

ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΜΑΖΑΣ – ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ
ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ
ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ
ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Σταμάτιος Στ. Μπέτσης

Επιβλέπων: Καθ. Ιωάννης Πασπαλιάρης

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ

**ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΜΑΖΑΣ – ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΚΥΨΕΛΗ
ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ
ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σταμάτιος Στ. Μπέτσης

Επιβλέπων: Ιωάννης Πασπαλιάρης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

Ιωάννης Πασπαλιάρης

Άνθιμος Ξενίδης

Νυμφοδώρα Παπασιώπη

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2011

.....

Σταμάτιος Στ. Μπέτσης

Διπλωματούχος Μηχανικός Μεταλλείων Μεταλλουργών Ε.Μ.Π.

Copyright ©Σταμάτιος Στ. Μπέτσης. 2011

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου το οποίο ιδρύθηκε με την πρωτοβουλία του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του Καθηγητή και προέδρου της σχολής των Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών κ. Ι. Πασπαλιάρη. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Πασπαλιάρη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το ενδιαφέρον και σύγχρονο θέμα καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε κατά την πορεία της εκπόνησης της διπλωματικής αυτής. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αντώνη Πέππα για την καθοδήγησή του και για το ότι ήταν πάντα πρόθυμος να βοηθήσει στην επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος ανέκυπτε καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής της διπλωματικής εργασίας. Ακόμα, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κ. Πανώριο Μπενάρδο για τη συνεργασία του στη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου καθώς και για τη βοήθειά που μου παρείχε στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|---|---------------|
| Κεφάλαιο 1 | |
| Εισαγωγή | Σελ 26 |
| 1.1 Ενέργεια και Υδρογόνο | Σελ 26 |
| | |
| Κεφάλαιο 2 | |
| Κυψέλες Καυσίμου | Σελ 28 |
| 2.1 Ιστορική αναδρομή κυψέλης καυσίμου | Σελ 28 |
| 2.2 Κατηγορίες και λειτουργία κυψελών καυσίμου | Σελ 32 |
| 2.3 Σύστημα κυψελών καυσίμου | Σελ 41 |
| 2.4 Πεδίο εφαρμογών κυψελών καυσίμου | Σελ 45 |
| 2.5 Πλεονεκτήματα- Μειονεκτήματα κυψελών καυσίμου | Σελ 53 |
| | |
| Κεφάλαιο 3 | |
| Ανάλυση της κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων | Σελ 58 |
| 3.1 Αρχή λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου | Σελ 58 |
| 3.2 Δομή της Κυψέλης | Σελ 60 |
| 3.2.1 Μεμβράνη | Σελ 62 |
| 3.2.2 Ηλεκτρόδια και η δομή τους | Σελ 63 |
| 3.2.3 Ροή αερίων και συλλογή ρεύματος | Σελ 67 |
| 3.2.4 Συστοιχία Κυψελών - Διπολικές πλάκες | Σελ 68 |
| 3.3 Ολοκληρωμένη μονάδα παραγωγής ενέργειας με κυψέλη καυσίμου PEM | Σελ 70 |

| | |
|---|---------|
| 3.3.1 Περιφερειακά συστήματα της κυψέλης καυσίμου PEM..... | Σελ 71 |
| 3.3.2 Ηλεκτρονικά ισχύος και συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας | Σελ 72 |
| 3.3.2.1 Μετατροπέας | Σελ 73 |
| 3.3.2.2 Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας | Σελ 74 |
| 3.3.2.3 Αντιστροφέας (inverter)..... | Σελ 76 |
| 3.4 Θερμοδυναμική Προσέγγιση..... | Σελ 77 |
| 3.4.1 Απόδοση Κυψέλης | Σελ 81 |
| 3.4.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την τάση | Σελ 84 |
| 3.5 Ρυθμός Αντίδρασης Κυψελών Καυσίμου..... | Σελ 85 |
| 3.6 Διάχυση των αερίων στα ηλεκτρόδια..... | Σελ 86 |
| 3.7 Μηχανισμοί που προκαλούν πτώση τάσεως..... | Σελ 87 |
| 3.7.1 Πυκνότητα ρεύματος και ισχύος | Σελ 87 |
| 3.7.2 Απώλειες ενεργοποίησης | Σελ 88 |
| 3.7.3 Ωμικές απώλειες | Σελ 89 |
| 3.7.4 Μείωση στη συγκέντρωση των αντιδρώντων | Σελ 90 |
| 3.8 Φαινόμενο ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας (charge double layer).. | Σελ 91 |
| 3.9 Χαρακτηριστική τάση ρεύματος της κυψέλης..... | Σελ 92 |
| 3.10 Διαχείριση νερού | Σελ 94 |
| Κεφάλαιο 4 | |
| Θεωρητικά μοντέλα Κυψελών καυσίμου..... | Σελ 96 |
| 4.1 Μοντέλο Njoya – Tremblay – Dessaint | Σελ 101 |

| | |
|--|----------------|
| 4.2 Μοντέλο Lazarou- Pyrgioti..... | Σελ 103 |
| 4.3 Μοντέλο Buasri- Slamah..... | Σελ 105 |
| 4.4 Μοντέλο Yeramalla – Davari..... | Σελ 107 |
| | |
| Κεφάλαιο 5 | |
| Ανάλυση Πειραματικής διαδικασίας | Σελ 109 |
| 5.1 Εισαγωγή | Σελ 109 |
| 5.1.1 Λίγα λόγια για το πρόγραμμα H2susBuild | Σελ 110 |
| 5.1.2 Διευθέτηση Εξοπλισμού | Σελ 111 |
| 5.1.3 Σύστημα παρακολούθησης και παρακολούθηση των δεδομένων | Σελ 113 |
| 5.2 Περιγραφή πειραματικής διάταξης | Σελ 114 |
| 5.2.1 Περιγραφή κυψέλης καυσίμου | Σελ 115 |
| 5.2.2 Περιγραφή Αντιστροφέα | Σελ 119 |
| 5.3 Ροή της Ενέργειας στο σύστημα κυψέλης καυσίμου – αντιστροφέα | Σελ 120 |
| 5.4 Ανάλυση πειραματικής διαδικασίας | Σελ 122 |
| 5.5 Ελεγχόμενα - Μετρούμενα - Υπολογιζόμενα Μεγέθη | Σελ 122 |
| 5.6 Πειραματικά αποτελέσματα | Σελ 125 |
| 5.6.1 Υπολογισμός Συνολικής κατανάλωσης H2 | Σελ 125 |
| 5.6.2 Παρουσίαση πειραματικών μετρήσεων συστοιχίας κυψελίδων καυσίμου (fuel cell stack) | Σελ 128 |
| 5.6.2.1 Πειραματικά αποτελέσματα της περιοχής λειτουργίας A | Σελ 130 |

| | |
|--|---------|
| 5.6.2.1.1 Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου | Σελ 130 |
| 5.6.2.1.2 Διάγραμμα Έντασης Ρεύματος – Χρόνου | Σελ 131 |
| 5.6.2.1.3 Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου | Σελ 131 |
| 5.6.2.1.4 Διάγραμμα κατανάλωσης H ₂ | Σελ 132 |
| 5.6.2.2 Πειραματικά αποτελέσματα της περιοχής λειτουργίας Β | Σελ 132 |
| 5.6.2.2.1 Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου | Σελ 132 |
| 5.6.2.2.2 Διάγραμμα Έντασης Ρεύματος – Χρόνου | Σελ 133 |
| 5.6.2.2.3 Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου | Σελ 134 |
| 5.6.2.2.4 Διάγραμμα κατανάλωσης H ₂ | Σελ 135 |
| 5.6.2.2.5 Ηλεκτρική απόδοση συστοιχίας κυψελίδων καυσίμου | Σελ 135 |
| 5.6.2.3 Πειραματικά αποτελέσματα της περιοχής λειτουργίας Γ | Σελ 136 |
| 5.6.2.3.1 Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου | Σελ 136 |
| 5.6.2.3.2 Διάγραμμα Έντασης Ρεύματος – Χρόνου | Σελ 137 |
| 5.6.2.3.3 Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου | Σελ 138 |
| 5.6.2.3.4 Διάγραμμα κατανάλωσης H ₂ | Σελ 138 |
| 5.6.2.3.5 Ηλεκτρική απόδοση συστοιχίας κυψελίδων καυσίμου | Σελ 139 |
| 5.6.2.4 Πειραματικά αποτελέσματα της περιοχής λειτουργίας Δ | Σελ 140 |

| | |
|---|---------|
| 5.6.2.4.1 Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου | Σελ 140 |
| 5.6.2.4.2 Διάγραμμα Έντασης Ρεύματος – Χρόνου | Σελ 141 |
| 5.6.2.4.3 Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου | Σελ 142 |
| 5.6.2.4.4 Διάγραμμα κατανάλωσης H ₂ | Σελ 142 |
| 5.6.2.4.5 Ηλεκτρική απόδοση συστοιχίας κυψελίδων καυσίμου | Σελ 143 |
| 5.6.2.5 Διάγραμμα Τάσης – Έντασης Ρεύματος | Σελ 144 |
| 5.6.3 Πειραματικές μετρήσεις κυψέλης καυσίμου και αντιστροφέα (inverter) | Σελ 146 |
| 5.6.3.1 Πειραματικά αποτελέσματα της περιοχής λειτουργίας A | Σελ 148 |
| 5.6.3.1.1 Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου | Σελ 148 |
| 5.6.3.1.2 Διάγραμμα Μεταβολής Ενέργειας – Χρόνου | Σελ 149 |
| 5.6.3.1.3 Θερμότητα Q | Σελ 149 |
| 5.6.3.2 Πειραματικά αποτελέσματα της περιοχής λειτουργίας B | Σελ 150 |
| 5.6.3.2.1 Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου | Σελ 150 |
| 5.6.3.2.2 Διάγραμμα Μεταβολής Ενέργειας – Χρόνου | Σελ 151 |
| 5.6.3.2.3 Απώλειες περιφερειακών συστημάτων και αντιστροφέα | Σελ 151 |
| 5.6.3.2.4 Ηλεκτρική απόδοση κυψέλης καυσίμου και αντιστροφέα | Σελ 152 |
| 5.6.3.2.5 Θερμότητα Q | Σελ 152 |

| | |
|---|---------|
| 5.6.3.2.6 Ποσοστά μετατροπής Ενέργειας σε Θερμότητα και Ηλεκτρική Ενέργεια | Σελ 152 |
| 5.6.3.3 Πειραματικά αποτελέσματα της περιοχής λειτουργίας Γ | Σελ 153 |
| 5.6.3.3.1 Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου | Σελ 153 |
| 5.6.3.3.2 Διάγραμμα Μεταβολής Ενέργειας – Χρόνου | Σελ 154 |
| 5.6.3.3.3 Απώλειες περιφερειακών συστημάτων και αντιστροφή | Σελ 154 |
| 5.6.3.3.4 Ηλεκτρική απόδοση κυψέλης καυσίμου και αντιστροφή | Σελ 155 |
| 5.6.3.3.5 Θερμότητα Q | Σελ 155 |
| 5.6.3.4 Πειραματικά αποτελέσματα της περιοχής λειτουργίας Δ | Σελ 156 |
| 5.6.3.4.1 Διάγραμμα Ισχύος –Χρόνου | Σελ 156 |
| 5.6.3.4.2 Διάγραμμα Μεταβολής Ενέργειας – Χρόνου | Σελ 157 |
| 5.6.3.4.3 Απώλειες περιφερειακών συστημάτων και αντιστροφή | Σελ 157 |
| 5.6.3.4.4 Ηλεκτρική απόδοση κυψέλης καυσίμου και αντιστροφή | Σελ 158 |
| 5.6.3.4.5 Θερμότητα Q | Σελ 158 |
| 5.6.3.4.6 Ποσοστά μετατροπής Ενέργειας σε Θερμότητα και Ηλεκτρική Ενέργεια | Σελ 158 |
| 5.7 Ισοζύγιο Μάζας - Ενέργειας | Σελ 159 |

| | |
|--|----------------|
| Κεφάλαιο 6 | |
| Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα | Σελ 162 |
| 6.1 Σημεία προαγωγής της Επιστήμης | Σελ 163 |
| 6.2 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση | Σελ 164 |
| Βιβλιογραφικές Αναφορές | Σελ 166 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Απεικόνιση της διάταξης του Sir William Grove (α) Η ηλεκτρόλυση του νερού. Το νερό διασπάται σε υδρογόνο και οξυγόνο με τη βοήθεια ηλεκτρικού ρεύματος.(β) Ροή ηλεκτρικού ρεύματος-Το οξυγόνο και το υδρογόνο επανενώνονται(τα βέλη στο σχήμα αναπαριστούν τη ροή των ηλεκτρονίων από το – στο +).

Σχήμα 2.2: Ο Bacon με την κυψέλη καυσίμου των 6kW. (Copyright Hulton-Deutsch Collection/Corbis).

Σχήμα 2.3: Κυψέλη καυσίμου τύπου PEM[Illinois Institute of Technology web site]

Σχήμα 2.4: Κυψέλη καυσίμου Αλκαλικού ηλεκτρολύτη[Illinois Institute of Technology web site]

Σχήμα 2.5: Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων[Illinois Institute of Technology web site]

Σχήμα 2.6: Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου[Illinois Institute of Technology web site]

Σχήμα 2.7: Κυψέλη καυσίμου μεθανόλης

Σχήμα 2.8 :Σχηματική αναπαράσταση συστήματος σύνδεσης των κυψελών καυσίμου με το δίκτυο και με τοπικά φορτία [10]

Σχήμα 2.9: Οι σημαντικότερες διεργασίες σε ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου.

Σχήμα 2.10: Εικόνα του στόλου λεωφορείων υδρογόνου της HyFleet στο Βερολίνο, 2006

Σχήμα 2.11: Πρότυπα αυτοκίνητα που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου.

Σχήμα 2.12: Αυτοκίνητο τροφοδοτούμενο από κυψέλες καυσίμου, General Motors

Σχήμα 2.13: Σχηματική παράσταση ενός πάρκου ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [10]

Σχήμα 2.14: Η μονάδα παραγωγής ενέργειας της Ballard generation systems

Σχήμα 2.15: Μονάδα παραγωγής ενέργεια υποβρυχίου με fuel cells Λειτουργεί με καθαρό υδρογόνο και οξυγόνο (Από την Ballard Generation Systems)

Σχήμα 2.16: Φορητά συστήματα fuel cell

Σχήμα 2.17: Μικροκυψέλη καυσίμου, σχεδιασμένη από την Fraunise ISE για χρήση στην κινητή τηλεφωνία

Σχήμα 2.18: Laptop τροφοδοτούμενο από κυψέλη καυσίμου, της Ballard

Σχήμα 2.19: Laptop τροφοδοτούμενο από μίνι κυψέλη καυσίμου

Σχήμα 2.20: Κατανομή της παγκόσμιας παραγωγής συστημάτων κυψελών καυσίμου (α) ανά εφαρμογή και (β) ανά χώρα[11]

Σχήμα 3.1: Εσωτερική δομή κυψέλης καυσίμου PEM

Σχήμα 3.2: Δομή πολυμερούς Nafion

Σχήμα 3.3: Η Δομή μιας μεμβράνης τύπου Nafion

Σχήμα 3.4: Η Δομή του στηριζόμενου σε άνθρακα καταλύτη.

Σχήμα 3.5: ιδανική και απλοποιημένη μορφή ενός ηλεκτροδίου από ένα PEM κελί καυσίμου.

Σχήμα 3.6 Μεγέθυνση του σχήματος 3.5 που δείχνει ότι ο ηλεκτρολύτης φτάνει μέχρι τα μόρια του καταλύτη.

Σχήμα 3.7: *Ανοξείδωτες πλάκες που χρησιμοποιούνται ως περιοχές ροής/ συλλέκτες ρεύματος*

Σχήμα 3.8: *Μεγέθυνση των καναλιών ροής του αερίου. Το ύψος, το πλάτος και η απόσταση μεταξύ των καναλιών είναι 0.8mm.*

Σχήμα 3.9: Συστοιχία κυψελών καυσίμου

Σχήμα 3.10: : Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διπολικής πλάκας

Σχήμα 3.11: Ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής ενέργειας με κυψέλη PEMFC

Σχήμα 3.12: Δομικό διάγραμμα ενός συστήματος παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με κυψέλη καυσίμου για Α) DC φορτία, Β) AC φορτία, [4].

Σχήμα 3.13: Μετατροπέας κυψέλης καυσίμου[14]

Σχήμα 3.14: Αντιστροφέας κυψέλης καυσίμου

Σχήμα 3.15: Φαινόμενου διπλού στρώματος σε ένωση p-n.

Σχήμα 3.16: Φόρτιση διπλού στρώματος στην επιφάνεια της καθόδου μιας κυψέλης καυσίμου

Σχήμα 3.17: Οι κινήσεις των μορίων του νερού

Σχήμα 5.1: Εννοιολογικό διάγραμμα του υβριδικού συστήματος παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας ΑΠΕ-H₂.

Σχήμα 5.2: 3D παρουσίαση του εσωτερικού του κτηρίου επίδειξης.

Σχήμα 5.3: Αρχιτεκτονική του συστήματος παρακολούθησης

Σχήμα 5.4: Μοντέλο Mirra 6 της Morphic Exergy

Σχήμα 5.5: Σχέδιο της εμπορικής μονάδας κυψέλης καυσίμου τύπου PEM

Σχήμα 5.6: 3D προβολή του ολοκληρωμένου μοντέλου μονάδας ισχύος PEMFC

Σχήμα 5.7: 3D ανάπτυγμα της πρωτότυπης μονάδας ισχύος της κυψέλης καυσίμου PEM.

Σχήμα 5.8: Σύστημα ψύξης και δοχείο αποθήκευσης νερού

Σχήμα 5.9: Τελικό πρωτότυπο

Σχήμα 5.10: Πορεία της ενέργειας σε ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου - inverter

Σχήμα 5.11: Ελεγχόμενα – Μετρούμενα – Υπολογιζόμενα Μεγέθη

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ & ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Πίνακας 2.1: Καύσιμα κυψελών καυσίμου.

Πίνακας 2.2: Οι αποδόσεις, οι χρόνοι εκκίνησης και οι θερμοκρασίες λειτουργίας των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου.

Πίνακας 2.3: Αντιδράσεις ανόδου και καθόδου

Πίνακας 2.4: Συγκεντρωτικά τα γενικά χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου.

Πίνακας 2.5: Σύγκριση Fuel Cell με άλλου τύπου πηγών ενέργειας.

Πίνακας 2.6: Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα κυψελών καυσίμου

Πίνακας 3.1: Θερμοδυναμικά στοιχεία της κυψέλης καυσίμου H₂/O₂

Πίνακας 3.2 : Θεωρητικές τιμές της τάσεως και του βαθμού απόδοσης της κυψέλης καυσίμου H₂/O₂

Πίνακας 3.3: Αγωγιμότητες εξαρτημάτων κυψέλης καυσίμου

Πίνακας 5.1: Προδιαγραφές του συστήματος

Πίνακας 5.2: Τεχνικές προδιαγραφές

Πίνακας 5.3: Πειραματικά αποτελέσματα πιέσεων H₂ σε μόνιμη και προσωρινή αποθήκη υδρογόνου – Συνολική κατανάλωση

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα μετρήσεων κυψέλης καυσίμου μαζί με αντιστροφέα

Πίνακας 5.5: Η ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου PEM και η ενέργεια που δίνει το H₂

Πίνακας 5.6: Η ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου PEM και η ενέργεια που δίνει το H₂ στη περιοχή λειτουργίας B

Διάγραμμα 2.1: Συνοπτικό διάγραμμα των εφαρμογών και των κύριων πλεονεκτημάτων των κυψελών καυσίμου για τα διάφορα είδη, καθώς και για τις διάφορες εφαρμογές.

Διάγραμμα 2.2: Γενικό διάγραμμα των εφαρμογών και των καυσίμων των διαφόρων κυψελών καυσίμου.

Διάγραμμα 2.3: Η κατανομή των παραγόμενων κυψελών καυσίμου ανά είδος το έτος 2007 .

Διάγραμμα 3.1: Βαθμός απόδοσης κυψέλης, HHV

Διάγραμμα 3.2: Τάση Nernst συναρτήσει της θερμοκρασίας

Διάγραμμα 3.3: V-I Χαρακτηριστική μιας κυψέλης καυσίμου.

Διάγραμμα 4.1: Χαρακτηριστική σε διαφορετικές θερμοκρασιακές λειτουργίες

Διάγραμμα 4.2: Χαρακτηριστική σε διαφορετικές λειτουργικές πιέσεις

Διάγραμμα 4.3: Δυναμική μεταβολή του σημείου λειτουργίας

Διάγραμμα 5.1: Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου

Διάγραμμα 5.2: Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας A

Διάγραμμα 5.3: Διάγραμμα Έντασης Ρεύματος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας A

Διάγραμμα 5.4: Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου περιοχής λειτουργίας A

Διάγραμμα 5.5: Διάγραμμα κατανάλωσης H₂ περιοχής λειτουργίας A

Διάγραμμα 5.6: Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας B

Διάγραμμα 5.7: Διάγραμμα Έντασης Ρεύματος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας B

Διάγραμμα 5.8: Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου περιοχής λειτουργίας B

Διάγραμμα 5.9: Διάγραμμα κατανάλωσης H₂ περιοχής λειτουργίας B

Διάγραμμα 5.10: Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Γ

Διάγραμμα 5.11: Διάγραμμα Έντασης Ρεύματος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Γ

Διάγραμμα 5.12: Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Γ

Διάγραμμα 5.13: Διάγραμμα κατανάλωσης H₂ περιοχής λειτουργίας Γ

Διάγραμμα 5.14: Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Δ

Διάγραμμα 5.15: Διάγραμμα Έντασης Ρεύματος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Δ

Διάγραμμα 5.16: Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Δ

Διάγραμμα 5.17: Διάγραμμα κατανάλωσης H₂ περιοχής λειτουργίας Δ

Διάγραμμα 5.18: Διάγραμμα Τάσης – Έντασης Ρεύματος

Διάγραμμα 5.19: Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου

Διάγραμμα 5.20: Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Α

Διάγραμμα 5.21: Διάγραμμα Μεταβολής Ενέργειας – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Α

Διάγραμμα 5.22: Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Β

Διάγραμμα 5.23: Διάγραμμα Μεταβολής Ενέργειας – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Β

Διάγραμμα 5.24: Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Γ

Διάγραμμα 5.25: Διάγραμμα Μεταβολής Ενέργειας – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Γ

Διάγραμμα 5.26: Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Δ

Διάγραμμα 5.27: Διάγραμμα Μεταβολής Ενέργειας – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Δ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των κυψελών καυσίμου ως εναλλακτική πηγή παραγωγής ενέργειας και η κατασκευή ισοζυγίου μάζας – ενέργειας για την προσομοίωση της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου τεχνολογίας PEM. Η ανάλυση περιλαμβάνει εκτός από το θεωρητικό υπόβαθρο της τεχνολογίας αυτής, την παρουσίαση ηλεκτρικών και μη ισοδύναμων κυκλωμάτων. Τα συστήματα κυψελών καυσίμου αναμένεται να διαδραματίσουν σπουδαίο ρόλο στην παραγωγή ισχύος λόγω της αποδοτικότητας, της καθαρότητας της ενέργειας που προσφέρουν και της αξιοπιστίας τους. Η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου συνεχώς βελτιώνεται και βρίσκουν ολοένα και μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια ιστορική αναδρομή καθώς και ανάλυση των διαθέσιμων τεχνολογιών των κυψελών καυσίμου. Επίσης παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους καθώς και η αρχή λειτουργίας στην οποία στηρίζεται κάθε τύπος κυψέλης. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στο πεδίο των εφαρμογών των κυψελών καυσίμου, το ευρύ φάσμα του οποίου περιλαμβάνει εκτός από σθερές και κινητές εφαρμογές.

Στο τρίτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας των κυψελών καυσίμου τύπου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων καθώς αποτελούν τις πιο απλές κυψέλες στην κατασκευή και τη χρήση, παρουσιάζουν ευελιξία και μπορούν να υποστηρίξουν ποικιλία εφαρμογών. Οι κυψέλες καυσίμου αυτού του είδους χαρακτηρίζονται από χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας, χαμηλούς χρόνους εκκίνησης και μεγάλη ανθεκτικότητα. Τα χαρακτηριστικά αυτά, καθώς και το γεγονός ότι αποτελούν εναλλακτικές πηγές ισχύος, τις καθιστούν αντικείμενο προς μελέτη και για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης.

Η ανάλυση της μόνιμης κατάστασης και της δυναμικής απόκρισης που ακολουθεί στο τέταρτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, δίνει τη δυνατότητα βαθύτερης κατανόησης της λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου. Έπειτα, παρουσιάζονται ορισμένα βασικά θεωρητικά μοντέλα των κυψελών τεχνολογίας PEM, τα οποία έχουν προταθεί κατά

καιρούς δίνοντας τη δυνατότητα συνδυασμού της κυψέλης καυσίμου με μοντέλα ηλεκτρονικών ισχύος, κινητήρων και συστημάτων ελέγχου για τη μελέτη ολοκληρωμένων συστημάτων σταθερών εφαρμογών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η πειραματική δοκιμή σε μία κυψέλη καυσίμου τεχνολογίας PEM και ισχύος 5,8kW. Γίνεται ανάλυση της λειτουργίας της σε 4 διαφορετικά επίπεδα και παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα. Τέλος, κατασκευάζεται το ισοζύγιο μάζας – ενέργειας, το οποίο προσομοιώνει τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μία ανακεφαλαίωση και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από τη διενέργεια της πειραματικής δοκιμής και της θεωρητικής προσέγγισης. Ένα καθαρό καύσιμο με μεγάλες προοπτικές να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον είναι το υδρογόνο και αυτό δύσκολα μπορεί κανείς να αμφισβητήσει. Υπάρχουν εδώ και μια δεκαετία εφαρμοσμένες λύσεις σε αυτόνομα και διασυνδεδεμένα συστήματα, τα οποία λειτουργούν εξ' ολοκλήρου με κυψέλες καυσίμου. Η μελλοντική ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων αναμένεται μεγάλη δεδομένου των ενεργειακών προβλημάτων που αντιμετωπίζει η παγκόσμια κοινότητα σήμερα. Πρόκειται για συστήματα τα οποία μπορούν να δώσουν ανεξαρτησία και φιλική προς το περιβάλλον ενέργεια. Οι εναλλακτικές μορφές ενέργειας αποτελούν σημαντική λύση στη δραματική μείωση των ορυκτών πόρων και πρέπει η έρευνα και η αγορά να στραφούν προς την εκμετάλλευσή τους.

ABSTRACT

The objective of this thesis is the study of fuel cells as an alternative source of energy production and the design of the material and energy balance in order to simulate a PEM fuel cell in steady-state. The analysis includes apart from the theoretical background of this technology (PEM), the presentation of electrical and non – equivalent circuits. The fuel cell systems are expected to play an important role in power generation field, due to their efficiency, the energy purity they provide and their reliability. The technology of the fuel cells is constantly being improved and thus adjusting in an increasing variety of applications.

In the second chapter, a historical recursion is made as long as an analysis of the available technologies of fuel cells. Furthermore, the advantages and disadvantages are presented and the operational principle on which each type of fuel cell is based. Particular emphasis is given in the field of fuel cell applications, the wide range of which includes not only stationary but also portable applications.

In the third chapter of the study, the operational principle of proton exchange membrane fuel cells is presented, as they are the simplest fuel cells as far as the way of construction and their use is concerned, they are flexible and can support a huge variety of applications. This kind of fuel cells is characterized by low operating temperature, low startup times and high endurance. These characteristics combined with the fact that they are alternative power sources, enable their study for electric traction also.

The analysis of steady state and the dynamic response that follows in the fourth chapter of this thesis, provides the capability of a deeper understanding of the operation of a fuel cell. Moreover, some basic theoretical models of PEM fuel cells are presented, which have been suggested from time to time and are able to combine the fuel cells with power electronics, gas motors and controlling systems for the study of complete systems of stationary applications.

In the fifth chapter, an experimental trial is being carried out in a PEM fuel cell with a 5,8kW power. An analysis of its operation is being done in 4 different levels and the

experimental results are being presented. At last, the energy and mass balance is being designed, which simulates the steady state operation of the proton exchange membrane fuel cell.

In the sixth chapter, a summary is being done and the results from the experimental trial and the theoretical approach are being presented. Undeniably, a pure fuel with huge perspectives which can be used in the future is hydrogen. Practical solutions in self - sustained and grid connected systems already exist, which can operate only with fuel cells. In the future, the growth of these systems is expected to be great, due to the energy problems that international society faces today. These systems are able to provide energy independence and an environmental friendly energy. The alternative energy sources can result in the dramatic reduction of the fossil fuels and the research and the market should turn to their exploitation.

Κεφάλαιο 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

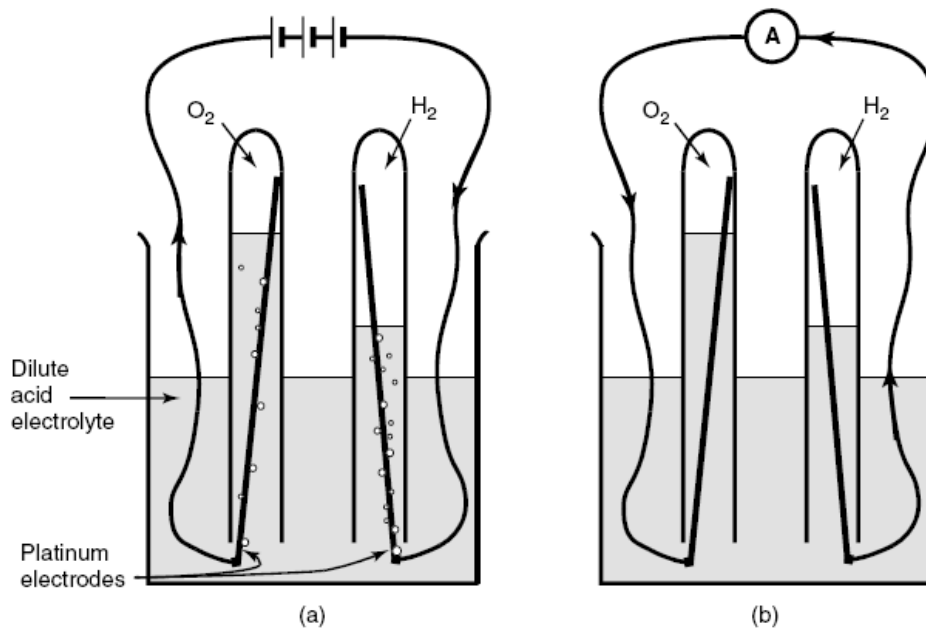
1.1 Ενέργεια και Υδρογόνο

Η Ενέργεια είναι κινητήριο δύναμη της κοινωνίας και της οικονομίας σήμερα. Η δουλειά, ο ελεύθερος χρόνος, η οικονομική, σωματική και κοινωνική ευημερία όλων μας εξαρτώνται από την επαρκή, απρόσκοπτη προμήθεια ενέργειας. Ωστόσο πολλοί από εμάς το θεωρούμε δεδομένο και έτσι η συζήτηση σχετικά με τη διαχείριση της ενέργειας συνεχίζει να αυξάνεται από χρόνο σε χρόνο. Οι παραδοσιακές ορυκτές πηγές ενέργειας, όπως το πετρέλαιο, είναι τελικά περιορισμένες και το διευρυνόμενο χάσμα μεταξύ της αύξησης της ζήτησης και της συρρίκνωση της προσφοράς καθώς και η συνεχής αύξηση της τιμής του, κατά το όχι και τόσο μακρινό μέλλον, πρέπει να καλυφθεί όλο και περισσότερο από άλλες εναλλακτικές πηγές πρωτογενούς ενέργειας. Έτσι η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με την επιβάρυνση του περιβάλλοντος από αέρια του θερμοκηπίου που εκλύονται από τις υπάρχουσες μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οδηγούν στην αναζήτηση νέων λύσεων. Μια από αυτές τις λύσεις που προτείνεται για την αντιμετώπιση του ενεργειακού προβλήματος αποτελεί το υδρογόνο. Το υδρογόνο ήταν το πρώτο στοιχείο που σχηματίστηκε μετά το «μεγάλη έκρηξη», αποτελεί το πιο κοινό στοιχείο στο σύμπαν και βρίσκεται σε αφθονία. Σαν καύσιμο μπορεί να ανακτηθεί από το φυσικό αέριο, το μεθάνιο ή το πετρέλαιο ή με ηλεκτρόλυση του νερού. Το υδρογόνο μπορεί να χαρακτηριστεί σαν το ιδανικό καύσιμο γιατί η χρήση του δεν έχει καθόλου αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον [1]. Μια από τις πιο πρόσφορες λύσεις που προτείνεται για τη μετατροπή της χημικής ενέργειας που περιέχεται από υδρογόνο σε ηλεκτρική είναι η κυψέλη καυσίμου.

Κεφάλαιο 2: ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

2.1 Ιστορική αναδρομή κυψελών καυσίμου

Η ιστορία της κυψέλης καυσίμου ανάγεται πίσω στο δέκατο ένατο αιώνα και χάρη στην εργασία του βρετανού δικαστή και επιστήμονα, Sir William Robert Grove. Τα πειράματά του Grove το 1839 στην ηλεκτρόλυση (η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας για να χωρίσει το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο) όπως φαίνονται στο σχήμα 2.1, οδήγησαν στην πρώτη κατασκευή μιας συσκευής που θα ονομαζόταν αργότερα ως κυψελίδα καυσίμου. Ο Grove ισχυρίστηκε ότι είναι δυνατό να αντιστραφεί η διαδικασία ηλεκτρόλυσης και να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια από την αντίδραση του οξυγόνου με το υδρογόνο. Για να εξετάσει αυτήν τη θεωρία τοποθέτησε δύο φύλλα λευκόχρυσου σε χωριστά σφραγισμένα μπουκάλια, ένα από τα οποία περιείχε υδρογόνο και το άλλο οξυγόνο. Όταν αυτά βυθίστηκαν σε αραιό θειικό οξύ, παρατήρησε ότι ρεύμα άρχισε να ρέει μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων με ταυτόχρονο σχηματισμό νερού. Προκειμένου να αυξηθεί η παραχθείσα τάση, ο Grove συνέδεσε αρκετές από αυτές τις συσκευές στη σειρά και δημιούργησε αυτό που ονόμασε “μπαταρία αερίου” (“gas battery”). Οι χημικοί Ludwig Mond και Charles Langer επινόησαν τον όρο «κυψέλη καυσίμου» το 1889, καθώς προσπαθούσαν να κατασκευάσουν την πρώτη συσκευή χρησιμοποιώντας ατμοσφαιρικό αέρα και αέρια που παράγονται από την καύση του άνθρακα.



Σχήμα 2.1: Απεικόνιση της διάταξης του Sir William Grove (α) Η ηλεκτρόλυση του νερού. Το νερό διασπάται σε υδρογόνο και οξυγόνο με τη βοήθεια ηλεκτρικού ρεύματος. (β) Ροή ηλεκτρικού ρεύματος-Το οξυγόνο και το υδρογόνο επανενώνονται (τα βέλη στο σχήμα αναπαριστούν τη ροή των ηλεκτρονίων από το - στο +).

Το επόμενο μεγάλο κεφάλαιο στην ιστορία των κυψελών καυσίμου γράφτηκε από το μηχανικό, Δρ Thomas Francis Bacon, στο Πανεπιστήμιο του Cambridge της Αγγλίας. Το 1932, ο Bacon επανέφερε στο προσκήνιο την κυψέλη που είχαν αναπτύξει οι Mond και Langer, εφαρμόζοντας διάφορες τροποποιήσεις στο αρχικό σχέδιο. Αυτές συμπεριέλαβαν την αντικατάσταση των ηλεκτροδίων πλατίνας με νικέλιο που είναι λιγότερο δαπανηρό. Επίσης, αντικατέστησε τον ηλεκτρολύτη θεικού οξέως με αλκαλικό υδροξείδιο του καλίου, μια ουσία λιγότερο διαβρωτική για τα ηλεκτρόδια. Αυτή η συσκευή η οποία ονομάστηκε «Κυψέλη Bacon», ήταν στην ουσία η πρώτη αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC). Θα περάσουν άλλα 27 χρόνια έως ότου ο Bacon θα μπορέσει να υλοποιήσει μια πραγματικά λειτουργική κυψέλη καυσίμου. Το 1959, ο Bacon θα παρουσιάσει μια κυψέλη καυσίμου ικανή να παράγει 6 kW ηλεκτρική ισχύ (σχήμα 2.2). Επίσης, στο τέλος του 1959 ο Harry Karl Ihrig κατασκεύασε το πρώτο όχημα-κυψελών καυσίμου με ικανότητα ιπποδύναμης 20 hp (15kW) [2].



Σχήμα 2.2: Ο Bacon με την κυψέλη καυσίμου των 6kW. (Copyright Hulton-Deutsch Collection/Corbis).

Στο πιο πρόσφατο παρελθόν και ξεκινώντας από τα μέσα της δεκαετίας του 50 και τις αρχές της δεκαετίας του 60 έχουμε την εμφάνιση ενός ζωηρού ενδιαφέροντος για την κυψέλη καυσίμου, όταν τις επέλεξε το διαστημικό πρόγραμμα των ΗΠΑ. Τότε ξεκινά και η πρόσφατη ιστορία της κυψελίδας καυσίμου. Μια αντιπροσωπεία της αμερικανικής κυβέρνησης, η εθνική αεροναυτική και η διαστημική διοίκηση (NASA), έψαχναν έναν τρόπο να τροφοδοτήσουν μια σειρά επερχόμενων επανδρωμένων διαστημικών πτήσεων. Η NASA είχε αποκλείσει ήδη τις μπαταρίες δεδομένου ότι ήταν πάρα πολύ βαριές, την ηλιακή ενέργεια δεδομένου ότι ο εξοπλισμός ήταν πάρα πολύ ακριβός καθώς και την πυρηνική ενέργεια λόγω της επικινδυνότητας της, με αποτέλεσμα να αναζητά μια εναλλακτική λύση. Η κυψέλη καυσίμου θεωρήθηκε ως πιθανή λύση και η NASA ανέθεσε διάφορες ερευνητικές συμβάσεις για να αναπτύξει ένα πρακτικό λειτουργικό σύστημα. Αυτή η αναζήτηση οδήγησε στην ανάπτυξη της πρώτης κυψέλης τύπου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM). Το 1955, ο Willard Thomas Grubb, ένας χημικός, τροποποίησε περαιτέρω το αρχικό σχέδιο κυψέλης καυσίμου με τη χρησιμοποίηση μιας sulphonated polystyrene ion-exchange membrane ως ηλεκτρολύτη. Τρία έτη αργότερα ένας άλλος Γερμανός χημικός, ο Leonard Niedrach, επινόησε έναν τρόπο απόθεσης λευκόχρυσου πάνω σε αυτήν τη μεμβράνη ο οποίος λειτουργεί ως

καταλύτης με αποτέλεσμα να αυξάνει την ταχύτητα της αντίδρασης και αυτή έγινε γνωστή ως "κυψελίδα καυσίμου Grubb- Niedrach" και χρησιμοποιήθηκε στο διαστημικό πρόγραμμα Gemini. Αυτή ήταν η πρώτη εμπορική χρήση των κυψελών καυσίμου. Στη συνέχεια ακολούθησε το διαστημικό πρόγραμμα Apollo, στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν κυψέλες καυσίμου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την κάλυψη των ανθρώπινων καθώς και τηλεπικοινωνιακών αναγκών στο δορυφόρο. Αυτές οι κυψέλες καυσίμου κατασκευάστηκαν από τους Pratt και Whitney. Επίσης, στα μέσα της δεκαετίας του 1960 η εταιρία General Motors κατασκεύασε ένα φορτηγό όχημα με κυψέλες καυσίμου το οποίο όμως βρισκόταν σε πειραματικό στάδιο. Στη δεκαετία του '90, πάνω από 150 έτη μετά από τα πειράματα του Groove, η υπόσχεση της ανέξοδης, καθαρής, ανανεώσιμης ενέργειας άρχισε να γίνεται πραγματικότητα καθώς οι πρώτες βιώσιμες κυψελίδες καυσίμου παρουσιάστηκαν. Το 1989 η εταιρία Perry Energy Systems σε συνεργασία με την Ballard κατασκεύασαν ένα υποβρύχιο, που τροφοδοτούνταν από συστοιχία κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Οι τεχνικές σημαντικές ανακαλύψεις κατά τη διάρκεια της δεκαετίας περιέλαβαν την κατασκευή του πρώτου εμπορικού οχήματος κυψελίδας καυσίμου (fuel cell-powered) το 1993 από την канаδική επιχείρηση Ballard. Συγκεκριμένα παρουσίασε αστικά λεωφορεία που λειτουργούσαν με κυψέλες καυσίμου. Τον ίδιο χρόνο, η Energy Partners, μια θυγατρική της Perry Energy Systems δημιούργησε το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο τροφοδοτούμενο με ενέργεια από κυψέλες καυσίμου. Γενικότερα, οι αυτοκινητοβιομηχανίες υποστηριζόμενες από το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α., περί τα τέλη του προηγούμενου αιώνα κατασκεύασαν πειραματικά αυτοκίνητα που χρησιμοποιούσαν τεχνολογία κυψελών καυσίμου. Δύο έτη αργότερα μια στοίβα κυψελών καυσίμου με πυκνότητα ισχύος 1 kW ανά λίτρο δημιουργήθηκε από τις Ballard και Daimler-Benz. Αυτές οι εξελίξεις προετοίμασαν το έδαφος για την εμπορευματοποίηση των κυψελίδων καυσίμου όπως τις ξέρουμε σήμερα. Παγκοσμίως, τουλάχιστον 600 εκατομμύρια Ευρώ το χρόνο επενδύονται στην τεχνολογία των κυψελών καυσίμου με σκοπό την επίτευξη ενός "καθαρότερου" μέλλοντος. Μέχρι το 1999, σε παγκόσμια κλίμακα, είχαν εγκατασταθεί μονάδες συνολικής ισχύος 40.000 kW περίπου, από τις οποίες περίπου το 90% είναι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) [3]. Στα τελευταία έτη κυψέλες καυσίμου εγκαθίστανται σε νοσοκομεία, σχολεία και σε άλλες δημόσιες και ιδιωτικές επιχειρήσεις.

2.2 Κατηγορίες και λειτουργία κυψελών καυσίμου

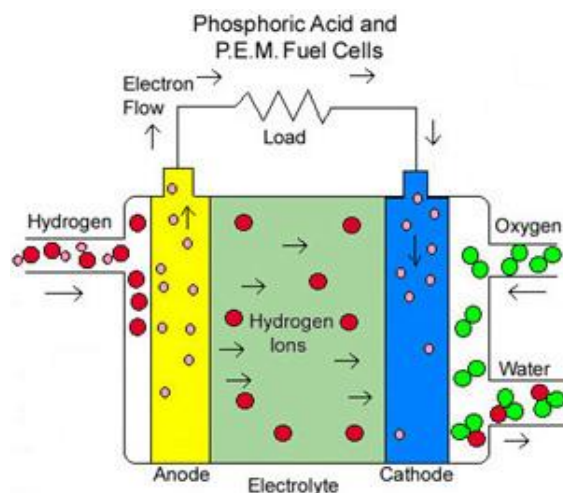
Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να ταξινομηθούν σε κατηγορίες βάση του τύπου του ηλεκτρολύτη τον οποίο χρησιμοποιούν. Ηλεκτρολύτης είναι οποιαδήποτε ουσία που περιέχει ελεύθερα ιόντα τα οποία επιτρέπουν τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από αυτά και συμπεριφέρεται σαν μέσο αγωγής ηλεκτρισμού [4]. Οι κατηγορίες είναι οι εξής:

I. Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC ή PEFC)

Λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και παράγουν ισχύ αρκετή για την ικανοποίηση καθημερινών οικιακών ενεργειακών αναγκών ή την κίνηση ενός οχήματος. Σε αυτό βοηθά η ικανότητα τους να προσαρμόζονται σε γρήγορες αυξομειώσεις στην απαίτηση ισχύος. Η ισχύς που παράγει μια τέτοια κυψέλη μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 50 W και 250 kW . Ο συγκεκριμένος τύπος κυψέλης για να λειτουργήσει απαιτεί καύσιμα υψηλής καθαρότητας.

Η έρευνα που αφορά την εφαρμογή των κυψελών καυσίμων στην κίνηση οχημάτων είναι επικεντρωμένη κυρίως στην μελέτη αυτού του τύπου κυψελών.

Μια κυψέλη καυσίμου PEM αποτελείται κυρίως από τρία τμήματα, την άνοδο, την κάθοδο και τον ενδιάμεσο χώρο ανάμεσά τους όπου τοποθετείται ο ηλεκτρολύτης όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. Στις κυψέλες καυσίμου PEM ο ηλεκτρολύτης είναι μια πολυμερική μεμβράνη που επιτρέπει τη διέλευση μέσω αυτής των ιόντων του υδρογόνου.



Σχήμα 2.3: Κυψέλη καυσίμου τύπου PEM [Illinois Institute of Technology web site]

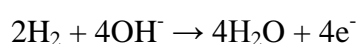
Το εισερχόμενο υδρογόνο με τη βοήθεια ενός καταλύτη πλατίνας στην άνοδο (+) μετατρέπεται σε θετικά φορτισμένα ιόντα (H^+) και σε ηλεκτρόνια (e^-). Τα ηλεκτρόνια που δημιουργούνται ρέουν μέσα από το κλειστό κύκλωμα και δημιουργούν ρεύμα που χρησιμοποιείται ως ηλεκτρική ενέργεια. Τα ιόντα του υδρογόνου κινούνται μέσω της ηλεκτρολυτικής μεμβράνης προς την κάθοδο (-) όπου ενώνονται με το οξυγόνο και τα ηλεκτρόνια που έχουν περάσει στο κύκλωμα από το φορτίο και παράγουν το νερό. Μία κυψέλη καυσίμου παράγει περίπου 0.6 Volt και πολλές μαζί συνδυάζονται για να δώσουν την ηλεκτρική ισχύ που χρειάζεται [1]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα κυψέλης καυσίμου τύπου PEM είναι η Mark 1020 ACS της εταιρίας Ballard της οποίας η ισχύς κυμαίνεται από 300-5000 W [6].

II. Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC)

Η αλκαλική κυψέλη καυσίμου αποτελεί μία από τις πιο ανεπτυγμένες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου. Αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1960 και χρησιμοποιήθηκε στη διαστημική τεχνολογία της NASA. Χρησιμοποιεί ως ηλεκτρολύτη διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH) και ως καταλύτη στην άνοδο και κάθοδο ένα ευρύ φάσμα μετάλλων. Η αποδοτικότητα της κυψέλης εξαρτάται από το ρυθμό με τον οποίο πραγματοποιούνται οι χημικές αντιδράσεις. Σε καλά σχεδιασμένες κυψέλες ο βαθμός απόδοσης προσεγγίζει το 60%. Παρ' όλα ταύτα παρουσιάζει ένα σοβαρό μειονέκτημα. Η λειτουργία της αλκαλικής κυψέλης καυσίμου επηρεάζεται σημαντικά από την περιεκτικότητα των τροφοδοτούμενων αερίων σε διοξείδιο του άνθρακα. Αυξημένη περιεκτικότητα CO_2 στα εισερχόμενα αέρια έχει άμεση συνέπεια τη

δημιουργία ανθρακικού καλίου, αποτίθεται στα ηλεκτρόδια και μειώνει το πορώδες τους [7]. Η εμπορική της χρήση είναι περιορισμένη εξαιτίας της ανάγκης χρήσης αερίων (H₂, O₂) υψηλής καθαρότητας.

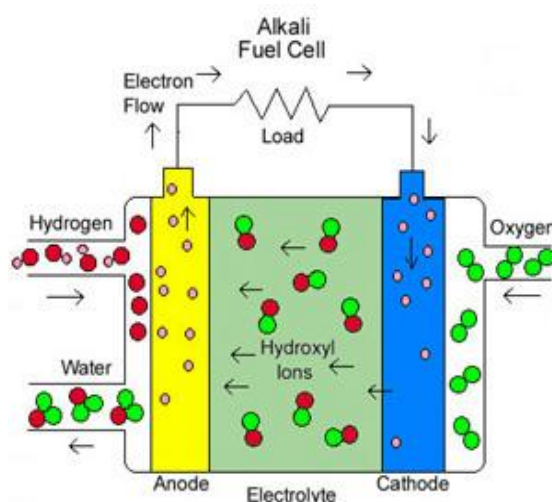
Οι αντιδράσεις που συμβαίνουν στα ηλεκτρόδια μιας κυψέλης καυσίμου αλκαλικού ηλεκτρολύτη είναι διαφορετικές από εκείνες που συμβαίνουν σε μια κυψέλη καυσίμου PEM. Τα διαθέσιμα υδροξυλίου του ηλεκτρολύτη αντιδρούν με το υδρογόνο στην άνοδο και απελευθερώνουν ενέργεια (θερμότητα) και ηλεκτρόνια παράγοντας νερό.



Στην κάθοδο το O₂ αντιδρά με τα ηλεκτρόνια που έρχονται μέσω του ηλεκτρικού φορτίου από την άνοδο και με το νερό του ηλεκτρολύτη, σχηματίζοντας νέα ιόντα υδροξυλίου.



Από τις παραπάνω αντιδράσεις φαίνεται ότι το νερό καταναλώνεται στη κάθοδο σε διπλάσια ποσότητα απ ότι παράγεται στην άνοδο [8].



Σχήμα 2.4: Κυψέλη καυσίμου Αλκαλικού ηλεκτρολύτη [Illinois Institute of Technology web site]

Χαρακτηριστικό παράδειγμα κυψέλης καυσίμου τύπου PAFC είναι το PureCell® System Model 400 της εταιρίας UTC Power του οποίου η ισχύς μπορεί να φθάσει μέχρι και 200 kW [6].

III. Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)

Οι κυψέλες φωσφορικού οξέος (phosphoric - acid fuel cells, PAFC) είναι άλλο ένα βασικό είδος κυψελών το οποίο είναι και αυτό διαθέσιμο σήμερα στο εμπόριο. Η απόδοση των κυψελών καυσίμων φωσφορικού οξέος κυμαίνεται σε αρκετά υψηλά επίπεδα.

Το υδρογόνο που χρησιμοποιείται σαν καύσιμο παράγεται από την αναμόρφωση φυσικού αερίου (κυρίως μεθανίου), σε υδρογόνο και CO₂. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας τους βρίσκονται στην περιοχή των 150 με 200°C. Αυτό συμβαίνει γιατί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες το φωσφορικό οξύ είναι κακός ιοντικός αγωγός και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) το οποίο σχηματίζεται πάνω στον καταλύτη δηλητηριάζει την άνοδο ρίχνοντας πάρα πολύ την απόδοση των κελιών. Ωστόσο τα επίπεδα ανοχής της συγκέντρωσης του CO είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει περισσότερα είδη καυσίμων για τη τροφοδότησή του. Στην περίπτωση όμως χρήσης συμβατικής βενζίνης πρέπει προηγουμένως να απομακρυνθούν τα περιεχόμενα σε αυτήν σουλφίδια. Τα μειονεκτήματα των PA (phosphoric – acid) κυψελών καυσίμου, είναι το μεγάλο μέγεθος και βάρος, ο ακριβός καταλύτης όπου χρησιμοποιείται (λευκόχρυσος) ενώ το ρεύμα το οποίο παράγεται είναι χαμηλής έντασης και η ισχύς συγκρίσιμη με αυτή άλλων τύπων κυψελών καυσίμου.

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που χαρακτηρίζουν αυτόν τον τύπο είναι ίδιες με αυτής της PEM κυψέλης.

IV. Κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC)

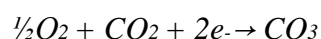
Η κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων έχει ως ηλεκτρολύτη τήγμα αλκαλικού μετάλλου ανθρακικού άλατος, το οποίο συγκρατείται σε κεραμική μήτρα. Η θερμοκρασία λειτουργίας της είναι περίπου 650°C. Η υψηλή θερμοκρασία υποδηλώνει ότι επιτυγχάνεται αρκετά καλός ρυθμός αντίδρασης με τη χρήση αρκετά φθηνού καταλύτη (νικέλιο). Στην άνοδο χρησιμοποιείται κράμα νικελίου-χρωμίου και στην κάθοδο οξείδιο του νικελίου. Ο βαθμός απόδοσης προσεγγίζει το 60% και σε

περίπτωση που χρησιμοποιηθεί και η θερμότητα που εκλύεται (συμπαραγωγή θερμότητας) ο βαθμός απόδοσης μπορεί να φτάσει το 85%.

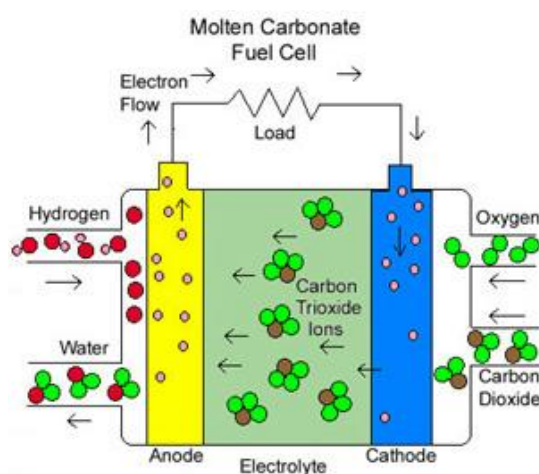
Στις κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται αποτελείται από ενώσεις ανθρακικών αλάτων του νατρίου ή του μαγνησίου τα οποία εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών (650⁰C) είναι σε κατάσταση τήγματος. Οι αντιδράσεις που συμβαίνουν στην άνοδο είναι:



Στην κάθοδο οι αντιδράσεις είναι:



Η λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου MCFC απεικονίζεται στο σχήμα 2.5 [8]. Το νερό, που σχηματίζεται από τη χημική αντίδραση, παράγεται στην άνοδο. Τα ανιόντα CO_3^- μεταφέρονται από την κάθοδο στην άνοδο δια μέσου του ηλεκτρολύτη [7]. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε εδώ ότι τα ανθρακικά ιόντα καταναλώνονται στις αντιδράσεις και το απαραίτητο για τη συντήρηση των χημικών αντιδράσεων CO_2 πρέπει να χορηγείται σταδιακά. Αυτή η παρατήρηση είναι σημαντική στη περίπτωση που χρησιμοποιούνται καύσιμα που περιέχουν CO_2 σε κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων [8].



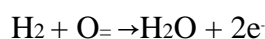
Σχήμα 2.5: Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων [Illinois Institute of Technology web site]

Χαρακτηριστικό παράδειγμα κυψέλης καυσίμου τύπου MCFC είναι το DFC 300MA της εταιρίας Fuel Cell Energy του οποίου η ισχύς είναι 300 kW [6].

V. Κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC)

Η κυψέλη αυτή χρησιμοποιεί ως ηλεκτρολύτη ένα μη πορώδες κεραμικό υλικό. Η θερμοκρασία λειτουργίας της είναι περίπου 1000°C, το οποίο επιτρέπει τη χρησιμοποίηση φθηνότερων καταλυτών, εκτός από το συνήθως χρησιμοποιούμενο λευκόχρυσου. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογονάνθρακες και σαν οξειδωτικό μέσο, αέρα ή οξυγόνο. Ο βαθμός απόδοσης της κυμαίνεται μεταξύ 50-60%. Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας, έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία αργού χρόνου εκκίνησης [7].

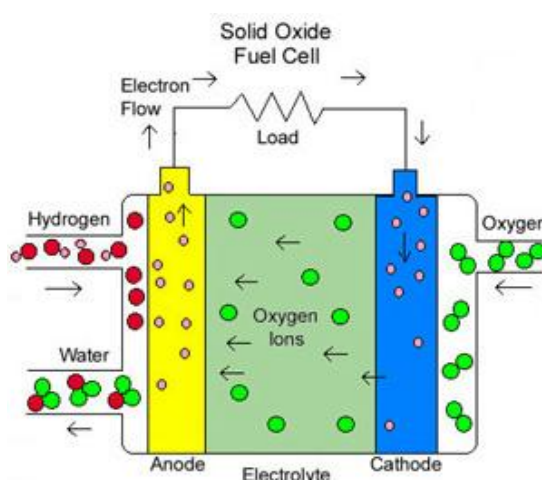
Οι αντιδράσεις στην άνοδο της κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου είναι:



Ενώ στη κάθοδο είναι:



Η αντίδραση απεικονίζεται σχηματικά παρακάτω (2.6):

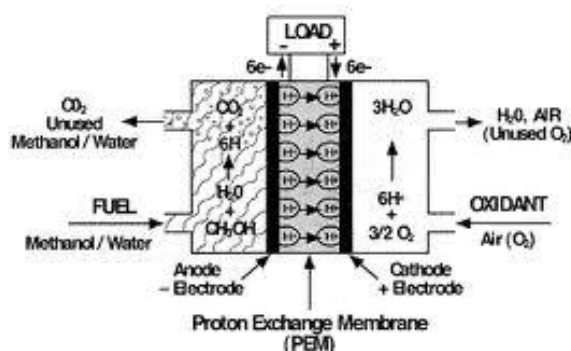


Σχήμα 2.6: Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου [Illinois Institute of Technology web site]

VI. Κυψέλες καυσίμου μεθανόλης (DMFC)

Σε όλες τις παραπάνω κυψέλες ως καύσιμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί το υδρογόνο. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος τύπος κυψελών (direct methanol fuel cells, DMFC) χρησιμοποιεί ως καύσιμο μεθανόλη σε υγρή μορφή, χωρίς να απαιτεί τη μετατροπή της σε υδρογόνο. Σε αυτή την περίπτωση η μεθανόλη είναι αυτή που οξειδώνεται στην άνοδο. Οι κυψέλες καυσίμου αυτού του τύπου χαρακτηρίζονται από μικρή παρεχόμενη ισχύ και μεγάλη διάρκεια ζωής. Οι κυψέλες καυσίμου μεθανόλης αποτελούν έναν από τους πιο πρόσφατα αναπτυγμένους τύπους κυψελίδων PEM αλλά παρουσιάζουν αρκετά ακόμα προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν όπως η μεγάλη ποσότητα καταλύτη που απαιτείται στην κατασκευή των ηλεκτροδίων [9].

Όσον αφορά τον τύπο κυψελών καυσίμου μεθανόλης η δομή τους φαίνεται στο σχήμα 2.7:



Σχήμα 2.7: Κυψέλη καυσίμου μεθανόλης

Ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται στον συγκεκριμένο τύπο κυψέλης καυσίμου είναι μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων αλλά με μεγαλύτερο πάχος από εκείνη των συμβατικών PEM. Ο καταλύτης στην άνοδο, είναι διμεταλλικός από λευκόχρυσο (Pt) και στην κάθοδο λευκόχρυσος ενώ στην άνοδο ο καταλύτης από μόνος του έλκει το υδρογόνο από το υγρό μεθάνιο. Στο προσεχές μέλλον, οι κυψέλες καυσίμου μεθανόλης θα χρησιμοποιούνται σε συσκευές που απαιτούν για τη λειτουργία τους, χαμηλή και σταθερή κατανάλωση ρεύματος, για μεγάλες χρονικές περιόδους.

Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να ταξινομηθούν επίσης και με βάση το καύσιμο που χρησιμοποιούν:

I. Direct Alcohol Fuel Cell (DAFC) ή Direct Methanol Fuel Cell (DMFC). Είναι κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν απ' ευθείας κάποια αλκοόλη (π.χ. μεθανόλη) χωρίς επεξεργασία. Συνήθως είναι PEMFC.

II. Direct Carbon Fuel Cell (DCFC). Είναι κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν απ' ευθείας άνθρακα σαν καύσιμο στην άνοδο χωρίς ενδιάμεσο στάδιο αεριοποίησης. Μπορεί να είναι SOFC, MCFC ή AFC. Τέτοιου τύπου κυψέλες θεωρητικά μπορούν να φτάσουν σε υψηλές αποδόσεις αλλά υπάρχουν διάφορα πρακτικά προβλήματα.

Ακόμη, ένας άλλος τρόπος ταξινόμησης των κυψελών καυσίμου είναι με βάση τη θερμοκρασία λειτουργίας.

I. Χαμηλής θερμοκρασίας: είναι οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC), οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) και οι κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC).

II. Μεσαίας θερμοκρασίας: είναι οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC).

III. Υψηλής θερμοκρασίας: είναι οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) και οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC).

Στον πίνακα 2.1 που ακολουθεί δίνονται για τους διάφορους τύπους κυψελών καυσίμου τα καύσιμα που δέχονται:

Πίνακας 2.1: Καύσιμα κυψελών καυσίμου.

| Καύσιμο | PEFC | AFC | PAFC | MCFC | SOFC |
|----------------|-----------------------|-----|------------------------|------|------|
| H ₂ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| CO | X μέγιστο 50ppm | X | X (πρέπει <0.5%) | ✓ | ✓ |

| | | | | | |
|------------------------------------|---|---|--|---|-----------------------|
| CH ₄ | X | X | Μετατροπή σε υδρογόνο με χρήση ξεχωριστής συσκευής | Μετατροπή σε υδρογόνο χωρίς χρήση ξεχωριστής συσκευής | ✓ |
| CO ₂ + H ₂ O | X | X | Μετατροπή σε υδρογόνο με χρήση ξεχωριστής συσκευής | Μετατροπή σε υδρογόνο χωρίς χρήση ξεχωριστής συσκευής | Μετατροπή σε υδρογόνο |

Παρατήρηση: Η αντίδραση του CO πραγματοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες είτε στο εσωτερικό της κυψέλης, για κυψέλες υψηλής θερμοκρασίας όπως οι SOFC και οι MCFC (πίνακας 2.1), είτε σε κάποιον εξωτερικό επεξεργαστή καυσίμου (reformer). Ο ρόλος της μονάδας επεξεργασίας καυσίμου αναλύεται στο υποκεφάλαιο 2.3.

Τέλος, στον πίνακα 2.2 που ακολουθεί γίνεται μια σύγκριση ανάμεσα στις αποδόσεις, στους χρόνους εκκίνησης και στις θερμοκρασίες λειτουργίας των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου:

Πίνακας 2.2: Οι αποδόσεις, οι χρόνοι εκκίνησης και οι θερμοκρασίες λειτουργίας των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου.

| | Απόδοση % | Χρόνος εκκίνησης | Θερμοκρασία λειτουργίας (°C) |
|-------|-----------|------------------|------------------------------|
| PAFC | 40 – 80 | 1 – 4 ώρες | 150 – 200 |
| MCFC | 60 – 80 | 2 – 10 ώρες | 650 |
| PEMFC | 40 - 50 | 1 λεπτό | 15 – 80 |
| SOFC | 60 | 0.5 – 3 ώρες | 1000 |

Στη συνέχεια, γίνεται αναλυτική αναφορά μεμονωμένα στο κάθε είδος κυψέλης καυσίμου που αναφέρθηκε παραπάνω, κάνοντας περιγραφή του τρόπου λειτουργίας και των χαρακτηριστικών του.

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι αντιδράσεις ανόδου και καθόδου σε κάθε είδος κυψέλης καυσίμου (πίνακας 2.3).

Πίνακας 2.3: Αντιδράσεις ανόδου και καθόδου

| Κυψέλη καυσίμου | Αντίδραση ανόδου | Μεταφερόμενο ιόν | Αντίδραση καθόδου |
|--------------------|--|---------------------|--|
| <i>PEMFC</i> | $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ | H^+ | $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ |
| <i>AFC</i> | $H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$ | OH^- | $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$ |
| <i>PAFC</i> | $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ | H^+ | $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ |
| <i>MCFC</i> | $H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ | CO_3^{2-} | $\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$ |
| <i>SOFC</i> | $H_2 + O_2^- \rightarrow H_2O + 2e^-$ | O_2^- | $\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O_2^-$ |

2.3 Σύστημα Κυψέλης Καυσίμου

Επειδή η τάση ρεύματος (τυπικά 0.7 Volt) που δίνει μια κυψέλη καυσίμου είναι μικρή, για να πετύχουμε ικανοποιητική τάση χρησιμοποιούμε πολλές κυψελίδες καυσίμου σε σειρά δημιουργώντας μια συστοιχία κυψελών καυσίμου (fuel cell stack). Ένα ολοκληρωμένο σύστημα κυψέλης καυσίμου στην πράξη εκτός από τη συστοιχία κυψελών καυσίμου περιλαμβάνει και μια σειρά από άλλα υποσυστήματα. Τα βασικότερα από αυτά είναι τα εξής:

- **Αντλίες και ανεμιστήρες:** Εξασφαλίζουν την κυκλοφορία του αέρα μέσα στην κυψέλη καυσίμου. Επίσης, συχνά χρησιμοποιούνται συμπιεστές.
- **Μονάδα επεξεργασίας καυσίμου (Reformer):** Στην περίπτωση που το καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο, μια τέτοια μονάδα δεν χρειάζεται. Για τα υπόλοιπα όμως καύσιμα όπως, για παράδειγμα το φυσικό αέριο ή τη μεθανόλη, η μονάδα αυτή είναι απαραίτητη για να επεξεργαστεί το καύσιμο και να δημιουργήσει ένα αέριο με υψηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο.
- **Παροχή αέρα (air supply):** Συνήθως χρησιμοποιείται κάποιος συμπιεστής ή και κάποιο φίλτρο.
- **Σύστημα Διαχείρισης θερμοκρασίας (Temperature Management System):** Πρέπει με κάποιο τρόπο να γίνεται απαγωγή της θερμότητας που παράγεται. Η θερμότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συμπαραγωγή θερμότητας, σε

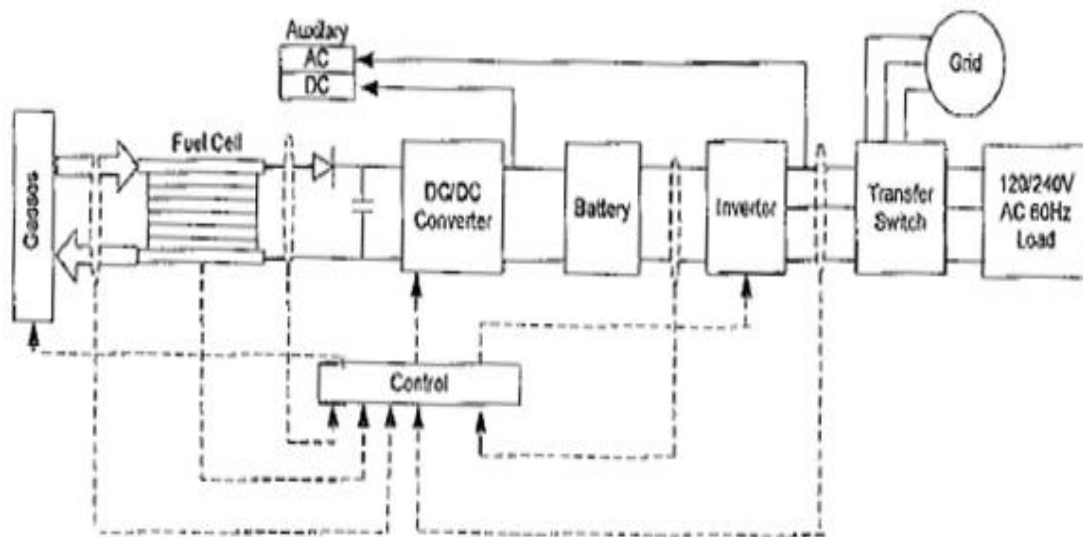
υβριδικό σύστημα με ατμοστρόβιλο, στη μονάδα επεξεργασίας καυσίμου ή και με κάποιο τρόπο να γίνει απαγωγή της στο περιβάλλον.

- **Σύστημα Διαχείρισης νερού (Water management System):** Ανάλογα με το είδος της κυψέλης καυσίμου ο ηλεκτρολύτης μπορεί να χρειάζεται νερό για να λειτουργήσει πιο αποδοτικά. Επομένως ένα μέρος του νερού που παράγεται μπορεί να εισάγεται ξανά με το καύσιμο. Βέβαια, υπερβολική εισαγωγή νερού μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της απόδοσης τον ηλεκτρολύτη.
- **Σύστημα μετατροπής της ισχύος (Power conditioning system-PCS ή Power conditioning unit-PCU):** Επειδή η κυψέλη καυσίμου παράγει συνεχές ρεύμα είναι συνεχής τάση (DC) και μεταβαλλόμενης ανάλογα με το φορτίο τάσης, είναι απαραίτητη η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (AC). Αυτό γίνεται με τη βοήθεια των κατάλληλων ηλεκτρονικών συσκευών ισχύος για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί τόσο από φορτία όσο και από το δίκτυο.
- **Διάφοροι ελεγκτές (controllers):** Για τον έλεγχο του καυσίμου, των ηλεκτρονικών ισχύος καθώς και των επιμέρους συστημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω.
- **Σύστημα ψύξης (intercooler):** Χρησιμοποιείται για τη μείωση της θερμοκρασίας της κυψέλης καυσίμου. Στις περιπτώσεις συνδυασμένου συστήματος (σύστημα που χρησιμοποιεί και τη θερμότητα) το σύστημα ψύξης καλείται εναλλάκτης θερμότητας, καθώς η βασική ιδέα είναι να αξιοποιηθεί η θερμότητα και όχι να χαθεί στο περιβάλλον.

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα χρησιμοποίησης κυψελών καυσίμου αποτελείται από:

- Το χώρο αποθήκευσης υδρογόνου για να αποθηκεύει το καύσιμο μέχρι τη στιγμή που θα του δοθεί εντολή να μεταφερθεί στη κυψέλη καυσίμου προς χρήση
- Την κυψέλη καυσίμου για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας

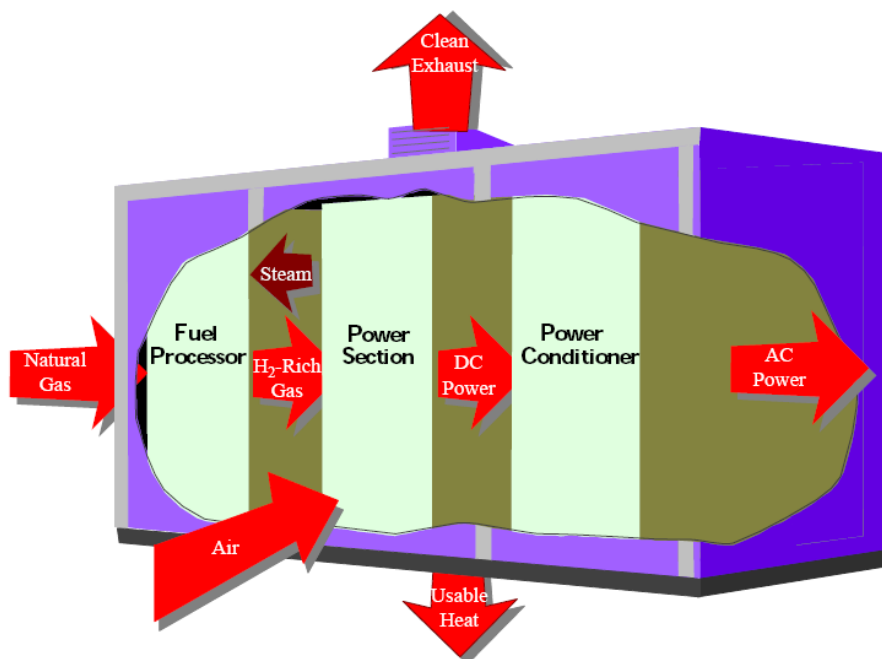
- Τον αντιστροφέα για τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο. Είναι συνδεδεμένος με την πειραματική κυψέλη καυσίμου ελέγχοντάς την, δηλαδή μέσω αυτού δίνεται η εντολή για το επίπεδο ισχύος της λειτουργίας της.
- Τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου και καταγραφής με τα οποία γίνεται η παρακολούθηση της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου και δίνονται οι απαραίτητες εντολές στον αντιστροφέα
- Το κτίριο που λαμβάνει το παραγόμενο από την κυψέλη καυσίμου ρεύμα για την κάλυψη των ενεργειακών του αναγκών



Σχήμα 2.8 :Σχηματική αναπαράσταση συστήματος σύνδεσης των κυψελών καυσίμου με το δίκτυο και με τοπικά φορτία [10]

Στο παρακάτω σχήμα (2.9) απεικονίζονται οι βασικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου. Ξεκινώντας με την επεξεργασία του καυσίμου, ένα συμβατικό καύσιμο (φυσικό αέριο, ή άλλοι αέριοι υδρογονάνθρακες, μεθανόλη, νάφθα ή άνθρακα) μετά από κατάλληλη διεργασία μετατρέπεται σε ένα αέριο υψηλής περιεκτικότητας υδρογόνου. Η ενεργειακή μετατροπή πραγματοποιείται όταν παράγεται ηλεκτρική ενέργεια (DC τάση) από τις μεμονωμένες κυψέλες καυσίμου οι οποίες συνδυάζονται με τη δομή της στοίβας (stack). Τελικά οι μετατροπείς των ηλεκτρονικών ισχύος (PCS)

μετατρέπουν την ηλεκτρική ισχύ από το DC σε ρυθμιζόμενο DC ή AC κατάλληλο πλέον για χρήση.



Σχήμα 2.9: Οι σημαντικότερες διεργασίες σε ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου.

Στον πίνακα 2.4 που ακολουθεί δίνονται συγκεντρωτικά τα γενικά χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου.

Πίνακας 2.4: Συγκεντρωτικά τα γενικά χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου.

| Είδος Κυψέλης καυσίμου | PEMFC | AFC | PAFC | MCFC | SOFC |
|--------------------------------------|---|---------------------------|--------------------------------|---|---------------------------------|
| Ηλεκτρολύτης | Ενυδατωμένη μεμβράνη από πολυμερές που επιτρέπει την ανταλλαγή ιόντων | KOH σε πίνακα από αμίαντο | Υγρό φωσφορικό οξύ μέσα σε SiC | Υγρό τηγμένο ανθρακικό άλας σε LiAlO ₂ | Κεραμικός |
| Ηλεκτρόδια | Από άνθρακα | Από στοιχεία μετάπτωσης I | Άνθρακας | Νικέλιο + οξείδια του νικελίου | Κεραμικά (μείγμα με μέταλλο) |
| Εσωτερικοί σύνδεσμοι (interconnects) | Από άνθρακα ή μεταλλικοί | Μεταλλικοί | Γραφίτης | Ανοξειδωτο ς Χάλυβας ή νικέλιο | Νικέλιο, κεραμικοί ή χαλύβδινοι |
| Θερμοκρασία λειτουργίας | 40-80°C | 65-220°C | 205°C | 650°C | 600-1000°C |
| Ιόντα | H ⁺ | OH ⁻ | H ⁺ | CO ₃ ²⁻ | O ₂ ⁻ |

| | | | | | |
|--|---|---|-----|-----------------------------|-----------------------------|
| Εξωτερικός reformer | Ναι | Ναι | Ναι | Όχι. Μόνο σε μερικά καύσιμα | Όχι. Μόνο σε μερικά καύσιμα |
| Εξωτερική μετατροπή σε υδρογόνο (Water Gas Shift Reaction) | Ναι + καθαρισμός για απομάκρυνση του CO | Ναι + καθαρισμός για απομάκρυνση του CO και CO ₂ | Ναι | Όχι | Όχι |

2.4 Πεδίο εφαρμογών των κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ισχύ σε ένα ικανοποιητικό εύρος από μερικά W έως εκατοντάδες kW. Για το λόγο αυτό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχεδόν σε κάθε εφαρμογή όπου απαιτείται τοπική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Λεωφορεία

Σήμερα, οι κυψέλες καυσίμων χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών όπως στα μέσα μεταφοράς όπου δοκιμές λεωφορείων κυψελίδας καυσίμου έχουν πραγματοποιηθεί στο Σικάγο και το Βανκούβερ καθώς και σε άλλες πόλεις στη Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη. Επίσης, υπό την αιγίδα του ευρωπαϊκού προγράμματος «Clean Urban Transport for Europe» (CUTE), αρκετές μεγάλες ευρωπαϊκές πόλεις όπως το Άμστερνταμ, η Βαρκελώνη, το Αμβούργο, το Λονδίνο, η Μαδρίτη, η Στοκχόλμη, η Στουτγάρδη και άλλες, χρησιμοποιούν υδρογονοκίνητα λεωφορεία. Αυτό γιατί τα αστικά λεωφορεία καθώς απαιτούν συχνές εκκινήσεις και στάσεις, δηλαδή της μεγάλης κατανάλωσης σε καύσιμα, έχουν κεντρικούς σταθμούς τροφοδότησης καυσίμου και αυτό διευκολύνει τη δημιουργία σταθμών παραγωγής υδρογόνου. Απαιτούν ισχύ, τυπικά από 250 kW και άνω όμως μπορούν εύκολα να αποθηκεύσουν μεγάλες ποσότητες υδρογόνου, συνήθως πάνω από 20 kg σε φιάλες των 250 ή και 300 bar στην οροφή του λεωφορείου. Επειδή το υδρογόνο είναι πιο ελαφρύ από τον αέρα, η τοποθέτηση στην οροφή αποτελεί μια αρκετά ασφαλή λύση.



Σχήμα 2.10: Εικόνα του στόλου λεωφορείων υδρογόνου της HyFleet στο Βερολίνο, 2006

Αυτοκίνητα

Ακόμα, οι μεγαλύτεροι κατασκευαστές αυτοκινήτων έχουν ήδη παρουσιάσει πρωτότυπα οχήματα-κυψελών καυσίμου και έχουν ήδη αναγγείλει τη μαζική παραγωγή και εμπορική εκμετάλλευσή τους. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να παίζουν το ρόλο της κύριας ή της βοηθητικής πηγής ενέργειας για την κινητήρια μηχανή. Ως καύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν το υδρογόνο, η μεθανόλη καθώς και η βενζίνη. Τα εμπόδια που πρέπει ακόμη να βελτιστοποιηθούν είναι η μείωση του όγκου και του βάρους, η αύξηση της διάρκειας ζωής, της αξιοπιστίας και της ανθεκτικότητας, η μείωση του κόστους και τέλος η δημιουργία των κατάλληλων υποδομών για την ασφαλή αποθήκευση και μεταφορά του υδρογόνου. Φωτογραφίες μερικών αυτοκινήτων που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου παρουσιάζονται στη συνέχεια (2.11, 2.12).



Ford THINK FCV



DaimlerChrysler Nekar 4



DaimlerChrysler Jeep Commander FCV



Honda FCX V3

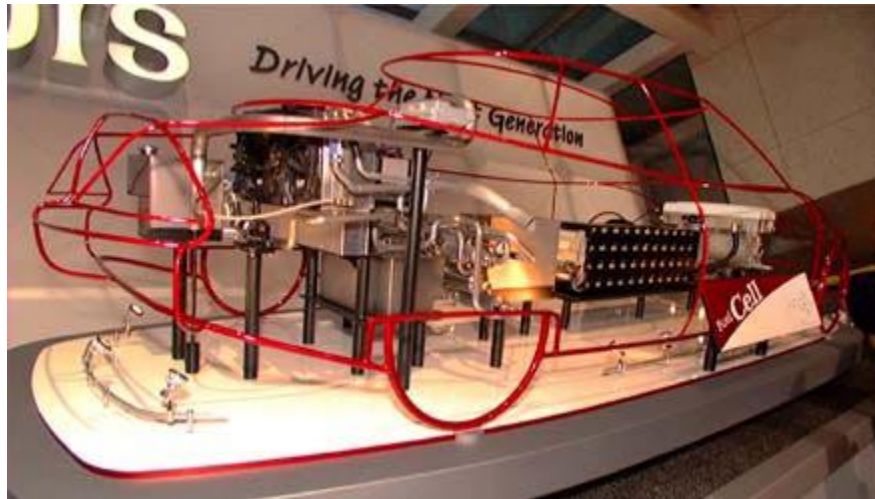


Mazda Premacy FC-EV



Nissan Xterra FCV

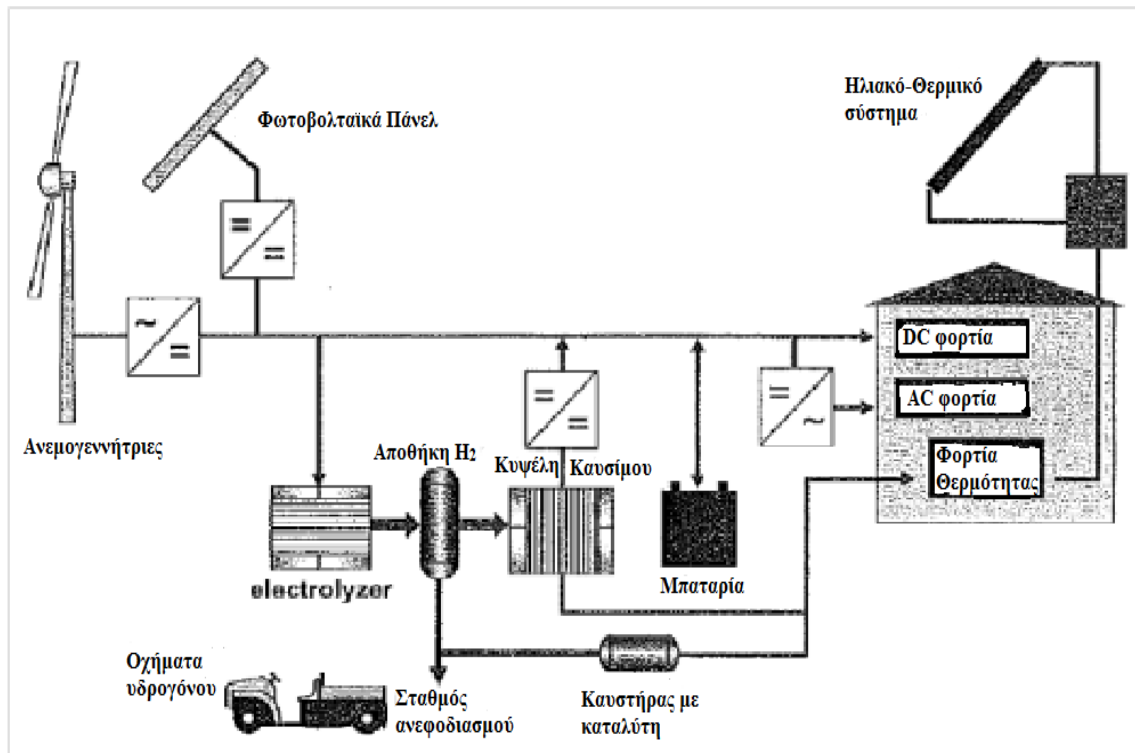
Σχήμα 2.11: Πρότυπα αυτοκίνητα που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου.



Σχήμα 2.12: Αυτοκίνητο τροφοδοτούμενο από κυψέλες καυσίμου, General Motors

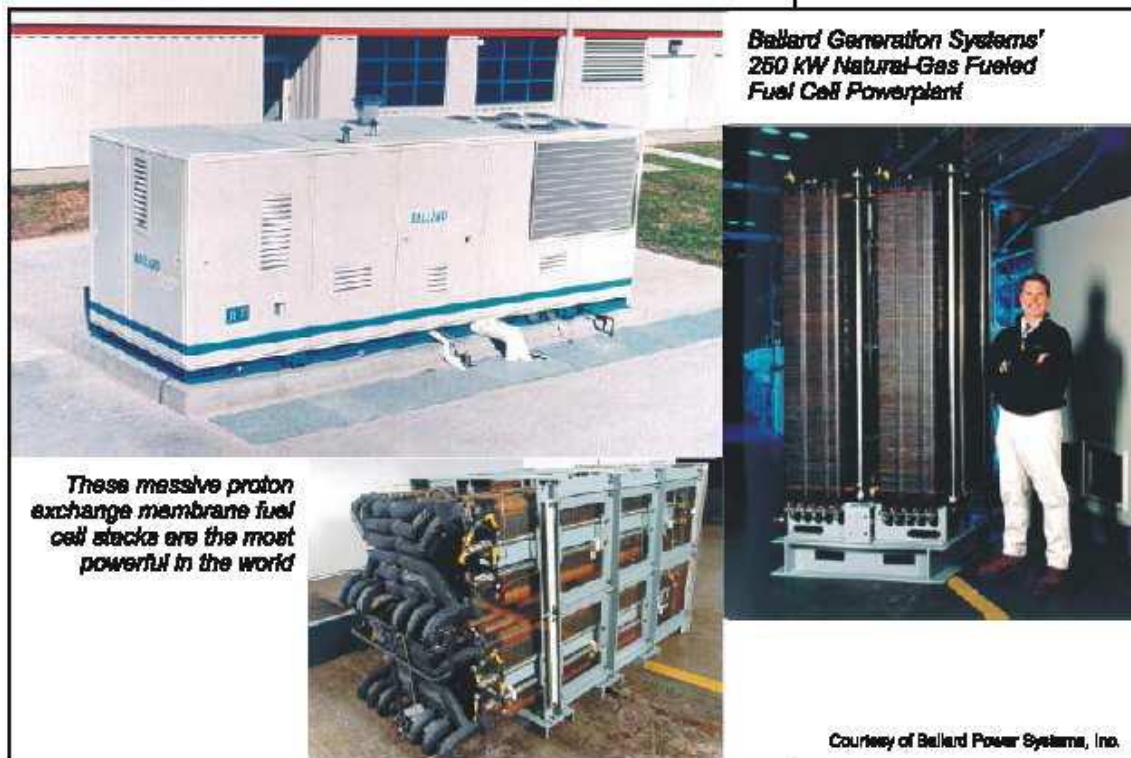
Σταθμοί Παραγωγής ενέργειας (stationary power plants)

Μια άλλη εφαρμογή των κυψελών καυσίμου είναι η χρήση τους στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είτε αντικαθιστώντας το δίκτυο σε απομακρυσμένες περιοχές, είτε συνδεδεμένες παράλληλα με το δίκτυο. Η λειτουργία τους μπορεί να είναι είτε ως σταθμός βάσης, είτε καλύπτοντας τις αιχμές ζήτησης, είτε ως βοηθητικά συστήματα τροφοδοσίας σε περίπτωση βλάβης του δικτύου, είτε σε συνδυασμός με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια σε περιόδους που οι άλλες πηγές δεν καλύπτουν τη ζήτηση. Μια τέτοια διασύνδεση παρουσιάζεται στο σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13: Σχηματική παράσταση ενός πάρκου ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [10]

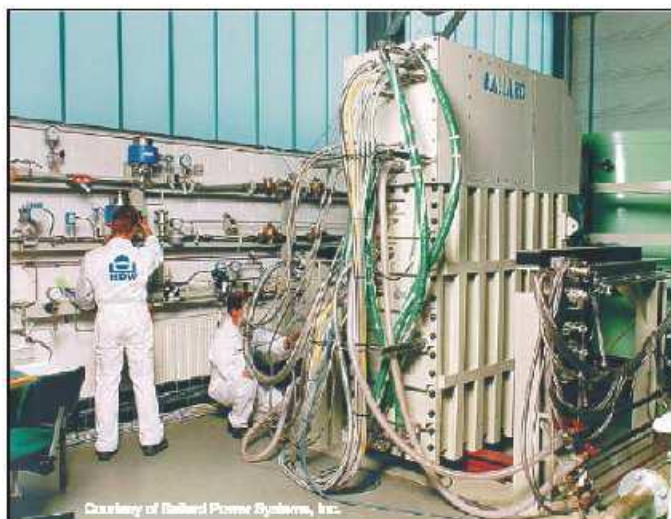
Το χαρακτηριστικό των κυψελών καυσίμου να έχουν υψηλότερη απόδοση χωρίς να μεταβάλλεται το μέγεθός αποτέλεσε το έναυσμα για την κατασκευή κυψελών καυσίμου με δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από μερικά W μέχρι 10 MW κατάλληλες τόσο για βιομηχανική όσο και για οικιακή χρήση. Μάλιστα για τις κυψέλες καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών η εκμετάλλευση και της συμπαραγωγής αυξάνει την απόδοσή τους γύρω στο 80%. Το κύριο καύσιμο για αυτές τις εφαρμογές είναι το φυσικό αέριο. Επίσης, κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούνται και για διανεμημένη παραγωγή (distributed generation-DG). Ένα, όμως από τα σημαντικότερα εμπόδια στην περαιτέρω εισχώρηση των κυψελών καυσίμου σε αυτό τον τομέα αποτελεί το αυξημένο κόστος τους.



Σχήμα 2.14: Η μονάδα παραγωγής ενέργειας της Ballard generation systems

Υποβρύχια

Οι κυψέλες καυσίμου είναι ιδανικές για εφαρμογές που σχετίζονται με τα στρατιωτικά υποβρύχια, για τα πολύ χαμηλά επίπεδα θορύβου και τα στίγματά τους σε υπέρυθρη ακτινοβολία. Αποτελούν για πολλούς λόγους καλοί αντικαταστάτες των μπαταριών που χρησιμοποιούνταν μέχρι τώρα για να παρέχουν ισχύ σε πολλά υποβρύχια. Όπως και με τις σταθερές μονάδες παραγωγής ενέργειας που αναφέρθηκαν παραπάνω, το θερμό νερό που παράγουν μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλους σκοπούς μέσα στο σκάφος. Τα τελευταία χρόνια έχουν κατασκευαστεί αρκετά πρωτότυπα συστήματα με αντιδρώντα υψηλής καθαρότητας και ενσωματωμένους αντιστροφείς.



Σχήμα 2.15: Μονάδα παραγωγής ενέργεια υποβρυχίου με fuel cells
Λειτουργεί με καθαρό υδρογόνο και οξυγόνο
(Από την Ballard Generation Systems)

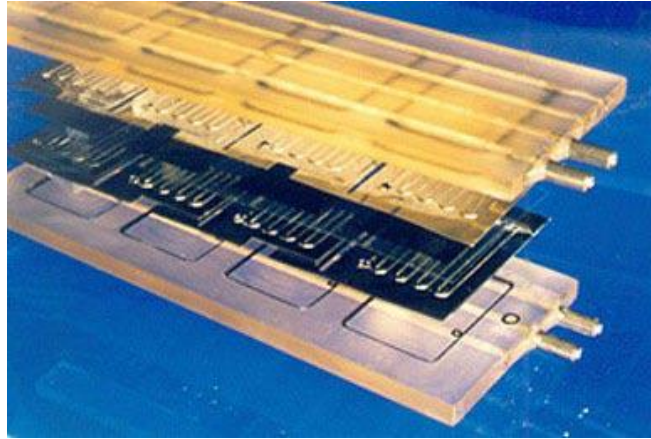
Φορητές μονάδες



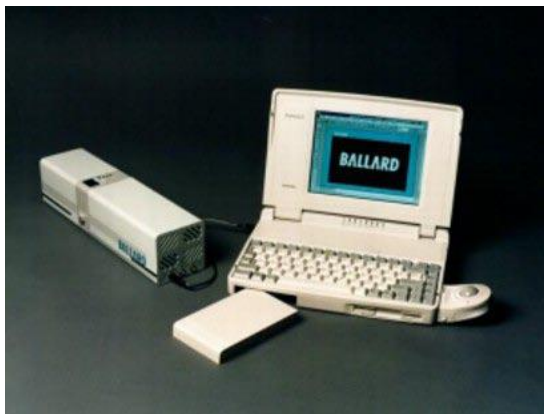
Σχήμα 2.16: Φορητά συστήματα fuel cell

Τέλος, κυψέλες καυσίμων χρησιμοποιούνται στη κατασκευή αεροσκαφών καθώς και σε φορητές ηλεκτρικές συσκευές. Ακόμα, η υψηλή πυκνότητα ισχύος, η μεγαλύτερη ικανότητα ενεργειακής αποθήκευσης και ο μεγάλος χρόνος αυτονομίας τους σε σχέση με τις συμβατικές μπαταρίες δίνει τη δυνατότητα στις κυψέλες καυσίμου να χρησιμοποιούνται στους φορητούς υπολογιστές, στις τηλεπικοινωνίες, σε φορητά ηλεκτρικά εργαλεία καθώς και σε πειραματικό στάδιο σε πολλές οικιακές συσκευές ακόμα και για τη λειτουργία ραδιοφώνων και ρολογιών χειρός. Γενικά φορητές μονάδες fuel cell μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιαδήποτε εφαρμογή

λειτουργούσε μέχρι τώρα με μπαταρίες. Ήδη είναι διαθέσιμες εμπορικές μονάδες που παρέχουν 1,2 kW ηλεκτρικής ισχύος.



Σχήμα 2.17: Μικροκυψέλη καυσίμου, σχεδιασμένη από την Fraunise ISE για χρήση στην κινητή τηλεφωνία



Σχήμα 2.18: Laptop τροφοδοτούμενο από κυψέλη καυσίμου, της Ballard



Σχήμα 2.19: Laptop τροφοδοτούμενο από μίνι κυψέλη καυσίμου

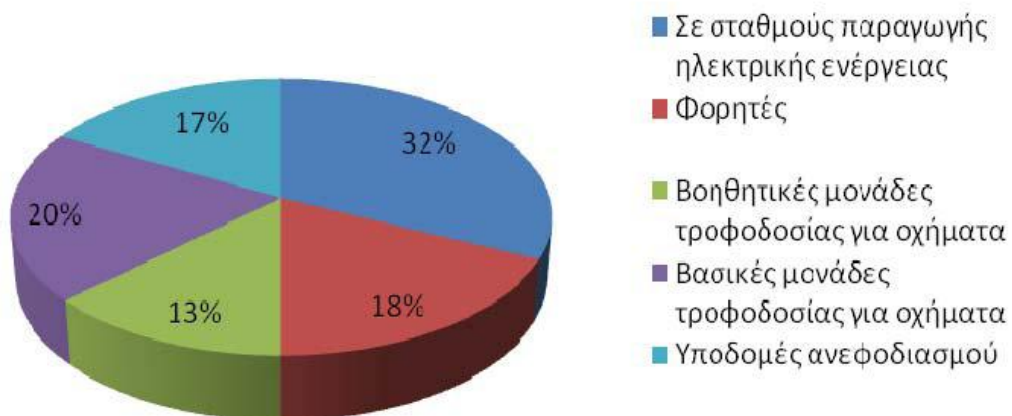
Παρακάτω παρουσιάζεται ένα συνοπτικό διάγραμμα (2.1) των βασικών εφαρμογών των fuel cell που αναλύθηκαν, τα όρια της ισχύος στα οποία λειτουργεί η κάθε εφαρμογή, τα κύρια πλεονεκτήματά τους όπως αναφέρθηκαν καθώς και το εύρος των εφαρμογών των τύπων κυψελών καυσίμου.

| ΤΥΠΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ | φορητός ηλεκτρονικός εξοπλισμός | | | αυτοκίνητα, σκάφη και οικιακή CHP | | | διανεμημένη παραγωγή, CHP, λεωφορεία | |
|--|---|----|-----|--|-----|------|--|-----|
| ΙΣΧΥΣ (watt) | 1 | 10 | 100 | 1k | 10K | 100k | 1M | 10M |
| ΚΥΡΙΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ | υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από τις μπαταρίες -πιο γρήγορη επαναφόρτιση | | | μηδενικοί ρύποι -υψηλότερες αποδόσεις | | | υψηλότερες αποδόσεις -λιγότερη μόλυνση -αθόρυβη λειτουργία | |
| ΕΥΡΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΩΝ ΤΥΠΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ | DMFC | | | AFC | | MCFC | | |
| | | | | SOFC | | | | |
| | PEMFC | | | | | | PAFC | |

Διάγραμμα 2.1: Συνοπτικό διάγραμμα των εφαρμογών και των κύριων πλεονεκτημάτων των κυψελών καυσίμου για τα διάφορα είδη, καθώς και για τις διάφορες εφαρμογές.

Σε μια παγκόσμια έρευνα αγοράς που διεξήγαγε το «US Fuel Cell Council» αναφέρεται η κατανομή της παγκόσμιας παραγωγής συστημάτων κυψελών καυσίμου ανά εφαρμογή όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 2.20.

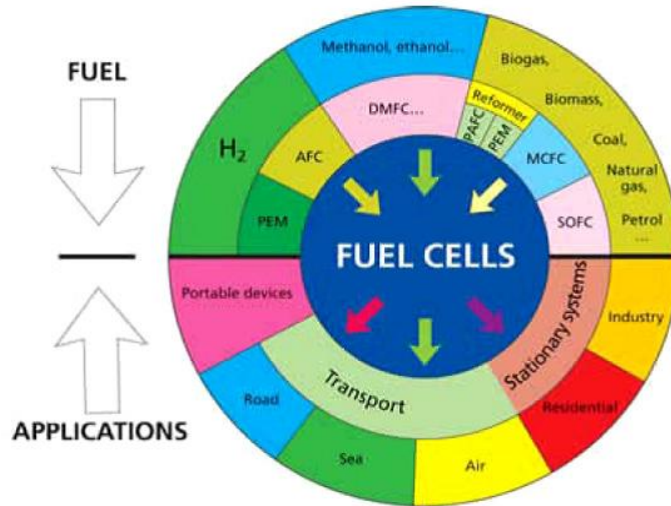
Οι εφαρμογές σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας αγοράς (32%), ενώ ακολουθούν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με 20%, οι φορητές με 18%, η χρήση σε υποδομές ανεφοδιασμού (17%) και τέλος ως βοηθητικές μονάδες τροφοδοσίας σε οχήματα (13%).



Σχήμα 2.20: Κατανομή της παγκόσμιας παραγωγής συστημάτων κυψελών καυσίμου (α) ανά εφαρμογή και (β) ανά χώρα[11]

Παρακάτω παρουσιάζεται σε κυκλικό διάγραμμα (2.2) το είδος του καυσίμου κάθε κυψέλης καυσίμου σε συνάρτηση με τις γενικότερες εφαρμογές στις οποίες

χρησιμοποιούνται. Συγκεκριμένα οι εφαρμογές που παρουσιάζονται είναι σε φορητές συσκευές, στα μέσα μεταφοράς, είτε οδικά, είτε θαλάσσια, είτε αέρια και σε σταθερά συστήματα για οικιακή χρήση είτε στη βιομηχανία.



Διάγραμμα 2.2: Γενικό διάγραμμα των εφαρμογών και των καυσίμων των διαφόρων κυψελών καυσίμου [29].

2.5 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα Κυψελών Καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου σαν εναλλακτική πηγή ενέργειας παρουσιάζουν τα παρακάτω **πλεονεκτήματα** [8],[10],[11]:

- Απ' ευθείας μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική με υψηλές αποδόσεις που κυμαίνονται από 30 έως 85%). Οι κυψέλες καυσίμου είναι γενικά περισσότερο αποδοτικές από τις μηχανές καύσης είτε αυτές χρησιμοποιούν έμβολα, είτε τουρμπίνες. Επίσης η απόδοση ενός συστήματος κυψέλης καυσίμου δεν εξαρτάται από το μέγεθός της. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό στα συστήματα συνδυασμένης ενέργειας για μικρές εφαρμογές, όπως για οικιακή χρήση.
- Τα απαραίτητα λειτουργικά στοιχεία μιας κυψέλης είναι ιδιαίτερα απλά, με ελάχιστα ή καθόλου κινούμενα μέρη. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε συστήματα μεγάλης διάρκειας ζωής και αξιοπιστίας. Επίσης, έχουν μικρές απαιτήσεις σε συντήρηση καθώς δεν έχουν κινούμενα μέρη.

- Έχουν εξαιρετικά χαμηλές εκπομπές ρύπων. Το υποπροϊόν της κύριας αντίδρασης στην κυψέλη καυσίμου, όταν το καύσιμο είναι το υδρογόνο, είναι το νερό, το οποίο ουσιαστικά σημαίνει ότι η κυψέλη καυσίμου είναι «μηδενικών ρύπων». Αυτό είναι αναμφίβολα το σημαντικότερο πλεονέκτημα τους, όταν χρησιμοποιούνται από τα οχήματα, καθώς συμβάλλουν στην ουσιαστική μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων από αυτά.
- Αθόρυβη λειτουργία, αφού δεν έχει κινούμενα μέρη κατά την ενεργειακή μετατροπή (πολύ σημαντικό για την εφαρμογή των κυψελών καυσίμου σε φορητές συσκευές και σε οικιακή χρήση).
- Έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν με μια ευρεία ποικιλία καυσίμων.
- Παρουσιάζουν ευελιξία στη διαστασιολόγηση τους. Ανάλογα με τις ανάγκες του φορτίου και την αξιοπιστία που απαιτείται μπορούν οι κυψέλες καυσίμου να συνδεθούν σε σειρά και παράλληλα.
- Ικανότητα γρήγορης απόκρισης στις αλλαγές του φορτίου. Σε μερικά δευτερόλεπτα η τάση και η ισχύς της κυψέλης καυσίμου έρχονται στην κατάσταση ισορροπίας. Με την χρήση ηλεκτρονικών ισχύος και μπαταριών παράλληλα με την κυψέλη καυσίμου είναι δυνατή η ακόμα γρηγορότερη απόκριση μέσα σε εκατοντάδες δεκάδες ms.
- Έχουν μεγάλη ποικιλία εφαρμογών.

Από την άλλη πλευρά, οι κυψέλες καυσίμου χαρακτηρίζονται από τα παρακάτω **μειονεκτήματα** [8],[10]:

- Το αρχικό κόστος επένδυσης είναι υψηλό. Οι κυψέλες είναι ακριβές επειδή χρειάζονται υλικά με συγκεκριμένες ιδιότητες. Υπάρχει ανάγκη ανάπτυξης φθηνών αναλώσιμων για τη λειτουργία της στα οποία συμπεριλαμβάνεται η

πλατίνα που χρησιμοποιείται ως καταλύτη και οι πολυμερές μεμβράνες όπως Nafion που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ηλεκτρολυτών.

- Αποτελεί σχετικά νέα τεχνολογία στη βιομηχανία της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος και έχει μεγάλη αποδοχή από χρήστες. Χρειάζεται έρευνα σε ορισμένους τομείς όπως για παράδειγμα αυτός της βελτίωσης των υλικών. Επίσης, υπάρχουν λίγοι κατασκευαστές και περιορισμένο δίκτυο υποστήριξης.
- Παρουσιάζουν σταθερή μείωση της απόδοσης αυξανόμενου του χρόνου λειτουργίας τους.
- Αποτελούν πολύπλοκα συστήματα.
- Η διαδικασία μετασχηματισμού του καυσίμου μπορεί να είναι δαπανηρή και δύσκολη και χρειάζεται ενέργεια για να γίνει.

Το γεγονός ότι το υδρογόνο είναι το προτιμώμενο καύσιμο είναι από τα κύρια μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου. Παρόλα αυτά είναι πολλοί που θεωρούν ότι αυτό είναι και από τα κύρια πλεονεκτήματα. Προβλέπεται ότι τα ορυκτά καύσιμα θα τελειώσουν σε μερικές δεκαετίες και ότι το υδρογόνο θα γίνει το κύριο καύσιμο του πλανήτη και ο κύριος ενεργειακός παράγοντας. Η παραγωγή του θα γίνεται από μεγάλες συστοιχίες ηλιακών συλλεκτών που θα ηλεκτρολύουν το νερό [11].

Στον Πίνακα 2.5 συγκρίνεται το βάρος, η ενέργεια και ο όγκος μπαταριών με μία κυψέλη καυσίμου. Όπως φαίνεται στον Πίνακα, το σύστημα της κυψέλης καυσίμου παρέχει ενέργεια εξίσου με τις μπαταρίες αλλά με ένα σύστημα μικρότερο σε βάρος και όγκο. Αυτό είναι ιδιαίτερα πλεονεκτικό για φορητά συστήματα.

Πίνακας 2.5: Σύγκριση Fuel Cell με άλλου τύπου πηγών ενέργειας.

| | Βάρος | Ενέργεια | Όγκος |
|-------------------------------|----------------|-----------------|--------------|
| Κυψέλη Καυσίμου | 4,3 kg | 2190 Whr | 4.0 L |
| Κυψέλη Ψευδαργύρου | 8,4 kg | 2620 Whr | 9.0 L |
| Άλλου είδους μπαταρίες | 10,9 kg | 2200 Whr | 9.5 L |

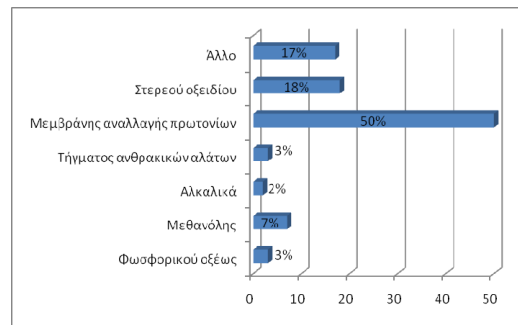
Στον πίνακα 2.6 παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του κάθε είδους κυψέλης καυσίμου καθώς και οι εφαρμογές στις οποίες λαμβάνουν μέρος.

Πίνακας 2.6: Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα κυψελών καυσίμου

| Είδος Καυσίμου | <i>Proton Exchange Membrane (PEMFC)</i> | <i>Alkaline (AFC)</i> | <i>Phosphoric Acid (PAFC)</i> | <i>Molten Carbonate (MCFC)</i> | <i>Solid Oxide (SOFC)</i> |
|----------------------|---|--|---|---|--|
| Πλεονεκτήματα | Ο στέρεος ηλεκτρολύτης μειώνει τα προβλήματα διάβρωσης και διαχείρισης, χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας, μικρός χρόνος εκκίνησης | γρήγορη αντίδραση καθόδου λόγω υψηλής θερμοκρασίας | μεγάλος βαθμός απόδοσης (85%) στην συμπαραγωγή θερμότητας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί καύσιμο χαμηλής καθαρότητας | υψηλή απόδοση, ευελιξία στην επιλογή του καυσίμου και καταλύτη | υψηλή απόδοση, ευελιξία στην επιλογή του καυσίμου και καταλύτη, ο στέρεος ηλεκτρολύτης μειώνει τα προβλήματα διάβρωσης και διαχείρισης |
| Μειονεκτήματα | Η χαμηλή θερμοκρασία απαιτεί ακριβό καταλύτη (Pt), υψηλή ευαισθησία σε ακαθαρσίες καυσίμων | Ακριβή διαδικασία καθαρισμού του CO ₂ από το καύσιμο και τον αέρα | Απαιτεί καταλύτη Pt, παράγει χαμηλή Ισχύς και ένταση ρεύματος, έχει μεγάλο όγκο και βάρος | μικρός χρόνος ζωής καθώς η υψηλή θερμοκρασία ενισχύει τη διάβρωση και την αστοχία των εξαρτημάτων της κυψέλης | μικρός χρόνος ζωής καθώς η υψηλή θερμοκρασία ενισχύει τη διάβρωση και την αστοχία των εξαρτημάτων της κυψέλης |
| Εφαρμογές | διαστημική τεχνολογία, οχήματα, υποβρύχια, κινητές εφαρμογές, οικιακή χρήση | διαστημική τεχνολογία, οχήματα, υποβρύχια | παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συμπαραγωγή θερμότητας, οχήματα | παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας | παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας |

Οι εταιρίες και οι δραστηριότητες των ερευνητικών κέντρων επικεντρώνονται στην ανάπτυξη κυρίως κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων και λιγότερο

σε αυτές του στερεού οξειδίου, όπως φαίνεται στην έρευνα που έκανε το «US Fuel Cell Council» το 2007 [12].



Διάγραμμα 2.3: Η κατανομή των παραγόμενων κυψελών καυσίμου ανά είδος το έτος 2007 [12].

Κεφάλαιο 3: ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΥΠΟΥ PEM

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα αναλυθούν οι κυψέλες καυσίμου τύπου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Η χρήση του συγκεκριμένου τύπου κυψέλης καυσίμου έχει αναπτυχθεί ιδιαίτερα σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης τα τελευταία χρόνια καθώς παρουσιάζουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης σε σχέση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης και δεν παράγουν αέριους ρύπους γιατί το προϊόν της χημικής αντίδρασης είναι νερό σε αντίθεση με το διοξείδιο του άνθρακα των μηχανών εσωτερικής καύσης. Χαρακτηριστικό των κυψελών καυσίμου PEM είναι η υψηλή πυκνότητα ισχύος, ο στερεός ηλεκτρολύτης, η μεγάλη διάρκεια ζωής και η ανθεκτικότητά τους.

3.1 Αρχή λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου

Το πιο γνωστό είδος κυψέλης καυσίμου είναι η κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίου (PEM) βασικό χαρακτηριστικό του οποίου είναι η απλότητά του.

Οι κυψέλες καυσίμου τύπου PEM, αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια την άνοδο και την κάθοδο τα οποία διαχωρίζονται από μία μεμβράνη, η οποία έχει το ρόλο του ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης είναι μια πολυμερή μεμβράνη η οποία επιτρέπει τη ροή ιόντων διαμέσου αυτής. Σε κάθε μια από τις δύο επιφάνειες της μεμβράνης του εφάπτεται ένα καταλυτικό πορώδες ηλεκτρόδιο. Ο σχηματισμός Άνοδος – Ηλεκτρολύτης – Κάθοδος αποτελεί μια ενιαία δομή, η οποία καλείται και MEA από τα αρχικά των λέξεων Membrane Electrode Assemblies. Η σύνδεση σε σειρά πολλών δομών MEA μεταξύ τους χρησιμοποιώντας διπολικές πλάκες για τη σύνδεση δημιουργεί μια συστοιχία. Οι όροι MEA και διπολική πλάκα αναλύονται παρακάτω. Η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος περιγράφεται από τα παρακάτω επιμέρους στάδια.

Το καύσιμο υδρογόνο τροφοδοτείται στην άνοδο της κυψέλης (αρνητικό ηλεκτρόδιο) έρχεται σε επαφή με τον καταλύτη και έτσι δίσταται 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 απελευθερώνονται ρέουν μέσω του εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος προς την κάθοδο δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα. Για αυτό το λόγο ως άνοδος και καταλύτης χρησιμοποιούνται αγώγιμα υλικά.

Τα θετικά φορτισμένα ιόντα του υδρογόνου διέρχονται μέσω της μεμβράνης και αντιδρούν με το οξυγόνο το οποίο τροφοδοτείται στην κάθοδο (θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο) και παράγεται νερό. Η κατασκευή του ηλεκτροδίου είναι τέτοια που εξασφαλίζει την ομοιογενή διάχυση του οξυγόνου στον καταλύτη.

Για σχηματισμό του νερού είναι απαραίτητη και η συμμετοχή εκτός των μορίων του οξυγόνου και των ιόντων του υδρογόνου, των ηλεκτρονίων τα οποία διοχετεύονται μέσω του εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος στην κάθοδο.

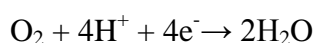
Ο καταλύτης χρησιμεύει στην αύξηση της ταχύτητας των αντιδράσεων διάσπασης του μορίου του υδρογόνου και της ένωσης υδρογόνου οξυγόνου για τη δημιουργία νερού, στην άνοδο και στην κάθοδο αντίστοιχα. Συνήθως αποτελείται από ένα πολύ λεπτό στρώμα λευκόχρυσου (Pt) πάνω σε επιφάνεια άνθρακα. Το στρώμα αυτό βρίσκεται στην πλευρά του καταλύτη η οποία είναι σε επαφή με τη μεμβράνη. Ο καταλύτης είναι τραχύς και πορώδης ώστε να μεγιστοποιείται η διαθέσιμη επιφάνεια της χημικής αντίδρασης.

Οι χημικές αντιδράσεις οι οποίες συμβαίνουν, συνοψίζονται παρακάτω.

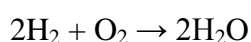
Στην άνοδο:



Στην κάθοδο:



Συνολική αντίδραση:



Οι παραπάνω αντιδράσεις σε μία απλή κυψέλη καυσίμου παράγουν τάση ίση περίπου με 0,7 Volt. Προκειμένου να παραχθούν μεγαλύτερες (και πρακτικά αξιοποιήσιμες) τάσεις, χρησιμοποιούνται περισσότερες κυψέλες σε σειρά (fuel cell stack) [8]. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της κυψέλης καυσίμου PEM είναι αρκετά υψηλός περίπου 50-60% και η τεχνολογία αυτή παρουσιάζει την μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος και εξαιρετικά δυναμικά χαρακτηριστικά όπως τον μικρό χρόνο εκκίνησης λειτουργίας, τον υψηλό βαθμό απόδοσης σε μεγάλη περιοχή φορτίων και την δυνατότητα γρήγορης μεταβολής της ισχύος εξόδου. Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας καθιστά αναγκαία την χρήση και ακριβών καταλυτών από ευγενή μέταλλα και η μικρή ανοχή σε ρύπους απαιτεί ιδιαίτερα σύνθετη επεξεργασία των καυσίμων. Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας, το ελαφρύ βάρος, η υψηλής πυκνότητας ισχύος και η απλότητα των κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων τις κάνουν ελκυστικές σε εφαρμογές κατασκευής οχημάτων.

Πέρα από τις χρήσεις που ήδη αναφέρθηκαν, χρησιμοποιούνται και σε συνδυασμένους κύκλους παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Επιπλέον, μπορούν να αποτελέσουν πηγή ενέργειας λίγων watt για κινητά τηλέφωνα και άλλες μορφές ηλεκτρονικού εξοπλισμού, όπως τα computer, ή λίγων kilowatt για πλοία και οικιακά συστήματα ή δεκάδων kilowatt για αυτοκίνητα ή ακόμη και εκατοντάδων kilowatt για λεωφορεία και βιομηχανικές εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Σημαντική είναι επίσης η χρήση τους σε εφαρμογές που αφορούν διαστημικά και στρατιωτικά προγράμματα [13].

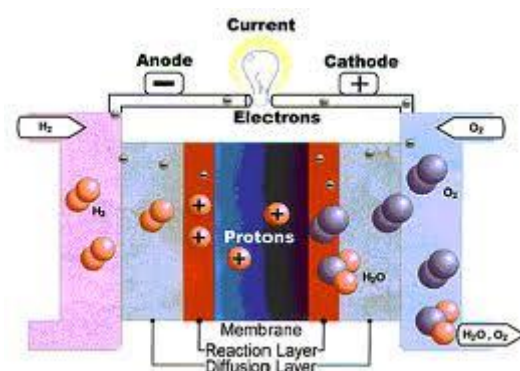
3.2 Δομή της Κυψέλης

Η αποδοτικότητα της κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων είναι συνάρτηση των δομικών στοιχείων που την απαρτίζουν. Ένας παράγοντας που κατέχει σημαντική θέση στην εύρυθμη λειτουργία της είναι η διαχείριση του νερού. Η κυψέλη πρέπει να ανατροφοδοτείται με τα αέρια αντιδρώντα και να συλλέγεται το προϊόν της αντίδρασης τους, που είναι το νερό. Η διαχείριση του νερού μέσα στην κυψέλη είναι μία σημαντική δραστηριότητα που πρέπει να προβλεφθεί διότι

σχετίζεται άμεσα με την αγωγιμότητα της μεμβράνης και με την αντίδραση της αναγωγής στην κάθοδο της κυψέλης. Επίσης δεν υπάρχουν στο εσωτερικό της κυψέλης διαβρωτικά υγρά και έτσι η κυψέλη μπορεί να δουλέψει σε οποιοδήποτε περιβάλλον, και συνεπώς αυτό σημαίνει ότι η κυψέλη τύπου PEM είναι ιδανική για φορητές εφαρμογές ή οχήματα.

Για τη κατασκευή μιας λειτουργικής κυψέλης καυσίμου πρέπει επίσης να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στον ηλεκτρολύτη ο οποίος είναι μονωτής του ηλεκτρικού ρεύματος και άγει τα παραγόμενα ιόντα όπως και στους συλλέκτες ρεύματος οι οποίοι συνδέουν τις κυψέλες μεταξύ τους σε συστοιχίες, άγουν το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα «τροφοδοτώντας» το κύκλωμα της κατανάλωσης. Ο ηλεκτρολύτης πολυμερών λειτουργεί σε χαμηλές θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα να καθιστά την εκκίνηση του κελιού ιδιαίτερα γρήγορη.

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η εσωτερική δομή της κυψέλης.



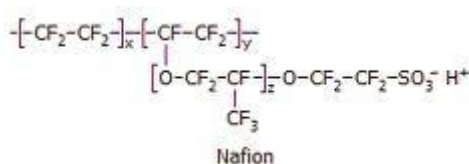
Σχήμα 3.1: Εσωτερική δομή κυψέλης καυσίμου PEM

Τα κύρια δομικά στοιχεία της είναι:

- η μεμβράνη πρωτονίων (Proton Exchange Membrane-PEM)
- τα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου
- η πλάκα ροής αερίων (Flow Field Plate) και η διπολική πλάκα
- η συστοιχία κυψελών καυσίμου (stack)

3.2.1 Μεμβράνη

Η μεμβράνη της κυψέλης αποτελείται συνήθως από έναν λεπτό ηλεκτρολύτη πάχους 25-200μm που επιτρέπει την αγωγή των πρωτονίων. Η μεμβράνη αυτή πρέπει να είναι επίσης αεροστεγής, να είναι μονωτής για τα ηλεκτρόνια και να έχει μεγάλη μηχανική και θερμική αντοχή σε περίπτωση μεταβολής της πίεσης. Οι ηλεκτρολύτες των κυψελών καυσίμου PEMFC αποτελούνται από μία μεμβράνη από πολυμερή υλικά σε στερεά μορφή. Το πιο συνηθισμένο πολυμερές που χρησιμοποιείται σήμερα είναι το Nafion που κατασκευάζεται από την εταιρεία DuPont (σχήμα 3.3) και έχει δομικές ομοιότητες με το Teflon.

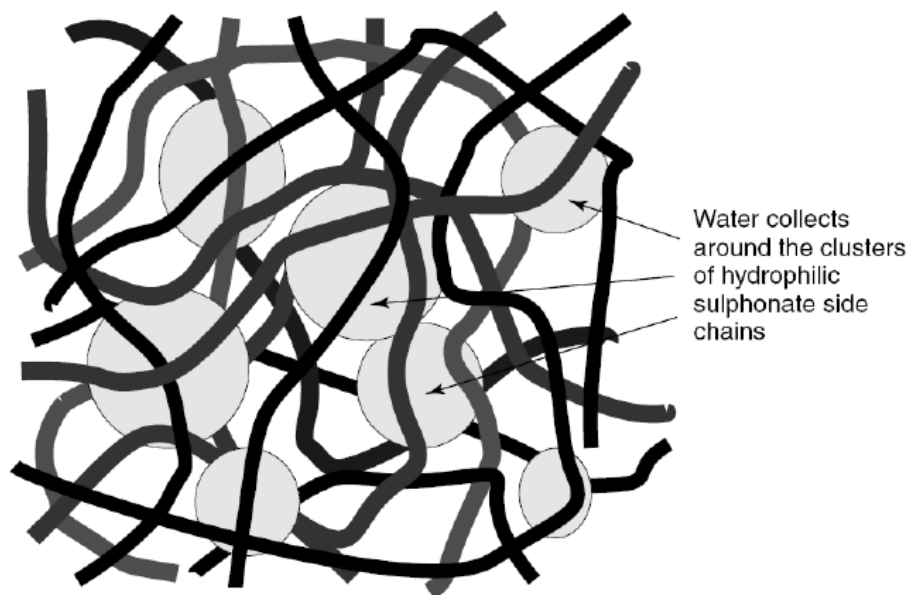


Σχήμα 3.2: Δομή πολυμερούς Nafion

Σύμφωνα με το σχήμα 3.2, διακρίνονται τρεις περιοχές. Η πρώτη περιοχή είναι ο κορμός των φθοροανθράκων (-CF₂-CF-CF₂-). Η αλληλουχία αυτή επαναλαμβάνεται εκατοντάδες φορές μέσα στη μεμβράνη. Η δεύτερη περιοχή αποτελείται από την πλευρική αλυσίδα (O-CF₂-CF-CF₃)-O-CF₂-CF₂- και συνδέει τον κορμό με την τρίτη περιοχή που αποτελείται από ιόντα θεικού οξέος SO₃⁻. Συνεπώς, καθώς διασπάται το μόριο του υδρογόνου στην άνοδο, τα μονατομικά κατιόντα υδρογόνου H⁺ εισέρχονται στη μεμβράνη και μεταπηδούν από ένα μόριο SO₃⁻ στο επόμενο [8]. Για να επιτευχθεί αυτό, η μεμβράνη πρέπει να είναι ενυδατωμένη ώστε να είναι αγωγίμη για τα H⁺. Σε αυτές τις ενυδατωμένες περιοχές δηλαδή, τα ιόντα του υδρογόνου H⁺ έλκονται σχετικά ελάχιστα από τα ιόντα SO₃⁻ και είναι ελεύθερα να κινηθούν. Αυτή η δομή φαίνεται στο σχήμα 3.3. Παρόλο που οι ενυδατωμένες περιοχές είναι διαχωρισμένες, είναι δυνατόν τα ιόντα του υδρογόνου H⁺ να κινούνται στα μεγάλα μόρια του υλικού. Για το λόγο αυτό η θερμοκρασία λειτουργίας πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα.

Από άποψη χρησιμότητας στο κελί καυσίμου, τα κύρια χαρακτηριστικά του Nafion είναι τα εξής [11]:

- Είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις χημικές καταπονήσεις
- Έχουν μεγάλη μηχανική αντοχή και έτσι μπορούν να κατασκευαστούν σε πολύ λεπτές στρώσεις, κάτω από 50 μm .
- Έχουν όξινο χαρακτήρα
- Μπορούν να απορροφήσουν μεγάλες ποσότητες νερού
- Εάν είναι καλά ενυδατωμένα, τα ιόντα H^+ μπορούν να κινηθούν ελεύθερα μέσα στο υλικό και έτσι είναι πολύ καλοί αγωγοί πρωτονίων.



Σχήμα 3.3: Η Δομή μιας μεμβράνης τύπου Nafion.

Όλη αυτή η λειτουργία επιδεικνύει πόσο απαραίτητη και σημαντική είναι η ενυδάτωση αλλά και η γενικότερη διαχείριση του νερού μέσα στην κυψέλη καυσίμου. Στην πράξη η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί κάτω από τους 100°C , ενώ σε περιπτώσεις που λειτουργούν κυψέλες καυσίμου πάνω από τους 100°C , πρέπει να επικρατούν συνθήκες υψηλής πίεσης ώστε το νερό να διατηρείται σε υγρή μορφή.

3.2.2 Ηλεκτρόδια και η δομή τους

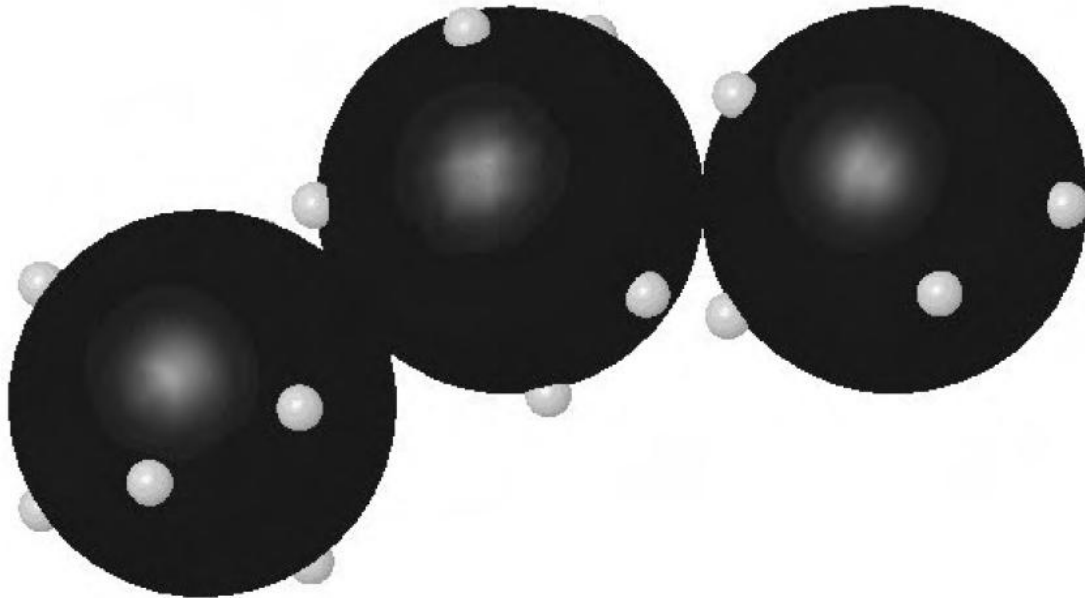
Ο καλύτερος καταλύτης τόσο για την άνοδο, όσο και για την κάθοδο είναι ο λευκόχρυσος. Στην αρχική περίοδο ανάπτυξης των κυψελών καυσίμου τεχνολογίας PEM, ο λευκόχρυσος χρησιμοποιούνταν ως καταλύτης με ρυθμό περίπου $28\text{mg}/\text{cm}^2$. Για παράδειγμα στη διαστημική αποστολή Gemini της NASA το 1962 χρησιμοποιήθηκε PEMFC ισχύος 1kW με ηλεκτρόδιο από πλατίνα $37\text{mg}/\text{cm}^2$. Με τις

τεχνολογικές βελτιώσεις που έχουν γίνει στην ανάπτυξη των κελιών καυσίμου, η ποσότητα της πλατίνας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του καταλύτη μειώθηκε στα $0,2\text{mg}/\text{cm}^2$ ενώ ταυτόχρονα αυξήθηκε η παρεχόμενη από το κελί ισχύ.

Η βασική δομή ενός ηλεκτροδίου στις κυψέλες καυσίμου τεχνολογίας PEM είναι σχεδόν ίδια σε κάθε σχεδίαση, και διαφέρει μόνο σε λεπτομέρειες. Επίσης, οι άνοδοι και οι κάθοδοι είναι και αυτές ίδιες στις περισσότερες κυψέλες καυσίμου PEM.

Ο λευκόχρυσος επεξεργάζεται και γίνεται μικρά σωματίδια, τα οποία τοποθετούνται στην επιφάνεια μεγαλύτερων σωματιδίων και τελικά δημιουργείται μια σκόνη άνθρακα, που περιέχει τον λευκόχρυσο. Η πιο συνηθισμένη σκόνη βασισμένη σε άνθρακα είναι η XC72 και χρησιμοποιείται ευρέως. Η ιδανική μορφή αυτής της σκόνης φαίνεται στο σχήμα 3.4. Ο λευκόχρυσος είναι λεπτοδιαμερισμένος και απλωμένος έτσι ώστε ένα μεγάλο μέρος της επιφάνειας να έρχεται σε επαφή με τα αντιδρώντα.

Η μέθοδος του ξεχωριστού ηλεκτροδίου, ο υποστηριζόμενος σε άνθρακα καταλύτης είναι τοποθετημένος, (χρησιμοποιώντας κάθε εταιρία τις δικές τις τεχνικές), σε ένα πορώδες και αγωγικό υλικό όπως είναι ύφασμα από άνθρακα ή ίνες από άνθρακα. Η τοποθέτηση πολυμερούς PTFE (Polytetrafluoroethylene) βοηθάει, λόγω της υδρόφοβης συμπεριφοράς του, στην μετακίνηση του παραγόμενου νερού στην επιφάνεια από την οποία μπορεί να εξατμιστεί. Επιπρόσθετα στην μηχανική δομή του ηλεκτροδίου, το ύφασμα ή οι ίνες άνθρακα διασκορπίζουν το αέριο μέσα στον καταλύτη. Τελικά τοποθετείται και ένα ηλεκτρόδιο σε κάθε πλευρά της μεμβράνης του πολυμερικού ηλεκτρολύτη.

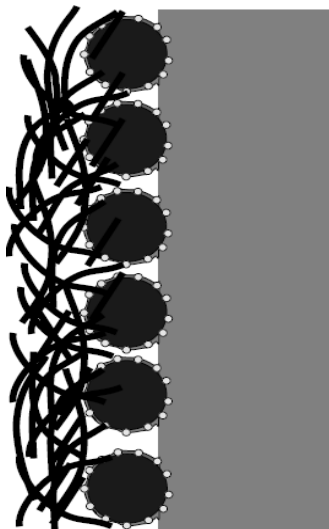


Σχήμα 3.4: Η Δομή του στηριζόμενου σε άνθρακα καταλύτη.[14]

Η άλλη μέθοδος έχει να κάνει με την απευθείας κατασκευή του ηλεκτροδίου μέσα στον ηλεκτρολύτη. ο λευκόχρυσος υποστηριζόμενος από άνθρακα, τοποθετείται κατευθείαν στον ηλεκτρολύτη, και μετά κατασκευάζεται το ηλεκτρόδιο πάνω στη μεμβράνη. Όταν τοποθετηθεί ο καταλύτης πάνω στην μεμβράνη πρέπει να δημιουργηθεί και ένα στρώμα διασκορπισμού του αερίου. Αυτό το στρώμα θα είναι είτε ίνες είτε ύφασμα άνθρακα και το πάχος του θα είναι από 0.2 μέχρι 0.5 mm. Η στρώση αυτή επιτελεί και άλλο ρόλο πέρα από το να διασκορπίζει το αέριο. Δημιουργεί μια ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ του υποστηριζόμενου από άνθρακα ηλεκτρολύτη και της διπολικής πλάκας, ή οποιουδήποτε άλλου συλλέκτη του ηλεκτρικού ρεύματος. Επιπλέον, μεταφέρει το παραγόμενο νερό έξω από την επιφάνεια του ηλεκτρολύτη και επίσης, δημιουργεί ένα προστατευτικό στρώμα πάνω από το λεπτό στρώμα του καταλύτη. Αυτή η στρώση διασκορπισμού των αερίων μπορεί είτε να είναι είτε όχι ολοκληρωμένο μέρος της κατασκευής μεμβράνης ηλεκτροδίου.

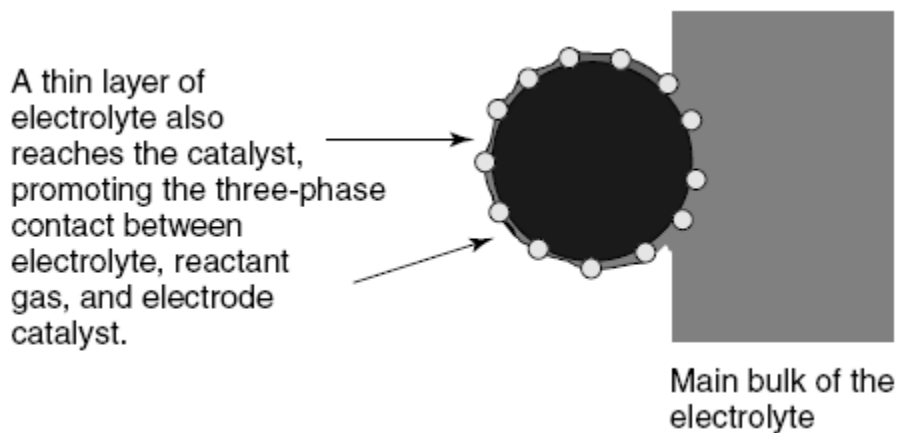
Όποια και από τις δυο μεθόδους να επιλεγθεί, το αποτέλεσμα είναι μια κατασκευή παρόμοια με αυτήν που φαίνεται στην ιδανική κατασκευή του σχήματος 3.5. Τα υποστηριζόμενα από άνθρακα μόρια του καταλύτη ενώνονται στον ηλεκτρολύτη στο ένα μέρος και στο άλλο με τη στρώση που κάνει τον διασκορπισμό του αερίου (και την συλλογή του ηλεκτρικού ρεύματος, την απομάκρυνση του νερού και την μηχανική υποστήριξη). Το υδρόφοβο PTFE το οποίο είναι απαραίτητο για την

απομάκρυνση του νερού από τον καταλύτη δεν εμφανίζεται στο σχήμα, αλλά υπάρχει σχεδόν πάντα σε κάθε σχεδίαση.



Σχήμα 3.5: Η ιδανική και απλοποιημένη μορφή ενός ηλεκτροδίου από ένα PEM κελί καυσίμου.[14]

Δύο επίσης σημαντικά θέματα είναι τα εξής. Το πρώτο έχει να κάνει με το διαποτισμό του ηλεκτροδίου από το ηλεκτρολυτικό υλικό. Στο σχήμα 3.6 φαίνεται μεγενθυμένο ένα μέρος της περιοχής καταλύτη/ηλεκτροδίου. Είναι φανερό ότι το ηλεκτρολυτικό υλικό απλώνεται σε όλη την επιφάνεια του καταλύτη. Δεν σκεπάζει τον καταλύτη αλλά δημιουργεί μια απευθείας ένωση ανάμεσα στον καταλύτη και στον ηλεκτρολύτη. Αυτό αυξάνει την απόδοση του ΜΕΑ, με το να ενισχύει την επαφή τριών φάσεων μεταξύ του αντιδρώντος αερίου, του ηλεκτρολύτη και του καταλυτικού ηλεκτροδίου. Αυτή η λεπτή στρώση ηλεκτρολύτη πάνω στον καταλύτη επιτυγχάνεται με την τριβή μιας διαλυτοποιημένης μορφής του ηλεκτρολύτη στο ηλεκτρόδιο. Στην περίπτωση διακριτού ηλεκτροδίου, αυτό γίνεται προτού το ηλεκτρόδιο τοποθετηθεί στην μεμβράνη. Στην περίπτωση ολοκλήρωσης του ηλεκτροδίου στην μεμβράνη, αυτή η διαδικασία γίνεται πριν τοποθετηθεί η στρώση διασκορπισμού του αερίου.



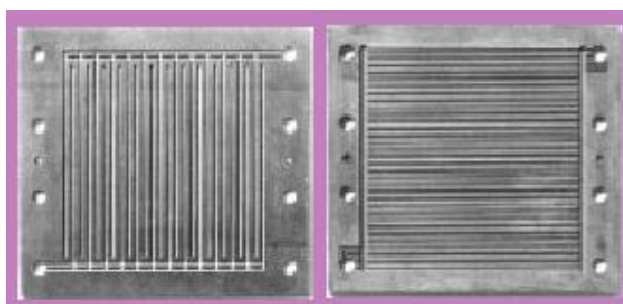
Σχήμα 3.6: Μεγέθυνση του σχήματος 3.5 που δείχνει ότι ο ηλεκτρολύτης φτάνει μέχρι τα μόρια του καταλύτη.[14]

Το δεύτερο σημαντικό σημείο αφορά την επιλογή της στρώσης διασκορπισμού του αερίου. Πιο πάνω φάνηκε ότι αυτή είναι γενικώς είτε ίνες άνθρακα είτε ύφασμα άνθρακα. Ίνες άνθρακα επιλέγονται όταν είναι απαραίτητο να σχεδιαστεί το κελί όσο το δυνατόν λεπτότερο. Το ύφασμα άνθρακα είναι παχύτερο και συνεπώς αυτό σημαίνει ότι θα απορροφά περισσότερο νερό και ότι απλοποιεί την μηχανική τοποθέτηση των διαφόρων μερών, αφού θα γεμίσουν οποιαδήποτε μικρά κενά και ανωμαλίες υπάρχουν πάνω στην διπολική πλάκα [14].

3.2.3 Ροή αερίων και συλλογή ρεύματος

Σε επαφή με τα στρώματα υποστήριξης βρίσκεται υλικό (υπό μορφή πλάκας) το οποίο έχει διττό ρόλο στη λειτουργία της κυψέλης. Κατά πρώτον, καθορίζει το πεδίο ροής (flow field) των αερίων και κατά δεύτερον συλλέγει το παραγόμενο ρεύμα. Το υλικό αυτό είναι ελαφρύ, σκληρό, ανθεκτικό σε διαβρωτικές ουσίες, μη διαπερατό από αέρια και αγωγίμο. Γραφίτης και μέταλλα χαρακτηρίζονται από αυτές τις ιδιότητες και είναι αυτά όπου συνήθως χρησιμοποιούνται.

Η πλάκες αυτές ορίζουν ένα πεδίο ροής στα εισερχόμενα αέρια. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια καναλιών (σχήμα 3.7, σχήμα 3.8) τα οποία βρίσκονται στη μία πλευρά της πλάκας με τέτοιο τρόπο ώστε το πεδίο να είναι ομοιογενές και να μεγιστοποιείται η απόδοση. Επίδραση στην απόδοση έχουν παράγοντες όπως το πλάτος και το βάθος των καναλιών αυτών.



Σχήμα 3.7: Ανοξειδωτες πλάκες που χρησιμοποιούνται ως περιοχές ροής/ συλλέκτες ρεύματος

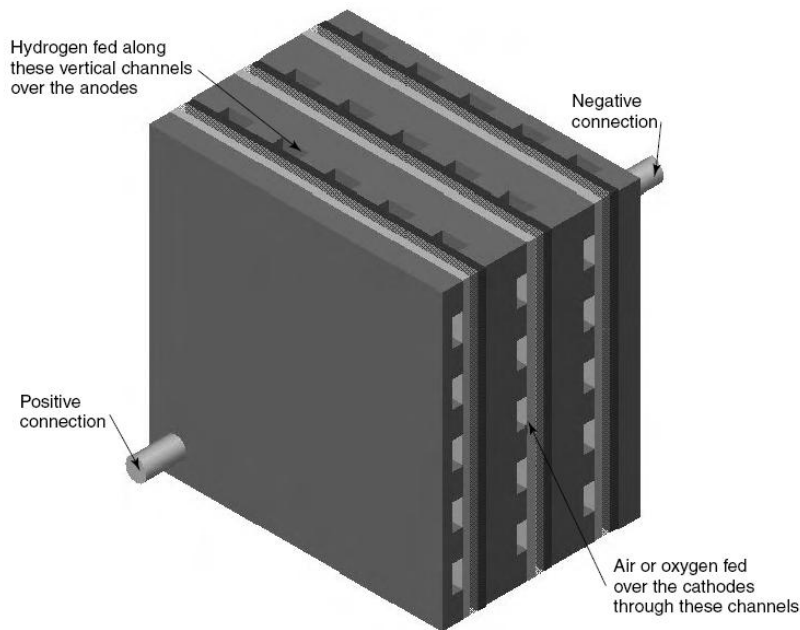


Σχήμα 3.8: Μεγέθυνση των καναλιών ροής του αερίου. Το ύψος, το πλάτος και η απόσταση μεταξύ των καναλιών είναι 0.8mm.

Δεύτερος σκοπός κάθε πλάκας είναι αυτός της συλλογής του παραγόμενου ρεύματος. Προκειμένου το ηλεκτρικό ρεύμα αυτό να διέλθει εκτός της κυψέλης μεταφέρεται από την άνοδο στο στρώμα υποστήριξης και στη συνέχεια στην πλάκα. Αυτή τροφοδοτεί το εξωτερικό κύκλωμα και στη συνέχεια το ρεύμα διέρχεται στην πλάκα της καθόδου.

3.2.4 Συστοιχία Κυψελών καυσίμου - Διπολικές πλάκες

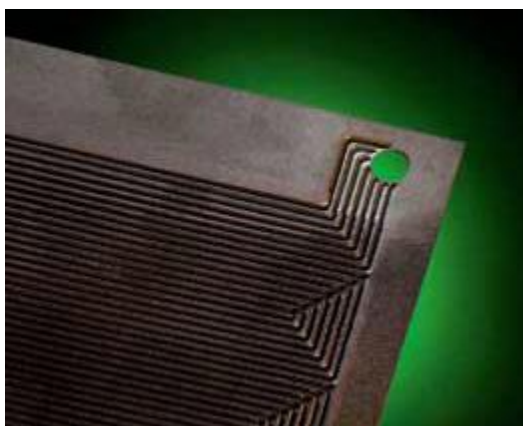
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η τάση στα άκρα μιας κυψέλης καυσίμου είναι περίπου 0,7 Volts. Για τη παραγωγή ωφέλιμης τάσης πολλά κελιά πρέπει να συνδεθούν σε σειρά, σχηματίζοντας μια συλλογή κελιών γνωστή ως “συστοιχία” (σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.9: Συστοιχία κυψελών καυσίμου

Αυτό θα μπορούσε να γίνει συνδέοντας την άκρη κάθε ανόδου με τη κάθοδο του επόμενου κελιού, οπότε τα ηλεκτρόνια θα πρέπει να οδεύσουν σε όλη την επιφάνεια του κάθε ηλεκτροδίου, προκειμένου να φθάσουν στο σημείο συλλογής τους. Αυτή η μέθοδος σύνδεσης σπάνια χρησιμοποιείται.

Η πιο κοινή μέθοδος διασύνδεσης είναι οι διπολικές πλάκες δηλαδή πλάκες που να έχουν και από τις δύο πλευρές τους χαραγμένα κανάλια (εξ' ου και το όνομα διπολική πλάκα) ώστε να υπάρχει πιο ομοιόμορφη κατανομή των αερίων στο στρώμα διάχυσης (σχήμα 3.10). Τέτοιες πλάκες επιτρέπουν συνδέσεις όλης της καθόδου του ενός κελιού και της ανόδου του επόμενου. Ταυτόχρονα οι διπολικές πλάκες επιτρέπουν τη τροφοδοσία του υδρογόνου με τη μορφή αερίου στην άνοδο και οξυγόνου στην κάθοδο, διατηρώντας τα δύο αέρια καλά διαχωρισμένα. Αυτός είναι ο λόγος που οι διπολικές πλάκες μερικές φορές αναφέρονται σαν πεδία ροής πλακών. Τα κανάλια αυτά μπορούν να έχουν, ανάλογα με την κατασκευή, διαφορετική διάρθρωση.

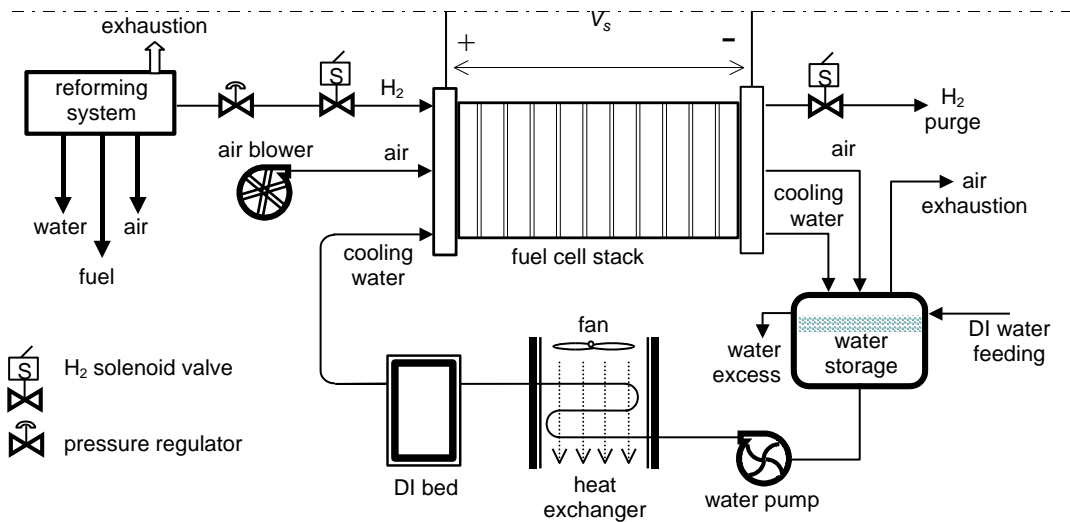


Σχήμα 3.10: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διπολικής πλάκας

Η βασική μορφή μιας διπολικής πλάκας είναι ένα επίπεδο κομμάτι, χαραγμένο με κανάλια τα οποία επιτρέπουν τη ροή των αερίων που αντιδρούν. Αυτά τα κανάλια θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο πλατιά, προκειμένου να μην εμποδίζουν τη ροή των αερίων. Από την άλλη όμως θα πρέπει να είναι όσο πιο στενά γίνεται για να επιτρέπουν τη μέγιστη επαφή με τα ηλεκτρόδια. Η διπολική πλάκα θα πρέπει να είναι όσο πιο λεπτή γίνεται για την ελαχιστοποίηση ηλεκτρικών αντιστάσεων και το περιορισμό του χώρου που λαμβάνει η συστοιχία κυψελών καυσίμου [8].

3.3 Ολοκληρωμένη μονάδα παραγωγής ενέργειας με κυψέλη καυσίμου PEM.

Ο πυρήνας της κυψέλης καυσίμου είναι μια στοίβα, η οποία αποτελείται από τα ηλεκτρόδια που αναφέρονται παραπάνω, τους ηλεκτρολύτες, τη μεμβράνη πρωτονίων και τις διπολικές πλάκες. Το πλήρες σύστημα της κυψέλης καυσίμου όμως περιλαμβάνει πολλά άλλα υποσυστήματα. Αυτά τα υποσυστήματα εξαρτώνται από τον τύπο της κυψέλης καυσίμου και αυτός είναι ο λόγος που καταλαμβάνουν πολύ περισσότερο χώρο απ' ό τι η ίδια η κυψέλη καυσίμου, ειδικά στη περίπτωση των εφαρμογών της Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ). Στο σχήμα 3.11 που ακολουθεί φαίνεται το ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής ενέργειας με κυψέλη PEM.



Σχήμα 3.11: Ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής ενέργειας με κυψέλη PEMFC

3.3.1 Περιφερειακά συστήματα της κυψέλης καυσίμου PEM

Τα περιφερειακά συστήματα σε μια κυψέλη καυσίμου τύπου PEM είναι:

- Ο συμπιεστής μαζί με συνοδευτικό κινητήρα
- Ο υγραντήρας
- Ο διαχωριστής νερού
- Ο εναλλάκτης θερμότητας
- Το σύστημα ελέγχου

Για τη ροή του συστήματος που εφοδιάζει την πλευρά της καθόδου της κυψέλης με αέρα, και συνεπώς με οξυγόνο, είναι αναγκαία η χρήση ενός συμπιεστή και του συνοδευτικού κινητήρα ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ροή και πίεση του αέρα. Ο ρυθμισμένος ως προς την πίεση αέρας στη συνέχεια ψύχεται, ώστε η θερμοκρασία εισόδου του στην κυψέλη να είναι σε επιθυμητά επίπεδα. Ο υγραντήρας έπειτα προσθέτει τον απαιτούμενο ατμό προς αποφυγήν αφυδάτωσης της μεμβράνης. Ο εξερχόμενος από την κάθοδο αέρας περιέχει επίσης ποσότητα νερού (προϊόν αντίδρασης) και στις εφαρμογές απαιτείται ένας διαχωριστής νερού ώστε το νερό να επαναχρησιμοποιηθεί για την ενυδάτωση του αέρα και του υδρογόνου.

Η άνοδος της συστοιχίας τροφοδοτείται από υδρογόνο που είναι αποθηκευμένο σε δεξαμενή υπό ρυθμισμένη πίεση. Χρησιμοποιείται βαλβίδα για να ελέγχεται η ροή του υδρογόνου και στη συνέχεια προστίθεται ατμός από τον υγραντήρα. Πέραν του

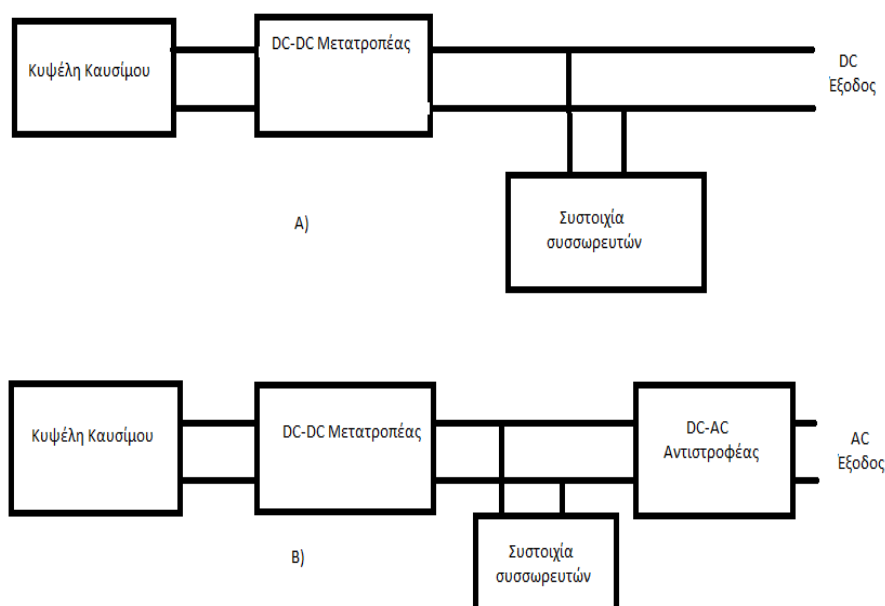
νερού, ως προϊόν της αντίδρασης, εκλύεται και θερμότητα. Η εκλυόμενη αυτή θερμότητα πρέπει να εξάγεται ώστε να διατηρείται η θερμοκρασία της κυψέλης κάτω από τους 100°C. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με αποϊονισμένο νερό που απάγει τη θερμότητα της κυψέλης και στη συνέχεια ψύχεται, είτε με κατάλληλο σχεδιασμό της κυψέλης που να επιτρέπει την εκ φύσεως απαγωγή της θερμότητας, είτε με ένα σύστημα ψύξης, αν και στις περισσότερες περιπτώσεις, η πλεονάζουσα θερμότητα θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την προθέρμανση του καυσίμου ή για να βοηθήσει την μικρή ποσότητα υδρογόνου που δεν καταναλώνεται και άρα απελευθερώνεται. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι ο ρυθμός ροής των αντιδρώντων όπως και η μερική πίεση τους, η εσωτερική θερμοκρασία της κυψέλης και το ποσοστό της υγρασίας της μεμβράνης είναι παράμετροι που πρέπει να ρυθμιστούν κατάλληλα. Η ρύθμιση αυτών των παραμέτρων εξασφαλίζει την καλή λειτουργία της κυψέλης είτε αυτή αναφέρεται στη γρήγορη απόκριση των δυναμικών μεταβολών του φορτίου, στις εκκινήσεις και στις διακοπές της λειτουργίας, είτε στην ανθεκτικότητα και στην ικανότητα προσαρμογής της. Πρέπει να τονισθεί το γεγονός ότι οι παράμετροι δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, η μεταβολή μίας παραμέτρου επηρεάζει και τις υπόλοιπες.

Στις εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, όπως είναι φυσικό παρουσιάζονται διαφορετικά επίπεδα φορτίου και ακαριαίες μεταβολές του φορτίου. Για να πραγματοποιηθεί η ομαλή και επιτυχημένη εμπορευματοποίηση των κυψελών καυσίμου σε τέτοιου είδους εφαρμογές απαραίτητη είναι η αντιμετώπιση τέτοιων φαινομένων με όσο το δυνατόν καλύτερο και αποδοτικότερο τρόπο. Για αυτόν το λόγο, κατά τη μεταβατική λειτουργία του συστήματος το σύστημα ελέγχου πρέπει να διατηρεί τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας (θερμοκρασία, υγρασία μεμβράνης, μερικές πιέσεις των αντιδρώντων), ώστε να αποφευχθεί μείωση της τάσεως και συνεπώς μείωση του βαθμού απόδοσης και της ανθεκτικότητας της συσκευής, [15].

3.3.2 Ηλεκτρονικά ισχύος και συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Η κυψέλη καυσίμου, σύμφωνα με την ανάλυση της προηγούμενης ενότητας, παράγει συνεχές ρεύμα και τάση. Συνεπώς, για τη σύνδεση της σε ένα φορτίο απαιτείται η παρεμβολή συστημάτων ηλεκτρονικών ισχύος. Συγκεκριμένα στην έξοδο της

κυψέλης συνδέεται ένας μετατροπέας ανύψωσης που σκοπεύει να αυξήσει και να σταθεροποιήσει τη συνεχή τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου στην επιθυμητή τιμή. Ανάλογα με την εφαρμογή, συνδέεται και ένας αντιστροφέας που μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη (DC/AC Converter). Για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, εκτός από τον κινητήρα που μετατρέπει την ηλεκτρική ισχύ σε μηχανική, πρέπει να προστεθούν και συσσωρευτές ώστε να προσφέρεται η απαιτούμενη ισχύς που παρουσιάζεται στις γρήγορες μεταβολές του φορτίου. Στο σχήμα 3.12 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα ενός συστήματος παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με κυψέλη καυσίμου για DC φορτία και AC φορτία.



Σχήμα 3.12: Δομικό διάγραμμα ενός συστήματος παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με κυψέλη καυσίμου για A) DC φορτία, B) AC φορτία, [9].

3.3.2.1 Μετατροπέας

Η τάση εξόδου της συστοιχίας των κυψελών, πρέπει να αυξηθεί και να σταθεροποιηθεί, ώστε να μπορέσει στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί στον αντιστροφέα. Για το λόγο αυτό γίνεται χρήση ενός μετατροπέα ανύψωσης. Ο μετατροπέας ανύψωσης (boost converter) είναι μια διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος, η

οποία λαμβάνει σαν είσοδο συνεχή τάση και δίνει στην έξοδό της επίσης συνεχή τάση. Έχουμε να κάνουμε δηλαδή με ένα dc-dc μετατροπέα. Ο μετατροπέας αυτός δίνει στην έξοδό του υψηλότερη τάση από αυτή της εισόδου. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται μια τυπική διάταξη μετατροπέα ανύψωσης [16].



Σχήμα 3.13: Μετατροπέας κυψέλης καυσίμου[17]

Το Q είναι ένας ημιαγωγικός διακόπτης, ο οποίος μπορεί να είναι ένας από τους τύπους ημιαγωγικών διακοπών που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρονική ισχύος, όπως MOSFET, IGBT, θυρίστορ κ.α.

Γενικά, οι dc-dc μετατροπείς χρησιμοποιούνται κυρίως στις εξής εφαρμογές [18] :

- Συστήματα ελέγχου κινητήρων συνεχούς ρεύματος.
- Συστήματα ηλεκτρικής τροφοδοσίας τηλεπικοινωνιών και διαστημικών συστημάτων.
- Παλμοτροφοδοτικά ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών κυκλωμάτων υψηλής συχνότητας και απόδοσης.

3.3.2.2 Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Ένα σημαντικό πρόβλημα είναι το γεγονός της μεγάλης χρονικής σταθεράς απόκρισης που παρουσιάζουν οι κυψέλες καυσίμου. Το πρόβλημα αυτό γίνεται εμφανές στις δυναμικές μεταβολές του συστήματος. Η μεγάλη χρονική σταθερά απόκρισης δημιουργεί δυσκολίες ελέγχου στις επόμενες βαθμίδες μετατροπής ισχύος και επομένως απαιτείται κάποιος τύπος συμπληρωματικής αποθήκευσης ενέργειας.

Χαρακτηριστικοί τύποι αποτελούν οι συσσωρευτές και οι υπερπυκνωτές (supercapacitors), συσκευές που μπορούν να αποθηκεύσουν ηλεκτρική ενέργεια.

Οι συσσωρευτές είναι κοινή επιλογή και μπορεί να είναι καλή αν χρησιμοποιηθεί μια συστοιχία συσσωρευτών χαμηλής τάσεως (π.χ. 96V). Αυτή η συστοιχία χαμηλής τάσεως, η οποία δεν απαιτεί σύστημα διαχείρισης συσσωρευτών μπορεί να τοποθετηθεί μετά από την έξοδο του μετατροπέα ανύψωσης.

Μία άλλη επιλογή θα ήταν η ενσωμάτωση υπερπυκνωτών που θα βελτίωναν τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος. Πυκνωτές αυτού του είδους έχουν τη δυνατότητα της άμεσης φόρτισης (10sec) και παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος. Μειονέκτημα τους είναι ότι απαιτούν τη διασύνδεση με έναν μετατροπέα, διότι από ένα σημείο και μετά της εκφόρτισης η τάση πέφτει σε ένα πολύ χαμηλό επίπεδο και επομένως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Με την ενσωμάτωση όμως ενός μετατροπέα μειώνεται ο βαθμός απόδοσης και παράλληλα αυξάνεται και το κόστος [19]. Σημειώνεται εδώ ότι σε κάποιες εφαρμογές χρησιμοποιούνται μπαταρίες (ή συσσωρευτές) μαζί με υπερπυκνωτές. Για παράδειγμα, στα οχήματα που λειτουργούν με κυψέλες υδρογόνου, οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται για να δώσουν ενέργεια όταν το φορτίο είναι χαμηλό, ενώ οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται για να δώσουν την απαιτούμενη ενέργεια κατά τις επιταχύνσεις και για να αποθηκεύσουν ενέργεια κατά τις επιβραδύνσεις. Ένα σημαντικό θέμα είναι το σημείο της τοποθέτησης των συσσωρευτών ή των υπερπυκνωτών. Οι επιλογές είναι δύο, είτε θα τοποθετηθούν στην είσοδο του μετατροπέα DC-DC ή στην έξοδό του. Αν τοποθετηθούν στην είσοδο του τότε χρειάζονται λιγότερα στοιχεία και επομένως το κόστος διατηρείται χαμηλό. Αυτό οφείλεται στη μειωμένη τάση που αναπτύσσεται σε αυτή την πλευρά. Στην περίπτωση όμως αυτή χρειάζεται ένας μετατροπέας, ο οποίος θα επιτρέπει την αμφίπλευρη μεταφορά ισχύος. Επιπλέον, θα πρέπει να έχει μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ. Αν τοποθετηθούν στην έξοδο, χρειάζεται αρκετά μεγάλος αριθμός στοιχείων, κάτι που αυξάνει το κόστος και εγείρει προβλήματα διαχείρισής τους, είτε πρόκειται για συσσωρευτές είτε για υπερπυκνωτές. Μια μέση λύση είναι η ανύψωση της τάσεως σε δύο στάδια, πρώτα δηλαδή στο μετατροπέα DC-DC κατά 2 ως 4 φορές, και μετά με μετασχηματιστή στην AC πλευρά του αντιστροφέα. Σε αυτή την περίπτωση οι υπερπυκνωτές ή οι συσσωρευτές μπορούν να συνδεόνται στην έξοδο

του μετατροπέα. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχουν αρκετά λίγα στοιχεία και το κόστος διατηρείται χαμηλό, [20].

3.3.2.3 Αντιστροφέας (inverter)

Ο αντιστροφέας έχει την ιδιότητα να μετατρέπει μία πηγή συνεχούς τάσεως ή ρεύματος σε εναλλασσόμενη μεταβλητού πλάτους και συχνότητας. Γενικά, οι κυριότεροι τομείς, στους οποίους βρίσκουν εφαρμογή οι αντιστροφείς είναι [16]:

- Συστήματα ελέγχου ταχύτητας εναλλασσόμενων ηλεκτρικών κινητήρων.
- Συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- Συστήματα ελέγχου τάσεως εξόδου αιολικών συστημάτων μετατροπής ενέργειας.
- Συστήματα ελέγχου θερμοκρασίας με επαγωγή
- Συστήματα ήπιων μορφών ενέργειας
- Συστήματα αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS)

Τύποι Αντιστροφέων

Υπάρχουν αντιστροφείς που μπορούν να δώσουν στην έξοδό τους μονοφασική ή τριφασική τάση. Στη εργασία αυτή θα μας απασχολήσουν οι μονοφασικοί αντιστροφείς, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιούν συνδεσμολογία γέφυρας (με τέσσερα ελεγχόμενα αγώγιμα στοιχεία) ή συνδεσμολογία ημιγέφυρας (με δύο ελεγχόμενα αγώγιμα στοιχεία) [21].



Σχήμα 3.14: Αντιστροφέας κυνέλης καυσίμου

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιούμε αντιστροφέα γέφυρας.

Τάση εξόδου αντιστροφέα

Ο αντιστροφέας γέφυρας στηρίζει τη λειτουργία του, στο ότι όταν άγουν οι κατάλληλοι διακόπτες, μπορεί να εφαρμόσει στα άκρα του φορτίου την τάση εισόδου κατά την ορθή ή την ανάστροφη φορά. Έτσι δημιουργείται εναλλασσόμενη τάση, με τη μορφή παλμών με πλάτος όσο η τιμή της τάσης εισόδου. Οι δίοδοι ελεύθερης διέλευσης επιτρέπουν τη ροή του ρεύματος που δημιουργείται από μη ωμικά φορτία, όταν οι διακόπτες δεν άγουν.

Για να έχουμε ένα μέτρο της ποιότητας της τάσης εξόδου, χρησιμοποιείται ο Συντελεστής Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (Total Harmonic Distortion Factor - THD). Ο συντελεστής αυτός ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

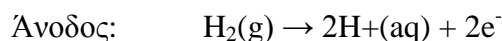
$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=3,5,\infty} (V_{o,n})^2}}{V_{o,1}} \quad (\text{Εξίσωση 3-1})$$

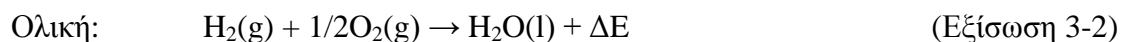
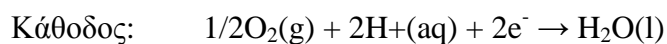
Όπου $V_{o,1}$ είναι το πλάτος της βασικής αρμονικής και $V_{o,n}$ είναι το πλάτος της n-οστής αρμονικής της τάσης εξόδου.

Όταν το THD είναι 0, τότε η έξοδος δεν έχει ανώτερες αρμονικές και είναι καθαρά ημιτονοειδής. Το κριτήριο που χρησιμοποιείται διεθνώς για να θεωρηθεί ανεκτή η μορφή της τάσης εξόδου, είναι το THD να μην υπερβαίνει το 5%. Όταν η τάση εξόδου πληρεί αυτό το κριτήριο, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς να δημιουργεί κανένα απολύτως πρόβλημα.

3.4 Θερμοδυναμική Προσέγγιση

Όπως έχει αναφερθεί και στην αρχή της ενότητας, στην κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων οι χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται είναι μία οξείδωση του υδρογόνου στην άνοδο και μία αναγωγή του οξυγόνου στην κάθοδο. Καθώς πραγματοποιούνται αυτές οι αντιδράσεις, το προϊόν που παράγεται είναι νερό με παράλληλη έκλυση θερμότητας.





Η κυψέλη καυσίμου μετατρέπει τη χημική ενέργεια των αερίων αντιδρώντων σε ηλεκτρική. Επομένως, για να αναλύσουμε τη λειτουργία μίας κυψέλης καυσίμου πρέπει να παρατηρήσουμε τα θερμοδυναμικά φαινόμενα που παρουσιάζονται. Η μελέτη των θερμοδυναμικών φαινομένων είναι αναγκαία διότι παρουσιάζει τη μεταβολή της ενέργειας από τη μία μορφή στην άλλη. Επίσης επιτρέπει τον θεωρητικό υπολογισμό της τάσεως που δημιουργείται σε μία κυψέλη και επιδεικνύει την εξάρτηση της από την πίεση των αντιδρώντων και τη θερμοκρασία λειτουργίας της. Η ανάλυση που θα ακολουθήσει παρουσιάζει τα σημαντικότερα σημεία της θεωρίας πάνω στην οποία στηρίζονται οι κυψέλες καυσίμου. Η ηλεκτροχημική μετατροπή της ενέργειας χαρακτηρίζει την άμεση μετατροπή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs, που συνοδεύει μία χημική αντίδραση, σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η ενέργεια Gibbs αποτελεί το μέγιστο μέτρο της ηλεκτρικής ενέργειας που ένα σύστημα υπό σταθερή θερμοκρασία και πίεση μπορεί να παράγει. Το ηλεκτρικό αυτό έργο W_{el} δίνεται από την αρνητική μεταβολή της ενέργειας Gibbs σύμφωνα με τη σχέση:

$$W_{el} = -\Delta G \quad (\text{Εξίσωση 3-3})$$

Η μεταβολή της ενθαλπίας της χημικής αντίδρασης (Εξίσωση 3-2) του υδρογόνου ισοδυναμεί με την εκλυόμενη θερμότητα και το παραγόμενο ηλεκτρικό έργο. Αυτό συμβαδίζει με το 2ο Θερμοδυναμικό νόμο που υποστηρίζει ότι ένα μέρος της ενθαλπίας δεν μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Συνεπώς για τον υπολογισμό της θεωρητικής τιμής της τάσεως γίνεται χρήση της ενέργειας Gibbs που ισοδυναμεί με τη μεταβολή της ενθαλπίας μειωμένη κατά το γινόμενο της επικρατούσας θερμοκρασίας μέσα στην κυψέλη επί τη μεταβολής της εντροπίας.

Η ελεύθερη ενέργεια Gibbs ΔG σύμφωνα με τα παραπάνω γράφεται:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (\text{Εξίσωση 3-4})$$

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ηλεκτρικό φορτίο Q συναρτήσει της τάσεως είναι:

$$W_{\text{elec}} = EQ \quad (\text{Εξίσωση 3-5})$$

Το ηλεκτρικό φορτίο σύμφωνα με το νόμο του Faraday είναι:

$$Q = nF \quad (\text{Εξίσωση 3-6})$$

όπου n είναι ο αριθμός των ηλεκτρικών μορίων που μεταφέρονται και F η σταθερά Faraday. Στην κυψέλη καυσίμου H₂/O₂ για ένα mol H₂ συμμετέχουν n=2mol ηλεκτρόνια. Αυτό σημαίνει ότι καθώς διασπάται ένα mol H₂, 2mol ηλεκτρονίων διαρρέουν το εξωτερικό κύκλωμα. Για τη συσχέτιση των ηλεκτρικών και θερμοδυναμικών μεγεθών χρησιμοποιούμε τις παρακάτω σταθερές:

e στοιχειώδες φορτίο $e=1,60218 \cdot 10^{-19}$ A.s

NA σταθερά Avogadro $NA=6,022 \cdot 10^{23}$

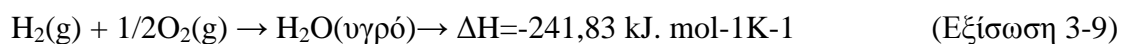
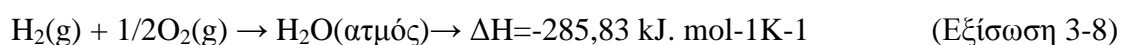
F σταθερά Faraday $F=e \cdot NA=96487$ Coulomb

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει:

$$\Delta G = -nFV_{\text{rev}} \Rightarrow V_{\text{rev}} = -\frac{\Delta G}{nF} = -\frac{\Delta H - T\Delta S}{nF} \quad (\text{Εξίσωση 3-7})$$

Όπου V_{rev} η θεωρητική τάση της κυψέλης (αποκαλείται και αντιστρέψιμη τάση).

Στην περίπτωση που το προϊόν της αντίδρασης του υδρογόνου με το οξυγόνο (νερό) βρίσκεται σε υγρή ή αέρια κατάσταση οι αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν για την ενθαλπία σχηματισμού είναι:



Η πρώτη ονομάζεται Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη (Lower Heating Value, LHV), ενώ η δεύτερη Υψηλότερη Θερμογόνος Δύναμη (Higher Heating Value, HHV). Έτσι για τον υπολογισμό της θεωρητικής τιμής της τάσεως θα πρέπει να αναφέρουμε αν η βάση είναι το HHV ή το LHV, [22].

Σύμφωνα με τα παραπάνω, στην περίπτωση που το παραγόμενο νερό βρίσκεται σε υγρή μορφή, η θεωρητική τιμή της τάσεως θα ισούται με:

$$V_{\text{rev}} = V_{\text{th}} = -\frac{\Delta G}{nF} = -1,229V \quad (\text{Εξίσωση 3-10})$$

ενώ στην περίπτωση που το παραγόμενο νερό βρίσκεται σε αέρια κατάσταση η θεωρητική τιμή της τάσεως θα είναι:

$$V_{\text{rev,g}} = V_{\text{th,g}} = -\frac{\Delta G}{nF} = -1,184V \quad (\text{Εξίσωση 3-11})$$

Η διαφορά των δύο τάσεων αντιπροσωπεύει τη λανθάνουσα θερμότητα του ατμοποιημένου νερού υπό κανονικές συνθήκες. Σε περίπτωση που όλη η ενέργεια της ενθαλπίας σχηματισμού ΔH μετατρέπονταν σε ηλεκτρική ενέργεια, η θεωρητική τιμή της τάσεως θα ισοδυναμούσε με:

$$V_{\text{th(HHV)}} = -\frac{\Delta H}{nF} = 1,48V \quad (\text{Εξίσωση 3-12})$$

$$V_{\text{th(LCV)}} = -\frac{\Delta H}{nF} = 1,25V \quad (\text{Εξίσωση 3-13})$$

Πίνακας 3.1: Θερμοδυναμικά στοιχεία της κυψέλης καυσίμου H₂/O₂

| Θερμοδυναμικά στοιχεία της κυψέλης καυσίμου H₂/O₂ | |
|--|--|
| n | 2 |
| ΔH | -285,83 KJ*mol ⁻¹ K ⁻¹ |
| ΔS | -163,34 KJ*mol ⁻¹ K ⁻¹ |
| ΔG | -237,18 KJ*mol ⁻¹ |
| ΔG_g | -228,59 KJ*mol ⁻¹ |
| V_{rev} | 1229mV |
| $V_{\text{rev,g}}$ | 1184mV |

3.4.1 Απόδοση Κυψέλης

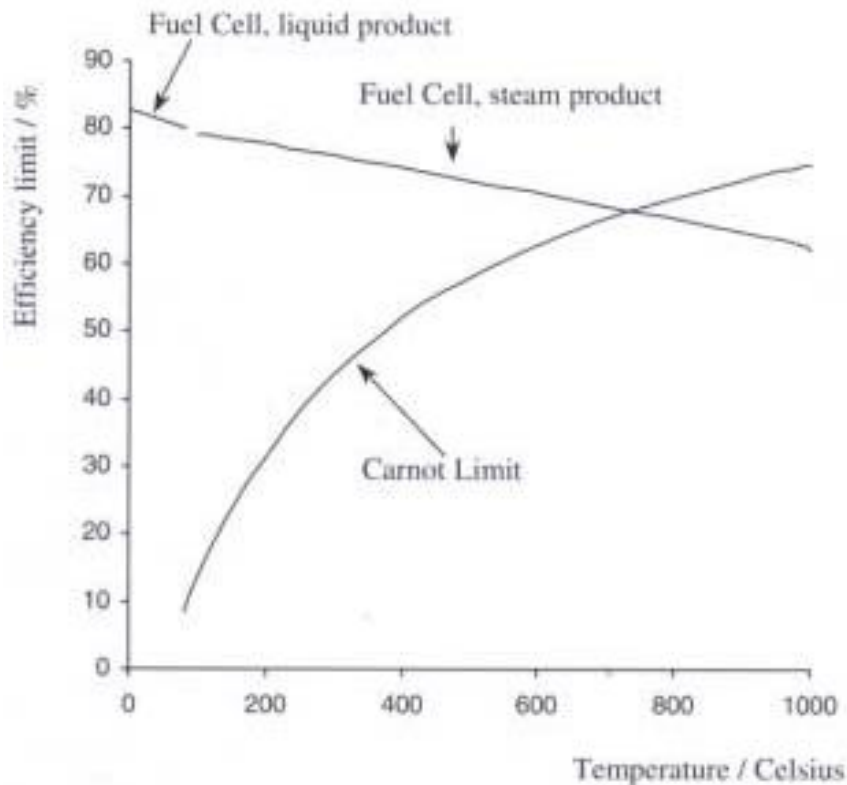
Όπως έχει αναφερθεί νωρίτερα, ο βαθμός απόδοσης των κυψελών καυσίμου αποτελεί ένα από τα πολλά πλεονεκτήματα τους συγκρινόμενα με τα κλασικά μηχανικά ή θερμικά συστήματα. Ο λόγος που παρουσιάζουν υψηλό βαθμό απόδοσης οφείλεται στο ότι οι αντιδράσεις μέσα σε μία κυψέλη καυσίμου θερμοκρασιακά δεν περιορίζονται από ανώτατα όρια, σε αντίθεση με μία ισοδύναμη θερμική μηχανή. Η απουσία αυτή των θερμοκρασιακών ορίων καθιστά τις κυψέλες καυσίμου ιδανικές διατάξεις για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων. Γενικά απόδοση ενός συστήματος ορίζεται ως η ενέργεια που παράγεται προς την ενέργεια που καταναλώνεται. Στην περίπτωση της κυψέλης καυσίμου, η παραγόμενη ενέργεια είναι ηλεκτρική ενέργεια και η ενέργεια που καταναλώνεται είναι η χημική ενέργεια του καυσίμου. Αυτή συνήθως εκφράζεται με την ελεύθερη ενέργεια Gibbs, έτσι η απόδοση εκφράζεται ως:

Παραγόμενη Ηλεκτρική ενέργεια / Ελεύθερη ενέργεια Gibbs

Αυτή όμως η θεώρηση δεν έχει χρησιμότητα διότι η τιμή της απόδοσης τείνει στη μονάδα, για οποιεσδήποτε συνθήκες, και επομένως αποκλίνει πολύ από την πραγματική τιμή της στην πράξη. Συνεπώς μία πιο αποδεκτή θεώρηση για τη μέγιστη απόδοση αποτελεί το πηλίκο της μεταβολής της ενέργειας Gibbs προς τη μεταβολή της ενθαλπίας σχηματισμού:

$$n_{th} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{\Delta H - T\Delta S}{\Delta H} = \frac{1 - T\Delta S}{\Delta H} \quad (\text{Εξίσωση 3-14})$$

Το επόμενο διάγραμμα δείχνει τον θεωρητικό βαθμό απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας, λαμβάνοντας υπόψη την υψηλότερη θερμογόνο δύναμη.



Διάγραμμα 3.1: Βαθμός απόδοσης κυψέλης, HHV [Larminie, 2000]

Η συσχέτιση της απόδοσης μίας κυψέλης καυσίμου με το δυναμικό που προκύπτει υπό σταθερό φορτίο υπολογίζεται λαμβάνοντας πάλι ως βάση το HHV ή το LHV, μέσω των εξισώσεων (3-12),(3-13). Επομένως, η απόδοση της κυψέλης μπορεί να δοθεί και από τους τύπους:

$$n_{th(LHV)} = V_{FC} / 1,48 \quad (\text{Εξίσωση 3-15})$$

$$n_{th(HHV)} = V_{FC} / 1,25 \quad (\text{Εξίσωση 3-16})$$

Στην πράξη έχει αποδειχθεί ότι δεν καταναλώνεται όλο το καύσιμο που διέρχεται από την κυψέλη, με αποτέλεσμα να εξέρχεται από αυτήν ποσότητα καυσίμου που δεν έχει αντιδράσει. Το πηλίκο της μάζας του υδρογόνου που αντιδρά προς εκείνο που εισέρχεται στην κυψέλη ονομάζεται συντελεστής χρησιμοποίησης. Αυτός ο λόγος είναι ισοδύναμος με το πηλίκο του ηλεκτρικού ρεύματος που διέρχεται μέσα από την κυψέλη καυσίμου προς αυτό που θα διερχόταν από αυτήν αν αντιδρούσε όλη η παρεχόμενη μάζα και συνεπώς ισχύει:

$$\mu_f = \frac{m_{H_2O}^{react}}{m_{H_2O}^{in}} = \frac{I_{m_{H_2O}^{react}}}{I_{m_{H_2O}^{in}}} \quad (\text{Εξίσωση 3-17})$$

Όπου $m_{H_2O}^{react}$ η μάζα του νερού που αντιδρά

$m_{H_2O}^{in}$ η μάζα του νερού που εισέρχεται στην κυψέλη

$I_{m_{H_2O}^{react}}$ το ηλεκτρικό ρεύμα που διέρχεται μέσα από την κυψέλη

$I_{m_{H_2O}^{in}}$ το ηλεκτρικό ρεύμα που θα διερχόταν από την κυψέλη αν αντιδρούσε όλη η παρεχόμενη μάζα

Η ροή του υδρογόνου που αντιδρά στην κυψέλη καυσίμου, σύμφωνα με την ηλεκτροχημική θεωρία, είναι ανάλογη του ρεύματος και ισχύει:

$$q_{H_2}^{react} = \frac{N_{cell} I}{2F} \quad (\text{Εξίσωση 3-18})$$

N_{cell} ο αριθμός των εν σειρά κυψελών που δημιουργούν μία συστοιχία

F η σταθερά Faraday

q η ροή καυσίμου

Επομένως ο συντελεστής χρησιμοποίησης ισούται με:

$$\mu_f = \frac{m_{H_2}^{react}}{m_{H_2}^{in}} = \frac{I_{m_{H_2}^{react}}}{I_{m_{H_2}^{in}}} = \frac{q_{H_2}^{react}}{q_{H_2}^{in}} \quad (\text{Εξίσωση 3-19})$$

Ο βαθμός απόδοσης, λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή χρησιμοποίησης μ_f μπορεί να γραφτεί ως:

$$n_{th(LHV)} = \mu_f \frac{V_{FC}}{1.25} \quad (\text{Εξίσωση 3-20})$$

Πίνακας 3.2 :Θεωρητικές τιμές της τάσεως και του βαθμού απόδοσης της κυψέλης καυσίμου H₂/O₂

| H ₂ O | Θερμοκρασία (°C) | ΔG (kJ* mol ⁻¹) | V _{rev} (V) | Βαθμός Απόδοσης (%) |
|------------------|---------------------|--------------------------------|----------------------|---------------------------|
| υγρό | 25 | -237,2 | 1,23 | 83 |
| υγρό | 80 | -228,2 | 1,18 | 80 |

| | | | | |
|-------|------|--------|------|----|
| αέριο | 100 | -225,2 | 1,17 | 79 |
| αέριο | 200 | -220,4 | 1,14 | 77 |
| αέριο | 400 | -210,3 | 1,09 | 74 |
| αέριο | 600 | -199,6 | 1,04 | 70 |
| αέριο | 800 | -188,6 | 0,98 | 66 |
| αέριο | 1000 | -177,4 | 0,92 | 62 |

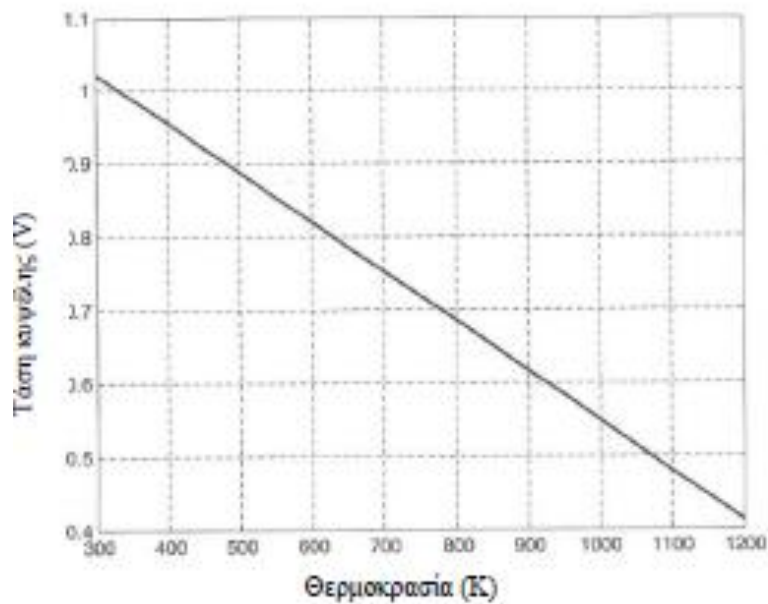
3.4.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την τάση

Η τάση της κυψέλης καυσίμου εξαρτάται από τη θερμοκρασία λειτουργίας και την πίεση των αντιδρώντων.

- **θερμοκρασία:**

Παραγωγίζοντας τη σχέση (Εξίσωση 3-7) ως προς τη θερμοκρασία, παρατηρούμε ότι μειώνεται η θεωρητική τιμή της τάσεως με την αύξηση της θερμοκρασίας.

$$\frac{\partial V}{\partial T} \Big|_p = -\frac{\partial}{\partial} \left(\frac{\Delta G}{nF} \right) \Rightarrow \frac{\partial V}{\partial T} \Big|_p = \frac{\partial}{\partial} \left(\frac{\Delta H - T\Delta S}{nF} \right) \Rightarrow \frac{\partial V}{\partial T} \Big|_p = \frac{\Delta S}{nF} = -0,8464 \frac{mV}{K} \quad (\text{Εξίσωση 3-21})$$



Διάγραμμα 3.2: Τάση Nernst συναρτήσει της θερμοκρασίας

- **πίεση:**

Η εξάρτηση από την πίεση αντικατοπτρίζεται από την εξίσωση Nernst:

$$E_{NERST} = V_{th} - \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{\frac{p_{H_2O}}{p_0}}{\frac{1}{\frac{p_{O_2}^2 p_{H_2}}{p_0 p_0}}} \right) \Rightarrow E = 1,229 + \frac{0,059V}{2} \log \left(\frac{p_{H_2} \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}} \right) \quad (\text{Εξίσωση 3-22})$$

Η παραπάνω εξίσωση απλουστεύεται, υποθέτοντας ιδανικά αέρια και κανονικές συνθήκες πίεσης ($p_0=1\text{atm}=1,01325\text{kPa}$). Σημειώνεται ότι σύμφωνα με την (Εξίσωση 3-22) οι μεταβλητές αντικατοπτρίζουν μερικές πιέσεις των αντίστοιχων στοιχείων. Επίσης γίνεται εμφανές ότι μία αύξηση της πίεσης των δύο αερίων από 1 σε 10 bar οδηγεί σε αύξηση της τάσεως από 1,229 σε 1,26 V

3.5 Ρυθμός Αντίδρασης Κυψελών Καυσίμου

Όπως και σε κάθε χημική αντίδραση, η αντίδραση του υδρογόνου στην άνοδο της κυψέλης καυσίμου απαιτεί μια συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας (ενέργεια ενεργοποίησης) προκειμένου να ξεκινήσει και στη συνέχεια προχωρά σε μια δεδομένη ταχύτητα αντίδρασης. Προκειμένου να μειωθεί η ενέργεια ενεργοποίησης και να αυξηθεί ο ρυθμός αντίδρασης μπορούν να ακολουθηθούν 3 προσεγγίσεις.

- Η χρήση καταλυτών
- Υψηλότερες θερμοκρασίες
- Μεγαλύτερη ενεργή επιφάνεια

Δεδομένου ότι οι αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, το τελευταίο από τα προηγούμενα τρία σημεία είναι πολύ σημαντικό. Η περιοχή του ηλεκτροδίου είναι τόσο ζωτικής σημασίας ώστε η απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου

αναφέρεται με τον όρο «πυκνότητα ρεύματος». Η ωφέλιμη επιφάνεια των κυψελών καυσίμου αυξάνεται χάρη στο γεγονός ότι τα ηλεκτρόδια έχουν μια μικροδομή που τους δίνει 2- ή 3- τάξεις μεγέθους μεγαλύτερης επιφάνειας σε σχέση με την επίπεδη περιοχή τους.

3.6 Διάχυση των αερίων στα ηλεκτρόδια

Για τον υπολογισμό της τάσεως μίας κυψέλης καυσίμου υδρογόνου από την εξίσωση (3-22) απαιτείται η γνώση των μερικών πιέσεων του οξυγόνου και του υδρογόνου. Στη συνέχεια παρουσιάζεται τρόπος υπολογισμού των μερικών πιέσεων. Στην περίπτωση των αερίων που διαχέονται δια μέσου της πλάκας διάχυσης, το φαινόμενο μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση Stefan-Maxwell:

$$\nabla_{X_i} = \frac{RT}{P} \sum_{j=1}^N \frac{x_i N_j - x_j N_i}{D_{i,j}} \quad (\text{Εξίσωση 3-23})$$

- όπου N : μοριακός ρυθμός (molar flux)
 x : μοριακό κλάσμα (mole fraction)
 D_{i,j}: ο συντελεστής διάχυσης μάζας (mass diffusivity)

3.7 Μηχανισμοί που προκαλούν πτώση τάσεως

Στην πράξη η θεωρητική τιμή της τάσεως που υπολογίζεται από τη σχέση (3-22) δεν προσεγγίζεται ακόμη και στην περίπτωση του ανοικτού κυκλώματος. Η τάση ανοικτού κυκλώματος E_{OCV} στην περίπτωση της κυψέλης καυσίμου PEM είναι κατά 0,2V χαμηλότερη από τη θεωρητική. Η διαφορά αυτή ονομάζεται τάση πόλωσης ηρεμίας και συμβολίζεται με E₀. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην πεπερασμένη ηλεκτρική αντίσταση του ηλεκτρολύτη για τα ηλεκτρόνια (δημιουργώντας ένα ρεύμα διαρροής και συνεπώς ένα εσωτερικό βραχυκύκλωμα) και στη διάχυση του καυσίμου δια μέσου του ηλεκτρολύτη προκαλώντας πτώση των μερικών πιέσεων [4], [5].

Καθώς συνδέεται φορτίο στο εξωτερικό κύκλωμα που ενώνεται με τα δύο ηλεκτρόδια, ρεύμα ρέει από την άνοδο στην κάθοδο, όσο διάστημα θα υπάρχει

ποσότητα υδρογόνου και οξυγόνου που θα αντιδρά. Η διαδικασία αυτή επιφέρει πτώση στην τάση της κυψέλης, η οποία οφείλεται στους εξής τρεις παράγοντες:

- Απώλειες ενεργοποίησης (Activation Loss)
- Ωμικές απώλειες (Ohmic Loss)
- Μείωση στη συγκέντρωση των αντιδρώντων (Concentration Loss)

3.7.1 Πυκνότητα ρεύματος και ισχύος

Πριν αναλυθούν οι μηχανισμοί που προκαλούν μείωση της τάσεως της κυψέλης καυσίμου, σκόπιμο είναι να ορισθούν οι έννοιες πυκνότητα ρεύματος και ισχύος. Η διαφορά δυναμικού που δημιουργείται μεταξύ των ηλεκτροδίων μίας κυψέλης προκαλεί, όπως είναι φυσικό, τη δημιουργία κάποιου ρεύματος I . Το ρεύμα αυτό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες από τους βασικότερους των οποίων είναι η αποτελεσματικότητα του καταλύτη. Πολλές φορές επιδιώκεται η σύγκριση διαφορετικών κυψελών καυσίμου κατασκευασμένα από ηλεκτρόδια με διαφορετική ενεργή επιφάνεια. Για το λόγο αυτό ορίζεται η πυκνότητα ρεύματος j ως το πηλίκο του ρεύματος I προς την ενεργή επιφάνεια A_{cell} του ηλεκτροδίου της κυψέλης από όπου διέρχεται και συνεπώς ισχύει:

$$j = \frac{I}{A_{cell}} \quad (\text{Εξίσωση 3-24})$$

Επίσης εκτός από την έννοια της ισχύος που αποτελεί το γινόμενο της τάσεως επί το ρεύμα, μία άλλη πολύ χρήσιμη έννοια που συναντάται συχνά είναι αυτή της πυκνότητας ισχύος που μετράται σε W/m^2 και που, όπως και η πυκνότητα ρεύματος, χρησιμοποιείται για τη σύγκριση κυψελών καυσίμου διαφορετικών διαστάσεων [23]. Η πυκνότητα ισχύος δίνεται από τη σχέση:

$$P_{density} = jV \quad (\text{Εξίσωση 3-25})$$

3.7.2 Απώλειες ενεργοποίησης

Οι απώλειες ενεργοποίησης προκύπτουν από την ενέργεια που καταναλώνεται για τη διάσπαση και ένωση χημικών δεσμών στην άνοδο και στην κάθοδο της κυψέλης καυσίμου. Ένα μέρος της διαθέσιμης ενέργειας χάνεται ώστε να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες χημικές αντιδράσεις που θα μεταφέρουν τα ηλεκτρόνια. Οι απώλειες ενεργοποίησης συμβαίνουν, σύμφωνα με τα παραπάνω, όχι μόνο στην άνοδο αλλά και στην κάθοδο [24]. Οι αντίδραση της οξείδωσης του υδρογόνου στην άνοδο είναι πολύ γρήγορη, ενώ η αναγωγή του οξυγόνου στην κάθοδο ολοκληρώνεται με πολύ αργούς ρυθμούς [25].

Ο υπολογισμός των απωλειών ενεργοποίησης στηρίζεται στη θεωρία της ηλεκτροχημικής κινητικής [24], [25]. Η εξίσωση που συσχετίζει την πυκνότητα ρεύματος, με την τάση ενεργοποίησης είναι η εξίσωση Butler-Volmer:

$$j = j_0 \left(\exp \left(\frac{a \cdot F \cdot n \cdot v_{act}}{RT} \right) - \exp \left(- \frac{(1-a) \cdot F \cdot n \cdot v_{act}}{RT} \right) \right) \quad (\text{Εξίσωση 3-26})$$

όπου j είναι η πυκνότητα ρεύματος της κυψέλης και ισούται με τη διαφορά των ρευμάτων που δημιουργούνται στην οξείδωση (άνοδο) και στην αναγωγή (κάθοδο). Συνεπώς θα ισχύει:

$$j = j_{ox} - j_{red} \quad (\text{Εξίσωση 3-27})$$

όπου j_0 είναι η πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής (current exchange density). Στην περίπτωση της θερμοδυναμικής ισορροπίας ισχύει $j_{ox} = j_{red} = j_0$. Όμως ακόμη και στην θέση αυτή που το ρεύμα της κυψέλης είναι μηδενικό, οι αντιδράσεις της οξείδωσης και της αναγωγής πραγματοποιούνται με ρυθμό που αντικατοπτρίζεται από την πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής j_0

n ο αριθμός των ηλεκτρονίων που μεταφέρονται ανά αντίδραση

a ο συντελεστής μεταφοράς (coefficient transfer) [24].

Από την (3-26) μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η αύξηση του ρεύματος της κυψέλης καυσίμου επιφέρει μεγάλη πτώση της τάσεως V_{act} .

$$V_{act} = (RT/aF) * \ln(j/j_0)$$

3.7.3 Ωμικές απώλειες

Οι ωμικές απώλειες προκαλούνται από τη μεταφορά των αγώγιμων φορτίων μέσα στην κυψέλη. Τα φορτισμένα σωματίδια που είτε είναι ηλεκτρόνια είτε κατιόντα υδρογόνου (H^+), συνεισφέρουν στην πτώση τάσεως της κυψέλης. Οι απώλειες λόγω της μεταφοράς των ηλεκτρονίων οφείλονται κυρίως στις μη ιδανικές συνδέσεις των διαφόρων στρωμάτων (στρώμα υποστήριξης, διπολικών πλακών), [26]. Η μεγαλύτερη ωμική απώλεια οφείλεται στα κατιόντα υδρογόνου που διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη, τη μεμβράνη. Αυτό οφείλεται στη χαμηλή αγωγιμότητα που εμφανίζεται στον ηλεκτρολύτη (και επομένως στη μεγάλη αντίσταση) σε αντίθεση με τα διάφορα άλλα μεταλλικά στρώματα. Οι τάξεις μεγέθους των αγωγιμοτήτων φαίνεται από τον πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Αγωγιμότητες εξαρτημάτων κυψέλης καυσίμου

| | Υλικό | Αγωγιμότητα | Εξάρτημα κυψέλης |
|-------------------|--------------|----------------------|--|
| Αγωγή ηλεκτρονίων | Μέταλλα | 10^3 έως 10^7 | Διπολικές πλάκες, στρώμα διάχυσης αερίων, τελικές πλάκες |
| | Ημιαγωγοί | 10^{-3} έως 10^4 | Διπολικές πλάκες, τελικές πλάκες |
| Αγωγή ιόντων | Ηλεκτρολύτης | 10^{-1} έως 10^3 | PEMFC Nafion ηλεκτρολύτης |

Οι ωμικές απώλειες συνεπώς γράφονται:

$$V_{OHMIC} = jA_{cell}R_{ohmic} = jA_{cell} \sum R \approx jA_{cell}(R_{elec} + R_{ionic}) \quad (\text{Εξίσωση 3-28})$$

Αν υποθεθεί ότι ο όρος της αντίστασης που αναφέρεται στην αγωγιμότητα των κατιόντων υπερτερεί, τότε η απώλεια της τάσεως οφειλόμενη στην ωμική αντίσταση γράφεται:

$$V_{OHMIC} \approx jA_{cell}R_{ionic} = jA_{cell} \left(\frac{L_{mem}}{\sigma_{mem}A_{cell}} \right) \Rightarrow v_{ohmic} = j \frac{L_{mem}}{\sigma_{mem}} \quad (\text{Εξίσωση 3-29})$$

Από την παραπάνω εξίσωση μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η ωμική απώλεια είναι ανάλογη του πάχους του ηλεκτρολύτη και αντιστρόφως ανάλογη της ιοντικής αγωγής. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η ιοντική αγωγή της μεμβράνης εξαρτάται από την ποσότητα του νερού που περιέχει [5], [24]. Η μείωση του πάχους της μεμβράνης, όπως φαίνεται και από την εξίσωση (3-29), θα μπορούσε να μειώσει τις ωμικές απώλειες. Αυτό όμως θα είχε δυσμενείς συνέπειες για όλη την κυψέλη, [4], [24]. Λόγω των περιορισμών αυτών το πάχος των μεμβρανών, σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα, δεν μπορεί να μειωθεί περαιτέρω των 10-100μm.

3.7.4 Μείωση στη συγκέντρωση των αντιδρώντων

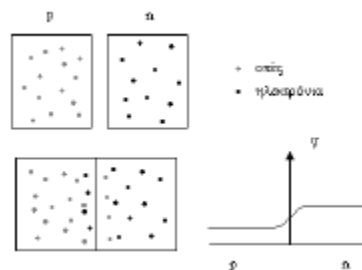
Η πτώση τάσεως λόγω μείωσης της συγκέντρωσης των αντιδρώντων εμφανίζεται σε όλο το φάσμα της πυκνότητας ρεύματος, όμως σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος γίνεται πολύ πιο αισθητή. Οι χημικές αντιδράσεις πραγματοποιούνται στην περιοχή ακριβώς μεταξύ μεμβράνης και ηλεκτροδίου. Το υδρογόνο, όπως και το οξυγόνο, πρέπει μέσω της διαδικασίας της διάχυσης να βρεθεί στο συγκεκριμένο αυτό σημείο. Στην κυψέλη καυσίμου όμως το υδρογόνο και το οξυγόνο διέρχονται μέσα από το στρώμα διάχυσης των αερίων (gas diffusion layer). Όταν δεν υπάρχει φορτίο, συνεπώς ούτε και ρεύμα, η συγκέντρωση των αντιδρώντων είναι ίδια με αυτή που εμφανίζεται και στην περιοχή του συλλέκτη (flow field pattern). Όταν όμως ρέει ρεύμα, η διάχυση των στοιχείων στην περιοχή που πραγματοποιούνται οι χημικές αντιδράσεις επιβραδύνεται και εμποδίζεται από τη ροή του ρεύματος. Το πρόβλημα αυτό είναι ακόμη πιο έντονο στην κάθοδο, όπου το οξυγόνο συναντά αντίσταση που οφείλεται στην παραγόμενη ποσότητα του νερού που κλείνει τις λεπτές διαδρομές του στρώματος διάχυσης. Η μαθηματική έκφραση της απώλειας είναι η ακόλουθη:

$$V_{CONC} = -B \ln \left(1 - \frac{j}{j_l} \right) = -\frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{j}{j_l} \right) \quad (\text{Εξίσωση 3-30})$$

όπου j_j το ρεύμα κατά το οποίο το καύσιμο καταναλώνεται με ρυθμό ίσο με τη μέγιστη ροή ανεφοδιασμού του.

3.8 Φαινόμενο ηλεκτρικής διπλοστιβάδας (charge double layer)

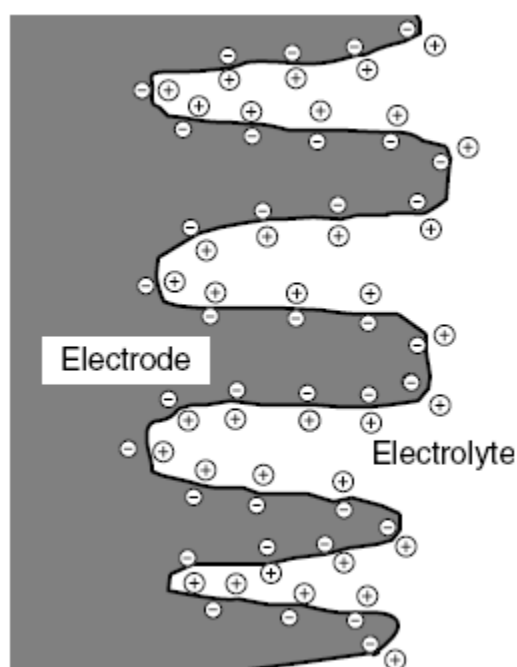
Το φαινόμενο της ηλεκτρικής διπλοστιβάδας προκύπτει καθώς δύο διαφορετικά υλικά έρχονται σε επαφή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η δίοδος επαφής p-n. Καθώς έρχονται σε επαφή τα δύο αυτά υλικά παρουσιάζεται διάχυση των οπών από τη μία πλευρά στην άλλη και ροή των ηλεκτρονίων από την αντίθετη πλευρά (σχήμα 3.7). Από την παραπάνω ροή των φορτίων δημιουργείται μία επιφάνεια, ένα στρώμα διπλής στρώσης αρνητικού και θετικού φορτίου, γεγονός που δημιουργεί μία διαφορά δυναμικού στην περιοχή μετάβασης των δύο περιοχών [7]. Στη θέση ισορροπίας, η διαφορά δυναμικού αποτρέπει τη ροή άλλων φορτίων. Αυτό το φαινόμενο χαρακτηρίζει τη δυναμική συμπεριφορά ημιαγωγών και παρουσιάζει μη γραμμική συμπεριφορά.



Σχήμα 3.15: Φαινόμενου διπλού στρώματος σε ένωση p-n.

Το φαινόμενο του διπλού στρώματος παρουσιάζεται και στα ηλεκτροχημικά συστήματα, στην επιφάνεια επαφής του ηλεκτροδίου και του ηλεκτρολύτη. Στη μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων συγκεντρώνονται στην επιφάνεια της καθόδου τα ηλεκτρόνια, που προέρχονται από το εξωτερικό κύκλωμα, και τα ιόντα H^+ , που έχουν διαπεράσει τον ηλεκτρολύτη (σχήμα 3.16). Η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων και των κατιόντων σε αυτή την περιοχή έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό δύο στρωμάτων αντίθετης πολικότητας (διπλό ηλεκτροχημικό στρώμα) που αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια και συνεπώς συμπεριφέρονται σαν πυκνωτές. Η διαφορά δυναμικού που

επάγεται ταυτίζεται με την πτώση τάσεως ενεργοποίησης V_{ACT} . Το ηλεκτροχημικό αυτό φαινόμενο επιδρά, όπως θα δούμε παρακάτω, στη δυναμική συμπεριφορά της κυψέλης, προκαλώντας μία χρονική καθυστέρηση. Η μοντελοποίηση του στο αντίστοιχο ηλεκτρικό ισοδύναμο της κυψέλης επιτυγχάνεται με έναν πυκνωτή. Στο σχήμα 3.16 απεικονίζεται το φαινόμενο αυτό:



Σχήμα 3.16: Φόρτιση διπλού στρώματος στην επιφάνεια της καθόδου μιας κυψέλης καυσίμου

3.9 Χαρακτηριστική τάση ρεύματος της κυψέλης

Όπως είδαμε στην ενότητα 3.7 η χαρακτηριστική της κυψέλης καυσίμου χωρίζεται σε τρεις περιοχές. Στις χαμηλές πυκνότητες ρεύματος επικρατούν οι απώλειες ενεργοποίησης που οδηγούν σε απότομη πτώση της τάσεως. Στη δεύτερη περιοχή, που περιλαμβάνει τις πυκνότητες ρεύματος μεταξύ 150-600 mA/cm², επικρατούν οι ωμικές απώλειες και το γραμμικό τμήμα των απωλειών ενεργοποίησης. Σε αυτήν την περιοχή παρατηρείται γραμμική πτώση της τάσεως και χαρακτηρίζει την περιοχή λειτουργίας της κυψέλης. Στην τρίτη περιοχή (από 600 mA/cm² και πάνω) παρουσιάζονται και οι απώλειες συγκέντρωσης. Αυτές οι μη γραμμικές απώλειες προκαλούν ραγδαία πτώση της τάσεως καθώς προσεγγίζεται το όριο της πυκνότητας ρεύματος. Το όριο αυτό της πυκνότητας ρεύματος (j_L) παρουσιάζει και το ρεύμα βραχυκύκλωσης της κυψέλης [27]. Πρέπει να σημειωθεί και να τονιστεί το γεγονός

ότι και οι τρεις μηχανισμοί απωλειών λειτουργούν ταυτόχρονα σε όλο το φάσμα της πυκνότητας ρεύματος της κυψέλης. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω μπορεί να σχεδιαστεί η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος της κυψέλης (polarization curve). Συνεπώς, η τάση της κυψέλης θα ισούται με:

$$V_{PEM} = V_{th} - E_0 - V_{act} - V_{ohmic} - V_{conc} \Rightarrow$$

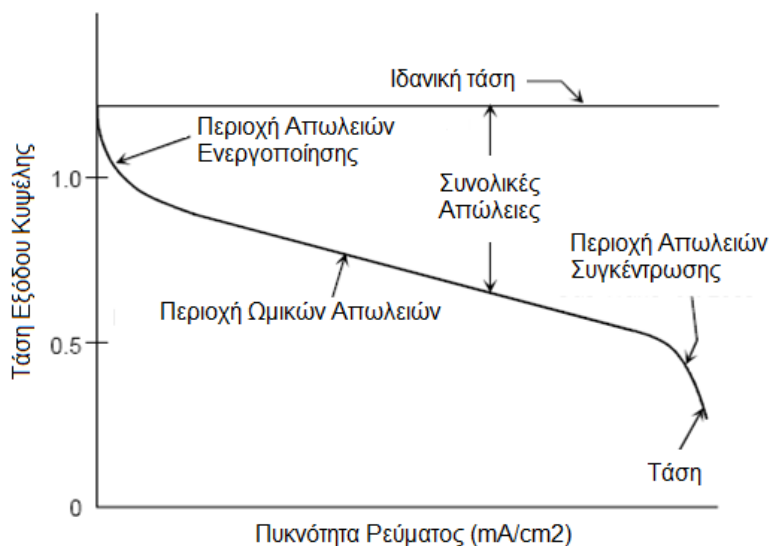
$$V_{PEM} = E_{OCV} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{conc} \Rightarrow$$

$$V_{PEM} = E_{OCV} - \frac{RT}{\alpha F} \ln \left(\frac{j}{j_0} \right) - jR_{ohmic} - \frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{j}{j_L} \right) \quad (\text{Εξίσωση 3-31})$$

Στη βιβλιογραφία, η τάση της κυψέλης καυσίμου συνήθως παρουσιάζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση Nernst:

$$V_{PEM} = E_{NERST} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{conc} \quad (\text{Εξίσωση 3-32})$$

Στο διάγραμμα 3.3 παρουσιάζεται μία χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος για μία μεμονωμένη κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Παράλληλα αποτυπώνονται και οι μηχανισμοί που προκαλούν πτώση τάσεως καθώς και το φάσμα στο οποίο παρουσιάζονται.



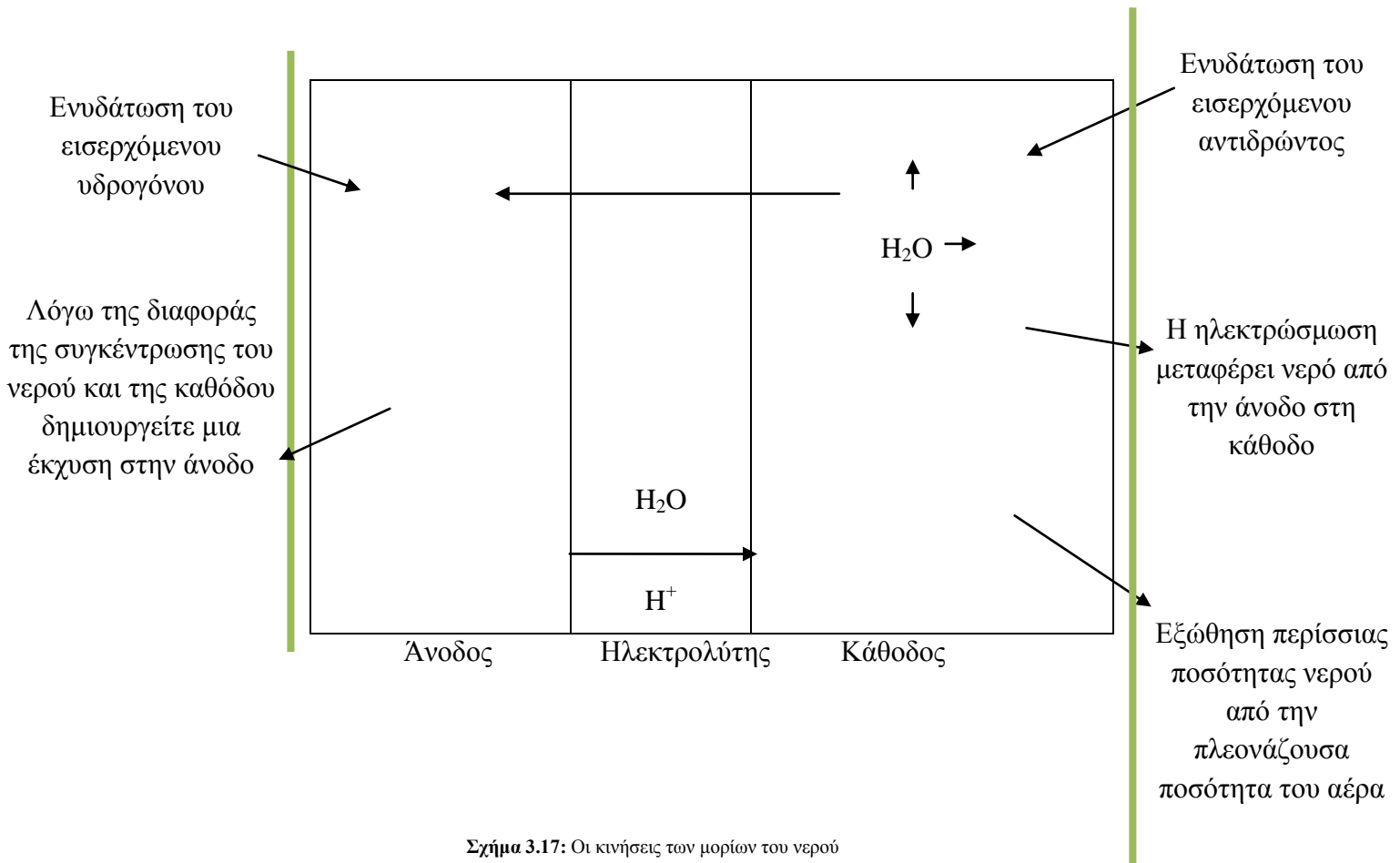
Διάγραμμα 3.3: V-I Χαρακτηριστική μιας κυψέλης καυσίμου.

3.10 Διαχείριση νερού

Από την περιγραφή που δόθηκε στο κεφάλαιο 3.2.1 για τη δομή της μεμβράνης γίνεται εμφανής η αναγκαιότητα της επαρκούς ποσότητας νερού στην πολυμερή μεμβράνη της κυψέλης καυσίμου. Η αγωγιμότητα των ιόντων του υδρογόνου στη μεμβράνη είναι συνεπώς ανάλογη της περιεκτικότητας της σε νερό, ωστόσο η υπερβολική ποσότητα του νερού οδηγεί σε δυσμενή αποτελέσματα, προκαλώντας πλημμύρισμα στα ηλεκτρόδια και στην πλάκα διάχυσης των αερίων. Αυτό με τη σειρά οδηγεί στην απενεργοποίηση των ενεργών περιοχών του καταλύτη που είναι υπεύθυνες για την ηλεκτροχημική μετατροπή και επομένως στη μείωση της αποδοτικότητας της κυψέλης. Συνεπώς γίνεται αναγκαία η μελέτη της διαχείρισης του νερού μέσα στην κυψέλη ώστε μία αντιστάθμιση των φαινομένων να οδηγήσει στη βέλτιστη κατάσταση λειτουργίας [15].

Πέραν από την εξάρτηση της αγωγιμότητας της μεμβράνης από την ποσότητα του νερού, άμεση είναι και η εξάρτηση της κινητικότητας των αερίων μέσα στη μεμβράνη από αυτήν. Όπως έχει επισημανθεί και στην ενότητα που περιέγραφε την αρχή λειτουργίας της κυψέλης, το προϊόν της αντίδρασης του υδρογόνου και του οξυγόνου, είναι το νερό που παράγεται στην κάθοδο της κυψέλης. Στην ιδανική περίπτωση θα επαρκούσε αυτό το παραγόμενο νερό για την ενυδάτωση του ηλεκτρολύτη και των ηλεκτροδίων ενώ το πλεονάζον νερό θα εξωθούνταν με τη βοήθεια του νερού που θα εισέρχονταν. Η αύξηση της συγκέντρωσης του νερού στην κάθοδο (στην ουσία πρόκειται για τη διαφορά της συγκέντρωσης μεταξύ καθόδου και ανόδου) δημιουργεί μία έκχυση νερού προς την πλευρά της ανόδου. Σε αυτήν τη ροή του νερού αντιτίθεται το ηλεκτροωσμωτικό φαινόμενο. Σε περίπτωση λεπτής μεμβράνης μπορεί να αποφευχθεί η εξωτερική ενυδάτωση του υδρογόνου. Ενώ εάν η ποσότητα του υδρογόνου που εισέρχεται είναι πολύ μεγάλη, οδηγούμαστε στην αφυδάτωση της πλευράς της ανόδου διότι η έκχυση του νερού από την κάθοδο δεν επαρκεί για να αντισταθμίσει την ποσότητα του νερού που εξωθείται λόγω της πλεονάζουσας ποσότητας του υδρογόνου στην άνοδο. Για αυτούς τους λόγους μια βέλτιστη σχεδίαση της πλάκας διάχυσης των αερίων είναι απαραίτητη, όπως και μία σωστά σχεδιασμένη πλάκα ροής, ώστε να επιτυγχάνεται η σωστή λειτουργία σε χαμηλές και υψηλές πυκνότητες ρεύματος. Πρέπει να σημειωθεί και το γεγονός ότι η διαχείριση

του νερού και επομένως η αντίσταση της μεμβράνης επηρεάζεται από τον τρόπο της ενυδάτωσης της καθόδου, είτε αυτός είναι εξωτερικός, μέσω ενυδάτωσης του εισερχόμενου οξυγόνου ή αέρα, είτε εσωτερικός, μέσω του παραγόμενου νερού. Στο σχήμα 3.17 παρουσιάζονται οι κινήσεις των μορίων του νερού [4].



Σχήμα 3.17: Οι κινήσεις των μορίων του νερού

4. ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Η μοντελοποίηση της κυψέλης καυσίμου βοηθά στη καλύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών λειτουργίας της, την αξιολόγηση της απόδοσής της και κατ' επέκταση στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας της. Επιπλέον ένα τέτοιο μοντέλο δίνει τη δυνατότητα καλύτερης εφαρμογής της κυψέλης καυσίμου με μοντέλα ηλεκτρονικών ισχύος, κινητήρων και συστημάτων ελέγχου για τη μελέτη ολοκληρωμένων συστημάτων σταθερών εφαρμογών και εφαρμογών ηλεκτροκίνησης. Η μοντελοποίηση της κυψέλης συνίσταται στη σωστή προσομοίωση της μόνιμης κατάστασης και ιδιαίτερα τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης τάσης – ρεύματος, καθώς και της μεταβατικής της συμπεριφοράς.

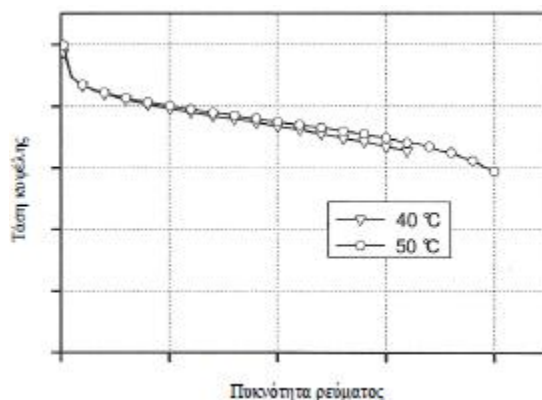
Στο κεφάλαιο 3 έγινε η ανάλυση όλων των ηλεκτροχημικών φαινομένων που πραγματοποιούνται μέσα στη κυψέλη καυσίμου και παρουσιάστηκε η ενδεικτική χαρακτηριστική καμπύλη τάσης ρεύματός της (Κεφ. 3.9). Όμως η χαρακτηριστική αυτή καμπύλη αναφέρεται στη περίπτωση που η κυψέλη βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση, αμελώντας τη μεταβατική κατάσταση που παρουσιάζεται καθώς μεταβάλλεται το φορτίο. Παρακάτω γίνεται ανάλυση της συμπεριφοράς της κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων τόσο στη σταθερή κατάσταση όσο και στη μεταβατική, το διάστημα που απαιτείται για να αποκτήσει τη μόνιμη τιμή της, ενώ στη συνέχεια εξετάζονται τα θεωρητικά μοντέλα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και προσομοιώνουν τη λειτουργία τους. Παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά τους, οι παραδοχές και οι παράμετροι λειτουργίας τους καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους.

Μόνιμη κατάσταση

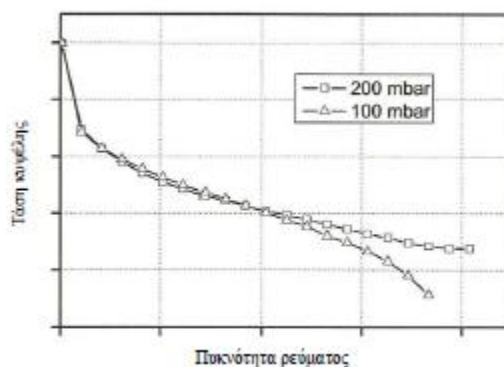
Η τάση της κυψέλης εξαρτάται κυρίως από την πυκνότητα ρεύματος και επηρεάζεται από το σύνολο των απωλειών που λαμβάνουν χώρα μέσα σε μια κυψέλη καυσίμου όπως αποδεικνύεται από την εξίσωση (3-45). Όμως εκτός από την πυκνότητα, η τάση εξαρτάται και άμεσα από την πίεση και τη θερμοκρασία, όπως απεικονίζεται στις χαρακτηριστικές των διαγραμμάτων 4.1 και 4.2.

Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης η χαρακτηριστική βρίσκεται υψηλότερα από την προηγούμενη κατάσταση λειτουργίας και συνεπώς οι απώλειες είναι μικρότερες (διάγραμμα 4.1). Η αντίσταση της μεμβράνης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, γεγονός που ευνοεί τη λειτουργία της κυψέλης σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Παρ' όλα αυτά σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να παρουσιαστεί το πρόβλημα της μείωσης της υγρασίας της μεμβράνης, το οποίο με τη σειρά οδηγεί στην αύξηση της αντίστασης της μεμβράνης και επομένως στην αύξηση της πτώσης τάσεως. Το φαινόμενο αυτό περιορίζεται καθώς ενυδατώνεται το οξυγόνο ή ο αέρας που εισέρχεται από την πλευρά της καθόδου. Σε μια συστοιχία κυψελών καυσίμου με καλό σχεδιασμένο σύστημα ενυδάτωσης η αντίσταση της μεμβράνης μειώνεται κατά κανόνα καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία λειτουργίας.

Στο διάγραμμα 4.2 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική για διαφορετικές συνθήκες πιέσεων. Όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα με την αύξηση της λειτουργικής πίεσης επιτυγχάνεται μερικώς καλύτερη λειτουργία της κυψέλης. Αυτό οφείλεται στην καλύτερη μεταφορά των αερίων στα ηλεκτρόδια.



Διάγραμμα 4.1: Χαρακτηριστική καμπύλη σε διαφορετικές θερμοκρασιακές λειτουργίες



Διάγραμμα 4.2: Χαρακτηριστική καμπύλη σε διαφορετικές λειτουργικές πιέσεις

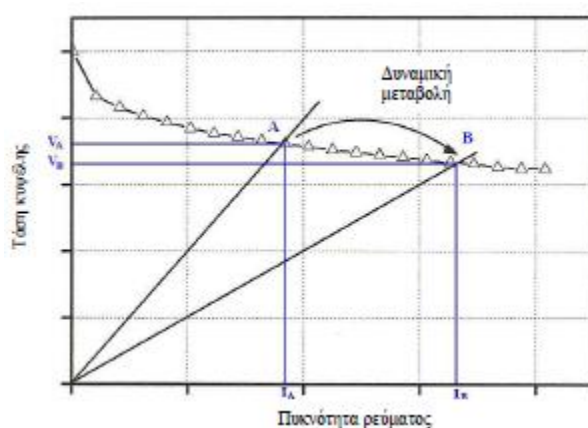
Δυναμική απόκριση (dynamic response)

Σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, όπου οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων πρωταγωνιστούν λόγω της χαμηλής θερμοκρασιακής λειτουργίας τους, η ισχύς μεταβάλλεται ραγδαία και συνεπώς η δυναμική συμπεριφορά της κυψέλης πρέπει να μελετηθεί με λεπτομέρεια. Η ακαριαία μεταβολή της απαιτούμενης ισχύος φορτίου πρέπει να συνοδεύεται από ταυτόσημη μεταβολή της ισχύος τροφοδοσίας όπως είναι φυσικό. Εκτός από την τροφοδοτούμενη ισχύ που προσφέρει η κυψέλη και τη δυναμική συμπεριφορά που επιδεικνύει και θα μελετηθεί παρακάτω, σε ένα σύστημα αποτελούμενο από κυψέλες καυσίμου πρέπει να υπάρχουν επιμέρους πηγές ισχύος. Χαρακτηριστικές πηγές ισχύος αποτελούν οι πυκνωτές και οι συσσωρευτές. Η ενσωμάτωση τέτοιων πηγών έχει ως σκοπό την εύρυθμη προσαρμογή ακραίων μεταβολών του φορτίου που μπορούν να οδηγήσουν σε δυσλειτουργία της κυψέλης ή ακόμα και σε διακοπή της λειτουργίας του συστήματος στη χειρότερη περίπτωση. Αυτή η κατάσταση λειτουργίας δεν είναι επικίνδυνη μόνο για την κυψέλη καυσίμου αλλά και για τα βοηθητικά συστήματα, διότι σε περίπτωση μη αποδοτικής αντιστάθμισης της διαφοράς της απαιτούμενης ισχύος, τα ηλεκτρονικά στοιχεία που συνοδεύουν το σύστημα μπορούν να καταστραφούν. Συνεπώς είναι πρωταρχική ανάγκη να μελετηθούν τα μεταβατικά φαινόμενα που συνοδεύονται από τη δυναμική συμπεριφορά της κυψέλης καυσίμου.

Η χαρακτηριστική τάση-ρεύματος έχει ένα μεγάλο μειονέκτημα, δεν απεικονίζει τη δυναμική συμπεριφορά της κυψέλης με τις μεταβολές του φορτίου παρά μόνο με

καθυστέρηση. Η μεταβατική αυτή απόκριση που παρουσιάζεται με τη μεταβολή του φορτίου στην κυψέλη καυσίμου κυμαίνεται μεταξύ μερικών έως και δεκάδων δευτερολέπτων.

Όπως αναφέρθηκε, η δυναμική συμπεριφορά μίας κυψέλης καυσίμου χαρακτηρίζεται από τη μεταβολή του φορτίου και συνεπώς από τη μεταβολή του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει την κυψέλη. Η μεταβολή του φορτίου έχει ως συνέπεια τη μετάθεση του σημείου λειτουργίας που απεικονίζεται δια μέσου της χαρακτηριστικής τάσεως ρεύματος της κυψέλης. Το διάγραμμα 4.3 αναπαριστά τη μεταβολή του σημείου λειτουργίας (από το σημείο A στο σημείο B) πάνω στη χαρακτηριστική καμπύλη, που οφείλεται στη μεταβολή του φορτίου. Συγκεκριμένα καθώς μεταβάλλεται το φορτίο (μείωση του φορτίου) παρατηρείται αύξηση του ρεύματος της κυψέλης και ταυτόχρονη μείωση της τάσεως.



Διάγραμμα 4.3: Δυναμική μεταβολή του σημείου λειτουργίας

Η δυναμική απόκριση της κυψέλης εξαρτάται όχι μόνο από το φαινόμενο της διπλοστιβάδας που παρουσιάζεται στα δύο ηλεκτρόδια αλλά και από το ισοζύγιο των μαζών των στοιχείων που αντιδρούν στο εσωτερικό της κυψέλης. Στη μόνιμη κατάσταση που απεικονίζεται μέσω της χαρακτηριστικής V-I, οι μερικές πιέσεις των αντιδρώντων (υδρογόνου και οξυγόνου) είναι σταθερές. Καθώς μεταβάλλεται το φορτίο ρεύματος το ισοζύγιο των μαζών των στοιχείων μεταβάλλεται αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει διότι το ηλεκτρικό ρεύμα είναι ανάλογο της ροής εισόδου των αερίων και στη μόνιμη κατάσταση ισχύει:

$$m_{H_2}^{react} = 2m_{O_2}^{react} = \frac{I}{2F} \quad (\text{Εξίσωση 4.1})$$

Όπου F η σταθερά Faraday

$m_{H_2}^{react}$ η μάζα του υδρογόνου που αντέδρασε

$m_{O_2}^{react}$ η μάζα του οξυγόνου που αντέδρασε

Το υδρογόνο διαχέεται μέσω των καναλιών διάχυσης των αερίων στην άνοδο και συνεπώς στην ενεργή περιοχή της αντίδρασης. Καθώς πραγματοποιείται η ηλεκτροχημική αντίδραση τα πρωτόνια εισέρχονται στη μεμβράνη. Η μεταφορά των πρωτονίων αυτών στη μεμβράνη συσχετίζεται άμεσα με την περιεκτικότητα της σε νερό. Από την άλλη πλευρά, στην άνοδο το οξυγόνο ή ο αέρας διαχέεται στην ενεργή επιφάνεια της καθόδου και αντιδρά με τα πρωτόνια. Όταν αυξάνεται ή μειώνεται η πυκνότητα ισχύος ακαριαία η συγκέντρωση των πρωτονίων υπόκειται σε αύξηση ή μείωση αντίστοιχα. Συνεπώς για την επίτευξη της μεταβολής της συγκέντρωσης των πρωτονίων στη μεμβράνη απαιτείται και αντίστοιχη μεταβολή των ροών των αερίων. Η μεταβολή των ροών των αερίων, σύμφωνα με την καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων, επηρεάζει με τη σειρά τη μερική πίεση των αερίων μέσα στην κυψέλη:

$$\frac{V_A}{RT} * \frac{dp_{H_2}^{partial}}{dt} = m_{H_2} - \frac{I}{2F} \quad (\text{Εξίσωση 4.2})$$

Όπου $dp_{H_2}^{partial}$ η μερική πίεση του υδρογόνου

dt η μερική πίεση των αερίων μέσα στην κυψέλη

$$\frac{V_A}{RT} * \frac{dp_{O_2}^{partial}}{dt} = m_{O_2} - \frac{I}{4F} \quad (\text{Εξίσωση 4.3})$$

Όπου $dp_{O_2}^{partial}$ η μερική πίεση του οξυγόνου

Στη μόνιμη κατάσταση, οι μερικές πιέσεις των αερίων είναι σταθερές και επομένως η σχέση (4.4) οδηγεί στη (4.1)

$$\frac{dp_{H_2}^{partial}}{dt} = \frac{dp_{O_2}^{partial}}{dt} = 0 \quad (\text{Εξίσωση 4.4})$$

Συνεπώς η δυναμική συμπεριφορά της κυψέλης παρουσιάζει καθυστέρηση μεταξύ ρεύματος και ροής αερίων ή ισοδύναμα μερικών πιέσεων, η οποία δίνεται από τους τύπους, [28]:

$$\tau_A \frac{dm_{H_2}}{dt} = \frac{I}{2F} - m_{H_2} \quad (\text{Εξίσωση 4.5})$$

$$\tau_K \frac{dm_{O_2}}{dt} = \frac{I}{4F} - m_{O_2} \quad (\text{Εξίσωση 4.6})$$

Τα θεωρητικά μοντέλα που αναλύονται παρακάτω ανάλογα με τη λειτουργία της μοντελοποίησης μπορούν να χωριστούν σε :

- Μοντέλα μόνιμης κατάστασης: Μοντέλο Njoya – Tremblay – Dessaint Απλή μορφή, Μοντέλο Buasri – Slameh, Μοντέλο Famouri – S.Gemmen, Μοντέλο Brunetto – Moschetto – Tina
- Μοντέλα δυναμικής κατάστασης: Μοντέλο Njoya – Tremblay – Dessaint λεπτομερής μορφή, Μοντέλο Lazarou – Pyrgioti, Μοντέλο Yeramalla – Davari, Μοντέλο Ju – Juvarajan

Σημειώνεται ότι τα μοντέλα που προσομοιώνουν τη δυναμική συμπεριφορά της κυψέλης δίνουν αποτελέσματα και για τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Πρέπει να αναφερθεί ότι όλα τα μοντέλα βασίζονται στον τύπο 3.46.

4.1 Μοντέλο Njoya – Tremblay – Dessaint (απλή μορφή)

Το μοντέλο Njoya – Tremblay – Dessaint (απλή μορφή) υπολογίζει την τάση εξόδου της κυψέλης λαμβάνοντας υπόψη την τάση ανοιχτού κυκλώματος και τις ωμικές απώλειες [29].

Χαρακτηριστικά μοντέλου

- Βασίζεται σε δεδομένα που λαμβάνονται από τεχνικά φυλλάδια του κατασκευαστή της κυψέλης.
- Προσομοιώνει γενικά κυψέλες καυσίμου που λειτουργούν με καύσιμο καθαρό υδρογόνο και ατμοσφαιρικό αέρα.
- Προτείνονται δύο μορφές, η απλή και η λεπτομερής. Η απλή μορφή προσομοιώνει τη λειτουργία σε σταθερή κατάσταση (steady – state) με σταθερές, ονομαστικές τιμές θερμοκρασίας και πίεσης. Η λεπτομερής μορφή αποτελεί εξέλιξη της απλής μορφής. Μελετάται η επιρροή του ρεύματος της κυψέλης από παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, οι πιέσεις, οι ροές και η στοιχειομετρία των αερίων καθώς και η μεταβολή που προκαλούν οι παράμετροι αυτές στις απώλειες ενεργοποίησης και την τάση ανοιχτού κυκλώματος.
- Υλοποιείται με χρήση της βιβλιοθήκης SimPowerSystems του περιβάλλοντος Simulink.
- Η λειτουργία και η απόδοση του μοντέλου αξιολογείται μέσω της προσομοίωσης ενός Fuel Cell Backup Power System (FCBPS).

Παραδοχές

- Τα αέρια H₂ και O₂ συμπεριφέρονται ως ιδανικά αέρια
- Στην άνοδο και στην κάθοδο η θερμοκρασία είναι σταθερή
- Επαρκής και κατάλληλη ποσότητα υγρασίας σε κάθε φορτίο
- Αμελητέες πτώσεις πίεσης
- Η ροή αερίων στη μεμβράνη είναι σταθερή

Για την απλή μορφή έχουμε:

Η γενική μορφή της εξίσωσης για την τάση εξόδου της κυψέλης δίνεται από την:

$$V_{fc} = E - R_{ohm} * i_{fc} \quad (\text{Εξίσωση 4.7})$$

Όπου V_{fc} η τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου

E η ενέργεια της κυψέλης καυσίμου

R_{ohm} η ωμική αντίσταση

i_{fc} η πυκνότητα ρεύματος της κυψέλης καυσίμου

Τα πλεονεκτήματα του μοντέλου είναι [29]:

- Υπάρχει διαθέσιμο το λεπτομερές μοντέλο στη βιβλιοθήκη SymPowerSystems του Simulink ως Fuel Cell Stack.
- Η μοντελοποίηση βασίζεται σε πίνακες κατασκευαστών άρα αντιπροσωπεύει εμπορικά μοντέλα.
- Συνδυάζει στοιχεία χημικών και ηλεκτρικών μοντέλων.
- Δίνει τη δυνατότητα ελέγχου πολλών διαφορετικών παραμέτρων (πίεση, θερμοκρασία, σύσταση αερίων και ρυθμοί ροής καυσίμου/αέρα)

Τα μειονεκτήματα του μοντέλου είναι [29]:

- Δεν προσομοιώνει τις απώλειες συγκέντρωσης
- Το επίπεδο ακρίβειας της μοντελοποίησης εξαρτάται από το πόσο λεπτομερή είναι τα στοιχεία που δίνονται από το κατασκευαστή.
- Το μοντέλο θεωρεί σταθερή αντίσταση μεμβράνης γεγονός που οδηγεί σε ύπαρξη σφάλματος στην ωμική περιοχή της τάσης. Το σφάλμα αυξάνεται με αύξηση της πίεσης και μείωση της θερμοκρασίας.

4.2 Μοντέλο Buasri- Salameh

Το μοντέλο Buasri- Salameh υπολογίζει τις απώλειες που προκαλούν πτώση υπολογίζοντας τις απώλειες ενεργοποίησης, τις ωμικές απώλειες, τις απώλειες συγκέντρωσης καθώς και του φαινομένου Charge Double Layer [30].

Χαρακτηριστικά μοντέλου

- Λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα των απωλειών ενεργοποίησης, συγκέντρωσης, των ωμικών απωλειών καθώς και του φαινομένου Charge Double Layer. Εξετάζει τις γραμμικές αλλά και τις μη γραμμικές επιδράσεις των απωλειών που προκαλούν πτώση τάσης.
- Αποτελεί ηλεκτρικό ισοδύναμο με χρήση απλών ηλεκτρικών στοιχείων.
- Χρησιμοποιείται για προσομοίωση της συμπεριφοράς της κυψέλης σε αλλαγές φορτίου.

- Υλοποιείται στο πρόγραμμα Matlab. Συγκρίνεται με πειραματικές μετρήσεις σε πραγματική κυψέλη καυσίμου.

Παραδοχές

- Η θερμοκρασία και η πίεση λειτουργίας είναι σταθερές
- Η κατανομή και η ροή των αερίων είναι ομοιόμορφη
- Οι απώλειες λόγω εσωτερικών ρευμάτων, λόγω θερμότητας και αφυδάτωσης της μεμβράνης δεν λαμβάνονται υπόψη.

Περιγραφή

Οι απώλειες ενεργοποίησης προσομοιώνονται με χρήση της διόδου λόγω της ομοιότητας της χαρακτηριστικής της με την εξίσωση Tafel. Η μη γραμμική χαρακτηριστική εξίσωση της διόδου δίνεται από το τύπο:

$$V_D = \frac{NkT}{q} \ln \left(\frac{I_D}{I_S} \right) \quad (\text{Εξίσωση 4.8})$$

Όπου N είναι ο συντελεστής εκπομπής της διόδου, I_D το ρεύμα διέλευσης, I_S το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού, k = σταθερά του boltzmann (138×10^{-23} j/k) και q το φορτίο του ηλεκτρονίου ($1,6 \times 10^{-19}$ Cb)

Οι ωμικές και οι απώλειες συγκέντρωσης προσομοιώνονται με τη χρήση των αντιστάσεων R_{ohm} και R_{con} αντίστοιχα. Η πρώτη θεωρείται σταθερή και λαμβάνει μια προσεγγιστική, σύμφωνα με τα δεδομένα του κατασκευαστή, τιμή. Η δεύτερη υπολογίζεται από τον τύπο:

$$R_{con} = \frac{E_{con}}{I_{fc}} = K_1 e^{K_2 I_{fc}} \quad (\text{Εξίσωση 4.9})$$

Οι διάφορες παράμετροι που εισάγονται στις εξισώσεις υπολογίζονται με βάση τα στοιχεία του κατασκευαστή της πραγματικής κυψέλης καυσίμου [30].

Τα πλεονεκτήματα του μοντέλου είναι [30]:

- Διακρίνεται για την απλότητά του.
- Έχει δοκιμαστεί σε δυο διαφορετικά είδη λειτουργιών.

Τα μειονεκτήματα του μοντέλου είναι [30]:

- Είναι περίπλοκος ο υπολογισμός των απωλειών συγκέντρωσης αφού εισάγονται δύο σταθερές K_1 και K_2 οι οποίες υπολογίζονται πειραματικά.

4.3 Μοντέλο Famouri – S.Gemmen

Το μοντέλο Famouri – S.Gemmen εξετάζει το φαινόμενο απωλειών μέσα σε μια κυψέλη καυσίμου υπολογίζοντας τις απώλειες ενεργοποίησης και τις απώλειες συγκέντρωσης [31].

Χαρακτηριστικά μοντέλου

- Λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές των παροχών, τις μερικές πιέσεις των αντιδρώντων και τους μηχανισμούς απωλειών, βασιζόμενο στις ηλεκτροχημικές εξισώσεις και στις εξισώσεις διατήρησης της ροής.
- Δυναμικό μοντέλο το οποίο περιλαμβάνει το φαινόμενο Charge Double Layer.
- Εξετάζει τη συμπεριφορά της κυψέλης σε διαφορετικές συνθήκες παροχής του καυσίμου και του αέρα. Επίσης λαμβάνει τη λειτουργία των υγραντήρων καυσίμου και αέρα. Με αυτό τον τρόπο εξετάζεται η συμπεριφορά του μοντέλου στις αλλαγές του φορτίου μέσα από τις αλλαγές στο ρυθμό παροχής των αντιδρώντων στη κυψέλη.
- Υλοποιείται σε περιβάλλον προσομοίωσης PSpice.

Παραδοχές

- Η θερμοκρασία και η πίεση λειτουργίας είναι σταθερές και ομοιόμορφες.
- Η ροή των αερίων είναι ομαλή.
- Στη θερμοκρασία της κυψέλης τα εισερχόμενα αέρια θεωρούνται κορεσμένα.
- Στα κανάλια παροχής αγνοούνται φαινόμενα συμπύκνωσης.

Περιγραφή

Για το συγκεκριμένο μοντέλο έχουμε:

$$f_1(I) = \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right) \quad (\text{Εξίσωση 4.10})$$

Που αντιπροσωπεύει τον παράγοντα Nernst

$$f_2(I) = -\frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (\text{Εξίσωση 4.11})$$

Που αντιπροσωπεύει τις απώλειες ενεργοποίησης

$$f_3(I) = \frac{RT}{2F} \ln \left(1 - \frac{I}{I_{max}} \right) \quad (\text{Εξίσωση 4.12})$$

Που αντιπροσωπεύει τις απώλειες συγκέντρωσης [31]

Τα πλεονεκτήματα του μοντέλου είναι [31]:

- Αποτελεί αναλυτικό μοντέλο το οποίο συνδυάζει στοιχεία ηλεκτρικών και μη ηλεκτρικών μοντέλων. Διαφέρει από τα υπόλοιπα καθώς περιλαμβάνει τόσο τη λειτουργία των υγραντήρων του καυσίμου και του αέρα όσο και τις παροχές των αντιδρώντων.
- Χρήσιμο για τη περίπτωση όπου στη μοντελοποίηση ενσωματώνονται και άλλα ηλεκτρικά στοιχεία όπως μετατροπείς ισχύος, δημιουργώντας ένα ολοκληρωμένο κυκλωματικό περιβάλλον προσομοίωσης.
- Προσομοιώνει λειτουργία σε διαφορετικές συνθήκες παροχής καυσίμου.

Τα μειονεκτήματα του μοντέλου είναι [31]:

- Δεν έχει αξιολογηθεί σε σύγκριση με κάποιο εμπορικό μοντέλο κυψέλης καυσίμου.
- Εξετάζει τη λειτουργία της κυψέλης μόνο με εξαγωγή της χαρακτηριστικής $V - I$.

4.4 Μοντέλο Yu – Yuvarajan

Το μοντέλο Yu – Yuvarajan εξετάζει το φαινόμενο απωλειών μέσα σε μια κυψέλη καυσίμου υπολογίζοντας τις απώλειες ενεργοποίησης και τις απώλειες συγκέντρωσης, τις ωμικές απώλειες καθώς και το Charge Double Layer [32].

Χαρακτηριστικά μοντέλου

- Εξετάζει τόσο τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας όσο και τη δυναμική συμπεριφορά της κυψέλης.
- Λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα των απωλειών ενεργοποίησης, συγκέντρωσης και τις ωμικές απώλειες, καθώς και το Charge Double Layer.
- Οι απώλειες συγκέντρωσης (mass transport losses) μοντελοποιούνται με δυο διπολικά τρανζίστορ BJT. Επίσης, λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της απότομης πτώσης της τάσης κατά τη σύνδεση πλήρους φορτίου (undershoot).
- Υλοποιείται στο PSpice

Παραδοχές

- Οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας λειτουργίας είναι σταθερές

Περιγραφή

Οι απώλειες ενεργοποίησης προσομοιώνονται με χρήση μια ημιαγωγικής διόδου της οποίας η χαρακτηριστική εξίσωση είναι παρόμοια με την εξίσωση Tafel που περιγράφει το μηχανισμό των απωλειών ενεργοποίησης:

$$V_D = n * V_T * \ln \left(\frac{I_D}{I_S} \right) \text{ αντίστοιχη με } V = A * \ln \left(\frac{i}{i_S} \right) \quad (\text{Εξίσωση 4.12})$$

$$\text{Όπου } V_T = \frac{kT}{q}$$

Όπου k= σταθερά του boltzmann (138×10^{-23} j/k) και q το φορτίο του ηλεκτρονίου ($1,6 \times 10^{-19}$ Cb)

Τα χαρακτηριστικά της διόδου, από τα οποία μεγαλύτερο ρόλο παίζει ο συντελεστής εκπομπής N, επιλέγονται κατάλληλα ώστε να προκύπτει η V – I χαρακτηριστική της κυψέλης. Οι ωμικές απώλειες προσομοιώνονται με τη παρασιτική αντίσταση της διόδου χωρίς τη χρήση επιπλέον αντίστασης στο κύκλωμα.

Οι απώλειες συγκέντρωσης προσομοιώνονται με ένα ισοδύναμο κύκλωμα μείωσης του ρεύματος το οποίο αποτελείται από 2 τρανζίστορ [32].

Τα πλεονεκτήματα του μοντέλου είναι [32]:

- Διαφέρει από τα υπόλοιπα μοντέλα καθώς εισάγει την πτώση τάσης λόγω απωλειών συγκέντρωσης με αναλυτικό, μη γραμμικό τρόπο.
- Εξετάζει και εισάγει το δυναμικό φαινόμενο undershoot της τάσης σε απότομη αύξηση φορτίου.
- Αξιολογείται μέσω της διεξαγωγής μετρήσεων στο πραγματικό εμπορικό μοντέλο κυψέλης καυσίμου Nexa™ Power Module τόσο για τη μόνιμη όσο και για τη δυναμική κατάσταση.

Τα μειονεκτήματα του μοντέλου είναι [32]:

- Ο υπολογισμός κάποιων παραμέτρων που είναι απαραίτητες για τη διεξαγωγή αποτελεσμάτων βασίζεται σε εμπειρικές σχέσεις.

Επίσης, ανάλογα με τη φύση της μοντελοποίησης τα θεωρητικά μοντέλα που αναλύονται παρακάτω μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις εξής κατηγορίες:

- Μη ηλεκτρικά μοντέλα: Μοντέλο Njoya – Tremblay – Dessaint
- Ηλεκτρικά μοντέλα: Μοντέλο Buasri – Slameh, Μοντέλο Famouri – S.Gemmen, Μοντέλο Ju – Juvarajan

Τέλος ανάλογα με το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε χωρίζονται σε μοντέλα προσομοίωσης με το πρόγραμμα:

- Matlab Simulink :
 - Μοντέλο Buasri – Slameh
 - SimPowerSystems: Μοντέλο Njoya – Tremblay – Dessaint
- PSpice : Μοντέλο Famouri – S.Gemmen, Μοντέλο Ju – Juvarajan

5. Ανάλυση Πειραματικής Διαδικασίας

5.1 Εισαγωγή

Το πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας έλαβε χώρα στην περιοχή του Λαυρίου και πιο συγκεκριμένα στο Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου (Τ.Π.Π.Λ.). Το Τ.Π.Π.Λ. είναι ένας οργανισμός επιστημονικής έρευνας, εκπαίδευσης, επιχειρηματικής δραστηριότητας και πολιτισμού. Ιδρύθηκε στη θέση της παλαιάς Γαλλικής Εταιρείας Λαυρίου (Compagnie Francaise des Mines du Laurium) το 1992, με πρωτοβουλία του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το Τ.Π.Π.Λ. στοχεύει στη σύνδεση της επιστημονικής και τεχνολογικής έρευνας που πραγματοποιείται στο ΕΜΠ με τις ανάγκες και τα ενδιαφέροντα του επιχειρηματικού κόσμου στην πραγματοποίηση πολιτιστικών εκδηλώσεων σχετικών με την προβολή της ιστορίας και του πολιτισμού της ευρύτερης περιοχής της Λαυρεωτικής και στην ανάδειξη της ιστορίας των δραστηριοτήτων που στο παρελθόν είχαν αναπτυχθεί στις διατηρητέες εγκαταστάσεις του. Ο χώρος του Τ.Π.Π.Λ. αποτελεί μοναδικό μνημείο βιομηχανικής αρχαιολογίας και αρχιτεκτονικής και σε αυτόν διατίθενται μια σειρά εγκαταστάσεων για τη στέγαση επιχειρηματικών δραστηριοτήτων αιχμής. Οι υπηρεσίες που παρέχονται από το Τ.Π.Π.Λ. αλλά και οι ανακαινισμένες εγκαταστάσεις, συνεχίζουν να στηρίζουν την έρευνα, την εκπαίδευση και την τεχνολογία. Σήμερα, το Τ.Π.Π.Λ. αποτελεί ουσιαστικά το μοναδικό Τεχνολογικό Πάρκο στην περιοχή της Αττικής που εξειδικεύεται σε τομείς – κλειδιά της σύγχρονης εφαρμοσμένης τεχνολογίας, όπως είναι η πληροφορική, η ηλεκτρονική τεχνολογία, οι τηλεπικοινωνίες, η ρομποτική, η τεχνολογία laser, η περιβαλλοντική τεχνολογία, η εξοικονόμηση ενέργειας, η ναυπηγική, η θαλάσσια τεχνολογία, κ.α. [33].

Στο χώρο αυτό διεξάγεται το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα H2susBuild που έχει ως στόχο τη δημιουργία ενός κτιρίου με μηδενικές εκπομπές CO₂ και την εξασφάλιση ηλεκτρικής ενέργειας από τις ένα υβριδικό ενεργειακό σύστημα που βασίζεται στις ΑΠΕ και το υδρογόνο. Η κυψέλη καυσίμου στην οποία διεξήχθη η πειραματική διαδικασία είναι μέρος του συγκεκριμένου προγράμματος.

Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας είναι η δημιουργία ενός ισοζυγίου μάζας – ενέργειας για τον έλεγχο της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου στις εγκαταστάσεις του Ε.Μ.Π στο Λαύριο, μέσω της διεξαγωγής μετρήσεων σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος της κυψέλης καυσίμου, τα αποτελέσματα της οποίας θα αναλυθούν σε δύο επίπεδα.

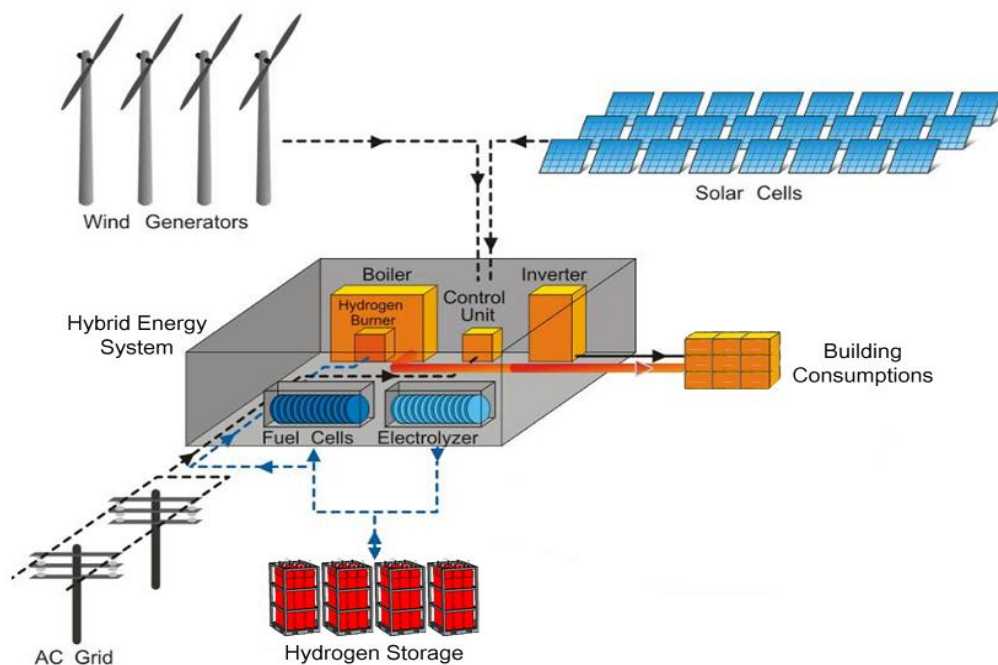
5.1.1 Λίγα λόγια για το πρόγραμμα H2susBuild

Η φιλοσοφία του ανεπτυγμένου υβριδικού ενεργειακού συστήματος είναι η χρήση ΑΠΕ για τη συγκομιδή πρωτογενούς ενέργειας που θα χρησιμοποιείται άμεσα για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων του κτιρίου με ταυτόχρονη μηδενική εκπομπή CO₂. Όταν η παραγωγή από ΑΠΕ είναι μεγαλύτερη από τη συνολική κατανάλωση του κτιρίου, η πλεονάζουσα ενέργεια αποθηκεύεται με τη μορφή υδρογόνου, το οποίο παράγεται από το νερό με ηλεκτρόλυση. Αντίθετα, όταν η παραγωγή από ΑΠΕ είναι μικρότερη από τη συνολική κατανάλωση του κτιρίου, το αποθηκευμένο υδρογόνο εφαρμόζεται ως ένα πράσινο καύσιμο για την κάλυψη της ζήτησης σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια του κτιρίου, μέσω της συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας μέσω κυψελών καυσίμου [34].

Τα βασικά μέρη του υβριδικού συστήματος ενέργειας είναι: (Σχήμα 5.1):

- Οι ΑΠΕ, δηλαδή φωτοβολταϊκά πάνελ (συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 46,8 kW) που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια και ανεμογεννήτριες (συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 36 kW) για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας.
- Μια μονάδα ηλεκτρόλυσης νερού (ισχύος 22,3 kW) για την παραγωγή αερίου H₂.
- Το δίκτυο διανομής υδρογόνου και οι φιάλες αποθήκευσης του υδρογόνου (μέγιστη χωρητικότητα νερού 3480 lt).

- Ένας συμπιεστής ώστε να καταστεί δυνατή η αποθήκευση του υδρογόνου σε υψηλή πίεση (έως και 200 bar).
- Μια κυψέλη καυσίμου (ισχύος 5,8kW για τη φάση εφαρμογής σε μικρή κλίμακα και ισχύος 20kW για τη φάση εφαρμογής σε μεγάλη κλίμακα αντίστοιχα) για τη μετατροπή του αποθηκευμένου υδρογόνου σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια.
- Έναν καυστήρα υδρογόνου για την παραγωγή θερμικής ενέργειας.



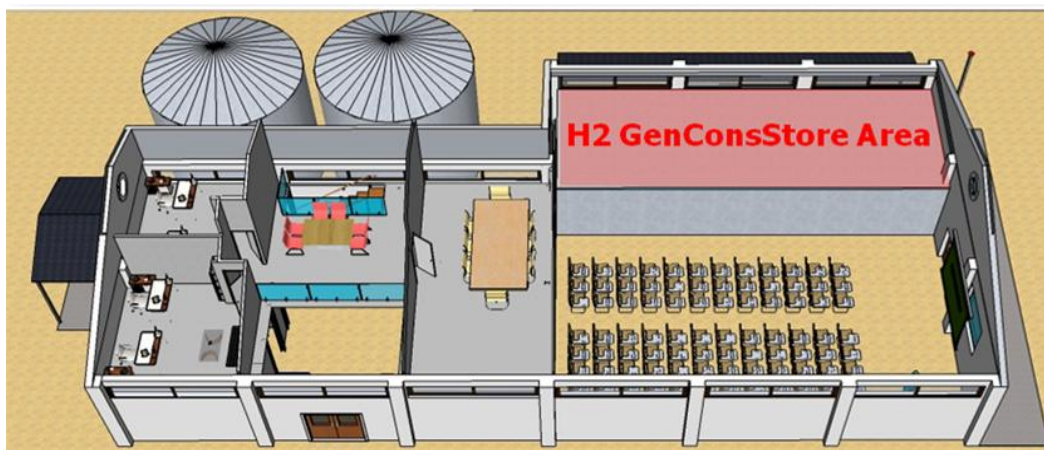
Σχήμα 5.1: Εννοιολογικό διάγραμμα του υβριδικού συστήματος παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας ΑΠΕ-H2.

5.1.2 Διευθέτηση Εξοπλισμού

Μια απομονωμένη περιοχή του κτιρίου, που ονομάζεται περιοχή H2 GenConsStore, η οποία είναι κατασκευασμένη από σκυρόδεμα και τοίχους με διπλό τούβλο φιλοξενεί τη μονάδα ηλεκτρόλυσης, την κυψέλη καυσίμου και τον καυστήρα υδρογόνου (Σχήμα 5.2). Σε αυτήν την περιοχή υπάρχουν 2 εισοδοί, οι οποίες σφραγίζονται από

πυράντοχες πόρτες 60 λεπτών. Κάθε εξοπλισμός τοποθετείται σε ένα ξεχωριστό δωμάτιο με διαστάσεις 5m x 5m x 4m έτσι ώστε να αφήνει ένα ανοιχτό διάδρομο που χρησιμοποιείται ως οδός διαφυγής προς τις εξόδους, σε περίπτωση ανάγκης. Ένα ανεξάρτητο σύστημα εξαερισμού διασφαλίζει τη συνεχή αναπλήρωση του αέρα στο εσωτερικό κάθε δωματίου κατά τη διάρκεια λειτουργίας του εξοπλισμού. Ο καθαρός αέρας απορροφάται σε απόσταση 15 μέτρων από το μηχανοστάσιο. Όλες οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις στην περιοχή πληρούν τις απαιτήσεις των σχετικών οδηγιών ATEX [35], ενώ το δωμάτιο ηλεκτρόλυσης έχει επίσης έναν τοίχο εκτόνωσης.

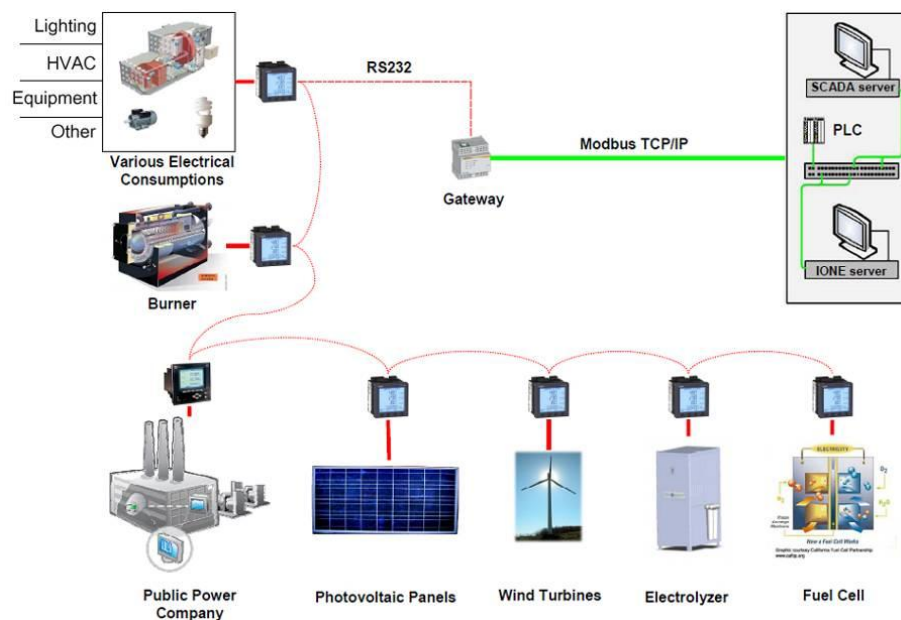
Το δίκτυο διανομής υδρογόνου και ο αποθηκευτικός χώρος βρίσκονται έξω από το κτίριο. Ο αποθηκευτικός χώρος χωρίζεται στην προσωρινή αποθήκη υδρογόνου (buffer) και τη μόνιμη αποθήκη υδρογόνου(storage). Οι σωληνώσεις είναι τοποθετημένες στον εξωτερικό τοίχο του κτιρίου, ενώ οι φιάλες υδρογόνου είναι τοποθετημένες σε τσιμεντένια βάση και κάτω από μια προστατευτική στέγη για να αποφεύγεται η άμεση έκθεση στον ήλιο και τη βροχή.



Σχήμα 5.2: 3D παρουσίαση του εσωτερικού του κτιρίου επίδειξης.

5.1.3 Σύστημα παρακολούθησης και καταγραφής των δεδομένων

Η ανάλυση της ροής της ενέργειας μεταξύ των τμημάτων του υβριδικού συστήματος και του κτιρίου επίδειξης επιτυγχάνεται μέσω ενός συστήματος παρακολούθησης και καταγραφής δεδομένων. Το σύστημα αυτό μπορεί να μετρήσει και να αποθηκεύσει σε πραγματικό χρόνο την ενέργεια που παράγεται από τις ΑΠΕ ή την κυψέλη καυσίμου και την ενέργεια που καταναλώνεται από τον εξοπλισμό και το κτίριο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση έξυπνων συσκευών μέτρησης εγκατεστημένων στον κύριο ηλεκτρικό πίνακα του κτιρίου. Αυτές οι συσκευές μετρούν ηλεκτρικά σήματα και επίσης προσφέρουν προηγμένες λειτουργίες όπως αυτόματη ειδοποίηση σε περίπτωση σφάλματος, πρόβλεψη κατανάλωσης και άλλες. Οι τύποι των συσκευών μέτρησης είναι της σειράς Powerlogic PM800 και πιο συγκεκριμένα οι PM820, PM850 και PM870 οι οποίοι διαθέτουν προσαρμοσμένο καταγραφέα και προσφέρουν μετρήσεις για την ηλεκτρική ενέργεια και ισχύ μέσω της τάσης και της έντασης ρεύματος [36]. Η αρχιτεκτονική του συστήματος παρακολούθησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3: Αρχιτεκτονική του συστήματος παρακολούθησης

5.2 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από:

- Τις φιάλες αποθήκευσης υδρογόνου οι οποίες χωρίζονται σε μόνιμης αποθήκευσης και προσωρινής αποθήκευσης και το δίκτυο διανομής υδρογόνου (όπως αναφέρονται στην υποπαράγραφο 5.1.1)
- Την κυψέλη καυσίμου τύπου PEM (ονομαστικής ισχύος 5,8kW) για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.
- Τον αντιστροφέα για τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο. Είναι συνδεδεμένος με την πειραματική κυψέλη καυσίμου ελέγχοντάς την, δηλαδή μέσω αυτού δίνεται η εντολή για το επίπεδο ισχύος της λειτουργίας της.
- Το σύστημα καταγραφής και ο υπολογιστής με τον οποίο γίνεται η παρακολούθηση της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου και δίνονται οι απαραίτητες εντολές στον αντιστροφέα.
- Το κτίριο που λαμβάνει το παραγόμενο από την κυψέλη καυσίμου ρεύμα για την κάλυψη των ενεργειακών του αναγκών.

Για να τεθεί σε λειτουργία η πειραματική κυψέλη καυσίμου στις εγκαταστάσεις του Ε.Μ.Π. στο Λαύριο δίνεται εντολή μέσω του υπολογιστή στον αντιστροφέα. Ο αντιστροφέας όντας συνδεδεμένος με την κυψέλη καυσίμου, της δίνει την εντολή για το επίπεδο λειτουργίας. Στη συνέχεια μέσω του δικτύου διανομής η κυψέλη καυσίμου αντλεί υδρογόνο ταυτόχρονα από την προσωρινή και την μόνιμη αποθήκη το οποίο καταναλώνει παράγοντας ηλεκτρική και θερμική ενέργεια. Η θερμική ενέργεια δεν ανακτάται ενώ η ηλεκτρική ενέργεια διέρχεται από τον αντιστροφέα, όπου από συνεχής μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη και πηγαίνει στο κτίριο για την κάλυψη των ενεργειακών του αλλαγών.

5.2.1 Περιγραφή κυψέλης καυσίμου

Όσον αφορά την πρωτότυπη κυψέλη καυσίμου με την οποία εκτελέστηκε η πειραματική διαδικασία, στη συνέχεια περιγράφονται οι τεχνικές προδιαγραφές της μονάδας ισχύος και δίνονται φωτογραφίες του μοντέλου. Η αναπτυγμένη κυψέλη καυσίμου βασίστηκε στο μοντέλο Mirra 6 της Morphic Exergy που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (5.4):



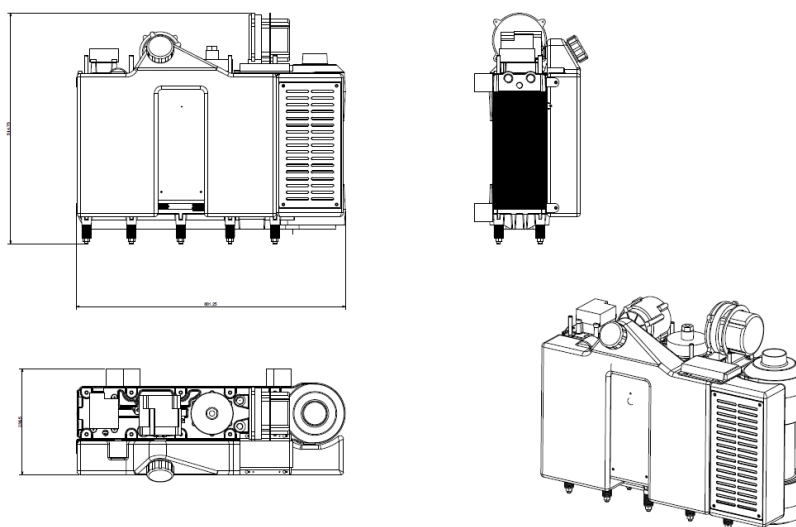
Σχήμα 5.4: Μοντέλο Mirra 6 της Morphic Exergy

Η μονάδα ισχύος της κυψέλης καυσίμου μικρής κλίμακας σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε από την εταιρία ICI CALDAIE και παρέχει καθαρή και μη σταθεροποιημένη ηλεκτρική ενέργεια στο κτίριο. Το σύστημα βασίζεται στην τεχνολογία κυψελών καυσίμου τύπου PEM (Proton Exchange Membrane) και εντάσσεται στο πλαίσιο του έργου H2SusBuild. Κατά συνέπεια, οι κυψελίδες καυσίμων θα τροφοδοτούνται με καθαρό αέριο υδρογόνο που προέρχεται από τη σύνδεση με το δίκτυο υδρογόνου. Το σύστημα είναι σε θέση να δώσει το μέγιστο 7,0 kW ηλεκτρικής ισχύος και 5,8 kW σε κατάσταση ονομαστικής συνεχούς λειτουργίας. Το σύστημα ισχύος του μοντέλου της κυψέλης καυσίμου έχει τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά όπως παρουσιάζονται και στον πίνακα 5.1 [37].

Πίνακας 5.1: Προδιαγραφές του συστήματος

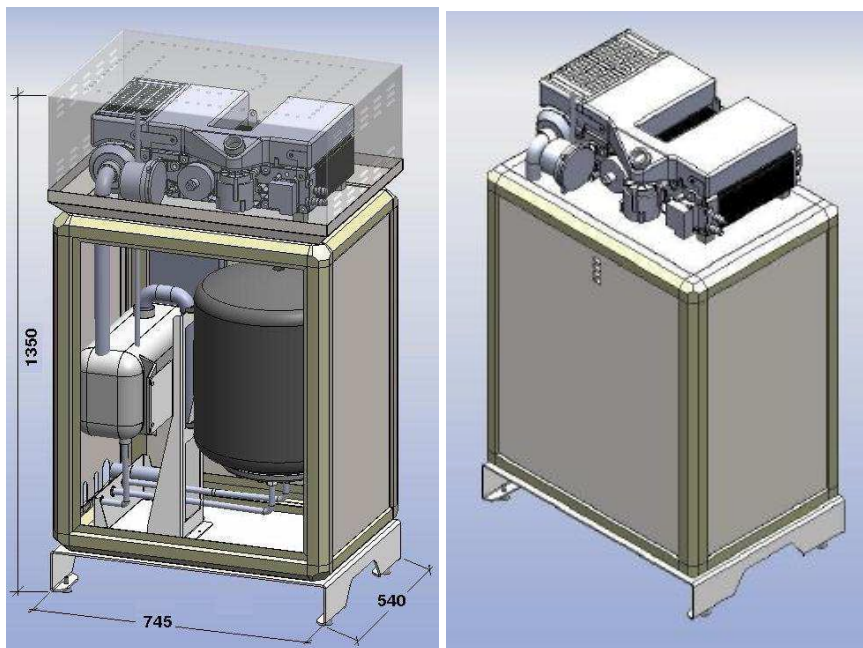
| Περιγραφή | Μονάδες | Τιμές |
|------------------------------------|---------|-------|
| Απόδοση | | |
| Μέγιστη Ηλεκτρική ισχύς | kW | 7 |
| Ονομαστική συνεχής Ηλεκτρική ισχύς | kW | 5.8 |

| | | |
|--|---------------------|---|
| Τάση | V | 31-72 μη σταθεροποιημένη |
| Μέγιστη ένταση ρεύματος | A | 280 |
| Απόδοση του συστήματος στη συνεχή ονομαστική ισχύ | % | >40 |
| Απόδοση του συστήματος στο 60% της συνεχούς ονομαστικής ισχύος | % | >50 |
| Εκτιμώμενη διάρκεια ζωής | hour | 10000 |
| Τρόποι λειτουργίας | | |
| Έλεγχος συστήματος | | Αυτόματος |
| Χρόνος εκκίνησης | sec | 12sec στο 75% της συνεχούς ονομαστικής ισχύος |
| Εφοδιασμός με Καύσιμα | | |
| Τύπος καύσιμου | | Υδρογόνο |
| Ελάχιστη πίεση | bar | 2 |
| Πίεση εισόδου | bar | 2-5 |
| Καθαρότητα Υδρογόνου | grade | 3,5(EU)(≥99.95% καθαρότητα) |
| Κατανάλωση καυσίμου | Nm ³ /hr | 4,3 στη συνεχή ονομαστική ισχύ |
| Πρωτεύον κύκλωμα ψύξης | | |
| Υδρόψυκτο | °C | 65 |
| Τύπος κυκλώματος | | Κλειστό κύκλωμα με αντλία κυκλοφορίας |
| Απαιτούμενο ψυκτικό | | Νερό-γλυκόλη ή απιονισμένο νερό |
| Ποσότητα νερού | lt | 6,7 |
| Λειτουργική κατάσταση | | |
| Θερμοκρασία λειτουργίας | °C | -20 έως +50 |
| Θερμοκρασία αποθήκευσης | °C | >0(>-20 μετά τη ξήρανση) |
| Μέγιστο υψόμετρο λειτουργίας | m | 2000 |
| Σχετική Υγρασία | RH | 10% έως 95% |
| Εκπομπή θορύβου | dBA | 55 σε απόσταση 1 m |



Σχήμα 5.5: Σχέδιο της εμπορικής μονάδας κυψέλης καυσίμου τύπου PEM

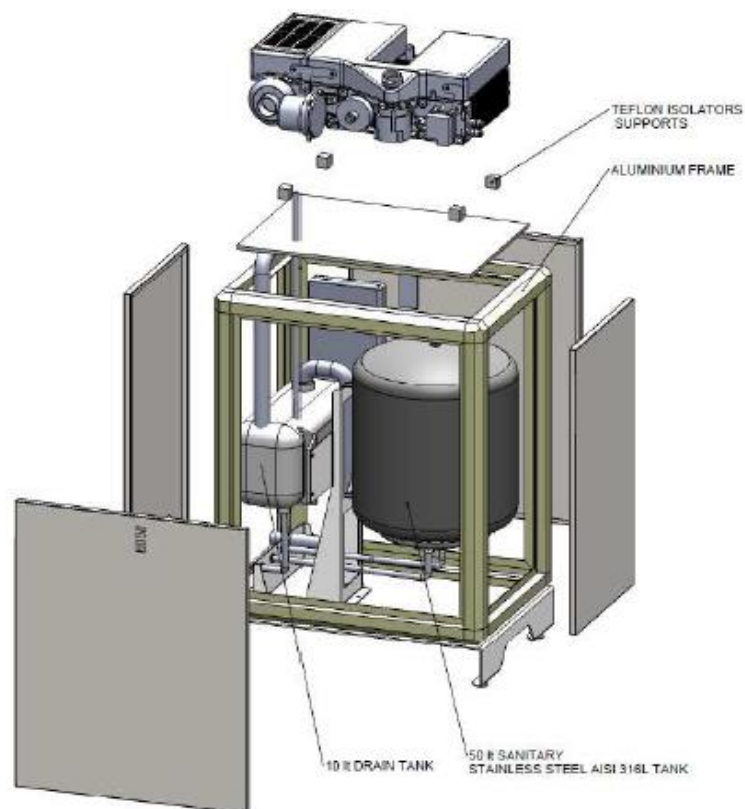
Η επιλεγμένη εμπορική κυψέλη καυσίμου τύπου PEM, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5, έχει συναρμολογηθεί με τον απαραίτητο εξοπλισμό για να προκύψει ένα πλήρως λειτουργικό σύστημα. Η συνδεσμολογία περιλαμβάνει ένα κύκλωμα ψύξης μαζί με δεξαμενή, μια αντλία, αισθητήρες θερμοκρασίας, και έναν εξωτερικό εναλλάκτη θερμότητας με ανεμιστήρα. Το σύστημα είναι επίσης εξοπλισμένο με έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα για την παροχή μονοφασικής τάσης εξόδου 220 V στα 50 Hz. Αξίζει να σημειωθεί πως στην παρούσα πρωτότυπη κυψέλη καυσίμου δεν έχει συμπεριληφθεί κάποιο σύστημα ανάκτησης της παραγόμενης θερμότητας. Όπως θα φανεί και στην ανάλυση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας, η ύπαρξη ενός τέτοιου συστήματος θα είχε σαν αποτέλεσμα μια πολύ σημαντική αύξηση του συνολικού βαθμού απόδοσης. Το σχήμα 5.6 απεικονίζει διαφορετικές απόψεις του ολοκληρωμένου σχεδιασμού της κυψέλης καυσίμου [37].



Σχήμα 5.6: 3D προβολή της ολοκληρωμένης κυψέλης καυσίμου PEMFC

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το σχήμα 5.6, η εμπορική μονάδα κυψελών καυσίμου τύπου PEM βρίσκεται στο άνω τμήμα της διάταξης. Ο λεπτομερής ολοκληρωμένος σχεδιασμός της κυψέλης καυσίμου και των λοιπών περιφερειακών συστημάτων, σε συνδυασμό με την κατάλληλη επιλογή των διαφόρων εξαρτημάτων και ηλεκτρονικών και τη χωροθέτησή τους, είχε σαν αποτέλεσμα μια συμπαγής (από πλευράς διαστάσεων) διάταξη. Το ανάπτυγμα στο σχήμα που ακολουθεί (5.7) παρουσιάζει λεπτομερέστερα τα κύρια εξαρτήματα και τη σχετική τους θέση στην

ολοκληρωμένη διάταξη της κυψέλης καυσίμου ενώ το σχήμα 5.8 παρουσιάζει ευκρινέστερα το σύστημα ψύξης και το δοχείο αποθήκευσης νερού.



Σχήμα 5.7: 3D ανάπτυγμα της πρωτότυπης μονάδας ισχύος της κυψέλης καυσίμου PEM.



Σχήμα 5.8: Σύστημα ψύξης και δοχείο αποθήκευσης νερού

Η μονάδα είναι πλήρως εξοπλισμένη με ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου, αισθητήρες τάσης στις κυψελίδες καθώς και σύστημα ανίχνευσης υδρογόνου. Η επικοινωνία και ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ όλων των συστημάτων ελέγχου και αισθητήρων βασίζονται στο πρωτόκολλο διασύνδεσης CAN Bus.

Στη συνέχεια απεικονίζεται το τελικό πρωτότυπο της κυψέλης καυσίμου τύπου PEM με την οποία διεξήχθη η πειραματική διαδικασία (σχήμα 5.9).



Σχήμα 5.9: Τελικό πρωτότυπο

5.2.2 Περιγραφή Αντιστροφέα

Μετά την παραγωγή του ρεύματος από την κυψέλη καυσίμου και πριν αυτό φτάσει στο κτίριο χρησιμοποιείται ένας αντιστροφέας της Delta Energy Systems ο οποίος μετατρέπει το συνεχές ρεύμα (DC) σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Ο τύπος του αντιστροφέα που χρησιμοποιείται στις εγκαταστάσεις του Λαυρίου είναι ο DHF-1AC-5000W και τα χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται εν συντομία στον πίνακα 5.2 [38]:

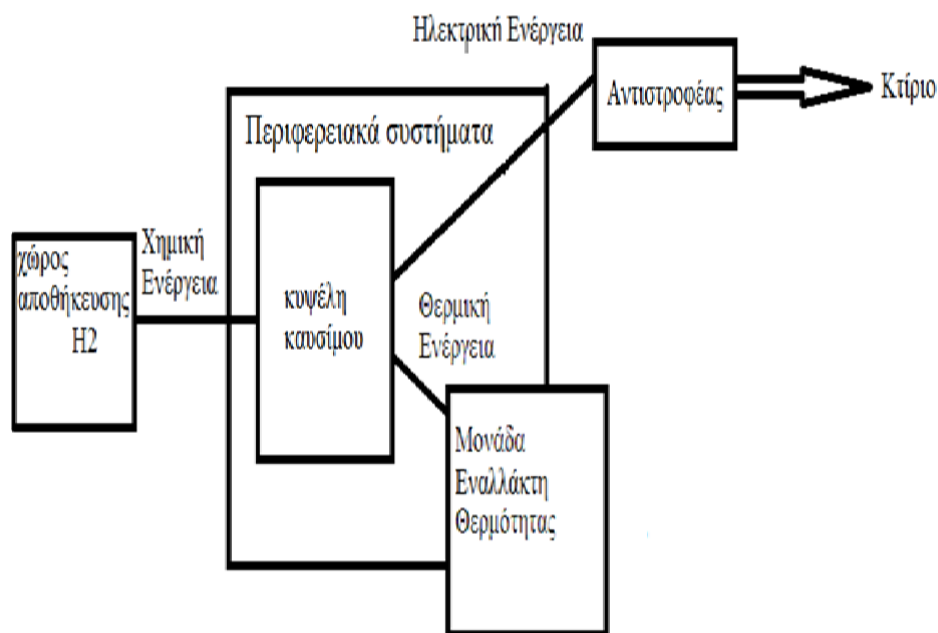
Πίνακας 5.2: Τεχνικές προδιαγραφές

| Συνεχές ρεύμα (DC) | |
|---------------------------------------|-------------------------------|
| Τύπος | DHF-1AC-5000W |
| Αριθμός είδους | D0103755 |
| Τάση (ονομαστική) | 51 V |
| Εύρος τάσης | 42 V ... 92 V |
| Ένταση (ονομαστικό) | 122 A |
| Ένταση (μέγιστο) | 122 A |
| Ρεύμα περιορισμός | 150 A |
| Ρεύμα κυμάτωσης | <0,5 APK-PK |
| Ρυθμός μεταβολής έντασης ρεύματος | 33 A/s |
| Ισχύς | 6250 W5 |
| Εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) | |
| Τάση εξόδου (RMS, ονομαστική) | 230 V |
| Εύρος τάσης εξόδου (RMS) | 195 V ... 265 V (230 V ± 15%) |
| Ένταση (rms, συνολικά) | 28 A max. |
| Ένταση (rms, συνδεδεμένοι στο δίκτυο) | 23 A max. |

| | |
|--|---|
| Ισχύς (συνολική) | 5800 W max. |
| Ισχύς (συνδεδεμένοι στο δίκτυο) | 4800 W max. |
| Συντελεστής ισχύος | 0,99 |
| Συχνότητα | 50 Hz \pm 0,1 Hz ή 60 Hz \pm 0,1 Hz |
| Απόδοση Vin, DC, nom. Iin, DC, nom., Vout, AC, nom. | > 88,5% |
| Τάση προστασίας Ασφάλειες | 250 V 30 A / ταχείας δράσης |

5.3 Ροή της Ενέργειας στο σύστημα κυψέλης καυσίμου – αντιστροφέα

Η ροή της ενέργειας στο σύστημα κυψέλης καυσίμου – αντιστροφέα ξεκινά από το χώρο αποθήκευσης υδρογόνου όπου φυλάσσεται το αέριο υδρογόνο. Στη συνέχεια, το υδρογόνο μεταφέρεται μέσω σωληνώσεων στην κυψέλη καυσίμου όπου η χημική του ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια. Τμήμα της ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται για τη λειτουργία των περιφερειακών συστημάτων, ενώ το υπόλοιπό της εισέρχεται στον αντιστροφέα από όπου και τροφοδοτείται στο κτίριο. Η θερμική ενέργεια που παράγεται δεν ανακτάται και μπορεί να υπολογιστεί από την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού στο κύκλωμα ψύξης της κυψέλης καυσίμου. Στη συνέχεια παρουσιάζεται σχηματικά (σχήμα 5.10) η ροή της ενέργειας στο σύστημα κυψέλης καυσίμου – αντιστροφέα.



Σχήμα 5.10: Ροή ενέργειας στο σύστημα κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα

5.4 Ανάλυση πειραματικής διαδικασίας

Αντικείμενο της πειραματικής διαδικασίας είναι η ανάλυση της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας της πειραματικής κυψέλης καυσίμου τύπου PEM στις εγκαταστάσεις του Ε.Μ.Π. στο Λαύριο και η δημιουργία ενός ισοζυγίου μάζας - ενέργειας που να δείχνει πως κατανέμεται η ενέργεια μέσα σε σύστημα κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα.

Για την κατασκευή του ισοζυγίου λοιπόν, είναι απαραίτητος ο έλεγχος της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος μέσα στο εύρος λειτουργίας της. Οπότε, για τη διεξαγωγή των πειραμάτων η μεθοδολογία που επιλέχθηκε ήταν η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου σε 3 διαφορετικά επίπεδα ισχύος. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή στο δωμάτιο ελέγχου της εγκατάστασης (control room) ο οποίος ρυθμίζει τη λειτουργία του αντιστροφέα. Η εντολή που δίνεται στον αντιστροφέα εκφράζεται μέσω της έντασης του ρεύματος που θέλουμε να παράγεται στην κυψέλη καυσίμου, οπότε με τη σειρά

του αυτός δίνει την αντίστοιχη εντολή στην κυψέλη καυσίμου για το επίπεδο λειτουργίας της. Η αλλαγή λοιπόν της έντασης ρεύματος στον αντιστροφέα ανά προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα, έχει ως αποτέλεσμα την λειτουργία της κυψέλης καυσίμου σε διαφορετικά επίπεδα έντασης ρεύματος άρα και ισχύος, εφόσον τα ποσά αυτά είναι ανάλογα. Το λογισμικό της ίδιας της κυψέλης καυσίμου και οι μετρητές, που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 5.2, κάνουν την καταγραφή και την αποθήκευση των πειραματικών δεδομένων τα οποία χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Η ηλεκτρονική καταγραφή των μετρήσεων γίνονται κάθε 0,5 δευτερόλεπτα όσον αφορά στα δεδομένα της συστοιχίας κυψελίδων καυσίμου από το λογισμικό της ίδιας της κυψέλης καυσίμου και κάθε 1 λεπτό όσον αφορά στα δεδομένα του συστήματος κυψέλης καυσίμου και αντιστροφέα από τους μετρητές.

Για την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων, ο διαχωρισμός πραγματοποιείται σε δύο επίπεδα. Αρχικά, γίνεται ανάλυση της κυψέλης καυσίμου ως μεμονωμένο σύστημα ενώ στη συνέχεια γίνεται ανάλυση του συστήματος κυψέλης καυσίμου και αντιστροφέα. Η επιλογή αυτή στοχεύει στο να γίνει πιο κατανοητή η πορεία της ενέργειας μέσα στο σύστημα κυψέλης καυσίμου και αντιστροφέα και να μπορέσει να υπολογιστεί το μέγεθος των απωλειών από τα περιφερειακά συστήματα και τον αντιστροφέα, η θερμότητα και η ηλεκτρική ενέργεια που προκύπτει από την κυψέλη καυσίμου ώστε να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του ισοζυγίου ενέργειας.

5.5 Ελεγχόμενα - Μετρούμενα - Υπολογιζόμενα Μεγέθη

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας έγινε μελέτη και παρακολούθηση της μεταβολής ορισμένων μεγεθών καθώς βρισκόταν σε λειτουργία η κυψέλη καυσίμου. Επίσης, με τη βοήθεια των υπολογισμών που θα γίνονταν με τα αποτελέσματα των καταγραφών θα μπορέσουν να διεξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τη ποιότητα λειτουργίας της κυψέλης στην εγκατάσταση του Ε.Μ.Π. στο Λαύριο. Τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται χωρίζονται σε ελεγχόμενα, μετρούμενα και υπολογιζόμενα.

Ελεγχόμενα μεγέθη: Όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 5.11, σαν ελεγχόμενο μέγεθος χρησιμοποιείται η ένταση ρεύματος στον αντιστροφέα. Το μέγεθος αυτό περιλαμβάνεται στην ανάλυσή της πειραματικής διαδικασίας διότι είναι το μόνο που καθορίζει το επίπεδο λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου.

Μετρούμενα μεγέθη: Σύμφωνα και με το σχήμα 5.11, τα μετρούμενα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της κυψέλης καυσίμου είναι:

- η ισχύς
- η τάση εξόδου
- η ένταση του ρεύματος
- η πίεση του υδρογόνου στην προσωρινή αποθήκη και τη μόνιμη αποθήκη υδρογόνου.

Η ισχύς και η τάση εξόδου είναι βασικά μεγέθη της λειτουργίας κάθε κυψέλης καυσίμου οπότε η μέτρησή τους κρίνεται απαραίτητη. Η πίεση του υδρογόνου στην προσωρινή αποθήκη και στη μόνιμη αποθήκη δίνεται ώστε να υπολογιστεί η κατανάλωση σε υδρογόνο της κυψέλης καυσίμου.

Όσον αφορά τα μετρούμενα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση του συστήματος κυψέλης καυσίμου και αντιστροφέα, είναι:

- η ισχύς
- η ενέργεια
- η θερμοκρασία του H₂O
- η πίεση στη προσωρινή και τη μόνιμη αποθήκη υδρογόνου

Η ισχύς είναι η ενέργεια που παράγεται από το σύστημα είναι βασικό στοιχείο της ανάλυσης για τον υπολογισμό του ισοζυγίου μάζας – ενέργειας. Η θερμοκρασία του H₂O χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θερμότητας που παράγεται από τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου και η οποία δεν ανακτάται. Τέλος, χρησιμοποιείται η πίεση του υδρογόνου της προσωρινής και της μόνιμης αποθήκης υδρογόνου η οποία είναι κοινή για την ανάλυση της κυψέλης καυσίμου και του συστήματος κυψέλη καυσίμου και αντιστροφέα και η σημασία της έχει αναφερθεί παραπάνω.

Υπολογιζόμενα μεγέθη: Όπως παρουσιάζονται και στο σχήμα 5.11, τα υπολογιζόμενα μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν στις δύο αναλύσεις είναι για την ανάλυση της κυψέλης καυσίμου:

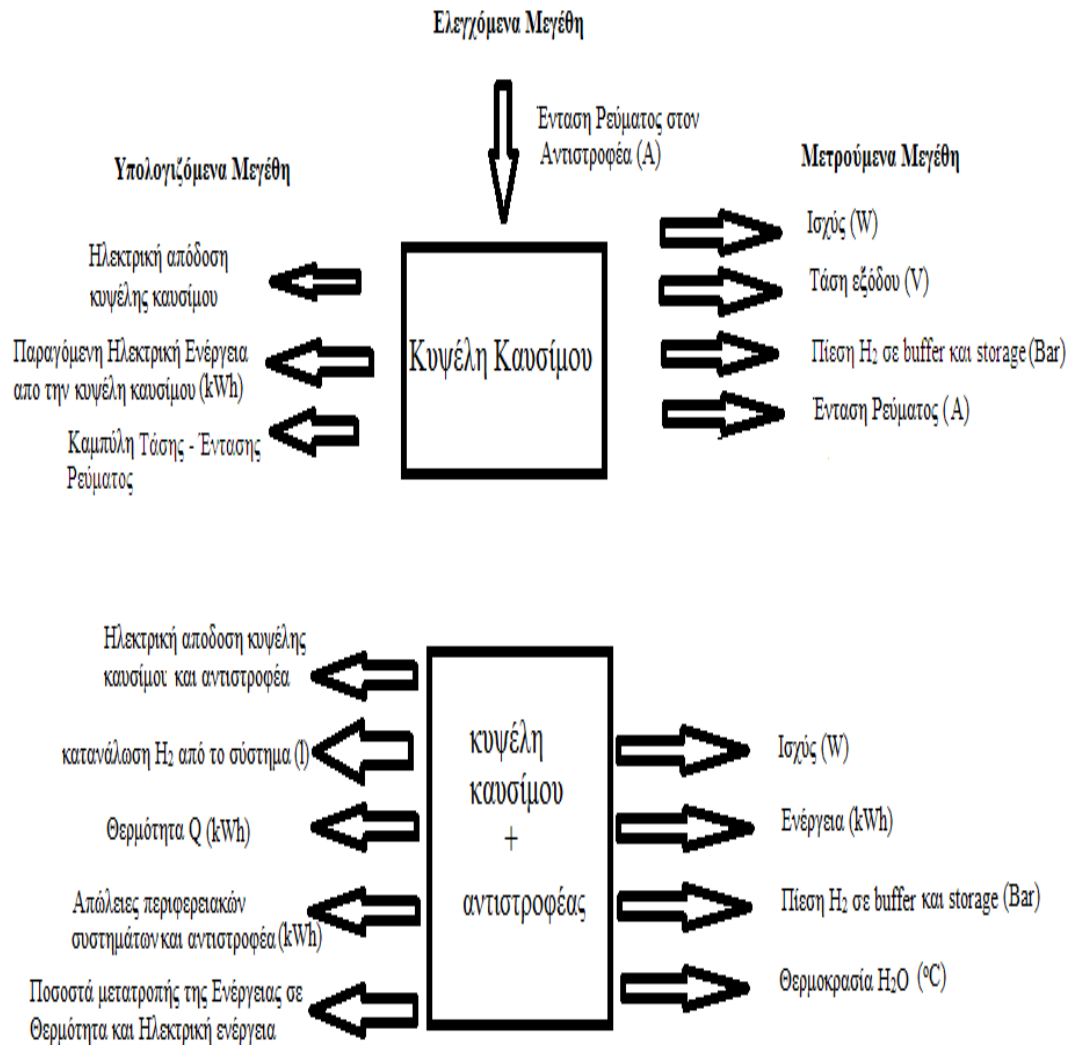
- Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου
- Η ηλεκτρική απόδοση της κυψέλης καυσίμου
- Η καμπύλη τάσης – έντασης ρεύματος

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου υπολογίζεται μέσω της ισχύος που καταγράφεται από τους μετρητές κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Η ηλεκτρική απόδοση της πειραματικής κυψέλης υπολογίζεται με βάση την ηλεκτρική ενέργεια που παρήγαγε η συστοιχία και το HHV του υδρογόνου σύμφωνα με την κατανάλωση του υδρογόνου. Η καμπύλη τάσης – έντασης ρεύματος δημιουργήθηκε συγχρονίζοντας τις μετρήσεις τάσης και έντασης ρεύματος.

Για την ανάλυση του συστήματος κυψέλης καυσίμου και αντιστροφέα:

- Η κατανάλωση υδρογόνου από το σύστημα
- Η θερμότητα Q
- Η ηλεκτρική απόδοση του συστήματος
- Οι απώλειες των περιφερειακών συστημάτων και του αντιστροφέα
- Τα ποσοστά μετατροπής της ενέργειας σε θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια

Η κατανάλωση του υδρογόνου από το σύστημα υπολογίστηκε με βάση τις μετρήσεις των πιέσεων στην προσωρινή και τη μόνιμη αποθήκη υδρογόνου. Η θερμότητα Q υπολογίστηκε με βάση τη μεταβολή της θερμοκρασίας H₂O ενώ η ηλεκτρική απόδοση του συστήματος όπως προαναφέρθηκε. Οι απώλειες των περιφερειακών συστημάτων και του αντιστροφέα υπολογίστηκαν με γνώμονα την ισχύ που απαιτείται για τη λειτουργία τους. Τα ποσοστά μετατροπής της ενέργειας σε θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια υπολογίστηκαν με βάση την ηλεκτρική ενέργεια που εξέρχεται από την κυψέλη καυσίμου, την ενέργεια των περιφερειακών και του αντιστροφέα, το HHV του H₂ και τη θερμότητα που παρήγαγε το σύστημα.



Σχήμα 5.11: Ελεγχόμενα - Μετρούμενα - Υπολογιζόμενα Μεγέθη

5.6 Πειραματικά αποτελέσματα

5.6.1 Υπολογισμός Συνολικής κατανάλωσης H₂

Αρχικά, μπορεί να υπολογιστεί η ποσότητα του H₂ που καταναλώνεται. Οι πειραματικές μετρήσεις πίεσης του storage και του buffer σύμφωνα με το χρόνο παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (5.3). Όσον αφορά τη στήλη της συνολικής κατανάλωσης H₂ υπολογίστηκε για κάθε 60 sec λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου σύμφωνα με τη διαδικασία που θα αναλυθεί στη συνέχεια:

Πίνακας 5.3: Πειραματικά αποτελέσματα πιέσεων H₂ σε storage και buffer – Συνολική κατανάλωση

| Χρόνος (sec) | H ₂ Storage (Bar) | H ₂ Buffer (Bar) | Συνολική Κατανάλωση H ₂ (l) |
|--------------|------------------------------|-----------------------------|--|
| 0 | 16,430 | 6,080 | 0 |
| 60 | 16,430 | 6,080 | 0 |
| 120 | 16,430 | 6,080 | 0 |
| 180 | 16,417 | 6,071 | 9,104367 |
| 240 | 16,407 | 6,061 | 16,43227 |
| 300 | 16,402 | 6,052 | 21,09548 |
| 360 | 16,395 | 6,043 | 26,49889 |
| 420 | 16,382 | 6,033 | 35,3812 |
| 480 | 16,369 | 6,023 | 44,26351 |
| 540 | 16,359 | 6,011 | 52,25759 |
| 600 | 16,348 | 5,996 | 60,62176 |
| 660 | 16,334 | 5,983 | 71,20651 |
| 720 | 16,318 | 5,968 | 82,90155 |
| 780 | 16,303 | 5,954 | 93,8564 |
| 840 | 16,289 | 5,941 | 103,701 |
| 900 | 16,275 | 5,923 | 115,0259 |
| 960 | 16,256 | 5,906 | 128,7195 |
| 1020 | 16,241 | 5,891 | 139,8964 |
| 1080 | 16,228 | 5,873 | 149,889 |
| 1140 | 16,211 | 5,859 | 162,3242 |
| 1200 | 16,192 | 5,844 | 175,8697 |
| 1260 | 16,177 | 5,829 | 186,6765 |
| 1320 | 16,172 | 5,823 | 190,8216 |

Ο υπολογισμός της κατανάλωσης του υδρογόνου βασίστηκε στην καταστατική εξίσωση των αερίων. Αυτό ισχύει γιατί το αέριο που μελετάμε (υδρογόνο) έχει πίεση μικρότερη από 200 bar υπό κανονικές συνθήκες.

$$P * V = n * R * T$$

Παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας η πίεση του υδρογόνου στο buffer μεταβλήθηκε από 6,08 bar σε 5,823 bar και στο storage από 16,43 bar σε 16,172 bar.

Οπότε:

- Για την προσωρινή αποθήκη υδρογόνου

Όταν το υδρογόνο έχει πίεση 1 atm ή 1,01325 bar και η φιάλη έχει χωρητικότητα 50l τότε αν χρησιμοποιηθεί η καταστατική εξίσωση ισχύει:

$$P_{H_2} * V_{H_2} = n * R * T_{H_2}$$

$$P_{φιάλης} * V_{φιάλης} = n * R * T_{φιάλης}$$

Και επειδή η θερμοκρασία της φιάλης ταυτίζεται με τη θερμοκρασία του υδρογόνου που βρίσκεται μέσα στη φιάλη ($T_{φιάλης} = T_{H_2}$) και θεωρώντας ότι η θερμοκρασία της φιάλης δεν μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, τότε διαιρώντας τις 2 εξισώσεις κατά μέλη ισχύει:

$$\text{Για } P_{φιάλης} = 6,08 \text{ bar έχουμε } V_{H_2} = \frac{50 * 6,08}{1,01325} = 300,024 \text{ l } H_2$$

$$\text{Για } P_{φιάλης} = 5,823 \text{ bar έχουμε } V_{H_2} = \frac{50 * 5,823}{1,01325} = 287,342 \text{ l } H_2$$

Άρα το συνολικό υδρογόνο που καταναλώθηκε από μια φιάλη είναι: 300,024 - 287,342 = 12,681 L υδρογόνου.

Επειδή όμως υπάρχουν 3 φιάλες υδρογόνου χωρητικότητας 50L η μία, τότε η συνολική κατανάλωση υδρογόνου από την προσωρινή αποθήκη υδρογόνου είναι 3*12,681 = 38,04 l H₂.

- Για τη μόνιμη αποθήκη υδρογόνου

Αντίστοιχα, όταν η φιάλη υδρογόνου έχει πίεση 1 atm ή 1,01325 bar και έχει χωρητικότητα 50L ισχύει:

$$\text{Για } P_{H_2} = 16,43 \text{ bar έχουμε } V_{H_2} = \frac{50 * 16,43}{1,01325} = 810,757 \text{ l υδρογόνου}$$

$$\text{Για } P_{H_2} = 16,172 \text{ bar έχουμε } V_{H_2} = \frac{50 * 16,172}{1,01325} = 798,026 \text{ l υδρογόνου}$$

Άρα το συνολικό υδρογόνο που καταναλώθηκε από μια φιάλη είναι: 810,757 - 798,026 = 12,731 l υδρογόνου.

Επειδή όμως υπάρχουν 12 φιάλες υδρογόνου χωρητικότητας 50l η μία, τότε η συνολική κατανάλωση υδρογόνου από τη μόνιμη αποθήκη υδρογόνου είναι $12 \cdot 12,731 = 152,776$ l υδρογόνου.

Επομένως, η συνολική κατανάλωση υδρογόνου κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας ήταν $38,04 + 152,776 = 190,821$ l υδρογόνου.

Η θεωρητική ενέργεια που δίνει το υδρογόνο καιγόμενο είναι σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.7) και (3.8):

$$\text{HHV} = 285,83 \text{ kJ / mol ή } 12,745 \text{ kJ/l [40]}$$

$$\text{LHV} = 241,83 \text{ kJ / mol ή } 10,783 \text{ kJ/l [40]}$$

Άρα αν χρησιμοποιηθεί το LHV ισχύει: $10,783 \cdot 190,821 = 2057,6$ kJ ή 0,571 kWh.

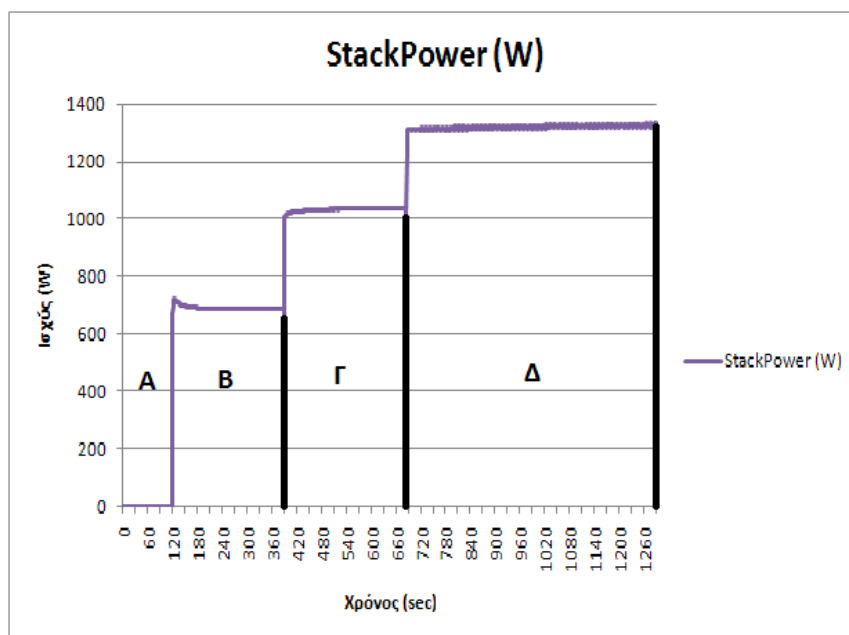
Ενώ αν χρησιμοποιηθεί το HHV ισχύει: $12,745 \cdot 190,821 = 2432,014$ kJ ή 0,676 kWh.

Χρησιμοποιώντας τις ενδιάμεσες μετρήσεις της πίεσης του πίνακα 5.3 προκύπτει ομοίως η 4^η στήλη του πίνακα 5.3, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω διαγραμματικά (5.5,5.9,5.13,5.17)

5.6.2 Παρουσίαση πειραματικών μετρήσεων συστοιχίας κυψελίδων καυσίμου (fuel cell stack)

Το σύνολο των πειραματικών μετρήσεων στις οποίες αντιστοιχούν τα παρακάτω διαγράμματα δίνονται σε αρχείο excel, λόγω του όγκου των αποτελεσμάτων.

Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου



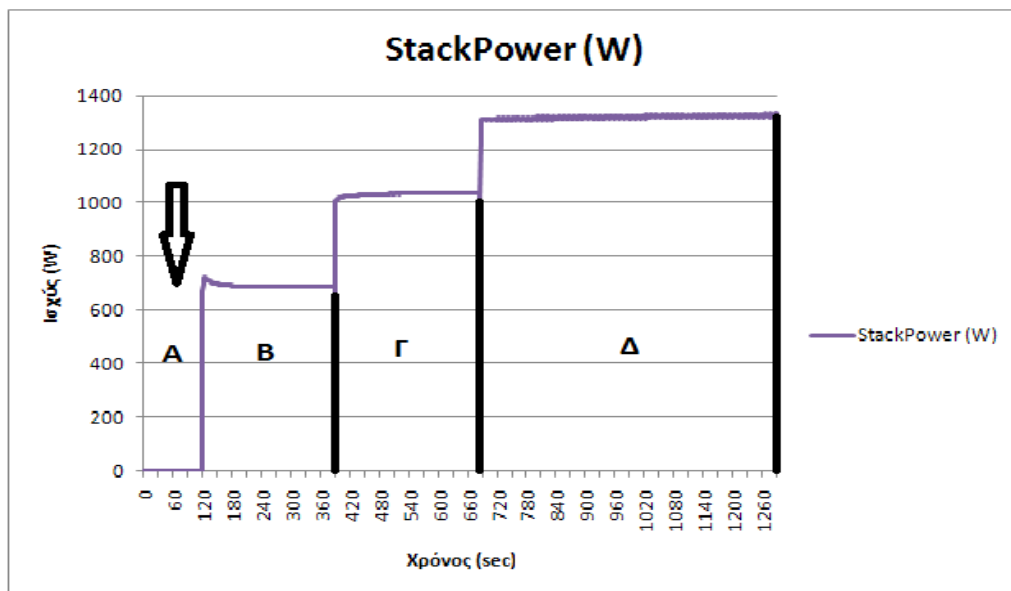
Διάγραμμα 5.1: Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου

Σύμφωνα με τις μετρήσεις από τη συστοιχία κυψελίδων καυσίμου και με το διάγραμμα 5.1 που παρουσιάζεται παραπάνω, η πειραματική διαδικασία που εκτελέστηκε μπορεί να χωριστεί σε 4 περιοχές λειτουργίας:

- Η πρώτη περιοχή ή περιοχή Α, όπου η κυψέλη καυσίμου είναι σε κατάσταση αναμονής με διάρκεια από 0 έως 120 sec.
- Η δεύτερη περιοχή ή περιοχή Β που αντιστοιχεί σε 5A ρυθμιζόμενη τιμή στον αντιστροφέα με διάρκεια από 120 έως 390 sec. Στην περιοχή αυτή παρατηρείται μέση τιμή ισχύος 687W.
- Η τρίτη περιοχή ή περιοχή Γ που αντιστοιχεί σε 10A ρυθμιζόμενη τιμή στον αντιστροφέα με διάρκεια από 390 έως 685 sec. Στην περιοχή αυτή παρατηρείται μέση τιμή ισχύος 1034W.
- Η τέταρτη περιοχή ή περιοχή Δ που αντιστοιχεί σε 15A ρυθμιζόμενη τιμή στον αντιστροφέα με διάρκεια από 685 έως 1288 sec. Στην περιοχή αυτή παρατηρείται μέση τιμή ισχύος 1320W.

5.6.2.1 Πειραματικά αποτελέσματα της περιοχής λειτουργίας A

5.6.2.1.1 Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου

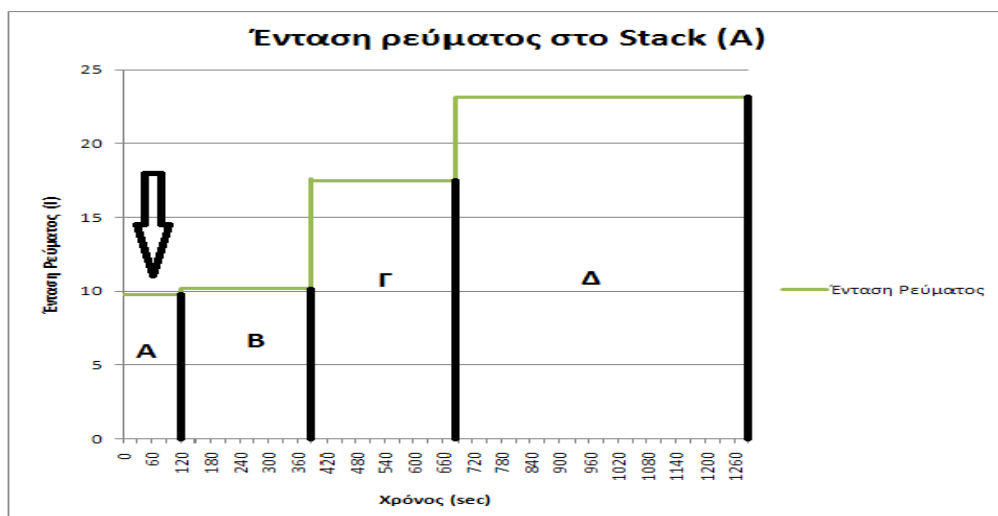


Διάγραμμα 5.2: Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας A

Η περιοχή λειτουργίας A χαρακτηρίζεται από μηδενική ισχύ στην κυψέλη καυσίμου. Αυτό οφείλεται στο ότι η κυψέλη καυσίμου αν και είναι σε λειτουργία δεν παράγει ενέργεια, είναι δηλαδή σε κατάσταση αναμονής.

Από το παραπάνω διάγραμμα (5.2) μπορεί να υπολογιστεί η ηλεκτρική ενέργεια που παρήγαγε η κυψέλη καυσίμου στην περιοχή λειτουργίας A υπολογίζοντας το ολοκλήρωμα της εξίσωσης του γραφήματος από τη χρονική στιγμή $t_1=0$ έως $t_2=120$ sec. Όπως παρατηρείται, η ισχύς παραμένει σταθερή και ίση με το 0, συνεπώς καθώς η κυψέλη καυσίμου βρίσκεται σε αναμονή, η ηλεκτρική ενέργεια στην περιοχή λειτουργίας A είναι $E_{A \text{ stack}}=0$.

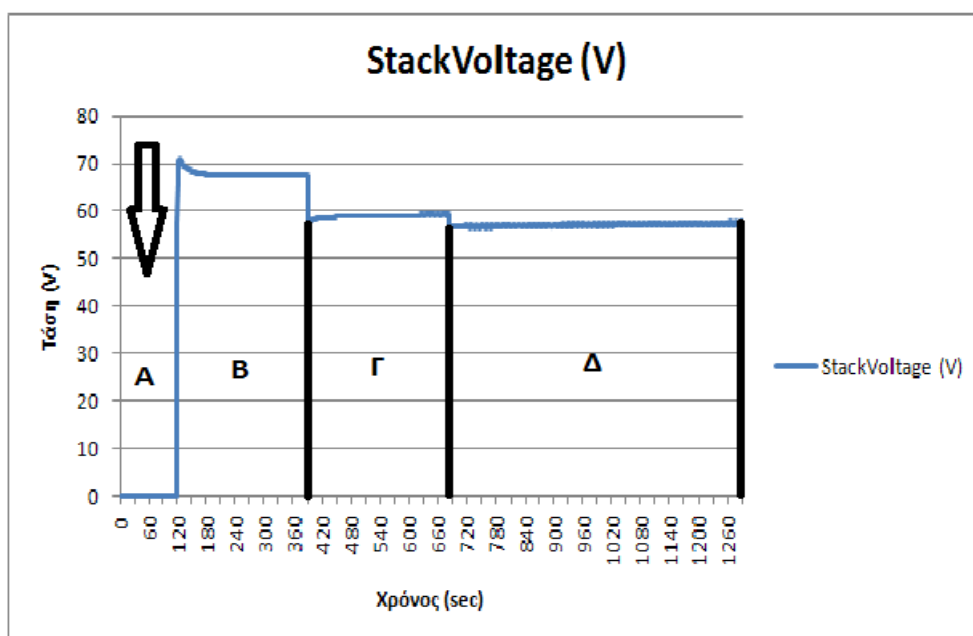
5.6.2.1.2 Διάγραμμα Έντασης Ρεύματος – Χρόνου



Διάγραμμα 5.3: Διάγραμμα Έντασης Ρεύματος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Α

Σύμφωνα με το διάγραμμα 5.3, στην περιοχή λειτουργίας Α παρατηρείται ένταση ρεύματος στην κυψέλη καυσίμου ίση με 9,8Α.

5.6.2.1.3 Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου

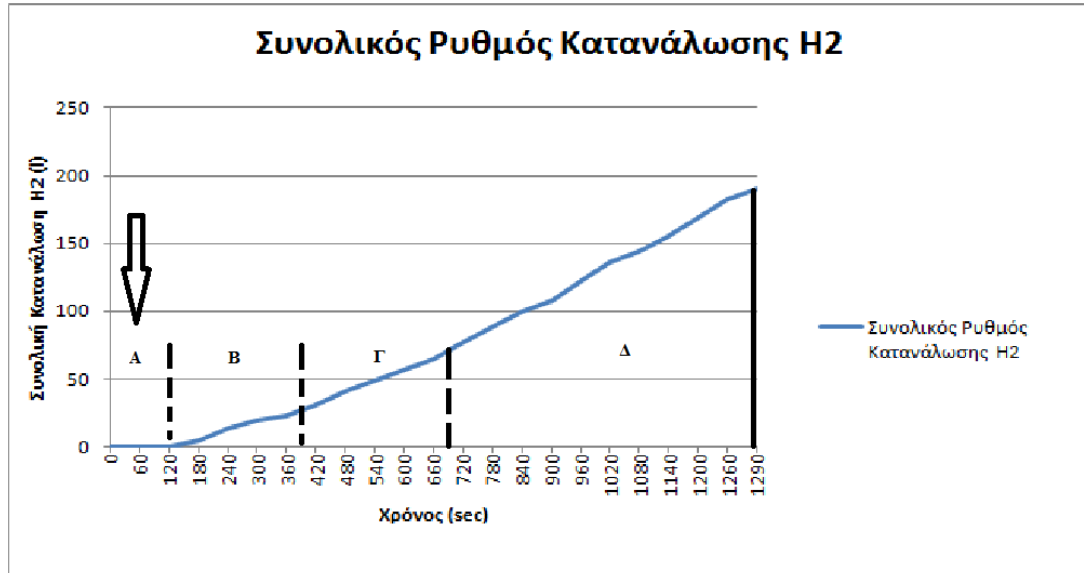


Διάγραμμα 5.4: Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Α

Η περιοχή λειτουργίας Α χαρακτηρίζεται από μηδενική τάση εξόδου στην κυψέλη καυσίμου, επιβεβαιώνοντας ότι η κυψέλη καυσίμου βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής.

5.6.2.1.4 Διάγραμμα κατανάλωσης υδρογόνου

Το διάγραμμα κατανάλωσης υδρογόνου (5.5) κατασκευάστηκε από τα αποτελέσματα του πίνακα 5.3.

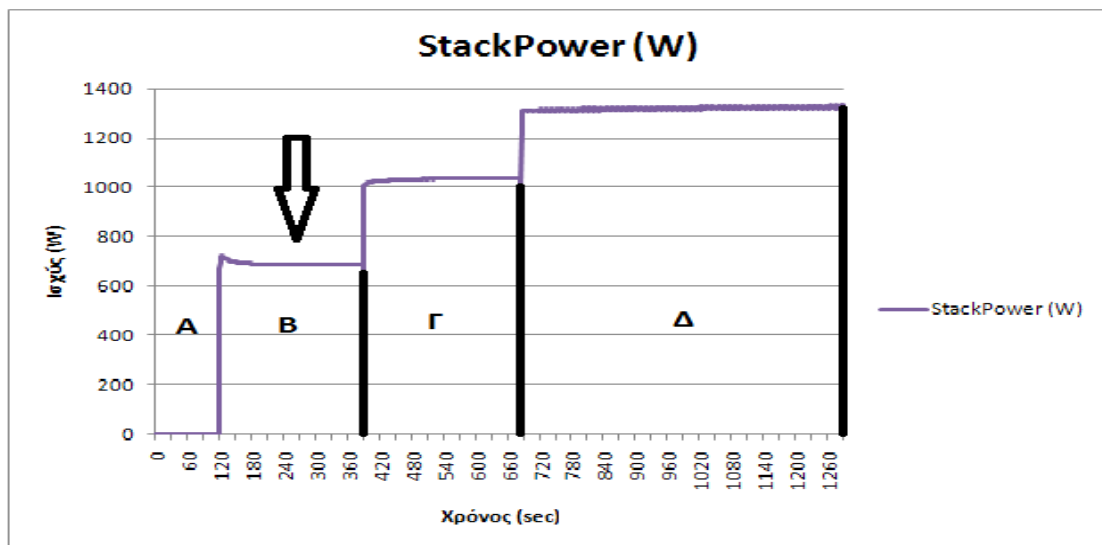


Διάγραμμα 5.5: Διάγραμμα κατανάλωσης H₂ περιοχής λειτουργίας A

Στην περιοχή A δεν καταναλώνεται υδρογόνο καθώς η κυψέλη καυσίμου είναι σε αναμονή.

5.6.2.2 Πειραματικά αποτελέσματα της περιοχής λειτουργίας B

5.6.2.2.1 Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου



Διάγραμμα 5.6: Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας B

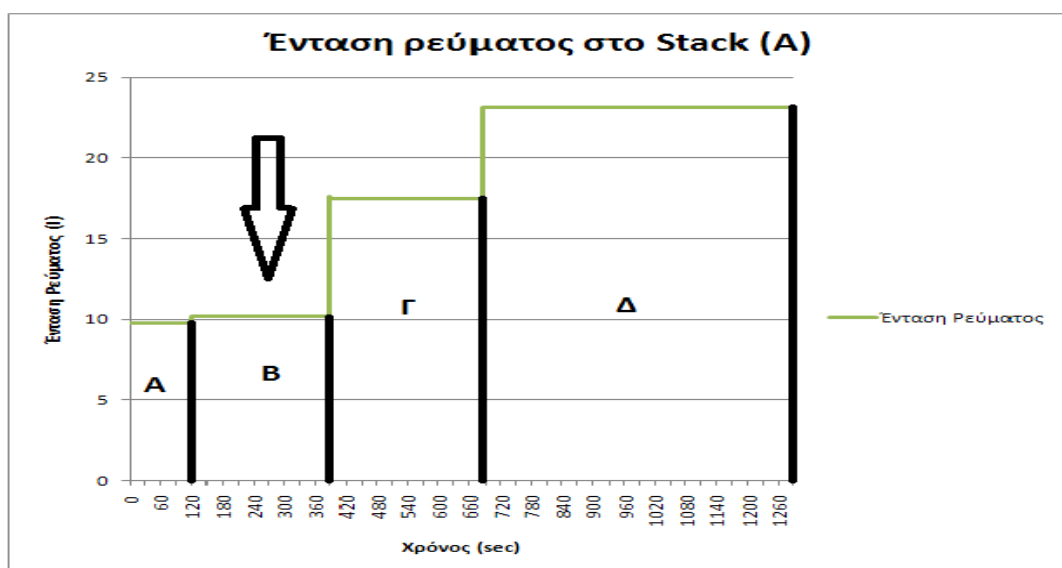
Με βάση τις πειραματικές μετρήσεις, η μέση τιμή της ισχύος της συστοιχίας στην περιοχή λειτουργίας B υπολογίζεται ίση με 687W.

Από το παραπάνω διάγραμμα μπορεί να υπολογιστεί η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται η κυψέλη καυσίμου στην περιοχή λειτουργίας B υπολογίζοντας το ολοκλήρωμα της εξίσωσης του γραφήματος από τη χρονική στιγμή $t_1=120$ έως $t_2=390$ sec. Επειδή όμως η παραγόμενη ισχύ είναι σχεδόν σταθερή, άρα είναι της μορφής $y=a$, η ηλεκτρική ενέργεια στη περιοχή λειτουργίας B μπορεί να υπολογιστεί εν συντομία από την παρακάτω σχέση:

Οπότε έχουμε:

$$E_{B \text{ stack}} = \frac{390-120}{3600} * \frac{687}{1000} = 0,051 \text{ kWh} \quad (\text{Εξίσωση 5.1})$$

5.6.2.2 Διάγραμμα Έντασης Ρεύματος – Χρόνου

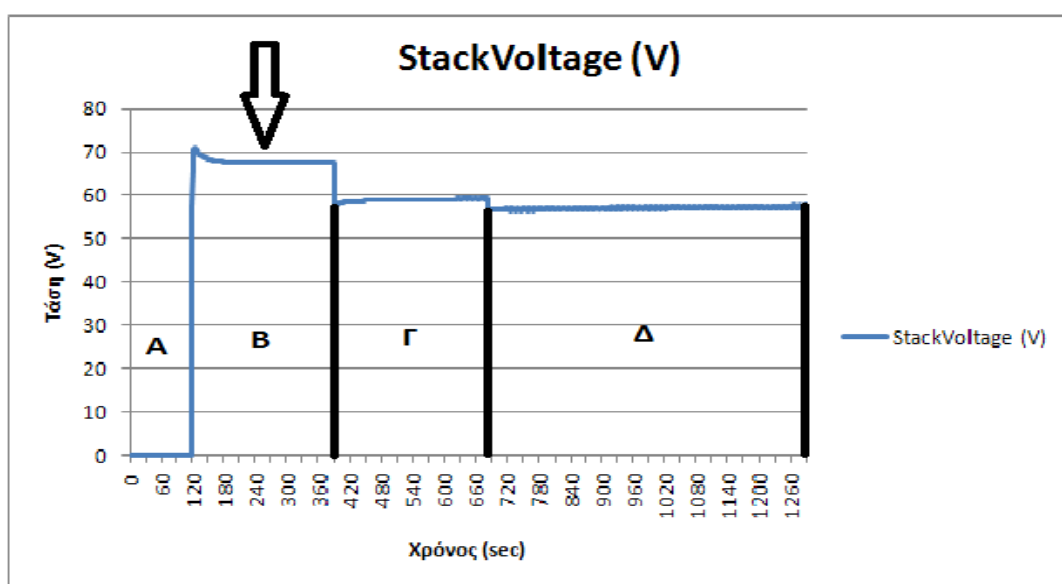


Διάγραμμα 5.7: Διάγραμμα Έντασης Ρεύματος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας B

Με βάση τις πειραματικές μετρήσεις, η τιμή της έντασης του ρεύματος της πειραματικής κυψέλης στην περιοχή λειτουργίας B υπολογίζεται ίση με 10,2Α με ρυθμιζόμενη τιμή στον αντιστροφέα 5Α.

Παρατηρείται λοιπόν μια διαφορά ανάμεσα στην ένταση του ρεύματος σαν εντολή στον αντιστροφέα και σε αυτή που λειτουργεί η κυψέλη καυσίμου της τάξεως των 5,2Α. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι η ένταση του ρεύματος στον αντιστροφέα ταυτίζεται με τη ζητούμενη ένταση ρεύματος από την κυψέλη καυσίμου. Αν υπολογιστεί ότι απαιτείται ρεύμα και για τη λειτουργία των περιφερειακών συστημάτων, είναι λογικό η ένταση ρεύματος που παράγεται από την κυψέλη να είναι μεγαλύτερη.

5.6.2.2.3 Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου



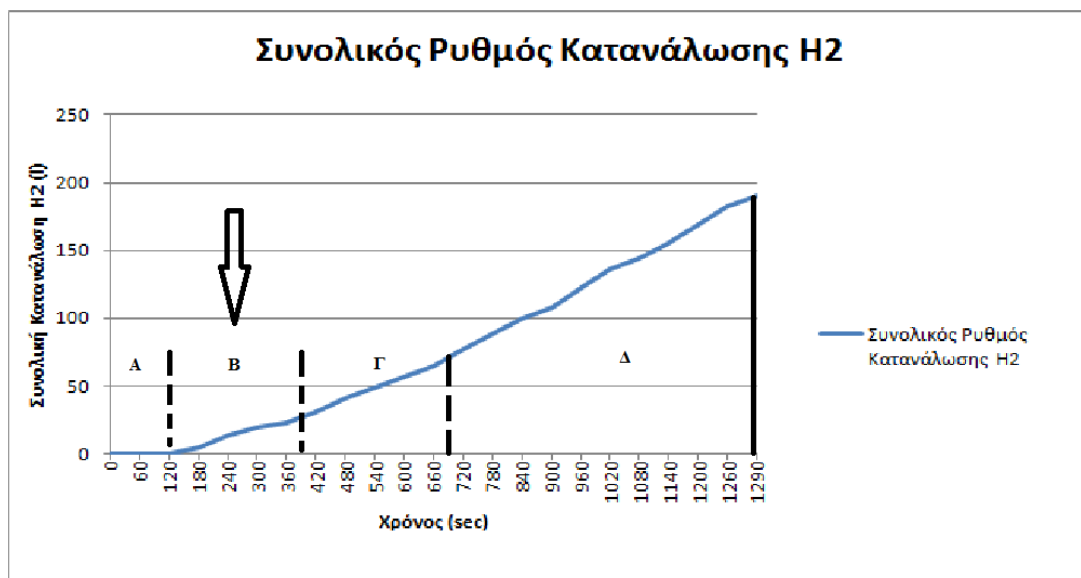
Διάγραμμα 5.8: Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου περιοχής λειτουργίας B

Στην περιοχή λειτουργίας B, η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί στα 67V.

Παρατηρείται λοιπόν μια αύξηση της τάσης της συστοιχίας κυψελίδων καυσίμου, σε σχέση με την περιοχή λειτουργίας A κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι η κυψέλη καυσίμου άρχισε να λειτουργεί. Επίσης, με την αύξηση της έντασης του ρεύματος κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας είναι λογικό να εμφανίζεται μια μείωση της τάσης εξόδου στα άκρα της συστοιχία κυψελίδων καυσίμου, καθώς τα μεγέθη είναι αντιστρόφως ανάλογα. Αυτό παρατηρείται συγκρίνοντας τα διαγράμματα 5.7-5.8.

5.6.2.2.4 Διάγραμμα κατανάλωσης υδρογόνου

Το διάγραμμα κατανάλωσης H₂ κατασκευάστηκε από τα αποτελέσματα του πίνακα 5.3.



Διάγραμμα 5.9: Διάγραμμα κατανάλωσης H₂ περιοχής λειτουργίας B.

Η ποσότητα του υδρογόνου που καταναλώθηκε στη περιοχή B είναι 35,381-26,498=30,94 l.

Σύμφωνα με το HHV του υδρογόνου, η ενέργεια από τη κατανάλωση του υδρογόνου στην περιοχή λειτουργίας B είναι 30,94*12,745= 394,33 kJ ή 0,11 kWh(Εξίσωση 5.2)

Σύμφωνα με το LHV του υδρογόνου, η ενέργεια από τη κατανάλωση του υδρογόνου στην περιοχή λειτουργίας B είναι 30,94*10,783= 333,627 kJ ή 0,093 kWh.

5.6.2.2.5 Ηλεκτρική απόδοση συστοιχίας κυψελίδων καυσίμου

Η ηλεκτρική απόδοση της συστοιχίας κυψελίδων καυσίμου για την περιοχή λειτουργίας B δίνεται από τον τύπο:

$$n = \frac{E_{B \text{ stack}}}{E_{B \text{ HHV}}} \xrightarrow{(5.1) \quad (5.2)} n = \frac{0,051}{0,11} = 0,47 \text{ ή } 47\%$$

Όπου $E_{B \text{ stack}}$: η ηλεκτρική ενέργεια στην περιοχή λειτουργίας B.

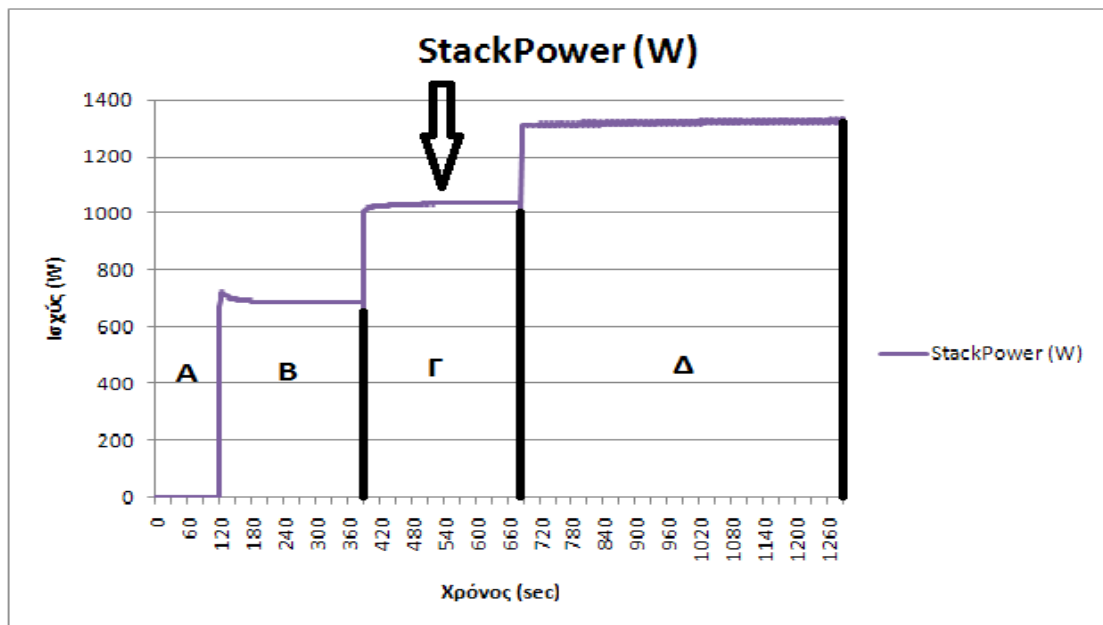
$E_{B \text{ HHV}}$: Η ενέργεια από την κατανάλωση του υδρογόνου στην περιοχή λειτουργίας B.

Ο βαθμός της ηλεκτρικής απόδοσης της κυψέλης καυσίμου στην περιοχή λειτουργίας B, όπως υπολογίστηκε παραπάνω, χαρακτηρίζεται λογικός σύμφωνα με τις προδιαγραφές της κυψέλης καυσίμου του πίνακα 5.1 αν θεωρηθεί ότι βρισκόμαστε στην περιοχή των απωλειών ενεργοποίησης, κάτι που θα εξεταστεί στην ενότητα 5.6.2.5. Αν συγκριθεί σε σχέση με άλλες κυψέλες καυσίμου που βρίσκονται στην αγορά, η κυψέλη καυσίμου στην οποία διεξήχθη η πειραματική διαδικασία στο επίπεδο ισχύος των 687W χαρακτηρίζεται καλύτερη από την κυψέλη καυσίμου MF LPH-8020 τύπου PEM της εταιρίας m-Field ονομαστικής ισχύος 3kW με απόδοση 50% (LHV) [39], διότι χρησιμοποιώντας το LHV του H_2 η απόδοση της πειραματικής κυψέλης καυσίμου είναι:

$$\eta = \frac{E_{B \text{ stack}}}{E_{B \text{ LHV}}} \stackrel{(5.1)}{\implies} \eta = \frac{0,051}{0,093} = 0,548 \text{ ή } 54,8\%$$

5.6.2.3 Πειραματικά αποτελέσματα της περιοχής λειτουργίας Γ

5.6.2.3.1 Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου



Διάγραμμα 5.10: Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Γ

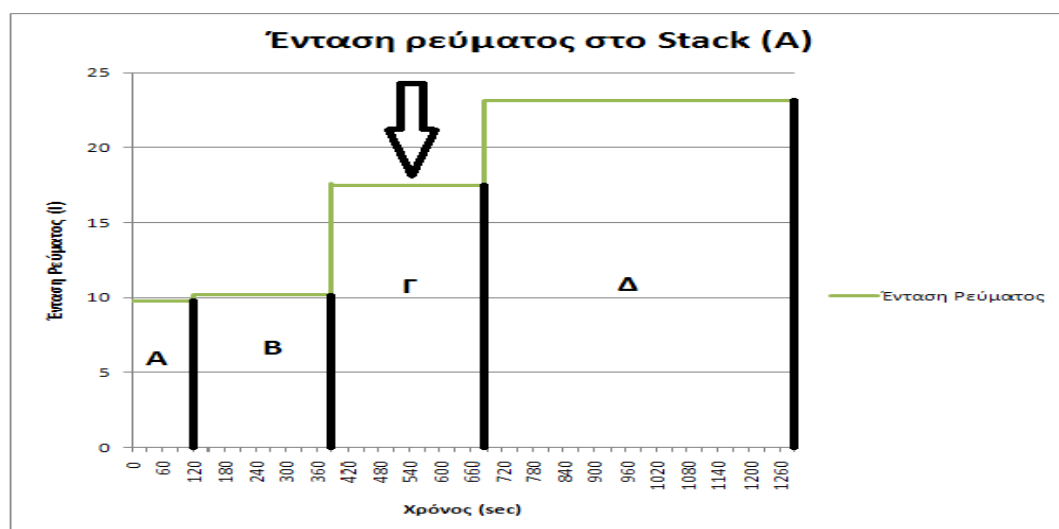
Με βάση τις πειραματικές μετρήσεις, η μέση τιμή ισχύος της πειραματικής κυψέλης στην περιοχή λειτουργίας Γ υπολογίζεται ίση με 1031W.

Από το παραπάνω διάγραμμα μπορεί να υπολογιστεί η ηλεκτρική ενέργεια που παρήγαγε η κυψέλη καυσίμου στην περιοχή λειτουργίας Γ υπολογίζοντας το ολοκλήρωμα της εξίσωσης του γραφήματος από τη χρονική στιγμή $t_3=390$ έως $t_4=685$ sec. Επειδή η παραγόμενη ισχύ είναι σχεδόν σταθερή, άρα είναι της μορφής $y=a$, η ηλεκτρική ενέργεια στη περιοχή λειτουργίας Γ μπορεί να υπολογιστεί εν συντομία από την παρακάτω σχέση (5.3):

Οπότε έχουμε:

$$E_{\Gamma \text{ stack}} = \frac{685-390}{3600} * \frac{1031}{1000} = 0,084 \text{ kWh} \quad (\text{Εξίσωση 5.3})$$

5.6.2.3.2 Διάγραμμα Έντασης Ρεύματος – Χρόνου



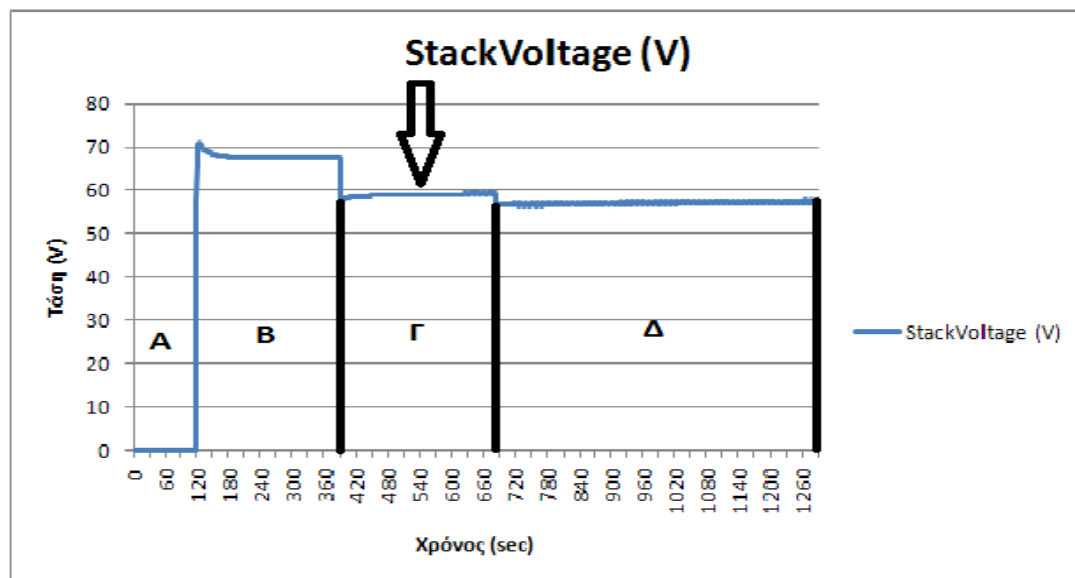
Διάγραμμα 5.11: Διάγραμμα Έντασης Ρεύματος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Γ

Η περιοχή λειτουργίας Γ είναι η περιοχή στην οποία η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί σε 17,5A έντασης ρεύματος με ρυθμιζόμενη τιμή στον αντιστροφέα 10A.

Παρατηρείται λοιπόν μια διαφορά ανάμεσα στην ένταση του ρεύματος σαν εντολή στον αντιστροφέα και σε αυτή που λειτουργεί η πειραματική κυψέλη της τάξεως των 7,5A. Αν συγκριθεί και με τη διαφορά της έντασης του ρεύματος που παρατηρήθηκε

στην περιοχή λειτουργίας B χαρακτηρίζεται μεγαλύτερη όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 5.6.2.2.2.

5.8.2.3.3 Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου



Διάγραμμα 5.12: Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Γ

Η περιοχή λειτουργίας Γ είναι η περιοχή στην οποία η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί με τάση εξόδου στα 59V.

Η μείωση της τάσης εξόδου της περιοχής λειτουργίας Γ σε σχέση με την Β οφείλεται στην αντιστρόφως ανάλογη σχέση που έχει με την ένταση του ρεύματος της κυψέλης καυσίμου οπότε με το γεγονός ότι αυξήθηκε η ένταση του ρεύματος που παράγει η κυψέλη καυσίμου, η τάση εξόδου στα άκρα της κυψέλης μειώνεται.

5.6.2.3.4 Διάγραμμα κατανάλωσης H₂

Το διάγραμμα κατανάλωσης υδρογόνου κατασκευάστηκε από τα αποτελέσματα του πίνακα 5.3.



Διάγραμμα 5.13: Διάγραμμα κατανάλωσης H₂ περιοχής λειτουργίας Γ

Η ποσότητα του υδρογόνου που καταναλώθηκε στη περιοχή Γ είναι $82,901 - 71,206 = 46,113$ l.

Σύμφωνα με το HHV του υδρογόνου, η ενέργεια από τη κατανάλωση του υδρογόνου στη περιοχή λειτουργίας Γ είναι $46,113 * 12,745 = 587,723$ kJ ή 0,163 kWh.

(Εξίσωση 5.4)

Σύμφωνα με το LHV του υδρογόνου, η ενέργεια από τη κατανάλωση του υδρογόνου στη περιοχή λειτουργίας Γ είναι $46,113 * 10,783 = 497,247$ kJ ή 0,138 kWh.

5.6.2.3.5 Ηλεκτρική απόδοση συστοιχίας κυψελίδων καυσίμου

Η ηλεκτρική απόδοση της συστοιχίας κυψελίδων καυσίμου για την περιοχή λειτουργίας Γ δίνεται από τον τύπο:

$$n = \frac{E_{\Gamma stack}}{E_{\Gamma HHV}} \xrightarrow{(5.3) \quad (5.4)} \frac{0,08}{0,163} = 0,518 \text{ ή } 51,8\%$$

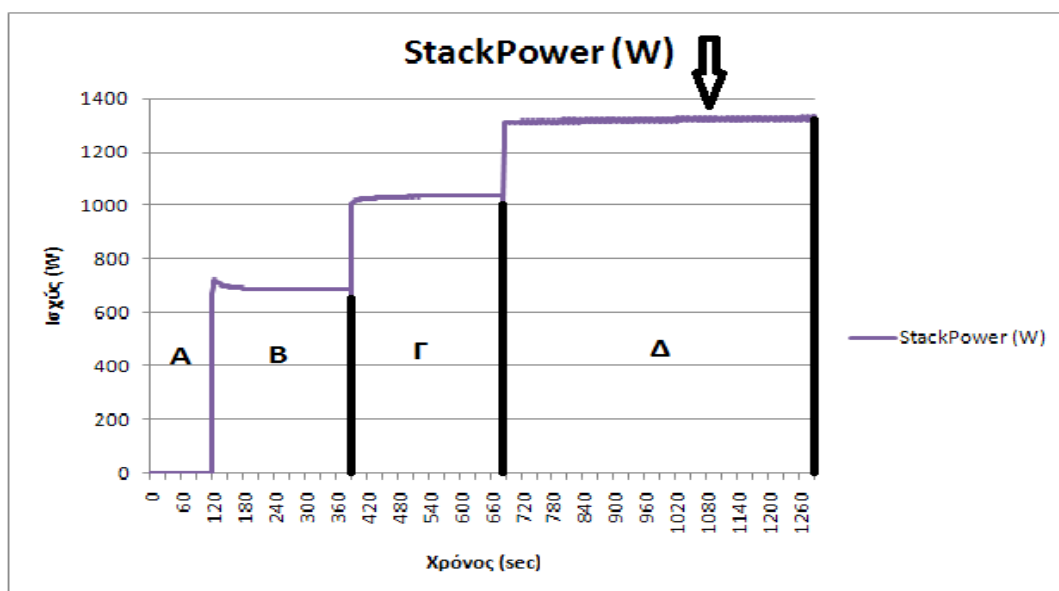
Όπου $E_{\Gamma stack}$: η ηλεκτρική ενέργεια στην περιοχή λειτουργίας Γ.

$E_{\Gamma HHV}$: η ενέργεια από τη κατανάλωση του υδρογόνου στην περιοχή λειτουργίας Γ.

Παρατηρείται μια αύξηση της απόδοσης σε σύγκριση με την περιοχή λειτουργίας Β από το 47% στο 51,8% κάτι που οφείλεται στη πιθανή μετάβαση από τη περιοχή των απωλειών ενεργοποίησης στην περιοχή των ωμικών απωλειών κάτι που θα εξεταστεί στην ενότητα 5.6.2.5 και οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί καλύτερα στα 1034W ισχύος απ' ότι στα 687W.

5.6.2.4 Πειραματικά αποτελέσματα της περιοχής λειτουργίας Δ

5.6.2.4.1 Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου



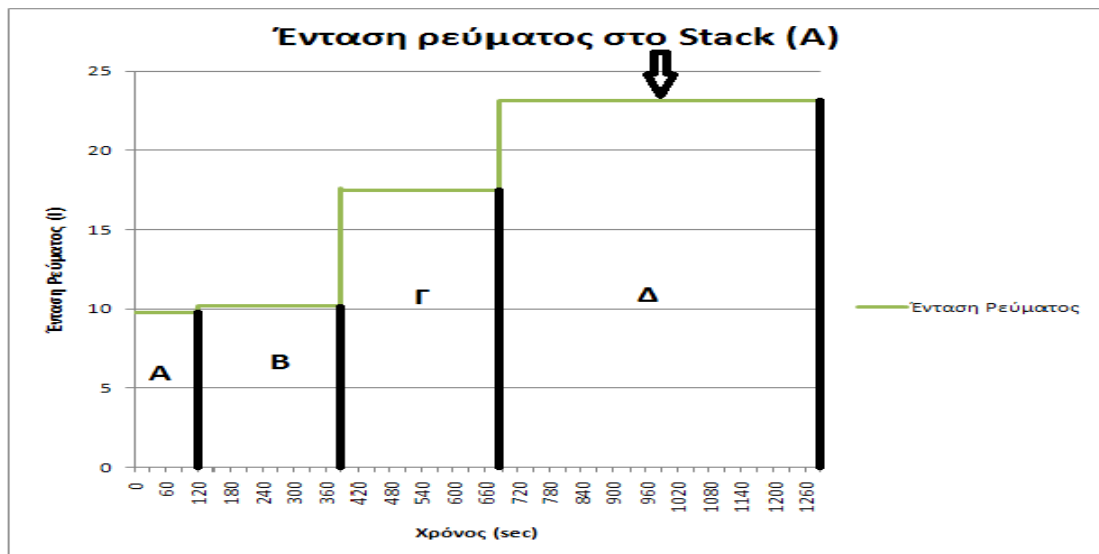
Διάγραμμα 5.14: Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Δ

Με βάση τις πειραματικές μετρήσεις, η μέση τιμή ισχύος της πειραματικής κυψέλης στην περιοχή λειτουργίας Δ υπολογίζεται ίση με 1320W.

Από το παραπάνω διάγραμμα μπορεί να υπολογιστεί η ηλεκτρική ενέργεια που παρήγαγε η κυψέλη καυσίμου στην περιοχή λειτουργίας Δ υπολογίζοντας το εμβαδόν του τμήματος κάτω από την καμπύλη. Οπότε ισχύει:

$$E_{\Delta stack} = \frac{1288-685}{3600} * \frac{1320}{1000} = 0,221 \text{ kWh} \quad (\text{Εξίσωση 5.5})$$

5.6.2.4.2 Διάγραμμα Έντασης Ρεύματος – Χρόνου

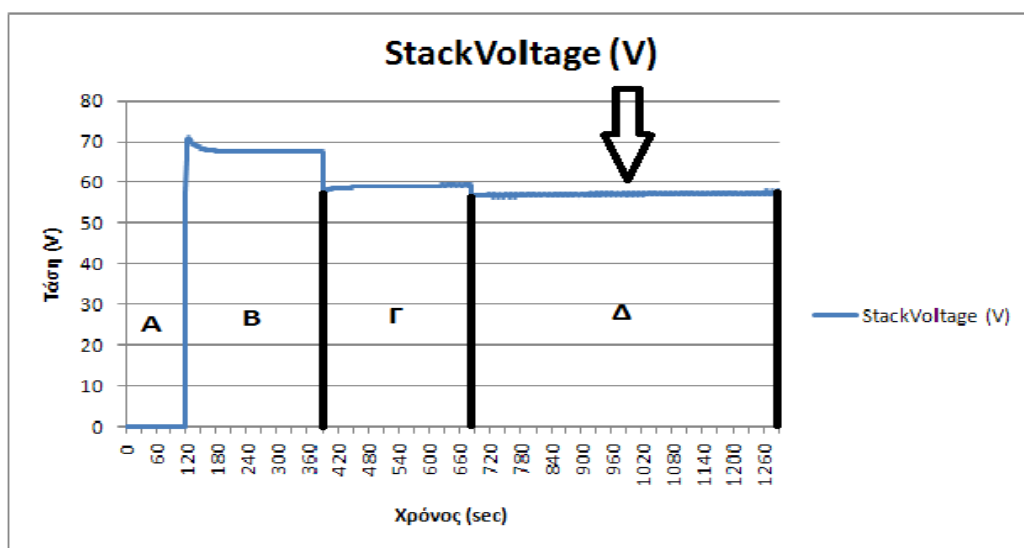


Διάγραμμα 5.15: Διάγραμμα Έντασης Ρεύματος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Δ

Η περιοχή λειτουργίας Δ είναι η περιοχή στην οποία η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί με σταθερή ένταση ρεύματος 23A με ρυθμιζόμενη τιμή στον αντιστροφέα 15A.

Παρατηρείται λοιπόν μια διαφορά ανάμεσα στην ένταση του ρεύματος σαν εντολή στον αντιστροφέα και σε αυτή που λειτουργεί η πειραματική κυψέλη της τάξεως των 7A. Η διαφορά αυτή είναι λίγο μικρότερη σε σχέση με τη περιοχή Γ και δείχνει ότι η διαφορά των 7-7,5 A είναι η σταθερή διαφορά ανάμεσα στην εντολή που δίνεται στον αντιστροφέα και στην ένταση του ρεύματος που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου εφόσον βρισκόμαστε στην περιοχή των ωμικών απωλειών.

5.6.2.4.3 Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου



Διάγραμμα 5.16: Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Δ

Η περιοχή λειτουργίας Δ είναι η περιοχή στην οποία η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί με τάση εξόδου στα 57,5V μέχρι το τέλος της πειραματικής διαδικασίας.

Η μείωση της τάσης εξόδου στα άκρα της κυψέλης καυσίμου είναι αναμενόμενη όπως αναλύθηκε και στην υποενότητα 5.6.2.3.3.

5.6.2.4.4 Διάγραμμα κατανάλωσης H₂

Το διάγραμμα κατανάλωσης υδρογόνου κατασκευάστηκε από τα αποτελέσματα του πίνακα 5.3.



Διάγραμμα 5.17: Διάγραμμα κατανάλωσης H₂ περιοχής λειτουργίας Δ

Η ποσότητα του υδρογόνου που καταναλώθηκε στη περιοχή Δ είναι:

$$190,821 - 77,054 = 113,768 \text{ l.}$$

Σύμφωνα με το HHV του υδρογόνου, η ενέργεια από τη κατανάλωση του υδρογόνου στην περιοχή λειτουργίας Δ είναι $113,768 * 12,745 = 1449,968 \text{ kJ}$ ή $0,403 \text{ kWh}$.

(Εξίσωση 5.6)

Σύμφωνα με το LHV του υδρογόνου, η ενέργεια από τη κατανάλωση του υδρογόνου στη περιοχή λειτουργίας Δ είναι $113,768 * 10,783 = 1226,756 \text{ kJ}$ ή $0,341 \text{ kWh}$.

5.6.2.4.5 Ηλεκτρική απόδοση συστοιχίας κυψελίδων καυσίμου

Η ηλεκτρική απόδοση της συστοιχίας κυψελίδων για την περιοχή λειτουργίας Δ δίνεται από τον τύπο:

$$\eta = \frac{E_{\Delta \text{ stack}}}{E_{\Delta \text{ HHV}}} \xrightarrow{(5.5) \quad (5.6)} \frac{0,221}{0,403} = 0,548 \text{ ή } 54,8\%$$

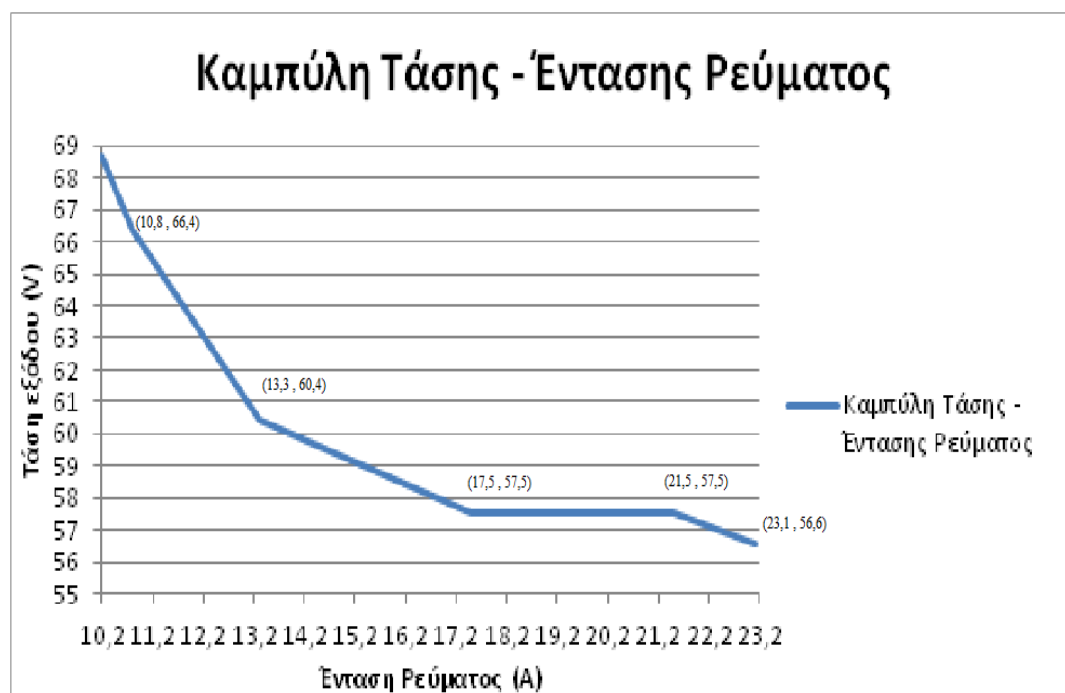
Όπου $E_{\Delta \text{ stack}}$: η ηλεκτρική ενέργεια στην περιοχή λειτουργίας Δ.

$E_{\Delta \text{ HHV}}$: η ενέργεια από τη κατανάλωση του υδρογόνου στην περιοχή λειτουργίας Δ.

Παρατηρείται ότι στα 1320 W , η απόδοση της κυψέλης καυσίμου αυξάνεται από το $51,8\%$ στο $54,8\%$ σε σχέση με τη περιοχή λειτουργίας Γ κάτι που επιβεβαιώνει τα στοιχεία του πίνακα 5.1, όπου η απόδοση της κυψέλης καυσίμου αυξάνεται όσο πλησιάζει στο 60% της ονομαστικής της ισχύος (περίπου 3 kW με απόδοση $>50\%$).

5.6.2.5 Διάγραμμα Τάσης – Έντασης Ρεύματος

Το διάγραμμα 5.18 κατασκευάστηκε συγχρονίζοντας τις μετρήσεις της τάσης και της έντασης ρεύματος για τη κυψέλη καυσίμου, έχει τη μορφή της χαρακτηριστικής εξίσωσης του διαγράμματος 3.3 και παρουσιάζει τη καμπύλη που δημιουργείται μετά την έναρξη της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου.



Διάγραμμα 5.18: Διάγραμμα Τάσης – Έντασης Ρεύματος

Σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις, τα ευθύγραμμα τμήματα που δημιουργούνται και παρουσιάζονται στο διάγραμμα 5.18 είναι τα ακόλουθα:

- 10,2-10,8
- 10,8-13,3
- 13,3-17,5
- 17,5-21,5
- 21,5-23,1

Αν συγκριθεί η ένταση ρεύματος κάθε περιοχής λειτουργίας με τα παραπάνω ευθύγραμμα τμήματα, τότε η περιοχή λειτουργίας A δεν περιλαμβάνεται διότι η κυψέλη καυσίμου δεν βρίσκεται σε λειτουργία. Η περιοχή λειτουργίας B με ένταση

ρεύματος 10,2A βρίσκεται στο 1^ο ευθύγραμμο τμήμα. Η περιοχή λειτουργίας Γ με ένταση ρεύματος 17,5A βρίσκεται στο 4^ο ευθύγραμμο τμήμα ενώ η περιοχή λειτουργίας Δ με ένταση ρεύματος 23A βρίσκεται στο 5^ο ευθύγραμμο τμήμα.

Μια προσέγγιση για το συσχετισμό των περιοχών λειτουργίας της πειραματικής διαδικασίας με τις περιοχές απωλειών ενεργοποίησης και ωμικών απωλειών είναι μέσω του υπολογισμού της κλίσης των ευθειών.

Για τον υπολογισμό της κλίσης των ευθειών χρησιμοποιήθηκε ο τύπος:

$$a = \frac{|y_2 - y_1|}{x_2 - x_1}$$

Οπότε για κάθε ευθύγραμμο τμήμα του διαγράμματος ισχύει:

- 10,2-10,8: $a = \frac{|y_2 - y_1|}{x_2 - x_1} = \frac{68,7 - 66,4}{10,8 - 10,2} = 3,8$
- 10,8-13,3: $a = \frac{|y_2 - y_1|}{x_2 - x_1} = \frac{66,4 - 60,4}{13,3 - 10,8} = 2,4$
- 13,3-17,5: $a = \frac{|y_2 - y_1|}{x_2 - x_1} = \frac{60,4 - 57,5}{17,5 - 13,3} = 0,7$
- 17,5-21,5: $a = \frac{|y_2 - y_1|}{x_2 - x_1} = \frac{57,5 - 57,5}{21,5 - 17,5} = 0$
- 21,5-23,1: $a = \frac{|y_2 - y_1|}{x_2 - x_1} = \frac{57,5 - 56,6}{23,1 - 21,5} = 0,5$

Συμπερασματικά, τα ευθύγραμμα τμήματα που αντιστοιχούν σε ένταση ρεύματος 10,2-13,3, όπου οι ευθείες παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη κλίση, αναφέρονται στις απώλειες ενεργοποίησης ενώ στη συνέχεια παρατηρείται μια μικρότερη κλίση που αυτό δηλώνει τη μετάβαση στην περιοχή με τις ωμικές απώλειες. Οπότε, στην περιοχή λειτουργίας Β παρουσιάζονται απώλειες ενεργοποίησης, ενώ στις περιοχές λειτουργίας Γ και Δ ωμικές απώλειες. Εκεί οφείλεται και η αύξηση της απόδοσης της κυψέλης καυσίμου από την περιοχή λειτουργίας Β στην περιοχή λειτουργίας Γ.

5.6.3 Πειραματικές μετρήσεις κυψέλης καυσίμου και αντιστροφέα (inverter)

Σε αντίθεση με την ανάλυση της παραγράφου 5.9.2, στη συγκεκριμένη παράγραφο γίνεται μια ανάλυση στο σύστημα κυψέλης καυσίμου και αντιστροφέα. Ο διαχωρισμός αυτός δίνει τη δυνατότητα να υπολογιστούν οι απώλειες των περιφερειακών συστημάτων και του αντιστροφέα αλλά και το ποσό της θερμότητας που παράγεται αλλά δεν ανακτάται. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορέσει να κατασκευαστεί το ισοζύγιο μάζας - ενέργειας για την πειραματική κυψέλη καυσίμου.

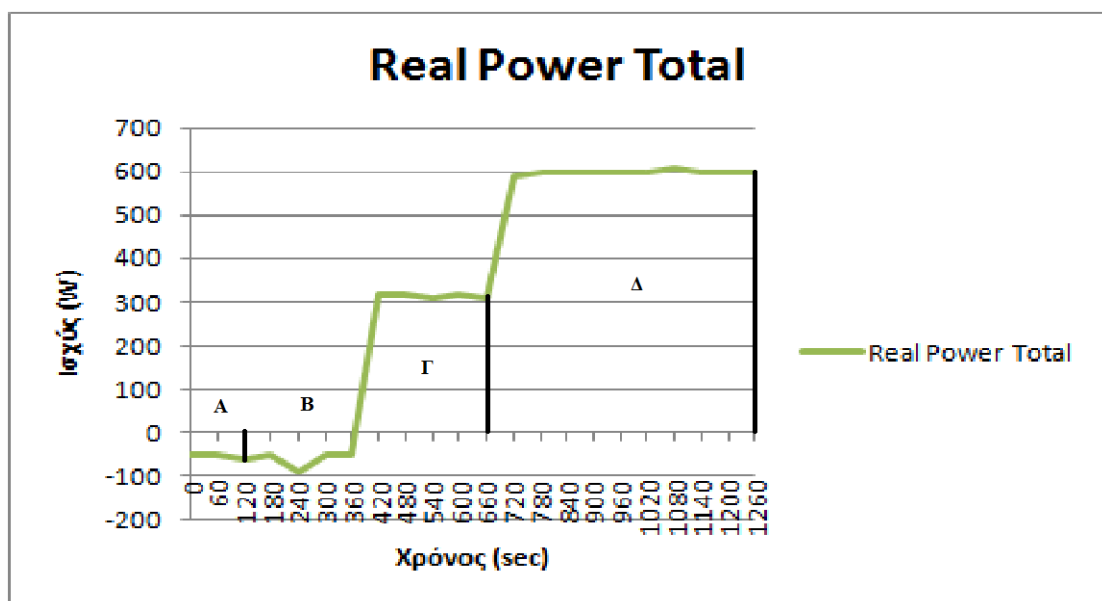
Για τον υπολογισμό της μεταβολής της ενέργειας (4^η στήλη του πίνακα 5.4), έγινε για κάθε χρονική στιγμή αφαίρεση της υπάρχουσας ενέργειας που εισέρχεται στο κτίριο από την αρχική ενέργεια που εισέρχεται στο κτίριο τη χρονική στιγμή $t=0$ sec (2^η στήλη).

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα μετρήσεων κυψέλης καυσίμου μαζί με αντιστροφέα

| Χρόνος (sec) | Ενέργεια (kWh) | Ισχύς (W) | Μεταβολή ενέργειας (kWh) | T _{H2O} (°C) |
|--------------|----------------|-----------|--------------------------|-----------------------|
| 0 | 7,817 | -50 | 0 | 27,6 |
| 60 | 7,817 | -50 | 0 | 27,6 |
| 120 | 7,817 | -60 | 0 | 27,6 |
| 180 | 7,817 | -50 | 0 | 27,4 |
| 240 | 7,817 | -90 | 0 | 27,5 |
| 300 | 7,817 | -50 | 0 | 27,6 |
| 360 | 7,817 | -50 | 0 | 27,8 |
| 420 | 7,821 | 320 | 0,004 | 27,6 |
| 480 | 7,826 | 320 | 0,009 | 28,7 |
| 540 | 7,831 | 310 | 0,014 | 29,1 |
| 600 | 7,836 | 320 | 0,019 | 29,6 |
| 660 | 7,841 | 310 | 0,024 | 30,1 |
| 720 | 7,85 | 590 | 0,033 | 30,8 |
| 780 | 7,86 | 600 | 0,043 | 31,4 |
| 840 | 7,87 | 600 | 0,053 | 32,1 |

| | | | | |
|------|------|-----|-------|------|
| 900 | 7,88 | 600 | 0,063 | 32,6 |
| 960 | 7,89 | 600 | 0,073 | 33,2 |
| 1020 | 7,9 | 600 | 0,083 | 33,8 |
| 1080 | 7,91 | 610 | 0,093 | 34,3 |
| 1140 | 7,92 | 600 | 0,103 | 34,8 |
| 1200 | 7,93 | 600 | 0,113 | 35,1 |
| 1260 | 7,94 | 600 | 0,123 | 35,7 |

Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου



Διάγραμμα 5.19: Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου

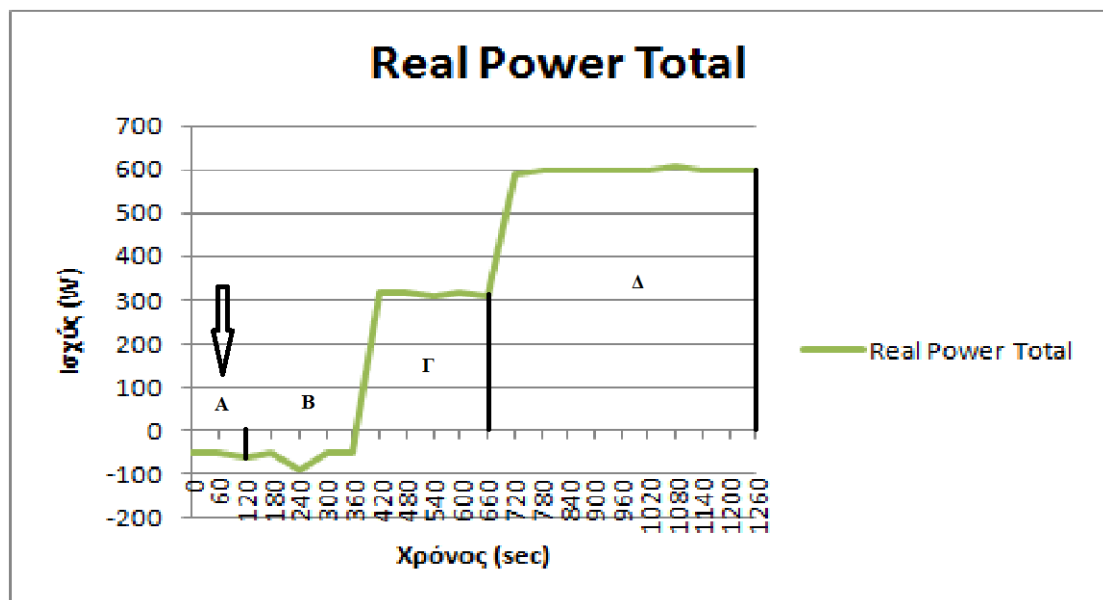
Σύμφωνα με τις μετρήσεις από την κυψέλη καυσίμου μαζί με τον αντιστροφέα η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου μπορεί να χωριστεί στις αντίστοιχες 4 περιοχές λειτουργίας όπως και προηγουμένως:

- Η πρώτη περιοχή ή περιοχή A όπου η κυψέλη καυσίμου είναι σε κατάσταση αναμονής με διάρκεια από 0 έως 120 sec και μέση τιμή ισχύος του συστήματος ίση με -50W.
- Η δεύτερη περιοχή ή περιοχή B που αντιστοιχεί σε 5A ρυθμιζόμενη τιμή στον αντιστροφέα με διάρκεια από 120 έως 390 sec και μέση τιμή ισχύος του συστήματος ίση με -60W.

- Η Τρίτη περιοχή ή περιοχή Γ που αντιστοιχεί σε 10Α ρυθμιζόμενη τιμή στον αντιστροφέα με διάρκεια από 390 έως 685 sec και μέση τιμή ισχύος του συστήματος ίση με 310W.
- Η τέταρτη περιοχή ή περιοχή Δ που αντιστοιχεί σε 15Α ρυθμιζόμενη τιμή στον αντιστροφέα με διάρκεια από 685 έως 1288 sec και μέση τιμή ισχύος του συστήματος ίση με 600W.

5.6.3.1 Πειραματικά αποτελέσματα της περιοχής λειτουργίας A

5.6.3.1.1 Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου



Διάγραμμα 5.20: Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας A

Παρατηρώντας τα πειραματικά αποτελέσματα της περιοχής λειτουργίας A συμπεραίνεται ότι η ενέργεια που καταναλώνουν τα περιφερειακά συστήματα όσο η κυψέλη καυσίμου είναι σε αναμονή είναι γύρω στα 50W. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι ενώ η κυψέλη καυσίμου βρίσκεται σε αναμονή, στο διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου, η ισχύς που πηγαίνει στο κτίριο είναι ίση με -0,05 kW.

5.6.3.1.2 Διάγραμμα Μεταβολής Ενέργειας – Χρόνου



Διάγραμμα 5.21: Διάγραμμα Μεταβολής Ενέργειας – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Α

Εφόσον η κυψέλη καυσίμου βρίσκεται σε αναμονή, στην περιοχή λειτουργίας Α δεν παράγεται ηλεκτρική ενέργεια, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 5.21.

Άρα $E_{\text{κτιρίου Α}}=0$

5.6.3.1.3 Θερμότητα Q

Για την ανάλυση του συστήματος κυψέλης καυσίμου και αντιστροφέα, που γίνεται στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο, πρέπει να υπολογιστεί και η θερμότητα που παράγεται σύμφωνα και με το σχήμα 5.10. Κάτι τέτοιο υπολογίζεται μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας του H_2O του κυκλώματος ψύξης.

Για τον υπολογισμό της θερμότητας χρησιμοποιήθηκε ο τύπος:

$$Q = m_{H_2O} * C_p * \Delta t \quad (\text{Εξίσωση 5.7})$$

Για την περιοχή λειτουργίας Α ισχύει:

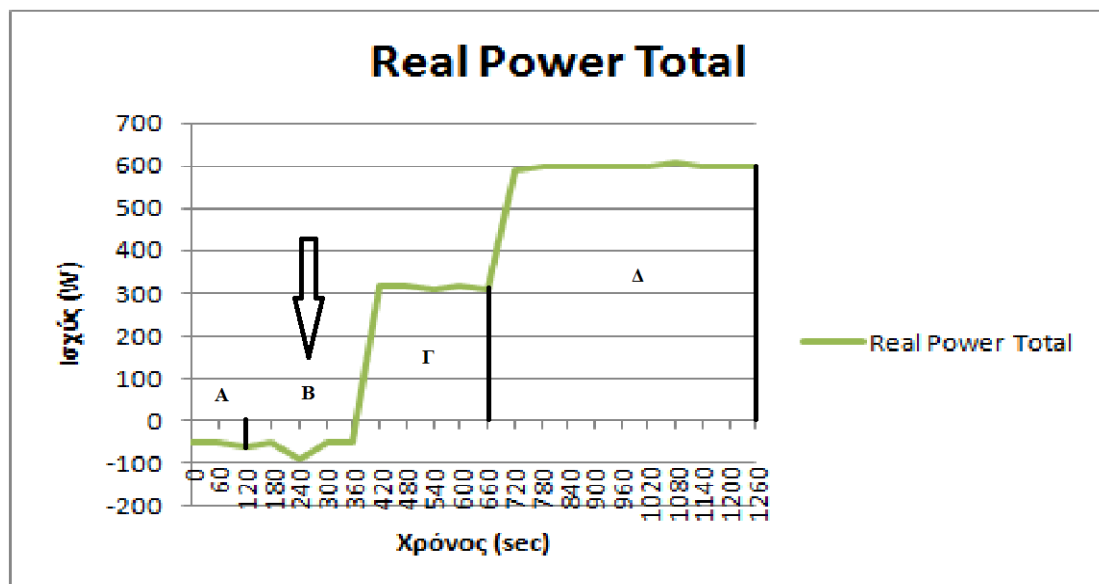
$$Q = 6700 * 1,165 * 10^{-5} * (27,6 - 27,6) = 0 \text{ kWh}$$

Όπου $m_{H_2O} = V_{H_2O} = 6700 \text{ l}$ (πιν 5.1)

$$C_p = 1,165 * 10^{-6} \text{ kWh / gr}^{\circ} \text{C}$$

5.6.3.2 Πειραματικά αποτελέσματα της περιοχής λειτουργίας B

5.6.3.2.1 Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου



Διάγραμμα 5.22: Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας B

Περιοχή λειτουργίας B: Στη συγκεκριμένη περιοχή παρατηρείται ότι η ισχύς στην έξοδο της κυψέλης καυσίμου μαζί με τον αντιστροφέα είναι -60 W.

Παρατηρείται λοιπόν μια σχετική ομοιότητα ανάμεσα στην ισχύ του συστήματος κυψέλης καυσίμου και αντιστροφέα της περιοχής λειτουργίας A και B κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι με τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου στα 687W η ενέργεια που απαιτείται από τα περιφερειακά συστήματα και τον αντιστροφέα είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου με αποτέλεσμα την ένδειξη ισχύος των -60W.

5.6.3.2.2 Διάγραμμα Μεταβολής Ενέργειας – Χρόνου



Διάγραμμα 5.23: Διάγραμμα Μεταβολής Ενέργειας – Χρόνου περιοχής λειτουργίας B

Παρόλο που η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί σε ισχύ 687W, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στην περιοχή λειτουργίας B και τροφοδοτείται στο κτίριο, όπως δείχνει και το διάγραμμα είναι 0. Άρα $E_{B \text{ κτιρίου}} = 0$ (Εξίσωση 5.8)

5.6.3.2.3 Απώλειες περιφερειακών συστημάτων και αντιστροφέα

Για τον υπολογισμό των απωλειών των περιφερειακών συστημάτων και του αντιστροφέα πρέπει να υπολογιστεί η ισχύς που απαιτούν τα περιφερειακά συστήματα και ο αντιστροφέας για να λειτουργήσουν. Οπότε ισχύει:

$$P_{B \text{ περιφ.}+\text{αντιστρ.}} = P_{B \text{ συστοιχίας κυψελίδων καυσίμου}} - P_{B \text{ κτιρίου}} = 687 - (-60) = 747W$$

Άρα οι απώλειες των περιφερειακών συστημάτων και του αντιστροφέα δίνονται από τον τύπο:

$$E_{B \text{ περιφ.}+\text{αντιστρ.}} = P_{B \text{ περιφ.}+\text{αντιστρ.}} * T$$

$$E_{B \text{ περιφ.}+\text{αντιστρ.}} = \frac{747}{1000} * \frac{390-120}{3600} = 0,056 \text{ kWh}$$

5.6.3.2.4 Ηλεκτρική απόδοση κυψέλης καυσίμου και αντιστροφέα

Η ηλεκτρική απόδοση της κυψέλης καυσίμου μαζί με τον αντιστροφέα για την περιοχή λειτουργίας B δίνεται από τον τύπο:

$$n = \frac{E_{B \text{ κτιρίου}}}{E_{B \text{ HHV}}} \xrightarrow{(5.8) \quad (5.2)} n \geq \frac{0}{0,11} \geq 0 \text{ ή } 0\%$$

Όπου $E_{B \text{ κτιρίου}}$: Η ηλεκτρική ενέργεια που εισέρχεται στο κτίριο στην περιοχή λειτουργίας B.

$E_{B \text{ HHV}}$: Η ενέργεια από τη κατανάλωση του H_2 στην περιοχή λειτουργίας B.

5.6.3.2.5 Θερμότητα Q

Για τον υπολογισμό της θερμότητας χρησιμοποιήθηκε ο τύπος (5.7), οπότε για την περιοχή λειτουργίας B ισχύει:

$$Q_B = 6700 * 1,165 * 10^{-6} * (27,8 - 27,6) = 0,002 \text{ kWh}$$

5.6.3.2.6 Ποσοστά μετατροπής Ενέργειας σε Θερμότητα και Ηλεκτρική Ενέργεια

Το ποσοστό της ενέργειας που μετετρέπη σε θερμότητα στην περιοχή λειτουργίας B είναι:

$$\frac{Q_B}{E_{B \text{ HHV}}} = \frac{0,002}{0,109} = 0,018 \text{ ή } 1,8\%$$

Το ποσοστό της ενέργειας που μετετρέπη σε ηλεκτρική ενέργεια στην περιοχή λειτουργίας B είναι:

$$\frac{E_{B \text{ stack}} + E_{B \text{ περιφ.+αντιστρ.}}}{E_{B \text{ HHV}}} = \frac{0,051 + 0,056}{0,109} = 0,981 \text{ ή } 98,1\%$$

Το ποσοστό της ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου που τροφοδοτήθηκε στο κτίριο είναι:

$$\frac{E_{B \text{ κτιρίου}}}{E_{B \text{ stack}}} = \frac{0}{0,051} = 0\%$$

Το ποσοστό της ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου που κατανάλωσαν τα περιφερειακά και ο αντιστροφείας είναι:

$$\frac{E_{B \text{ περιφ.} + \text{αντιστρ.}}}{E_{B \text{ stack}}} > 100\%$$

εξίσου και η αρνητική τιμή στην τιμή της ισχύος του συστήματος κυψέλης καυσίμου και αντιστροφέα στην περιοχή λειτουργίας Β.

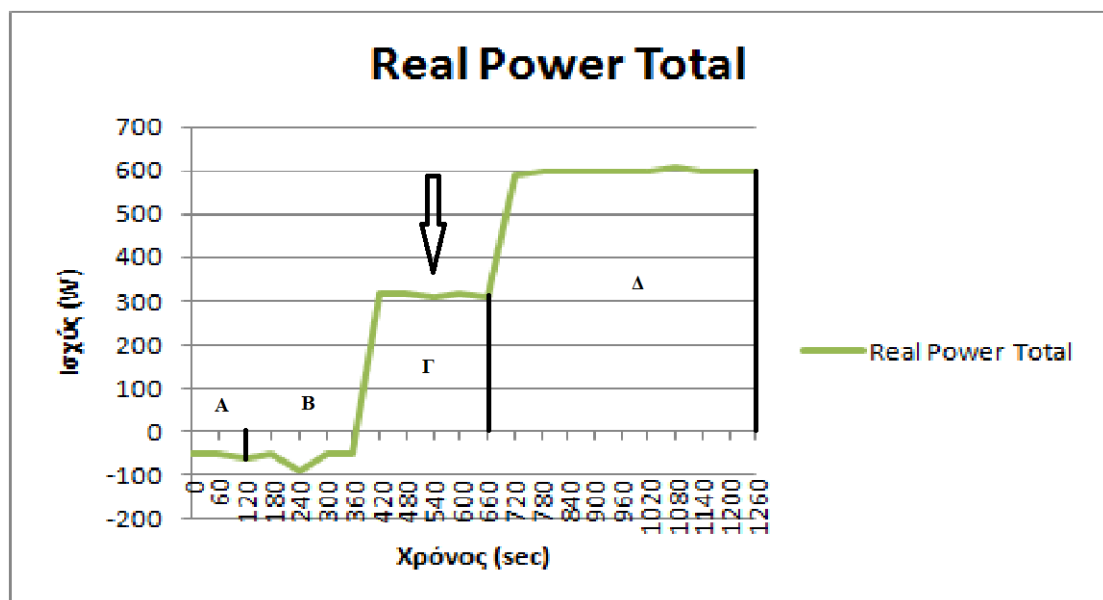
5.6.3.2.7 Ηλεκτρική Απόδοση κυψέλης καυσίμου και αντιστροφέα σε περίπτωση ανάκτησης θερμότητας

Δίνεται από τον τύπο:

$$\eta' = \frac{E_{B \text{ κτιρίου}} + Q_B}{E_{B \text{ HHV}}} = \frac{0 + 0,002}{0,11} = 0,018 \text{ ή } 1,8\%$$

5.6.3.3 Πειραματικά αποτελέσματα της περιοχής λειτουργίας Γ

5.6.3.3.1 Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου



Διάγραμμα 5.24: Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Γ

Περιοχή λειτουργίας Γ: Στη συγκεκριμένη περιοχή η ισχύς της κυψέλης καυσίμου μαζί με τον αντιστροφέα αυξάνεται αρχικά με μεγάλο ρυθμό από την τιμή -60W μέχρι την τιμή 316W όπου σταθεροποιείται μέχρι το πέρας των 685 δευτερολέπτων.

5.6.3.3.2 Διάγραμμα Μεταβολής Ενέργειας – Χρόνου



Διάγραμμα 5.25: Διάγραμμα Μεταβολής Ενέργειας – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Γ

Στην περιοχή λειτουργίας Γ παρατηρείται συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου μαζί με τον αντιστροφέα που αγγίζει τις 0,024 kWh.

$$\text{Άρα } E_{\Gamma \text{ κτιρίου}} = 0,024 \text{ kWh} \quad (\text{Εξίσωση 5.9})$$

5.6.3.3.3 Απώλειες περιφερειακών συστημάτων και αντιστροφέα

Για τον υπολογισμό των απωλειών των περιφερειακών συστημάτων και του αντιστροφέα πρέπει να υπολογιστεί η ισχύς που απαιτούν τα περιφερειακά συστήματα και ο αντιστροφέας για να λειτουργήσουν. Οπότε ισχύει:

$$\begin{aligned} P_{\Gamma \text{ περιφ.}+\text{αντιστρ.}} &= P_{\Gamma \text{ συστοιχίας κυψελίδων καυσίμου}} - P_{\Gamma \text{ κτιρίου}} = 1034 - (316) \\ &= 718W \end{aligned}$$

Άρα οι απώλειες των περιφερειακών συστημάτων και του αντιστροφέα δίνονται από τον τύπο:

$$\begin{aligned} E_{\Gamma \text{ περιφ.}+\text{αντιστρ.}} &= P_{\Gamma \text{ περιφ.}+\text{αντιστρ.}} * T \\ E_{\Gamma \text{ περιφ.}+\text{αντιστρ.}} &= \frac{718}{1000} * \frac{685-390}{3600} = 0,059 \text{ kWh} \end{aligned}$$

5.6.3.3.4 Ηλεκτρική απόδοση κυψέλης καυσίμου και αναστροφέα

Η ηλεκτρική απόδοση της κυψέλης καυσίμου μαζί με τον αντιστροφέα για την περιοχή λειτουργίας Γ δίνεται από τον τύπο:

$$n = \frac{E_{\Gamma \text{ κτιρίου}}}{E_{\Gamma \text{ HHV}}} \xrightarrow{(5.4) \quad (5.9)} n = \frac{0,024}{0,163} = 0,146 \text{ ή } 14,6\%$$

Όπου $E_{\Gamma \text{ κτιρίου}}$: Η ηλεκτρική ενέργεια που εισέρχεται στο κτίριο στην περιοχή λειτουργίας Γ.

$E_{\Gamma \text{ HHV}}$: Η ενέργεια από την κατανάλωση του υδρογόνου στην περιοχή λειτουργίας Γ.

5.6.3.3.5 Θερμότητα Q

Για τον υπολογισμό της θερμότητας χρησιμοποιήθηκε ο τύπος (5.7), οπότε για την περιοχή λειτουργίας Γ ισχύει:

$$Q_{\Gamma} = 6700 * 1,16482 * 10^{-6} * (30,2 - 27,8) = 0,019 \text{ kWh}$$

5.6.3.3.6 Ποσοστά μετατροπής Ενέργειας σε Θερμότητα και Ηλεκτρική Ενέργεια

Το ποσοστό της ενέργειας που μετετρέπη σε θερμότητα στην περιοχή λειτουργίας Γ είναι:

$$\frac{Q_{\Gamma}}{E_{\Gamma \text{ HHV}}} = \frac{0,019}{0,163} = 0,116 \text{ ή } 11,6\%$$

Το ποσοστό της ενέργειας που μετετρέπη σε ηλεκτρική ενέργεια στην περιοχή λειτουργίας Γ είναι:

$$\frac{E_{\Gamma \text{ stack}} + E_{\Gamma \text{ περιφ.+αντιστρ.}}}{E_{\Gamma \text{ HHV}}} = \frac{0,084 + 0,059}{0,163} = 0,877 \text{ ή } 87,7\%$$

Το ποσοστό της ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου που τροφοδοτήθηκε στο κτίριο είναι:

$$\frac{E_{\Gamma \text{ κτιρίου}}}{E_{\Gamma \text{ stack}}} = \frac{0,024}{0,084} = 28,57\%$$

Το ποσοστό της ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου που κατανάλωσαν τα περιφερειακά και ο αντιστροφέας είναι:

$$\frac{E_{\Gamma \text{ περιφ.} + \text{αντιστρ.}}}{E_{\Gamma \text{ stack}}} = \frac{0,059}{0,084} = 70,23\%$$

Η διαφορά του 1,2% μπορεί να οφείλεται στο υδρογόνο που δεν έχει καταναλωθεί για την παραγωγή ενέργειας.

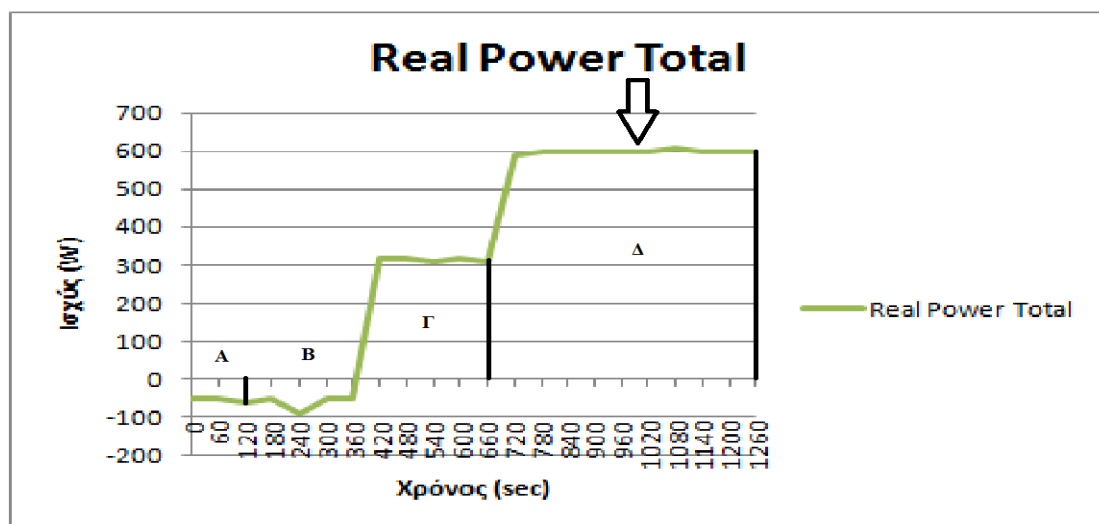
5.6.3.3.7 Ηλεκτρική Απόδοση κυψέλης καυσίμου και αντιστροφέα σε περίπτωση ανάκτησης θερμότητας

Δίνεται από τον τύπο:

$$n' = \frac{E_{\Gamma \text{ κτιρίου}} + Q_{\Gamma}}{E_{\Gamma \text{ HHV}}} = \frac{0,024 + 0,019}{0,163} = 0,263 \text{ ή } 26,3\%$$

5.6.3.4 Πειραματικά αποτελέσματα της περιοχής λειτουργίας Δ

5.6.3.4.1 Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου



Διάγραμμα 5.26: Διάγραμμα Ισχύος – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Δ

Περιοχή λειτουργίας Δ: Στη συγκεκριμένη περιοχή η ισχύς της κυψέλης καυσίμου μαζί με τον αντιστροφέα αυξάνεται αρχικά με μεγάλο ρυθμό από την τιμή 310W μέχρι την τιμή 600W όπου σταθεροποιείται μέχρι το πέρας των 1288 δευτερολέπτων.

5.6.3.4.2 Διάγραμμα Μεταβολής Ενέργειας – Χρόνου



Διάγραμμα 5.27: Διάγραμμα Μεταβολής Ενέργειας – Χρόνου περιοχής λειτουργίας Δ

Στην περιοχή λειτουργίας Δ παρατηρείται συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη κυψέλη καυσίμου μαζί με τον αντιστροφέα που ανέρχεται τις 0,123 kWh.

Η ηλεκτρική ενέργεια που εισέρχεται στο κτίριο στην περιοχή λειτουργίας Δ είναι:

$$E_{\Delta \text{ κτιρίου}} = 0,123 - 0,024 = 0,099 \text{ kWh} \quad (\text{Εξίσωση 5.10})$$

5.6.3.4.3 Απώλειες περιφερειακών συστημάτων και αντιστροφέα

Για τον υπολογισμό των απωλειών των περιφερειακών συστημάτων και του αντιστροφέα πρέπει να υπολογιστεί η ισχύς που απαιτούν τα περιφερειακά συστήματα και ο αντιστροφέας για να λειτουργήσουν. Οπότε ισχύει:

$$\begin{aligned} P_{\Delta \text{ περιφ.} + \text{αντιστρ.}} &= P_{\Delta \text{ συστοιχίας κυψελίδων καυσίμου}} - P_{\Delta \text{ κτιρίου}} = 1320 - (600) \\ &= 720W \end{aligned}$$

Άρα οι απώλειες των περιφερειακών συστημάτων και του αντιστροφέα δίνονται από τον τύπο:

$$E_{\Delta \text{ περιφ.}+\text{αντιστρ.}} = P_{\Delta \text{ περιφ.}+\text{αντιστρ.}} * t$$

$$E_{\Delta \text{ περιφ.}+\text{αντιστρ.}} = \frac{720}{1000} * \frac{1288-690}{3600} = 0,12 \text{ kWh}$$

5.6.3.4.4 Ηλεκτρική απόδοση κυψέλης καυσίμου και αναστροφέα

Η ηλεκτρική απόδοση της κυψέλης καυσίμου μαζί με τον αντιστροφέα για την περιοχή λειτουργίας Δ δίνεται από τον τύπο:

$$n = \frac{E_{\Delta \text{ κτιρίου}}}{E_{\Delta \text{ HHV}}} \xrightarrow{(5.6) \quad (5.10)} n = \frac{0,099}{0,403} = 0,245 \text{ ή } 24,5\%$$

Όπου $E_{\Delta \text{ κτιρίου}}$: Η ηλεκτρική ενέργεια που εισέρχεται στο κτίριο στην περιοχή λειτουργίας Δ.

$E_{\Delta \text{ HHV}}$: Η ενέργεια από τη κατανάλωση του H_2 στην περιοχή λειτουργίας Δ.

5.6.3.4.5 Θερμότητα Q

Για τον υπολογισμό της θερμότητας χρησιμοποιήθηκε ο τύπος (5.7), οπότε για την περιοχή λειτουργίας Δ ισχύει:

$$Q_{\Delta} = 6700 * 1,16482 * 10^{-6} * (35,7 - 30,2) = 0,042 \text{ kWh}$$

5.6.3.4.6 Ποσοστά μετατροπής Ενέργειας σε Θερμότητα και Ηλεκτρική Ενέργεια

Το ποσοστό της ενέργειας που μετετρέπη σε θερμότητα στην περιοχή λειτουργίας Δ είναι:

$$\frac{Q_{\Delta}}{E_{\Delta \text{ HHV}}} = \frac{0,042}{0,403} = 0,106 \text{ ή } 10,6\%$$

Το ποσοστό της ενέργειας που μετετρέπη σε ηλεκτρική ενέργεια στην περιοχή λειτουργίας Δ είναι:

$$\frac{E_{\Delta \text{ stack}} + E_{\Delta \text{ περιφ. + αντιστρ.}}}{E_{\Delta \text{ HHV}}} = \frac{0,221 + 0,12}{0,403} = 0,846 \text{ ή } 84,6\%$$

Το ποσοστό της ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου που τροφοδοτήθηκε στο κτίριο είναι:

$$\frac{E_{\Delta \text{ κτιρίου}}}{E_{\Delta \text{ stack}}} = \frac{0,099}{0,221} = 44,8\%$$

Το ποσοστό της ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου που κατανάλωσαν τα περιφερειακά και ο αντιστροφέας είναι:

$$\frac{E_{\Delta \text{ περιφ. + αντιστρ.}}}{E_{\Delta \text{ stack}}} = \frac{0,12}{0,221} = 54,3\%$$

Η διαφορά του 0,9% μπορεί να οφείλεται στο υδρογόνο που δεν έχει καταναλωθεί για την παραγωγή ενέργειας.

5.6.3.4.7 Ηλεκτρική Απόδοση κυψέλης καυσίμου και αντιστροφή σε περίπτωση ανάκτησης θερμότητας

Δίνεται από τον τύπο:

$$n' = \frac{E_{\Delta \text{ κτιρίου}} + Q_{\Delta}}{E_{\Delta \text{ HHV}}} = \frac{0,099 + 0,042}{0,403} = 0,349 \text{ ή } 34,9\%$$

5.7 Ισοζύγιο Μάζας - Ενέργειας

Ο στόχος της πειραματικής διαδικασίας της διπλωματικής εργασίας ήταν η κατασκευή ενός ισοζυγίου μάζας – ενέργειας με σκοπό τον έλεγχο της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου στις εγκαταστάσεις του Λαυρίου, με την οποία πραγματοποιήθηκε το πείραμα.

$$\mathbf{E_{H_2 \text{ χημική}} = (E_{\text{stack}} + E_{\text{περιφ. + αντιστρ.}}) + (Q)}$$

Όπου $N_{\text{φιαλών}}$: ο αριθμός των φιαλών H_2

V_{H_2} : ο όγκος του H_2 που καταναλώθηκε σε κάθε φιάλη

$[HHV]=12,745$ kJ/l Η θεωρητική ενέργεια που δίνει καιγόμενο το υδρογόνο

V_{stack} : Τάση εξόδου στο stack

I_{stack} : Ένταση ρεύματος στο stack

t : Ο χρόνος λειτουργίας του stack

$E_{περιφ.+αντιστρ.}$: Ενέργεια περιφερειακών συστημάτων

$m_{H_2O} = V_{H_2O}$: όγκος του νερού στο δοχείο ψύξης

C_p : Ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού

ΔT_{H_2O} : η μεταβολή της θερμοκρασίας του νερού

Πίνακας 5.5: Η ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου PEM και η ενέργεια που δίνει το H₂

| Περιοχή | E_{stack} | $E_{περιφ.+αντιστρ.}$ | Q | Άθροισμα | E_{H_2} LHV | E_{H_2} HHV |
|----------|--------------|-----------------------|--------------|--------------|------------------|------------------|
| B | 0,051 | 0,056 | 0,002 | 0,109 | 0,092 | 0,109 |
| Γ | 0,084 | 0,059 | 0,019 | 0,162 | 0,138 | 0,163 |
| Δ | 0,221 | 0,12 | 0,043 | 0,384 | 0,339 | 0,403 |

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα στον πίνακα 5.5 παρατηρείται η σχέση που δημιουργείται ανάμεσα στη συνολική ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου τύπου PEM, που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, σε σχέση με το LHV και το HHV του υδρογόνου για κάθε επίπεδο λειτουργίας.

Η διαφορά των αποτελεσμάτων της 5^{ης} στήλης του πίνακα 5.5 με το LHV του H₂ στον ίδιο πίνακα είναι λογική διότι στο LHV του H₂ δεν υπολογίζεται η ενέργεια που προκύπτει από την εξάτμιση του νερού. Οπότε στη συγκεκριμένη περίπτωση τα αποτελέσματα της ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου θα πλησιάζουν περισσότερο το HHV του υδρογόνου.

Για την περιοχή λειτουργίας A: Η κυψέλη καυσίμου βρίσκεται σε αναμονή οπότε η δεν έχει νόημα η δημιουργία ισοζυγίου για τη συγκεκριμένη περιοχή.

Για την περιοχή λειτουργίας B: Για τη συγκεκριμένη περιοχή επειδή παρατηρείται ότι το σύστημα κυψέλη καυσίμου – αντιστροφείας καταναλώνει ενέργεια από το κτίριο τότε δεν ισχύουν τα ίδια δεδομένα με πριν άρα το ισοζύγιο πρέπει να τροποποιηθεί. Για τη συγκεκριμένη περιοχή λειτουργίας λοιπόν το ισοζύγιο μάζας – ενέργειας γίνεται:

$$E_{H_2 \text{ χημική}} + E_{\text{κτιρίου}} = (E_{\text{stack}} + E_{\text{περιφ.+αντιστρ.}}) + (Q)$$

$$E_{\text{κτιρίου}} = \frac{60 \cdot (360 - 120)}{1000 \cdot 3600} = 0,004 \text{ kWh}$$

Πίνακας 5.6: Η ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου PEM και η ενέργεια που δίνει το H₂ στη περιοχή λειτουργίας B

| Περιοχή | E_{stack} | E_{περιφ.+αντιστρ.} | Q | Άθροισμα | E_{H2} LHV | E_{H2} HHV | E_{από} κτίριο |
|----------------|--------------------------|------------------------------------|--------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| B | 0,051 | 0,056 | 0,002 | 0,109 | 0,092 | 0,109 | 0,004 |

Παρατηρείται μια απόκλιση 3,6% ή 4 Wh λιγότερες ανάμεσα στην ενέργεια από την πειραματική κυψέλη καυσίμου PEM και το HHV του υδρογόνου μαζί με την ενέργεια που κατανάλωσε από το δίκτυο. Τα πειραματικά αποτελέσματα λοιπόν δείχνουν ότι το ισοζύγιο ισχύει ενώ η διαφορά του 4,4% μπορεί να οφείλεται στο υδρογόνο που δεν έχει καταναλωθεί από την κυψέλη καυσίμου.

Για την περιοχή λειτουργίας Γ: Παρατηρείται μια απόκλιση 0,6% ή 1 Wh λιγότερης ανάμεσα στην ενέργεια από την πειραματική κυψέλη καυσίμου PEM και το HHV του υδρογόνου. Τα πειραματικά αποτελέσματα λοιπόν δείχνουν ότι το ισοζύγιο ισχύει και η απόκλιση μπορεί να οφείλεται στο υδρογόνο που δεν έχει καταναλωθεί από την κυψέλη καυσίμου.

Για την περιοχή λειτουργίας Δ: Παρατηρείται μια απόκλιση 4,7% ή 19 Wh λιγότερες ανάμεσα στην ενέργεια από την πειραματική κυψέλη καυσίμου PEM και το HHV του υδρογόνου. Τα πειραματικά αποτελέσματα λοιπόν

δείχνουν ότι το ισοζύγιο ισχύει ενώ η διαφορά του 4,7% μπορεί να οφείλεται στο υδρογόνο που δεν έχει καταναλωθεί από την κυψέλη καυσίμου.

6. Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάστηκαν τα θερμοδυναμικά και τα ηλεκτροχημικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία μιας κυψέλης και εξετάστηκε ενδελεχώς, πως αυτά επηρεάζουν την τερματική τάση και γενικότερα τη δυναμική απόκρισή της. Επίσης, παρουσιάστηκαν τα επιμέρους συστήματα που χρειάζονται για την τροφοδότηση του φορτίου.

Στα πλαίσια της μελέτης, πραγματοποιήθηκε ανασκόπηση στα κυριότερα θεωρητικά μοντέλα που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία και προσομοιώνουν τη λειτουργία των κυψελών καυσίμου PEM. Παρουσιάστηκαν τα χαρακτηριστικά τους, οι παραδοχές και οι παράμετροι λειτουργίας τους καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους και επιτρέπουν την αναπαράσταση της μόνιμης και δυναμικής συμπεριφοράς της κυψέλης.

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε μια κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, ονομαστικής ισχύος 5,8 kW, η οποία εντάσσεται στο ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα H2SusBuild, στο οποίο συμμετέχει και το Ε.Μ.Π. και χρησιμοποιείται για την κάλυψη της ζήτησης σε ηλεκτρική ενός κτιρίου που βρίσκεται στο Τ.Π.Π.Α. Μελετήθηκε η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της συγκεκριμένης κυψέλης και καταγράφηκαν 4 σειρές μετρήσεων που αντιστοιχούν τόσο στην περιοχή που κυριαρχούν οι απώλειες ενεργοποίησης όσο και στη γραμμική περιοχή λειτουργίας των ωμικών απωλειών.

Όσον αφορά τη θεωρητική προσέγγιση το συμπέρασμα που προκύπτει είναι:

- Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος η κυψέλη καυσίμου τύπου PEM που μελετήθηκε στις εγκαταστάσεις του ΕΜΠ στο Λαύριο παρουσιάζει άριστη συμπεριφορά εξαιτίας της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας της. Επίσης, χαρακτηρίζεται από μεγάλη βιωσιμότητα καθώς η χαμηλή θερμοκρασία δεν ενισχύει τη διάβρωση και την κατάρρευση των εξαρτημάτων της κυψέλης. Σε αυτό συντελεί και ο στέρεος ηλεκτρολύτης ο οποίος μειώνει τα προβλήματα διάβρωσης και διαχείρισης του νερού.

Από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας διεξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Στην περιοχή λειτουργίας B ενώ η κυψέλη καυσίμου βρίσκεται σε λειτουργία παρατηρείται σχεδόν μηδενική παροχή ωφέλιμης ηλεκτρικής ενέργειας προς το κτίριο. Οπότε, για την παραγωγή ωφέλιμης ηλεκτρικής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου στο κτήριο αρκεί να δοθεί εντολή μεγαλύτερη των 5A στον αντιστροφέα. Επίσης, στην περιοχή λειτουργίας B, παρατηρείται μηδενική απόδοση του συστήματος κυψέλης καυσίμου και αντιστροφέα. Αυτό συμβαίνει διότι η ενέργεια που απαιτούν τα περιφερειακά συστήματα και ο αντιστροφέας για να λειτουργήσουν είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου.
- Στην περιοχή των ωμικών απωλειών παρατηρείται ότι η ισχύς που απαιτείται από τα περιφερειακά συστήματα μαζί με τον αντιστροφέα είναι σχετικά σταθερή και ίση με 720-725W. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί να προβλέπεται η ισχύς στην οποία χρειάζεται να λειτουργεί η κυψέλη καυσίμου ούτως ώστε να παρέχει την επιθυμητή ισχύ προς το κτίριο, η οποία μπορεί να καθοριστεί μέσω του αντιστροφέα.
- Η παραπάνω κυψέλη καυσίμου PEM που εξετάστηκε παρουσιάζει γρήγορη εκκίνηση και ικανοποιητική απόδοση, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι οι κυψέλες τέτοιου τύπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την παραγωγή

ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με ΑΠΕ για την κάλυψη των αναγκών ενός κτιρίου.

6.1 Σημεία προαγωγής της Επιστήμης

Τα τελευταία χρόνια, γίνεται ολοένα και ισχυρότερη η πεποίθηση για τη διάδοση των καθαρών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η κατασπατάληση των φυσικών ενεργειακών πόρων κατέστησαν το υδρογόνο ως τον πιο πιθανό μελλοντικό αντικαταστάτη των συμβατικών καυσίμων. Η χρησιμοποίηση του υδρογόνου σε συνδυασμό με άλλες ενεργειακές πηγές, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, έστρεψε το ενδιαφέρον της παγκόσμιας επιστημονικής κοινότητας προς τα υβριδικά συστήματα παραγωγής. Διάφορες εφαρμογές που συνδυάζουν το υδρογόνο με άλλες ΑΠΕ συναντώνται στη βιβλιογραφία. Τα καινοτομικά στοιχεία που περιλαμβάνει η παρούσα διπλωματική εργασία είναι τα εξής:

- Μπορεί να γίνει η πρόβλεψη της συγκεκριμένης τιμής ισχύος με την οποία θα λειτουργεί η πειραματική κυψέλη καυσίμου ούτως ώστε να παράγει την επιθυμητή ενέργεια χωρίς περεταίρω σπατάλη σε καύσιμο και χρόνο.
- Το ισοζύγιο μάζας – ενέργειας που παρουσιάστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία μπορεί να προβλέπει και να αναπαριστά χωρίς σημαντικό σφάλμα τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της πειραματικής κυψέλης στα επίπεδα ισχύος που εξετάστηκαν. Αναλύεται επίσης η ροή της ενέργειας στα διαφορετικά μέρη του συστήματος κυψέλης καυσίμου – αντιστροφέα.

6.2 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση

Μετά την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής αναδεικνύονται τα παρακάτω σημεία για περαιτέρω διερεύνηση:

- Η χρήση της πειραματικής διάταξης μέσω ενός υπολογιστικού προγράμματος για την αυτόματη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων ώστε το κτίριο να παρουσιάζει αυτονομία στη παραγωγή ενέργειας.
- Η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου μέχρι την ονομαστική της ισχύ ούτως ώστε να βγουν περισσότερα συμπεράσματα για τη λειτουργία και τη συμπεριφορά της πειραματικής κυψέλης σε υψηλά επίπεδα ισχύος.
- Η διενέργεια του πειράματος με ταυτόχρονη παρατήρηση της δυναμικής συμπεριφοράς της κυψέλης καυσίμου με αυξομειώσεις του φορτίου. Επίσης, σε περιπτώσεις μακροχρόνιων μεταβολών του φορτίου απαιτείται περαιτέρω ανάλυση στο πεδίο της διαχείρισης του νερού ώστε να διασαφηνιστούν οι επιδράσεις που παρουσιάζουν στη δυναμική συμπεριφορά της συστοιχίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΓΟΡΕΣ

- [1] www.physics4u.gr/energy/fuelcells.html
- [2] Γρ. Ιατρόπουλος, Ι. Κοντογιάννης: Μοντελοποίηση συστήματος διανεμημένης παραγωγής με κυψέλες καυσίμου και προσομοίωση μεταβατικών φαινομένων. Διπλωματική εργασία, Θεσσαλονίκη 2008.
- [3] Χρυσοβαλάντης Ο. Ζιώγος: Ρύθμιση συστήματος κυψέλης καυσίμου βασισμένη σε μαθηματικό μοντέλο προβλεπτικού ελέγχου (predictive) και ανίχνευση βέλτιστου σημείου λειτουργίας. Διπλωματική εργασία, Θεσσαλονίκη 2009.
- [4] Larminie J., Dicks A.: Fuel Cell Systems Explained. Wiley, 2000.
- [5] Schindele Lothar: Einsatz eines leistungselektronischen Stellglieds zur Parameteridentifikation und optimalen Betriebsführung von PEMBrennstoffzellensystemen.
- [6] <http://www.fuelcells.org/usfccproductlist.pdf>
- [7] Κ. Θ. Δέρβος: Εισαγωγή στα ημιαγωγικά υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις. Αθήνα 2007.
- [8] Dr. N. Lymberopoulos: Fuel Cells FUEL CELLS AND THEIR APPLICATION IN BIO-ENERGY, Center for Renewable Energy Sources (C.R.E.S.), February 2005.

- [9] Μαραμπέας Παντελής: Νέα τοπολογία ηλεκτρονικών ισχύος για εφαρμογές σε κυψέλες υδρογόνου αναστρέψιμης λειτουργίας. Διδακτορική Διατριβή Ε.Μ.Π, Αθήνα, 2008.
- [10] Αναγνώστης Σαμάνης: Ανάπτυξη προηγμένου συστήματος ελέγχου για κυψελίδα καυσίμου υδρογόνου με μέγιστη ισχύ – αλγόριθμος ελέγχου και εφαρμογή σε σταθερό φορτίο. Διπλωματική εργασία, Θεσσαλονίκη 2010.
- [11] Κωνσταντίνος Καραβότας: Μετρήσεις σε πειραματική διάταξη κυψέλης υδρογόνου (fuel cell) τεχνολογίας πολυμερικού ηλεκτρολύτη χαμηλής θερμοκρασίας (PEM). Διπλωματική εργασία Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2009.
- [12] US Fuel Cell Council: <http://www.usfcc.com>
- [13] Φούντη, 2005, Wallmark et al, 2001 και Larminie et al, 2003.
- [14] A. Kazim, H.T. Liu, P. Forges, Modeling of performance of PEM fuel cells with conventional and interdigitated flow fields, J. Appl. Electrochem. 29 (1999).
- [15] Gasser, Felix: An analytical, control-oriented state space model for a PEM fuel cell system. διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Λοζάνης, 2005.
- [16] Παναγιώτης Α. Ψαρρός: Προσομοίωση κυψελών καυσίμου με το πρόγραμμα PSPICE και σχεδίαση μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος για κυψέλες καυσίμου. Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π. Αθήνα, 2004.
- [17] www2.magnetek.com
- [18] Thomas C., Zalbowitz M.: Fuel Cells Green Power. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, 2000.
- [19] M. Uzunoglu, M. S. Alam: Dynamic modeling, desing and simulation of a PEM fuel cell/ultra-capacitor hybrid system for vehicular applications. IEEE Trans. Energy Conversion, Vol 21, No. 3, pp. 767-775, Sep 2006.
- [20] Ιωάννης Μεξής: Τεχνικές προσομοίωσης συστημάτων κυψελών καυσίμου. Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π. Αθήνα, 2006.
- [21] Σ. Ν. Μανιάς, “Ηλεκτρονικά Ισχύος”, Εκδόσεις Συμεών, 2000.

- [22] Ιωάννης Χασίκος: Ανάπτυξη μεθοδολογίας προβλεπτικού ελέγχου για τη ρύθμιση συστήματος κελιών καυσίμου υδρογόνου. Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π. Αθήνα, 2008.
- [23] Tassios D.P.: Applied Chemical Engineering Thermodynamics. Springer Verlag, 1992.
- [24] Ryan O'Hayre, Suk-Won Cha, Whitney Colella, Fritz B. Prinz: *Fuel Cell Fundamentals*. Wiley, 2006.
- [25] Pukrushpan Jay T., Stefanopoulou Anna G., Peng Huei: *Control of Fuel Cell Power Systems*. Springer, 2004 (1st edition).
- [26] Spiegel Colleen: PEM fuel cell Modeling and Simulation using Matlab. Elsevier, 2008.
- [27] *Handbook of Fuel Cells*. Seventh Edition. US Department of Energy,
- [28] Haubrock, Jens: Parametrierung elektrischer äquivalentschaltbilder von PEM Brennstoffzellen. Διδακτορική Διατριβή Πανεπιστημίου Μαγδεμβούργου Γερμανίας, 2007.
- [29] Souleman Njoya M., Oliver Tremblay, Louis-A. Dessaint: A Generic Fuel Cell Model for the Simulation of Fuel Cell Power Systems, Vehicle Power and Propulsion Conference, VVPC 7-10 Sept. 2009.
- [30] P. Buasri, Z.M. Salameh: An Electrical Circuit Model for A Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), Power Engineering Society General Meeting, Montreal, 2006.
- [31] Parviz Famouri, Randall S. Gemmen: Electrochemical Circuit Model of A PEM Fuel Cell, Power Engineering Society General Meeting, July 2003.
- [32] Dachuan Yu, S. Yuvarajan: Electronic circuit model for proton exchange membrane fuel cells, Journal of Power Sources, Vol.142, Issue 1-2, p.238-242, March 2005.
- [33] <http://www.ltp.ntua.gr/home>
- [34] <http://www.h2susbuild.ntua.gr/html/objectives.html>
- [35] <http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/mechanical/documents/guidance/atex/application/>

- [36] PowerLogic power-monitoring units: Power Meter Series 800, 2007.
- [37] Carlo Tregambe (ICI Caldaie): Prototyping and Testing of PEMFC Micro-CHP: Prototype (6kW) for Small-Scale System, January 2010.
- [38] Energy Systems: DHF-1AC-2600W / DHF-1AC-5000W Inverter-Family Operation Manual.
- [39] <http://www.fuelcellmarkets.com/3,1,28266,17,28869.html>
- [40] http://www.rodchainam.com/images/main_1245953673/H2%20Fact%20Sheets.pdf