

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΕ ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΥΠΟΥ SOFC ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕΘΑΝΙΟΥ

Ε. Βακουφτσή¹, Γ. Μαρνέλλος^{1,2}, Κ. Αθανασίου², Φ.Α. Κουτελιέρης³

¹Τμήμα Μηχανικών Διαχείρισης Ενεργειακών Πόρων, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, 50100 Κοζάνη

²Ινστιτούτο Τεχνικής Χημικών Διεργασιών, Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης, 57001 Θεσσαλονίκη

³Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, 30100 Αγρίνιο

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετώνται τα κυριότερα φαινόμενα μεταφοράς που λαμβάνουν χώρα σε μια τρισδιάστατη κυψέλη καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη. Για τις ανάγκες της μαθηματικής προσομοίωσης υποτίθεται πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή και θεωρούνται οι εξισώσεις για τη μετάδοση θερμότητας, τη μεταφορά της μάζας των στοιχείων καθώς και του φορτίου τους (ηλεκτροχημεία), η αριθμητική επίλυση των οποίων επιτυγχάνεται με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου CFD-ACE. Η κυψέλη καυσίμου τροφοδοτείται με μείγμα μεθανίου και υδρατμών, όπου τόσο ομογενείς όσο και ετερογενείς αντιδράσεις λαμβάνονται υπόψη και πραγματοποιείται ο υπολογισμός των κλασμάτων μάζας των χημικών ειδών καθώς και η παραγόμενη ισχύς. Βρέθηκε ότι το μείγμα τροφοδοσίας διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, ενώ παρατηρήθηκε βελτίωση των ηλεκτροχημικών χαρακτηριστικών της κυψέλης καυσίμου με αύξηση της περιεκτικότητας της τροφοδοσίας σε μεθάνιο. Επιπλέον, η αύξηση του δυναμικού λειτουργίας μειώνει την κατανάλωση στην κυψέλη παράγοντας αντίστοιχα λιγότερο ρεύμα.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι κυψέλες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές διατάξεις, οι οποίες μετατρέπουν άμεσα τη χημική ενέργεια των καυσίμων σε ηλεκτρική, επιτυγχάνοντας υψηλές αποδόσεις επειδή υπερκαλύπτουν τους θερμοδυναμικούς περιορισμούς που διέπουν τις συμβατικές θερμικές μηχανές [1]. Η μαζική είσοδος των κυψελών καυσίμου στην αγορά ενέργειας δεν είναι ακόμα εφικτή αφ' ενός εξαιτίας του αυξημένου κόστους κατασκευής και λειτουργίας τους, και αφετέρου λόγω της περιορισμένης ευελιξίας στην επιλογή του καυσίμου.

Οι κυψέλες καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη (Solid Oxide Fuel Cell-SOFC) παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων τύπων κυψελών καυσίμου, κυρίως λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας τους (800-1200°C), η οποία επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στην επιλογή καυσίμου. Η πλειοψηφία των διαθέσιμων κυψελών καυσίμου χρησιμοποιεί ως καύσιμο το υδρογόνο, το οποίο δεν είναι εμπορικά διαθέσιμο, ενώ τόσο η μεταφορά όσο και η αποθήκευση του δεν είναι προς το παρόν επαρκώς ασφαλείς και οικονομικά εφικτές. Η χρήση εναλλακτικών επιλογών καυσίμου θα μπορούσε να λειτουργήσει θετικά στην εμπορική εκμετάλλευση των κυψελών καυσίμου σε βιομηχανική κλίμακα. Ως καταλληλότερη επιλογή θεωρείται το εμπορικά διαθέσιμο φυσικό αέριο (95% CH_4). Επιπλέον, τα SOFCs επιτρέπουν την εσωτερική αναμόρφωση του μεθανίου και την άμεση μετατροπή του σε υδρογόνο, μειώνοντας έτσι την πολυπλοκότητα της διεργασίας, αποφεύγοντας το επιπλέον κόστος προεπεξεργασίας του καυσίμου και γενικότερα συμβάλλοντας στην θερμική ολοκλήρωση και απόδοση της μονάδας [2-5].

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Τα κυριότερα φαινόμενα μεταφοράς που λαμβάνουν χώρα σε μια κυψέλη καυσίμου είναι η μεταφορά ορμής, η μετάδοση θερμότητας, καθώς και η μεταφορά μάζας και φορτίου. Αυτά μπορούν να περιγραφούν από τις μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις για την ροή, τη μετάδοση θερμότητας και τη μεταφορά της μάζας των στοιχείων (φορτισμένων ή μη). Η εξίσωση συνέχειας μπορεί να γραφεί ως:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \underline{U}) = 0 \quad (1)$$

όπου \underline{U} είναι το διάνυσμα της ταχύτητας, ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού και t είναι ο χρόνος.

Αγνοώντας τις βαρυτικές επιδράσεις, η εξίσωση διατήρησης της ορμής παίρνει τη μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \underline{U}) + \nabla \cdot (\rho \underline{U} \underline{U}) = -\nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau} \quad (2)$$

όπου P είναι η πίεση και $\bar{\tau}$ είναι ο τανυστής των τάσεων.

Επιπλέον, ο υπολογισμός της θερμοκρασίας μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της επίλυσης της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας, μη λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της ακτινοβολίας. Τότε, αυτή έχει τη μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot (\rho \underline{U} h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \frac{\partial P}{\partial t} + \dot{Q} \quad (3)$$

όπου h είναι η συνολική ενθαλπία του ρευστού, k είναι η αγωγιμότητα του μείγματος και \dot{Q} είναι οι επιπλέον θερμικές πηγές λόγω των ενδόθερμων ή εξώθερμων αντιδράσεων.

Η εξίσωση διατήρησης μάζας κάθε χημικού είδους λαμβάνει τη μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \underline{U} Y_i) = \nabla \cdot \underline{J}_i + \dot{\omega}_i \quad (4)$$

όπου Y_i είναι τα κλάσματα μάζας των χημικών ειδών, $\dot{\omega}_i$ είναι ο ρυθμός παραγωγής ή καταστροφής του i χημικού είδους λόγω των αντιδράσεων και \underline{J}_i είναι το διάνυσμα της μαζικής παροχής λόγω διάχυσης. Οι εξισώσεις που προαναφέρθηκαν εφαρμόζονται τόσο στις μη πορώδεις περιοχές όσο και στις πορώδεις λαμβάνοντας υπόψη το πορώδες και τη διαπερατότητα των υλικών.

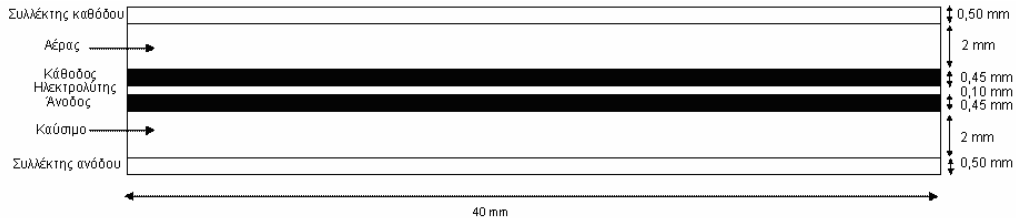
Η πυκνότητα του ρεύματος υπολογίζεται από την εξίσωση Butler-Volmer ως εξής:

$$j_T = \frac{j_0}{\prod_{i=1}^N [C_{i,ref}]^{a_k}} \left[\exp\left(\frac{a_a F}{RT} \eta\right) - \exp\left(-\frac{a_c F}{RT} \eta\right) \right] \prod_{i=1}^N [C_i]^{a_k} \quad (5)$$

όπου ο δείκτης k αφορά τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις μόνο, j_0 είναι η πυκνότητα του ρεύματος ανταλλαγής, a_a και a_c είναι ο ανοδικός και καθοδικός συντελεστής μεταφοράς φορτίου αντίστοιχα, $[C_i]$ είναι η μοριακή συγκέντρωση των χημικών ειδών πλησίον των στερεών τοιχωμάτων, $[C_{i,ref}]$ είναι η μοριακή συγκέντρωση στην κατάσταση αναφοράς στην είσοδο και a_k είναι ο εκθέτης που αφορά στις συγκεντρώσεις.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάται μια κυψέλη καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη τύπου SOFC επίπεδης γεωμετρίας. Η κυψέλη τροφοδοτείται με μείγματα μεθανίου και υδρατμών σε διάφορες αναλογίες (C:H>2), έτσι ώστε να αποφεύγεται ο σχηματισμός στερεού άνθρακα [6,7]. Αναλυτικότερα, η επίπεδη τρισδιάστατης γεωμετρίας κυψέλη αποτελείται από το στερεό ηλεκτρολύτη, ο οποίος συνδέεται με δύο πορώδη ηλεκτρόδια, την άνοδο και την κάθοδο, και περιβάλλεται περιφερειακά από τους συλλέκτες ρεύματος (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Γεωμετρία SOFC [8]

Ο στερεός ηλεκτρολύτης αποτελείται από το σταθεροποιημένο οξειδίο του Ζιρκονίου με οξειδίο του Υτρίου (YSZ) και διαχωρίζει τα δύο ηλεκτρόδια και αποτρέπει την ανάμιξη των αέριων ρευμάτων, του καυσίμου μείγματος που εισέρχεται στον αγωγό της ανόδου και του αέρα που εισέρχεται στον αγωγό της καθόδου. Το ηλεκτρόδιο της ανόδου και της καθόδου από κεραμο-μεταλλικό μίγμα Ni/YSZ (cermet) και το μεικτό οξειδίο τύπου περοβσκίτη (LaMnO₃), αντίστοιχα. Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των πορώδων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 που ακολουθεί.

Πίνακας 1. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά πορώδων υλικών.

	Άνοδος	Κάθοδος	Ηλεκτρολύτης
Πορώδες	0,40	0,50	0,01
Διαπερατότητα	$1e^{-12}$	$1e^{-12}$	$1e^{-18}$
Θερμική αγωγιμότητα	6,23	9,6	2,7
Ηλεκτρική αγωγιμότητα στερεού	100000	7700	$1e^{-20}$
Ηλεκτρική αγωγιμότητα πόρων	10	10	10

Το μείγμα μεθανίου και υδρατμών που εισέρχεται στην κυψέλη καυσίμου αντιδρά λόγω της αντίδρασης αναμόρφωσης του μεθανίου με ατμό προς σχηματισμό υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα σύμφωνα με την αντίδραση:



της οποίας η κινητική σε μορφή Arrhenius δίνεται ως [6]:

$$r_{SR} = 1,91 \times 10^8 T^2 \exp\left(-\frac{27063}{T}\right) [CH_4][H_2O] - 1,1 \times 10^{-7} T^4 \exp\left(-\frac{232,78}{T}\right) [H_2]^3 [CO] \quad (7)$$

Επιπλέον, γίνεται η υπόθεση ότι η αντίδραση μετατόπισης του υδραερίου βρίσκεται σε ισορροπία, οπότε:



και η κινητική της δίνεται από την έκφραση [6]:

$$r_{wGS} = 1199T^2 \exp\left(-\frac{12500}{T}\right)[H_2O][CO] - 1119T^2 \exp\left(-\frac{12500}{T}\right)[H_2][CO_2] \quad (9)$$

Τόσο το H_2 όσο και το CO οξειδώνονται ηλεκτροχημικά στο ηλεκτρόδιο της ανόδου σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



ενώ, τα απαραίτητα ιόντα οξυγόνου, O^{2-} , παράγονται στο ηλεκτρόδιο της καθόδου σύμφωνα με την αντίδραση:

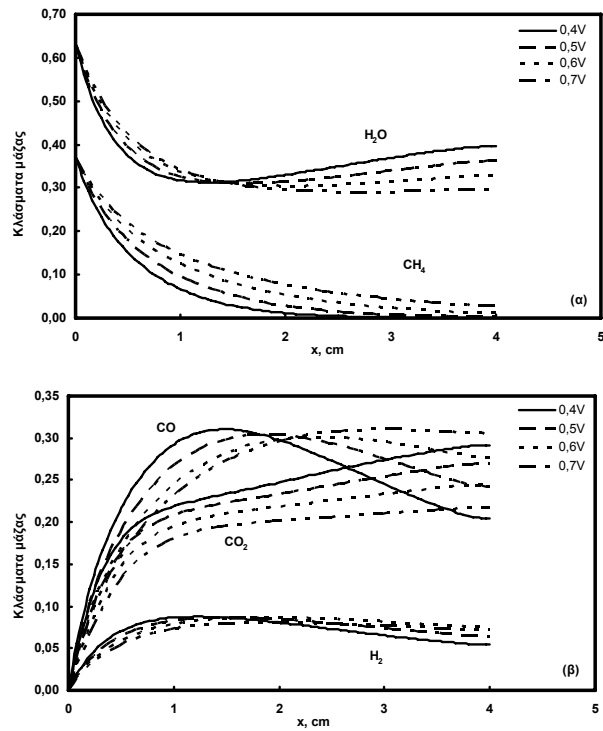


Για τις ανάγκες της προσομοίωσης, η παροχή του μείγματος ανόδου είναι σταθερή και ίση με $1,0 \times 10^{-7} \text{ kg/s}$, ενώ στον αγωγό καθόδου ο αέρας τυπικής σύστασης (23% κ.β. O_2 και 73% κ.β. N_2) εισέρχεται με $2,12 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$. Στην είσοδο και την έξοδο εφαρμόζεται πίεση 1 atm. Επιπλέον, θεωρήθηκε ότι το μείγμα αέρα και το μείγμα καυσίμου είναι ισοθερμοκρασιακά και προθερμαίνονται στους 1073K πριν εισέλθουν στην κυψέλη. Επιπρόσθετα, αναφορικά με τα ηλεκτροχημικά χαρακτηριστικά, η πυκνότητα του ρεύματος ανταλλαγής είναι ίση με 10^{11} και 10^{10} A/m^2 για το ηλεκτρόδιο της ανόδου και της καθόδου, αντίστοιχα, ενώ τόσο ο ανοδικός όσο και ο καθοδικός συντελεστής μεταφοράς φορτίου είναι ίσοι με 0,7. Η τρισδιάστατη κυψέλη διακριτοποιήθηκε στο χώρο σε δομημένο πλέγμα που αποτελείται από 33516 κελιά και οι μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις (1)-(5) μαζί με τις συνοριακές συνθήκες που προαναφέρθηκαν επιλύονται από το υπολογιστικό πακέτο CFD-ACE [9].

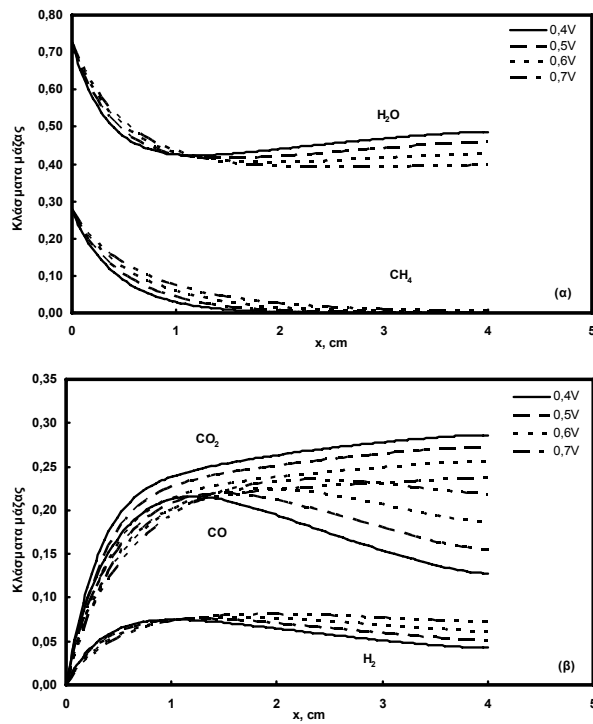
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Αρχικά, εξετάστηκε η επίδραση του μείγματος τροφοδοσίας στο παραγόμενο ρεύμα και την ισχύ της κυψέλης καυσίμου διατηρώντας τη θερμοκρασία εισόδου των αέριων ρευμάτων σταθερή στους 1073K. Χρησιμοποιηθήκαν δύο μείγματα τροφοδοσίας με περιεκτικότητες 37% κ.β. CH_4 και 63% κ.β. H_2O η πρώτη και 27% κ.β. CH_4 και 73% κ.β. H_2O , η δεύτερη.

Η κατανομή των διαφόρων χημικών ειδών κατά μήκος μιας γραμμής στο κέντρο του αγωγού της ανόδου απεικονίζεται στα Σχήματα 2 και 3. Αναφορικά με την πρώτη τροφοδοσία, στο Σχήμα 2 (α) παριστάνεται η κατανάλωση του CH_4 και του H_2O για διάφορες τιμές του δυναμικού λειτουργίας. Παρατηρείται ότι κοντά στην είσοδο της κυψέλης καυσίμου το CH_4 όσο και το H_2O καταναλώνονται με σχετικά γρήγορο ρυθμό για κάθε τιμή του δυναμικού λειτουργίας, λόγω της αντίδρασης ατμο-αναμόρφωσης του μεθανίου. Η ελάττωση του δυναμικού λειτουργίας οδηγεί σε αυξημένη κατανάλωση του CO και του H_2 , το οποίο συνεπάγεται την μετατόπιση της ισορροπίας της αντίδρασης αναμόρφωσης του μεθανίου με ατμό προς τα δεξιά και αύξηση της κατανάλωσης του μεθανίου. Αντίθετα, κοντά στην έξοδο παρόλο που το CH_4 εξακολουθεί να έχει παρόμοια κατανομή, το H_2O αυξάνει με τη μείωση του δυναμικού λειτουργίας, γεγονός το οποίο αποδίδεται στην επικράτηση των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Ο ισχυρισμός αυτός ενισχύεται από την κατανομή των κλασμάτων μάζας του H_2 και του CO όπως αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 2 (β), όπου ο ρυθμός παραγωγής των τελευταίων αρχίζει να γίνεται μικρότερος από το ρυθμό κατανάλωσης τους με τη μείωση του δυναμικού λειτουργίας. Αντίστοιχη κατανομή των κλασμάτων μάζας των χημικών ειδών παρατηρήθηκε και στην περίπτωση τροφοδοσίας 27% κ.β. CH_4 , όπως φαίνεται στα Σχήματα 3 (α) και (β). Είναι φανερό ότι λόγω της μικρότερης περιεκτικότητας της τροφοδοσίας σε μεθάνιο το τελευταίο καταναλώνεται γρηγορότερα.

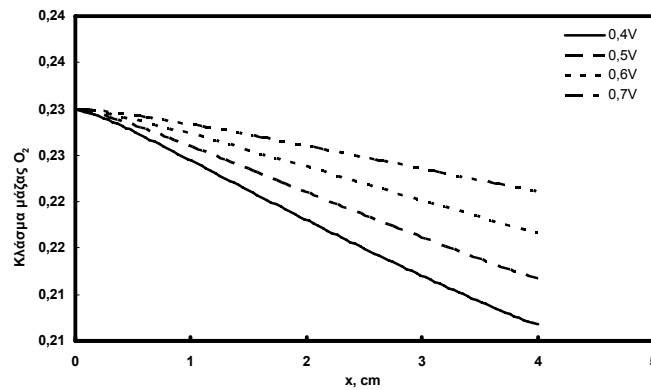


Σχήμα 2. Κατανομή κλασμάτων μάζας CH_4 και H_2O (α) και CO , CO_2 και H_2 (β) για τροφοδοσία 37% κ.β. CH_4 .

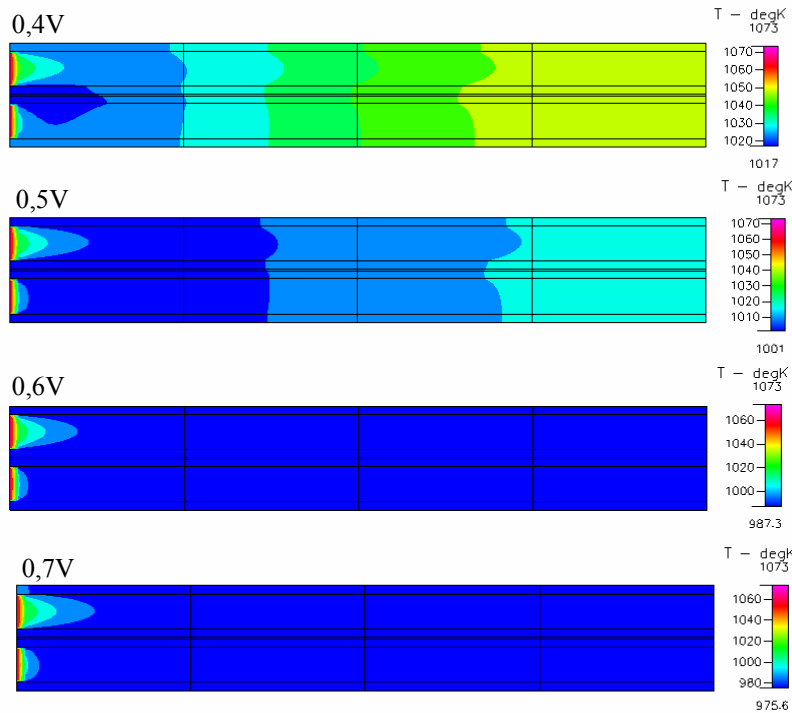


Σχήμα 3. Κατανομή κλασμάτων μάζας CH_4 και H_2O (α) και CO , CO_2 και H_2 (β) για τροφοδοσία 27% κ.β. CH_4 .

Η κατανάλωση του O_2 κατά μήκος μιας γραμμής στο κέντρο του αγωγού της καθόδου για τροφοδοσία 37% κ.β. CH_4 και για διάφορες τιμές του δυναμικού λειτουργίας, απεικονίζεται στο Σχήμα 4. Η κατανάλωση του O_2 , για κάθε δυναμικό λειτουργίας, ικανοποιώντας τις απαιτήσεις των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων είναι ανάλογη με την κατανάλωση των CO και H_2 και παρατηρείται σταδιακή μείωση του κλάσματος μάζας του, η οποία κορυφώνεται κοντά την έξοδο της κυψέλης καυσίμου. Ταυτόχρονα, η μείωση του δυναμικού λειτουργίας οδηγεί σε μεγαλύτερη κατανάλωση των CO και H_2 και συνεπώς σε μείωση της περιεκτικότητας του O_2 στον αγωγό καθόδου. Όπως είναι αναμενόμενο, μείωση της περιεκτικότητας του μείγματος σε μεθάνιο οδηγεί σε μειωμένη κατανάλωση O_2 .

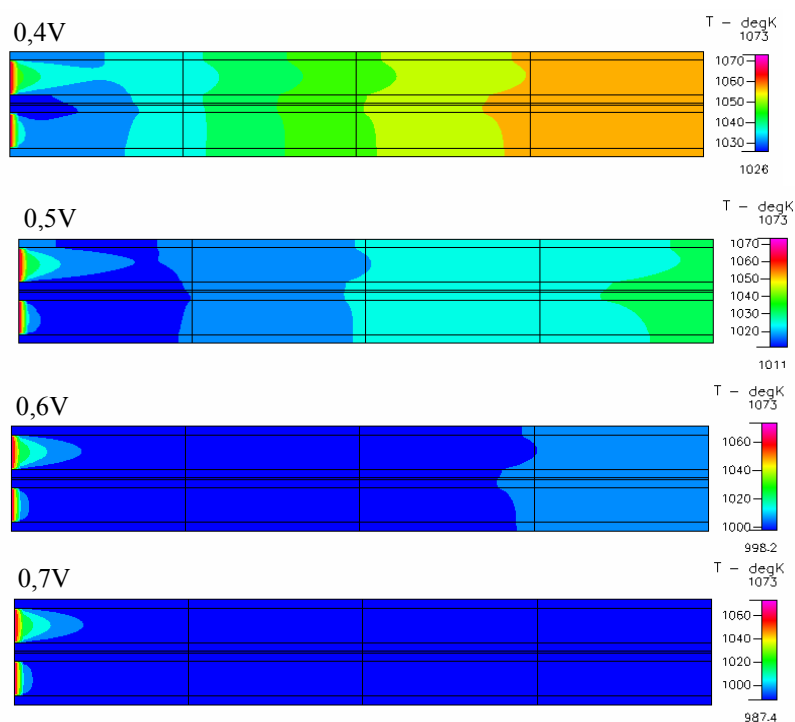


Σχήμα 4. Κατανομή κλάσματος μάζας O_2 .



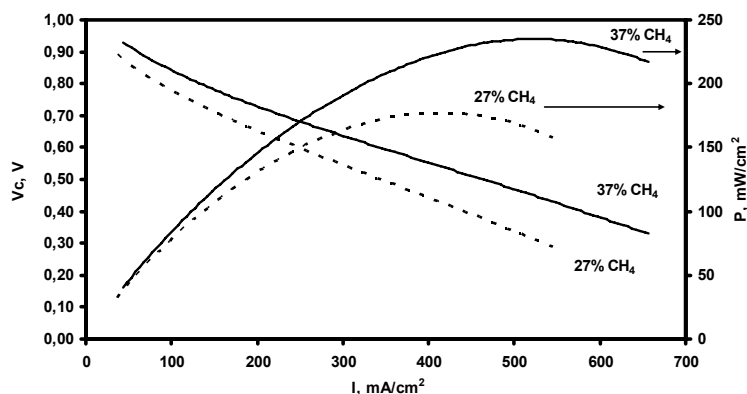
Σχήμα 5. Χωρικές κατανομές θερμοκρασίας για τροφοδοσία 37% κ.β. CH_4 .

Επιπλέον, οι χωρικές κατανομές της θερμοκρασίας σε μια τομή στη μέση της κυψέλης καυσίμου για τροφοδοσία 37% κ.β. CH_4 και για διάφορες τιμές του δυναμικού λειτουργίας της κυψέλης (0,4V, 0,5V, 0,6V, 0,7V) απεικονίζονται στο Σχήμα 5, ενώ οι αντίστοιχες κατανομές για τροφοδοσία 27% κ.β. CH_4 παρουσιάζονται στο Σχήμα 6. Σε κάθε περίπτωση, παρόλο που τα αέρια μείγματα προθερμαίνονται στους 1073K πριν εισέλθουν στην κυψέλη, η μέση θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης είναι σημαντικά χαμηλότερη εξαιτίας της ισχυρά ενδόθερμης αντίδρασης αναμόρφωσης του μεθανίου και σημειώνεται πτώση της θερμοκρασίας στα πρώτα εκατοστά κοντά στην είσοδο. Επιπλέον, για σταθερή τροφοδοσία, η μείωση του δυναμικού λειτουργίας συνεπάγεται τη μείωση της διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στην είσοδο και στην έξοδο της κυψέλης καυσίμου, διότι, καθώς μειώνεται το δυναμικό λειτουργίας, μεγαλύτερο ποσοστό των CO και H_2 (χρήση καυσίμου) συμμετέχει στις εξώθερμες ηλεκτροχημικές αντιδράσεις θερμαίνοντας περαιτέρω την κυψέλη καυσίμου. Παράλληλα, υπογραμμίζεται ότι με μείωση της περιεκτικότητας σε μεθάνιο μειώνεται και η έκταση της αντίδρασης αναμόρφωσης του μεθανίου με ατμό και κατά συνέπεια η κυψέλη καυσίμου ψύχεται ελαφρώς λιγότερο.



Σχήμα 6. Χωρικές κατανομές θερμοκρασίας για τροφοδοσία 27% κ.β. CH_4 .

Τέλος, στο Σχήμα 7 απεικονίζεται η μεταβολή του δυναμικού λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου και της παραγόμενης ισχύος συναρτήσει του ρεύματος για τις δύο τροφοδοσίες. Καθώς το ρεύμα αυξάνει, το δυναμικό λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου αποκλίνει από την λειτουργία ανοικτού κυκλώματος, λόγω ανάπτυξης υπερτάσεων. Ειδικότερα, παρατηρείται ότι για παραγωγή ρεύματος περίπου 550 mA/cm^2 , η πτώση τάσης για τροφοδοσία 37% κ.β. CH_4 είναι $0,6 \text{ V}$, ενώ για τροφοδοσία 27% CH_4 είναι $0,7 \text{ V}$, αν και η μείωση του δυναμικού ανοικτού κυκλώματος και για τα δύο μείγματα τροφοδοσίες είναι 40mV . Επιπλέον, αύξηση της περιεκτικότητας του μείγματος σε μεθάνιο οδηγεί σε αύξηση της ισχύος.



Σχήμα 7. Καμπύλες ρεύματος και ισχύος για τροφοδοσία μείγματος 27 % κ.β. και 37 % κ.β. CH_4 .

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν τα κυριότερα φαινόμενα μεταφοράς που λαμβάνουν χώρα σε μια κυψέλη καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη η οποία τροφοδοτείται με μείγμα μεθανίου και υδρατμών σε διαφορετικές αναλογίες. Διαπιστώθηκε πως η τροφοδοσία του μείγματος καυσίμου διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Ακόμη, σημειώνεται βελτίωση των ηλεκτροχημικών χαρακτηριστικών της κυψέλης καυσίμου όταν αυξάνεται η αναλογία του τροφοδοτούμενου μεθανίου. Επιπλέον, η αύξηση του δυναμικού λειτουργίας μειώνει την κατανάλωση των χημικών ειδών, γεγονός το οποίο συνεπάγεται μικρότερη παραγωγή ρεύματος. Σχετικά με την μετάδοση θερμότητας, παρατηρήθηκε πως η μικρή περιεκτικότητα της τροφοδοσίας σε μεθάνιο διατηρεί τη θερμοκρασία της κυψέλης σε υψηλά επίπεδα, αλλά η αυξημένη παραγωγή CO και H_2 σε τροφοδοσία με μεγάλη περιεκτικότητα σε μεθάνιο οδηγεί τελικά σε υψηλότερη παραγωγή ισχύος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Larminie J., Dicks A., Fuel cell systems explained, 2nd ed., Wiley (2003).
- [2]. Douvartzides S.L., Coutelieris F.A., Demin A.K. and Tsiakaras P.E.. Int. J. Hydrogen Energy **29**: 375 (2004).
- [3]. Lo Faro M., La Rosa D., Nicotera I., Antonucci V. and Arico A.S., Appl. Catal. B- Environ. (2008), In Press (Available online 24 November 2008).
- [4]. Bebelis S., Zeritis A., Tiropani C. and Neophytides S.G., Ind. Eng. Chem, Res. **39**: 4920 (2000).
- [5]. Aloui T. and Halouani K., Appl. Therm. Eng. **27**: 731 (2007).
- [6]. Klein J.-M., Bultel Y., Pons M. and Ozil P., J. Fuel Cell Tech. **7**: 425 (2007).
- [7]. Ahmed K and Foger K., Catal. Today. **63**: 47 (2000).
- [8]. Ramakrishna P.A., Yang S., Sohn C.H., J. Power Sources. **158**: 378 (2006).
- [9]. ESI-Group, CFD-RC, CFD-ACE+User Manual, Huntsville, USA (2008).