ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

"Μελέτη της λειτουργίας κυψελίδας καυσίμου πρωτονιακής μεμβράνης (PEM Fuel Cell)"

Φουσκαρής Μελέτιος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Α. Κατσαούνης

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Ι. Καραφύλλης, Ε. Ψυλλάκη

Χανιά 2008

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ 4
1.1 Περιγραφή κυψελίδων καυσίμου 4
1.2 Σύγκριση με την κλασσική στοιχειοθεσία μετατροπής ενέργειας 6
1.3 Θερμοδυναμική εξέταση των χημικών αντιδράσεων στις κυψελίδες καυσίμου 7
1.3.1 Σχέση ανάμεσα στο αντιστρεπτό δυναμικό και την ελεύθερη ενέργεια Gibbs – Απόδοση κυψελίδας καυσίμου 7
1.3.2 Εξάρτηση της ΗΕΔ κυψελίδας καυσίμου από τη θερμοκρασία 9
1.3.3 Εξάρτηση της ΗΕΔ κυψελίδας καυσίμου από τις ενεργότητες των ουσιών 10
1.4 Στάδια των αντιδράσεων μεταφοράς φορτίου και παράγοντες που τα επηρεάζουν 12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΥΠΟΙ ΚΥΨΕΛΙΔΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ 13
2.1 Εισαγωγή 13
2.2 Αλκαλικές Κυψελίδες Καυσίμου (Alkaline Fuel Cells, AFC) 14
2.3 Κυψέλιδα Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC) 15
2.4 Κυψελίδα Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) 16
2.5 Κυψελίδες Καυσίμου Στερεών Ηλεκτρολύτη (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) 18
2.6 Κυψελίδα Μεθανόλης (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC) 19
2.7 Κυψελίδα Καυσίμου με Τετηγμένα Ανθρακικά άλατα (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) 20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΥΨΕΛΙΔΑ ΜΕ ΜΕΒΡΑΝΗ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL, PEMFC) 21
3.1 Γενικά χαρακτηριστικά 21
3.2 Χαρακτηρισμός των επιμέρους τμημάτων μιας κυψελίδας PEM 22
3.2.1 Ηλεκτρόδια κυψελίδας PEM 22
3.2.2 Μεμβράνη κυψελίδας PEM 23
3.2.3 Μεταλλικές πλάκες 25
3.3 Μελέτη μιας κυψελίδας καυσίμου 26
3.4 Τεχνικές χαρακτηρισμού κυψελίδων καυσίμου 28
3.4.1 In Situ ηλεκτροχημικές τεχνικές χαρακτηρισμού 28
3.4.2 Ex Situ τεχνικές χαρακτηρισμού 29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ 30
4.1 Φιάλες και ροόμετρα μάζας 31
4.2 Κορεστής 32
4.3 Κυψελίδα μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων 32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ 34
5.1 Επίδραση της παροχής αέρα στην απόδοση της κυψελίδας 34
5.2 Επίδραση της παροχής καθαρού υδρογόνου (100% H_2) στην απόδοση της κυψελίδας 41
5.3 Επίδραση της παροχής υδρογόνου (περιεκτικότητας: 3% H_2) στην απόδοση της κυψελίδας 46
5.4 Επίδραση της μερικής πιέσεως του υδρογόνου στην απόδοση της κυψελίδας 51
5.5 Επίδραση της μερικής πιέσεως του οξυγόνου στην απόδοση της κυψελίδας 56
5.6 Επίδραση της υγρασίας στην απόδοση της κυψελίδας 61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 67
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 68

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι συμβατικές τεχνολογίες μετατροπής ενέργειας, δηλαδή οι μηχανές εσωτερικής καύσεως και τουρμπίνες, σε συνδυασμό με τη χρήση συμβατικών καυσίμων (λιγνίτης, πετρέλαιο, κ.α.), συμβάλουν στην επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με την παραγωγή των κυριότερων αέριων ρυπαντών όπως το μονοξείδιο του άνθρακα CO, τα οξείδια του αζώτου NO_x, οι υδρογονάνθρακες HC, τα οξείδια του θείου SO_x και τα αιωρούμενα στερεά. Επίσης, οι χαμηλές ενεργειακές αποδόσεις που παρουσιάζουν οι παραπάνω μηχανές συντελούν στην περαιτέρω υποβάθμιση του περιβάλλοντος και την ανεξέλεγκτη κατανάλωση φυσικών πόρων.

Η επιβαρημένη, λοιπόν, κατάσταση του περιβάλλοντος σε συνδυασμό με τις συνεχώς αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις, οδηγούν επιτακτικά στην ανάγκη εξεύρεσης νέων τρόπων παραγωγής ενέργειας περισσότερο φιλικές προς το περιβάλλον. Προς την κατεύθυνση αυτή, οι κυψελίδες καυσίμου αποτελούν διατάξεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ιδιαίτερα φιλικές προς το περιβάλλον.

Οι κυψελίδες καυσίμου έχουν περιορισμένες έως μηδενικές εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα και μεγάλη ενεργειακή απόδοση, η οποία μπορεί να φτάσει σε ποσοστό μέχρι και 70%, δηλαδή υπερδιπλάσιο σε σχέση με την απόδοση των συμβατικών τεχνολογιών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τη μελέτη και λειτουργία μιας κυψελίδας μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC). Στα πειράματα που διενεργήθηκαν χρησιμοποιήθηκε ως καύσιμο υδρογόνο, το οποίο οξειδώνεται ηλεκτροχημικά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ το προϊόν της οξείδωσης είναι το νερό.

Τα πειράματα αφορούσαν την απόδοση της κυψελίδας και τη συμπεριφορά της στις διάφορες μεταβολές στην παροχή του καυσίμου, στην παροχή του οξυγόνου, στην περιεκτικότητα του καυσίμου, στη μερική πίεση του υδρογόνου και του οξυγόνου και στη θερμοκρασία της κυψελίδας και του κορεστή. Τέλος, από τις πειραματικές μετρήσεις κατασκευάστηκαν διαγράμματα, βάσει των οποίων παρουσιάζεται γραφικά η λειτουργία και η απόδοση της κυψελίδας καυσίμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

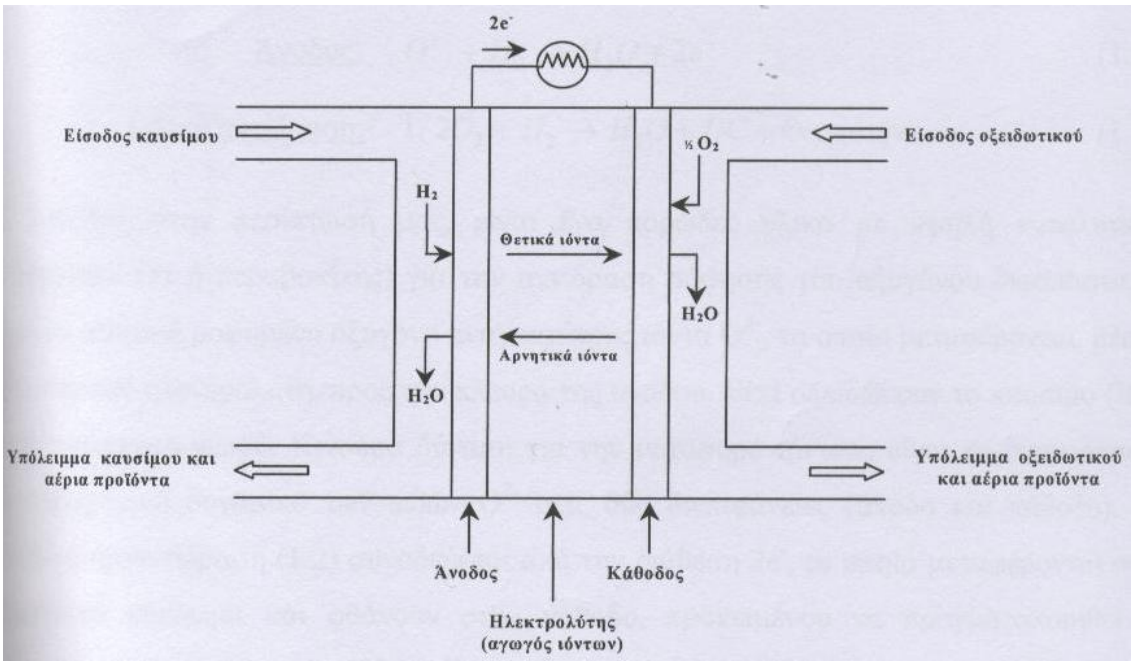
1.1 Περιγραφή κυψελίδων καυσίμου

Οι κυψελίδες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές διατάξεις αποτελούμενες από δύο ηλεκτρόδια και ένα ηλεκτρολύτη, οι οποίες μπορούν να μετατρέψουν τη χημική ενέργεια μιας αντίδρασης απευθείας σε ηλεκτρική και ένα μικρό ποσοστό της σε θερμότητα.

Το ένα ηλεκτρόδιο αποτελεί την άνοδο του συστήματος και τροφοδοτείται συνεχώς με αναγωγικό υλικό (καύσιμο), ενώ το άλλο ηλεκτρόδιο αποτελεί την κάθοδο όπου τροφοδοτείται συνεχώς με οξειδωτικό. Τα καύσιμα που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι αέρια (H_2, CO, φυσικό αέριο), ενώ το πιο διαδεδομένο οξειδωτικό είναι το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα.

Ο ηλεκτρολύτης μπορεί να είναι ένα υγρό ή ένα στερεό και εκτός του ότι λειτουργεί ως μια ιοντική γέφυρα μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων από πρακτική άποψη διαδραματίζει και το ρόλο του διαχωριστή των αντιδρώντων στα δύο μέρη της κυψελίδας μονώνοντας ηλεκτρονιακά την άνοδο από την κάθοδο.

Τα ηλεκτρόδια μπορεί να είναι μέταλλα, οξείδια μετάλλων, με ή χωρίς ντοπάρισμα, έτσι ώστε να αποτελούν έναν άριστο καταλύτη για τις αντιδράσεις μεταφοράς φορτίου. Θα πρέπει επομένως, να είναι πολύ καλοί ιοντικοί και ηλεκτρονιακοί αγωγοί. Οι ηλεκτροκαταλύτες αυτοί πρέπει να παρέχουν τις απαραίτητες ενεργές-επιφανειακές θέσεις σε μικρό ολικό όγκο για την επιτέλεση των αντιδράσεων μεταφοράς φορτίου σε μεγάλα ρεύματα. Γι αυτό το λόγο τα μεταλλικά ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι πολύ πορώδη. Επίσης στα ηλεκτρόδια αυτά πρέπει να έχουμε μικρό σχετικά πάχος στις στοιβάδες διάχυσης για να έχουμε όσο το δυνατό μικρότερη αντίσταση. Τέλος, τα ηλεκτρόδια πρέπει να μονώνουν φυσικά τον ηλεκτρολύτη εμποδίζοντας το κύριο σώμα του ρεύματος τροφοδοσίας να έρθει σε άμεση επαφή μαζί του.



Σχήμα 1: Τυπική αναπαράσταση μιας κυψελίδας καυσίμου (Fuel Cell) [1]

Όπως βλέπουμε στο παραπάνω σχήμα η άνοδος έχει συνδεθεί με την κάθοδο με ένα εξωτερικό φορτίο αντίστασης, έτσι ώστε το κύκλωμα να είναι κλειστό και να έχουμε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με τις αντιδράσεις μεταφοράς φορτίου που λαμβάνουν χώρα στο καθοδικό και ανοδικό μέρος μιας κυψελίδας και έχουν την ακόλουθη μορφή (π.χ. για κυψελίδα πρωτονιακής μεμβράνης):

Κάθοδος: $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ (1)

Άνοδος: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ (2)

Συνολική αντίδραση: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$ (3)

Για την περίπτωση των PEM η άνοδος πρέπει να είναι ένα πορώδες υλικό με υψηλή καταλυτική ενεργότητα για την αντίδραση ρόφησης του υδρογόνου διασπαστικά. Εκεί το ατομικά ροφημένο υδρογόνο οξειδώνεται προς ιόντα H^+, τα οποία μεταφέρονται αυθόρμητα, μέσω του στερεού ηλεκτρολύτη, στην κάθοδο και ανάγουν το οξειδωτικό, με αποτέλεσμα την παραγωγή νερού. Κινούσα δύναμη για την μεταφορά των ιόντων H^+ είναι το διαφορετικό ηλεκτροχημικό δυναμικό του H^+ στις δύο διεπιφάνειες (καθοδική και ανοδική).

Η ανοδική ημιαντίδραση συνοδεύεται από την διάθεση $2e^-$, τα οποία μεταφέρονται στο εξωτερικό κύκλωμα και φτάνουν στην κάθοδο, προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο επόμενος κύκλος του ηλεκτρονιακού φορτίου.

Έτσι, στη διαχωριστική επιφάνεια της ανόδου, τα ηλεκτρόνια που προκύπτουν έχουν την ίδια διεύθυνση (προς την πλευρά της καθόδου), οπότε η κατευθυνόμενη αυτή ροή έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, επειδή η κυψελίδα δεν λειτουργεί κάτω από ιδανικές συνθήκες θα έχουμε και την παραγωγή ενός μικρού ποσού θερμότητας που οφείλεται σε θερμότητα Joule προερχόμενη από την εσωτερική αντίσταση του κελιού (R_i).

Αναλυτικότερα στοιχεία για τη λειτουργία και τα επιμέρους χαρακτηριστικά των κυψελίδων καυσίμου τύπου PEM δίνονται στο κεφάλαιο 3.

1.2 Σύγκριση με την κλασσική στοιχειοθεσία μετατροπής ενέργειας

Όπως έχει ειπωθεί παραπάνω, οι κυψελίδες καυσίμου είναι διατάξεις που μετατρέπουν την ενέργεια της αντίδρασης του καυσίμου και του οξειδωτικού απευθείας σε ηλεκτρική, χωρίς την ενδιάμεση παραγωγή θερμότητας. Στις συμβατικές τεχνολογίες μετατροπής ενέργειας έχουμε αρχικά καύση του καυσίμου με O_2, η οποία θα αποδώσει την χημική ενέργεια υπό μορφή θερμότητας. Κατόπιν η ενέργεια αυτή μετατρέπεται σε μηχανική με την χρήση θερμικών μηχανών και τέλος σε ηλεκτρική με τη χρήση γεννητριών.

Σημειωτέον, ότι μια τέτοια μετατροπή υπόκειται σε περιορισμούς απόδοσης τύπου Carnot που καθορίζονται από την διαφορά T_1-T_2 μεταξύ της διαθέσιμης θερμής και ψυχρής δεξαμενής, σύμφωνα με την σχέση:

$\varepsilon = (T_1-T_2)/T_1$, όπου ε: απόδοση της θερμικής μηχανής

Οι περιορισμοί αυτοί υποβαθμίζουν την απόδοση μετατροπής της θερμότητας σε μηχανικό έργο σε ένα επίπεδο του 20-40%. Εάν μάλιστα συνυπολογίσουμε και της απώλειες (10-20%) των γεννητριών για την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική τότε μια κλασσική στοιχειοθεσία μετατροπής της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική θα περιορίζεται τελικώς σε αποδόσεις του 15-30% συνήθως.

Οι κυψελίδες καυσίμου δεν υπόκεινται σε περιορισμούς Carnot (δεν υπάρχουν κρούσεις μορίων, παρά μόνο μεταφορά ηλεκτρονίων) και μπορούν να λειτουργήσουν θεωρητικά σε επίπεδα αποδόσεων άνω του 70%.

1.3 Θερμοδυναμική εξέταση των χημικών αντιδράσεων στις κυψελίδες καυσίμου

1.3.1 Σχέση ανάμεσα στο αντιστρεπτό δυναμικό και την ελεύθερη ενέργεια Gibbs – Απόδοση κυψελίδας καυσίμου

Για να βρούμε την απόδοση μιας ηλεκτροχημικής μετατροπής της ενέργειας ορισμένης χημικής αντιδράσεως σε ηλεκτρική ενέργεια, ξεκινούμε από τη γνωστή θερμοδυναμική σχέση:

$$-\Delta G = (Wrev - P\Delta V)$$

σύμφωνα με την οποία: η ελάττωση της ελεύθερης ενέργειας Gibbs σε μια αντίδραση είναι ίση με το αντιστρεπτό ολικό έργο μείον το έργο διαστολής του συστήματος [2].
Στην παραπάνω περίπτωση κυψελίδας δεν υπάρχει έργο διαστολής, οπότε έχουμε:

$$-\Delta G = Wrev$$

όπου Wrev το συνολικό έργο που παράγεται από την επιτέλεση της αντίδρασης (3).

Εφόσον όμως η αντίδραση (3) επιτελείται μέσω των ημι-αντιδράσεων (1) και (2) που συνοδεύονται από μετακίνηση ηλεκτρικών φορτίων σε ένα πεδίο δυναμικού Vrev (Vrev είναι το αντιστρεπτό δυναμικό), θα έχουμε παραγωγή ηλεκτρικού έργου ίσου με:

$$-Wel = nFVrev$$

όπου n το φορτίο του ιόντος (αριθμός μεταφερόμενων e^- ανά κύκλο) και F η σταθερά Faraday (F = 96500 Cb/mol).

Θεωρώντας ότι αυτό είναι το μοναδικό έργο που παράγεται από την κυψελίδα και ότι έχουμε συνθήκες αντιστρεπτότητας, τότε έχουμε:

$$Wrev = Wel \quad \text{και} \quad -\Delta G = nFVrev \quad [3] \quad (\text{μονάδα μέτρησης σε J})$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ό,τι όταν Vrev>0 τότε ΔG<0, που σημαίνει ότι η συνολική αντίδραση (1) λαμβάνει χώρα αυθόρμητα όπως έχει γραφτεί από τα αριστερά προς τα δεξιά. [4].

Αν λοιπόν μπορούσαμε να διεξάγουμε τις αντιδράσεις κατά τρόπο απολύτως αντιστρεπτό, δηλαδή αν το δυναμικό της κυψελίδας ήταν ακριβώς ίσο με το δυναμικό ισορροπίας (το μέγιστο δυναμικό που μπορεί να αναπτυχθεί μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων), τότε όλη η ΔG της αντιδράσεως θα μετατρεπόταν σε ηλεκτρική ενέργεια και θα ήταν ίση με –nFVrev. Σ'αυτήν την ιδανική λοιπόν περίπτωση η κυψελίδα καυσίμου θα είχε απόδοση 100% [3].

Για ουσιώδη όμως σύγκριση με τις θερμικές μηχανές, το μέγεθος που χρησιμοποιείται αντί της ΔG είναι η μεταβολή της ενθαλπίας ΔH (ΔH = ΔG + TΔS) [5].

Έτσι ένας πλεονεκτικότερος ορισμός της απόδοσης μιας κυψελίδας καυσίμου, σε συνθήκες αντιστρεπτότητας, θα βασίζεται στο ΔH και θα δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_{max} = \Delta G/\Delta H = -nFVrev/\Delta H$$

Στην πράξη, όμως, η μέγιστη αυτή απόδοση δεν μπορεί να επιτευχθεί, διότι τα αντίστοιχα ηλεκτρικά στοιχεία δεν λειτουργούν κάτω από ιδανικά αντιστρεπτές συνθήκες. Το πραγματικό δυναμικό λειτουργίας μιας κυψελίδας, E_{th}, είναι συνήθως σημαντικά μικρότερο από το δυναμικό ισορροπίας, Vrev. Έτσι, η πραγματική απόδοση της κυψελίδας θα δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_o = -nFE_{th}/\Delta H = (-nFVrev/\Delta H)(E_{th}/Vrev) = \varepsilon_{max}\varepsilon_p$$

όπου $\varepsilon_p = E_{th}/Vrev$ ονομάζεται απόδοση δυναμικού του κελιού [3].

Για να πετύχουμε τη μεγιστοποίηση της αποδόσεως της κυψελίδας, θα πρέπει το ρεύμα ανταλλαγής να γίνει όσο γίνεται πιο μεγάλο και η ηλεκτρική αντίσταση των ηλεκτρολυτών όσο γίνεται πιο μικρή. Μεγάλη τιμή στην πυκνότητα του ρεύματος ανταλλαγής i_o επιτυγχάνεται με την κατάλληλη εκλογή ηλεκτροκαταλυτικών ηλεκτροδίων. Μικρή τιμή ηλεκτρικής αντιστάσεως στον ηλεκτρολύτη επιτυγχάνεται με την αύξηση της ηλεκτρολυτικής αγωγιμότητας, αλλά και με την κατάλληλη τοποθέτηση των ηλεκτροδίων.

Για το ίδιο όμως στοιχείο, δηλ. για την ίδια αντίδραση ηλεκτροχημικής καύσεως και το ίδιο ηλεκτροδιακό υλικό, η απόδοση εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος που παρέχει αυτό στο εξωτερικό κύκλωμα. Όσο πιο μεγάλη είναι η ένταση του ρεύματος που παρέχει η ηλεκτροχημική πηγή στο εξωτερικό κύκλωμα, τόσο μικρότερη καθίσταται η απόδοσή της. Μεγάλη ένταση σημαίνει γενικώς γρήγορη δράση και συνεπώς απομάκρυνση από τις συνθήκες θερμοδυναμικής αντιστρεπτότητας και ισορροπίας.

1.3.2 Εξάρτηση της ΗΕΔ κυψελίδας καυσίμου από τη θερμοκρασία

Οι γνωστές θερμοδυναμικές εξισώσεις Gibbs-Helmholtz βρίσκουν σημαντική εφαρμογή στις κυψελίδες καυσίμου, επιτρέποντας να βγάλουμε συμπεράσματα για την επίδραση της θερμοκρασίας στην ΗΕΔ και στη λειτουργία τους γενικότερα.

$$\Delta H = \Delta G - T\left[\frac{\partial(\Delta G)}{\partial T}\right]_p \quad \text{(εξίσωση Gibbs-Helmholtz)}$$

Βάσει της σχέσεως αυτής και της –ΔG = nFVrev, παίρνουμε την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta H = \Delta G + nFT\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_p \quad [6]$$

Το γινόμενο $nF\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_p$ δίνει φυσικά τη μεταβολή της εντροπίας, ΔS, της αντιδράσεως (διότι ΔΗ = ΔG + TΔS).

Το $\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_p$ παρέχει το θερμικό συντελεστή του δυναμικού του αντίστοιχου ηλεκτρικού στοιχείου κατά τη λειτουργία αυτού υπό σταθερή πίεση.

Στην πράξη, στη συντριπτική πλειοψηφία των γαλβανικών στοιχείων έχουμε $\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_p < 0$, δηλαδή κατά τη λειτουργία του στοιχείου καθώς πέφτει το E_{th} ανεβαίνει η θερμοκρασία του.

Τότε θα είναι :

$$(-\Delta G) < (-\Delta H) \quad [2]$$

Το (-ΔΗ) είναι εν γένει μεγαλύτερο του (-ΔG) κατά 10-20% περίπου για τις περισσότερες αντιδράσεις που θα μπορούσαμε να επιτελέσουμε σε μια κυψελίδα καυσίμου.

Επομένως, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο στοιχείο (που μέτρο της είναι η –ΔG) είναι μικρότερη από την καταναλισκόμενη χημική ενέργεια (που μέτρο της είναι η –ΔΗ της αντίδρασης του στοιχείου), της οποίας ένα ποσό, ίσο με $nFT\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_p$, αποδίδεται στο περιβάλλον με τη μορφή θερμότητας. Άρα όσο μικρότερος κατ'απόλυτη τιμή είναι ο (αρνητικός) θερμικός συντελεστής της ΗΕΔ του στοιχείου, τόσο ωφελιμότερη η

λειτουργία του σ' αυτήν την περίπτωση [6]. Σπάνια περίπτωση είναι να έχουμε $\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_p > 0$ οπότε και (-ΔG)>(-ΔH).

Σ'αυτήν την περίπτωση η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι μεγαλύτερη από την καταναλισκόμενη χημική ενέργεια. Η διαφορά, ίση με nFT $\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_p$ κερδίζεται με απορρόφηση θερμότητας από το περιβάλλον, εφόσον το στοιχείο λειτουργεί αντιστρεπτά [6].

Αν τέλος ο θερμικός συντελεστής της ΗΕΔ είναι μηδέν, η διεξαγωγή της αντιδράσεως γίνεται θεωρητικά κατ' αντιστρεπτό τρόπο. Άρα τότε θα ισχύει:

$$(-\Delta G) = (-\Delta H)$$

δηλαδή δεν υπεισέρχεται στη θερμοδυναμική εξίσωση ο εντροπικός όρος TΔS [2].

1.3.3 Εξάρτηση της ΗΕΔ κυψελίδας καυσίμου από τις ενεργότητες των ουσιών

Γενικώς τα δυναμικά ισορροπίας των ηλεκτροδίων, συνεπώς και των ηλεκτροχημικών στοιχείων, δεν εξαρτώνται μόνο από τη θερμοκρασία, όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, αλλά και από τις συγκεντρώσεις ή καλύτερα τις ενεργότητες των ουσιών, οι οποίες λαμβάνουν μέρος στην ηλεκτροχημική αντίδραση.

Ας θεωρήσουμε ότι σε μια κυψελίδα καυσίμου γίνεται η ολική αντίδραση

$$aA + bB \leftrightarrow cC + dD$$

Σε συνθήκες σταθερής πίεσης και θερμοκρασίας, η μεταβολή στην ελεύθερη ενέργεια Gibbs της αντίδρασης θα ισούται, όπως γνωρίζουμε από την θερμοδυναμική, με το αλγεβρικό άθροισμα των χημικών δυναμικών των συστατικών που μετέχουν σ' αυτήν. Έτσι, θα έχουμε:

$$\Delta G = -nFE = (c\mu_C + d\mu_D) - (a\mu_A + b\mu_B)$$

και αν θέσουμε $\mu_i = \mu_i^o + RT\ln a_i$, καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση:

$$E = -\frac{1}{nF}\left(c\mu_C^o + d\mu_D^o - a\mu_A^o - b\mu_B^o\right) - \frac{RT}{nF}\ln\frac{(a_C)^c(a_D)^d}{(a_A)^\alpha(a_B)^b}$$

Τέλος, αν στη παραπάνω σχέση θέσουμε, $E^o = -\frac{1}{nF}\left(c\mu_C^o + d\mu_D^o - a\mu_A^o - b\mu_B^o\right)$

τότε παίρνουμε τη γνωστή εξίσωση των Peters-Nernst $E = E^o - \frac{RT}{nF}\ln\frac{(a_C)^c(a_D)^d}{(a_A)^\alpha(a_B)^b}$

που δίνει την εξάρτηση του δυναμικού του στοιχείου από τις ενεργότητες των συστατικών της αντίδρασης που γίνεται σ'αυτό.

Η σταθερά E^o ονομάζεται κανονικό δυναμικό του ημιστοιχείου ή ηλεκτροδίου και ισούται με την ΗΕΔ του στοιχείου, όταν οι ενεργότητες των συστατικών A, B, C, D είναι ίσες με μονάδα. Έχει τιμή χαρακτηριστική για κάθε ηλεκτρόδιο και αποτελεί μέτρο της οξειδωτικής ή αναγωγικής ικανότητας του ηλεκτροδίου. Όσο θετικότερο είναι το κανονικό δυναμικό, τόσο ισχυρότερο οξειδωτικό μέσο είναι το ηλεκτρόδιο και όσο πιο αρνητικό είναι το κανονικό δυναμικό, τόσο ισχυρότερο αναγωγικό μέσο είναι το ηλεκτρόδιο.

Έτσι, ο συνδυασμός ενός ισχυρού οξειδωτικού μέσου με ένα ισχυρό αναγωγικό μέσο οδηγεί σε γαλβανικό στοιχείο με αρνητικό πόλο (οξειδωτική άνοδο) το αναγωγικό ηλεκτρόδιο. Αξίζει να σημειωθεί ακόμη, ότι η παράσταση μέσα στην παρένθεση της δίνει την κανονική μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs (ΔG^o) της αντίδρασης του στοιχείου. Συνεπώς είναι:

$$E^o = -\frac{\Delta G^o}{nF} \text{ ή } \Delta G^o = -nFE^o$$

Αλλά η ΔG^o συνδέεται με τη σταθερά χημικής ισορροπίας της αντίδρασης του στοιχείου με τη γνωστή θερμοδυναμική σχέση $\Delta G^o = -RT\ln k$, που αν συνδυαστεί με την $\Delta G^o = -nFE^o$, προκύπτει η σχέση:

$$\ln k = \frac{nF}{RT}E^o$$

Από τη σχέση αυτή μπορούμε να υπολογίσουμε τη σταθερά χημικής ισορροπίας της αντίδρασης που γίνεται σε μια κυψελίδα καυσίμου ποτενσιομετρικώς, με μέτρηση δηλαδή του E^o του στοιχείου αυτού.

1.4 Στάδια των αντιδράσεων μεταφοράς φορτίου και παράγοντες που τα επηρεάζουν

Τα κύρια στάδια της γενικής ηλεκτροχημικής αντίδρασης Ox + ne ↔ Red είναι [6]:

(α) η κύρια αντίδραση μεταφοράς φορτίου

(β) η μεταφορά μάζας με διάχυση ή και με μετανάστευση από το bulk στη διαφασική περιοχή και αντίστροφα

(γ) διάφορες ομογενείς χημικές αντιδράσεις που γίνονται στη διάχυτη στοιβάδα πριν ή μετά την καθαυτό ηλεκτροδιακή δράση, όπως ισομεριώσεις, διμερισμοί, κ.α.

(δ) φυσικές ή φυσικοχημικές διεργασίες που γίνονται στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου και πάντως μέσα στη σταθερή στοιβάδα Helmholtz, όπως προσρόφηση και εκρόφηση αντιδρώντων και προϊόντων, ηλεκτροδιάλυση και ηλεκτροαπόθεση του ηλεκτροδιακού υλικού, κ.α.

Η παρεμπόδιση ενός ή περισσότερων από τα στάδια αυτά έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση υπέρτασης, ενώ το παρεμποδιζόμενο αργό στάδιο είναι αυτό που καθορίζει την ταχύτητα της ολικής ηλεκτροχημικής αντίδρασης στο ηλεκτρόδιο.

Οι παράγοντες και τα φαινόμενα που επηρεάζουν την κινητική της καθαυτό αντίδρασης μεταφοράς φορτίου είναι [6]:

α) Η επιφανειακή συγκέντρωση της ηλεκτρενεργής ουσίας, που καθορίζεται κυρίως από τη διάχυση και από φαινόμενα προσρόφησης της ίδιας της ηλεκτρενεργής ουσίας.

β) Η ενέργεια ενεργοποίησης της αντίδρασης μεταφοράς φορτίου, που εξαρτάται από τη φύση και τις καταλυτικές ή προσροφητικές ιδιότητες του ηλεκτροδιακού υλικού και ακόμη από τη φύση των αντιδρώντων συστατικών.

γ) Το δυναμικό του ηλεκτροδίου, που ελέγχει την ταχύτητα μεταφοράς φορτίου από και προς την ηλεκτροδιακή επιφάνεια.

δ) Η διεξαγωγή ή όχι ομογενών χημικών αντιδράσεων στη διαφασική περιοχή.

ε) Η προσρόφηση ενδιάμεσων ή τελικών προϊόντων της ηλεκτροδιακής αντίδρασης που μπορεί να παρακωλύουν ή να καταλύουν την κύρια αντίδραση μεταφοράς φορτίου, και τέλος

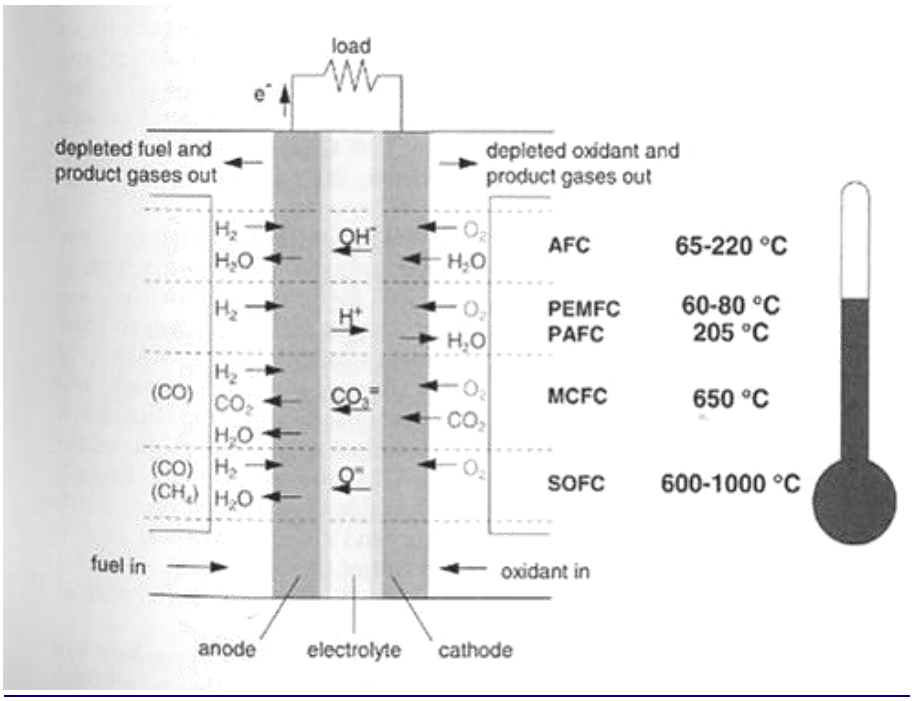
στ) Η θερμοκρασία, με την αύξηση της οποίας ευνοείται η κινητική των αντιδράσεων μεταφοράς φορτίου.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να ειπωθεί ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, συνεπάγεται και την αύξηση της αντοχής των ηλεκτροδίων από CO και CO_2 , αέρια που συχνά συνοδεύουν σε υψηλό ποσοστό, το συνηθισμένο για κυψελίδες καυσίμου, καύσιμο H_2, όταν μάλιστα αυτό προέρχεται από μια προ-εργασία αναμόρφωσης κάποιου υδρογονάνθρακα, κάτι που συνηθίζεται [3].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΥΠΟΙ ΚΥΨΕΛΙΔΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

2.1 Εισαγωγή

Οι κυψελίδες καυσίμου μπορούν να ταξινομηθούν βάση του τύπου του ηλεκτρολύτη τη θερμοκρασία λειτουργίας τους ή ακόμα και το καύσιμο που χρησιμοποιούν. Στο σχήμα 2 φαίνονται οι διάφοροι τύποι κυψελίδων καυσίμου σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν. Παρακάτω γίνεται μια σύντομη περιγραφή των διαφόρων τύπων του σχήματος.



Σχήμα 2: Διάφοροι τύποι κυψελίδων καυσίμου

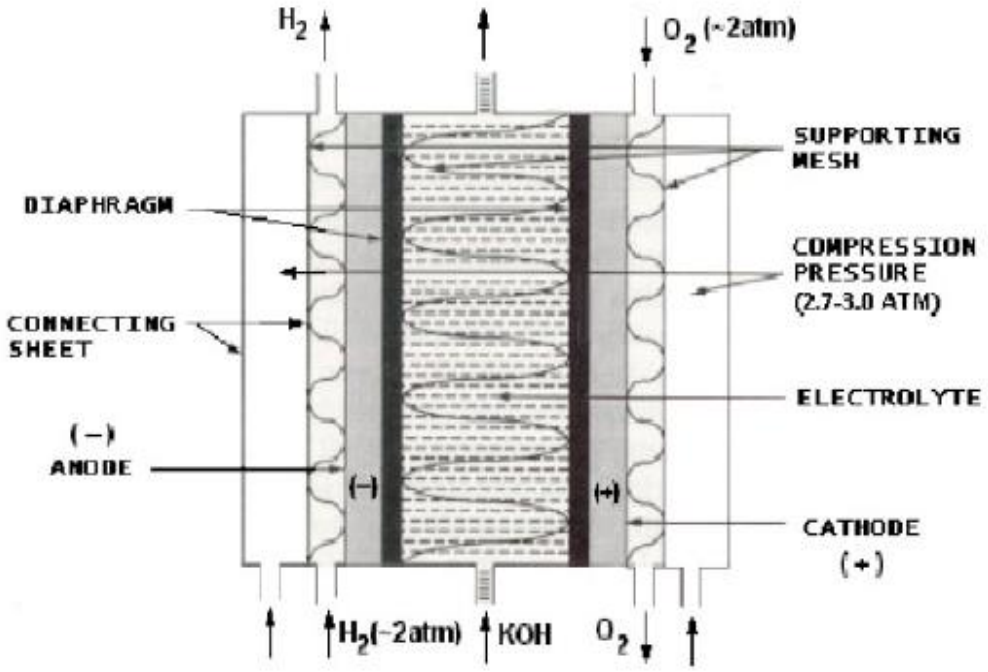
2.2 Αλκαλικές Κυψελίδες Καυσίμου (Alkaline Fuel Cells, AFC)

Ο ηλεκτρολύτης στην αλκαλική κυψελίδα καυσίμου είναι πυκνό καυστικό κάλιο. Τα AFCs χρησιμοποιούν ως καύσιμο το H_2 και οξειδωτικό το O_2 κάτω από υψηλή πίεση. Πρέπει να σημειώσουμε ότι η αναγωγή του O_2 ευνοείται σε αλκαλικά μέσα παρά σε οξέα. Έχουν τη δυνατότητα χρήσης μη-ευγενών μετάλλων ως ηλεκτροκαταλυτών, γεγονός που ρίχνει σημαντικά το κόστος κατασκευής. Από την άλλη μεριά όμως, η αδυναμία διαχείρισης του CO_2 από τις κυψελίδες αυτές έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται καθαρισμός του καυσίμου αλλά και του οξειδωτικού από προσμίξεις CO_2, γεγονός που ανεβάζει σημαντικά το κόστος λειτουργικότητας [3].

Οι ημιαντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στα ηλεκτρόδια είναι:

$$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O \quad \text{κάθοδος}$$

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \quad \text{άνοδος [Z]}$$



Σχήμα 3: Σχηματική αναπαράσταση αλκαλικής κυψελίδας καυσίμου (Alkaline Fuel Cell, AFC) [1]

Τα AFCs χρησιμοποιούνται ευρέως σε διαστημικές αποστολές εξαιτίας της υψηλής ειδικής πυκνότητας ισχύος και ενέργειας, η οποία επιτυγχάνεται από αυτά, και της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας τους (80°C). Παρόλο που γι' αυτές τις εξειδικευμένες εφαρμογές οι κυψελίδες αυτές φαίνονται πολύ κατάλληλες, για άλλες χρήσεις δεν πρέπει να παραβλέπεται η ενέργεια που απαιτείται και που έχει προ-διατεθεί για την συμπίεση των αντιδρώντων και τον καθαρισμό τους από CO_2 [3].

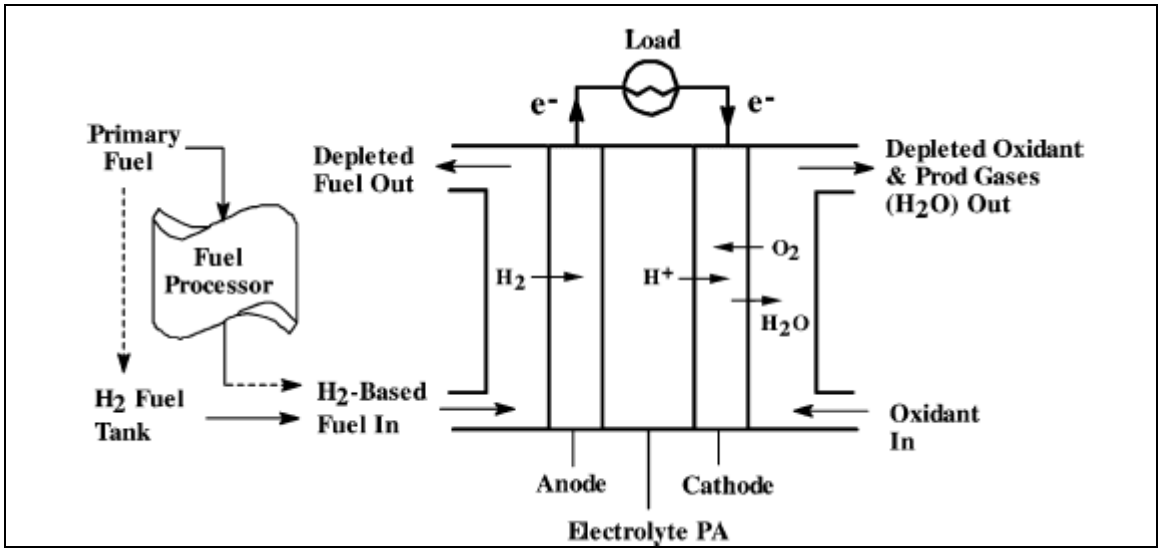
2.3 Κυψέλιδα Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)

Ο ηλεκτρολύτης στις κυψελίδες καυσίμου φωσφορικού οξέος είναι πυκνό φωσφορικό οξύ και η θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι μεταξύ 150 και 200°C. Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην κυψελίδα είναι ίδιες με αυτές των αλκαλικών κυψελίδων καυσίμου. Στα πιο σύγχρονα σχέδια τα ηλεκτρόδια είναι ενσωματωμένα σε Teflon. Τα ηλεκτρόδια / καταλύτες είναι λευκόχρυσος και κράματα λευκόχρυσου υποστηριγμένα σε κατάλληλα επεξεργασμένο άνθρακα. Αυτή η διασπορά του καταλύτη πάνω στον άνθρακα επιτυγχάνει υψηλό εμβαδόν καταλυτικά ενεργής επιφάνειας με ελάχιστο φορτίου ευγενούς μετάλλου. Αποτέλεσμα η σημαντική μείωση του κόστους κατασκευής της κυψελίδας. Τυπικά φορτία ευγενούς μετάλλου (Pt) σε αυτά του υποστηριγμένου τύπου ηλεκτρόδια είναι της τάξης του 1mg Pt/cm^2 [3].

Παρότι τα γραφιτικά υλικά εμφανίζονται θερμοδυναμικά ασταθή σε περιβάλλον κυψελίδων καυσίμου, η κινητική οξείδωσής τους είναι τόσο αργή σε αυτές τις συνθήκες, ώστε το ζήτημα να μην μας απασχολεί [3].

Η σχετικά αναβαθμισμένη θερμοκρασία λειτουργίας των 200°C έχει σαν αποτέλεσμα την λήψη του παραγόμενου H_2O υπό μορφή ατμού. Παρότι η προσρόφηση φωσφορικών ιόντων στην κάθοδο αυξάνουν την πολωσιμότητά τους – που οδηγεί σε αύξηση της υπέρτασης ενεργοποίησης – με την απουσία υγρού νερού η κυψελίδα μπορεί να λειτουργεί σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης με υψηλή δυνατότητα κατανάλωσης οξυγόνου (>50%) του αέρα, χωρίς την ανάγκη ανακύκλωσης [3].

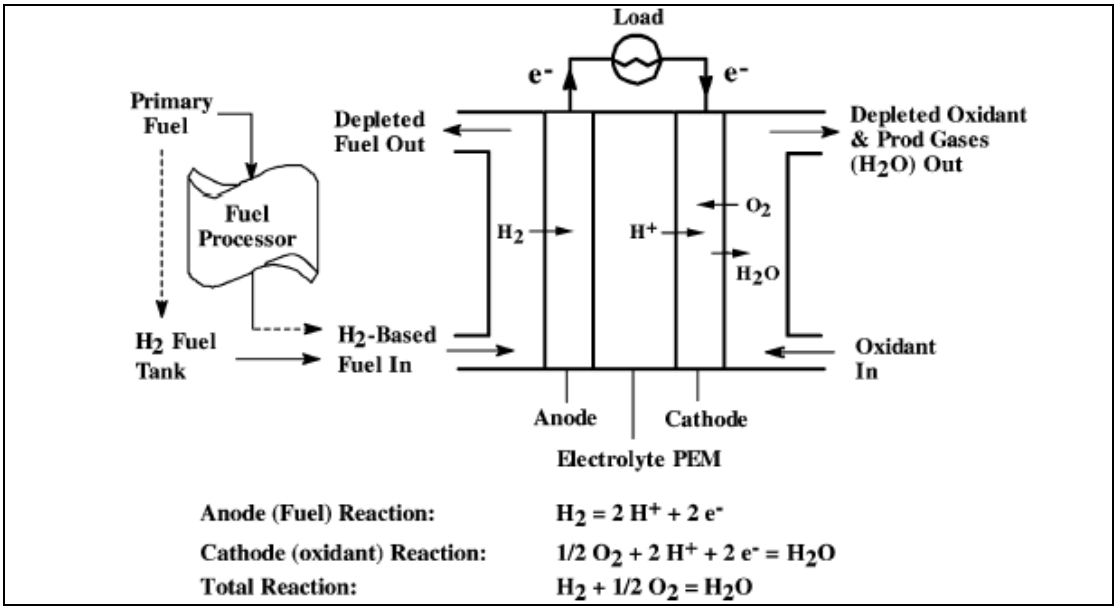
Οι υψηλές θερμοκρασίες που προαναφέραμε υποβοηθούν στην ανεκτικότητα των ηλεκτροδίων στην αναπόφευκτη παρουσία CO στα καύσιμα που προέρχονται από αναμόρφωση. Στους 200°C, τα PAFC λειτουργούν χωρίς ουσιαστικό πρόβλημα σε περιεκτικότητες CO έως και 1,5% στο ρεύμα του καυσίμου (άνοδος) [3].



Σχήμα 4: Τυπική αναπαράσταση κυψελίδας καυσίμου φωσφορικού οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC) [7]

2.4 Κυψελίδα Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)

Ο ηλεκτρολύτης σ'αυτές τις κυψελίδες είναι μια πολυμερή μεμβράνη που είναι ένας έξοχος αγωγός ιόντων πρωτονίου (H+). Το μόνο παραπροϊόν, που υπεισέρχεται της διαδικασίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, είναι το νερό, κυρίως με την υγρή του μορφή, γι αυτό το λόγο προβλήματα που σχετίζονται με φαινόμενα διάβρωσης των επιμέρους τμημάτων είναι αμελητέα. Το σημείο-κλειδί για την λειτουργία των κυψελίδων, είναι η απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων νερού, από την μεμβράνη, μέσω της οποίας εξασφαλίζεται η ικανότητά της να άγει τα πρωτόνια. Με άλλα λόγια η μεμβράνη δεν είναι ένας "καθαρός" αγωγός στερεάς κατάστασης. Γι αυτό το λόγο, είναι απαραίτητη η ελεγχόμενη διαχείριση του νερού που παράγεται, ώστε να εξασφαλίζεται η ενυδάτωση της μεμβράνης [1].



Σχήμα 5: Σχηματική αναπαράσταση κυψελίδας καυσίμου πρωτονιακής μεμβράνης (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) [7]

Η θερμοκρασία λειτουργίας αυτών των κυψελίδων περιορίζεται από την ίδια την φύση του ηλεκτρολύτη (πολυμερούς) σε τιμές κάτω από 120°C ενώ η απουσία άλλων υγρών ελαχιστοποιούν τα προβλήματα διάβρωσης των υλικών (ηλεκτροδίων, κτλ.). Ωστόσο, μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στην καθαρότητα του καυσίμου (H_2), ώστε να μην περιέχει ανεπιθύμητες προσμίξεις και ιδιαίτερα CO, το οποίο είναι δηλητήριο, ακόμη και σε συγκεντρώσεις 10 ppm, για τον καταλύτη σε χαμηλές θερμοκρασίες [1].

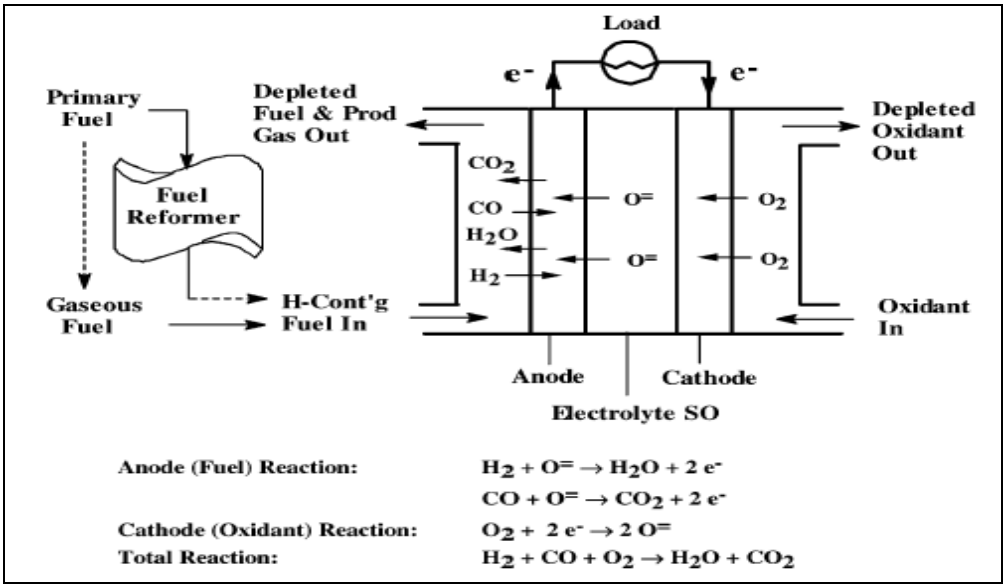
Τα τελευταία χρόνια υπήρξε μια σημαντική ανάπτυξη των κυψελίδων καυσίμου τύπου PEM. Οι κυψελίδες αυτές βρίσκονται στο στάδιο της επίδειξης / εμπορευματοποίησης. Ζητήματα κλειδιά στην υπόθεση των PEM είναι (i) το κόστος της μεμβράνης και των ηλεκτροδίων / καταλυτών (τα ηλεκτρόδιά τους αποτελούνται από υψηλά διεσπαρμένα ευγενή μέταλλα – κυρίως Pt), (ii) η ευπάθεια από μικροποσότητες CO και CO_2 που αναπόφευκτα θα περιέχονται στο καύσιμο H_2 που προέρχεται από αναμόρφωση υδρογονανθράκων, και (iii) η διαχείριση του νερού και της θερμότητας [3].

Το κόστος κατασκευής των PEM έχει μειωθεί σημαντικά στις μέρες μας, μετά την αποτελεσματική ελάττωση του φορτίου ευγενούς μετάλλου στα ηλεκτρόδια και τις πολύ λεπτές μεμβράνες που αναπτύχθηκαν από τον W.L. Gore. Οι κυψελίδες PEM επιτυγχάνουν πυκνότητες ισχύος της τάξης των 500-600 mW/cm^2 σε δυναμικά 0,6-0,7 Volt [3].

2.5 Κυψελίδες Καυσίμου Στερεών Ηλεκτρολύτη (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)

Η κυριότερη χρήση των κυψελίδων αυτών είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Εκτός από τα γενικότερα πλεονεκτήματα των κυψελίδων καυσίμου, όπως λειτουργία φιλική προς το περιβάλλον, τα SOFCs είναι ευέλικτα ως προς τη χρήση καυσίμων και μπορούν να λειτουργήσουν με πολλά αέρια ως καύσιμα, συμπεριλαμβανομένων και τους υδρογονάνθρακες (πχ φυσικό αέριο). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα SOFCs λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες παρόμοιες με αυτές των αναμορφωτών υδρογονανθράκων (συνήθως 800-1000°C). Έτσι, μπορούμε να αναμορφώσουμε τα φυσικά καύσιμα, εσωτερικά, μέσα στις κυωελίδες καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη ή να τα οξειδώσουμε απευθείας στην άνοδο των SOFCs.

Εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας που έχουν τα αέρια εξόδου, τα SOFCs μπορούν να συμπαράγουν θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια, με μεγαλύτερο το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η θερμική ενέργεια δεν είναι «χαμένη» υπόθεση. Είναι αυτή που θα διατηρήσει την κυψελίδα στην απαιτούμενη υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας, αλλά και αυτή που θα αποδώσει την απαιτούμενη ενέργεια στην επιτέλεση της αντίδρασης αναμόρφωσης του υδρογονάνθρακα , που είναι ως γνωστό μια ενδόθερμη αντίδραση, όταν φυσικά αναφερόμαστε στην διεργασία εσωτερικής αναμόρφωσης. Τέλος, εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας, δεν είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση πολύτιμων μετάλλων πάνω στα ηλεκτρόδια, αφού διάφορα οξείδια και βασικά μέταλλα επιτυγχάνουν ικανοποιητικές αγωγιμότητες κάτω από τέτοιες συνθήκες [1].



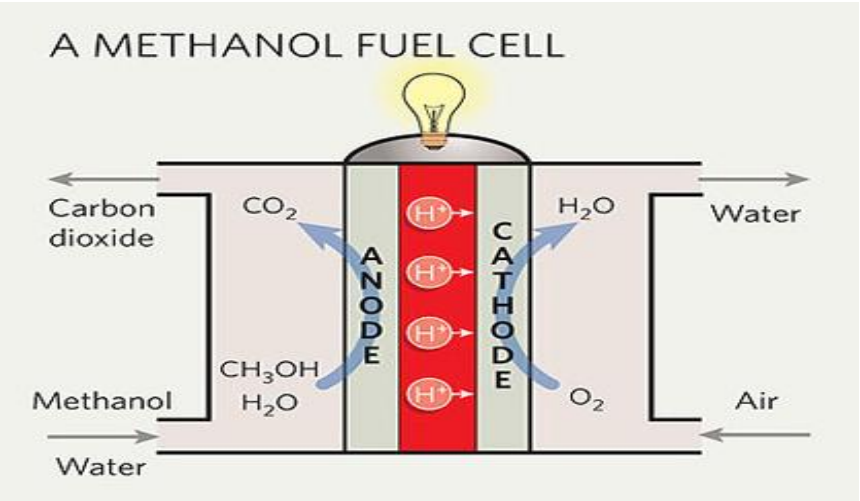
Σχήμα 6: Σχηματική αναπαράσταση κυψελίδας καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) [7]

2.6 Κυψελίδα Μεθανόλης (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC)

Η κατασκευή μιας κυψελίδας που θα μπορούσε να αναμορφώνει στην άνοδο ένα υδρογονάνθρακα για την παραγωγή H_2 και CO, αέρια τα οποία θα αποτελούσαν αυτομάτως και τα απαραίτητα καύσιμα για την λειτουργία της κυψελίδας, θα ήταν η ιδανικότερη λύση. Η ένωση που θα μπορούσε να αντιπροσωπεύει το καύσιμο για μια τέτοια προοπτική φαίνεται να είναι η μεθανόλη. Υπό το πρίσμα αυτής της ιδέας αναπτύχθηκε η τάση για την κατασκευή κυψελίδων καυσίμου που θα τροφοδοτούνται απευθείας με μεθανόλη: οι κυψελίδες καυσίμου απευθείας μετατροπής της μεθανόλης (DMFC). Αυτά θα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με την απευθείας αναμόρφωση της μεθανόλης στην άνοδο [3].

Το κυριότερο πλεονέκτημα των DMFC, συγκρινόμενα με τις κυψελίδες καυσίμου που τροφοδοτούνται με H_2, είναι η μη-ύπαρξη μιας εξωτερικής μονάδας αναμόρφωσης, που θα σήμαινε ανάγκη σημαντικού χώρου, βάρους και μείωση της τελικής απόδοσης της κυψελίδας. Έτσι, τα DMFC θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στις μεταφορές, καθόσον δεν θα είναι πλέον απαραίτητη η παραγωγή H_2 σε ένα ξεχωριστό αναμορφωτή, αλλά και η μεταφορά της υγρής μεθανόλης είναι ασφαλέστερη και ευκολότερη από την μεταφορά και την αποθήκευση του H_2.

Παρά τα τεράστια πλεονεκτήματα που διαφαίνονται, η εμπορευματοποίηση των DMFCs έχει καθυστερήσει εξαιτίας της φτωχής τους μέχρι τώρα απόδοσής τους συγκρινόμενα με τις κλασσικές κυψελίδες υδρογόνου [3].



Σχήμα 7: Σχηματική αναπαράσταση κυψελίδας καυσίμου μεθανόλης (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC)

2.7 Κυψελίδα Καυσίμου με Τετηγμένα Ανθρακικά άλατα (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)

Ο ηλεκτρολύτης αυτών των κυψελίδων είναι ένας συνδυασμός ανθρακικών αλάτων που τοποθετούνται σε μια μήτρα LiAlO2 (σχημα 5.5). Το ρεύμα άγεται μέσω των ιόντων CO_3^{2-}.

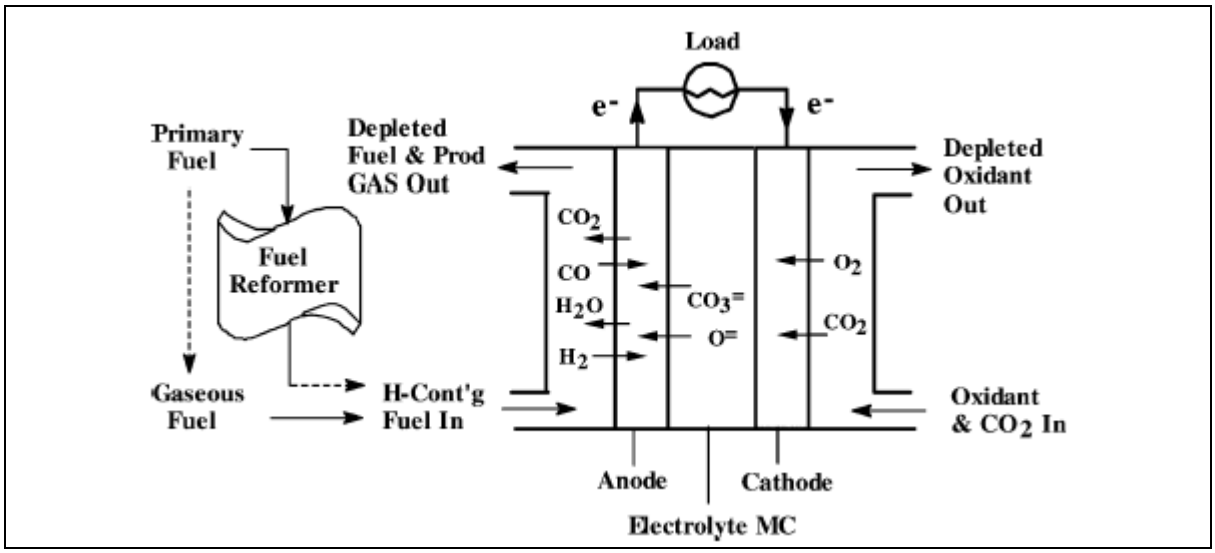
Οι ηλεκτροχημικές ημι-αντιδράσεις που συμβαίνουν σε αυτά είναι:

Άνοδος: $H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$

Κάθοδος: $\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$

Συγχρόνως με την παραγωγή ενός μορίου H_2O, έχουμε μια παράλληλη μεταφορά ενός μορίου CO_2 από την κάθοδο προς την άνοδο. Αυτό το CO_2 πρέπει να ανακυκλωθεί για να διατηρηθεί ο ηλεκτρολύτης.

Τα MCFCs λειτουργούν σε θερμοκρασίες της τάξης των 650°C. Αυτό επιτρέπει την χρήση φθηνών μετάλλων (και όχι ευγενών) ως ηλεκτροδιακά υλικά, ελαττώνοντας έτσι σημαντικά το κόστος κατασκευής. Τόσο η άνοδος όσο και η κάθοδος αυτών των κυψελίδων βασίζεται στο Ni. Τέλος, το καύσιμο που χρησιμοποιούν τα MCFC είναι φυσικό αέριο όπου ο αναμορφωτής μεθανίου είναι εγκατεστημένος μέσα στην μονάδα [3].



Σχήμα 8: Σχηματική αναπαράσταση κυψελίδας καυσίμου με τετηγμένα ανθρακικά άλατα (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) [7]

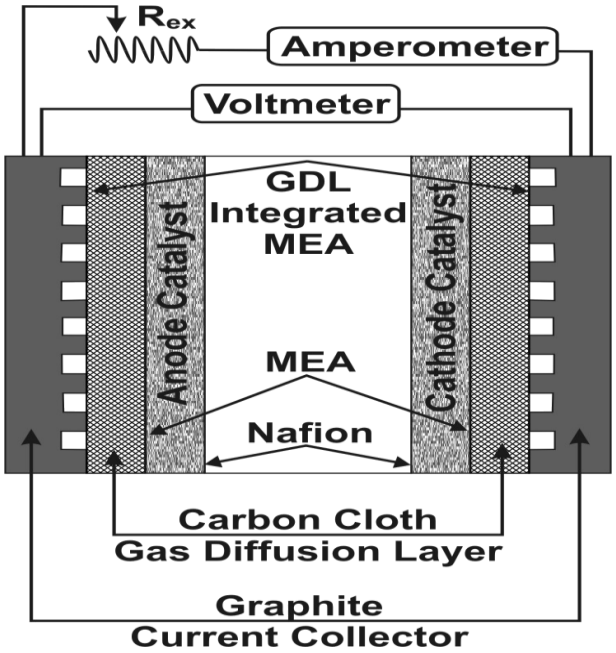
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΥΨΕΛΙΔΑ ΜΕ ΜΕΒΡΑΝΗ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL, PEMFC)

3.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Οι κυψελίδες καυσίμου PEM και η τεχνολογία τους έχουν τραβήξει την προσοχή ως εναλλακτική μορφή ενέργειας για τους εξής λόγους:

- Η λειτουργία τους είναι σχετικά απλή
- Έχουν γρήγορο ξεκίνημα δεδομένου ότι λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες
- Έχουν πάρα πολλές εφαρμογές
- Έχουν πολύ χαμηλές εκπομπές

Η κυψελίδα αποτελείται από την πολυμερική μεμβράνη και τα ηλεκτρόδια. Η πολυμερική μεμβράνη πρέπει να είναι αδιαπέρατη για τα αέρια και να έχει μεγάλη πρωτονιακή αγωγιμότητα. Τα ηλεκτρόδια πρέπει να είναι το πορώδεις, να έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα και ηλεκτροκαταλυτική τους ενεργότητα. Τα ηλεκτρόδια είναι συνήθως φτιαγμένα από ένα λεπτό στρώμα άνθρακα (το οποίο λειτουργεί και ως στρώμα διάχυσης των αερίων, gas diffusion layer, GDL) στην επιφάνεια του οποίου τοποθετείται η ενεργός φάση (μέταλλα, κράματα μετάλλων, οξείδια κ.λπ.). Τα δύο ηλεκτρόδια (άνοδος, κάθοδος) τοποθετούνται στις δύο πλευρές μιας πολυμερικής μεμβράνης και όλα μαζί αποτελούν το σύστημα μεμβράνης – ηλεκτροδίου (Membrane Electrode Assembly, MEA).



Σχήμα 9: Τυπική αναπαράσταση του εσωτερικού μιας κυψελίδας PEM

3.2 Χαρακτηρισμός των επιμέρους τμημάτων μιας κυψελίδας PEM

3.2.1 Ηλεκτρόδια κυψελίδας PEM

Τα ηλεκτρόδια της κυψελίδας όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο είναι συνήθως από άνθρακα τα οποία περιέχουν την ενεργό μεταλλική φάση (π.χ. Pt,Ru). Στα ηλεκτρόδια λαμβάνουν μέρος οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις.

Ο πιο κοινός καταλύτης που χρησιμοποιείται στις κυψελίδες καυσίμου PEM για τις αντιδράσεις αναγωγής του οξυγόνου και οξείδωσης του υδρογόνου είναι η πλατίνα (Pt). Παλιότερα στα πρώτα βήματα της ανάπτυξης των κυψελίδων PEM χρησιμοποιούνταν μεγάλες ποσότητες πλατίνας (μέχρι και 28 $\mu g/cm^2$) ενώ στις μέρες μας η ποσότητα έχει μειωθεί στο 0,2 – 0,3 $\mu g/cm^2$. Άλλα μέταλλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι το ρουθήνιο, Ru ή συνδυασμός πλατίνας – ρουθηνίου Pt – Ru κ.α. [8]

Το υπόστρωμα του άνθρακα το οποίο δρά και ως ένα στρώμα διάχυσης αερίου (gas diffusion layer) πρέπει να έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

- να είναι αρκετά πορώδες ώστε να επιτρέπει τη ροή των αντιδρώντων αερίων αλλά και του παραγόμενου νερού.
- να είναι ηλεκτρικά και θερμικά αγώγιμο.
- Οι πόροι του σε σύγκριση με τους πόρους του καταλύτη δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλοι, επειδή το στρώμα του καταλύτη αποτελείται από πολύ μικρά σωματίδια.
- να είναι σχετικά άκαμπτο για να υποστηρίζει το σύστημα μεμβράνης - ηλεκτροδίου (MEA) και ταυτόχρονα να έχει κάποια ελαστικότητα για να διατηρήσει καλές ηλεκτρικές επαφές [8].

Παρακάτω παρουσιάζονται οι ιδιότητες τυπικών υποστρωμάτων (gas diffusion layers) που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ηλεκτροδίων για κυψελίδες καυσίμου:

Πάχος: 200 – 400 μm

Πυκνότητα: 0,20 – 0,50 g/cm^3

Βάρος: 50 - 200 g/m^2

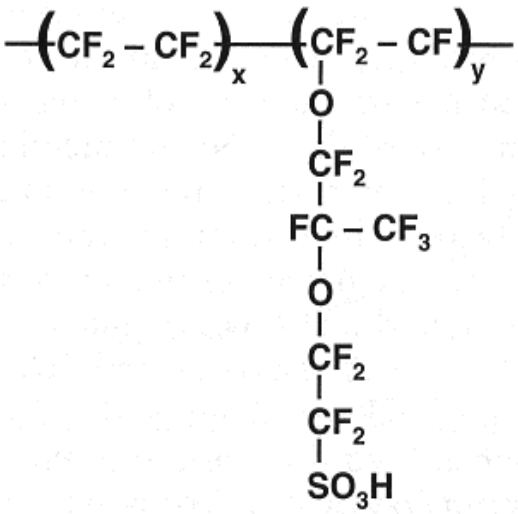
Πορώδες: 80 – 90%

Ηλεκτρική ειδική αντίσταση: 0,08 – 0,60 Ohmcm

Η παρασκευή του συστήματος μεμβράνης – ηλεκτροδίου (MEA) πραγματοποιείται συνήθως με εναπόθεση της ενεργούς φάσης στο υπόστρωμα του άνθρακα (μέσω ψεκασμού, ηλεκτροεναπόθεσης ή απόθεσης με εξάτμιση)και εν συνεχεία με εναπόθεση του ηλεκτροδίου στη μεμβράνη μέσω πίεσης σε αυξημένη θερμοκρασία (50 – 60 ^{o}C) [8].

3.2.2 Μεμβράνη κυψελίδας PEM

Η μεμβράνη της κυψελίδος πρέπει να έχει υψηλή πρωτονιακή αγωγιμότητα και δεν πρέπει να επιτρέπει τη μίξη του καυσίμου με το οξυγόνο. Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μεμβράνη είναι το Nafion και έχει τον παρακάτω χημικό τύπο:



Η ομάδα ατόμων SO_3H είναι συνδεδεμένη στο τέλος της πλαϊνής αλυσίδας και ουσιαστικά αποτελείται από τα αρνητικά ιόντα του SO_3^- και τα πρωτόνια ενώ είναι εξαιρετικά υδρόφιλη. Έτσι ένυδρες καταστάσεις δημιουργούνται γύρω από τις σουλφονικές πλευρικές αλυσίδες. Για αυτό το λόγο, αυτό το είδος της μεμβράνης απορροφά μεγάλες ποσότητες νερού. Η κίνηση των πρωτονίων μέσα σε αυτό το ένυδρο περιβάλλον κάνει τη μεμβράνη να έχει υψηλή πρωτονιακή αγωγιμότητα.

Οι μεμβράνες Nafion κατασκευάζονται σε διάφορα μεγέθη και με διαφορετικό πάχος. Κάθε μεμβράνη έχει ειδικό κωδικό ο οποίος αρχίζει από το γράμμα N και ακολουθεί ένας τριψήφιος ή τετραψήφιος αριθμός.

Τα πρώτα δύο ψηφία αντιπροσωπεύουν το ισοδύναμο βάρος διαιρούμενο με το 100 και το τελευταίο ψηφίο ή δύο τελευταία αντιπροσωπεύουν το πάχος της μεμβράνης σε mills (1mill = 0,0254 mm). Για παράδειγμα το Nafion 117 έχει ισοδύναμο βάρος 1100 και πάχος 7 mills δηλαδή 178 μm.

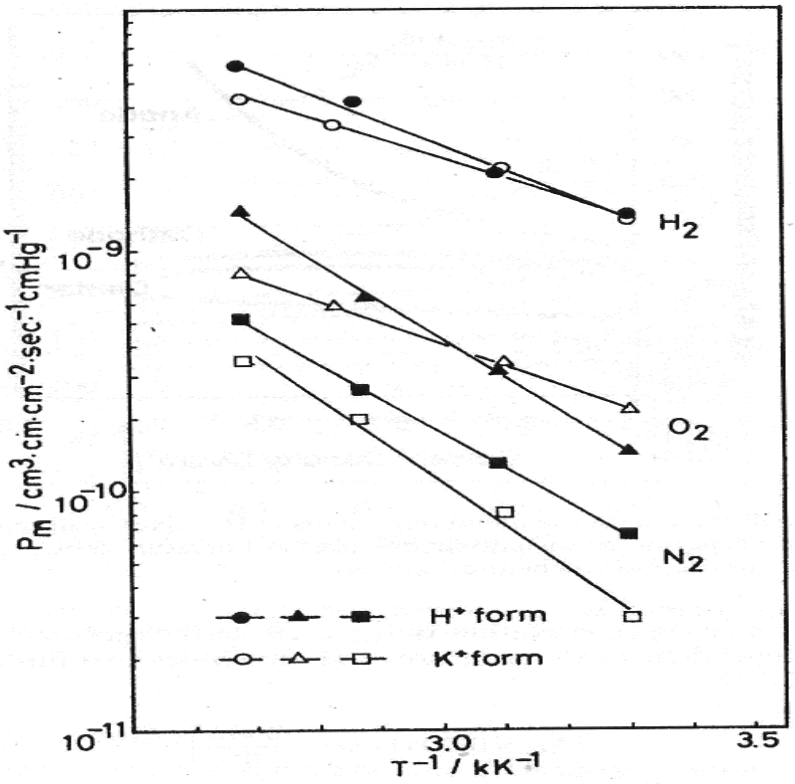
Συνοπτικά λοιπόν η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρισμού από την κυψελίδα μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

Το υδρογόνο τροφοδοτεί την άνοδο της κυψελίδας, το αρνητικό ηλεκτρόδιο, το οποίο ερχόμενο σε επαφή με τον καταλύτη διαχωρίζεται σε θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια. Η άνοδος και ο καταλύτης είναι τέτοιας κατασκευής ώστε η διάχυση των ατόμων του υδρογόνου να γίνεται με ομοιογενή τρόπο. Τα ηλεκτρόνια τα οποία απελευθερώθηκαν μεταφέρονται μέσω εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος προς την κάθοδο δημιουργώντας ηλεκτρισμό αφού η μεμβράνη αποτρέπει τη διέλευσή τους μέσω αυτής.Τα θετικά φορτισμένα ιόντα του υδρογόνου δηλαδή τα πρωτόνια διαπερνούν τη μεμβράνη και ενώνονται με τα ιόντα του οξυγόνου το οποίο τροφοδοτεί την κάθοδο, θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο, και παράγεται νερό. Όπως και πριν, την ομοιογενή διάχυση του οξυγόνου στον καταλύτη εξασφαλίζει η κατασκευή του ηλεκτροδίου. Στο σχηματισμό του νερού συμμετέχουν εκτός των μορίων του οξυγόνου και των ιόντων του υδρογόνου, τα ηλεκτρόνια τα οποία διοχετεύτηκαν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος στην κάθοδο, στην αρχή της διαδικασίας.

Η απόδοση της μεμβράνης μπορεί να επηρεαστεί από χαρακτηριστικά όπως:

1) Δυνατότητα μεταφοράς H_2O (η οποία συνδέεται άμεσα με την πρωτονιακή αγωγιμότητα).
2) Φυσικά χαρακτηριστικά (π.χ. διαστατικές αλλαγές κατά τη μεταφορά H_2O).
3) Διαπερατότητα αερίων. Η μεμβράνη πρέπει να είναι μη περατή τόσο για τα αέρια της ανόδου όσο και για τα αέρια της καθόδου.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η διαπερατότητα μιας πρωτονιακής μεμβράνης (Nafion 125) για H_2, O_2 και N_2 σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο αυξάνεται η διαπερατότητα των αερίων (με μεγαλύτερη αυτή του υδρογόνου).

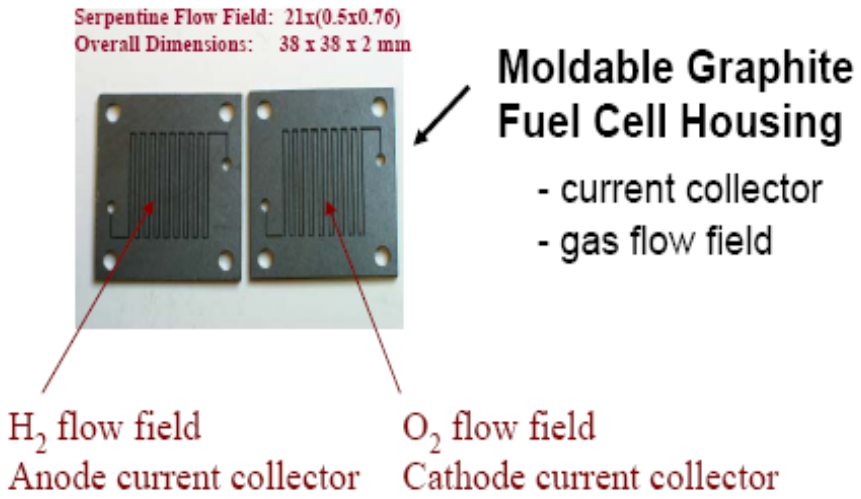


Σχήμα 10: Διάγραμμα διαπερατότητας υδρογόνου, οξυγόνου και αζώτου συναρτήσει της θερμοκρασίας για μεμβράνη Nafion 125 [9]

3.2.3 Μεταλλικές πλάκες

Οι μεταλλικές πλάκες συλλέγουν και κατευθύνουν το ηλεκτρικό ρεύμα ενώ όταν έχουμε πολλές κυψελίδες μαζί στη σειρά (fuel cell stack) διαχωρίζουν τα αέρια στις παρακείμενες κυψελίδες. Ονομάζονται επίσης διπολικές πλάκες επειδή σε σύστημα πολλών κυψελίδων συνδέουν φυσικά και ηλεκτρικά την κάθοδο μιας κυψελίδας με την άνοδο της παρακείμενης κυψελίδας. Υπάρχουν μεταλλικές πλάκες (αργίλιο, χάλυβας, τιτάνιο ή νικέλιο) και πλάκες από γραφίτη.

Στο σχήμα 10 βλέπουμε σε κάτοψη 2 πλάκες από γραφίτη. Είναι χαρακτηριστικά τα αυλάκια μέασα από τα οποία περνά το αέριο προκειμένου να έρθει σε επαφή με το ηλεκτρόδιο. Η διαδρομή είναι τέτοια ώστε να μεγιστοποιείται ο χρόνος παραμονής των αερίων στην κυψελίδα, επομένως και ο διαθέσιμος χρόνος για αντίδραση.



Σχήμα 11: Πλάκες από γραφίτη PEM κυψελίδας καυσίμου

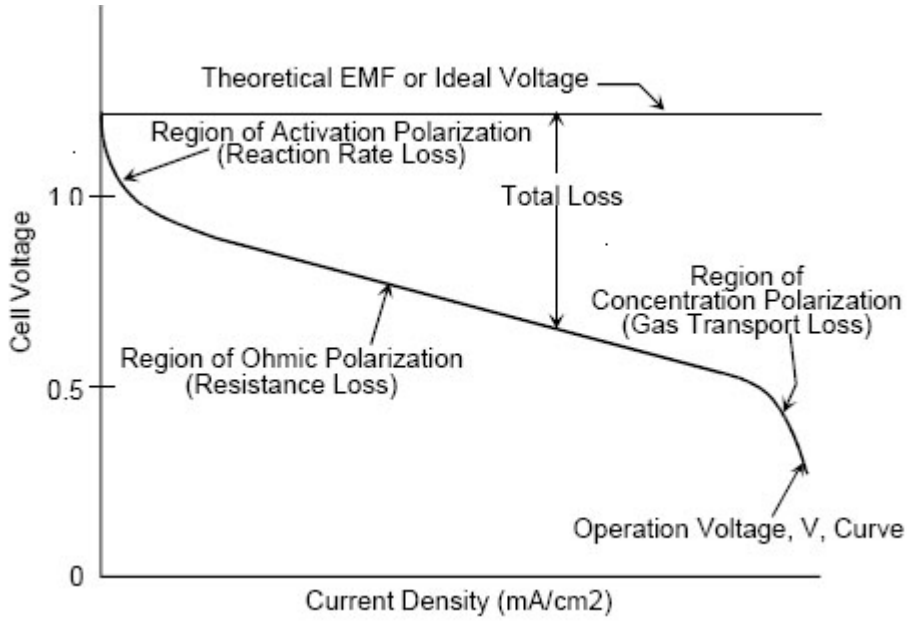
3.3 Μελέτη μιας κυψελίδας καυσίμου

Η λειτουργικότητα μιας κυψελίδας καυσίμου περιγράφεται από τα διαγράμματα τάσης – έντασης. Το δυναμικό ενός κελιού (ΗΕΔ) δίνεται από τη σχέση:

$$V_{cell} = E_{(+)} - E_{(-)}$$

Όπου $E_{(+)}$, $E_{(-)}$ είναι τα δυναμικά της καθόδου και της ανόδου αντίστοιχα.

Μια τυπική απόδοση - λειτουργία μιας κυψελίδας καυσίμου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 12: Τυπικό καμπύλη τάσης – έντασης κατά τη λειτουργία κυψελίδας καυσίμου τύπου PEM

Η διαφορά μεταξύ του πραγματικού δυναμικού των κυψελίδων σε μια δεδομένη πυκνότητα ρεύματος και του αντιστρεπτού δυναμικού καλείται υπέρταση. Η θερμοδυναμική αποδοτικότητα αλλά και η οικονομική βιωσιμότητα των κυψελίδων καυσίμου PEM εξαρτώνται από την ελαχιστοποίηση της συνολικής πόλωσης των κυψελίδων και αυτό απαιτεί μια καλή κατανόηση των διάφορων τύπων υπέρτασης, οι οποίοι περιορίζουν την απόδοση των κυψελίδων. Τέσσερις τύποι υπέρτασης είναι γνωστοί και ο συνδυασμός των οποίων μειώνει το δυναμικό των κυψελίδων καθώς αυξάνεται η πυκνότητα ρεύματος:

a) Υπέρταση Nernst, η_o, ως αποτέλεσμα της διασταύρωσης των αερίων ανόδου και καθόδου μέσω της πολυμερικής μεμβράνης.
b) Ωμική υπέρταση, η_Ω, που σχετίζεται με την ωμική αντίσταση του ηλεκτρολύτη και των δύο ηλεκτροδίων.
c) Υπέρταση ενεργοποίησης, η_a, που προκαλείται από την αργή ηλεκτροκατάλυση στη άνοδο και την κάθοδο.
d) Υπέρταση συγκέντρωσης, η_c, που σχετίζεται με φαινόμενα μεταφοράς. Συγκεκριμμένα έχουμε αργή μεταφορά μάζας των αντιδρώντων.

3.4 Τεχνικές χαρακτηρισμού κυψελίδων καυσίμου

Υπάρχουν πολλές παράμετροι οι οποίες είναι δυνατό να προσδιοριστούν μπορούν να χαρακτηρίσουν τις κυψελίδες καυσίμου όπως συνολική απόδοση (καμπύλες τάσης – έντασης, πυκνότητα ισχύος), κινητικές ιδιότητες (ηact, Io, *a*, ηλεκτροχημικά ενεργή επιφάνεια), ωμικές ιδιότητες (R_{ohmic}, ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα, αντιστάσεις ηλεκτροδίων), φαινόμενα μεταφοράς μάζας, δομή ηλεκτροδίων (πορώδες, αγωγιμότητα), δομή καταλύτη (πάχος, πορώδες, φόρτιση καταλύτη, ηλεκτροχημικά ενεργή επιφάνεια, ηλεκτρική αγωγιμότητα), και αρκετές ακόμα ιδιότητες.

Οι τεχνικές χαρακτηρισμού κυψελίδων καυσίμου διακρίνονται σε δύο τύπους:

1. **In Situ** ηλεκτροχημικές τεχνικές χαρακτηρισμού

   Χρησιμοποιούν τις ηλεκτροχημικές μεταβλητές της τάσης, του ρεύματος και του χρόνου για να χαρακτηρίσουν την απόδοση των κυψελίδων καυσίμου σε συνθήκες λειτουργίας.

2. **Ex Situ** τεχνικές χαρακτηρισμού

   Λεπτομερής χαρακτηρισμός της δομής (πορώδες, μορφολογία, επιφάνεια κ.α.) ή των ιδιοτήτων των συστατικών που αποτελούν τις κυψελίδες καυσίμου.

3.4.1 In Situ ηλεκτροχημικές τεχνικές χαρακτηρισμού

Οι κύριες **In Situ** μέθοδοι χαρακτηρισμού είναι:

Μέτρηση Ρεύματος – Τάσης (Current-Voltage measurement, I – V): Παρέχει μια γενική ποσοτική αξιολόγηση της απόδοσης και της πυκνότητας ισχύος των κυψελίδων καυσίμου.

Μετρήσεις Διακοπής Ρεύματος (Current Interrupt measurement): Χωρίζει τις συνεισφορές στην απόδοση των κυψελίδων καυσίμου στις ωμικές και μη ωμικές. Είναι μια πολύ γρήγορη τεχνική και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη και για τα υψηλής ισχύος συστήματα κυψελίδων καυσίμου ενώ εφαρμόζεται εύκολα παράλληλα με την (I – V) μέτρηση.

Ηλεκτροχημική Φασματοσκοπία Σύνθετης Αντίστασης (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS): Διαχωρισμός μεταξύ ωμικών απωλειών, απωλειών ενεργοποίησης και απωλειών συγκέντρωσης.

Κυκλική Βολταμετρία (Cyclic Voltammetry, CV): Παρέχει πληροφορίες για την κινητική των αντιδράσεων των κυψελίδων καυσίμου.

3.4.2 Ex Situ τεχνικές χαρακτηρισμού

Οι κύριες **Ex Situ** μέθοδοι χαρακτηρισμού είναι:

Προσδιορισμός πορώδους: Εξαγωγή του πορώδους ή ακόμα και αλλαγή μεγέθους πόρων.

Brunauer-Emmett-Teller (BET) Μέτρηση Επιφάνειας: Προσδιορισμός της επιφάνειας για οποιοδήποτε τύπο δείγματος.

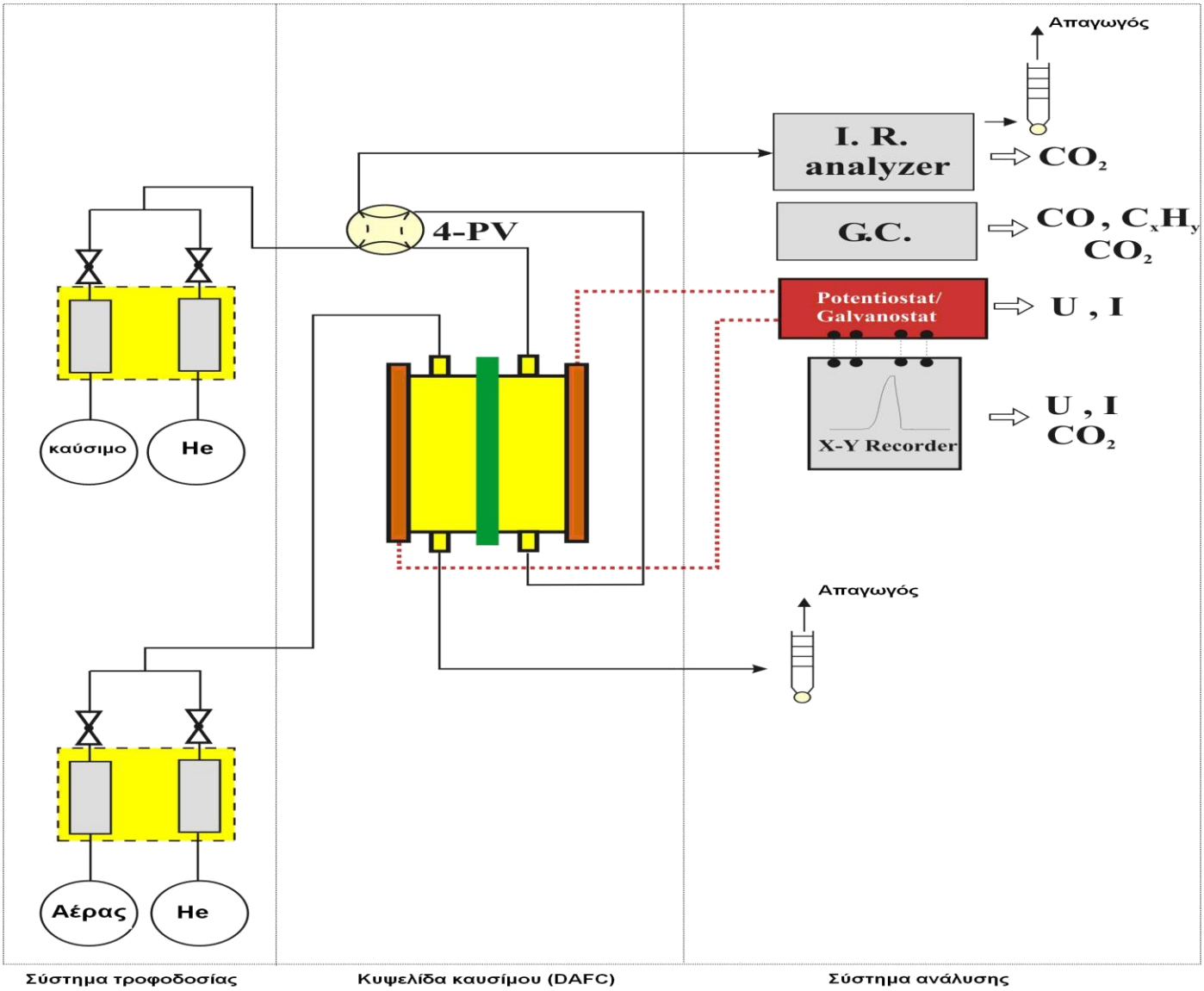
Διαπερατότητα αερίου: Κατανόηση της μαζικής μεταφοράς στα ηλεκτρόδια των κυψελίδων καυσίμου. Μετρήσεις διαπερατότητας και προσδιορισμός πορώδους.

Προσδιορισμοί δομών: Έρευνα για τη δομή (π.χ. δομή κρυστάλλου, προσανατολισμός, μορφολογία, κ.λπ.) των υλικών των κυψελίδων καυσίμου που χρησιμοποιούν ποικίλες τεχνικές μικροσκόπησης και διάθλασης. Χρήσιμη για τα νέα υλικά.

Χημικοί προσδιορισμοί: Χημική σύνθεση και ανάλυση των υλικών των κυψελίδων καυσίμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Η πειραματική διάταξη αποτελούνταν από 4 μέρη (σχήμα 12). Το τμήμα τροφοδοσίας, το οποίο αποτελείται από τις φιάλες των αερίων, τα ροόμετρα μάζας και τους 2 κορεστές, την κυψελίδα καυσίμου, το βοηθητικό σύστημα θέρμανσης και επιβολής φορτίων και τέλος το σύστημα καταγραφής των ηλεκτρικών σημάτων (δυναμικό και ρεύμα) και ελέγχου διαφόρων αερίων εξόδου. Στην παρούσα μελέτη δεν υπήρξε ανάλυση των αερίων εξόδου λόγω χρήσης του H_2 ως καυσίμου και κατά συνέπεια του H_2O ως μόνου προϊόντος.



Σχήμα 13: Πειραματική διάταξη

4.1 Φιάλες και ροόμετρα μάζας

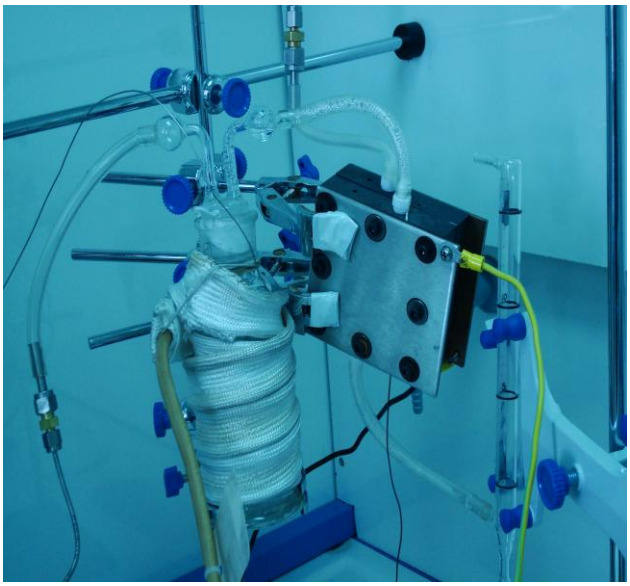
Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων χρησιμοποιήσαμε φιάλες που περιείχαν υδρογόνο, αέρα, καθαρό οξυγόνο και ήλιο σε καθαρότητα 99,999%. Η πίεση στη βαλβίδα ασφαλεία στις φιάλες μέσω της οποίας απελευθερώνονταν τα αέρια ήταν 3,5 bar. Οι φιάλες συνδέονταν με αναλογικά ροόμετρα μάζας, με τη βοήθεια των οποίων ήταν δυνατή η διαφοροποίηση της παροχής από 10 – 500 cc/min ανόλογα με το αέριο.

Φωτογραφία 1: Φιάλες

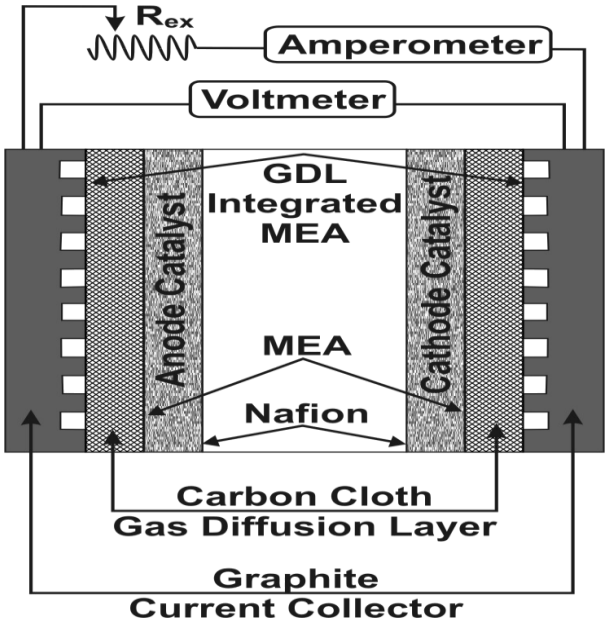
Φωτογραφία 2: Αναλογικά ροόμετρα μάζας

4.2 Κορεστής

Το αέριο της ανόδου πρωτού εισέλθει στην κυψελίδα περνούσε από πλυντιρίδα H_2O με σκοπό τον κορεσμό του σε H_2O και τη μεταφορά υδρατμών στην κυψελίδα. Ο ρόλος του κορεστή είναι πολύ σημαντικός για τη λειτουργία της κυψελίδας καθώς η υγρασία είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους λειτουργίας της κυψελίδας. Η αυξημένη υγρασία εντός της κυψελίδας είναι απαραίτητη για την καλή λειτουργία της πρωτονιακής μεμβράνης.



Φωτογραφία 3: Κυψελίδα εργαστηρίου



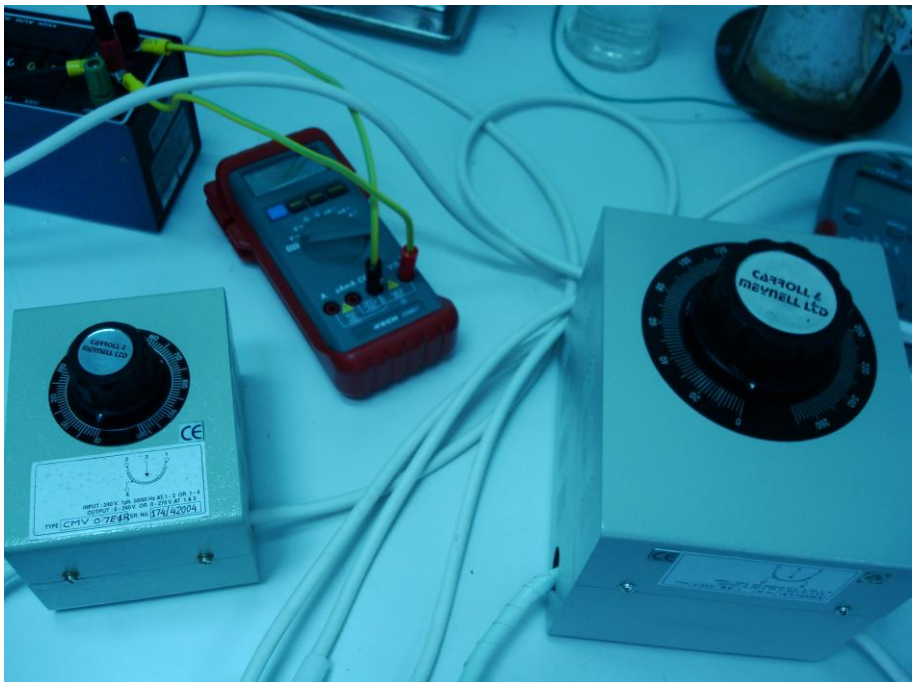
Σχήμα 14: Τυπική αναπαράσταση εσωτερικού κυψελίδας

4.3 Κυψελίδα μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων

Στα πειράματα της παρούσας διπλωματικής όπως αναφέρθηκε χρησιμοποιήθηκε κυψελίδα με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC). Η μεμβράνη που χρησιμοποιήθηκε ήταν Nafion 117 με πάχος 185 μm. Η γεωμετρική επιφάνεια των ηλεκτροδίων ήταν ίση με 5,29 cm^2. Κάθενα ηλεκτρόδιο στην άνοδο και την κάθοδο αποτελείται από πορώδες άνθρακα πάνω στον οποίο έχουν ψεκαστεί σωματίδια Pt. Τόσο στην άνοδο όσο και στην κάθοδο η φόρτιση σε Pt ήταν 4 mg Pt / cm^2.

Στα πειράματα που διενεργήθηκαν χρησιμοποιήσαμε 2 ηλεκτρονικά πολύμετρα προκειμένου να είναι δυνατή η συνεχόμενη καταγραφή του δυναμικού και του ρεύματος. Επίσης ένα κουτί μεταβλητών αντιστάσεων χρησιμοποιήθηκε για την επιβολή φορτίων στην κυψελίδα κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Για την αύξηση της θερμοκρασίας του κορεστή (προκειμένου να αυξηθεί η περιεκτικότητα του καυσίμου σε H_2O) χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλοι θερμαντικοί μανδύες ενώ για την αύξηση της θερμοκρασίας της κυψελίδας χρησιμοποιήθηκαν δύο θερμαντικοί ράβδοι. Μέσω εξωτερικών μετασχηματιστών τάσης δινόταν η εξωτερική ενέργεια που απαιτούσαν οι παραπάνω συσκευές θέρμανσης.



Φωτογραφία 4: Εξωτερικοί μετασχηματιστές τάσης, ηλεκτρονικό πολύμετρο, κουτί αντιστάσεων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

5.1 Επίδραση της παροχής αέρα στην απόδοση της κυψελίδας

Στο πείραμα αυτό, το οποίο έγινε σε θερμοκρασία T=25°C και πίεση ατμοσφαιρική, κρατήσαμε την παροχή της ανόδου σταθερή, δηλαδή την παροχή του υδρογόνου, f_{anode} = 400 cc/min ενώ αυξάναμε την παροχή της καθόδου, δηλαδή την παροχή του αέρα, $f_{cathode}$ = 25 cc/min , 50 cc/min, 100 cc/min, 150 cc/min, 200 cc/min και 250 cc/min. Από τα διάγραμματα τάσης – έντασης (σχήμα 15) παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η παροχή του αέρα τόσο αυξάνεται το ρεύμα φτάνοντας σε ένα σημείο πέραν του οποίου περαιτέρω αύξηση της παροχής δε δίνει σημαντικά διαφορετικά αποτελέσματα. Δηλαδή οι καμπύλες τάσης έντασης που προκύπτουν για τις τιμές 150 cc/min, 200 cc/min και 250 cc/min σχεδόν συμπίπτουν. Επίσης παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το ρεύμα μειώνεται η αντίσταση, η οποία σχετίζεται με το πόσο εύκολα ή δύσκολα διαπερνούν τα πρωτόνια τη μεμβράνη της κυψελίδας. Στις χαμηλές παροχές παρατηρούμε ότι η αντίσταση είναι μεγαλύτερη. Όσο μεγαλώνει το ρεύμα τόσο περισσότερα πρωτόνια περνούν μέσα από τη μεμβράνη και τόσο μικρότερη είναι η αντίσταση.

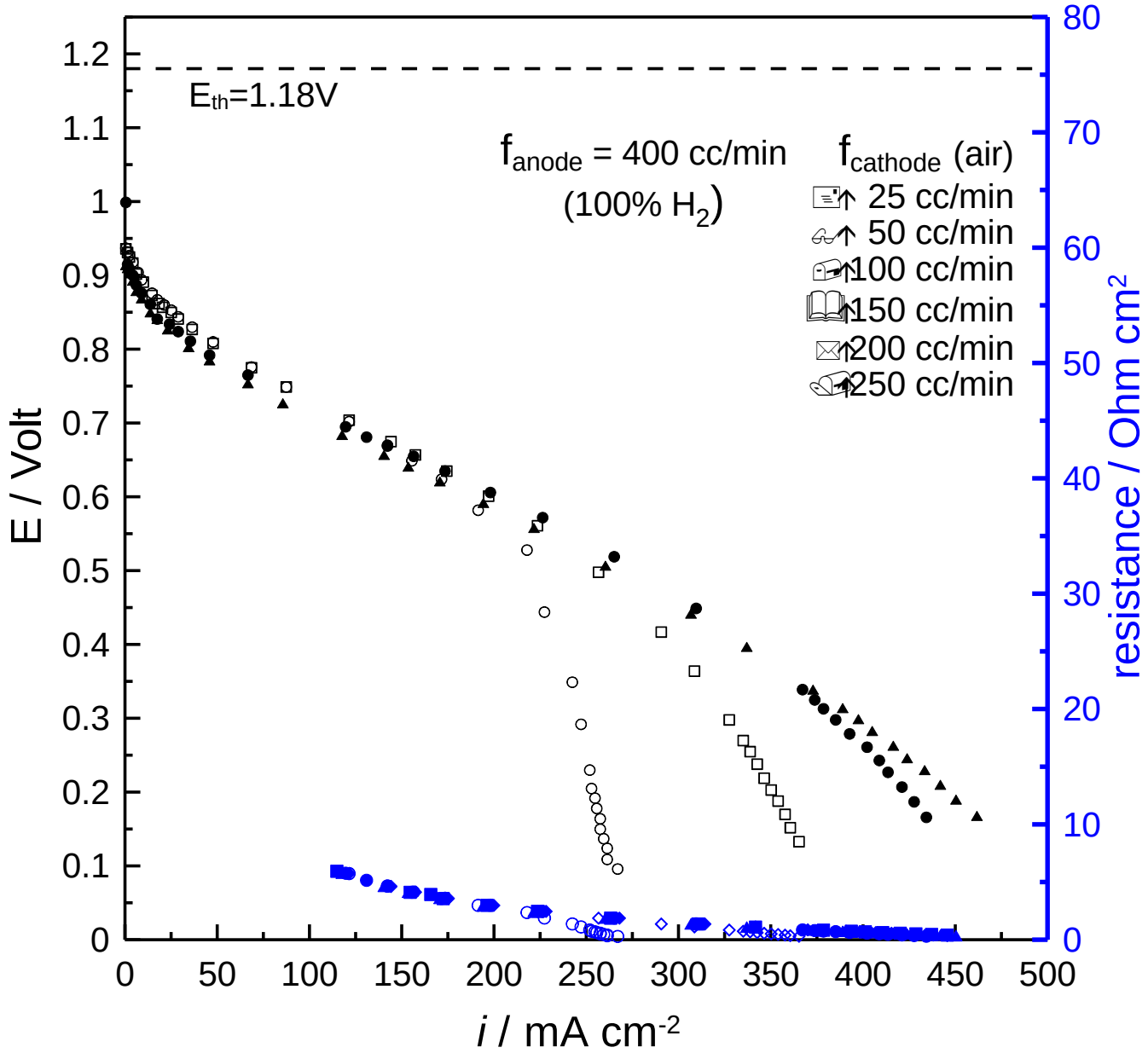
Στην περιοχή όπου κυριαρχεί η υπέρταση ενεργοποίησης οι αντιστάσεις που παρατηρεί κανείς είναι αυξημένες και οι καμπύλες της αντίστασης συναρτήσει του ρεύματος αλληλεπικαλύπτονται. Όσο το δυναμικό μειώνεται και μπαίνουμε στις περιοχές όπου επικρατούν ωμικές αντιστάσεις ή φαινόμενα μεταφοράς μάζας (π.χ. σχήμα 16) η αντίσταση παρουσιάζεται ανεξάρτητη της παροχής. Παρόμοια ήταν η συμπεριφορά για όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν και παρουσιάζονται παρακάτω.

Το θεωρητικό δυναμικό είναι E_{th} = 1,18V, όπως θα περιμέναμε αφού έχουμε νερό σε μορφή ατμών σαν προϊόν. Το δυναμικό αυτό υπολογίστηκε από τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 1. Το δυναμικό που υπολογίστηκε από το πείραμα όπως φαίνεται στο διάγραμμα δεν ξεπερνάει τα 0,95V. Αυτό συμβαίνει διότι, το θεωρητικό δυναμικό είναι το δυναμικό του κελιού καυσίμου όταν δεν κυκλοφορεί καθόλου ηλεκτρικό ρεύμα. Έτσι το δυναμικό αυτό μειώνεται όταν το κελί βρίσκεται σε λειτουργία λόγω των διαφόρων απωλειών που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3 (απώλειες ενεργοποίησης, ωμικές απώλειες και απώλειες διάχυσης).

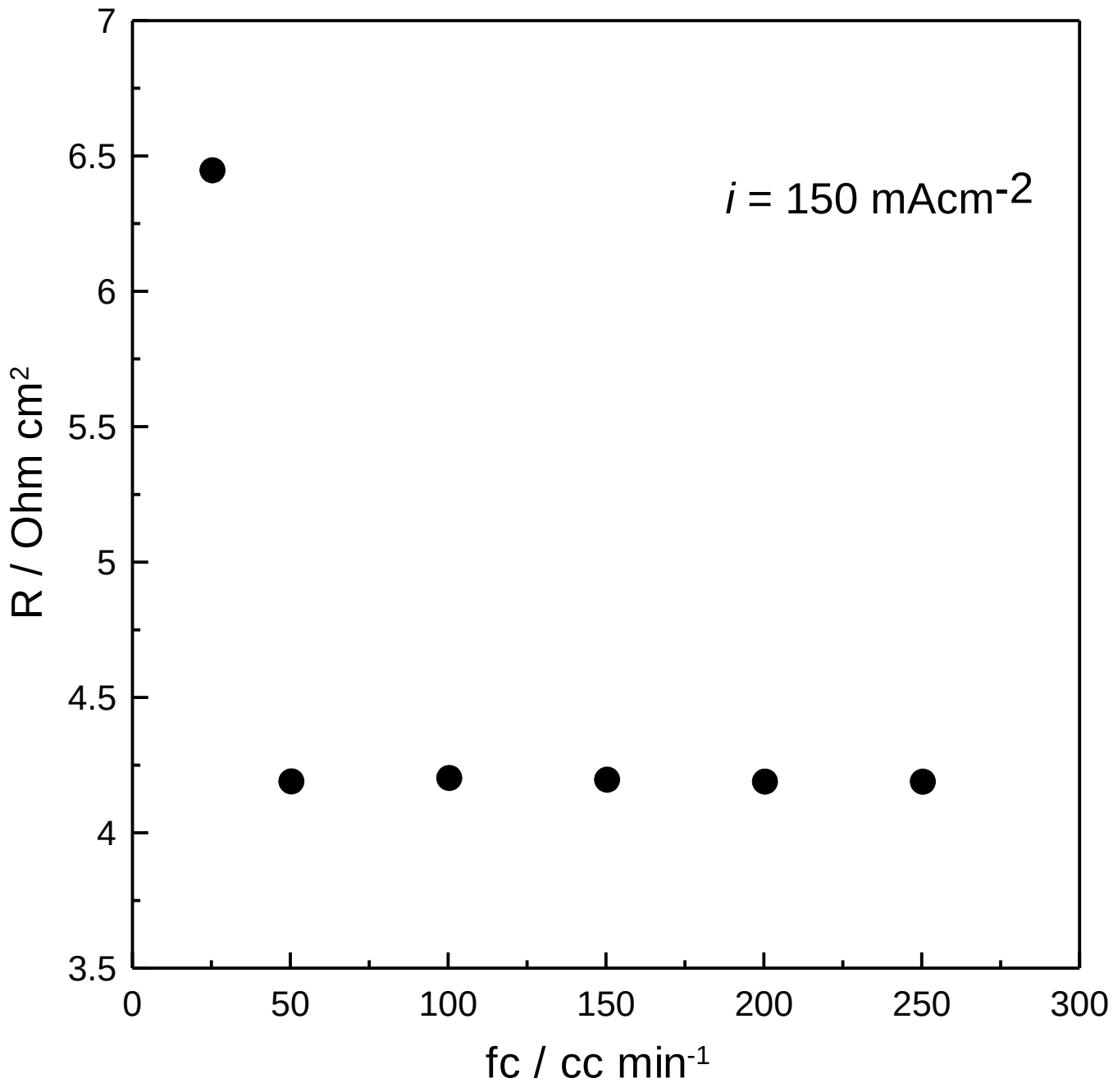
Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρούμε και στο διάγραμμα της ισχύος συναρτήσει του ρεύματος (σχήμα 17). Καθώς αυξάνεται η παροχή στην κάθοδο αυξάνεται η ισχύς και πάλι μέχρι τα 150 cc/min, ενώ για 200 cc/min και 250 cc/min η διαφοροποίηση όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε είναι πολύ μικρή. Έτσι για $f_{cathode}$ = 150 cc/min επιτυγχάνεται η μέγιστη ισχύς.

Στο διάγραμμα του μέγιστου ρεύματος συναρτήσει της παροχής στην κάθοδο (σχήμα 18) παρατηρούμε ότι παρουσιάζεται μέγιστο στα 200 cc/min με το i_{max} να έχει τιμή στα 465 mA/cm^2. Αντίθετα στο διάγραμμα της μεγίστης ισχύος συναρτήσει της παροχής του αέρα (σχήμα 19) βλέπουμε ότι παρουσιάζεται μέγιστο στα 150 cc/min με την τιμή της ισχύος να είναι στα 142 mWatt/cm^2 και i_p = 313,8 mA/cm^2.

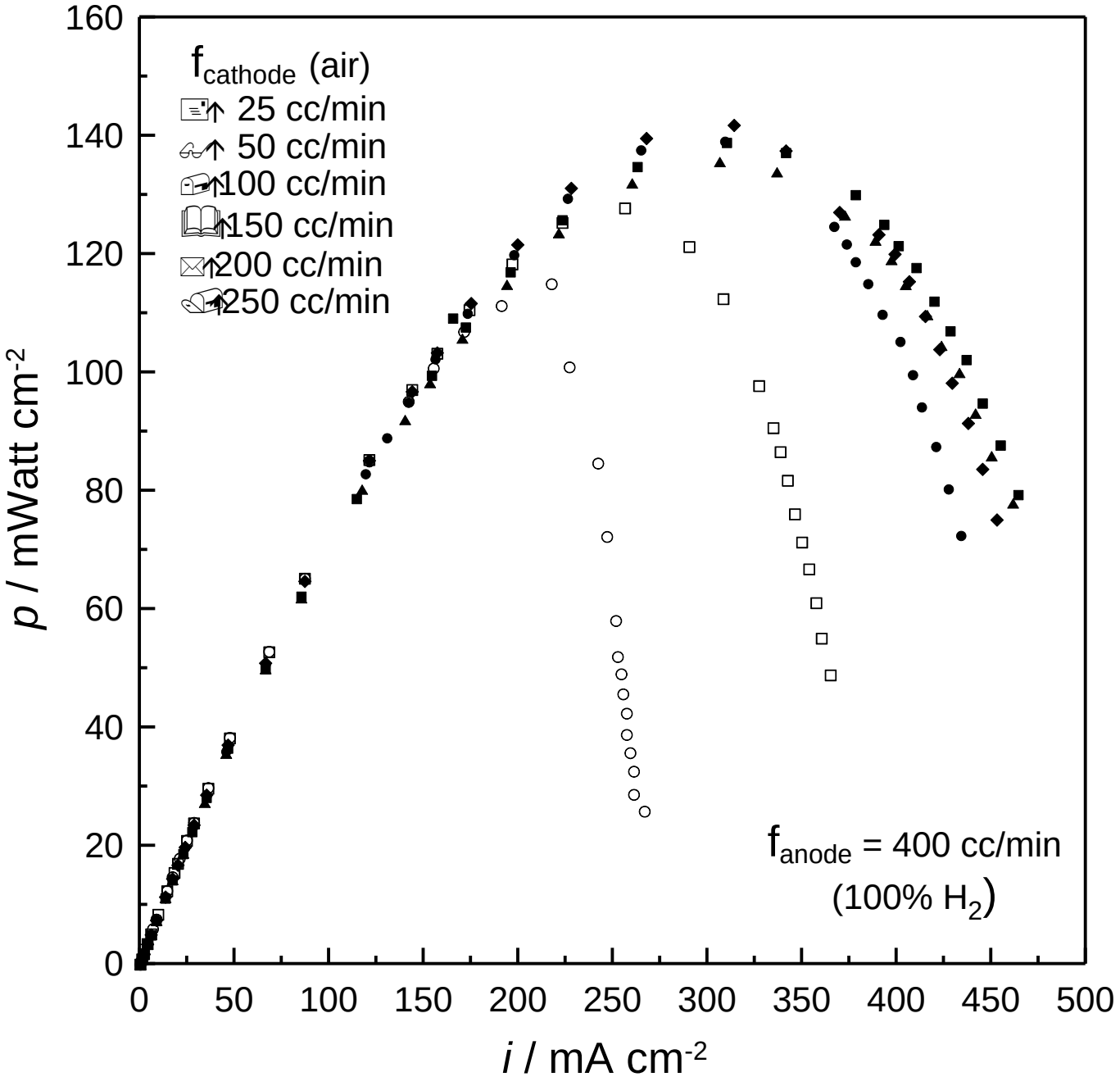
Παραθέτονται τα διαγράμματα



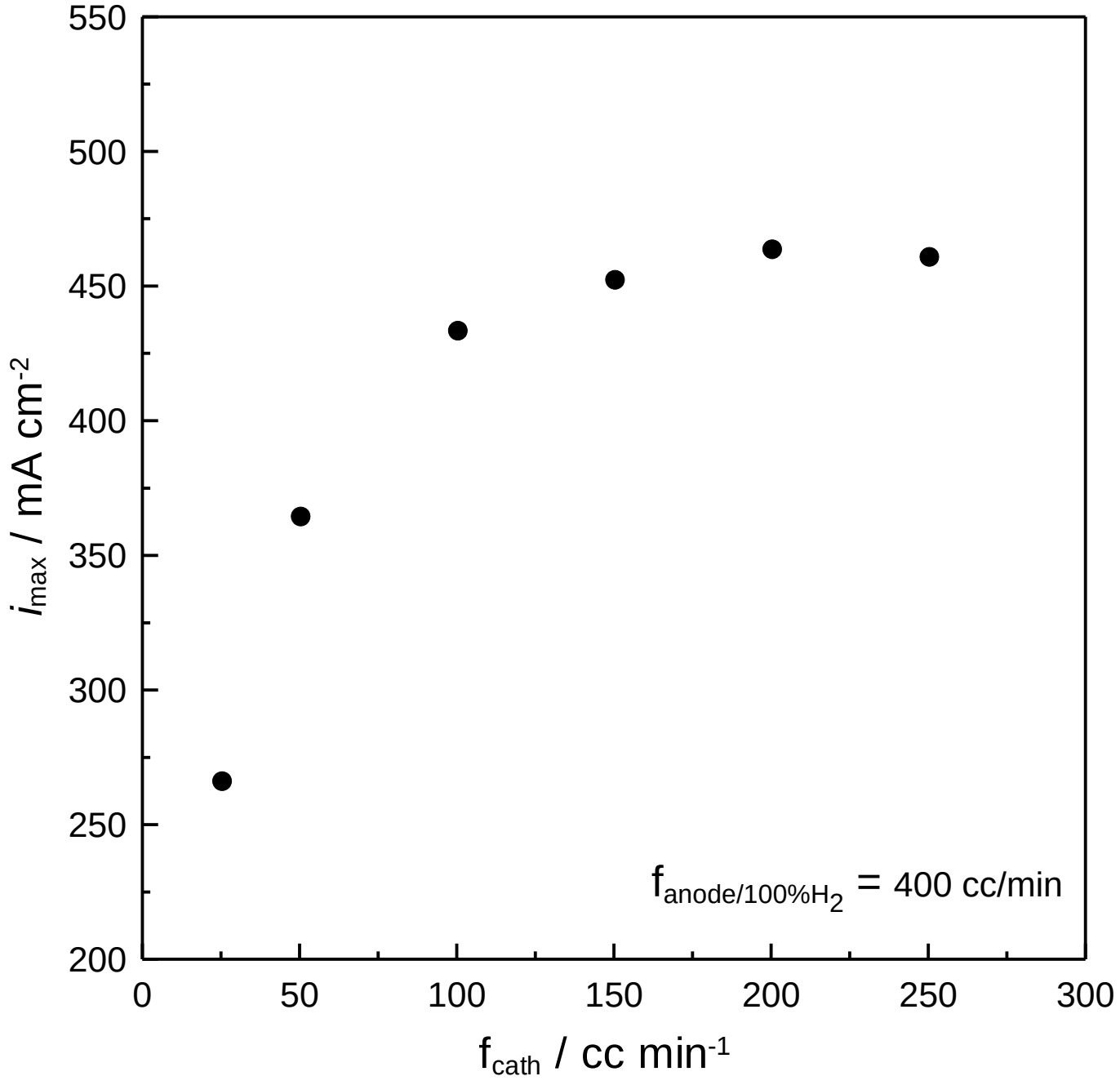
Σχήμα 15: *i*- Ε καμπύλες για διαφορετικές παροχές αέρα και σταθερή ροή καυσίμου (400 cc/min)



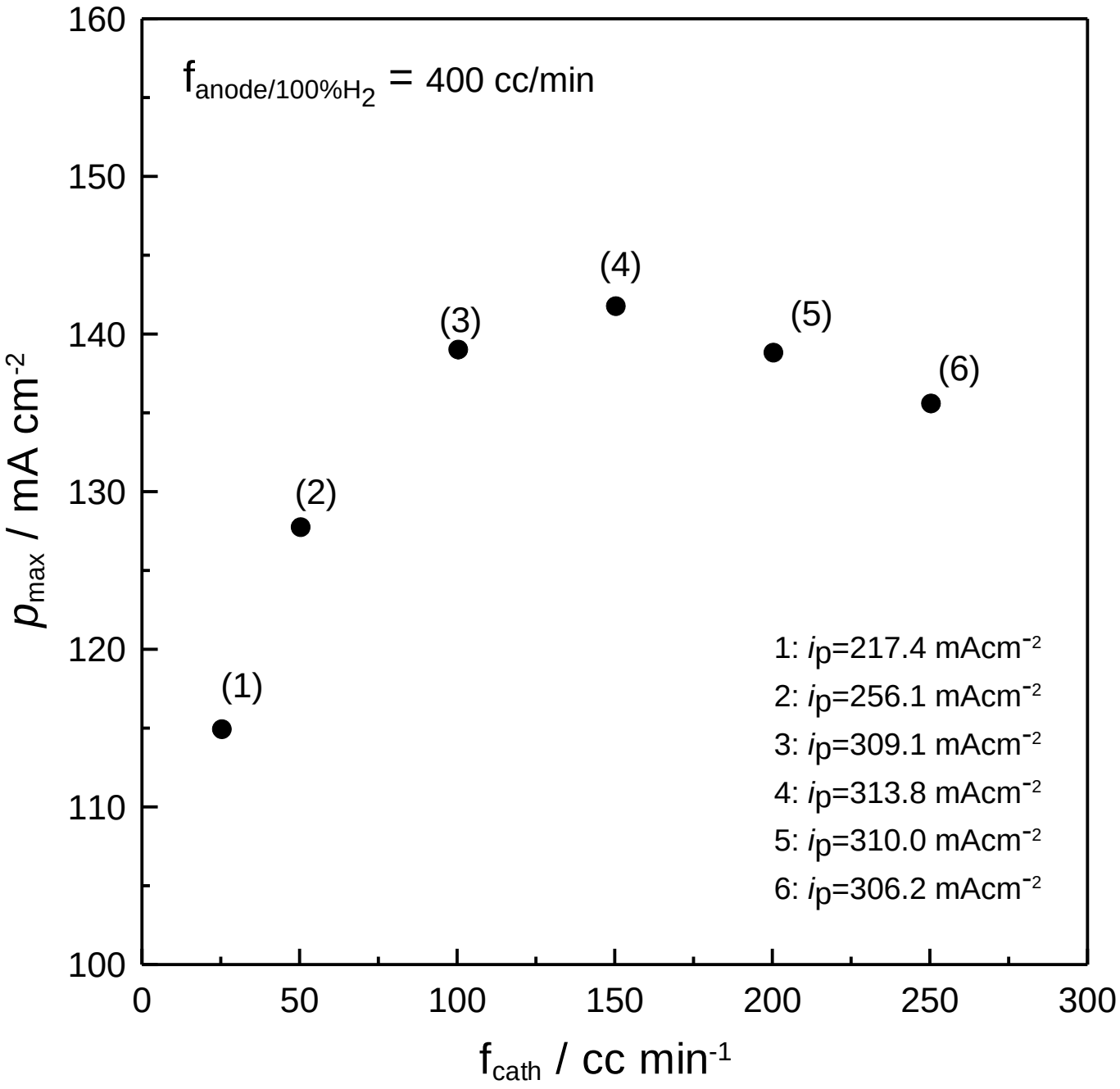
Σχήμα 16: f_c – R καμπύλη για σταθερή πυκνότητα ρεύματος (150 mA/cm²)



Σχήμα 17: *i* – p καμπύλες για διαφορετικές παροχές αέρα και σταθερή ροή καυσίμου (400 cc/min)



Σχήμα 18: i_{max} - f_{cath} καμπύλη για παροχές αέρα και σταθερή ροή καυσίμου (400 cc/min)



Σχήμα 19: p_{max} – f_{cath} καμπύλη για παροχές αέρα και σταθερή ροή καυσίμου (400 cc/min)

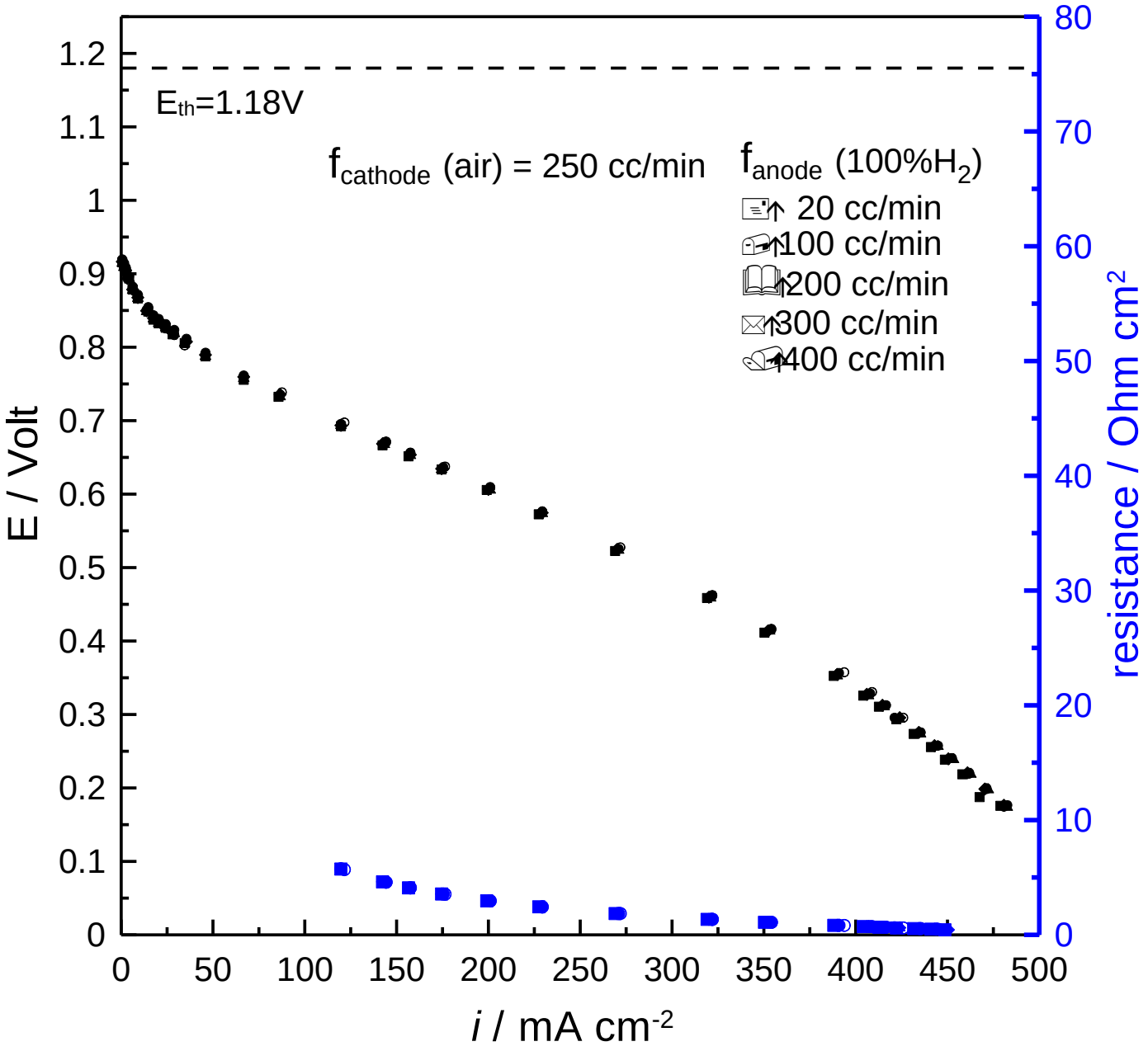
5.2 Επίδραση της παροχής καθαρού υδρογόνου (100% H_2) στην απόδοση της κυψελίδας

Στο πείραμα αυτό, που διεξήχθηκε πάλι σε θερμοκρασία T=25°C και πίεση ατμοσφαιρική, επιλέξαμε να κρατήσουμε σταθερή την παροχή του αέρα στα 250 cc/min ενώ παράλληλα αυξάναμε την παροχή του υδρογόνου στην άνοδο ξεκινώντας από τα 20 cc/min, στα 100 cc/min, στα 200 cc/min, στα 300 cc/min και στα 400 cc/min. Στο διάγραμμα τάσης – έντασης (σχήμα 20) παρατηρούμε ότι δεν έχουμε καμιά μεταβολή στις καμπύλες οι οποίες σχεδόν συμπίπτουν. Μπορούμε να συμπεράνουμε λοιπόν ότι αν έχουμε καθαρό υδρογόνο δεν παίζει ρόλο η παροχή με την οποία εισάγεται το καύσιμο στην κυψελίδα. Πιθανότατα παροχές πολύ μικρότερες των 20 cc/min να οδηγούσαν σε διαφοροποιημένες καμπύλες. Λόγω όμως των ροομέτρων μάζας δεν μπορέσαμε να πραγματοποιήσουμε πειράματα με f_{anode} < 20 cc/min. Για το λόγο αυτό προκειμένου να δούμε τη συμπεριφορά του συστήματος σε χαμηλότερες μερικές πιέσεις υδρογόνου πραγματοποιήθηκαν πειράματα με χρήση αραιωμένου καυσίμου τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω. Και σ'αυτή την περίπτωση παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το ρεύμα μειώνεται η αντίσταση, η οποία σχετίζεται με το πόσο εύκολα ή δύσκολα διαπερνούν τα πρωτόνια τη μεμβράνη της κυψελίδας. Και στις 5 διαφορετικές παροχές της ανόδου όπως αναμένεται η αντίσταση είναι η ίδια.

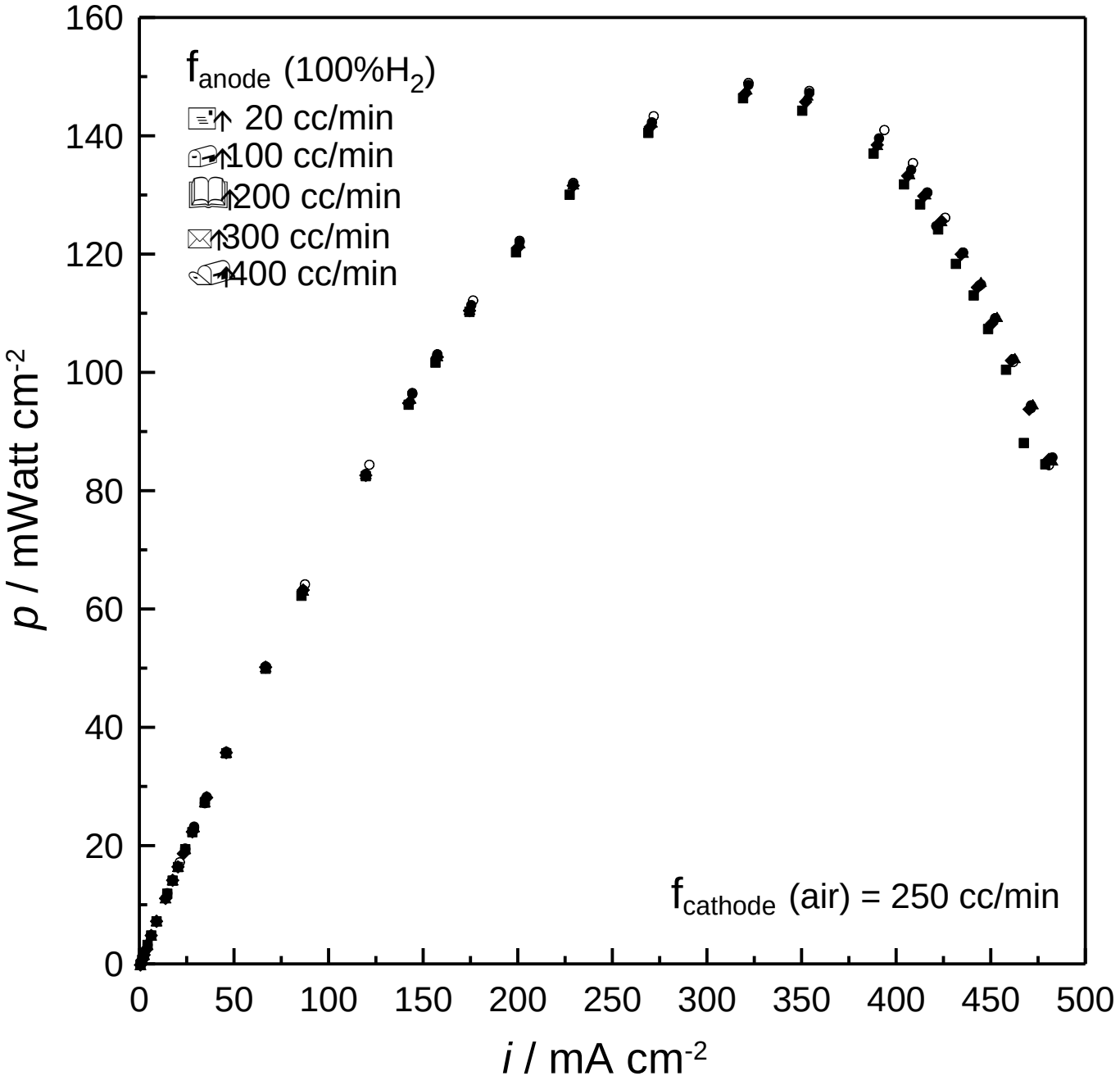
Παρόμοια κατάσταση έχουμε και στο διάγραμμα της ισχύος συναρτήσει του ρεύματος (σχήμα 21) με τις καπλύλες να παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά. Όσο αυξάνεται η παροχή στην άνοδο δεν υπάρχει σημαντική επίδραση στην ισχύ και όλες οι καμπύλες για τις διάφορες τιμές της f_{anode} σχεδόν συμπίπτουν.

Τέλος στο διάγραμμα του μέγιστου ρεύματος συναρτήσει της παροχής στην άνοδο (σχήμα 22) δεν παρατηρείται καμιά σημαντική επίδραση και όλα τα μέγιστα ρεύματα για κάθε τιμή της παροχής ανόδου κυμαίνονται γύρω στα 480 mA/cm^2, ενώ στο διάγραμμα της μεγίστης ισχύος συναρτήσει της παροχής του υδρογόνου (σχήμα 23) επίσης δεν παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές και οι τιμές κινούνται από 145 έως 150 mWatt/cm^2.

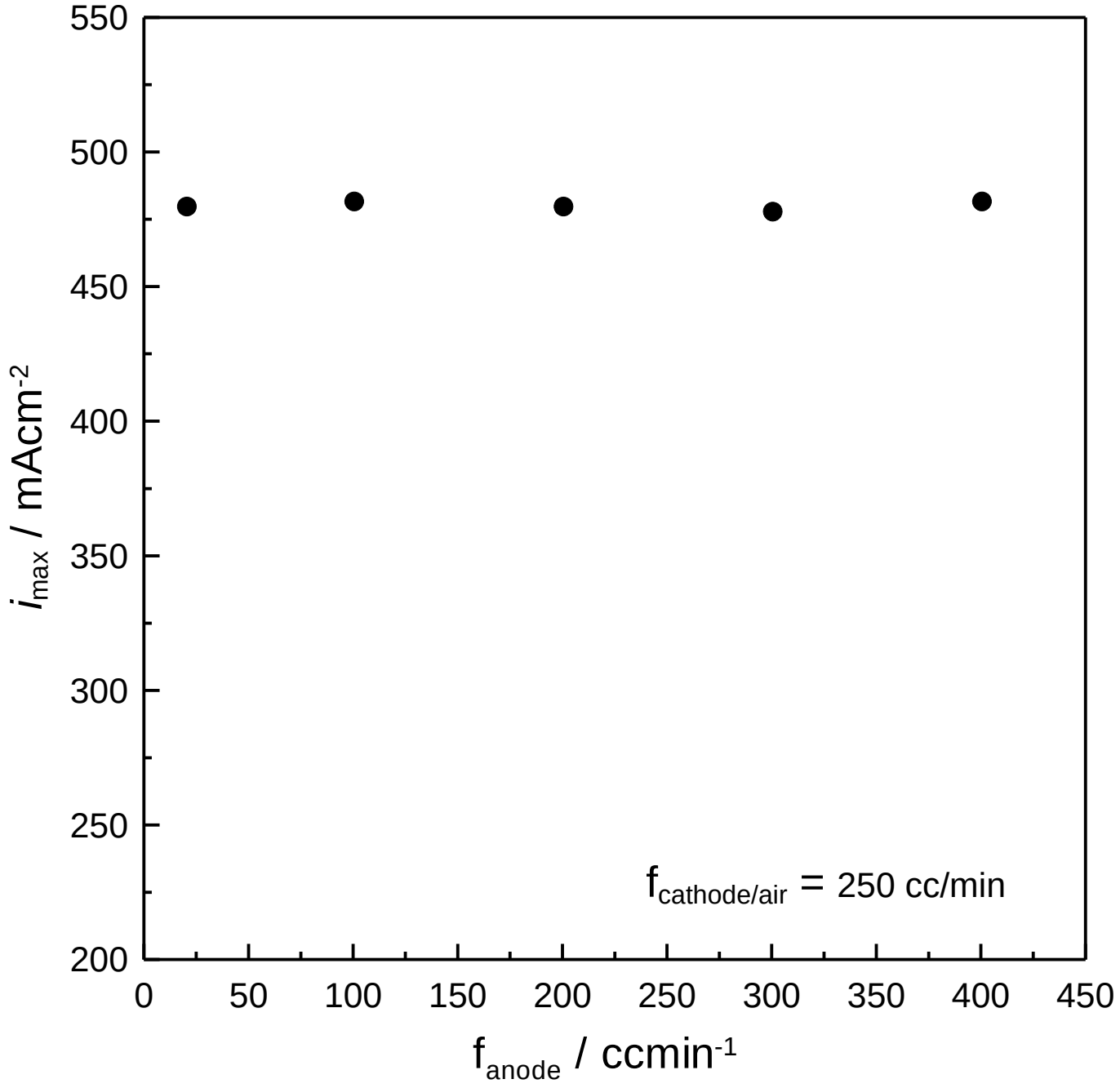
Παραθέτονται τα διαγράμματα



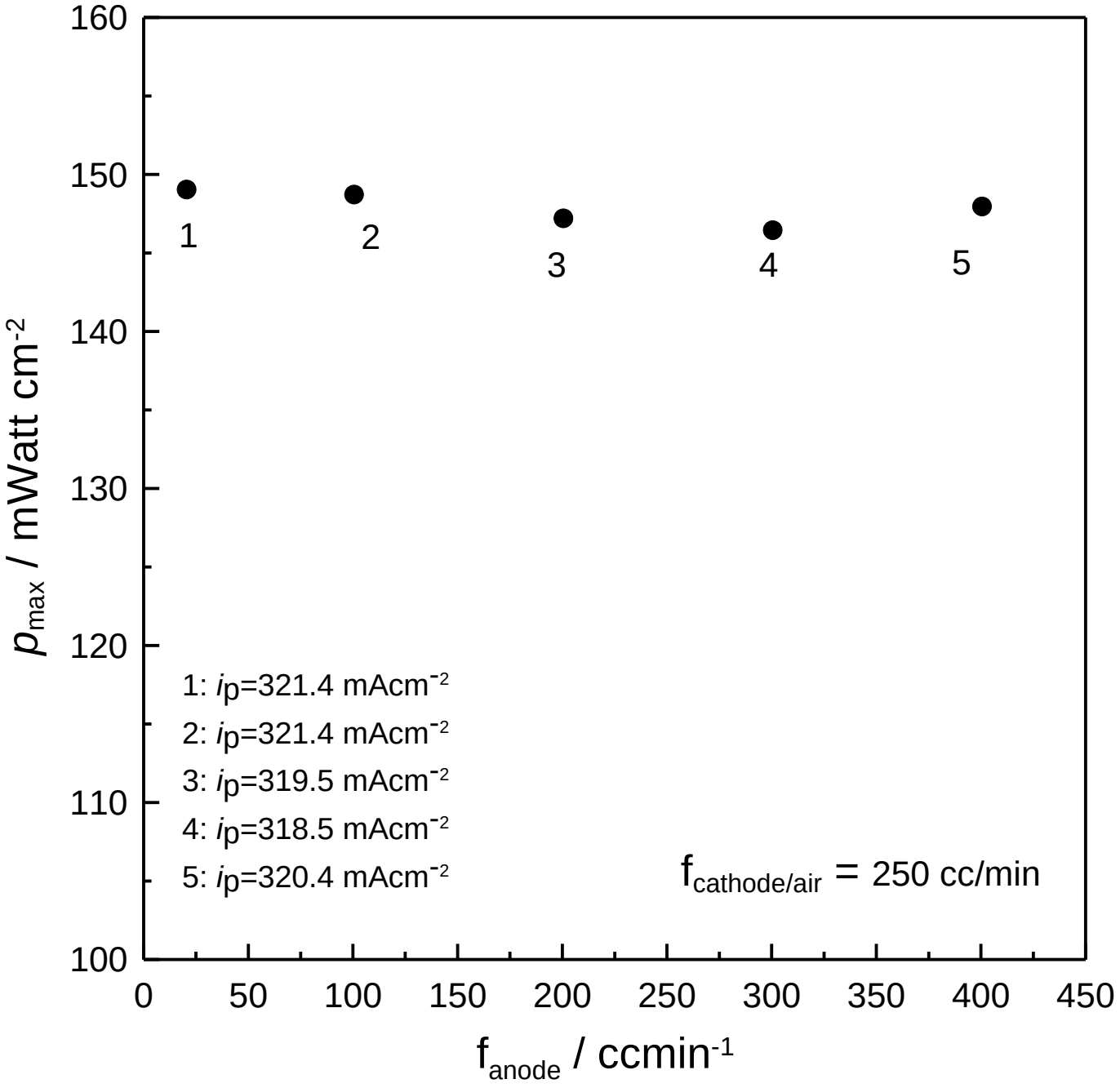
Σχήμα 20: *i* – E καμπύλες για διαφορετικές παροχές καυσίμου (100% H2) και σταθερή ροή του αέρα (250 cc/min)



Σχήμα 21: *i* - p καμπύλες για διαφορετικές παροχές καυσίμου (100% H2) και σταθερή ροή του αέρα (250 cc/min)



Σχήμα 22: i_{max} - f_{anode} καμπύλη για παροχές καυσίμου (100% H2) και σταθερή ροή του αέρα (250 cc/min)



Σχήμα 23: p_{max} – f_{anode} καμπύλη για παροχές καυσίμου (100% H2) και σταθερή ροή του αέρα (250 cc/min)

5.3 Επίδραση της παροχής υδρογόνου (περιεκτικότητας: 3% H_2) στην απόδοση της κυψελίδας

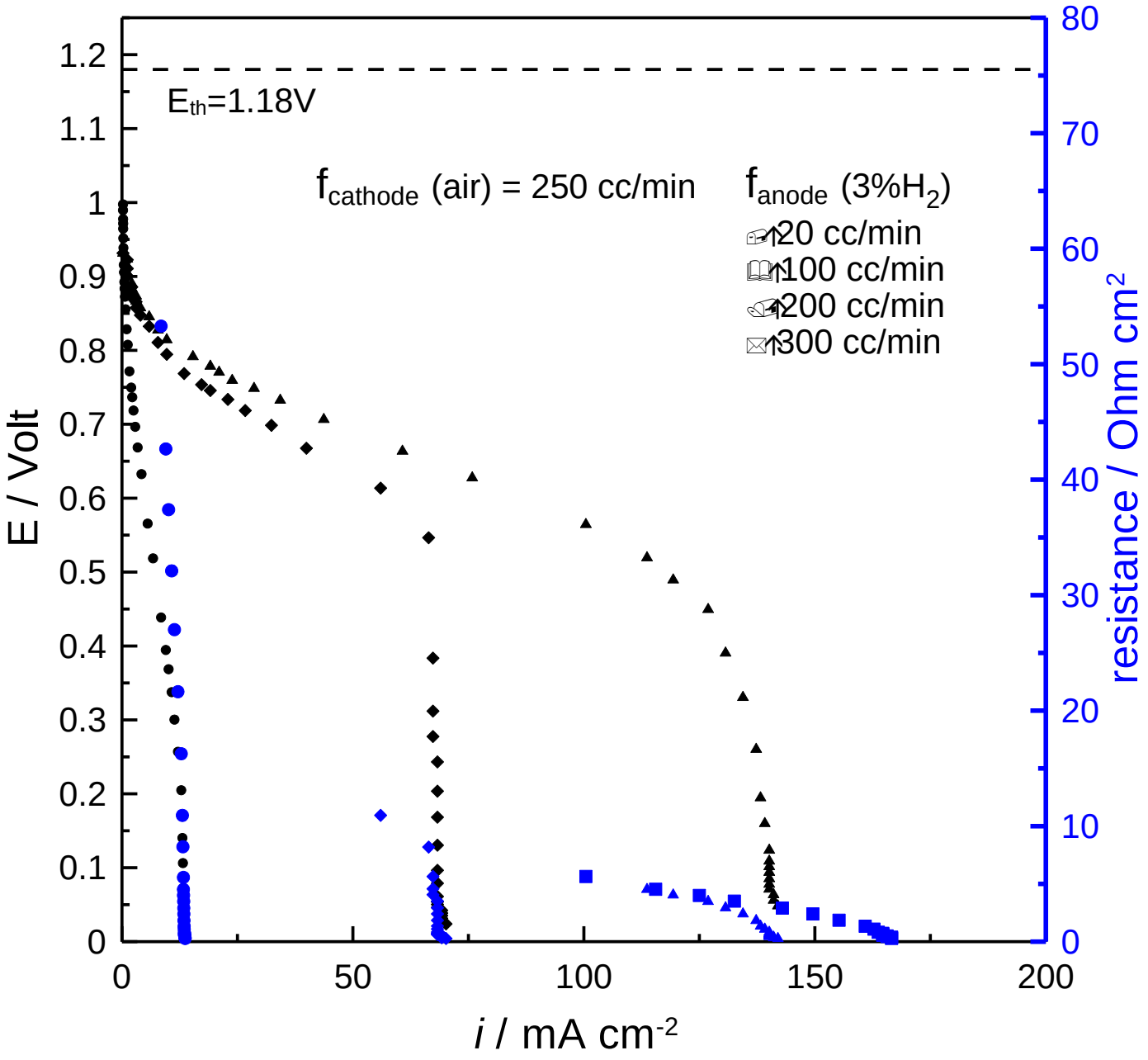
Στο συγκεκριμένο πείραμα, θερμοκρασία T=25°C και πίεση ατμοσφαιρική, κρατήσαμε σταθερή και πάλι την παροχή του αέρα στα 250 cc/min ενώ τροφοδοτήσαμε την άνοδο με υδρογόνο αραιωμένο με ήλιο, περιεκτικότητας 3% και μεταβάλαμε την παροχή από 20 cc/min, σε 100 cc/min, 200 cc/min και 300 cc/min. Παρατηρούμε ότι αύξηση της παροχής αραιωμένου καυσίμου οδηγεί σε αύξηση του ρεύματος και της απόδοσης της κυψελίδας, αντίθετα με τα όσα παρατηρήθηκαν στα σχήματα 20 και 21. Αυτό συμβαίνει διότι λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας και της χαμηλής παροχής δεν εισέρχεται στο κελί ικανή και σημαντική ποσότητα υδρογόνου ώστε να λειτουργήσει σωστά, με αποτέλεσμα η τιμή του ρεύματος υπό συνθήκες χαμηλής παροχής να είναι πολύ μικρή. Με την αύξηση της παροχής, όμως, μεγάλη ποσότητα καυσίμου (H_2) μπορεί να χημειορροφηθεί δίνοντας περισσότερο ατομικό υδρογόνο διαθέσιμο για αναγωγή του καθοδικού αερίου (O_2). Επομένως σε χαμηλές περιεκτικότητες καυσίμου σημαντικότερο ρόλο παίζει η παροχή στην άνοδο της κυψελίδας. Παρατηρώντας τα σχήματα 24 και 20 για την ίδια παροχή f_{anode} = 300 cc/min και $f_{cathode}$ = 250 cc/min οι αντίστοιχες τιμές του ρεύματος για 3% H_2 είναι 166 mA/cm^2 ενώ για 100% H_2 είναι 477 mA/cm^2. Επίσης παρατηρούμε ότι για μικρές παροχές (20 cc/min) η αντίσταση είναι πολύ μεγάλη ενώ όσο αυξάνεται η παροχή, το ρεύμα μεγαλώνει και η αντίσταση μειώνεται καθώς όλο και περισσότερα πρωτόνια διαπερνούν τη μεμβράνη.

Το θεωρητικό δυναμικό και σ' αυτήν την περίπτωση είναι 1,18V. Το δυναμικό που υπολογίστηκε από το πείραμα όπως φαίνεται στο διάγραμμα δεν ξεπερνάει το 1V. Το δυναμικό αυτό όπως αναφέρθηκε μειώνεται όταν το κελί βρίσκεται σε λειτουργία λόγω διαφόρων απωλειών όπως: απώλειες ενεργοποίησης, ωμικές απώλειες και απώλειες διάχυσης. Αυτές οι απώλειες συνήθως δημιουργούν πτώση της τάσης της κυψελίδας.

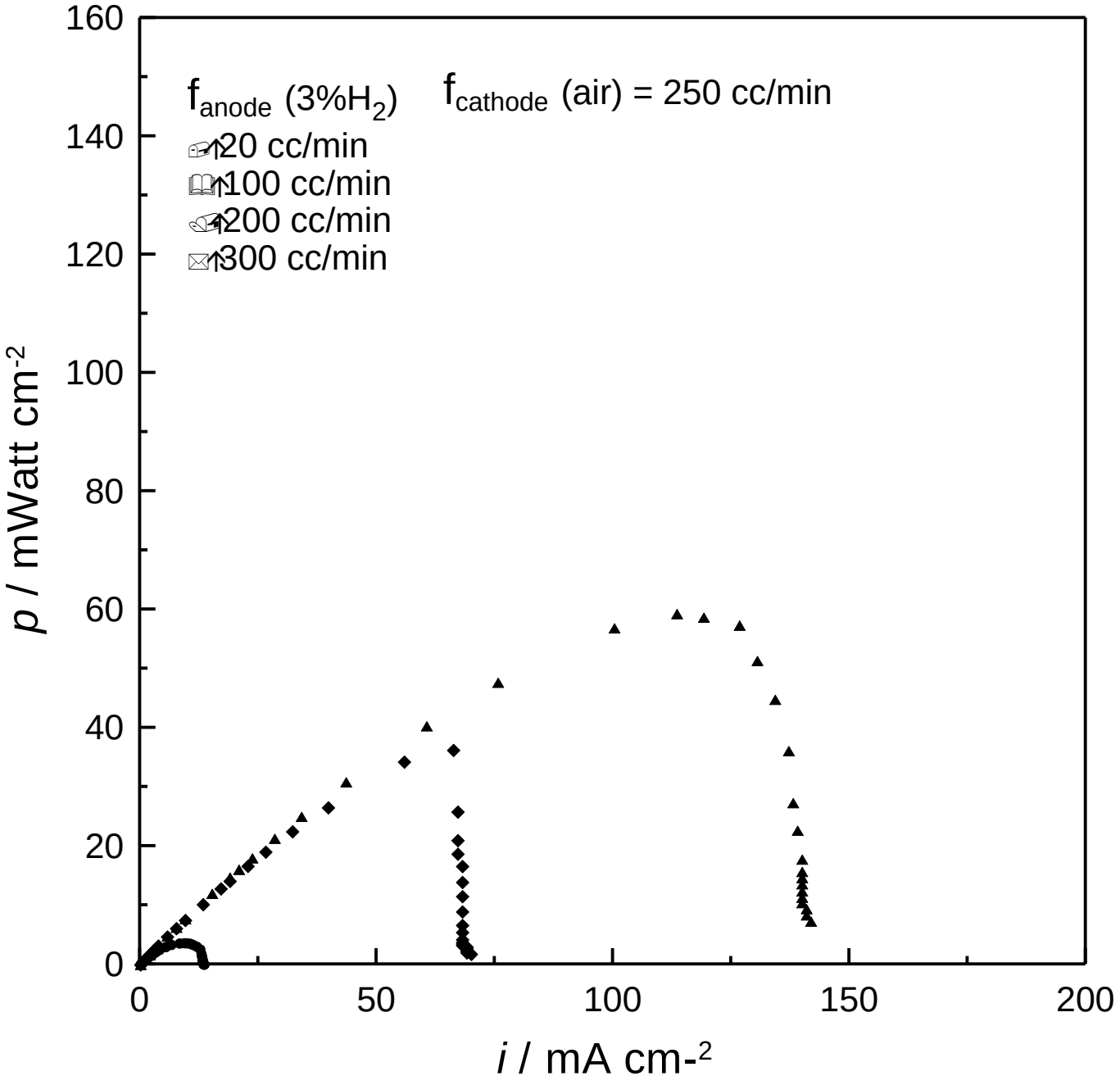
Από το διάγραμμα της ισχύος συναρτήσει του ρεύματος (σχήμα 25) παρατηρούμε ότι για περιεκτικότητα καυσίμου 3% σε H_2 η ισχύς είναι ίση με 64 mWatt/cm^2 τιμή πολύ μικρότερη από την τιμή που λαμβάνουμε αν είχαμε περιεκτικότητα καυσίμου 100% σε H_2 (148 mWatt/cm^2).

Από το διάγραμμα του μεγίστου ρεύματος συναρτήσει της παροχής υδρογόνου στην άνοδο (σχήμα 26), παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η παροχή τόσο αυξάνεται το ρεύμα. Το ίδιο ισχύει και για το διάγραμμα της μεγίστης ισχύος συναρτήσει της παροχής του υδρογόνου (σχήμα 27). Και στις δύο περιπτώσεις η αύξηση μοιάζει να είναι γραμμική.

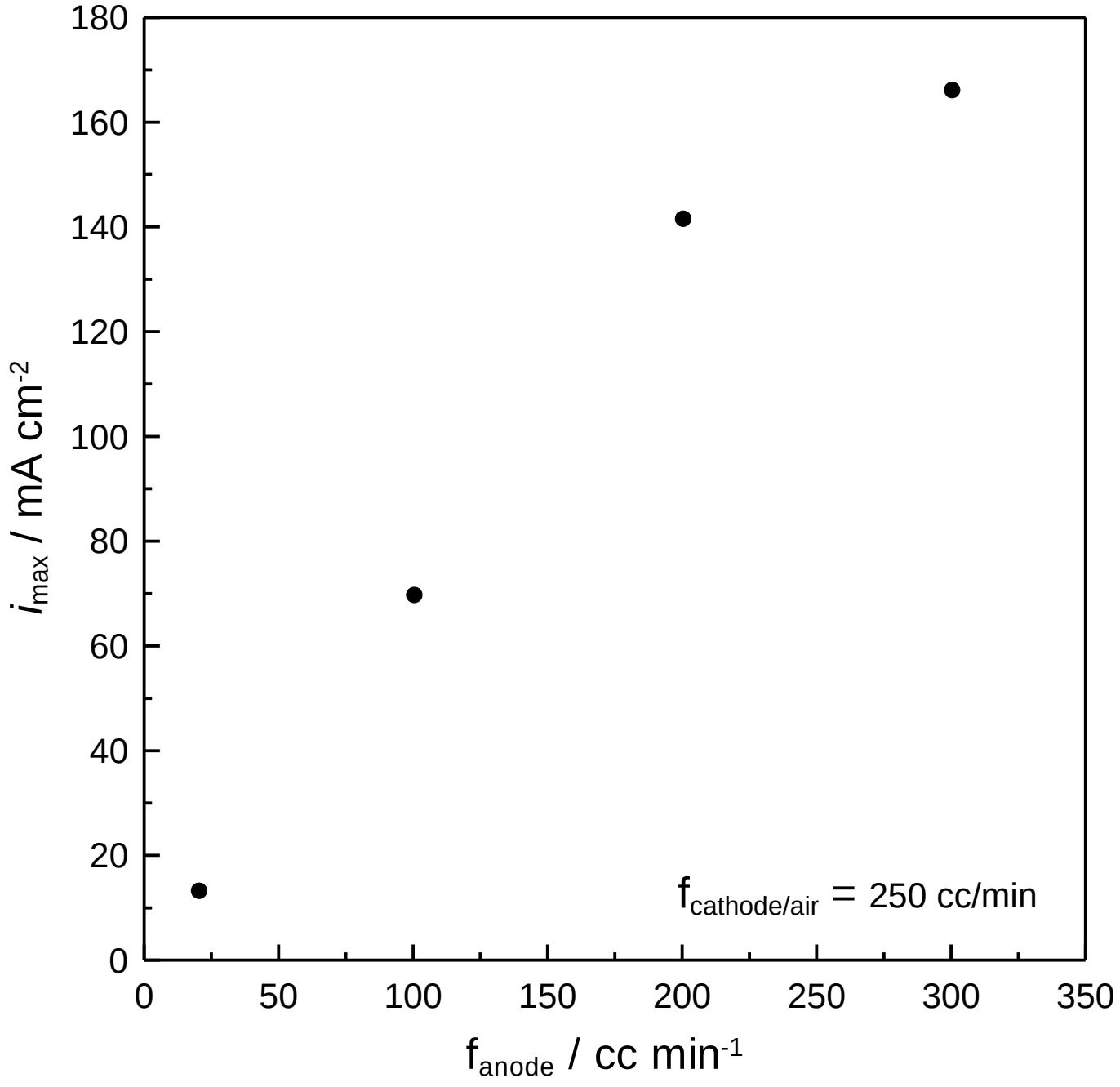
Παραθέτονται τα διαγράμματα



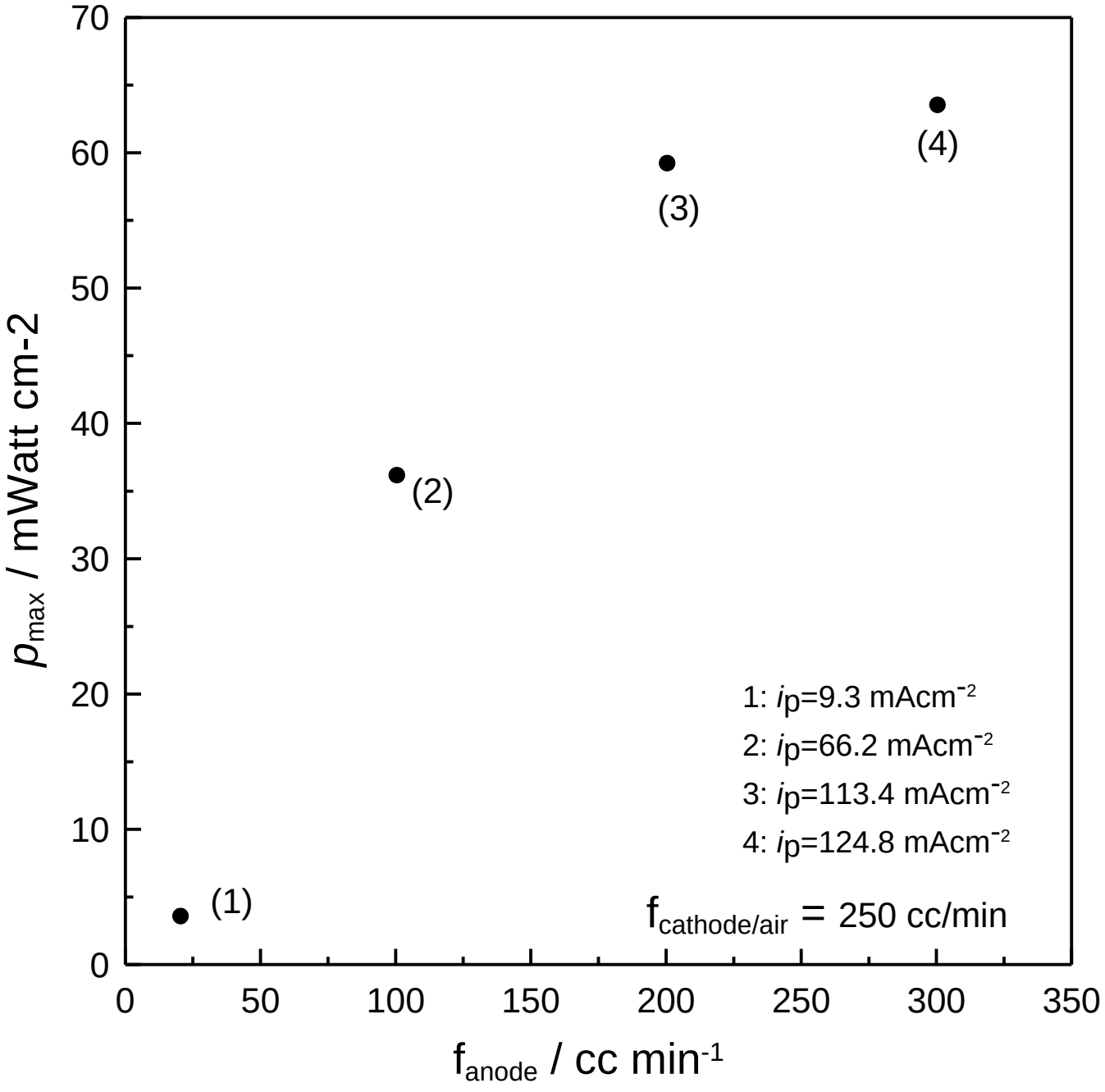
Σχήμα 24: *i* – E καμπύλες για διαφορετικές παροχές καυσίμου (3% H2) και σταθερή ροή του αέρα (250 cc/min)



Σχήμα 25: *i* - p καμπύλες για διαφορετικές παροχές καυσίμου (3% H2) και σταθερή ροή του αέρα (250 cc/min)



Σχήμα 26: i_{max} – f_{anode} καμπύλη για παροχές καυσίμου (3% H2) και σταθερή ροή του αέρα (250 cc/min)



Σχήμα 27: p_{max} – f_{anode} καμπύλη για παροχές καυσίμου (3% H2) και σταθερή ροή του αέρα (250 cc/min)

5.4 Επίδραση της μερικής πιέσεως του υδρογόνου στην απόδοση της κυψελίδας

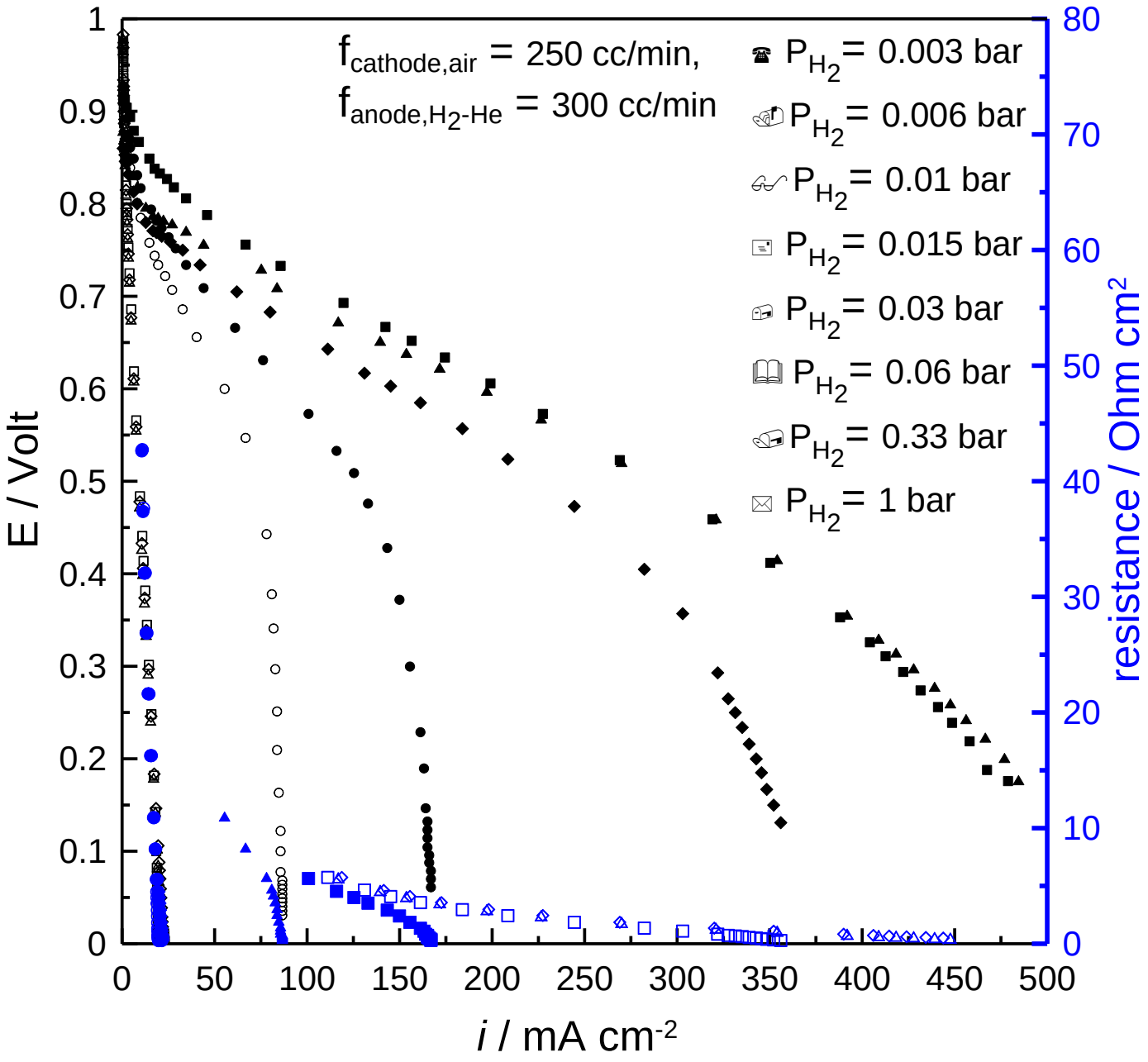
Στο πείραμα αυτό, το οποίο έγινε σε θερμοκρασία T=25°C και πίεση ατμοσφαιρική, επιλέξαμε από τα προηγούμενα πειράματα τις βέλτιστες παροχές ανόδου και καθόδου ($f_{cathode,air}$ = 250 cc/min , $f_{anode,H2-He}$ = 300 cc/min) και κρατώντας τες σταθερές μεταβάλαμε τη μερική πίεση του υδρογόνου, δηλαδή την περιεκτικότητά του. Αυτό το πετύχαμε αραιώνοντας το υδρογόνο με ήλιο. Οι τιμές της μερικής πιέσεως που χρησιμοποιήθηκαν για τη διενέργεια του πειράματος ήταν P_{H2} = 0,003 bar, 0,006 bar, 0,01 bar, 0,015 bar, 0,03 bar, 0,06 bar, 0,33 bar και 1 bar. Από το διάγραμμα τάσης – έντασης (σχήμα 28) παρατηρούμε ότι για τις τιμές 0,003, 0,006 και 0,01 bar η ποσότητα του υδρογόνου που εισέρχεται στην κυψελίδα είναι πολύ μικρή με αποτέλεσμα πολύ λίγα πρωτόνια να διαπερνούν τη μεμβράνη και άρα πολύ λίγα ηλεκτρόνια να κινούνται για τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος. Στο ίδιο διάγραμμα βλέπουμε ότι για τις τιμές αυτές οι τρείς καμπύλες συμπίπτουν μεταξύ τους και η τιμή του ρεύματος δεν ξεπερνάει τα 25 mA/cm^2. Με την αύξηση όμως της μερικής πιέσεως όλο και περισσότερο υδρογόνο τροφοδοτεί την άνοδο της κυψέλης, έτσι η οξείδωση του υδρογόνου λαμβάνει χώρα σε όλη την έκταση του καταλύτη, και έτσι έχουμε ύπαρξη αξιόλογης ροής ρεύματος. Για τις τιμές των 0,33 και 1 bar οι καμπύλες έχουν την ίδια κλίση και σχεδόν συμπίπτουν. Επίσης παρατηρούμε ότι για τις χαμηλές τιμές της μερικής πίεσης (0,003, 0,006, 0,01 bar) η αντίσταση είναι αρκετά μεγάλη ενώ όσο αυξάνεται η μερική πίεση και μεγαλώνει το ρεύμα τόσο μικραίνει η αντίσταση.

Από το διάγραμμα της ισχύος συναρτήσει του ρεύματος (σχήμα 29) παρατηρούμε ότι η ισχύς για τις τιμές 0,003, 0,006 και 0,01 bar είναι πολύ μικρή, και όσο αυξάνεται η μερική πίεση του υδρογόνου αυξάνεται και η ισχύς. Όπως αναμένεται η μέγιστη ισχύς επιτυγχάνεται για τιμές της μερικής πιέσεως μεγαλύτερες από 0,33 bar.

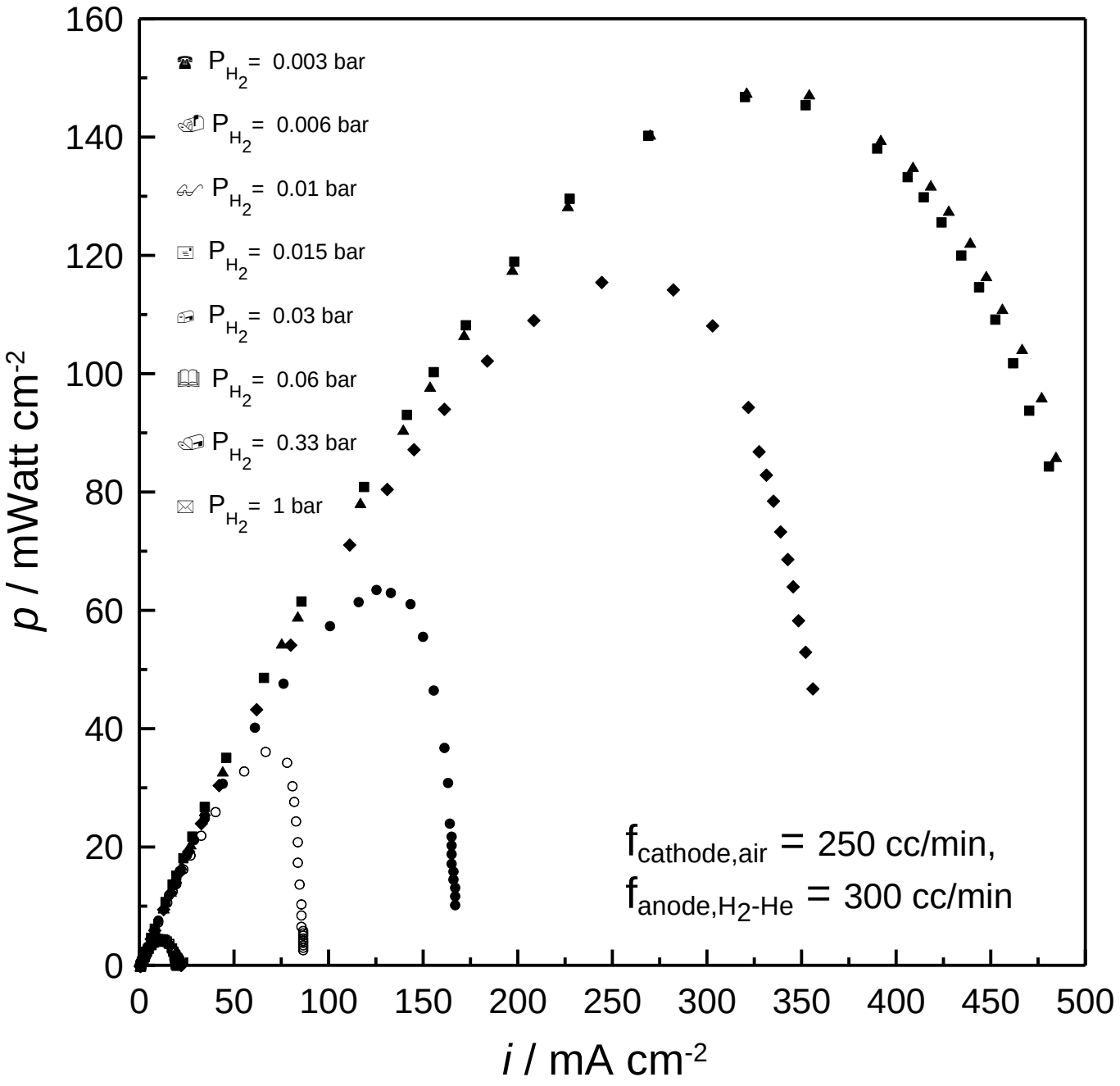
Από το διάγραμμα του μεγίστου ρεύματος συναρτήσει της μερικής πιέσεως του υδρογόνου στην άνοδο (σχήμα 30), παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η μερική πίεση τόσο αυξάνεται το i_{max}, μέχρι την τιμή των 0,33 bar όπου παίρνει τη μεγαλύτερη τιμή ενώ για 1 bar η τιμή του i_{max} είναι κατάτι μικρότερη (εντός του πειραματικού σφάλματος).

Από το διάγραμμα της μεγίστης ισχύος συναρτήσει της μερικής πιέσεως του υδρογόνου (σχήμα 31) παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η μερική πίεση τόσο αυξάνεται το p_{max}, και για τις τιμές των 0,33 και 1 bar το p_{max} έχει την ίδια τιμή (147 mWatt/cm^2).

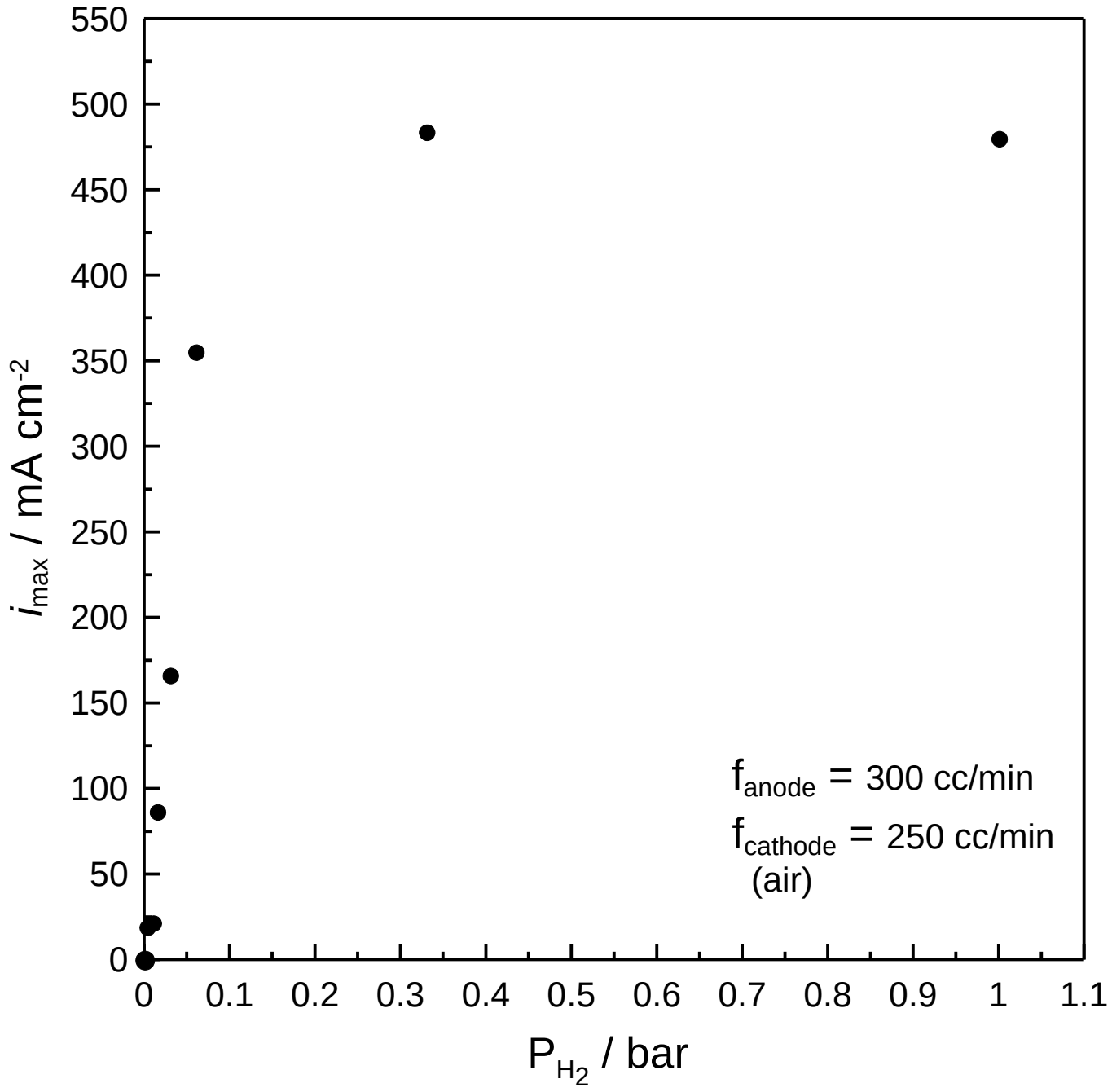
Παραθέτονται τα διαγράμματα



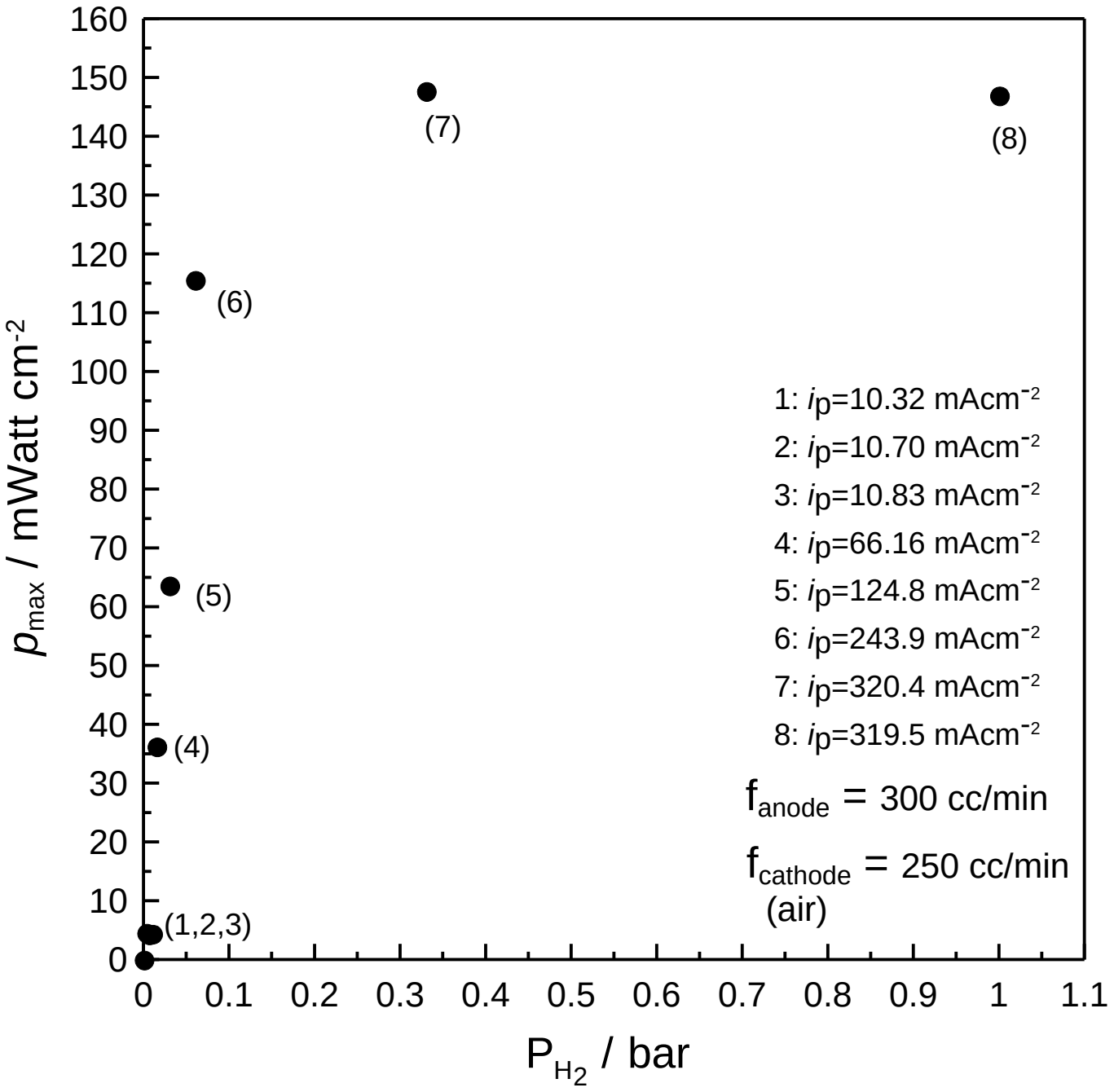
Σχήμα 28: *i* - E καμπύλες για σταθερή ροή καυσίμου (300 cc/min) και αέρα (250 cc/min), αλλά για διαφορετικές μερικές πιέσεις υδρογόνου



Σχήμα 29: *i* - p καμπύλες για σταθερή ροή καυσίμου (300 cc/min) και αέρα (250 cc/min), αλλά για διαφορετικές μερικές πιέσεις υδρογόνου



Σχήμα 30: i_{max} - P_{H2} καμπύλη για σταθερή ροή καυσίμου (300 cc/min) και αέρα (250 cc/min)



Σχήμα 31: p_{max} - P_{H2} καμπύλη για σταθερή ροή καυσίμου (300 cc/min) και αέρα (250 cc/min)

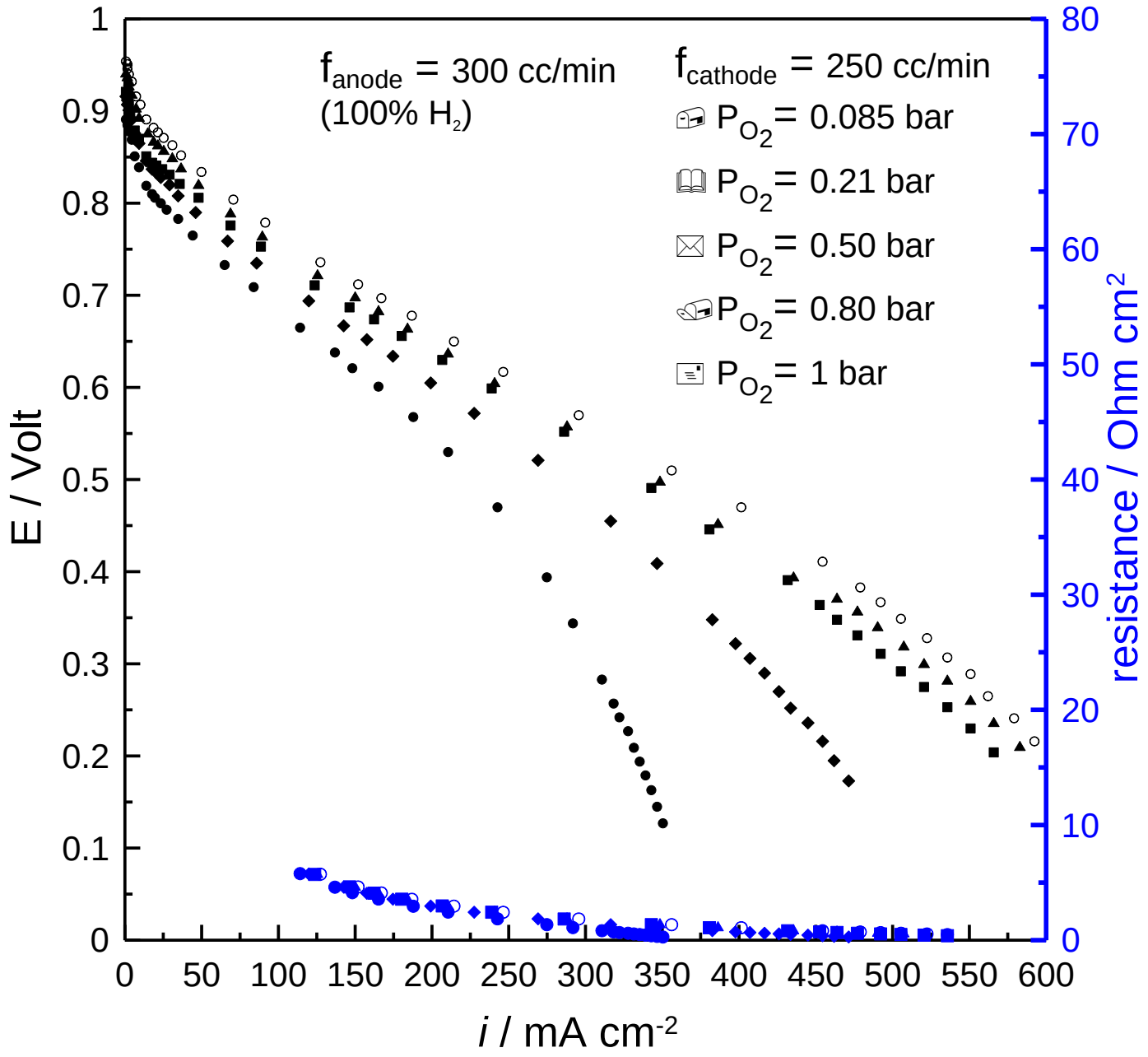
5.5 Επίδραση της μερικής πιέσεως του οξυγόνου στην απόδοση της κυψελίδας

Σε αυτό το πείραμα όπου επικρατούσαν οι ίδιες συνθήκες όπως παραπάνω δηλαδή T=25°C και πίεση ατμοσφαιρική και με σταθερές τις βέλτιστες παροχές ανόδου και καθόδου (f_{anode} = 300 cc/min, $f_{cathode}$ = 250 cc/min) μεταβάλαμε τη μερική πίεση του οξυγόνου. Μεταβάλαμε δηλαδή την περιεκτικότητά του αραιώνοντας το με ήλιο. Οι τιμές της μερικής πιέσεως που επιλέχθηκαν για τη διενέργεια του πειράματος ήταν P_{O2} = 0,085 bar, 0,21 bar, 0,50 bar, 0,80 bar και 1 bar. Από το διάγραμμα τάσης – έντασης (σχήμα 32) και τις καμπύλες που προέκυψαν για τις προαναφερθείσες τιμές παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η μερική πίεση του οξυγόνου τόσο αυξάνεται το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από την κυψελίδα. Επίσης παρατηρούμε ότι με καθαρό υδρογόνο για καύσιμο στην άνοδο, όταν η μερική πίεση του οξυγόνου πάρει την τιμή του 1 bar τότε το ηλεκτρικό ρεύμα φτάνει στη μέγιστη τιμή του (600 mA/cm^2) η οποία ήταν και η μεγαλύτερη τιμή μέχρι το συγκεκριμένο πείραμα. Επίσης παρατηρούμε ότι η μεταβολή της μερικής πιέσεως του οξυγόνου δεν επηρεάζει την αντίσταση κάτι που είναι απολύτως φυσιολογικό μιας και η αντίσταση συνδέεται με την κίνηση H^+. Από το διάγραμμα της ισχύος συναρτήσει του ρεύματος (σχήμα 33) παρατηρούμε ότι η ισχύς αυξάνεται όσο αυξάνεται η μερική πίεση του οξυγόνου και φτάνει στη μέγιστη τιμή της για P_{O2} = 1 bar.

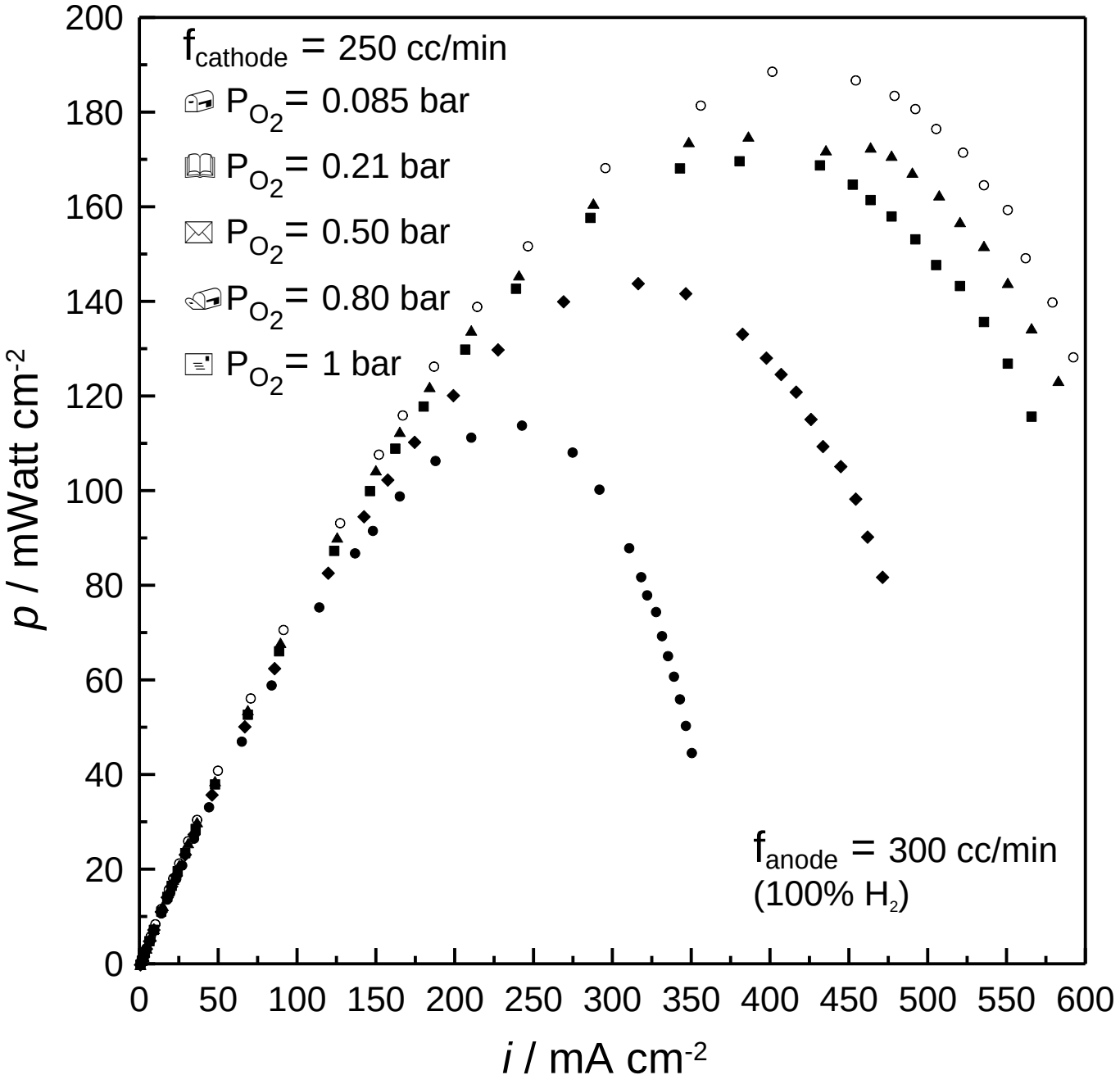
Από το διάγραμμα του μεγίστου ρεύματος συναρτήσει της μερικής πιέσεως του οξυγόνου στην κάθοδο (σχήμα 34), παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η μερική πίεση τόσο αυξάνεται το i_{max}, στην τιμή του 1 bar παίρνει τη μέγιστη τιμή, 600 mA/cm^2.

Από το διάγραμμα της μεγίστης ισχύος συναρτήσει της μερικής πιέσεως του οξυγόνου (σχήμα 35) παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η μερική πίεση τόσο αυξάνεται το p_{max}, και για την τιμή P_{O2} = 1 bar το p_{max} έχει την μέγιστη τιμή 190 mWatt/cm^2.

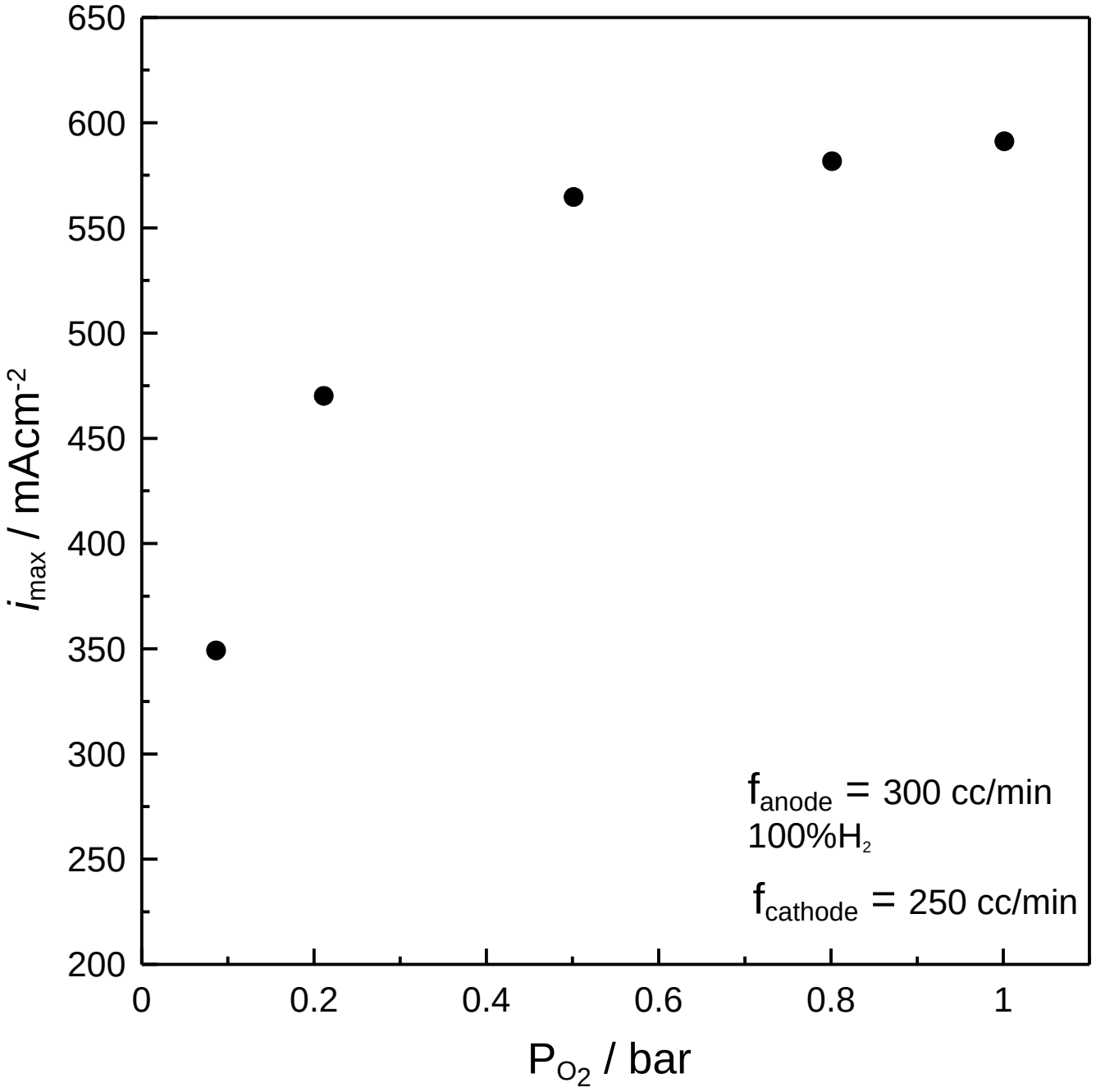
Παραθέτονται τα διαγράμματα



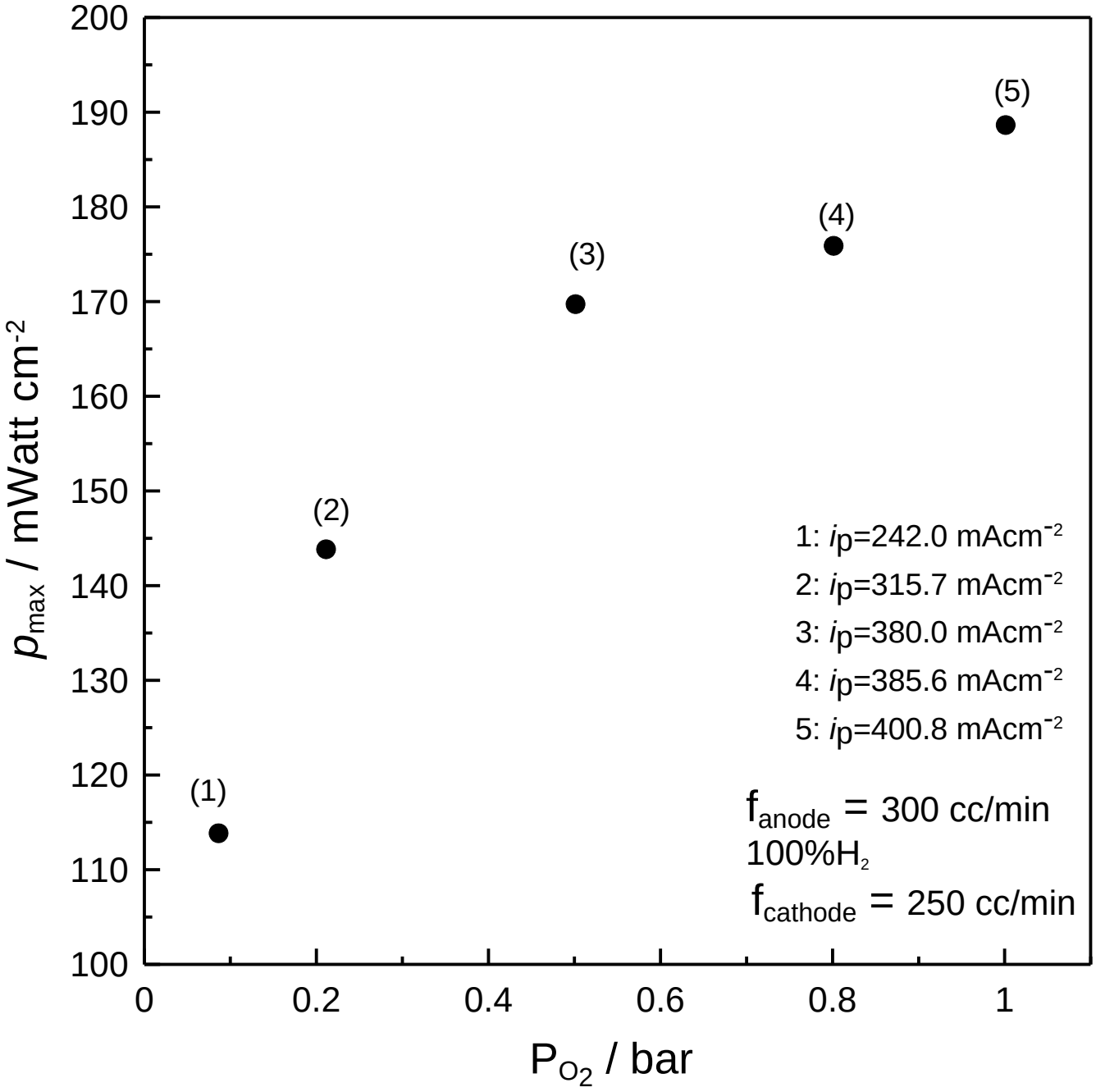
Σχήμα 32: *i* – Ε καμπύλες για σταθερή ροή καυσίμου (300 cc/min) και αέρα (250 cc/min), αλλά για διαφορετικές μερικές πιέσεις οξυγόνου



Σχήμα 33: *i* – p καμπύλες για σταθερή ροή καυσίμου (300 cc/min) και αέρα (250 cc/min), αλλά για διαφορετικές μερικές πιέσεις οξυγόνου



Σχήμα 34: i_{max} - P_{O2} καμπύλη για σταθερή ροή καυσίμου (300 cc/min) και αέρα (250 cc/min)



Σχήμα 35: p_{max} - P_{O_2} καμπύλη για σταθερή παροχή καυσίμου (300 cc/min) και αέρα (250 cc/min)

5.6 Επίδραση της υγρασίας στην απόδοση της κυψελίδας

Η υγρασία όπως αναφέρθηκε και στο κομμάτι της θεωρίας επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία της κυψελίδας καυσίμου, και ειδικότερα την απόδοση της μεμβράνης αφού επιδρά καθοριστικά στο ρυθμό μεταφοράς των ιόντων υδρογόνου. Υπάρχουν περιορισμοί στη μεταφορά του νερού λόγω της πορώδους δομής της μεμβράνης μέσα στην κυψελίδα καυσίμου. Το πάχος των ηλεκτροδίων έχει επίσης μια σημαντική επίδραση στο ποσοστό μεταφοράς μάζας και θερμότητας και ως εκ τούτου στις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων [11]. Ανεξέλεγκτη αύξηση της θερμοκρασίας και της θερμότητας που παράγεται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της κυψελίδας αυξάνει το ποσοστό εξάτμισης του νερού με αποτέλεσμα η κυψελίδα να βρεθεί σε υπερβολικά ξηρές συνθήκες τόσο για τη μεμβράνη όσο και για τα ηλεκτρόδια με αποτέλεσμα τη μειωμένη απόδοσή της. Κατά συνέπεια, η σωστή διαχείριση της υγρασίας είναι πολύ σημαντική για τη λειτουργία της κυψελίδας. Ως γενική αρχή, ο ρυθμός εξάτμισης του νερού δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό παραγωγής του λόγω φαινομένων ξηρότητας της μεμβράνης.

Στα σχήματα 36 και 37 φαίνονται τα αποτελέσματα της επίδρασης της υγρασίας στην απόδοση της κυψελίδας κάτω από διάφορες θερμοκρασιακές συνθήκες. Η αύξηση της θερμοκρασίας του κορεστή συνδέεται άμεσα με την περιεκτικότητα του αερίου ρεύματος σε υδρατμούς μιας και άνοδος της θερμοκρασίας σημαίνει άνοδος της τάσης των ατμών του H_2O μέσα στον κορεστή. Η θερμοκρασία της κυψελίδας αρχικά αυξήθηκε λόγω της παροχής θερμού αερίου στην άνοδο (έως 50^oC) και εν συνεχεία λόγω εξωτερικής παροχής θερμότητας (μέχρι 83^oC). Περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας της κυψελίδας αντενδείκνυται λόγω της θερμικής αντοχής της μεμβράνης (Nafion 117).

Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 36 η απόδοση της κυψελίδας αυξάνει με τη θερμοκρασία του κορεστή ή με άλλα λόγια με την αύξηση της μερικής πίεσης των υδρατμών που εισέρχονται στο ανοδικό ηλεκτρόδιο μαζί με το καύσιμο. Η συμπεριφορά είναι μονότονα αύξουσα αναδεικνύοντας τη θετική επίδραση της συγκέντρωσης του H_2O. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της συνολικής ατμοσφαιρικής πίεσης που επικρατεί στην άνοδο αύξηση της P_{H2O} συνοδεύεται και από μείωση της P_{H2} (έτσι ώστε $P_{H2O} + P_{H2} = 1$) και επομένως από ενδεχόμενη αρνητική συνεισφορά στην απόδοση, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο. Δεδομένου όμως ότι ακόμα και στους

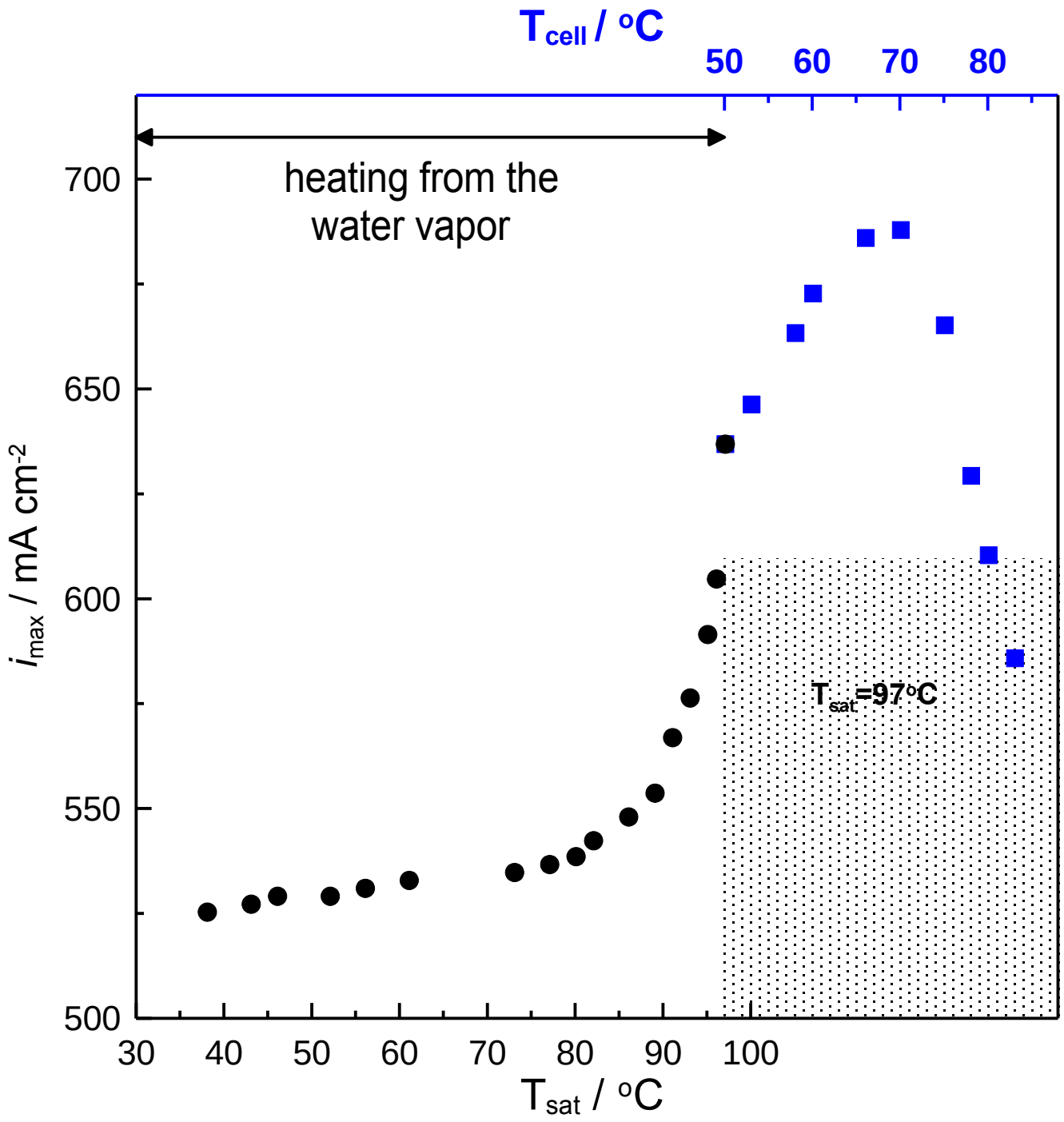
97°C η μερική πίεση του υδρογόνου παραμένει στο ανοδικό ρεύμα αρκετά υψηλή (11%) η αρνητική επίδραση που πιθανόν να έχει αναμένεται να είναι πολύ μικρή.

Ενισχυτικά της άποψης αυτής είναι και τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο σχήμα 28. Στο δεξί κομμάτι του σχήματος 36 και καθώς η θερμοκρασία της κυψελίδας αρχίζει να αυξάνει πλέον γραμμικά (από τους 50°C), υπό τη μέγιστη δυνατή υγρασία παρατηρούμε ότι η απόδοση περνά από το μέγιστο στους 70°C.

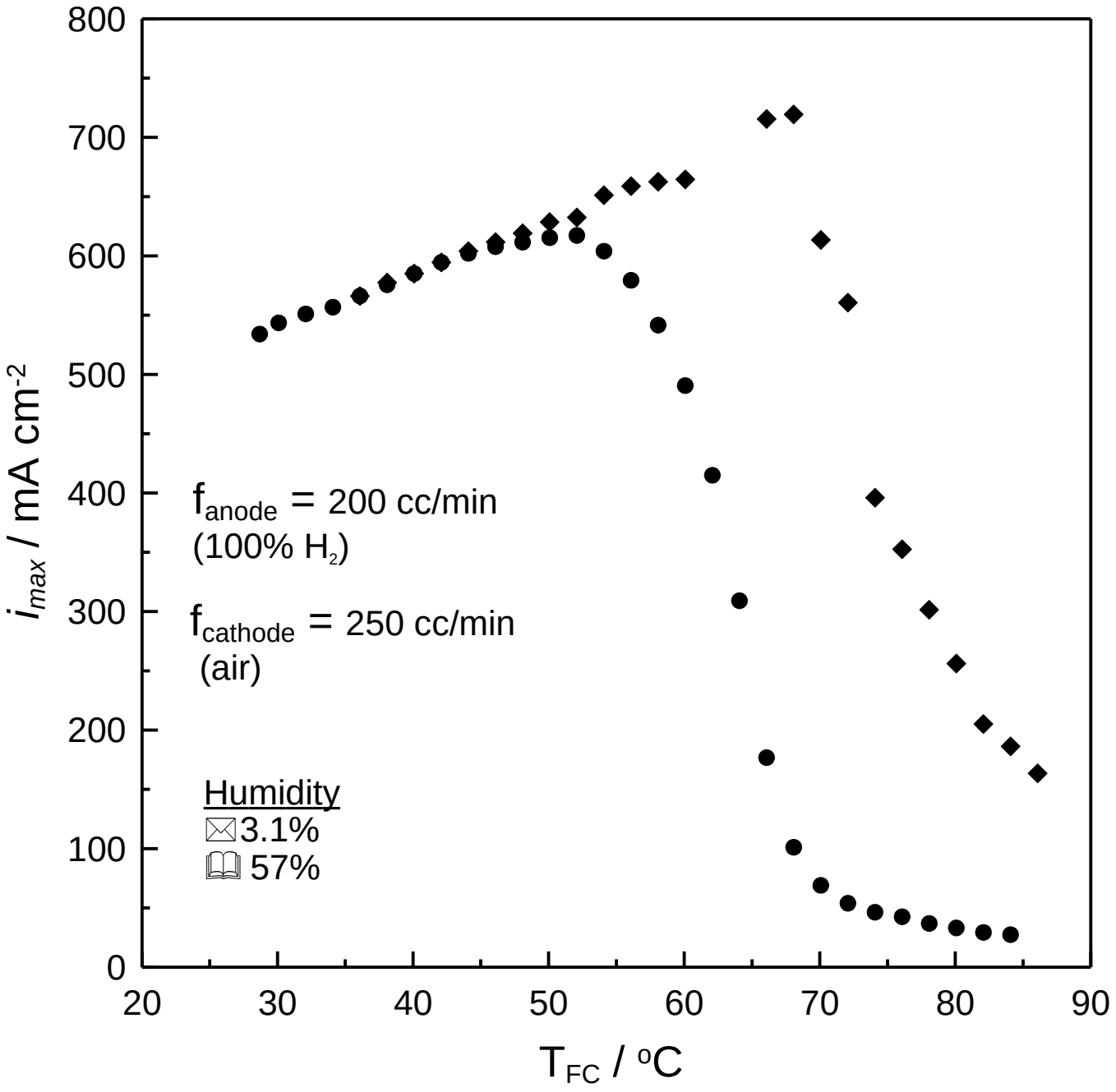
Ειδικότερα, στις χαμηλές θερμοκρασίες της κυψελίδας, (T<70°C) η δυνατότητα διαχείρισης των υδρατμών από τη μεμβράνη είναι μικρή (με συνέπεια η πραγματική σχετική υγρασία να είναι <<100%) και κατά συνέπεια αύξηση της θερμοκρασίας να οδηγεί σε καλύτερη διαχείριση άρα και αξιοποίηση της εισερχόμενης υγρασίας. Από την άλλη μεριά για υψηλές θερμοκρασίες (T>70°C) η αυξημένη δυνατότητα διαχείρισης συναγωνίζεται με τη μείωση της αγωγιμότητας της μεμβράνης λόγω της αυξημένης T που προκαλεί ξήρανση σε κατά τόπους τμήματα.

Στο σχήμα 37 φαίνεται η συμπεριφορά της κυψελίδας συναρτήσει της θερμοκρασίας της σε 2 διαφορετικές μερικές πιέσεις H_2O, η επίδραση της θερμοκρασίας της κυψελίδας στην απόδοσή της σε δύο διαφορετικές τροφοδοσίες υδρατμών (3,1% και 57%). Όπως παρατηρούμε, η απόδοση της κυψελίδας αυξάνει όσο αυξάνεται και η θερμοκρασίας της (επομένως και η δυνατότητά της για διαχείριση της εισερχόμενης υγρασίας) μέχρι κάποια χαρακτηριστική θερμοκρασία πέραν της οποίας παρατηρείται απότομη πτώση. Πιθανότατα η μείωση αυτή να οφείλεται στην έντονη ξηρασία μετά από κάποια θερμοκρασία που επικρατεί στο εσωτερικό της κυψελίδας που έχει ως αποτέλεσμα τη ραγδαία μείωση της αγωγιμότητας της μεμβράνης. Η κρίσιμη αυτή θερμοκρασία όπως είναι εμφανές στο σχήμα 37 μπορεί να αυξηθεί (δίνοντας τη δυνατότητα διεύρυνσης του παραθύρου μέσα στο οποίο η απόδοση αυξάνει γραμμικά) με αύξηση της εισερχόμενης υγρασίας. Χαρακτηριστικά η αύξηση της υγρασίας από 3,1% σε 57% είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης κατά 16% και τη μέγιστη επιτρεπόμενη λειτουργία της κυψελίδας από 52 σε 70°C.

Παραθέτονται τα διαγράμματα



Σχήμα 36: Τ – i_{max} καμπύλες για σταθερή ροή καυσίμου (300 cc/min-33%H2) και αέρα (250 cc/min), σταθερή θερμοκρασία κυψελίδας αλλά για διαφορετικές θερμοκρασίες του κορεστή



Σχήμα 37: Τ - i_{max} καμπύλες για σταθερή ροή καυσίμου (200 cc/min-100%H2) και αέρα (250 cc/min)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά και βάσει των αποτελεσμάτων που βρήκαμε από τα πειράματα που διενεργήθηκαν μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η λειτουργία και η απόδοση της κυψελίδας καυσίμου επηρεάζονται από μια σειρά παραγόντων όπως σύσταση αερίων, θερμοκρασία, παροχές εισόδου κ.τ.λ. Πιο συγκεκριμμένα μπορούμε να πούμε ότι σημαντικός παράγοντας για την απόδοση της κυψελίδας είναι η παροχή του καυσίμου όταν αυτό τροφοδοτείται αραιωμένο και όχι σε περιεκτικότητα 100%. Από την άλλη μεριά αξιοσημείωτη βελτίωση παρατηρήθηκε με τη χρήση καθαρού O_2 αντί αέρα κάτι που βέβαια αυξάνει το κόστος λειτουργίας. Επίσης τη λειτουργία της κυψελίδας επηρεάζουν σημαντικά η μερική πίεση του υδρογόνου η οποία βρέθηκε ότι θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 20% προκειμένου να επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοση. Τέλος ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της κυψελίδας είναι η υγρασία, η οποία συνδέεται άμεσα με τη λειτουργία του στερεού ηλεκτρολύτη μιας και επηρεάζει καθοριστικά την ιοντική του αγωγιμότητα.

Τα παραπάνω αποτελέσματα τα συγκρίναμε με δημοσιεύσεις που αφορούσαν τη λειτουργία παρόμοιας κυψελίδας καυσίμου (πίνακας 1). Οι διαφορές που προκύπτουν μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων των δημοσιεύσεων μπορούμε να πούμε ότι οφείλονται είτε στη χρησιμοποίηση διμεταλλικών καταλυτών (π.χ. PtRu/C) οι οποίοι εμφανίζουν αυξημένη ηλεκτροκαταλυτική ενεργότητα, είτε στην επίτευξη μεγαλύτερων ποσοστών υγρασίας, με κατάλληλο συνδυασμό θερμοκρασιών της κυψελίδας και των ρευμάτων εισόδου, είτε στη διαφορετική φόρτιση του καταλύτη πάνω στο καθοδικό και ανοδικό ηλεκτρόδιο, είτε στην αυξημένη πίεση λειτουργίας της κυψελίδας.

a/a	Fuel	Flow of fuel (cc/min)	RH (%) or T(humidity)	Oxidant	Flow oxidant (cc/min)	RH (%) or T(humidity)	Catalyst (anode)	Load of anode Catalyst (mg/cm2)	Electrol. (Nafion)	Catalyst (cathode)	Load of cathode catalyst (mg/cm2)	MEA active area (cm2)	T (oC)	P (atm)	Imax (mA/cm2)	Pmax (mW/cm2)	[Ref.]
1	H2	100	100	air	1000	100	20% PtRu/C	0.5	112	20% Pt/C	0.5	4.4	80	3	2750	900	[14]
2	H2	750	0	air	1000	0	20% Pt/Ru/C	0.5	112	40% Pt/C	0.5	4.4	80	3	1020	250	[15]
3	H2	-	100 (80oC)	air	-	75 (73oC)	35% Pt/C	0.5	117	46.5 % Pt/C	0.5	25	80	1	1400	-	[16]
4	H2	-	70 (90oC)	air	-	70 (90oC)	35% Pt/C	0.5	117	46.5 % Pt/C	0.5	26	100	1	1430	-	[16]
5	H2	-	35	air	-	35	35% Pt/C	0.5	117	46.5 % Pt/C	0.5	27	120	1	1200	-	[16]
6	H2	-	(75oC)	air	-	(70oC)	Pt/C	0.1	112	Pt/C	0.1	5	70	1	1600	640	[17]
7	H2	-	100 (80oC)	air	-	100 (80oC)	47% Pt/C	0.05	112	47% Pt/C	0.2	50	80	1.5	1200	-	[18]
8	H2	60	(80oC)	O2	60	(80oC)	Pt/C	-	117	20% Pt/C	-	5	65	-	680	130	[19]
9	H2	60	(80oC)	O2	60	(80oC)	CoMoC-873/KC	-	117	20% Pt/C	-	5	65	-	80	25	[19]
10	H2	600	-	O2	600	-	Pt40/V	0.35	113.5	Pt40/V+PTFE	0.35	25	75	5.9	2500	1000	[20]
11	H2	600	-	air	3000	-	Pt40/V	0.35	113.5	Pt40/V+PTFE	0.35	25	75	5.9	2000	750	[20]
12	H2	-	-	O2	-	-	Pt-NPGL	0.03	113.5	Pt-NPGL	0.03	3.8	75	3.5	500	250	[21]
13	H2	1200	(70oC)	air	2200	(70oC)	Pt/C	0.40	115	Pt/C	0.4	51.84	80	3	1680	-	[22]
14	H2	-	(80oC)	O2	-	(80oC)	20% Pt/C	0.4	117	20% Pt/C	0.4	5	80	2	780	-	[23]
15	H2	-	100	air	-	50	20% Pt/C	0.4	117	20% Pt/C	0.4	25	80	1	910	-	[24]
16	H2	-	100	air	-	50	20% Pt/C	0.4	117	20% Pt/C	0.4	25	80	4	1150	-	[24]
17	H2	300	(97oC)	air	250	-	30% Pt/C	4.0	117	30% Pt/C	4.0	5.29	70	1	690	-	Exp. results
18	H2	300	-	O2	250	-	30% Pt/C	4.0	117	30% Pt/C	4.0	5.29	25	1	600	190	Exp. results

Πίνακας 1: Πειραματικά αποτελέσματα και δημοσιεύσεις για κυψελίδα καυσίμου τύπου PEM

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Β.Ι. Κιούσης, Μεταπτυχιακή Ερευνητική Εργασία: «Ανάπτυξη και ανάλυση πρωτότυπων κυψελίδων καυσίμου», Πάτρα 2001

[2] Δ.Α. Γιαννακουδάκη, Ηλεκτροχημικές Εφαρμογές, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 1986-1987

[3] Ι.Β. Γεντεκάκης, Σύγχρονες Μέθοδοι Μετατροπής και Εκμετάλλευσης Ενέργειας- Κελιά Καυσίμου, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 1998

[4] Ν. Κατσάνος, Φυσικοχημεία, Έκδοση 2η Πανεπιστημίου Πατρών, 1978

[5] Ι.Β. Γεντεκάκης, Ατμοσφαιρική Ρύπανση, Εκδόσεις Τζιόλα, 1999

[6] Ι.Α Μουμτζής και Δ.Π. Σαζού, Ηλεκτροχημεία, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 1997

[7] C. Song, Catal. Today, 77 (2002) 17-49

[8] M.F. Mathias et al. in W. Vielstich et. al., Handbook of Fuel Cells, (John Wiley & Sons) New York, 2003 pp 517-537

[9] T.H. Sakai et al., Journal of the Electrochemical Society, 133 (1986) 88

[10] A. Katsaounis et al., Solid State Ionics 177 (2006) 2397–2401

[11] M.N. Tsampas et al., Electrochimica Acta 51 (2006) 2743–2755

[12] A. Katsaounis et al., Electrochimica Acta 50 (2005) 5132–5143

[13] A. Katsaounis et al., Applied Catalysis B: Environmental 56 (2005) 251–258

[14] C. Song et. al.., Electrochimica Acta 52 (2007) 2552–2561

[15] J. Zhang et. al., Electrochimica Acta 52 (2007) 5095–5101

[16] Y. Song, et. al., Journal of Power Sources 154 (2006) 138–144

[17] Yong-Hun Cho, et. al., Electrochimica Acta 53 (2008) 6111–6116

[18] H.A. Gasteiger, et.al., Journal of Power Sources 127 (2004) 162–171

[19] S. Izhar, et.al., Journal of Power Sources 182 (2008) 52–60

[20] S. Grigoriev, et. al., International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) 4438 – 4442

[21] R. Zeis, et. al., Journal of Power Sources 165 (2007) 65–72

[22] L. Wang, et. al., International Journal of Hydrogen Energy 28 (2003) 1263 – 1272

[23] M. Amirinejad et. al., Journal of Power Sources 161 (2006) 872–875

[24] Q. Yan et. al., Journal of Power Sources 161 (2006) 492–502

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακες τιμών

1. Επίδραση της παροχής αέρα στην απόδοση της κυψελίδας

R / ohm	I / A	E / V	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	1,410	0,097	266,5	25,85	3,752
0,01	1,380	0,110	260,9	28,70	3,833
0,02	1,380	0,125	260,9	32,61	3,833
0,03	1,370	0,138	259,0	35,74	3,861
0,04	1,360	0,151	257,1	38,82	3,890
0,05	1,360	0,165	257,1	42,42	3,890
0,06	1,350	0,179	255,2	45,68	3,919
0,07	1,345	0,193	254,3	49,07	3,933
0,08	1,335	0,206	252,4	51,99	3,963
0,1	1,330	0,231	251,4	58,08	3,977
0,15	1,305	0,293	246,7	72,28	4,054
0,2	1,280	0,350	242,0	84,69	4,133
0,3	1,200	0,445	226,8	100,9	4,408
0,4	1,150	0,529	217,4	115,0	4,600
0,5	1,010	0,583	190,9	111,3	5,238
0,6	0,905	0,625	171,1	106,9	5,845
0,7	0,820	0,650	155,0	100,8	6,451
0,8	0,750	0,671	141,8	95,13	7,053
1	0,640	0,703	121,0	85,05	8,266
1,5	0,460	0,750	86,96	65,22	11,50
2	0,360	0,777	68,05	52,88	14,69
3	0,250	0,811	47,26	38,33	21,16
4	0,190	0,831	35,92	29,85	27,84
5	0,150	0,845	28,36	23,96	35,27
6	0,130	0,854	24,57	20,99	40,69
7	0,110	0,861	20,79	17,90	48,09
8	0,090	0,868	17,01	14,77	58,78
10	0,075	0,877	14,18	12,43	70,53
15	0,045	0,895	8,507	7,613	117,6
20	0,035	0,905	6,616	5,988	151,1
30	0,020	0,919	3,781	3,474	264,5
40	0,010	0,928	1,890	1,754	529,0
50	0,005	0,933	0,945	0,882	1058
60	0,000	0,938	0,000	0,000	

Πίνακας τιμών 1.1: f_{anode} = 400 cc/min , $f_{cathode}$ = 25 cc/min

R / ohm	I / A	E / V	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	1,930	0,134	364,8	48,89	0,367
0,01	1,905	0,153	360,1	55,10	0,425
0,02	1,890	0,171	357,3	61,09	0,479
0,03	1,870	0,189	353,5	66,81	0,535
0,04	1,850	0,204	349,7	71,34	0,583
0,05	1,830	0,220	345,9	76,11	0,636
0,06	1,810	0,239	342,2	81,78	0,699
0,07	1,790	0,256	338,4	86,62	0,757
0,08	1,770	0,271	334,6	90,67	0,810
0,1	1,730	0,299	327,0	97,78	0,914
0,15	1,630	0,365	308,1	112,5	1,185
0,2	1,535	0,418	290,2	121,3	1,441
0,3	1,355	0,499	256,1	127,8	1,948
0,4	1,180	0,562	223,1	125,4	2,519
0,5	1,040	0,602	196,6	118,4	3,062
0,6	0,920	0,636	173,9	110,6	3,657
0,7	0,830	0,658	156,9	103,2	4,194
0,8	0,760	0,676	143,7	97,12	4,705
1	0,640	0,705	121,0	85,29	5,827
1,5	0,460	0,750	86,96	65,22	8,625
2	0,360	0,776	68,05	52,81	11,40
3	0,250	0,809	47,26	38,23	17,12
4	0,190	0,828	35,92	29,74	23,05
5	0,150	0,842	28,36	23,88	29,69
6	0,130	0,851	24,57	20,91	34,63
7	0,105	0,858	19,85	17,03	43,23
8	0,095	0,863	17,96	15,50	48,06
10	0,075	0,874	14,18	12,39	61,65
15	0,050	0,892	9,452	8,431	94,37
20	0,030	0,903	5,671	5,121	159,2
30	0,020	0,918	3,781	3,471	242,8
40	0,010	0,926	1,890	1,750	489,9
50	0,005	0,932	0,945	0,881	986,1
60	0,000	0,937	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 1.2</u>: f_{anode} = 400 cc/min , $f_{cathode}$ = 50 cc/min

R / ohm	I / A	E / V	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance/ohm cm^2
0	2,295	0,167	433,8	72,45	0,385
0,01	2,260	0,188	427,2	80,32	0,440
0,02	2,225	0,208	420,6	87,49	0,495
0,03	2,185	0,228	413,0	94,17	0,552
0,04	2,160	0,244	408,3	99,63	0,598
0,05	2,125	0,262	401,7	105,2	0,652
0,06	2,075	0,280	392,2	109,8	0,714
0,07	2,035	0,299	384,7	115,0	0,777
0,08	2,000	0,314	378,1	118,7	0,831
0,09	1,975	0,326	373,3	121,7	0,873
0,1	1,940	0,340	366,7	124,7	0,927
0,2	1,635	0,450	309,1	139,1	1,456
0,3	1,400	0,520	264,7	137,6	1,965
0,4	1,195	0,573	225,9	129,4	2,537
0,5	1,045	0,607	197,5	119,9	3,073
0,6	0,915	0,636	173,0	110,0	3,677
0,7	0,825	0,656	156,0	102,3	4,206
0,8	0,750	0,670	141,8	94,99	4,726
0,9	0,690	0,682	130,4	88,96	5,229
1	0,630	0,696	119,1	82,89	5,844
2	0,350	0,766	66,16	50,68	11,58
3	0,240	0,793	45,37	35,98	17,48
4	0,185	0,812	34,97	28,40	23,22
5	0,150	0,825	28,36	23,39	29,10
6	0,125	0,835	23,63	19,73	35,34
8	0,090	0,842	17,01	14,33	49,49
10	0,070	0,862	13,23	11,41	65,14
15	0,045	0,877	8,507	7,460	103,1
20	0,030	0,888	5,671	5,036	156,6
30	0,020	0,901	3,781	3,406	238,3
40	0,010	0,910	1,890	1,720	481,4
50	0,005	0,916	0,945	0,866	969,1
60	0,000	1,000	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 1.3</u>: f_{anode} = 400 cc/min , $f_{cathode}$ = 100 cc/min

R / ohm	I / A	E / V	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	2,395	0,166	452,7	75,16	0,367
0,01	2,355	0,188	445,2	83,69	0,422
0,02	2,315	0,209	437,6	91,46	0,478
0,03	2,270	0,229	429,1	98,27	0,534
0,04	2,235	0,246	422,5	103,9	0,582
0,05	2,195	0,264	414,9	109,5	0,636
0,06	2,150	0,284	406,4	115,4	0,699
0,07	2,110	0,301	398,9	120,1	0,755
0,08	2,065	0,316	390,4	123,4	0,810
0,1	1,955	0,344	369,6	127,1	0,931
0,15	1,805	0,403	341,2	137,5	1,181
0,2	1,660	0,452	313,8	141,8	1,440
0,3	1,415	0,522	267,5	139,6	1,952
0,4	1,205	0,576	227,8	131,2	2,529
0,5	1,055	0,610	199,4	121,7	3,059
0,6	0,925	0,639	174,9	111,7	3,654
0,7	0,830	0,659	156,9	103,4	4,200
0,8	0,760	0,674	143,7	96,83	4,691
1	0,640	0,704	121,0	85,17	5,819
1,5	0,460	0,745	86,96	64,78	8,568
2	0,350	0,770	66,16	50,95	11,64
3	0,245	0,801	46,31	37,10	17,30
4	0,185	0,819	34,97	28,64	23,42
5	0,150	0,831	28,36	23,56	29,31
6	0,125	0,839	23,63	19,83	35,51
7	0,105	0,846	19,85	16,79	42,62
8	0,090	0,851	17,01	14,48	50,02
10	0,070	0,863	13,23	11,42	65,22
15	0,045	0,877	8,507	7,460	103,1
20	0,030	0,884	5,671	5,013	155,9
30	0,020	0,900	3,781	3,403	238,1
40	0,010	0,910	1,890	1,720	481,4
50	0,010	0,917	1,890	1,733	485,1
60	0,005	0,921	0,945	0,871	974,4

<u>Πίνακας τιμών 1.4</u>: f_{anode} = 400 cc/min , $f_{cathode}$ = 150 cc/min

R / ohm	I / A	E / V	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	2,455	0,171	464,1	79,36	0,368
0,01	2,405	0,193	454,6	87,74	0,425
0,02	2,355	0,213	445,2	94,82	0,478
0,03	2,310	0,234	436,7	102,2	0,536
0,04	2,265	0,250	428,2	107,0	0,584
0,05	2,220	0,267	419,7	112,0	0,636
0,06	2,170	0,287	410,2	117,7	0,700
0,07	2,120	0,303	400,8	121,4	0,756
0,08	2,080	0,318	393,2	125,0	0,809
0,1	2,000	0,344	378,1	130,1	0,910
0,15	1,805	0,402	341,2	137,2	1,178
0,2	1,640	0,448	310,0	138,9	1,445
0,3	1,390	0,513	262,8	134,8	1,952
0,4	1,180	0,564	223,1	125,8	2,528
0,5	1,035	0,598	195,7	117,0	3,056
0,6	0,910	0,626	172,0	107,7	3,639
0,7	0,815	0,646	154,1	99,53	4,193
0,8	0,874	0,661	165,2	109,2	4,001
1	0,605	0,688	114,4	78,68	6,016
1,5	0,450	0,731	85,07	62,18	8,593
2	0,350	0,755	66,16	49,95	11,41
3	0,245	0,788	46,31	36,50	17,01
4	0,185	0,806	34,97	28,19	23,05
5	0,145	0,817	27,41	22,39	29,81
6	0,120	0,824	22,68	18,69	36,32
8	0,090	0,837	17,01	14,24	49,20
10	0,070	0,845	13,23	11,18	63,86
15	0,045	0,865	8,507	7,358	101,7
20	0,030	0,876	5,671	4,968	154,5
30	0,020	0,892	3,781	3,372	235,9
40	0,010	0,902	1,890	1,705	477,2
50	0,005	0,908	0,945	0,858	960,7
60	0,000	0,913	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 1.5</u>: f_{anode} = 400 cc/min , $f_{cathode}$ = 200 cc/min

R / ohm	I / A	E / V	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	2,440	0,169	461,2	77,95	0,366
0,01	2,380	0,191	449,9	85,93	0,425
0,02	2,335	0,211	441,4	93,14	0,478
0,03	2,290	0,231	432,9	100,00	0,534
0,04	2,240	0,247	423,4	104,6	0,583
0,05	2,200	0,264	415,9	109,8	0,635
0,06	2,140	0,284	404,5	114,9	0,702
0,07	2,100	0,300	397,0	119,1	0,756
0,08	2,055	0,315	388,5	122,4	0,811
0,1	1,970	0,340	372,4	126,6	0,913
0,15	1,780	0,398	336,5	133,9	1,183
0,2	1,620	0,443	306,2	135,7	1,447
0,3	1,375	0,508	259,9	132,0	1,954
0,4	1,170	0,559	221,2	123,6	2,527
0,5	1,025	0,593	193,8	114,9	3,060
0,6	0,900	0,622	170,1	105,8	3,656
0,7	0,810	0,642	153,1	98,30	4,193
0,8	0,740	0,658	139,9	92,05	4,704
1	0,620	0,685	117,2	80,28	5,845
1,5	0,450	0,728	85,07	61,93	8,558
2	0,350	0,755	66,16	49,95	11,41
3	0,240	0,786	45,37	35,66	17,32
4	0,180	0,804	34,03	27,36	23,63
6	0,120	0,828	22,68	18,78	36,50
8	0,090	0,842	17,01	14,33	49,49
10	0,070	0,851	13,23	11,26	64,31
15	0,045	0,870	8,507	7,401	102,3
20	0,030	0,880	5,671	4,991	155,2
30	0,020	0,894	3,781	3,380	236,5
40	0,010	0,904	1,890	1,709	478,2
50	0,005	0,911	0,945	0,861	963,8
60	0,000	0,915	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 1.6</u>: f_{anode} = 400 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min

2. Επίδραση της παροχής καθαρού υδρογόνου στην απόδοση της κυψελίδας

R / ohm	I / A	E / V	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	2,540	0,176	480,2	84,51	0,367
0,01	2,490	0,200	470,7	94,14	0,425
0,02	2,440	0,221	461,2	101,9	0,479
0,03	2,390	0,242	451,8	109,3	0,536
0,04	2,345	0,259	443,3	114,8	0,584
0,05	2,300	0,277	434,8	120,4	0,637
0,06	2,250	0,297	425,3	126,3	0,698
0,07	2,200	0,314	415,9	130,6	0,755
0,08	2,160	0,332	408,3	135,6	0,813
0,1	2,080	0,359	393,2	141,2	0,913
0,15	1,870	0,418	353,5	147,8	1,182
0,2	1,700	0,464	321,4	149,1	1,444
0,3	1,435	0,529	271,3	143,5	1,950
0,4	1,210	0,578	228,7	132,2	2,527
0,5	1,060	0,611	200,4	122,4	3,049
0,6	0,930	0,639	175,8	112,3	3,635
0,7	0,830	0,658	156,9	103,2	4,194
0,8	0,760	0,673	143,7	96,69	4,684
1	0,640	0,699	121,0	84,57	5,778
1,5	0,460	0,740	86,96	64,35	8,510
2	0,350	0,762	66,16	50,42	11,52
3	0,240	0,793	45,37	35,98	17,48
4	0,180	0,804	34,03	27,36	23,63
5	0,150	0,818	28,36	23,19	28,85
6	0,125	0,827	23,63	19,54	35,00
7	0,110	0,835	20,79	17,36	40,16
8	0,090	0,840	17,01	14,29	49,37
10	0,070	0,852	13,23	11,27	64,39
15	0,045	0,871	8,507	7,409	102,4
20	0,030	0,882	5,671	5,002	155,5
30	0,020	0,898	3,781	3,395	237,5
40	0,010	0,908	1,890	1,716	480,3
50	0,005	0,915	0,945	0,865	968,1
60	0,000	0,920	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 2.1</u>: f_{anode} = 20 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min

R / ohm	I / A	E / V	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	2,550	0,178	482,0	85,80	0,369
0,01	2,490	0,201	470,7	94,61	0,427
0,02	2,440	0,222	461,2	102,40	0,481
0,03	2,390	0,242	451,8	109,3	0,536
0,04	2,350	0,259	444,2	115,1	0,583
0,05	2,300	0,277	434,8	120,4	0,637
0,06	2,225	0,297	420,6	124,9	0,706
0,07	2,200	0,314	415,9	130,6	0,755
0,08	2,155	0,330	407,4	134,4	0,810
0,1	2,065	0,358	390,4	139,7	0,917
0,15	1,870	0,417	353,5	147,4	1,180
0,2	1,700	0,463	321,4	148,8	1,441
0,3	1,430	0,527	270,3	142,5	1,950
0,4	1,210	0,577	228,7	132,0	2,523
0,5	1,060	0,610	200,4	122,2	3,044
0,6	0,925	0,638	174,9	111,6	3,649
0,7	0,830	0,657	156,9	103,1	4,187
0,8	0,760	0,672	143,7	96,54	4,677
1	0,630	0,697	119,1	83,01	5,853
1,5	0,455	0,737	86,01	63,39	8,569
2	0,350	0,763	66,16	50,48	11,53
3	0,240	0,794	45,37	36,02	17,50
4	0,185	0,813	34,97	28,43	23,25
5	0,150	0,825	28,36	23,39	29,10
6	0,125	0,833	23,63	19,68	35,25
7	0,105	0,840	19,85	16,67	42,32
8	0,090	0,845	17,01	14,38	49,67
10	0,075	0,856	14,18	12,14	60,38
15	0,045	0,873	8,507	7,426	102,6
20	0,030	0,884	5,671	5,013	155,9
30	0,015	0,899	2,836	2,549	317,0
40	0,010	0,909	1,890	1,718	480,9
50	0,005	0,916	0,945	0,866	969,1
60	0,000	0,921	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 2.2</u>: f_{anode} = 100 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min

R / ohm	I / A	E / V	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	2,540	0,178	480,2	85,47	0,371
0,01	2,485	0,200	469,8	93,95	0,426
0,02	2,435	0,222	460,3	102,2	0,482
0,03	2,380	0,241	449,9	108,4	0,536
0,04	2,340	0,259	442,3	114,6	0,586
0,05	2,295	0,277	433,8	120,2	0,638
0,06	2,240	0,297	423,4	125,8	0,701
0,07	2,190	0,314	414,0	130,0	0,758
0,08	2,145	0,329	405,5	133,4	0,811
0,1	2,060	0,356	389,4	138,6	0,914
0,15	1,860	0,415	351,6	145,9	1,180
0,2	1,690	0,461	319,5	147,3	1,443
0,3	1,425	0,526	269,4	141,7	1,953
0,4	1,210	0,576	228,7	131,8	2,518
0,5	1,055	0,608	199,4	121,3	3,049
0,6	0,920	0,636	173,9	110,6	3,657
0,7	0,830	0,655	156,9	102,8	4,175
0,8	0,750	0,670	141,8	94,99	4,726
1	0,630	0,695	119,1	82,77	5,836
1,5	0,455	0,737	86,01	63,39	8,569
2	0,350	0,761	66,16	50,35	11,50
3	0,240	0,791	45,37	35,89	17,43
4	0,185	0,809	34,97	28,29	23,13
5	0,145	0,821	27,41	22,50	29,95
6	0,120	0,830	22,68	18,83	36,59
7	0,105	0,836	19,85	16,59	42,12
8	0,090	0,841	17,01	14,31	49,43
10	0,070	0,851	13,23	11,26	64,31
15	0,045	0,869	8,507	7,392	102,2
20	0,030	0,880	5,671	4,991	155,2
30	0,015	0,895	2,836	2,538	315,6
40	0,010	0,906	1,890	1,713	479,3
50	0,005	0,913	0,945	0,863	966,0
60	0,000	0,918	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 2.3</u>: f_{anode} = 200 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min

R / ohm	I / A	E / V	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	2,530	0,177	478,3	84,65	0,370
0,01	2,470	0,189	466,9	88,25	0,405
0,02	2,420	0,220	457,5	100,6	0,481
0,03	2,370	0,240	448,0	107,5	0,536
0,04	2,330	0,257	440,5	113,2	0,583
0,05	2,280	0,275	431,0	118,5	0,638
0,06	2,230	0,295	421,6	124,4	0,700
0,07	2,180	0,312	412,1	128,6	0,757
0,08	2,135	0,327	403,6	132,0	0,810
0,1	2,050	0,354	387,5	137,2	0,913
0,15	1,850	0,413	349,7	144,4	1,181
0,2	1,685	0,460	318,5	146,5	1,444
0,3	1,420	0,524	268,4	140,7	1,952
0,4	1,200	0,574	226,8	130,2	2,530
0,5	1,050	0,607	198,5	120,5	3,058
0,6	0,920	0,635	173,9	110,4	3,651
0,7	0,825	0,653	156,0	101,8	4,187
0,8	0,750	0,668	141,8	94,71	4,712
1	0,630	0,694	119,1	82,65	5,827
1,5	0,450	0,734	85,07	62,44	8,629
2	0,350	0,757	66,16	50,09	11,44
3	0,240	0,789	45,37	35,80	17,39
4	0,180	0,807	34,03	27,46	23,72
5	0,145	0,819	27,41	22,45	29,88
6	0,125	0,828	23,63	19,57	35,04
7	0,105	0,834	19,85	16,55	42,02
8	0,090	0,839	17,01	14,27	49,31
10	0,075	0,850	14,18	12,05	59,95
15	0,045	0,868	8,507	7,384	102,0
20	0,030	0,880	5,671	4,991	155,2
30	0,020	0,895	3,781	3,384	236,7
40	0,010	0,905	1,890	1,711	478,7
50	0,005	0,912	0,945	0,862	964,9
60	0,000	0,917	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 2.4</u>: f_{anode} = 300 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min

R / ohm	I / A	E / V	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	2,550	0,177	482,0	85,32	0,367
0,01	2,495	0,201	471,6	94,80	0,426
0,02	2,445	0,222	462,2	102,6	0,480
0,03	2,395	0,242	452,7	109,6	0,535
0,04	2,350	0,260	444,2	115,5	0,585
0,05	2,300	0,277	434,8	120,4	0,637
0,06	2,240	0,297	423,4	125,8	0,701
0,07	2,195	0,314	414,9	130,3	0,757
0,08	2,150	0,329	406,4	133,7	0,809
0,1	2,060	0,356	389,4	138,6	0,914
0,15	1,865	0,417	352,6	147,0	1,183
0,2	1,695	0,462	320,4	148,0	1,442
0,3	1,430	0,527	270,3	142,5	1,950
0,4	1,210	0,577	228,7	132,0	2,523
0,5	1,060	0,609	200,4	122,0	3,039
0,6	0,920	0,637	173,9	110,8	3,663
0,7	0,830	0,656	156,9	102,9	4,181
0,8	0,755	0,671	142,7	95,77	4,701
1	0,630	0,697	119,1	83,01	5,853
1,5	0,455	0,736	86,01	63,30	8,557
2	0,350	0,761	66,16	50,35	11,50
3	0,240	0,791	45,37	35,89	17,43
4	0,180	0,809	34,03	27,53	23,78
5	0,150	0,822	28,36	23,31	28,99
6	0,125	0,830	23,63	19,61	35,13
7	0,105	0,836	19,85	16,59	42,12
8	0,090	0,842	17,01	14,33	49,49
10	0,070	0,852	13,23	11,27	64,39
15	0,045	0,870	8,507	7,401	102,3
20	0,030	0,881	5,671	4,996	155,3
30	0,020	0,897	3,781	3,391	237,3
40	0,010	0,906	1,890	1,713	479,3
50	0,005	0,912	0,945	0,862	964,9
60	0,000	0,918	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 2.5</u>: f_{anode} = 400 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min

3. Επίδραση της παροχής υδρογόνου (3%) στην απόδοση της κυψελίδας

R / Ohm	I / mA	E / mVolt	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	71,20	4,900	13,46	0,066	0,364
0,01	71,00	5,600	13,42	0,075	0,417
0,02	71,00	6,300	13,42	0,085	0,469
0,03	70,80	7,100	13,38	0,095	0,530
0,04	70,70	7,700	13,36	0,103	0,576
0,05	70,60	8,400	13,35	0,112	0,629
0,06	70,50	9,200	13,33	0,123	0,690
0,07	70,40	9,900	13,31	0,132	0,744
0,08	70,40	10,60	13,31	0,141	0,797
0,1	70,30	12,00	13,29	0,159	0,903
0,15	70,10	15,50	13,25	0,205	1,170
0,2	70,00	18,80	13,23	0,249	1,421
0,3	69,80	25,30	13,19	0,334	1,917
0,4	69,70	32,70	13,18	0,431	2,482
0,5	69,60	39,40	13,16	0,518	2,995
0,6	69,50	47,00	13,14	0,617	3,577
0,7	69,30	53,70	13,10	0,703	4,099
0,8	69,20	60,30	13,08	0,789	4,610
1	69,20	74,00	13,08	0,968	5,657
1,5	68,60	107,7	12,97	1,397	8,305
2	68,00	141,7	12,85	1,821	11,02
3	66,70	206,3	12,61	2,601	16,36
4	62,90	258,4	11,89	3,072	21,73
5	58,90	301,8	11,13	3,360	27,11
6	55,70	339,0	10,53	3,569	32,20
7	52,20	370,0	9,868	3,651	37,50
8	49,00	396,0	9,263	3,668	42,75
10	43,60	440,0	8,242	3,626	53,39
15	34,40	520,0	6,503	3,381	79,97
20	28,20	567,0	5,331	3,023	106,4
30	21,12	634,0	3,992	2,531	158,8
40	16,75	670,0	3,166	2,121	211,6
50	13,98	698,0	2,643	1,845	264,1
60	12,01	720,0	2,270	1,635	317,1
70	10,54	738,0	1,992	1,470	370,4
80	9,390	751,0	1,775	1,333	423,1
100	7,340	773,0	1,388	1,073	557,1
150	5,400	809,0	1,021	0,826	792,5

200	4,160	830,0	0,786	0,653	1055
300	2,860	857,0	0,541	0,463	1585
400	2,190	874,0	0,414	0,362	2111
500	1,770	885,0	0,335	0,296	2645
600	1,490	894,0	0,282	0,252	3174
800	1,130	907,0	0,214	0,194	4246
1000	0,880	917,0	0,166	0,153	5512
1500	0,460	940,0	0,087	0,082	10810
2000	0,310	953,0	0,059	0,056	16262
6000	0,190	966,0	0,036	0,035	26895
8000	0,140	973,0	0,026	0,026	36766
10000	0,100	979,0	0,019	0,019	51789
50000	0,020	991,0	0,004	0,004	262120
300000	0,000	999,0	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 3.1</u>: f_{anode} = 20 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min

R / Ohm	I / mA	E / mVolt	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	0,370	25,50	69,94	1,784	0,365
0,01	0,365	29,20	69,00	2,015	0,423
0,02	0,365	32,90	69,00	2,270	0,477
0,03	0,365	36,60	69,00	2,525	0,530
0,04	0,365	39,90	69,00	2,753	0,578
0,05	0,365	43,70	69,00	3,015	0,633
0,06	0,360	47,80	68,05	3,253	0,702
0,07	0,360	51,60	68,05	3,512	0,758
0,08	0,360	55,30	68,05	3,763	0,813
0,1	0,360	62,50	68,05	4,253	0,918
0,15	0,360	80,40	68,05	5,471	1,181
0,2	0,360	98,00	68,05	6,669	1,440
0,3	0,360	131,8	68,05	8,969	1,937
0,4	0,360	169,8	68,05	11,56	2,495
0,5	0,360	205,1	68,05	13,96	3,014
0,6	0,360	244,6	68,05	16,65	3,594
0,7	0,355	278,9	67,11	18,72	4,156
0,8	0,355	313,3	67,11	21,02	4,669
1	0,355	385,0	67,11	25,84	5,737
1,5	0,350	548,0	66,16	36,26	8,283
2	0,295	615,0	55,77	34,30	11,03
3	0,210	669,0	39,70	26,56	16,85
4	0,170	700,0	32,14	22,50	21,78
5	0,140	720,0	26,47	19,05	27,21
6	0,120	735,0	22,68	16,67	32,40
7	0,100	747,0	18,90	14,12	39,52
8	0,090	755,0	17,01	12,84	44,38
10	0,070	770,0	13,23	10,19	58,19
15	0,050	796,0	9,452	7,524	84,22
20	0,040	812,0	7,561	6,140	107,4
30	0,030	834,0	5,671	4,730	147,1
40	0,020	849,0	3,781	3,210	224,6
50	0,015	859,0	2,836	2,436	302,9
60	0,015	867,0	2,836	2,458	305,8
70	0,010	873,0	1,890	1,650	461,8
80	0,010	878,0	1,890	1,660	464,5
100	0,010	887,0	1,890	1,677	469,2
150	0,005	902,0	0,945	0,853	954,3
200	0,005	912,0	0,945	0,862	964,9
300	0,005	924,0	0,945	0,873	977,6
400	0,000	933,0	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 3.2</u>: f_{anode} = 100 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min

R / Ohm	I / A	E / mVolt	i / mA cm-2	p / mWatt cm-2	resistance / Ohm cm2
0	0,750	51,80	141,8	7,344	0,365
0,01	0,745	59,50	140,8	8,379	0,422
0,02	0,745	67,00	140,8	9,436	0,476
0,03	0,740	74,70	139,9	10,45	0,534
0,04	0,740	81,30	139,9	11,37	0,581
0,05	0,740	88,80	139,9	12,42	0,635
0,06	0,740	97,40	139,9	13,62	0,696
0,07	0,740	105,1	139,9	14,70	0,751
0,08	0,740	112,5	139,9	15,74	0,804
0,1	0,740	127,3	139,9	17,81	0,910
0,15	0,735	163,3	138,9	22,69	1,175
0,2	0,730	198,2	138,0	27,35	1,436
0,3	0,725	263,8	137,1	36,15	1,925
0,4	0,710	334,0	134,2	44,83	2,489
0,5	0,690	394,0	130,4	51,39	3,021
0,6	0,670	453,0	126,7	57,37	3,577
0,7	0,630	493,0	119,1	58,71	4,140
0,8	0,600	523,0	113,4	59,32	4,611
1	0,530	568,0	100,2	56,91	5,669
1,5	0,400	631,0	75,61	47,71	8,345
2	0,320	667,0	60,49	40,35	11,03
3	0,230	710,0	43,48	30,87	16,33
4	0,180	736,0	34,03	25,04	21,63
5	0,150	752,0	28,36	21,32	26,52
6	0,125	763,0	23,63	18,03	32,29
7	0,110	774,0	20,79	16,09	37,22
8	0,100	782,0	18,90	14,78	41,37
10	0,080	795,0	15,12	12,02	52,57
15	0,050	818,0	9,452	7,732	86,54
20	0,040	831,0	7,561	6,284	109,9
30	0,030	849,0	5,671	4,815	149,7
40	0,020	861,0	3,781	3,255	227,7
50	0,015	870,0	2,836	2,467	306,8
60	0,015	877,0	2,836	2,487	309,3
70	0,010	882,0	1,890	1,667	466,6
80	0,010	887,0	1,890	1,677	469,2
100	0,010	894,0	1,890	1,690	472,9
150	0,005	908,0	0,945	0,858	960,7
200	0,005	917,0	0,945	0,867	970,2
300	0,005	927,0	0,945	0,876	980,8
400	0,000	935,0	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 3.3</u>: f_{anode} = 200 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min

R / Ohm	I / A	E / mVolt	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	0,880	62,20	166,4	10,35	0,374
0,01	0,880	71,20	166,4	11,84	0,428
0,02	0,880	79,90	166,4	13,29	0,480
0,03	0,875	88,70	165,4	14,67	0,536
0,04	0,875	96,80	165,4	16,01	0,585
0,05	0,870	105,4	164,5	17,33	0,641
0,06	0,870	115,3	164,5	18,96	0,701
0,07	0,870	124,2	164,5	20,43	0,755
0,08	0,870	133,3	164,5	21,92	0,811
0,1	0,865	147,6	163,5	24,13	0,903
0,15	0,860	190,7	162,6	31,00	1,173
0,2	0,850	229,8	160,7	36,92	1,430
0,3	0,820	300,8	155,0	46,63	1,941
0,4	0,790	373,0	149,3	55,70	2,498
0,5	0,755	429,0	142,7	61,23	3,006
0,6	0,700	477,0	132,3	63,12	3,605
0,7	0,660	510,0	124,8	63,63	4,088
0,8	0,610	534,0	115,3	61,58	4,631
1	0,530	574,0	100,2	57,51	5,729
1,5	0,400	632,0	75,61	47,79	8,358
2	0,320	667,0	60,49	40,35	11,03
3	0,230	710,0	43,48	30,87	16,33
4	0,180	735,0	34,03	25,01	21,60
5	0,150	753,0	28,36	21,35	26,56
6	0,130	765,0	24,57	18,80	31,13
7	0,110	775,0	20,79	16,12	37,27
8	0,095	783,0	17,96	14,06	43,60
10	0,080	795,0	15,12	12,02	52,57
15	0,050	818,0	9,452	7,732	86,54
20	0,040	832,0	7,561	6,291	110,0
30	0,030	850,0	5,671	4,820	149,9
40	0,020	862,0	3,781	3,259	228,0
50	0,020	870,0	3,781	3,289	230,1
60	0,015	876,0	2,836	2,484	308,9
100	0,010	893,0	1,890	1,688	472,4
300	0,000	928,0	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 3.4</u>: f_{anode} = 300 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min

4. Επίδραση της μερικής πιέσεως του υδρογόνου στην απόδοση της κυψελίδας

R / Ohm	I / mA	E / mVolt	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	101,2	6,800	19,13	0,130	0,355
0,01	100,9	7,900	19,07	0,151	0,414
0,02	100,8	8,900	19,05	0,170	0,467
0,03	100,7	9,900	19,03	0,188	0,520
0,04	100,5	10,80	18,99	0,205	0,569
0,05	100,2	11,80	18,94	0,224	0,623
0,06	100,1	13,00	18,92	0,246	0,687
0,07	100,0	14,00	18,90	0,265	0,741
0,08	99,80	15,00	18,87	0,283	0,795
0,1	99,70	16,90	18,85	0,319	0,897
0,15	99,40	21,80	18,79	0,410	1,160
0,2	99,00	26,60	18,71	0,498	1,421
0,3	98,60	35,70	18,64	0,665	1,915
0,4	98,15	45,90	18,55	0,852	2,474
0,5	97,70	55,20	18,47	1,019	2,989
0,6	97,10	65,50	18,36	1,202	3,568
0,7	96,50	74,50	18,24	1,359	4,084
0,8	96,00	83,30	18,15	1,512	4,590
1	94,80	101,4	17,92	1,817	5,658
1,5	91,70	143,5	17,33	2,488	8,278
2	88,00	182,9	16,64	3,043	10,99
3	80,60	249,3	15,24	3,798	16,36
4	73,80	302,6	13,95	4,222	21,69
5	67,90	346,0	12,84	4,441	26,96
6	63,00	383,0	11,91	4,561	32,16
7	58,15	415,0	10,99	4,562	37,75
8	54,60	442,0	10,32	4,562	42,82
10	48,00	485,0	9,074	4,401	53,45
15	37,50	567,0	7,089	4,019	79,98
20	30,80	620,0	5,822	3,610	106,5
30	22,90	687,0	4,329	2,974	158,7
40	18,10	726,0	3,422	2,484	212,2
50	15,08	754,0	2,851	2,149	264,5
60	12,90	774,0	2,439	1,887	317,4
70	11,27	789,0	2,130	1,681	370,3
80	10,00	801,0	1,890	1,514	423,7

100	8,230	821,0	1,556	1,277	527,7
150	5,680	850,0	1,074	0,913	791,6
200	4,350	867,0	0,822	0,713	1054
300	2,950	888,0	0,558	0,495	1592
400	2,250	900,0	0,425	0,383	2116
500	1,820	908,0	0,344	0,312	2639
600	1,520	914,0	0,287	0,263	3181
700	1,310	919,0	0,248	0,228	3711
800	1,150	922,0	0,217	0,200	4241
1000	0,890	930,0	0,168	0,156	5528
1500	0,610	937,0	0,115	0,108	8126
2000	0,460	942,0	0,087	0,082	10833
3000	0,310	949,0	0,059	0,056	16194
4000	0,230	954,0	0,043	0,041	21942
5000	0,190	959,0	0,036	0,034	26701
6000	0,160	961,0	0,030	0,029	31773
7000	0,130	963,0	0,025	0,024	39187
8000	0,120	964,0	0,023	0,022	42496
10000	0,100	965,0	0,019	0,018	51049
14000	0,070	967,0	0,013	0,013	73078
20000	0,050	970,0	0,009	0,009	102626
30000	0,030	972,0	0,006	0,006	171396
40000	0,020	973,0	0,004	0,004	257359
80000	0,010	975,0	0,002	0,002	515775
300000	0,000	977,0	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 4.1</u>: f_{anode} = 300 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min
P_{H2} = 0,003 bar

R / Ohm	I / mA	E / mVolt	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	110,7	7,600	20,92	0,159	0,363
0,01	110,5	8,800	20,89	0,184	0,421
0,02	110,4	9,900	20,86	0,207	0,475
0,03	110,2	11,00	20,83	0,229	0,528
0,04	110,1	12,00	20,80	0,250	0,577
0,05	109,9	13,10	20,78	0,272	0,631
0,06	109,7	14,40	20,74	0,299	0,694
0,07	109,6	15,50	20,72	0,321	0,748
0,08	109,5	16,60	20,70	0,344	0,802
0,1	109,2	18,60	20,63	0,384	0,901
0,15	108,5	23,90	20,50	0,490	1,166
0,2	107,7	29,00	20,36	0,590	1,424
0,3	106,4	38,60	20,11	0,776	1,919
0,4	105,1	49,20	19,87	0,977	2,476
0,5	103,8	58,70	19,62	1,152	2,992
0,6	102,3	69,20	19,34	1,338	3,578
0,7	101,1	78,10	19,10	1,492	4,089
0,8	99,90	86,70	18,88	1,637	4,591
1	97,40	104,2	18,41	1,919	5,659
1,5	92,00	144,0	17,39	2,504	8,280
2	86,90	180,7	16,43	2,968	11,00
3	78,40	242,4	14,82	3,592	16,36
4	71,40	293,1	13,50	3,956	21,72
5	65,70	335,0	12,42	4,161	26,97
6	60,90	370,0	11,51	4,260	32,14
7	56,60	401,0	10,70	4,290	37,48
8	53,00	428,0	10,02	4,288	42,72
10	47,00	474,0	8,885	4,211	53,35
15	36,80	557,0	6,957	3,875	80,07
20	30,30	610,0	5,728	3,494	106,5
30	22,50	676,0	4,253	2,875	158,9
40	17,90	717,0	3,384	2,426	211,9
50	14,90	744,0	2,817	2,096	264,1
60	12,75	765,0	2,410	1,844	317,4
70	11,15	781,0	2,108	1,646	370,5

80	9,900	792,0	1,871	1,482	423,2
100	8,140	812,0	1,539	1,249	527,7
150	5,640	844,0	1,066	0,900	791,6
200	4,320	862,0	0,817	0,704	1056
300	2,950	884,0	0,558	0,493	1585
400	2,250	897,0	0,425	0,382	2109
500	1,810	906,0	0,342	0,310	2648
600	1,520	913,0	0,287	0,262	3177
700	1,310	919,0	0,248	0,228	3711
800	1,150	923,0	0,217	0,201	4246
1000	0,890	929,0	0,168	0,156	5522
10000	0,100	967,0	0,019	0,018	51154
300000	0,000	980,0	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 4.2</u>: f_{anode} = 300 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min
P_{H2} = 0,006 bar

R / Ohm	I / mA	E / mVolt	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	114,3	8,000	21,61	0,173	0,370
0,01	114,2	9,200	21,59	0,199	0,426
0,02	114,1	10,30	21,57	0,222	0,478
0,03	114,0	11,50	21,54	0,248	0,534
0,04	113,8	12,50	21,51	0,269	0,581
0,05	113,6	13,60	21,47	0,292	0,633
0,06	113,4	14,90	21,44	0,319	0,695
0,07	113,2	16,10	21,40	0,345	0,752
0,08	113,1	17,20	21,37	0,368	0,805
0,1	112,8	19,40	21,31	0,413	0,910
0,15	112,0	24,80	21,17	0,525	1,171
0,2	111,2	30,00	21,02	0,631	1,427
0,3	109,8	40,00	20,76	0,830	1,927
0,4	108,2	50,80	20,45	1,039	2,484
0,5	106,8	60,50	20,19	1,221	2,997
0,6	105,2	71,30	19,89	1,418	3,585
0,7	103,9	80,50	19,64	1,581	4,099
0,8	102,6	89,20	19,40	1,730	4,599
1	99,90	107,1	18,88	2,023	5,671
1,5	94,10	147,5	17,79	2,624	8,292
2	88,80	184,7	16,79	3,100	11,00
3	79,80	247,0	15,09	3,726	16,37
4	72,60	298,0	13,72	4,090	21,71
5	66,60	340,0	12,59	4,281	27,01
6	61,70	375,0	11,66	4,374	32,15
7	57,30	407,0	10,83	4,409	37,57
8	53,60	434,0	10,13	4,397	42,83
10	47,60	479,0	8,998	4,310	53,23
15	37,00	560,0	6,994	3,917	80,06
20	30,40	612,0	5,747	3,517	106,5
30	22,60	678,0	4,272	2,897	158,7
40	17,95	719,0	3,393	2,440	211,9
50	14,95	747,0	2,826	2,111	264,3
60	12,80	768,0	2,420	1,858	317,4

70	11,20	784,0	2,117	1,660	370,3
80	9,950	796,0	1,881	1,497	423,2
100	8,180	816,0	1,546	1,262	527,7
150	5,650	847,0	1,068	0,905	793,0
200	4,340	866,0	0,820	0,710	1056
300	2,950	888,0	0,558	0,495	1592
400	2,250	901,0	0,425	0,383	2118
500	1,820	910,0	0,344	0,313	2645
600	1,530	918,0	0,289	0,266	3174
700	1,320	924,0	0,250	0,231	3703
800	1,160	928,0	0,219	0,203	4232
1000	0,890	935,0	0,168	0,157	5557
10000	0,100	970,0	0,019	0,018	51313
300000	0,000	984,0	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 4.3</u>: f_{anode} = 300 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min
P_{H2} = 0,01 bar

R / Ohm	I / A	E / mVolt	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	0,455	31,80	86,01	2,735	0,370
0,01	0,455	36,70	86,01	3,157	0,427
0,02	0,455	41,40	86,01	3,561	0,481
0,03	0,455	46,20	86,01	3,974	0,537
0,04	0,455	50,20	86,01	4,318	0,584
0,05	0,455	54,80	86,01	4,713	0,637
0,06	0,455	60,30	86,01	5,186	0,701
0,07	0,455	64,90	86,01	5,582	0,755
0,08	0,455	69,60	86,01	5,986	0,809
0,1	0,450	78,70	85,07	6,695	0,925
0,15	0,450	101,1	85,07	8,600	1,188
0,2	0,450	123,1	85,07	10,47	1,447
0,3	0,445	164,4	84,12	13,83	1,954
0,4	0,440	210,6	83,18	17,52	2,532
0,5	0,440	252,3	83,18	20,99	3,033
0,6	0,435	298,0	82,23	24,50	3,624
0,7	0,430	342,0	81,29	27,80	4,207
0,8	0,425	379,0	80,34	30,45	4,717
1	0,410	444,0	77,50	34,41	5,729
1,5	0,350	548,0	66,16	36,26	8,283
2	0,290	601,0	54,82	32,95	10,96
3	0,210	657,0	39,70	26,08	16,55
4	0,170	687,0	32,14	22,08	21,38
5	0,140	708,0	26,47	18,74	26,75
6	0,120	723,0	22,68	16,40	31,87
7	0,100	735,0	18,90	13,89	38,88
8	0,090	745,0	17,01	12,67	43,79
10	0,075	759,0	14,18	10,76	53,53
15	0,050	786,0	9,452	7,429	83,16
20	0,040	802,0	7,561	6,064	106,1
30	0,030	824,0	5,671	4,673	145,3
40	0,020	840,0	3,781	3,176	222,2
50	0,015	849,0	2,836	2,407	299,4
60	0,010	856,0	1,890	1,618	452,8
100	0,010	876,0	1,890	1,656	463,4
150	0,005	891,0	0,945	0,842	942,7
300	0,000	914,0	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 4.4</u>: f_{anode} = 300 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min
P_{H2} = 0,015 bar

R / Ohm	I / A	E / mVolt	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	0,880	62,20	166,4	10,35	0,374
0,01	0,880	71,20	166,4	11,84	0,428
0,02	0,880	79,90	166,4	13,29	0,480
0,03	0,875	88,70	165,4	14,67	0,536
0,04	0,875	96,80	165,4	16,01	0,585
0,05	0,870	105,4	164,5	17,33	0,641
0,06	0,870	115,3	164,5	18,96	0,701
0,07	0,870	124,2	164,5	20,43	0,755
0,08	0,870	133,3	164,5	21,92	0,811
0,1	0,865	147,6	163,5	24,13	0,903
0,15	0,860	190,7	162,6	31,00	1,173
0,2	0,850	229,8	160,7	36,92	1,430
0,3	0,820	300,8	155,0	46,63	1,941
0,4	0,790	373,0	149,3	55,70	2,498
0,5	0,755	429,0	142,7	61,23	3,006
0,6	0,700	477,0	132,3	63,12	3,605
0,7	0,660	510,0	124,8	63,63	4,088
0,8	0,610	534,0	115,3	61,58	4,631
1	0,530	574,0	100,2	57,51	5,729
1,5	0,400	632,0	75,61	47,79	8,358
2	0,320	667,0	60,49	40,35	11,03
3	0,230	710,0	43,48	30,87	16,33
4	0,180	735,0	34,03	25,01	21,60
5	0,150	753,0	28,36	21,35	26,56
6	0,130	765,0	24,57	18,80	31,13
7	0,110	775,0	20,79	16,12	37,27
8	0,095	783,0	17,96	14,06	43,60
10	0,080	795,0	15,12	12,02	52,57
15	0,050	818,0	9,452	7,732	86,54
20	0,040	832,0	7,561	6,291	110,0
30	0,030	850,0	5,671	4,820	149,9
40	0,020	862,0	3,781	3,259	228,0
50	0,020	870,0	3,781	3,289	230,1
60	0,015	876,0	2,836	2,484	308,9
100	0,010	893,0	1,890	1,688	472,4
300	0,000	928,0	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 4.5</u>: f_{anode} = 300 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min
P_{H2} = 0,03 bar

I / A	E / V	P / mWatt	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
1,880	0,132	248,2	355,4	46,91	0,371
1,860	0,151	280,9	351,6	53,09	0,429
1,840	0,168	309,1	347,8	58,43	0,483
1,825	0,186	339,5	345,0	64,17	0,539
1,810	0,201	363,8	342,2	68,77	0,587
1,790	0,217	388,4	338,4	73,43	0,641
1,770	0,235	416,0	334,6	78,63	0,702
1,750	0,251	439,3	330,8	83,03	0,759
1,730	0,266	460,2	327,0	86,99	0,813
1,700	0,294	499,8	321,4	94,48	0,915
1,600	0,358	572,8	302,5	108,3	1,184
1,490	0,406	604,9	281,7	114,4	1,441
1,290	0,474	611,5	243,9	115,6	1,944
1,100	0,525	577,5	207,9	109,2	2,525
0,970	0,558	541,3	183,4	102,3	3,043
0,850	0,586	498,1	160,7	94,16	3,647
0,765	0,604	462,1	144,6	87,35	4,177
0,690	0,618	426,4	130,4	80,61	4,738
0,585	0,644	376,7	110,6	71,22	5,824
0,420	0,684	287,3	79,40	54,31	8,615
0,325	0,706	229,5	61,44	43,37	11,49
0,220	0,735	161,7	41,59	30,57	17,67
0,170	0,751	127,7	32,14	24,13	23,37
0,135	0,760	102,6	25,52	19,40	29,78
0,110	0,766	84,26	20,79	15,93	36,84
0,095	0,770	73,15	17,96	13,83	42,88
0,085	0,772	65,62	16,07	12,40	48,05
0,065	0,781	50,77	12,29	9,596	63,56
0,040	0,801	32,04	7,561	6,057	105,9
0,030	0,814	24,42	5,671	4,616	143,5
0,015	0,833	12,50	2,836	2,362	293,8
0,010	0,845	8,450	1,890	1,597	447,0
0,005	0,854	4,270	0,945	0,807	903,5
0,000	0,861	0,000	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 4.6</u>: f_{anode} = 300 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min
P_{H2} = 0,06 bar

I / A	E / V	P / mWatt	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
2,560	0,178	455,7	483,9	86,14	0,368
2,520	0,202	509,0	476,4	96,23	0,424
2,465	0,224	552,2	466,0	104,4	0,481
2,410	0,244	588,0	455,6	111,2	0,536
2,365	0,261	617,3	447,1	116,7	0,584
2,320	0,279	647,3	438,6	122,4	0,636
2,260	0,299	675,7	427,2	127,7	0,700
2,210	0,316	698,4	417,8	132,0	0,756
2,160	0,331	715,0	408,3	135,2	0,811
2,070	0,357	739,0	391,3	139,7	0,912
1,870	0,417	779,8	353,5	147,4	1,180
1,695	0,461	781,4	320,4	147,7	1,439
1,425	0,522	743,9	269,4	140,6	1,938
1,195	0,569	680,0	225,9	128,5	2,519
1,040	0,599	623,0	196,6	117,8	3,047
0,905	0,624	564,7	171,1	106,8	3,647
0,810	0,640	518,4	153,1	98,00	4,180
0,735	0,653	480,0	138,9	90,73	4,700
0,615	0,674	414,5	116,3	78,36	5,797
0,440	0,711	312,8	83,18	59,14	8,548
0,395	0,731	288,7	74,67	54,58	9,790
0,230	0,758	174,3	43,48	32,96	17,43
0,180	0,772	139,0	34,03	26,27	22,69
0,140	0,780	109,2	26,47	20,64	29,47
0,115	0,784	90,16	21,74	17,04	36,06
0,100	0,787	78,70	18,90	14,88	41,63
0,085	0,789	67,07	16,07	12,68	49,10
0,065	0,798	51,87	12,29	9,805	64,94
0,040	0,820	32,80	7,561	6,200	108,4
0,030	0,832	24,96	5,671	4,718	146,7
0,015	0,852	12,78	2,836	2,416	300,5
0,010	0,864	8,640	1,890	1,633	457,1
0,005	0,873	4,365	0,945	0,825	923,6
0,000	0,880	0,000	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 4.7</u>: f_{anode} = 300 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min
P_{H2} = 0,33 bar

R / ohm	I / A	E / V	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	2,540	0,177	478,3	84,65	0,370
0,01	2,485	0,189	466,9	88,25	0,405
0,02	2,440	0,220	457,5	100,6	0,481
0,03	2,390	0,240	448,0	107,5	0,536
0,04	2,345	0,257	440,5	113,2	0,583
0,05	2,295	0,275	431,0	118,5	0,638
0,06	2,240	0,295	421,6	124,4	0,700
0,07	2,190	0,312	412,1	128,6	0,757
0,08	2,145	0,327	403,6	132,0	0,810
0,1	2,060	0,354	387,5	137,2	0,913
0,15	1,860	0,413	349,7	144,4	1,181
0,2	1,690	0,460	318,5	146,5	1,444
0,3	1,420	0,524	268,4	140,7	1,952
0,4	1,200	0,574	226,8	130,2	2,530
0,5	1,045	0,607	198,5	120,5	3,058
0,6	0,910	0,635	173,9	110,4	3,651
0,7	0,820	0,653	156,0	101,8	4,187
0,8	0,745	0,668	141,8	94,71	4,712
1	0,625	0,694	119,1	82,65	5,827
1,5	0,450	0,734	85,07	62,44	8,629
2	0,345	0,757	66,16	50,09	11,44
3	0,240	0,789	45,37	35,80	17,39
4	0,180	0,807	34,03	27,46	23,72
5	0,145	0,819	27,41	22,45	29,88
6	0,120	0,828	23,63	19,57	35,04
7	0,100	0,834	19,85	16,55	42,02
8	0,090	0,839	17,01	14,27	49,31
10	0,070	0,850	14,18	12,05	59,95
15	0,040	0,868	8,507	7,384	102,0
20	0,030	0,880	5,671	4,991	155,2
30	0,015	0,895	3,781	3,384	236,7
40	0,010	0,905	1,890	1,711	478,7
50	0,005	0,912	0,945	0,862	964,9
60	0,000	0,917	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 4.8</u>: f_{anode} = 300 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min
P_{H2} = 1 bar

5. Επίδραση της μερικής πιέσεως του οξυγόνου στην απόδοση της κυψελίδας

R / ohm	I / A	E / V	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	Resistance / Ohm cm^2
0	1,850	0,128	349,7	44,76	0,366
0,01	1,830	0,146	345,9	50,51	0,422
0,02	1,810	0,164	342,2	56,11	0,479
0,03	1,790	0,180	338,4	60,91	0,532
0,04	1,770	0,195	334,6	65,25	0,583
0,05	1,750	0,210	330,8	69,47	0,635
0,06	1,730	0,228	327,0	74,56	0,697
0,07	1,700	0,243	321,4	78,09	0,756
0,08	1,680	0,258	317,6	81,94	0,812
0,1	1,640	0,284	310,0	88,05	0,916
0,15	1,540	0,345	291,1	100,4	1,185
0,2	1,450	0,395	274,1	108,3	1,441
0,3	1,280	0,471	242,0	114,0	1,947
0,4	1,110	0,531	209,8	111,4	2,531
0,5	0,990	0,569	187,1	106,5	3,040
0,6	0,870	0,602	164,5	99,01	3,660
0,7	0,780	0,622	147,4	91,71	4,218
0,8	0,720	0,639	136,1	86,97	4,695
1	0,600	0,666	113,4	75,54	5,872
1,5	0,440	0,710	83,18	59,05	8,536
2	0,340	0,734	64,27	47,18	11,42
3	0,230	0,766	43,48	33,30	17,62
4	0,180	0,784	34,03	26,68	23,04
5	0,140	0,794	26,47	21,01	30,00
6	0,120	0,801	22,68	18,17	35,31
7	0,100	0,807	18,90	15,26	42,69
8	0,090	0,811	17,01	13,80	47,67
10	0,070	0,820	13,23	10,85	61,97
15	0,045	0,840	8,507	7,146	98,75
20	0,030	0,852	5,671	4,832	150,2
30	0,020	0,870	3,781	3,289	230,1
40	0,010	0,879	1,890	1,662	465,0
50	0,005	0,886	0,945	0,837	937,4
60	0,000	0,892	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 5.1</u>: f_{anode} = 300 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min
P_{O2} = 0,085 bar

R / ohm	I / A	E / V	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	2,490	0,174	470,7	81,90	0,370
0,01	2,440	0,196	461,2	90,40	0,425
0,02	2,400	0,217	453,7	98,45	0,478
0,03	2,350	0,237	444,2	105,3	0,534
0,04	2,290	0,253	432,9	109,5	0,584
0,05	2,250	0,271	425,3	115,3	0,637
0,06	2,200	0,291	415,9	121,0	0,700
0,07	2,150	0,307	406,4	124,8	0,755
0,08	2,100	0,323	397,0	128,2	0,814
0,1	2,020	0,349	381,9	133,3	0,914
0,15	1,830	0,410	345,9	141,8	1,185
0,2	1,670	0,456	315,7	144,0	1,444
0,3	1,420	0,522	268,4	140,1	1,945
0,4	1,200	0,573	226,8	130,0	2,526
0,5	1,050	0,606	198,5	120,3	3,053
0,6	0,920	0,635	173,9	110,4	3,651
0,7	0,830	0,653	156,9	102,5	4,162
0,8	0,750	0,668	141,8	94,71	4,712
1	0,630	0,695	119,1	82,77	5,836
1,5	0,450	0,736	85,07	62,61	8,652
2	0,350	0,760	66,16	50,28	11,49
3	0,240	0,791	45,37	35,89	17,43
4	0,180	0,809	34,03	27,53	23,78
5	0,150	0,821	28,36	23,28	28,95
6	0,120	0,829	22,68	18,81	36,55
7	0,105	0,834	19,85	16,55	42,02
8	0,090	0,838	17,01	14,26	49,26
10	0,070	0,847	13,23	11,21	64,01
15	0,045	0,866	8,507	7,367	101,8
20	0,030	0,877	5,671	4,974	154,6
30	0,020	0,892	3,781	3,372	235,9
40	0,010	0,902	1,890	1,705	477,2
50	0,005	0,908	0,945	0,858	960,7
60	0,005	0,913	0,945	0,863	966,0
70	0	0,917	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 5.2</u>: f_{anode} = 300 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min
P_{O2} = 0,21 bar

R / ohm	I / A	E / V	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	2,990	0,205	565,2	115,9	0,363
0,01	2,910	0,231	550,1	127,1	0,420
0,02	2,830	0,254	535,0	135,9	0,475
0,03	2,750	0,276	519,8	143,5	0,531
0,04	2,670	0,293	504,7	147,9	0,581
0,05	2,600	0,312	491,5	153,3	0,635
0,06	2,520	0,332	476,4	158,2	0,697
0,07	2,450	0,349	463,1	161,6	0,754
0,08	2,390	0,365	451,8	164,9	0,808
0,1	2,280	0,392	431,0	169,0	0,910
0,15	2,010	0,447	380,0	169,8	1,176
0,2	1,810	0,492	342,2	168,3	1,438
0,3	1,510	0,553	285,4	157,9	1,937
0,4	1,260	0,600	238,2	142,9	2,519
0,5	1,090	0,631	206,0	130,0	3,062
0,6	0,950	0,657	179,6	118,0	3,658
0,7	0,855	0,675	161,6	109,1	4,176
0,8	0,770	0,688	145,6	100,1	4,727
1	0,650	0,712	122,9	87,49	5,795
1,5	0,465	0,754	87,90	66,28	8,578
2	0,360	0,777	68,05	52,88	11,42
3	0,250	0,807	47,26	38,14	17,08
4	0,185	0,822	34,97	28,75	23,50
5	0,150	0,832	28,36	23,59	29,34
6	0,125	0,838	23,63	19,80	35,46
7	0,105	0,842	19,85	16,71	42,42
8	0,090	0,845	17,01	14,38	49,67
10	0,070	0,852	13,23	11,27	64,39
15	0,045	0,871	8,507	7,409	102,4
20	0,030	0,880	5,671	4,991	155,2
30	0,015	0,896	2,836	2,541	316,0
40	0,010	0,907	1,890	1,715	479,8
50	0,005	0,913	0,945	0,863	966,0
60	0,005	0,918	0,945	0,868	971,2
70	0,000	0,922	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 5.3</u>: f_{anode} = 300 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min
P_{O2} = 0,50 bar

R / ohm	I / A	E / V	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	3,080	0,212	582,2	123,4	0,364
0,01	2,990	0,238	565,2	134,5	0,421
0,02	2,910	0,262	550,1	144,1	0,476
0,03	2,830	0,284	535,0	151,9	0,531
0,04	2,750	0,302	519,8	157,0	0,581
0,05	2,680	0,321	506,6	162,6	0,634
0,06	2,590	0,342	489,6	167,4	0,699
0,07	2,520	0,359	476,4	171,0	0,754
0,08	2,450	0,373	463,1	172,8	0,805
0,1	2,300	0,396	434,8	172,2	0,911
0,15	2,040	0,454	385,6	175,1	1,177
0,2	1,840	0,500	347,8	173,9	1,438
0,3	1,520	0,560	287,3	160,9	1,949
0,4	1,270	0,607	240,1	145,7	2,528
0,5	1,110	0,639	209,8	134,1	3,045
0,6	0,970	0,666	183,4	122,1	3,632
0,7	0,870	0,685	164,5	112,7	4,165
0,8	0,790	0,700	149,3	104,5	4,687
1	0,660	0,724	124,8	90,33	5,803
1,5	0,470	0,766	88,85	68,06	8,622
2	0,360	0,791	68,05	53,83	11,62
3	0,250	0,822	47,26	38,85	17,39
4	0,190	0,840	35,92	30,17	23,39
5	0,160	0,851	30,25	25,74	28,14
6	0,130	0,859	24,57	21,11	34,95
7	0,110	0,865	20,79	17,99	41,60
8	0,095	0,869	17,96	15,61	48,39
10	0,075	0,878	14,18	12,45	61,93
15	0,045	0,895	8,507	7,613	105,2
20	0,035	0,905	6,616	5,988	136,8
30	0,020	0,920	3,781	3,478	243,3
40	0,010	0,929	1,890	1,756	491,4
50	0,010	0,934	1,890	1,766	494,1
60	0,005	0,939	0,945	0,888	993,5
70	0,000	0,943	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 5.4</u>: f_{anode} = 300 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min
P_{O2} = 0,80 bar

R / ohm	I / A	E / V	i / mA cm^{-2}	p / mWatt cm^{-2}	resistance / Ohm cm^2
0	3,130	0,217	591,7	128,4	0,367
0,01	3,060	0,242	578,4	140,0	0,418
0,02	2,970	0,266	561,4	149,3	0,474
0,03	2,910	0,290	550,1	159,5	0,527
0,04	2,830	0,308	535,0	164,8	0,576
0,05	2,760	0,329	521,7	171,7	0,631
0,06	2,670	0,350	504,7	176,7	0,693
0,07	2,600	0,368	491,5	180,9	0,749
0,08	2,530	0,384	478,3	183,7	0,803
0,1	2,400	0,412	453,7	186,9	0,908
0,15	2,120	0,471	400,8	188,8	1,175
0,2	1,880	0,511	355,4	181,6	1,438
0,3	1,560	0,571	294,9	168,4	1,936
0,4	1,300	0,618	245,7	151,9	2,515
0,5	1,130	0,651	213,6	139,1	3,048
0,6	0,985	0,679	186,2	126,4	3,647
0,7	0,880	0,698	166,4	116,1	4,196
0,8	0,800	0,713	151,2	107,8	4,715
1	0,670	0,737	126,7	93,34	5,819
1,5	0,480	0,780	90,74	70,78	8,596
2	0,370	0,805	69,94	56,30	11,51
3	0,260	0,835	49,15	41,04	16,99
4	0,190	0,853	35,92	30,64	23,75
5	0,160	0,864	30,25	26,13	28,57
6	0,130	0,872	24,57	21,43	35,48
7	0,110	0,878	20,79	18,26	42,22
8	0,095	0,883	17,96	15,86	49,17
10	0,070	0,892	13,23	11,80	67,41
15	0,050	0,908	9,452	8,582	96,07
20	0,035	0,917	6,616	6,067	138,6
30	0,020	0,933	3,781	3,527	246,8
40	0,010	0,941	1,890	1,779	497,8
50	0,005	0,947	0,945	0,895	1002
60	0,005	0,952	0,945	0,900	1007
70	0,000	0,955	0,000	0,000	

<u>Πίνακας τιμών 5.5</u>: f_{anode} = 300 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min
P_{O2} = 1 bar

6. Επίδραση της υγρασίας στην απόδοση της κυψελίδας

T / oC	Imax / A	imax / mA cm^{-2}	T / oC	Imax / A	imax / mA cm^{-2}
38	2,780	525,5	50	3,370	637,1
43	2,790	527,4	53	3,420	646,5
46	2,800	529,3	58	3,510	663,5
52	2,800	529,3	60	3,560	673,0
56	2,810	531,2	66	3,630	686,2
61	2,820	533,1	70	3,640	688,1
73	2,830	535,0	75	3,520	665,4
77	2,840	536,9	78	3,330	629,5
80	2,850	538,8	80	3,230	610,6
82	2,870	542,5	83	3,100	586,0
86	2,900	548,2			
89	2,930	553,9			
91	3,000	567,1			
93	3,050	576,6			
95	3,130	591,7			
96	3,200	604,9			
97	3,370	637,1			

<u>Πίνακας τιμών 6.1</u>: f_{anode} = 300 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min

T / oC	Imax / A	imax / mA cm^{-2}
28,6	2,830	535,0
30	2,880	544,4
32	2,920	552,0
34	2,950	557,7
36	3,000	567,1
38	3,050	576,6
40	3,100	586,0
42	3,150	595,5
44	3,190	603,0
46	3,220	608,7
48	3,240	612,5
50	3,260	616,3
52	3,270	618,1
54	3,200	604,9
56	3,070	580,3
58	2,870	542,5
60	2,600	491,5
62	2,200	415,9
64	1,640	310,0
66	0,940	177,7
68	0,540	102,1
70	0,370	69,94
72	0,290	54,82
74	0,250	47,26
76	0,230	43,48
78	0,200	37,81
80	0,180	34,03
82	0,160	30,25
84	0,150	28,36

<u>Πίνακας τιμών 6.2</u>: f_{anode} = 300 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min
Humidity = 3,1%

T / oC	Imax / A	imax / mA cm^{-2}
36	3,000	567,1
38	3,060	578,4
40	3,100	586,0
42	3,150	595,5
44	3,200	604,9
46	3,240	612,5
48	3,280	620,0
50	3,330	629,5
52	3,350	633,3
54	3,450	652,2
56	3,490	659,7
58	3,510	663,5
60	3,520	665,4
66	3,790	716,4
68	3,810	720,2
70	3,250	614,4
72	2,970	561,4
74	2,100	397,0
76	1,870	353,5
78	1,600	302,5
80	1,360	257,1
82	1,090	206,0
84	0,990	187,1
86	0,870	164,5

<u>Πίνακας τιμών 6.3</u>: f_{anode} = 300 cc/min , $f_{cathode}$ = 250 cc/min
Humidity = 57%