασκευάστηκε πειραματική διάταξη που προσομοιάζει επιτυχώς τη θερμική συμπεριφορά ενός κελιού καυσίμου. Οι τοπικές μετρήσεις θερμοκρασίας πάνω στην “ιδεατή” πολυμερική μεμβράνη έδειξαν περιοχές εστίασης υψηλών θερμοκρασιών. Η παράλληλη υπολογιστική μελέτη, τα αποτελέσματα της οποίας επικυρώθηκαν ικανοποιητικά από τις πειραματικές μετρήσεις, έδειξε ότι η κατανομή θερμοκρασίας μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της απόδοσης του κελιού καυσίμου εξαιτίας της σταδιακής καταστροφής της μεμβράνης. Επίσης η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου του ψυκτικού ρευστού, που μπορεί να φτάσει τους περίπου 7 °C για χαμηλές παροχές του ψυκτικού, είναι σημαντική και μπορεί να βελτιώσει τη συνολική απόδοση μιας συστοιχίας κελιών καυσίμων με ανάκτηση της θερμότητας.

Στη συνέχεια έγινε προσπάθεια τροποποίησης του πεδίου ροής με δημιουργία αυλακώσεων στην επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας με στόχο την αποδοτικότερη μεταφοράς θερμότητας. Τα προκαταρκτικά αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει σχετική βελτίωση της κατανομής θερμότητας και μείωση των θερμών σημείων στην επιφάνεια της μεμβράνης, το οποίο όμως χρήζει περαιτέρω έρευνας. Η αναζήτηση της βέλτιστης γεωμετρίας της ψυκτικής πλάκας και των αυλακώσεων της επιφάνειάς της είναι αντικείμενο μελέτης που συνεχίζεται στο Εργαστήριο.

Ευχαριστίες: Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τους τεχνικούς του Τμήματος, κ.κ. Α. Λέκκα, Φ. Λαμπρόπουλο και Τ. Τσιλιπέρα για την κατασκευή και εγκατάσταση της πειραματικής διάταξης.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Kandlikar S.G. and Lu Z.J., Thermal management issues in a PEMFC stack - A brief review of current status, *Appl Therm Eng* **29**:7 (2009) pp.1276-1280.
- [2] O'Hayre R.P., Cha S.-W., Colella W.P., Prinz F.B., *Fuel cell fundamentals*, 2nd ed., Hoboken, NJ: J. Wiley & Sons, 2009.
- [3] Arsalis A., Nielsen M.P., Kær S.K., Modeling and off-design performance of a 1 kWe HT-PEMFC (high temperature-proton exchange membrane fuel cell)-based residential micro-CHP (combined-heat-and-power) system for Danish single-family households, *Energy* **36**:2 (2011) pp.993-1002.
- [4] Pfeifer P., Wall C., Jensen O., Hahn H., Fichtner M., Thermal coupling of a high temperature PEM fuel cell with a complex hydride tank, *Int J Hydrogen Energ* **34**:8 (2009) pp.3457-3466.
- [5] Forde T., Eriksen J., Pettersen A.G., Vie P.J.S., Ulleberg O., Thermal integration of a metal hydride storage unit and a PEM fuel cell stack, *Int J Hydrogen Energ* **34**:16 (2009) pp.6730-6739.
- [6] Hwang J.J. and Zou M.L., Development of a proton exchange membrane fuel cell cogeneration system, *J Power Sources* **195**:9 (2010) pp.2579-2585.
- [7] Hwang J.J., Zou M.L., Chang W.R., Su A., Weng F.B., Wu W., Implementation of a heat recovery unit in a proton exchange membrane fuel cell system, *Int J Hydrogen Energ* **35**:16 (2010) pp.8644-8653.
- [8] Lasbet Y., Auvity B., Castelain C., Peerhossaini H., Thermal and hydrodynamic performances of chaotic mini-channel: Application to the fuel cell cooling, *Heat Transfer Eng* **28**:8-9 (2007) pp.795-803.
- [9] Matian M., Marquis A., Brandon N.P., Application of thermal imaging to validate a heat transfer model for polymer electrolyte fuel cells, *Int J Hydrogen Energ* **35**:22 (2010) pp.12308-12316.
- [10] Kanaris A.G., Mouza A.A., Paras S.V., Flow and heat transfer prediction in a corrugated plate heat exchanger using CFD code, *Chem Eng Technol* **29**:8 (2006) pp.923-930.
- [11] Pantzali M.N., Kanaris A.G., Antoniadis K.D., Mouza A.A., Paras S.V., Effect of nanofluids on the performance of a miniature plate heat exchanger with modulated surface, *Int J Heat Fluid Fl* **30**:4 (2009) pp.691-699.
- [12] Kanaris A.G., Mouza A.A., Paras S.V., Optimal design of a plate heat exchanger with undulated surfaces, *Int J Therm Sci* **48**:6 (2009) pp.1184-1195.
- [13] Kanaris A.G., Mouza A.A., Paras S.V., Flow and heat transfer in narrow channels with corrugated walls - A CFD code application, *Chem Eng Res Des* **83**:A5 (2005) pp.460-468.