

H/Γ
899



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
Τ. Ε. Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ**
ΣΧΟΛΗ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ.
Επιβλέπων: ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΑΔΟΥ ΕΡΙΕΤΤΑ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

(ANALYSIS OF HOURS FUEL CELLS FOR PRODUCTION OF ELECTRICITY)

**ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ**

**Πτυχιακή Εργασία:
ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΤΡΟΜΠΕΤΑΣ , Α.Μ:34996**

**ΑΙΓΑΛΕΩ
ΙΟΥΝΙΟΣ 2014**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	10
1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.2	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	11
1.3	ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΚΑΥΣΙΜΑ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	19
2.1	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ	19
2.2	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	23
2.2.1	ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΗΣ	24
2.2.2	ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ	26
2.2.3	ΣΤΡΩΜΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΑΕΡΙΩΝ	27
2.2.4	ΔΙΠΟΛΙΚΕΣ ΠΛΑΚΕΣ	27
2.3	ΚΑΥΣΙΜΑ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	30
2.3.1	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	30
2.3.2	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	32
2.3.2.1	ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ ΝΕΡΟΥ	32
2.3.2.2	ΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ	34
2.3.2.3	ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ	35
2.3.2.4	ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	35
2.3.2.5	ΦΥΤΟΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	35
2.3.3	ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	36
2.3.4	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	ΤΥΠΟΙ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	41
3.1	ΤΥΠΟΙ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	41
3.2	ΑΛΚΑΛΙΚΕΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (AFC)	46
3.2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	46
3.2.2	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	46
3.2.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	47
3.2.4	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	48
3.2.5	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	48
3.3	ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC)	50
3.3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	50
3.3.2	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	50
3.3.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	51
3.3.4	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	52
3.3.5	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	53
3.4	ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΑΜΕΣΗΣ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ (DMFC)	55
3.4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	55
3.4.2	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	55

3.4.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	56
3.4.4	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ.....	56
3.4.5	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	57
3.5	ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΦΩΣΦΟΡΙΚΟΥ ΟΞΕΩΣ (ΡΑFC)	59
3.5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	59
3.5.2	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	59
3.5.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	60
3.5.4	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ.....	61
3.5.5	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	62
3.6	ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΕΡΕΩΝ ΟΞΕΙΔΙΩΝ (SOFC).....	64
3.6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	64
3.6.2	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	64
3.6.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	65
3.6.4	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ.....	68
3.6.5	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	69
3.7	ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΗΓΜΑΤΟΣ ΑΝΘΡΑΚΙΚΩΝ ΑΛΑΤΩΝ (MCFC).....	71
3.7.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	71
3.7.2	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	71
3.7.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	72
3.7.4	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ.....	73
3.7.5	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	73
3.8	ΑΝΑΓΓΕΝΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	76
3.9	ΕΠΙΔΕΙΞΗ ΚΑΙ ΕΜΠΟΡΕΥΜΕΤΟΠΟΙΣΗ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	76
3.10	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

1.1 Εισαγωγή

Το πετρέλαιο γίνεται συνεχώς σπανιότερο και η καύση του παράγει ρύπους που μολύνουν το περιβάλλον. Τα αποτελέσματα αυτής της συνεχούς και αυξανόμενης καταστροφής, είναι φανερά στις μέρες μας, όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η αύξηση των θανάτων παγκοσμίως, λόγω της ρύπανσης της ατμόσφαιρας.

Με στόχο να ανατραπεί η καταστροφή του περιβάλλοντος, είναι επιθυμητή η αλλαγή της ενεργειακής πολιτικής προς μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περισσότερο οικολογικές, όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (αιολική, γεωθερμική, ηλιακή ενέργεια). Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, προς το παρόν, χρησιμοποιούνται σε μικρή κλίμακα, καθώς απαιτείται ιδιαίτερο περιβάλλον για την αποτελεσματική τους λειτουργία. Αντίθετα, οι κυψέλες καυσίμου δεν απαιτούν ιδιαίτερο περιβάλλον για την ομαλή τους λειτουργία, παράγουν από ελάχιστους ως μηδενικούς ρύπους και είναι ιδιαίτερα αποδοτικές, τόσο για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος όσο και για την παραγωγή θερμότητας.

Η κυψέλη καυσίμου είναι ηλεκτροχημική συσκευή, η οποία μετατρέπει συνεχώς την χημική ενέργεια του καυσίμου, σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ενέργεια αυτή χρησιμοποιείται σε οχήματα, ηλεκτρονικές συσκευές, κατοικίες και ηλεκτρικά δίκτυα. Η ραγδαία ανάπτυξη των κυψελών καυσίμου, τις τελευταίες δεκαετίες, οφείλεται στον μεγάλο βαθμό απόδοσης τους και στην εξαιρετικά καθαρή επεξεργασία του καυσίμου.

Η κυψέλη καυσίμου παρομοιάζεται με τον συσσωρευτή αφού περιέχει ηλεκτρόδια (άνοδος και κάθοδος) διαχωρισμένα από έναν ηλεκτρολύτη. Η διαφορά της είναι η συνεχής παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας. Το καύσιμο και το οξειδωτικό μέσο, το οποίο είναι συνήθως οξυγόνο, παρέχονται αδιάκοπα στην κυψέλη καυσίμου από εξωτερική πηγή. Στον συσσωρευτή, το καύσιμο και το

οξειδωτικό μέσο περιέχονται στο εσωτερικό του και όταν τα αντιδρώντα καταναλωθούν, ο συσσωρευτής θα πρέπει να αντικατασταθεί ή να επαναφορτιστεί.

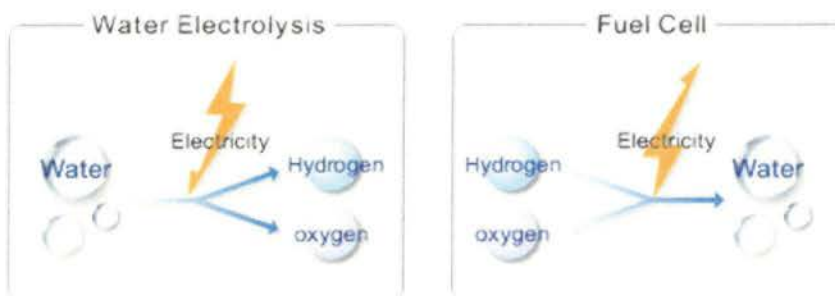
Οι κυψέλες καυσίμου είναι εξώθερμες διατάξεις, παράγοντας θερμότητα ως υποπροϊόν της χημικής αντίδρασης η οποία είναι διαθέσιμη για εφαρμογές συμπαραγωγής.

Η διαφορά της με τις συμβατικές θερμικές μηχανές, είναι ότι η κυψέλη καυσίμου μετατρέπει την χημική ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια, χωρίς να μεσολαβεί η μετατροπή της σε μηχανική ενέργεια.

Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν υγρά ή αέρια καύσιμα, όπως το υδρογόνο, τους υδρογονάνθρακες και το φυσικό αέριο. Όταν το καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο, το μόνο παραπροϊόν είναι το νερό και η θερμότητα. Το οξειδωτικό μέσο είναι αέριο οξυγόνο ή αέρας.

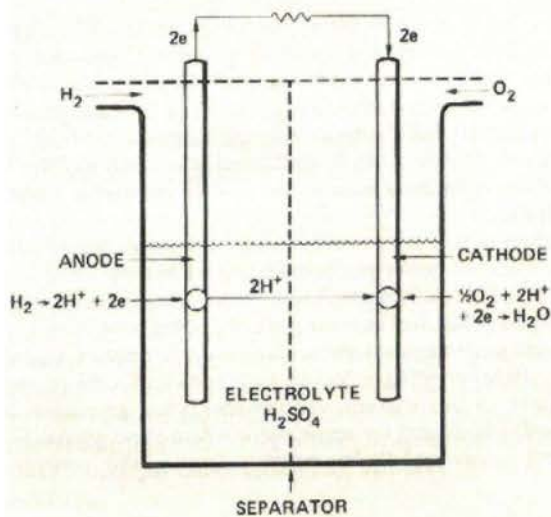
1.2 Αρχή λειτουργίας - περιγραφή

Η βασική αρχή λειτουργίας της, θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι το αντίθετο της ηλεκτρόλυσης. Ηλεκτρόλυση είναι η διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο, όταν μέσα από αυτό ρέει ηλεκτρικό ρεύμα. Στις κυψέλες καυσίμου, το υδρογόνο "ξαναενώνεται" με το οξυγόνο, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα.



Σχήμα 1.1: Ηλεκτρόλυση – Κυψέλη καυσίμου

Η λειτουργία των κυψελών καυσίμου βασίζεται στις θεμελιώδεις ηλεκτροχημικές αρχές. Η αρχή λειτουργίας δίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.2: Αρχή λειτουργίας

Δύο ηλεκτρόδια άνθρακα, με επίστρωση καταλύτη, βρίσκονται μέσα σε έναν ηλεκτρολύτη (όξινο στην προκειμένη περίπτωση) και διαχωρίζονται από ένα φράγμα αερίων. Το καύσιμο, που εδώ είναι το υδρογόνο, ιονίζεται στην επιφάνεια του ενός ηλεκτροδίου, ενώ ταυτόχρονα το οξειδωτικό μέσο, που είναι το οξυγόνο, ιονίζεται στο άλλο ηλεκτρόδιο. Όταν τα ηλεκτρόδια ενώνονται αγωγίμα, μέσω εξωτερικού κυκλώματος, συμβαίνουν τα εξής:

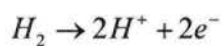
1. Το υδρογόνο διασπάται στην επιφάνεια του καταλύτη του ενός ηλεκτροδίου, σχηματίζοντας κατιόντα υδρογόνου (πρωτόνια) και ηλεκτρόνια.
2. Τα πρωτόνια μετακινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη (και του φράγματος των αερίων), στην καταλυτική επιφάνεια του ηλεκτροδίου στην πλευρά του οξυγόνου.

3. Ταυτόχρονα, τα ηλεκτρόνια κινούνται μέσα από το εξωτερικό κύκλωμα, στην ίδια καταλυτική επιφάνεια.
4. Το οξυγόνο, τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια ενώνονται στην καταλυτική επιφάνεια του ηλεκτροδίου και σχηματίζουν νερό.

Η διαδικασία εξελίσσεται φυσικά και οφείλεται στο γεγονός ότι φορτισμένα σωματίδια κινούνται προς περιοχές χαμηλότερης ηλεκτροχημικής ενέργειας, για τον σχηματισμό πιο σταθερών ενώσεων. Τα φορτισμένα σωματίδια του υδρογόνου και του οξυγόνου κινούνται το ένα προς το άλλο και ενώνονται επειδή τα τελικά προϊόντα της αντίδρασης έχουν χαμηλότερη ηλεκτροχημική ενέργεια. Η κίνηση αυτών των φορτισμένων σωματιδίων, χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

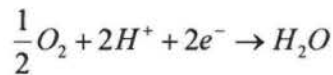
Σ' αυτή την ηλεκτροχημική διαδικασία, η μία πλευρά ονομάζεται άνοδος και η άλλη πλευρά ονομάζεται κάθοδος.

Στο ηλεκτρόδιο της ανόδου, πραγματοποιείται η αντίδραση της οξειδωσης, στην οποία τα άτομα του υδρογόνου διασπώνται σε πρωτόνια και σε ηλεκτρόνια.

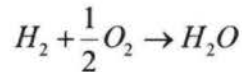


Στη συνέχεια τα ελεύθερα πρωτόνια περνούν μέσα από τον ηλεκτρολύτη και τα ηλεκτρόνια κινούνται μέσα από το εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα, προς την πλευρά της καθόδου.

Στην κάθοδο ο ατμοσφαιρικός αέρας, δίνει το απαραίτητο οξυγόνο για την αντίδραση αναγωγής. Τα άτομα του οξυγόνου διασπώνται και ενώνονται με τα πρωτόνια που έρχονται μέσω του ηλεκτρολύτη και με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από το εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα, σχηματίζοντας νερό.



Η ολική αντίδραση του αέριου υδρογόνου και οξυγόνου, για το σχηματισμό του νερού, είναι:

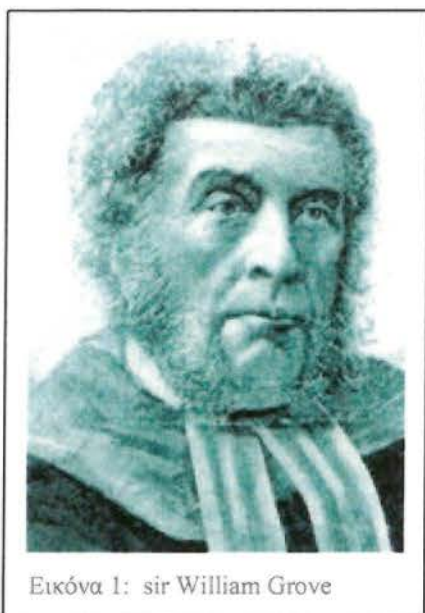


Η τάση που αναπτύσσεται, είναι συνάρτηση της ελεύθερης ενέργειας και των αντιδράσεων οξείδωσης και αναγωγής. Σε συνθήκες περιβάλλοντος, η ιδανική τιμή του δυναμικού που αναπτύσσεται είναι 1.23V, για κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν υδρογόνο-οξυγόνο.

Η όλη δραστηριότητα εξελίσσεται φυσικά, αλλά οι πραγματοποιηθείσες αντιδράσεις είναι αργές, περιορίζοντας την ισχύ εξόδου της κυψέλης καυσίμου. Η απόδοση της κυψέλης καυσίμου, περιορίζεται κυρίως από την αντίδραση αναγωγής του οξυγόνου, η οποία είναι εκατό φορές πιο αργή από την αντίδραση οξείδωσης του υδρογόνου. Έτσι για την επιτάχυνση των αντιδράσεων στα ηλεκτρόδια χρησιμοποιείται καταλύτης. Ένας κοινός καταλύτης που χρησιμοποιείται στις χαμηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου είναι η πλατίνα (Pt).

1.3 Ιστορική αναδρομή

Η βασική αρχή της τεχνολογίας Κυψελών Καυσίμου επινοήθηκε το 1839. Ο Γερμανοελβετός Christian Friedrich Schonbein δημοσίευσε το άρθρο του για τις κυψέλες καυσίμου υδρογόνου-οξυγόνου στο "Philosophical Magazine" τον Ιανουάριο του 1839. Την ίδια περίπου εποχή, ο Άγγλος sir William Grove εργαζόταν πάνω σε μια μέθοδο συνδεσμολογίας του ισχυρού συσσωρευτή πλατίνας-ψευδαργύρου, παράλληλα και σε σειρά.

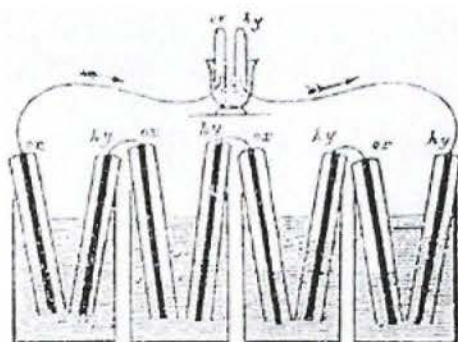


Εικόνα 1: sir William Grove

Στο υστερόγραφο του άρθρου του, ο sir William Grove, είχε υποδείξει την πιθανότητα, η αντίδραση υδρογόνου-οξυγόνου να παράγει ηλεκτρισμό. Πραγματοποίησε την περιγραφή ενός "ηλεκτρολυτικού συσσωρευτή αερίων", ο οποίος με "ψυχρή καύση" του υδρογόνου και του οξυγόνου θα παρήγαγε ηλεκτρικό ρεύμα με θεωρητική απόδοση σχεδόν 100%. Το 1842, ο sir William Grove παρουσίασε την μέθοδο Κυψελών Καυσίμου λεπτομερώς. Ένας από τους πρώτους που αναγνώρισε την σημασία των κυψελών καυσίμου υδρογόνου - οξυγόνου ήταν

ο Westphal το 1880.

Το 1894, ο Ostwald πρότεινε μια διαδικασία συνδυασμού άνθρακα (C) και οξυγόνου (O₂). Η πραγματοποίηση αυτής της ιδέας απέτυχε, εξ' αιτίας των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας (της τάξης των 1000°C) και των προβλημάτων που δημιουργήθηκαν, όσον αφορά την αντοχή και την ομαλή συμπεριφορά των υλικών σε αυτές τις θερμοκρασίες. Από τότε και μετά, οι ερευνητικές προσπάθειες εστιάστηκαν στην αντίδραση H₂ / O₂, η οποία μπορούσε να ελεγχθεί ευκολότερα.



Εικόνα 2: Η ιστορική πρώτη δομή, τεσσάρων κυψελών καυσίμου

Η τεχνική εξέλιξη των κυψελών καυσίμου ξεκίνησε λίγο μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο όταν ο Francis T. Bacon από το Cambridge στην Αγγλία, κατασκεύασε επιτυχώς μία κυψέλη υψηλής πίεσης. Η πρώτη λειτουργική συσκευή παρουσιάστηκε το 1954. Στη συνέχεια, αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC) και κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) αναπτύχθηκαν για τα διαστημικά προγράμματα (Gemini, Apollo, Spacelab). Εκείνη την περίοδο, η NASA χρησιμοποιούσε τις κυψέλες καυσίμου, οι οποίες ήταν κατασκευασμένες από την Pratt & Whitney (USA), για να παρέχουν ηλεκτρικό ρεύμα κατά τη διάρκεια των αποστολών του διαστημόπλοιου Gemini. Το γεγονός αυτό, ενθάρρυνε τους επιστήμονες, με αποτέλεσμα, πλήθος χωρών να ξεκινήσει μία αυξανόμενη δραστηριότητα γύρω από τις κυψέλες καυσίμου, τόσο σε πανεπιστήμια και σε εργαστήρια, όσο και στη βιομηχανία. Αλλά ο αρχικός ενθουσιασμός εξασθένησε σύντομα στην αρχή της δεκαετίας του '70, εξ' αιτίας του υψηλού κόστους. Έτσι οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά και μόνο σε διαστημικές και στρατιωτικές εφαρμογές. Στην συνέχεια το ενδιαφέρον των αμερικάνικων βιομηχανιών αναπτερώθηκε και πάλι με τις χρηματοδοτήσεις για έρευνα από το Τμήμα Ενέργειας (DOE), το Ινστιτούτο Έρευνας Ηλεκτρικής Ενέργειας (EPRI) και το Ινστιτούτο Έρευνας Αερίων (GRI) στη δεκαετία του '70. Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον εκδηλώθηκε για τις κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC), τις κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC) και τις κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC), δηλαδή για τις κυψέλες καυσίμου μέσης και υψηλής θερμοκρασίας. Η εξέλιξη όλων αυτών των τεχνολογιών στόχευε αρχικά στην εφαρμογή σε μονάδες ισχύος, μερικών εκατοντάδων MW.

Την ίδια περίοδο η Ιαπωνία ξεκίνησε ένα νέο ερευνητικό πρόγραμμα, το Moonlight Programme, το οποίο υποστηριζόταν αφειδώς από την κυβέρνηση. Αντίθετα, το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα για την έρευνα των κυψελών καυσίμου είχε περικοπεί στο ελάχιστο.

Όταν η Ευρωπαϊκή ερευνητική δραστηριότητα ξεκίνησε πάλι στα μέσα της δεκαετίας του '80, η Αμερικανική και η Ιαπωνική βιομηχανία είχαν ήδη αναπτύξει τις κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) για μη κινητές εγκαταστάσεις.

Έτσι, οι έρευνες εστιάστηκαν στις κυψέλες καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών, για να ανταγωνιστούν τις νέες τεχνικές και ιδέες των Η.Π.Α. και της Ιαπωνίας. Το ενδιαφέρον για κινητές μονάδες ενεργοποιείται και πάλι σήμερα αφού η περιβαλλοντική ευαισθησία προωθεί την εισαγωγή στην αγορά αυτοκινούμενων οχημάτων με μηδενικές ή έστω πολύ χαμηλές εκπομπές ρύπων.

Η χρήση στη βιομηχανία οχημάτων, της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου με την εγγενή υψηλή απόδοση, την υψηλή παραγωγή πυκνότητας ρεύματος και τη μηδενική εκπομπή ρύπων, έχει εξελιχθεί σημαντικά την τελευταία δεκαετία και σήμερα αποτελεί ένα σοβαρό ανταγωνιστή στην αγορά οχημάτων μηδενικών εκπομπών ρύπων. Το πρώτο λεωφορείο που χρησιμοποίησε την τεχνολογία κυψελών καυσίμου, ολοκληρώθηκε το 1993 και αρκετά μικρότερα οχήματα κατασκευάζονται στην Ευρώπη και τις Ενωμένες Πολιτείες.

Η ONSI στις Ηνωμένες Πολιτείες έχει ήδη προμηθεύσει σχεδόν 100 μονάδες συμπαραγωγής φωσφορικού οξέος (PAFC) των 200 kW, σε πελάτες της στις Ηνωμένες Πολιτείες και σε όλο τον κόσμο για δοκιμαστικές εφαρμογές. Η διάθεση τους στην αγορά το 1998 ήταν 1.500 \$/kW. Οι κυψέλες MCFC (ERC/MTU, Ansaldo, ECN, MC Power, IHI, Hitachi, MELCO, Tonen, κτλ.) και SOFC (Westinghouse, Siemens, Daimler-Benz, Sulzer, Ceramatec, Statoil, κτλ.) μετεπήδησαν από τα εργαστήρια, στις εμπορικές εφαρμογές μετά το 2000.

Οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) δεν ερευνήθηκαν σοβαρά πριν το τέλος της δεκαετίας του 70 αρχές '80. Οι έντονες δραστηριότητες, κυρίως από τις εταιρείες Ballard, Siemens, H-Power και διάφορων Αμερικάνικων πανεπιστημίων και ερευνητικών κέντρων, είχαν ως αποτέλεσμα την κατασκευή βελτιωμένων συσκευών MEA (Membrane-Electrode-Assemblies). Έτσι το βάρος και το κόστος των κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) μειώθηκε δραστικά και η εφαρμογή τους αυξήθηκε θεαματικά. Αυτό με τη σειρά του, έδωσε κίνητρα σε πολλές κατασκευάστριες εταιρείες αυτοκινήτων και λεωφορείων (Ballard/ New Flyer, Chrysler, Daimler-Benz, Ford, GM, Honda, Man, Neoplan, PSA, Renault, Toyota, Volvo) να θεωρήσουν τις κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων

(PEMFC) ως ένα εναλλακτικό σύστημα κίνησης των οχημάτων, έναντι των υπάρχοντων μηχανών εσωτερικής καύσης.

Παγκοσμίως, τουλάχιστον 600 εκατομμύρια Ευρο το χρόνο επενδύονται στην τεχνολογία των κυψελών καυσίμου μόνο και μόνο για την επίτευξη ενός "καθαρότερου" μέλλοντος. Μέχρι το 1999, σε παγκόσμια κλίμακα, είχαν εγκατασταθεί μονάδες συνολικής ισχύος 40.000 kW περίπου, κυρίως ως γεννήτριες ισχύος και θερμότητας, από τις οποίες περίπου το 90% είναι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC).

Σήμερα, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την τεχνολογία κυψελών καυσίμου και στην Ευρώπη. Η μονάδα PAFC της US ONSI 200kW, κατέγραψε 349.693 ώρες στην Ευρώπη με την μέγιστη συνεχόμενη λειτουργία για 5.729 ώρες και συνολική παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος 54.086 MWh (30 Σεπτεμβρίου 1998). Μερικές από αυτές τις μονάδες ξεπέρασαν την αναμενόμενη διάρκεια ζωής τους στην Ιαπωνία και την Αμερική, κάτι το οποίο αναδεικνύει την υψηλή αξιοπιστία της τεχνολογίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΚΑΥΣΙΜΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

2.1 Σύγκριση κυψελών καυσίμου, με θερμικές μηχανές

Όλες οι θερμικές μηχανές, συμπεριλαμβανομένου και των μηχανών εσωτερικής καύσης, περιορίζονται από την απόδοση του κύκλου Carnot. Η θερμική μηχανή δεν μπορεί να μετατρέψει όλη την παραγόμενη θερμική ενέργεια, σε μηχανική ενέργεια. Μέρος της θερμικής ενέργειας απορρίπτεται στο περιβάλλον. Σε μία μηχανή εσωτερικής καύσης, παρέχεται θερμότητα σε υψηλή θερμοκρασία T_1 , μέρος της ενέργειας μετατρέπεται σε μηχανικό έργο και το υπόλοιπο απορρίπτεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία T_2 . Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόδοση.

Σύμφωνα με τους νόμους της θερμοδυναμικής, η θερμική απόδοση της θερμικής μηχανής είναι, ο λόγος του μηχανικού έργου που παράγεται, προς το ποσό της θερμότητας που εισάγεται αρχικά σε θερμοκρασία T_1 .

$$\eta \leq 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

όπου οι θερμοκρασίες T_1, T_2 είναι σε Kelvin.

Οι κυψέλες καυσίμου μετατρέπουν απευθείας την χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια, χωρίς να περιλαμβάνουν το στάδιο της μετατροπής της θερμότητας σε μηχανική ενέργεια, η οποία εν συνεχεία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Γι' αυτό το λόγο η απόδοση των κυψελών καυσίμου, μπορεί να υπερβαίνει το όριο του κύκλου Carnot, ακόμα και όταν αυτές λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, π.χ. στους 80°C [10].

Ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης των κυψελών καυσίμου είναι [8]:

$$n = \frac{\Delta G}{\Delta H}$$

όπου ΔG : είναι η ελεύθερη ενέργεια του Gibbs, που ελευθερώνεται κατά την αντίδραση και

ΔH : είναι η μεταβολή της ενθαλπίας

Όταν το παραγόμενο νερό είναι σε υγρή μορφή : $\Delta G = 237.13 \text{kJ/mol}$ και $\Delta H = 238.13 \text{kJ/mol}$

Όταν το παραγόμενο νερό είναι σε αέρια μορφή : $\Delta G = 228.57 \text{kJ/mol}$ και $\Delta H = 241.82 \text{kJ/mol}$

Έτσι ο μέγιστος θεωρητικός βαθμός απόδοσης είναι:

$$n = 83\% \text{ (υγρό)}$$

$$n = 94.5\% \text{ (αέριο)}$$

Στην πράξη ο βαθμός απόδοσης είναι μικρότερος, λόγω της εσωτερικής αντίστασης των κυψελών καυσίμου [8].

Έτσι ο βαθμός απόδοσης είναι [25]: $n_{el} = \frac{V_{cell}}{\Delta H / 2F}$

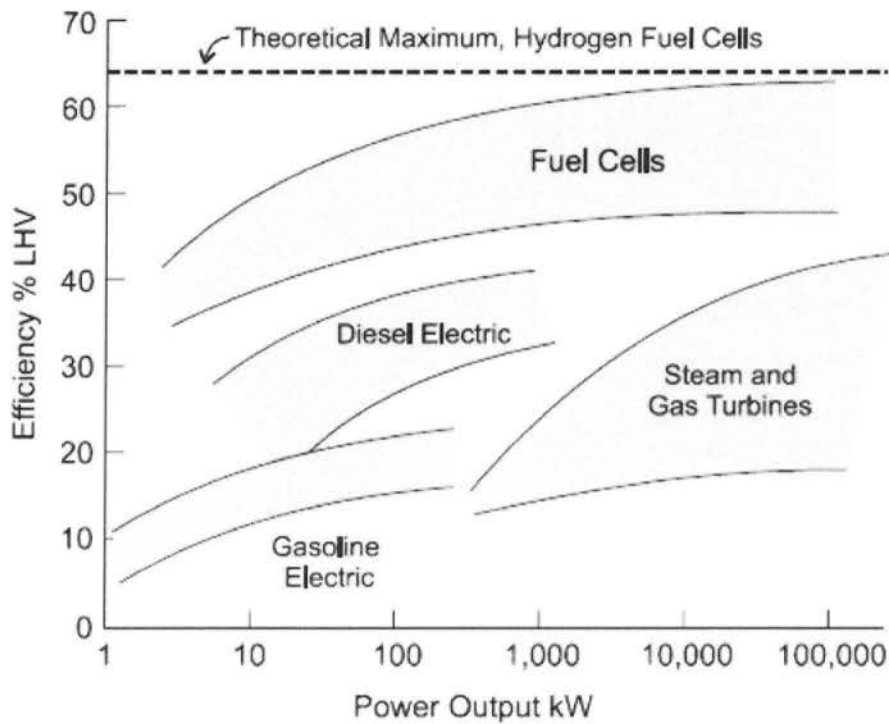
όπου V_{cell} : είναι η τάση της κυψέλης καυσίμου (V)

F: είναι η σταθερά Faraday (Cb/mol)

Παρακάτω φαίνεται ο βαθμός απόδοσης των συμβατικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και των κυψελών καυσίμου, σε σχέση με την ισχύ εξόδου [19].

Σύγκριση βαθμών απόδοσης, μονάδων ηλεκτρικής ισχύος

	Ηλεκτρικός (%)	Συμπαγωγή (%)	Συνολικός(%)
Κυψέλη καυσίμου	40-60	20-30	60-80
Μηχανή Diesel	30-40	0	30-40
Αεριοστρόβιλος	25-35	0	25-35
Μηχανή αερίου	25-35	0	25-35



Σχήμα 2.1: Βαθμός απόδοσης διαφόρων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας

Η νέα πρόταση στον τομέα ενέργειας

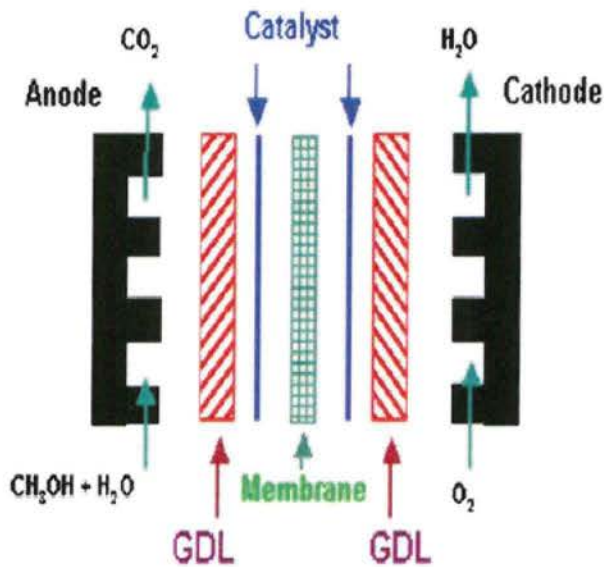
Οι κυψέλες καυσίμου έχουν θεωρηθεί την τελευταία δεκαετία μία από τις πολλά υποσχόμενες νέες τεχνολογίες, για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του πλανήτη. Αντίθετα με τις κοινές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν συμβατικές τεχνολογίες, οι μονάδες κυψελών καυσίμου μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα σε μεγάλο εύρος ισχύος, από μερικά Watt, έως μονάδες των MW.

Η αρχή λειτουργίας των κυψελών καυσίμου είναι εξαιρετικά απλή. Ο ηλεκτρισμός παράγεται χωρίς να απαιτείται η χρήση περιστρεφόμενων μηχανικών μερών και ο βαθμός απόδοσης τους φτάνει σε επίπεδα πολύ μεγαλύτερα από αυτά των μεγάλων συμβατικών μηχανών. Οι κυψέλες καυσίμου είναι αθόρυβες και αποδοτικές, ακόμα και σε μερικά φορτία. Τα πλεονεκτήματα τους είναι σημαντικά για τον περιορισμό της μόλυνσης του περιβάλλοντος και της εξοικονόμησης ενέργειας. Ένας τομέας στον οποίο η εφαρμογή της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου θα επιφέρει σημαντικά αποτελέσματα, είναι ο Συνδυασμένος Κύκλος Παραγωγής Ενέργειας και Θερμότητας (CHP)

Αντίθετα με τις μηχανές εσωτερικής καύσης και με τους αεροστρόβιλους, που είναι πολύ θορυβώδη και ο βαθμός απόδοσής τους είναι χαμηλός, οι κυψέλες καυσίμου είναι αθόρυβες και μετατρέπουν σε πολύ μεγαλύτερο ποσοστό την χημική ενέργεια σε ηλεκτρισμό. Από την χημική ενέργεια που περιέχει το καύσιμο, η κυψέλη καυσίμου έχει την δυνατότητα να μετατρέψει το 40-60% σε ηλεκτρισμό. Αυτό το στοιχείο αποτελεί σαφή απόδειξη ότι οι κυψέλες καυσίμου είναι πολύ πιο "ελκυστικές" και αποτελεσματικές από τις μηχανές εσωτερικής καύσης και τους αεροστρόβιλους.

2.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Τα κυριότερα δομικά στοιχεία μίας κυψέλης καυσίμου είναι, ο ηλεκτρολύτης (electrolyte), τα ηλεκτρόδια (electrodes), το στρώμα διάχυσης αερίων (Gas Diffusion Layers) και οι διπολικές πλάκες (Bipolar Plates). Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η δομή της κυψέλης καυσίμου άμεσου μεθανόλης. Ξεκινώντας από το κέντρο προς τα άκρα, ο ηλεκτρολύτης είναι στερεά πολυμερής μεμβράνη. Τα ηλεκτρόδια έχουν καταλυτική επιφάνεια και ακολουθεί το στρώμα διάχυσης αερίων. Η κυψέλη καυσίμου τελειώνει στις διπολικές πλάκες ανόδου και καθόδου, από τις οποίες εισέρχονται και εξέρχονται τα αντιδρώντα και τα προϊόντα των αντιδράσεων.



Σχήμα 2.2: Δομή κυψέλης καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC)

Η δομή και λειτουργία των επιμέρους αυτών στοιχείων της κυψέλης καυσίμου, αναλύεται ακολούθως.

2.2.1 Ηλεκτρολύτης

Ο ηλεκτρολύτης είναι η καρδιά της κυψέλης καυσίμου. Η βασική του λειτουργία στηρίζεται στην ιδιότητα που έχει να επιτρέπει την μετακίνηση ιόντων στο εσωτερικό του. Ο ηλεκτρολύτης θα πρέπει να διαθέτει μεγάλη ιοντική αγωγιμότητα και παράλληλα να εμποδίζει τη διέλευση των ηλεκτρονίων, ώστε να μην υπάρχουν απώλειες και να διατηρείται η ομαλή λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Εάν ο ηλεκτρολύτης επιτρέπει τη διέλευση των ηλεκτρονίων, τότε παρουσιάζονται προβλήματα βραχυκύκλωσης, με αποτέλεσμα τη μη ομαλή λειτουργία του στοιχείου. Παράλληλα ο ηλεκτρολύτης λειτουργεί και σαν διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα στο οξειδωτικό και το καύσιμο, έτσι ώστε να αποφεύγεται η απευθείας αντίδρασή τους.

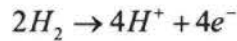
Ο ηλεκτρολύτης προσδιορίζει τις συνθήκες λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου. Έτσι η θερμοκρασία λειτουργίας, εξαρτάται άμεσα από το είδος του ηλεκτρολύτη που αυτή διαθέτει.

Στις κυψέλες καυσίμου που έχουν υγρό ηλεκτρολύτη, όπως ο αλκαλικός και αυτός του φωσφορικού οξέος, η θερμοκρασία λειτουργίας είναι σχετικά χαμηλή (< 250°C). Ο περιορισμός αυτός είναι αναγκαίος, καθώς αν η κυψέλη καυσίμου λειτουργήσει σε υψηλότερες θερμοκρασίες, ο υγρός ηλεκτρολύτης θα αλλοιωθεί λόγω εξάτμισης. Εξαιτίας αυτών των χαμηλών θερμοκρασιών, οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν ακριβούς ηλεκτρολύτες για την επαρκή κατάλυση της αντίδρασης, με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους τους.

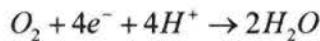
Αντίθετα όταν ο ηλεκτρολύτης είναι σε στερεά κατάσταση, η θερμοκρασία λειτουργίας ξεπερνάει τους 650°C, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται η χρήση ακριβού καταλύτη, αφού σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες οι αντιδράσεις καταλύονται επαρκώς και από λιγότερο δραστικούς καταλύτες, ενώ παράλληλα αυξάνεται η ιοντική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη.

Κατάλληλα για τον ηλεκτρολύτη είναι κάποια αλκαλικά και όξινα διαλύματα και στερεά σώματα.

Στην άνοδο ενός όξινου ηλεκτρολύτη, το υδρογόνο ιονίζεται στο ηλεκτρόδιο, απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια και δημιουργώντας πρωτόνια.

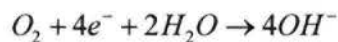


Η αντίδραση απελευθερώνει ενέργεια. Στην κάθοδο, το οξυγόνο αντιδρά με τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια, σχηματίζοντας νερό.



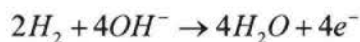
Το οξύ είναι υγρό με ελεύθερα ιόντα υδρογόνου (πρωτόνια H^+), έτσι ο όξινος ηλεκτρολύτης εκτελεί με επιτυχία το σκοπό του, δηλαδή την μετακίνηση των ιόντων υδρογόνου από την άνοδο στην κάθοδο. Ορισμένα πολυμερή, μπορούν επίσης να περιέχουν κινούμενα ιόντα υδρογόνου. Αυτά τα πολυμερή ονομάζονται μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων, παίρνοντας το όνομά τους από το ιόν του υδρογόνου ή αλλιώς πρωτόνιο.

Στους αλκαλικούς ηλεκτρολύτες οι αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια είναι διαφορετικές. Στην κάθοδο το οξυγόνο αντιδρά με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από την άνοδο και μαζί με το νερό, σχηματίζουν ανιόντα υδροξυλίου.



Τα ανιόντα υδροξυλίου περνούν μέσα από τον ηλεκτρολύτη από την κάθοδο στην άνοδο.

Στην άνοδο το υδρογόνο αντιδρά με τα ανιόντα υδροξυλίου απελευθερώνοντας ενέργεια και ηλεκτρόνια και παράγοντας νερό.



Συνοψίζοντας, στον όξινο ηλεκτρολύτη, το μεταφερόμενο ιόν από την άνοδο στην κάθοδο είναι το κατιόν του υδρογόνου και η παραγωγή του νερού γίνεται στην κάθοδο. Στον αλκαλικό ηλεκτρολύτη, το μεταφερόμενο ιόν από την

κάθοδο στην άνοδο είναι το ανιόν υδροξυλίου και το νερό σχηματίζεται στην άνοδο.

2.2.2 Ηλεκτρόδια

Η μετατροπή της χημικής ενέργειας που περιέχει το καύσιμο σε ηλεκτρική ενέργεια, γίνεται στα ηλεκτρόδια, καθώς από τα άτομα του καυσίμου και του αέρα, αποδεσμεύονται τα ηλεκτρόνια. Στη συνέχεια τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσα από εξωτερικό κύκλωμα, ενώ τα ιόντα διαπερνάνε τον ηλεκτρολύτη. Επομένως τα ηλεκτρόδια πρέπει να είναι πορώδη, διαπερατά, από τα αέρια μόρια, τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια, καθώς επίσης πρέπει να είναι καλοί αγωγοί ηλεκτρισμού.

Ο ρυθμός με τον οποίο γίνονται οι αντιδράσεις, σχετίζεται με την επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Η πορώδης κατασκευή τους αυξάνει την ενεργό επιφάνειά τους. Τα μοντέρνα ηλεκτρόδια έχουν τέτοια μικροδομή, που τους δίνει ενεργό επιφάνεια εκατοντάδες ή ακόμα χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από τις πραγματικές τους διαστάσεις.

Η ταχύτητα των αντιδράσεων είναι μείζονος σημασίας για την απόδοση της κυψέλης καυσίμου. Η αύξηση της ταχύτητας γίνεται, εκτός από την αύξηση της επιφάνειας των ηλεκτροδίων, είτε με την προσθήκη καταλυτικών επενδύσεων στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων, είτε με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Στην περίπτωση όξινων ηλεκτρολυτών μόνο ευγενή μέταλλα, όπως ο λευκόχρυσος (Pt) και το ρουθίνιο (Ru) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καταλύτες, γιατί λιγότερο πολύτιμα μέταλλα θα αντιμετώπιζαν πρόβλημα διάβρωσης με την πάροδο του χρόνου.

Άνοδος

Η άνοδος είναι το αρνητικό ηλεκτρόδιο της κυψέλης καυσίμου. Άγει τα ηλεκτρόνια που προέρχονται από τα μόρια του υδρογόνου, έτσι ώστε αυτά να οδηγηθούν στο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα.

Κάθοδος

Η κάθοδος είναι το θετικό ηλεκτρόδιο της κυψέλης καυσίμου. Άγει τα ηλεκτρόνια που επιστρέφουν από την άνοδο, έτσι ώστε να μπορούν να ξαναενωθούν με τα ιόντα υδρογόνου και το οξυγόνο, για τον σχηματισμό νερού.

2.2.3 Στρώμα διάχυσης αερίων

Το στρώμα διάχυσης των αερίων, μπορεί είτε να αποτελεί μέρος του ηλεκτροδίου, τόσο της ανόδου όσο και της καθόδου, είτε να είναι ξεχωριστό στρώμα. Ο πρωταρχικός του ρόλος είναι η διάχυση, η ισοκατανομή των αερίων πάνω στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Επιπλέον όμως, δημιουργεί ηλεκτρική σύνδεση ανάμεσα στον καταλύτη και στην διπολική πλάκα. Επίσης απομακρύνει το παραγόμενο νερό από την επιφάνεια του ηλεκτρολύτη και σχηματίζει ένα προστατευτικό λεπτό στρώμα στην επιφάνεια του καταλύτη.

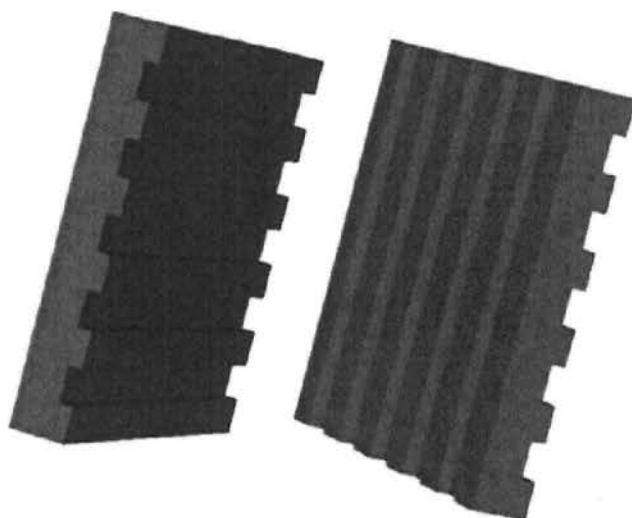
2.2.4 Διπολικές πλάκες

Η τάση μίας κυψέλης καυσίμου, υπό φορτίο είναι αρκετά μικρή, της τάξης του 0.7 Volt. Για να φτάσουμε το επιθυμητό επίπεδο της τάσης, πολλές κυψέλες καυσίμου θα πρέπει να ενωθούν στη σειρά. Η εν σειρά ένωση των κυψελών καυσίμου, δημιουργεί μία συστοιχία κυψελών καυσίμου. Ο πιο απλός τρόπος, είναι η σύνδεση της άκρης της καθόδου της μίας κυψέλης, στην άνοδο της επόμενης κυψέλης.

Το πρόβλημα αυτής της μεθόδου είναι ότι θα πρέπει τα ηλεκτρόνια να διατρέξουν όλη την επιφάνεια του ηλεκτροδίου, μέχρι να φτάσουν στο άκρο της ηλεκτρικής σύνδεσης. Παρόλο που τα ηλεκτρόδια είναι καλοί αγωγοί, όταν η κυψέλη έχει τάση 0.7Volt, ακόμα και η πιο μικρή πτώση τάσης είναι εξαιρετικά σημαντική.

Μια πολύ καλύτερη μέθοδος σύνδεσης των κυψελών είναι η χρήση διπολικών πλακών. Οι πλάκες συνδέουν ολόκληρη την επιφάνεια της καθόδου μιας κυψέλης, με ολόκληρη την επιφάνεια της ανόδου της επόμενης κυψέλης (εξού και ο όρος διπολική). Την ίδια στιγμή οι διπολικές πλάκες τροφοδοτούν με οξυγόνο την κάθοδο και με καύσιμο την άνοδο. Παρότι τα δύο ηλεκτρόδια πρέπει να έχουν καλή ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους, τα αέρια πρέπει να τροφοδοτούνται ξεχωριστά.

Μια διπολική πλάκα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Είναι κατασκευασμένη από αγώγιμα υλικά, όπως ο γραφίτης ή το ανοξείδωτο ατσάλι.



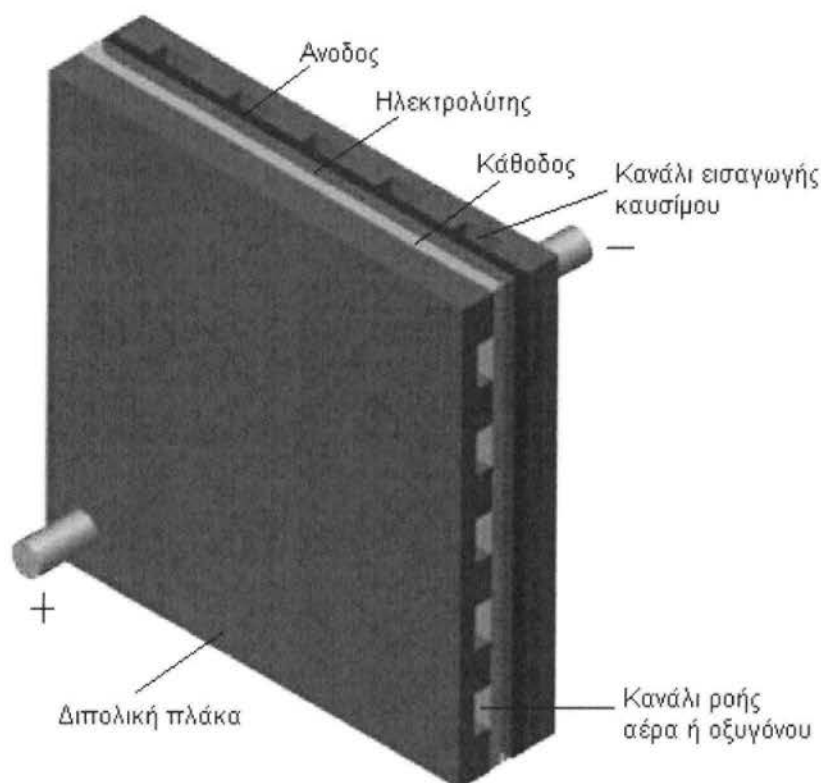
Σχήμα 2.3: Διπολικές πλάκες

Αυτές οι πλάκες έχουν κανάλια έτσι ώστε τα αέρια να ρέουν στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Τα κατακόρυφα κανάλια είναι για τη ροή του υδρογόνου στην άνοδο, ενώ τα οριζόντια κανάλια είναι για τη ροή του οξυγόνου στην κάθοδο. Είναι επίσης κατασκευασμένες με τρόπο τέτοιο ώστε έχουν αγωγή με την επιφάνεια του κάθε ηλεκτροδίου

Το αποτέλεσμα αυτής της σύνδεσης σε σειρά των κυψελών, είναι το ηλεκτρικό ρεύμα να περνά στην ουσία κατευθείαν από τη μία κυψέλη στην άλλη και όχι από την επιφάνεια του ενός ηλεκτροδίου στο άλλο.

Η ιδανική διπολική πλάκα πρέπει να είναι λεπτή, για την ελαχιστοποίηση της ηλεκτρικής αντίστασης και του μεγέθους της κυψέλης. Αυτό όμως περιορίζει τη ροή των αερίων στα κανάλια και είναι δυσκολότερη η εισαγωγή τους μέσα στην κυψέλη.

Στις χαμηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου, ο αέρας που κυκλοφορεί πρέπει απομακρύνει μαζί του και το παραγόμενο νερό. Οι διπολικές πλάκες διαθέτουν επιπλέον κανάλια για την κυκλοφορία του ψυκτικού υγρού.



Σχήμα 2.4: Δομή μιας κυψέλης καυσίμου. Οι δύο διπολικές πλάκες, περιέχουν την άνοδο, τον ηλεκτρολύτη και την κάθοδο.

2.3 ΚΑΥΣΙΜΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν υγρά ή αέρια καύσιμα, όπως το υδρογόνο, τους υδρογονάνθρακες, βιοκαύσιμα, αλκοόλες (μεθανόλη, αιθανόλη) και το φυσικό αέριο. Όταν το καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο, το μόνο παραπροϊόν είναι το νερό και η θερμότητα. Το οξειδωτικό μέσο είναι αέριο οξυγόνο ή ατμοσφαιρικός αέρας.

2.3.1 Ιδιότητες του Υδρογόνου

Το υδρογόνο αποτελεί το 90% του σύμπαντος. Στην γη βρίσκεται κυρίως σε ενώσεις του όπως το νερό και οι υδρογονάνθρακες, ενώ σαν καθαρό στοιχείο υπάρχει μόνο σε ίχνη στην ατμόσφαιρα. Το υδρογόνο έχει την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα βάρους, λόγω όμως της χαμηλής πυκνότητάς του, έχει χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου (βλέπε Πίνακα 1), ταιριάζει επομένως σε εφαρμογές όπου το βάρος παρά ο όγκος έχει σημασία.

Πίνακας 1: Σύγκριση ενεργειακών φορέων

Ενεργειακός φορέας	Υδρογόνο	Φ.Α.	LPG (προπάνιο)	Μεθανόλη	Βενζίνη	Μπαταρίες Μολύβδου
Ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα βάρους (kWh/kg)*	33.3	13.9	12.9	5.6	12.7	0.03
Ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου (kWh/lt)	0.53	2.6	7.5	4.4	8.7	0.09

Δεν έχει συμπεριληφθεί το βάρος του εξοπλισμού αποθήκευσης του κάθε ενεργειακού φορέα

Το υδρογόνο είναι ένας δευτερογενής ενεργειακός φορέας μια και για την παραγωγή του, την διάσπαση δηλαδή των ενώσεων του, απαιτείται ενέργεια. Ως

εκ τούτου, για να εκτιμηθεί η περιβαλλοντική διάσταση του υδρογόνου, πρέπει να ληφθεί υπόψη ο πλήρης κύκλος παραγωγής και χρήσης του.

Οι εμπορικές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου είναι:

- η αναμόρφωση υδρογονανθράκων με ατμό, κυρίως Φ.Α (κόστος 5\$/GJ).
- η μερική οξειδωση – αεριοποίηση βαρέων υδρογονανθράκων (13 \$/GJ)
- η ηλεκτρόλυση του νερού (12 \$/GJ)

Για την παραγωγή υδρογόνου από αναμόρφωση υδρογονανθράκων, καταναλώνεται περίπου το 20-30% του υδρογονάνθρακα για την παραγωγή της ενέργειας που απαιτείται για τη διαδικασία και εκλύονται συνεπώς αέρια του «θερμοκηπίου». Το πρόβλημα της ρύπανσης παραμένει και στην περίπτωση της ηλεκτρόλυσης, εφόσον η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από ορυκτά καύσιμα. Εάν όμως η ηλεκτρική ενέργεια έχει παραχθεί από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, τότε κατά τη παραγωγή του υδρογόνου εκλύονται μηδενικοί ρύποι.

Επί του παρόντος το υδρογόνο έχει κυρίως βιομηχανική χρήση ενώ οι ενεργειακές χρήσεις του υδρογόνου αποτελούν ελάχιστο ποσοστό. Η βιομηχανία αμμωνίας καταναλώνει το 50% του παραγόμενου υδρογόνου και τα διυλιστήρια το 37%. Σημαντικές καταναλώσεις έχει και η βιομηχανία τροφίμων (υδρογόνωση ελαίων). Ο βασικός ενεργειακός χρήστης του υδρογόνου είναι η διαστημική βιομηχανία.

Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν εναλλακτικό καύσιμο σε πλήθος (κατάλληλα τροποποιημένων) τεχνολογιών καύσης όπως καταλυτικούς καυστήρες, λέβητες αερίου, αεριοστροβίλους και κινητήρες εσωτερικής καύσης. Η καύση του υδρογόνου παράγει νερό αλλά, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών καύσης, παράγονται και οξείδια του αζώτου.

Το υδρογόνο καίγεται στον αέρα σε πολύ μεγαλύτερο εύρος συγκεντρώσεων από ότι το μεθάνιο και τα όρια έκρηξης του είναι επίσης μεγαλύτερα, αλλά διαχέεται πιο γρήγορα από το μεθάνιο ή τις βενζίνες. Είναι ελαφρύτερο του αέρα και επομένως ανεβαίνει γρήγορα ψηλά, σε αντίθεση με το προπάνιο και τους ατμούς βενζίνης που παραμένουν στο έδαφος. Κατά

συνέπεια, η χρήση του ενδείκνυται για εξωτερικούς ή καλά αεριζόμενους χώρους. Οι ιδιότητες αυτές του υδρογόνου παρουσιάζονται στον Πίνακα 2:

Πίνακας 2: Ιδιότητες Υδρογόνου

	Υδρογόνο	Μεθάνιο	Προπάνιο
ΚΘΙ (kWh/Nm³)	3	9.9	25.9
Πυκνότητα (kg/m³)	0.09	0.7	2
Συγκέντρωση για καύση (όγκος %)	4.1 - 72.5	5.1 - 13.5	2.5 - 9.3
Όρια έκρηξης (όγκος %)	13 - 65	6.3 - 14	-
Συντελεστής διάχυσης (cm²/s)	0.61	0.15	-

2.3.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Καθώς όμως το υδρογόνο δεν υπάρχει ελεύθερο στη φύση παρά μόνο σε σύνθετη μορφή με άλλα στοιχεία, απαιτείται η κατανάλωση ενέργειας για την εξαγωγή του, πριν διατεθεί κι αυτό με τη σειρά του για παραγωγή ενέργειας. Η παραγωγή του λοιπόν γίνεται κυρίως από το νερό, μέσω της ηλεκτρόλυσης και από τους υδρογονάνθρακες, αναμορφώνοντάς τους ή διασπώντάς τους με θερμικές διαδικασίες. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυριότερες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου.

2.3.2.1 Ηλεκτρόλυση νερού

Η πιο καθαρή μέθοδος παραγωγής υδρογόνου είναι η ηλεκτρόλυση νερού, για την οποία φυσικά απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια. Αν για το σκοπό αυτό χρησιμοποιηθεί ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ορυκτά καύσιμα, τότε βέβαια το πρόβλημα της ρύπανσης του περιβάλλοντος παραμένει. Η χρήση πυρηνικής ενέργειας είναι μια δυνατότητα που όμως εγκαταλείπεται λόγω των κινδύνων των αποβλήτων ή ενδεχόμενων πυρηνικών ατυχημάτων που περιλαμβάνει.

Η πιο «καθαρή» και ασφαλής μέθοδος παραγωγής είναι η ηλεκτρόλυση νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Σε χώρες με άφθονες υδατοπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί υδροηλεκτρική ενέργεια. Το κόστος αυτής της μεθόδου υπολογίζεται στα 12\$/GJ.

Άλλες ανανεώσιμες πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να είναι η ηλιακή, αιολική και γεωθερμία. Αυτή η τεχνική μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση της ενέργειας από ΑΠΕ σε μορφή υδρογόνου, το οποίο μπορεί να μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρισμό, ιδανικά μέσω κυψελών καυσίμου, σε περιόδους περιορισμένης διαθεσιμότητας της φυσικής πηγής. Η ανάκτηση υδρογόνου από την ηλεκτρόλυση του νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι απόλυτα αβλαβής για το περιβάλλον για τους εξής λόγους:

- (i) το νερό βρίσκεται σε ανεξάντλητες ποσότητες στη γη
- (ii) η παραγωγή του υδρογόνου γίνεται με επίσης ανεξάντλητες πηγές ενέργειας
- (iii) η οξειδωσή του για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (στις κυψέλες καυσίμου) παράγει καθαρό νερό το οποίο μπορεί να ανακυκλωθεί άμεσα

Το κόστος παραγωγής υδρογόνου από ηλιακή ενέργεια είναι αρκετά υψηλό και φτάνει στα 47\$/GJ ή και περισσότερο. Εκτός από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες που απαιτούνται, οι ηλεκτρολυτικές συσκευές είναι επίσης σημαντικό κέντρο κόστους λόγω των μεγάλων αυξομειώσεων του ρεύματος από τη διακύμανση της ηλιοφάνειας. Η χρήση της αιολικής ενέργειας αντιμετωπίζει παρόμοια προβλήματα και το κόστος της ανέρχεται στα 32\$/GJ.

Πέρα από τη συμβατική ηλεκτρόλυση νερού, όπου χρησιμοποιείται ένα μικρο-πορώδες διάφραγμα για το διαχωρισμό των παραγόμενων αερίων (οξυγόνο στην κάθοδο και υδρογόνο στην άνοδο) από το αλκαλικό διάλειμμα, ερευνάται η ηλεκτρόλυση σε υψηλή πίεση ή θερμοκρασία. Κατά την ηλεκτρόλυση σε υψηλή πίεση γίνεται προσπάθεια για τη δυνατότητα σύνδεσης του ηλεκτρολύτη με κυμαινόμενη πηγή ρεύματος που μπορεί να προέρχεται από τη

χρήση αιολικής ή ηλιακής ενέργειας σε αυτόνομο σύστημα. Στην περίπτωση της ηλεκτρόλυσης σε υψηλή θερμοκρασία ο στόχος είναι να καλύπτεται μέρος των ενεργειακών αναγκών της μεθόδου από τη θερμότητα η οποία μπορεί να παράγεται από ηλιοθερμικούς συλλέκτες ή απορριπτά θερμότητα από σταθμούς παραγωγής ενέργειας .

Τέλος, υπάρχει συσκευή ηλεκτρόλυσης όπου φωτοβολταϊκά κύτταρα είναι ταυτόχρονα και ηλεκτρόδια που διασπούν το νερό κάτω από ηλιακή ακτινοβολία. Η μέθοδος αυτή υπόσχεται παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμη πηγή με χαμηλό κόστος αλλά προς το παρόν περιορίζεται από την υψηλή τάση που απαιτείται για την ηλεκτρόλυση του νερού και τη διαβρωτικότητα του αλκαλικού διαλύματος.

2.3.2.2 Αναμόρφωση υδρογονανθράκων

Από τα $4 \times 10^{11} \text{Nm}^3$ υδρογόνου που παράγονται ετησίως στον κόσμο, οι μεγαλύτερες ποσότητες προέρχονται από την αναμόρφωση φυσικού αερίου, βιοαερίου και ελαφρών κλασμάτων πετρελαίου, με την επίδραση υδρατμών σε θερμοκρασία περίπου 1100°C , παρουσία καταλυτών (συνήθως νικέλιο). Είναι προφανές ότι η εκπομπή CO και CO_2 είναι αναπόφευκτη και το μεν μονοξείδιο είναι δηλητηριώδες, το δε διοξείδιο, αν και αβλαβές για τη χλωρίδα και την πανίδα συμβάλλει σημαντικά στη δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου. Παρά ταύτα, η εξαγωγή του υδρογόνου από το φυσικό αέριο (μεθάνιο), αποσπώντας 4 άτομα υδρογόνου από κάθε άτομο άνθρακα, είναι πολύ καθαρή και αποδοτική, οδηγώντας σε υποτριπλασιασμό των εκπομπών άνθρακα στο περιβάλλον σε σχέση με τη συμβατική χρήση. Η ενέργεια που απαιτείται για την διαδικασία αυτή αντιστοιχεί στο 20-30% του υδρογονάνθρακα που αναμορφώνεται αλλά το κόστος είναι μόνο 5\$/GJ, καθιστώντας αυτή τη μέθοδο την πιο συμφέρουσα οικονομικά.

Ο αναμορφωτής καυσίμου (reformer) είναι η συσκευή παραγωγής υδρογόνου, μέσω αναμόρφωσης υδρογονανθράκων. Το υδρογόνο που παράγεται με τη μέθοδο αυτή είναι χαμηλής καθαρότητας, γεγονός που το κάνει

απαγορευτικό να χρησιμοποιηθεί ως έχει στην κυψέλη καυσίμου. Τα λοιπά στοιχεία που περιέχονται σε αέριο χαμηλής καθαρότητας υδρογόνου, δρουν ως δηλητήριο για την κυψέλη, μειώνοντας το χρόνο ζωής της. Αντίθετα υψηλής καθαρότητας υδρογόνου, της τάξης του 99,95%, διασφαλίζει ότι τα λοιπά στοιχεία που υπάρχουν, δεν δημιουργούν πρόβλημα στη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου και καίγονται με ασφάλεια την κάθοδο. Για το λόγο αυτό πρέπει να παρεμβάλλεται συσκευή καθαρισμού, ανάμεσα στον αναμορφωτή και την κυψέλη καυσίμου.

2.3.2.3 Αεριοποίηση

Η αεριοποίηση ή απανθράκωση ανθράκων είναι η παλαιότερη μέθοδος παραγωγής υδρογόνου. Περιλαμβάνει θέρμανση άνθρακα στους 900°C με υδρατμούς και καθαρό οξυγόνο, που το διασπούν σε υγρά, αέρια και στερεά προϊόντα. Το αέριο είναι κυρίως υδρογόνο. Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλα ανθρακούχα υλικά όπως η βιομάζα ή τα αστικά απόβλητα. Το κόστος υπολογίζεται στα 13\$/GJ.

2.3.2.4 Θερμική Διάσπαση Υδρογονανθράκων

Αυτή η μέθοδος αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '80. Το φυσικό αέριο και διάφορα κλάσματα του πετρελαίου, με θερμική διάσπαση, δίνουν υδρογόνο και καθαρό άνθρακα στη μορφή σκόνης. Έτσι αποφεύγονται οι εκπομπές μονοξειδίου και διοξειδίου, ενώ η σκόνη άνθρακα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία ελαστικών ή να αποθηκευθεί στο υπέδαφος. Το κόστος είναι υψηλότερο από αυτό της αναμόρφωσης υδρογονανθράκων και η εφαρμογή είναι ακόμα πολύ περιορισμένη.

2.3.2.5 Φυτοβιολογικές μέθοδοι

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου από βιολογικές διαδικασίες. Οι περισσότερες βασίζονται στη φυσική δραστηριότητα των

βακτηρίων και πράσινων φυκιών που έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή υδρογόνου. Η χλωροφύλλη απορροφά ηλιακό φως και τα ένζυμα χρησιμοποιούν την ενέργεια για να αποσπασουν το υδρογόνο από το μόριο του νερού. Ενώ αυτή η μέθοδος είναι πολλά υποσχόμενη για τη μακροπρόθεσμη παραγωγή υδρογόνου έχει δυο βασικά μειονεκτήματα: Τη χαμηλή απόδοση (5-6%) μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ενέργεια με τη μορφή υδρογόνου και το γεγονός ότι η δραστηριότητα των ενζύμων εμποδίζεται από την παρουσία οξυγόνου, το δεύτερο παράγωγο από τη διάσπαση του νερού. Η έρευνα έχει επικεντρωθεί στην επίλυση αυτών των προβλημάτων.

Τέλος γίνονται έρευνες για άλλες μεθόδους παραγωγής υδρογόνου που βρίσκονται σε διάφορα στάδια ανάπτυξης αλλά δεν εφαρμόζονται ακόμα σε ευρεία κλίμακα. Μερικές από αυτές είναι η θερμική διάσπαση του νερού, που μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας, η φωτοκαταλυτική διάσπαση του νερού καθώς και η διάσπαση του νερού από μέταλλα, όπως π.χ. σίδηρο.

2.3.3 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Η πυκνότητα του υδρογόνου σε κανονικές συνθήκες είναι 0,0899g/lit, δηλαδή 14,4 φορές μικρότερη από τον αέρα. Κατά συνέπεια ο συντελεστής διάχυσης είναι 0,61cm³/s καθιστώντας το υδρογόνο ιδιαίτερα πτητικό. Επίσης αντιδρά με διάφορα υλικά όπως π.χ. χάλυβες υψηλής ποιότητας, κάνοντάς τους εύθραυστους ενώ υγροποιείται στους -253°C. Για αυτούς τους λόγους πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις μεθόδους αποθήκευσης και μεταφοράς του υδρογόνου. Θα πρέπει οι λύσεις να είναι οικονομικές, με περιορισμένο όγκο και βάρος και να δοθεί έμφαση σε θέματα ασφάλειας, ειδικά αν πρόκειται να γίνει ευρεία χρήση του στο προσεχές μέλλον και ιδιαίτερα στον τομέα των μεταφορών. Γενικά θεωρείται ότι η αποθήκευση του υδρογόνου είναι η Αχίλλειος πτέρνα του.

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος αποθήκευσης υδρογόνου είναι στην αέρια μορφή του, σε δεξαμενές ή κυλίνδρους, υπό πίεση 200-350 bar. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων σε υπόγειες σπηλιές ή εξαντλημένα πηγάδια ορυχείων που περιβάλλονται από πορώδη πετρώματα κεκορεσμένα με νερό, ώστε να αποφεύγονται οι διαρροές.

Στην υγρή μορφή του αποθηκεύεται σε σφαιρικά ντεπόζιτα με διπλά τοιχώματα από χάλυβα ή αλουμίνιο. Μεταξύ των τοιχωμάτων υπάρχει κενό αέρος. Με αυτή τη μέθοδο γίνεται οικονομία χώρου (80% μικρότερος όγκος από αέριο υδρογόνο υπό πίεση) αλλά απαιτείται ενέργεια που ισοδυναμεί με το 40% της ενέργειας που περιέχεται στο υδρογόνο.

Τέλος μπορεί να γίνει αποθήκευση υδρογόνου όπου αυτό είναι ενωμένο με κάποιο υλικό, είτε ως υδρίδιο είτε με προσρόφηση. Με τη μέθοδο αυτή μειώνεται σημαντικά ο όγκος που καταλαμβάνει το υδρογόνο ως αέριο χωρίς να απαιτείται υψηλή πίεση. Το βάρος εξαρτάται από το υλικό που χρησιμοποιείται και συνήθως το καθαρό βάρος είναι το 10% του μεικτού. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται επίσης η αντίδραση του υδρογόνου με άλλα υλικά ενώ αποφεύγεται ο κίνδυνος έκρηξης ή πυρκαγιάς. Τα δοχεία μπορούν να είναι οποιοδήποτε σχήματος με αποτέλεσμα να ευνοείται η χρήση τους στις μεταφορές.

Πίνακας 3: Σύγκριση μεθόδων αποθήκευσης υδρογόνου

Μέθοδος Αποθήκευσης	Περιεκτικότητα H ₂ κατά βάρος
Δοχείο πεπιεσμένου αερίου	7,5%
Υδρίδιο κραμάτων μετάλλων	10%
Προσρόφηση σε ίνες άνθρακα	18%

Τα υδρίδια μπορεί να είναι στερεά, υγρά και αέρια. Τα πιο συνηθισμένα που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση υδρογόνου είναι κράματα μετάλλων, όπως τιτάνιου-σιδήρου και λανθανίου-νικελίου. Το υδρογόνο εισάγεται ως αέριο υπό πίεση και για να ελευθερώνεται ως αέριο πάλι με θέρμανση του δοχείου.

Η πιο πρόσφατη μέθοδος αποθήκευσης υδρογόνου είναι αυτή της προσρόφησης σε ίνες άνθρακα. Το κυριότερο πλεονέκτημα σε σχέση με τα

υδρίδια μετάλλων είναι η μείωση του βάρους που μειώνεται σχεδόν στο μισό. Η παραγωγή όμως των ινών είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα. Στον Πίνακα 3 γίνεται μια σύγκριση των μεθόδων αποθήκευσης υδρογόνου που αναφέρθηκαν με γνώμονα το βάρος.

Ένα από τα κυριότερα προβλήματα που παρουσιάζονται σήμερα για την καθιέρωση του υδρογόνου ως του καταλληλότερου και φιλικότερου προς το περιβάλλον καυσίμου στην αγορά, πέρα από το κόστος παραγωγής του, είναι η έλλειψη υποδομής για την εύκολη παροχή του καυσίμου στους καταναλωτές. Βραχυπρόθεσμα, χρήση υδρογόνου μπορεί να γίνει στη βιομηχανία και τον οικιακό τομέα. Μεσοπρόθεσμα, οι εφαρμογές μπορούν να επεκταθούν στις μεταφορές, αρχικά σε βαρέα οχήματα και τις αστικές συγκοινωνίες και αργότερα στα ιδιωτικής χρήσης αυτοκίνητα. Για να είναι όμως εφικτό αυτό, θα πρέπει να υπάρχει εύκολος, ασφαλής και οικονομικός τρόπος πρόσβασης των καταναλωτών στο καύσιμο. Η μετάβαση, από ένα επί σειράς ετών σύστημα ενέργειας που βασίζεται κυρίως στο πετρέλαιο και τα παράγωγά του, σε ένα που θα γίνεται χρήση υδρογόνου, απαιτεί χρόνο και γενναία, δαπανηρά βήματα από κυβερνήσεις, παραγωγούς και καταναλωτές ενέργειας.

Οι πιθανές λύσεις για τη διανομή καυσίμου υδρογόνου είναι οι ακόλουθες:

- (i) Διανομή σε τόπους ανεφοδιασμού με βυτιοφόρο από κεντρική μονάδα παραγωγής
- (ii) Διανομή σε τόπους ανεφοδιασμού με δίκτυο αγωγών από κεντρική μονάδα παραγωγής
- (iii) Διανομή φυσικού αερίου με δίκτυο αγωγών στους τόπους ανεφοδιασμού όπου θα γίνεται τοπικά η αναμόρφωση σε υδρογόνο
- (iv) Τοπική παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση χρησιμοποιώντας είτε το ηλεκτρικό δίκτυο είτε ΑΠΕ

Η καταλληλότητα της μεθόδου εξαρτάται φυσικά και από το είδος της εφαρμογής. Το μεγαλύτερο όμως πρόβλημα παρουσιάζεται στη χρήση υδρογόνου στις μεταφορές, όπου για να είναι εφικτή η διάδοση των οχημάτων που κινούνται με το νέο καύσιμο θα πρέπει να υπάρχει στους δρόμους μεγάλος αριθμός σταθμών

ανεφοδιασμού. Επίσης, η μετάγγιση του υδρογόνου θα πρέπει να γίνεται απουσία αέρα, με ειδική βαλβίδα για να αποφευχθούν ατυχήματα λόγω της μεγάλης πτητικότητας. Ήδη σε κάποια μέρη του κόσμου (Γερμανία, ΗΠΑ) υπάρχουν κάποιοι σταθμοί ανεφοδιασμού οχημάτων που κινούνται με υδρογόνο που λειτουργούν δοκιμαστικά.

2.3.4 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Προς το παρόν, ο μεγαλύτερος καταναλωτής υδρογόνου σαν καύσιμο στον κόσμο είναι η NASA που το χρησιμοποιεί για την εκτόξευση διαστημοπλοίων και την προώθησή τους σε τροχιά. Πέρα από αυτή όμως τη χρήση, υπάρχουν και άλλες που με την εξέλιξη της τεχνολογίας γίνονται όλο και πιο κοινές.

Κατά την καύση του υδρογόνου με οξυγόνο, παράγονται εκτός από νερό και οξείδια του αζώτου. Για την μείωση των εκπομπών των οξειδίων αυτών χρησιμοποιούνται καυστήρες με μια επίστρωση καταλυτών. Με τους καταλυτικούς καυστήρες η περιοχή των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται ελέγχεται εύκολα αλλά οι παραγόμενοι υδρατμοί τους κάνουν ακατάλληλους για κάποιες εφαρμογές.

Ένας λέβητας φυσικού αερίου μπορεί εύκολα να μετατραπεί ώστε να χρησιμοποιηθεί με υδρογόνο. Το μόνο που απαιτείται είναι ελάττωση του ανοίγματος του στομίου και ρύθμιση της ταχύτητας της ροής του καύσιμου. Η θερμαντική αξία του υδρογόνου είναι ανά μονάδα βάρους μεγαλύτερη από το φυσικό αέριο ενώ εκμηδενίζονται οι εκπομπές οξειδίων του άνθρακα και υδρογονανθράκων. Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου μπορούν να μειωθούν με τεχνικές βελτιώσεις.

Το υδρογόνο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί όπως οποιοδήποτε άλλο αέριο στους αεριοστροβίλους. Η καύση είναι καθαρή, χωρίς να αφήνει ιζήματα ενώ περιορίζεται η διάβρωση των πτερυγίων. Το τελευταίο έχει ως αποτέλεσμα

τη δυνατότητα αύξησης της θερμοκρασίας εισόδου του καυσίμου και κατά συνέπεια αυξάνεται η απόδοση του συστήματος.

Με λίγες μετατροπές στο θάλαμο καύσεως το υδρογόνο μπορεί να αντικαταστήσει την κηροζίνη στα αεροπλάνα. Επίσης, με τα κατάλληλα μέτρα ώστε να αποφευχθεί η προανάφλεξη, το υδρογόνο είναι πολύ καλό καύσιμο στους κινητήρες εσωτερικής καύσεως με απόδοση κατά 22% υψηλότερη από τον αντίστοιχο βενζινοκινητήρα.

Οι κυψέλες καυσίμου, αναμένεται να είναι η βέλτιστη τεχνολογία για χρήση υδρογόνου στο προσεχές μέλλον. Η τεχνολογική πρόοδος και μείωση του κόστους, τις έφερε πάλι στο προσκήνιο πριν μερικά χρόνια και ήδη πολλές αυτοκινητοβιομηχανίες εξετάζουν τη χρήση τους στις μεταφορές. Οι κυψέλες καυσίμου εκτελώντας μια διαδικασία αντίστροφη της ηλεκτρόλυσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος σε πληθώρα εφαρμογών που εκτείνονται από κεντρικές μονάδες παραγωγής ρεύματος σε μινιατούρες που θα αντικαταστήσουν τις μπαταρίες σε ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΥΠΟΙ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

3.1 Τύποι κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου διακρίνονται ανάλογα με τον τύπο του ηλεκτρολύτη που διαθέτουν. Έτσι έχουμε :

Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC)

Κυψέλες καυσίμου πολυμερών ηλεκτρολυτών (PEFC).

Κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC)

Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC),

Κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC),

Κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC)

Ένα άλλος τρόπος διάκρισης είναι η θερμοκρασία λειτουργίας. Χαμηλής θερμοκρασίας είναι οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC), οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) και οι κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC). Μεσαίας θερμοκρασίας είναι οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC), ενώ υψηλής θερμοκρασίας είναι οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) και οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC).

Οι κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας, χρησιμοποιούν ως καύσιμο καθαρό υδρογόνο. Η παρουσία μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και αερίων που περιέχουν θείο (S) στην ροή του καυσίμου, προκαλούν την καταστροφή της ανόδου και υποβάθμιση της λειτουργίας της κυψέλης.

Στις κυψέλες καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών, δηλαδή στερεών οξειδίων (SOFC) και τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), μια ευρύτερη ποικιλία καυσίμων μπορεί να χρησιμοποιηθεί επειδή, αφ' ενός μεν η χημική διεργασία στο ηλεκτρόδιο είναι εντονότερη, αφ' ετέρου δε η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας μειώνει την ανάγκη ηλεκτροκαταλυτικής δράσης. Επίσης σε αυτές τις κυψέλες, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας, η επεξεργασία του καυσίμου μπορεί να γίνει εσωτερικά στην κυψέλη και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας άλλα καύσιμα που περιέχουν υδρογονάνθρακες.

Η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), καθορίζεται από το σημείο τήξεως του ηλεκτρολύτη, ενώ η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC), καθορίζεται από την ιοντική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη.

Στις κυψέλες καυσίμου χαμηλής πίεσης, τα αρχικά φορτία είναι είτε πρωτόνια (θετικό φορτίο), είτε ιόντα υδροξυλίου (αρνητικό φορτίο), ενώ στις κυψέλες υψηλής πίεσης τα αρχικά φορτία είναι ιόντα άνθρακα και όξινα ιόντα.

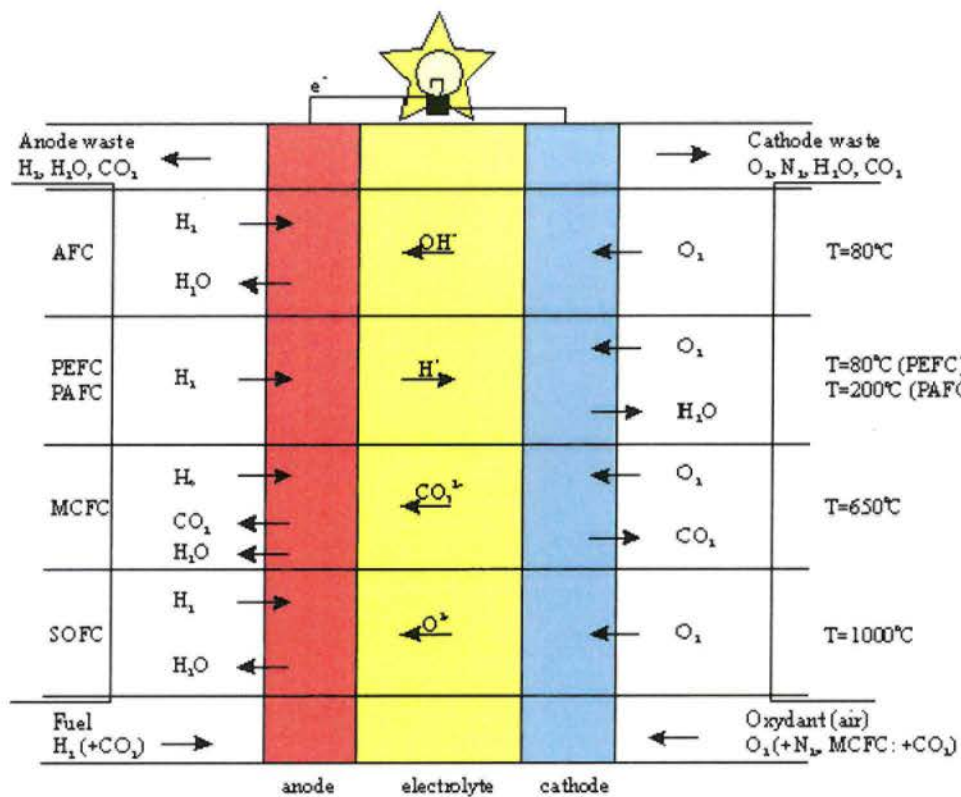
Στον πίνακα 1 φαίνονται τα αντιδρώντα, τα προϊόντα και το μεταφερόμενο ιόν μέσα από τον ηλεκτρολύτη, για διαφόρους τύπους κυψελών καυσίμου.

Πίνακας 1: Συνοπτικός πίνακας των αντιδράσεων που πραγματοποιούνται σε κάθε τύπο κυψέλης καυσίμου.

ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΑΝΟΔΟΥ	ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΟ ΙΟΝ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΚΑΘΟΔΟΥ
AFC	$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	OH^-	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$
PEMFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	H^+	$O_2 + 4H^+ \rightarrow 2H_2O$
DMFC	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$	H^+	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
PAFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	H^+	$O_2 + 4H^+ \rightarrow 2H_2O$
MCFC	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$	CO_3^{2-}	$O_2 + 2CO_2 + 4e^- \rightarrow CO_3^{2-}$
SOFC	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O_2 \rightarrow CO_2 + 2e^-$	O^{2-}	$O_2 + e^- \rightarrow 2O^{2-}$

Σημείωση: Στον τύπο AFC, το νερό σχηματίζεται στην άνοδο, αλλά χρειάζεται για την αντίδραση στην κάθοδο. Στον τύπο MCFC, το CO₂ χρειάζεται για την αντίδραση στην κάθοδο και πρέπει να επανακυκλοφορήσει από την άνοδο.

Στον παρακάτω πίνακα, φαίνεται το καύσιμο στην άνοδο και στην κάθοδο και το μεταφερόμενο ιόν από τον ηλεκτρολύτη, για διάφορους τύπους κυψελών καυσίμου.



Πίνακας 2

	ΤΥΠΟΙ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ					
	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Ηλεκτρολύτης	Υδροξειδίο του καλίου	Πολυμερές	Πολυμερές	Φωσφορικό Οξύ	Μίγμα Ανθρακικών Αλκαλίων	Σταθεροποιημένο ζιρκόνιο
Κατάσταση ηλεκτρολύτη	Υγρός	Στερεός	Στερεός	Ακίνητοποιημένο υγρό	Ακίνητοποιημένο υγρό	Στερεός
Θερμοκρασία Λειτουργίας (°C)	60-90	70-100	90	150-220	600-700	650-1000
Ανταλλάξιμο φορτίο	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ⁼	O ⁼
Άνοδος	Νικέλιο (Ni) ή Λευκόχρυσος (Pt)	Λευκόχρυσος (Pt)	Λευκόχρυσος (Pt) ή Ρουθίνιο (Ru)	Λευκόχρυσος (Pt)	Οξειδίο του Νικελίου (NiO) ή του χρωμίου	Στερεός
Κάθοδος	Λευκόχρυσος (Pt) ή οξειδίο του νικελίου	Λευκόχρυσος (Pt)	Λευκόχρυσος (Pt) ή Ρουθίνιο (Ru)	Λευκόχρυσος (Pt)	Οξειδίο του Νικελίου (NiO)	Σταθεροποιημένο ζιρκόνιο
Δομή Κυψέλης		Βασισμένη σε Γραφίτη	Ανοξειδωτο Ατσάλι			Κεραμικό Υλικό
Καταλύτης		Λευκόχρυσος (Pt)		Λευκόχρυσος (Pt)	Νικέλιο	Υπεροξειδία
θερμότητα από Συμπαραγωγή	Καθόλου	Χαμηλής ποιότητας	Καθόλου	Αποδεκτή για πολλές εφαρμογές	Υψηλή	Υψηλή

Βαθμός Απόδοσης [11]	50-70%	40-50%	25-40%	40-45%	50-60%	50-60%
Καύσιμο	H ₂ . Απαραίτητη η απομάκρυνση του CO ₂ , από τα αέρια της ανόδου και της καθόδου.	H ₂ Αν αυτό προέρχεται από αναμόρφωση, η περιεκτικότητα σε CO να είναι CO<10ppm	Διάλυμα νερού/μεθανόλης	H ₂ Και από αναμόρφωση	H ₂ , CO, φυσικό αέριο	H ₂ , CO, φυσικό αέριο
Μέγιστη πυκνότητα ισχύος (MW/cm ²)		700		200	160	200 (500 υπό ανάπτυξη)
Ισχύς	Μέχρι 20kW	Μέχρι 250kW	<10kW	>50kW	>1MW	>200kW
Εφαρμογές	Μικρές μονάδες. Χρήση σε διαστημικές εφαρμογές.	Οικιακή και εμπορική παραγωγή Συστήματα κίνησης οχημάτων	Φορητές συσκευές	Εμπορική παραγωγή. Μεγάλα οχήματα (λεωφορεία)	Εμπορική και βιομηχανική παραγωγή. Μονάδες μεγάλης ισχύος (MW)	Οικιακή, εμπορική και βιομηχανική παραγωγή (μεγάλη ισχύς).

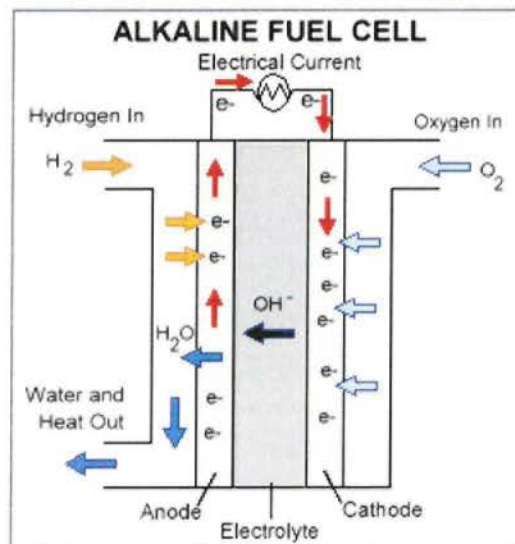
3.2 ΑΛΚΑΛΙΚΕΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (AFC)

3.2.1 Εισαγωγή

Στην αλκαλική κυψέλη καυσίμου, ο ηλεκτρολύτης είναι υδροξείδιο του καλίου (KOH), λόγω της υψηλής αγωγιμότητας των ιόντων υδροξυλίου. Η κυψέλη λειτουργεί σε θερμοκρασίες 60-100°C και σε πίεση ατμοσφαιρική. Τυπική πυκνότητα ισχύος είναι 0.2-0.3W/cm². Οι προβλεπόμενες ώρες λειτουργίας της είναι πάνω από 10000 ώρες, ενώ το κόστος της προβλέπεται να είναι 200\$/kW. Το καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο.

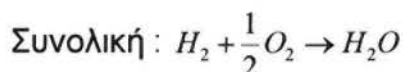
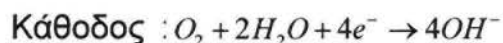
3.2.2 Αρχή λειτουργίας

Η δομή της αλκαλικής κυψέλης καυσίμου (AFC) φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 3.1 Αλκαλική κυψέλη καυσίμου

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις δίνονται παρακάτω.



Στην κάθοδο το οξυγόνο αντιδρά με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από την άνοδο και μαζί με το νερό, σχηματίζουν ανιόντα υδροξυλίου. Τα ανιόντα υδροξυλίου περνούν μέσα από τον ηλεκτρολύτη από την κάθοδο στην άνοδο. Στην άνοδο το υδρογόνο αντιδρά με τα ανιόντα υδροξυλίου απελευθερώνοντας ενέργεια και ηλεκτρόνια και παράγοντας νερό.

3.2.3 Περιγραφή της κυψέλης καυσίμου

Οι κυψέλες αυτού του τύπου χρησιμοποιούν διάλυμα υδροξειδίου του καλίου, ως ηλεκτρολύτη και μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια ποικιλία πολύτιμων ή μη, μετάλλων ως καταλύτες στην άνοδο και την κάθοδο. Έτσι στην άνοδο ο καταλύτης μπορεί να είναι από νικέλιο (Ni) ή λευκόχρυσο (Pt), ενώ στην κάθοδο ο καταλύτης είναι από λευκόχρυσο (Pt) ή οξείδια του νικελίου.

Μεταξύ των αντιδράσεων στην άνοδο και την κάθοδο, η αντίδραση της καθόδου είναι η πιο αργή, αφού χρειάζεται περισσότερος χρόνος για να πραγματοποιηθεί, από αυτή της ανόδου. Παρόλα αυτά στην αλκαλική κυψέλη καυσίμου, η αντίδραση στο ηλεκτρόδιο της καθόδου, πραγματοποιείται πολύ πιο γρήγορα από ότι στους άλλους τύπους κυψελών, με αποτέλεσμα η τάση λειτουργίας κάθε κυψέλης να φτάνει τα 0.875V, αρκετά υψηλότερη από τις υπόλοιπες κυψέλες καυσίμου.

3.2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αλκαλικών κυψελών καυσίμου (AFC).

Όπως και στις PEM , η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας, συνήθως μεταξύ 70-90°C, τους δίνει το πλεονέκτημα της γρήγορης εκκίνησης. Λόγω όμως αυτής της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας, είναι ζωτικής σημασίας οι μέθοδοι απομάκρυνσης του νερού και της θερμότητας.

Ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα είναι η ευαισθησία της στο διοξείδιο του άνθρακα. Έτσι η αλκαλική κυψέλη καυσίμου, δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει ατμοσφαιρικό αέρα, για την παροχή του απαραίτητου οξυγόνου στην κάθοδο. Χρειάζεται ειδικό σύστημα, το οποίο να απομακρύνει το διοξείδιο του άνθρακα από την εισαγωγή του αέρα.

Η χρήση διαβρωτικού ηλεκτρολύτη είναι ένα ακόμα μειονέκτημα. Ο ηλεκτρολύτης διαβρώνει τα υλικά γύρω του, με αποτέλεσμα την μείωση της διάρκειας ζωής της κυψέλης και την αύξηση του κόστους της.

Στην αύξηση του κόστους της συντελεί και η χρήση ακριβού καταλύτη όπως ο λευκόχρυσος. Η χρησιμοποίηση λιγότερο ακριβών καταλυτών όπως ο άνθρακας και ηλεκτρόδια κατασκευασμένα από οξειδία μετάλλων, είναι υπό διερεύνηση.

3.2.5 Εφαρμογές

Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούνται σε διαστημικές εφαρμογές της Nasa, καθώς επίσης σε στρατιωτικές εφαρμογές.



Σε σχέση με τις PAFC, είναι ελκυστικότερες για χρήση στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Αυτό οφείλεται στη δυνατότητα της χρησιμοποίησης λιγότερο ακριβού καταλύτη, όπως το νικέλιο στην άνοδο και το οξειδίο του νικελίου στην κάθοδο.

Όσο οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου, απαιτούν για την λειτουργία τους καθαρό υδρογόνο και οξυγόνο, δεν μπορεί να γίνει ευρεία χρήση τους σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Παρακάτω φαίνεται μια φορητή γεννήτρια ισχύος 2.4kW στα 48Vdc. Ο βαθμός απόδοσης υπερβαίνει το 50% και είναι πολύ μεγαλύτερος από τον βαθμό απόδοσης των γεννητριών που λειτουργούν με βενζίνη.



Εικόνα 3.1 AFC ισχύος 2,4kW της Astris

Οι κύριοι κατασκευαστές είναι: Astris, Energy Ventures, Gasjatel GmbH, International Fuel Cell, Zenvco Ltd.

3.3 ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC)

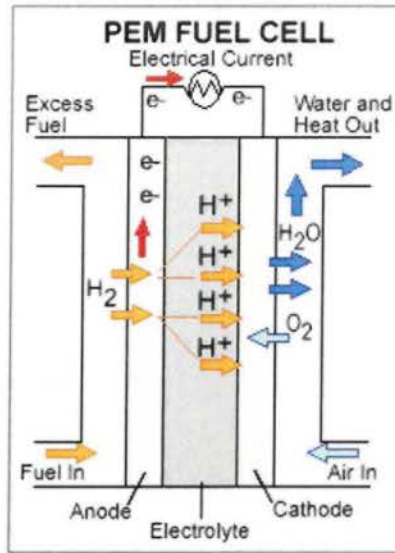
3.3.1 Εισαγωγή

Η κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), γνωστή και ως κυψέλη καυσίμου στερεού πολυμερούς (SPFC), χρησιμοποιεί στερεή πολυμερή μεμβράνη ως ηλεκτρολύτη. Η μεμβράνη βρίσκεται μεταξύ δυο πορωδών ηλεκτροδίων, την άνοδο και την κάθοδο, στα οποία ο καταλύτης είναι από λευκόχρυσο.

Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι μεταξύ των 50-100 °C και η πίεση ατμοσφαιρική ή λίγο μεγαλύτερη. Η πυκνότητα ισχύος είναι 0.35-0.6 W/cm². Η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής της είναι περισσότερο από 40000 ώρες και το κόστος της εκτιμάται ότι θα είναι 200\$/kW. Το καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο, αλλά με τη χρήση εξωτερικού αναμορφωτή καυσίμου, μπορούν να χρησιμοποιήσουν φυσικό αέριο ή βενζίνη.

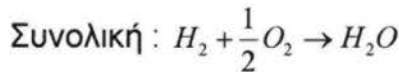
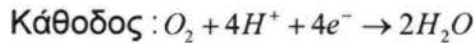
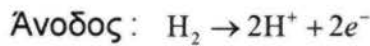
3.3.2 Αρχή λειτουργίας

Η δομή της κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 3.2: Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις δίνονται παρακάτω.



Στην άνοδο το υδρογόνο διασπάται στο ηλεκτρόδιο, σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Τα πρωτόνια κινούνται μέσω της μεμβράνης προς την κάθοδο ενώ τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσω εξωτερικού αγώγιμου κυκλώματος προς αυτήν. Στην κάθοδο το οξυγόνο ενώνεται με τα πρωτόνια από την άνοδο και με τα ηλεκτρόνια και σχηματίζεται νερό.

3.3.3 Περιγραφή της κυψέλης

Ο πολυμερής ηλεκτρολύτης όπως το Nafion, είναι κατασκευασμένος σαν μια μεμβράνη πάχους περίπου 175μm και έχει την όψη ενός καθαρού χαρτιού περιτυλίγματος από σελοφάν. Όταν έχει την κατάλληλη υγρασία, άγει τα θετικά

ιόντα (πρωτόνια υδρογόνου) και μπλοκάρει τα αρνητικά. Τα αρνητικά ιόντα τότε (ηλεκτρόνια), πρέπει να ακολουθήσουν έναν αγωγίμο δρόμο, για να κλείσουν το κύκλωμα γύρω από το πολυμερές. Ο καταλύτης είναι αναγκαίος για την επιτάχυνση της αντίδρασης οξειδωσης και αναγωγής στα ηλεκτρόδια. Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας, ο καταλύτης πρέπει να είναι από λευκόχρυσο (Pt).

3.3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)

Πλεονέκτημα της κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, είναι η υψηλή πυκνότητα ισχύος. Έχει τη μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος από όλους τους τύπους κυψελών, με εξαίρεση ίσως την αλκαλική κυψέλη καυσίμου.

Η χρήση στερεού ηλεκτρολύτη, μειώνει τη διάβρωση που υφίστανται τα υλικά και επιπλέον δεν απαιτείται ειδική διαχείριση των υγρών, που είναι απαραίτητη όταν υπάρχουν υγροί ηλεκτρολύτες.

Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η μικρή θερμοκρασία λειτουργίας. Λόγω αυτού του χαρακτηριστικού, υπάρχει η δυνατότητα της γρήγορης εκκίνησης, κάνοντας τις PEM κατάλληλες για εφαρμογή στα ηλεκτρικά οχήματα.

Ελκυστικό χαρακτηριστικό είναι επίσης η μεγάλη διάρκεια ζωής.

Η χρήση του λευκόχρυσου ως καταλύτη είναι από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα της κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, λόγω του μεγάλου κόστους του πολύτιμου μετάλλου. Βέβαια η ποσότητα του λευκόχρυσου που απαιτείται, μειώθηκε ραγδαία την τελευταία δεκαετία, αλλά χρειάζεται περαιτέρω έρευνα έτσι ώστε οι PEM να γίνουν ανταγωνιστικές.

Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η ευαισθησία της κυψέλης καυσίμου στο μονοξείδιο του άνθρακα. Για τη αντιστάθμιση του προβλήματος αυτού, η κατασκευή γίνεται πολυπλοκότερη.

3.3.5 Εφαρμογές

Οι πρώτες εκδοχές της PEM, όπως χρησιμοποιήθηκαν στο διαστημικό πρόγραμμα "Gemini" της Nasa, είχαν διάρκεια ζωής περίπου 500 ωρών, αρκετές για τις ανάγκες των πρώτων αποστολών. Οι συνεχείς έρευνες οδήγησαν το 1967, στην δημιουργία καινούργιας πολυμερούς μεμβράνης που ονομάστηκε Nafion της εταιρείας Dupont. Αυτός η τύπος μεμβράνης καθιερώθηκε και χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα.

Παρόλα αυτά, το πρόβλημα διαχείρισης του νερού που συγκεντρωνόταν στον ηλεκτρολύτη, μείωνε την αξιοπιστία τους. Για το λόγο αυτό η Nasa, στα οχήματα Apollo, τις αντικατέστησε με τις αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC). Η General Electric επίσης σταμάτησε την ανάπτυξη τους, λόγω του υψηλότερου κόστους της PEM σε σχέση με άλλους τύπους κυψελών όπως η κυψέλη φωσφορικού οξέος που τότε αναπτυσσόταν.

Στα μέσα της δεκαετίας του 1980 όμως, υπήρξε αναπτέρωση του ενδιαφέροντος κυρίως λόγω των προσπαθειών της Ballard στον Καναδά και του εθνικού εργαστηρίου του Los Alamos στις Ηνωμένες Πολιτείες.

Έχουν κατασκευαστεί μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με PEMFC, για χρήση στα αυτοκίνητα, σε οικιακές και βιομηχανικές εφαρμογές. Οι μικρότερες μονάδες, είναι κατάλληλες να αντικαταστήσουν τους συσσωρευτές στους φορητούς υπολογιστές. Το εύρος ισχύος τους είναι από μερικά Watt, έως 10kW.

Οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) αποτελούν τον κύριο υποψήφιο για εφαρμογές σε συστήματα αυτοκίνησης, κυρίως λόγω της ικανότητας τους να εκκινούν κρύες, χωρίς προθέρμανση. Τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανιστεί στο προσκήνιο πολλές εφαρμογές των συστημάτων PEMFC σε μονάδες αυτοκίνησης, οι οποίες χρησιμοποιούν κυρίως συστοιχίες της εταιρείας Ballard. Στις 14 Μαΐου 1996 στο Βερολίνο, παρουσιάστηκε το πρώτο όχημα που λειτουργούσε με κυψέλη καυσίμου

μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Το όχημα αυτό κατασκευάστηκε από την Daimler-Benz και ονομάστηκε Neocar II.

Από τότε έχουν κατασκευαστεί αυτοκίνητα και λεωφορεία από όλες τις μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνολογία.



Εικόνα 3.2: Επιβατικό όχημα κινούμενο με κυψέλη καυσίμου

Η πρώτη κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων ισχύος 7kW για κάλυψη οικιακών αναγκών, εγκαταστάθηκε σε οικία στο Latham στην Νέα Υόρκη από την Plug Power



Εικόνα 3.3: Η πρώτη PEMFC ισχύος 7kW της Plug Power

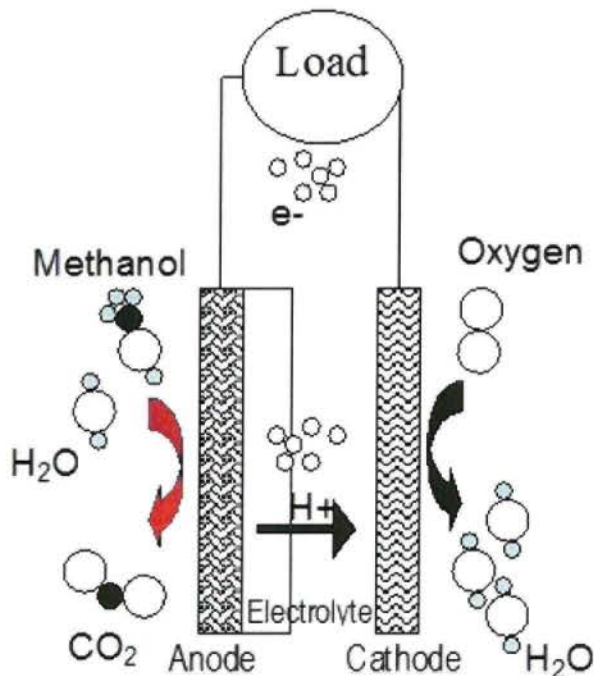
3.4 ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΑΜΕΣΗΣ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ (DMFC)

3.4.1 Εισαγωγή

Ο τύπος αυτός είναι νέος σε σχέση με τις υπόλοιπες κυψέλες καυσίμου. Είναι υβρίδιο της PEM, αλλά αντί υδρογόνου, χρησιμοποιεί μεθανόλη ως καύσιμο [16]. Η θερμοκρασία λειτουργίας της είναι μεταξύ 50-100°C, σε ατμοσφαιρική πίεση και δίνει πυκνότητα ισχύος 0.04-0.23 W/cm². Η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής είναι πάνω από 10000 ώρες και το κόστος της προβλέπεται να είναι 200\$/kW.

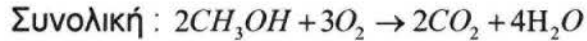
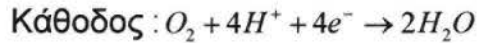
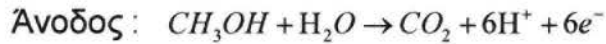
3.4.2 Αρχή λειτουργίας

Η δομή της κυψέλης καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC), είναι:



Σχήμα 3.3: Κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις δίνονται παρακάτω.



Στην άνοδο η μεθανόλη διασπάται και με το νερό, δίνει διοξείδιο του άνθρακα, πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Παρατηρούμε ότι απαιτείται η ύπαρξη νερού στην άνοδο, παρόλο που στην κάθοδο αυτό παράγεται πολύ πιο γρήγορα. Έτσι ενώ το καύσιμο είναι καθαρή μεθανόλη, θα πρέπει να αποθηκεύεται νερό στην κυψέλη και να προστίθεται στη μεθανόλη στην άνοδο. Στην κάθοδο, το οξυγόνο ενώνεται με τα πρωτόνια που έρχονται από την άνοδο μέσω του ηλεκτρολύτη και τα ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα και παράγεται νερό.

3.4.3 Περιγραφή της κυψέλης

Ο ηλεκτρολύτης είναι μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM), έχει όμως μεγαλύτερο πάχος. Ο καταλύτης στην άνοδο είναι διμεταλλικός από λευκόχρυσο και στη κάθοδο λευκόχρυσος. Στην άνοδο, ο καταλύτης από μόνος τους έλκει το υδρογόνο, από το υγρό μεθάνιο.

3.4.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου στερεών άμεσης μεθανόλης (DMFC)

Η κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC), έχει παρόμοια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα με την κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM). Δεν χρειάζεται όμως αναμορφωτή για τη λειτουργία της, γεγονός που μειώνει το κόστος.

Η μεθανόλη είναι το απλούστερο οργανικό καύσιμο, το οποίο πολύ οικονομικά και αποδοτικά μπορεί να παραχθεί σε μεγάλη κλίμακα, από καύσιμα όπως το κάρβουνο και το φυσικό αέριο.

Η μεθανόλη είναι υγρό καύσιμο και είναι πολύ εύκολη η αποθήκευση η διανομή της, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, τομείς όπου το υδρογόνο πάσχει .

Το σημαντικότερο μειονέκτημα οφείλεται στην αργή αντίδραση της ανόδου, όπου η οξειδωση της μεθανόλης, είναι πολυπλοκότερη από αυτή του υδρογόνου και πραγματοποιείται πολύ αργά. Αυτό έχει αποτέλεσμα η ισχύς να είναι πολύ μικρή, σε σχέση με το μέγεθος της κυψέλης.

3.4.5 Εφαρμογές

Η κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης, είναι κατάλληλη για εφαρμογή σε ηλεκτρονικές συσκευές, όπου χρειάζεται μικρή ισχύς και μεγάλη διάρκεια λειτουργίας, όπως τα κινητά τηλέφωνα, τους φορητούς υπολογιστές, τις φωτογραφικές μηχανές. Η αντικατάσταση των μπαταριών λιθίου, είναι ο κύριος στόχος τους, αφού επαναφορτίζονται πολύ πιο γρήγορα, απλά βάζοντας λίγη μεθανόλη, μέσα στη συσκευή.

Για να εφαρμοστεί στον τομέα των ηλεκτρικών οχημάτων, θα πρέπει να αυξηθεί η πυκνότητα ισχύος της και να μειωθεί το κόστος της.

Παρακάτω φαίνεται mp3 player της Toshiba, το οποίο λειτουργεί με κυψέλη καυσίμου άμεσου μεθανόλης.



Εικόνα 3.4: MP3 Player και κινητό της Toshiba, με κυψέλη καυσίμου άμεσου μεθανόλης

Η Toshiba παρουσίασε το 2005, το εικονιζόμενο μοντέλο (δεξιά). Η κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης φορτίζει τη μπαταρία του κινητού, για όση ώρα υπάρχει μεθανόλη στην εσωτερική δεξαμενή.

3.5 ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΦΩΣΦΟΡΙΚΟΥ ΟΞΕΟΣ (PAFC)

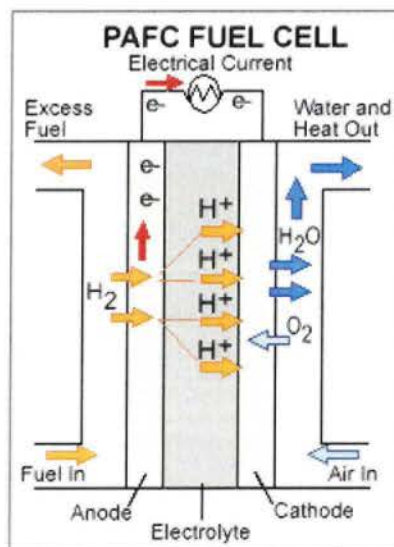
3.5.1 Εισαγωγή

Η κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος, χαρακτηρίζεται από τον ηλεκτρολύτη ο οποίος είναι αγωγίμος στα ιόντα του υδρογόνου, ενώ ο καταλύτης στην άνοδο και την κάθοδο είναι από λευκόχρυσο ή κράματα λευκόχρυσου.

Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι μεταξύ 150°C και 210°C και η πίεση ατμοσφαιρική ή λίγο μεγαλύτερη. Η παραγόμενη πυκνότητα ισχύος είναι 0.2 – 0.25 W/cm², η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής είναι 40 000 ώρες και το κόστος της προβλέπεται να είναι μεγαλύτερο των 1000\$/kW. Το καύσιμο, εκτός από υδρογόνο, μπορεί να είναι φυσικό αέριο ή μεθανόλη σε συνδυασμό με αναμορφωτή καυσίμου.

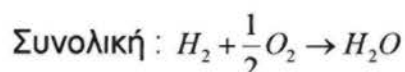
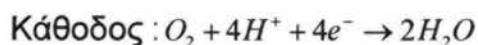
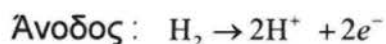
3.5.2 Αρχή λειτουργίας

Η δομή της κυψέλης καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 3.4: Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις δίνονται παρακάτω.



Η λειτουργία της είναι παρόμοια με την κυψέλη μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων.

3.5.3 Περιγραφή της κυψέλης

Στην αρχή της εξελίξεις τους, πολλοί διαφορετικοί τύποι οξέων δοκιμάζονταν για ηλεκτρολύτες, όπως το θειικό οξύ, τα υπερχλωρικά οξέα και το φωσφορικό οξύ. Τελικά επικράτησε το φωσφορικό οξύ, κυρίως λόγω της ανοχής της στο CO₂ που βρίσκεται στο καύσιμο και στο οξειδωτικό μέσο. Επιπλέον είναι σταθερό κατά τη λειτουργία της κυψέλης σε υψηλές θερμοκρασίες και έχει μεγάλη αγωγιμότητα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 150°C,.

Το φωσφορικό οξύ είναι άχρωμο παχύρευστο υγρό. Χρησιμοποιείται στις κυψέλες καυσίμου από το 1980 και έχει σημείο πήξεως στους 42°C. Για την προστασία της κυψέλης καυσίμου από το ψύχος θα πρέπει η θερμοκρασία να διατηρείται πάνω από αυτό το όριο. Το φωσφορικό οξύ πλαισιώνεται από πορώδες ανθρακικό υλικό, το οποίο είναι καλυμμένο με Teflon, που το συγκρατεί, κατά τη διάρκεια των αντιδράσεων, διευκολύνει την παροχή των αερίων στις επιφάνειες αντίδρασης, αλλά και την διαφυγή τους από τον ηλεκτρολύτη.

Η θερμοκρασία λειτουργίας της PAFC είναι διπλάσια από ότι της PEM. Η υψηλή αυτή θερμοκρασία είναι αναγκαία λόγω του νερού που παράγεται ως παραπροϊόν. Εάν η θερμοκρασία ήταν χαμηλότερη, αυτό θα διαλυόταν στον ηλεκτρολύτη. Έτσι η θερμοκρασία πρέπει να είναι αρκετά υψηλή έτσι ώστε το νερό να εξέρχεται της κυψέλης υπό μορφή ατμού. Η θερμοκρασία δεν μπορεί να είναι υπερβολικά υψηλή καθώς το φωσφορικό οξύ αποσυντίθεται μετά τους 210°C.

3.5.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC).

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της PAFC είναι η ανθεκτικότητά της στις ακαθαρσίες που υπάρχουν στο καύσιμο που παράγεται με αναμόρφωση των υδρογονανθράκων. Αυτός ήταν και ο λόγος για τον οποίο επιλέχτηκε η ουσιαστική ανάπτυξη της PAFC, στα πρώτα βήματα. Η ικανότητα λειτουργίας της με "ακάθαρο" καύσιμο, την κάνει φθηνότερη από τους υπόλοιπους τύπους κυψελών καυσίμου, καθώς μειώνεται το κόστος του αναμορφωτή .

Το μειωμένο κόστος επεξεργασίας του καυσίμου μειώνει με τη σειρά του το κόστος όλης της μονάδας PAFC και της δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί και άλλα καύσιμα, προερχόμενα είτε από τα αέρια των χωματερών (μεθάνιο-CH₄) είτε από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού και επεξεργασίας λυμάτων. Σε μια τέτοια περίπτωση χρήσης κάποιου άλλου καυσίμου, η μοναδική αλλαγή που απαιτείται είναι μικρές προσαρμογές στο σύστημα επεξεργασίας και παροχής του καυσίμου.

Ένα δεύτερο πλεονέκτημα είναι ότι η τεχνολογία γύρω από την PAFC είναι η πλέον ώριμη, σε επίπεδο ανάπτυξης και εμπορευματοποίησης. Ο συγκεκριμένος τύπος αναπτύσσεται για περισσότερο από 20 χρόνια. Έτσι, όπως και με τις αλκαλικές κυψέλες καυσίμου, το κόστος έχει μειωθεί ενώ η απόδοση αυξάνεται.

Η δυνατότητα συμπαραγωγής λόγω της λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες, κάνει την PAFC αποδοτικότερη από τις κυψέλες καυσίμου χαμηλών θερμοκρασιών.

Μειονέκτημα της PAFC, όπως και στην PEM, είναι η χρήση του πολύ ακριβού λευκόχρυσου ως καταλύτη, το οποίο αυξάνει το συνολικό κόστος.

Η υψηλή θερμοκρασία είναι ταυτόχρονα και μειονέκτημα, καθώς υπάρχει περίοδος αναμονής, μέχρι η κυψέλη να ζεσταθεί και να λειτουργήσει σωστά.

Η κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος, παράγει σχετικά μικρή πυκνότητα ρεύματος και ισχύος και έχει μεγάλο μέγεθος. Οι κυψέλες αυτές είναι αρκετά μεγάλες και βαριές. Συνεπώς είναι δύσκολη η χρησιμοποίησή τους σε οχήματα και σε κινητές εφαρμογές.

3.5.5 Εφαρμογές

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) είναι ο παλαιότερος τύπος κυψελών καυσίμου και οι ρίζες τους εκτείνονται μέχρι την εποχή της σύλληψης της ιδέας παραγωγής ισχύος με την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου. Τα συστήματα PAFC ανήκουν στις μέσης θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου. Είναι ο πιο εμπορικά ανεπτυγμένος τύπος κυψελών καυσίμου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, σε κτίρια και μικρές βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Έχει ήδη χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές, όπως νοσοκομεία, γηροκομεία, ξενοδοχεία, κτίρια επαγγελματικής στέγης, σχολεία, μονάδες παραγωγής ενέργειας κοινωφελούς χαρακτήρα και σε ένα τερματικό αεροδρομίου.

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC), έχουν εύρος ισχύος από 50 έως 500kW. Τα μοντέλα παραγωγής, παράγουν συνήθως ισχύ 200kW.

Παρακάτω φαίνεται η μονάδα συμπαραγωγής ενέργειας και θερμότητας (PureCell 200), ισχύος 200kW της εταιρείας United Technology. Η παραγωγή

θερμότητας φτάνει τα 925 Btu/h. Από το 1991, έχουν εγκατασταθεί παγκοσμίως περισσότερες από 257 μονάδες.



Εικόνα 3.5: κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος ισχύος 200kW, της United Technology

Το μεγαλύτερο εργοστάσιο κυψελών καυσίμου φωσφορικού οξέος σε λειτουργία, έχει φτιαχτεί από τις εταιρείες International Fuel Cells Corporation και την Toshiba, για την Tokyo Electric Power Company στην Ιαπωνία, ισχύος 11MW.

Οι έρευνες επικεντρώνονται στην διεσπαρμένη παραγωγή και στη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Οι σημαντικότεροι κατασκευαστές είναι η UTC Fuel Cells (United Technologies Corp) στις Ηνωμένες Πολιτείες και η Fuji Electric, Toshiba Mitsubishi Electric Companies στην Ιαπωνία.

3.6 ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΕΡΕΩΝ ΟΞΕΙΔΙΩΝ (SOFC)

3.6.1 Εισαγωγή

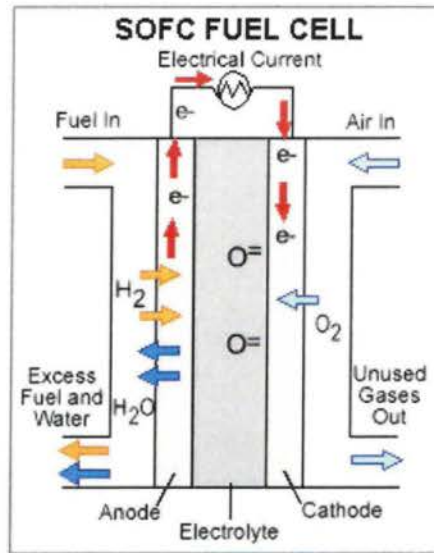
Η κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων, είναι εξ ολοκλήρου στερεή κατασκευή. Ο ηλεκτρολύτης είναι μη πορώδες κεραμικό υλικό, αγωγίμο στα ανιόντα του οξυγόνου, που διέρχονται από το πλέγμα του κρυστάλλου. Για το λόγω αυτό είναι πιο απλή από τα υπόλοιπα συστήματα κυψελών καυσίμου. Ο ηλεκτρολύτης είναι κράμα υττρίας (Y_2O_3) και ζirkονίου, η άνοδος είναι κεραμικό μίγμα νικελίου και ζirkονίου και η κάθοδος είναι μαγγανίτης λανθανίου στρόντιου.

Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι μεταξύ $800^{\circ}C$ και $1100^{\circ}C$ και η πίεση ατμοσφαιρική. Η παραγόμενη πυκνότητα ισχύος είναι $0.24 - 0.3 W/cm^2$, η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής είναι 40 000 ώρες και το κόστος εκτιμάται ότι θα ανέρχεται στα 1500\$/kW.

Μπορεί να χρησιμοποιήσει σαν καύσιμο, υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογονάνθρακες και σαν οξειδωτικό μέσο αέρα ή οξυγόνο

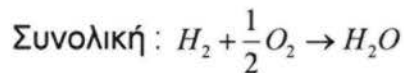
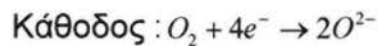
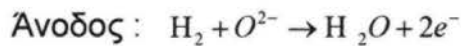
3.6.2 Αρχή λειτουργίας

Η δομή της κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 3.5: Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις δίνονται παρακάτω.



Μέσα στην κυψέλη, τα ιόντα οξυγόνου που σχηματίζονται στην κάθοδο, μετακινούνται, μέσω του αγωγισμού στα ιόντα, ηλεκτρολύτη, στην διαχωριστική επιφάνεια ηλεκτρολύτη-άνοδου. Εκεί αντιδρούν με το υδρογόνο και το μονοξείδιο του άνθρακα που περιέχεται στο καύσιμο, παράγοντας νερό και διοξείδιο του άνθρακα, ενώ τα ηλεκτρόνια μέσω εξωτερικού κυκλώματος οδηγούνται από την άνοδο, στην κάθοδο.

3.6.3 Περιγραφή της κυψέλης

Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου, δεν είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση πολύτιμων μετάλλων για τον καταλύτη. Όπως

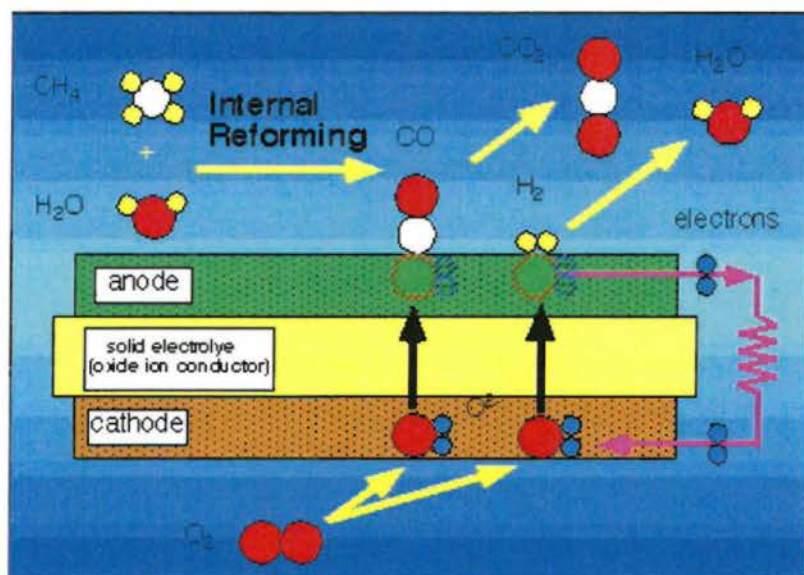
και στην MCFC, το καύσιμο μπορεί να είναι τόσο υδρογόνο, όσο και μονοξείδιο του άνθρακα.

Λειτουργώντας παρόμοια με την MCFC, τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα οξυγόνου, μεταφέρονται από την κάθοδο μέσω του ηλεκτρολύτη στην άνοδο. Έτσι το παραγόμενο νερό σχηματίζεται στην άνοδο. Η SOFC αναπτύσσεται από το 1899, όταν ο Nerst πρώτος περιέγραψε το οξείδιο του ζirkονίου (ZrO_2), σαν αγωγό των ανιόντων του οξυγόνου. Όλες οι SOFC βασίζονται στον ηλεκτρολύτη από ζirkόνιο, με προσθήκη μικρού ποσοστού υτtrίας (Y_2O_3). Σε θερμοκρασίες περί των $800^\circ C$, το ζirkόνιο γίνεται αγωγός των ανιόντων του οξυγόνου. Η τυπική θερμοκρασία λειτουργίας μίας κυψέλης SOFC είναι μεταξύ $800^\circ C$ και $1100^\circ C$. Αυτή είναι και η υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας απ όλες τις κυψέλες καυσίμου, με αποτέλεσμα η κατασκευή και η διάρκεια ζωής τους να είναι πρόκληση μα συνάμα και ευκαιρία για τη χρήση της κυψέλης καυσίμου σε μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας.

Στην κάθοδο χρησιμοποιείται μαγγανίτης λανθανίου ποτισμένο με στρόντιο. Η άνοδος είναι κεραμικό μείγμα ζirkονίου (μείγμα ζirkονίου και μετάλλου, συνήθως νικελίου). Η επιλογή του νικελίου γίνεται λόγω της υψηλής ηλεκτρικής του αγωγιμότητας και της σταθερότητας του κατά τη διάρκεια των αντιδράσεων. Η χρησιμοποίηση του νικελίου και ως καταλύτη αναμόρφωσης, σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοκρασία, δίνει το πλεονέκτημα της εσωτερικής αναμόρφωσης μέσα στην SOFC, κατευθείαν στην άνοδο.

Λειτουργώντας στους $1000-1100^\circ C$, τα στερεά οξείδια σχηματίζουν ιόντα υδρογόνου, τα οποία άγονται προς τη ροή του καυσίμου, όπου αντιδρούν με το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και το υδρογόνο (H_2), ελευθερώνοντας ηλεκτρόνια. Αυτή η διαδικασία είναι αντίθετη με το τι συμβαίνει στις άλλες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου, στις οποίες το υδρογόνο (H_2) κατευθύνεται προς τα ηλεκτρόδια και μετά προς την πηγή του οξυγόνου (O_2). Αυτή η διαφορά, σε συνδυασμό με τη σταθερότητα των στερεών οξειδίων, επιτρέπει στα συστήματα SOFC να εξαλείψουν την ανάγκη προσθήκης επεξεργαστή καυσίμου και συνεπώς να είναι πιο ευέλικτα από τα συστήματα MCFC, ως προς τον τύπο του

καυσίμου που τροφοδοτούνται. Επιπλέον, τα συστήματα SOFC μπορούν να επιτύχουν ακόμα μεγαλύτερες "πυκνότητες" ισχύος, αφού τα στερεά οξειδία έχουν την δυνατότητα να σχηματίζονται σε μεγάλη ποικιλία μορφών και σχημάτων.



Σχήμα 3.6: Εσωτερική αναμόρφωση κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων

Καθώς οι συμβατικές υψηλής θερμοκρασίας SOFC, λειτουργούν συνήθως μεταξύ 800°C και 1000 °C, οι έρευνες επικεντρώνονται στις μεσαίας θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (IT-SOFC, Intermediate Temperature SOFC). Αυτές λειτουργούν μεταξύ 550°C και 800°C, προσφέροντας ευρύτερη γκάμα υλικών κατασκευής και πιο οικονομική κατασκευή της ίδιας της κυψέλης. Η υψηλής θερμοκρασίας SOFC είναι εξ ολοκλήρου κατασκευασμένη από κεραμικά υλικά, ενώ η IT-SOFC αποτελείται από κεραμικά και μεταλλικά υλικά και χρησιμοποιεί συνδέσεις από ανοξειδωτο ασάλι αντί του πολύ ακριβού κράματος χρωμίου.

Οι βασικοί σχεδιασμοί της SOFC είναι δύο, είτε με βάση τον ηλεκτρολύτη είτε με βάση τα ηλεκτρόδια. Στην πρώτη περίπτωση ο ηλεκτρολύτης είναι μεγάλο εξάρτημα και αποτελεί τη βάση της κατασκευής. Αυτές οι κυψέλες

καυσίμου χρησιμοποιούνται μόνο στις υψηλές θερμοκρασίες, όπου οι συχνά μεγάλες ωμικές απώλειες μπορούν να μειωθούν. Στη δεύτερη περίπτωση, οι κυψέλες κατασκευάζονται με σκοπό τη μείωση των ωμικών απωλειών στις χαμηλότερες θερμοκρασίες, όπως είναι οι IT-SOFC. Σε αυτές τις κυψέλες ένα από τα δύο ηλεκτρόδια είναι το μεγαλύτερο εξάρτημα και στηρίζει την κατασκευή, ενώ ο ηλεκτρολύτης πρέπει να έχει υψηλή ιοντική αγωγιμότητα και να είναι λεπτός. Παραταύτα παρατηρείται ότι παρόλο την μικρή ωμική συνεισφορά, η ωμική αντίσταση των IT-SOFC είναι μεγαλύτερη από αυτή των κυψελών υψηλών θερμοκρασιών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην υπέρταση λόγω ενεργοποίησης και συγκέντρωσης, οι οποίες συχνά υπερακοντίζουν την ωμική συνεισφορά.

3.6.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC).

Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας δίνει το πλεονέκτημα στην SOFC, έναντι στις χαμηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου. Η υψηλή θερμοκρασία αυξάνει τον βαθμό απόδοσης της κυψέλης και δίνει τη δυνατότητα της χρησιμοποίησης λιγότερου ακριβού καταλύτη απ' ό,τι οι κυψέλες χαμηλών θερμοκρασιών, αφού με την αύξηση της θερμοκρασίας, οι χημικοί δεσμοί σπάνε γρηγορότερα.

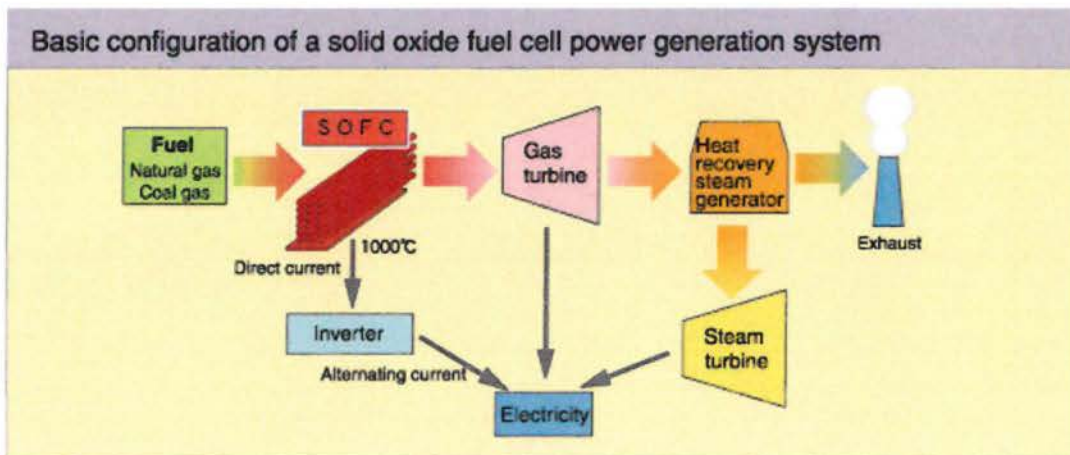
Η μεγάλη θερμοκρασία των SOFC, δίνει το πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης περισσότερων τύπων καυσίμου. Με αυτά τα καύσιμα η αναμόρφωση μπορεί να γίνει στο εσωτερικό της κυψέλης και όχι με τη χρήση ξεχωριστής εξωτερικής συσκευής αναμόρφωσης, μειώνοντας το συνολικό κόστος. Η υψηλή θερμοκρασία χρησιμοποιείται επίσης για συμπαραγωγή ενέργειας και θερμότητας, αυξάνοντας το βαθμό απόδοσης του συστήματος.

Με τη χρησιμοποίηση στερεού ηλεκτρολύτη, εκλείπουν τα προβλήματα διάβρωσης και διαχείρισης που έχουν οι υγροί ηλεκτρολύτες. Έτσι το σύστημα γίνεται απλούστερο και πιο οικονομικό.

Η υψηλή θερμοκρασία όμως επιταχύνει τη φθορά των εξαρτημάτων της κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής της κυψέλης.

3.7.5 Εφαρμογές

Οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων, έχουν εύρος ισχύος από 1kW έως 1MW. Οι εφαρμογές τους εστιάζονται, σε μεγάλες μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, δεδομένου ότι οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων έχουν τη μεγαλύτερη θερμοκρασία λειτουργίας από όλους τους τύπους κυψελών καυσίμου.



Σχήμα 3.7: Βασικός σχεδιασμός μονάδας συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (CHP)

Η μεγαλύτερη κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων που έχει κατασκευαστεί, είναι της Siemens, ισχύος 250kW. Ξεκίνησε τη λειτουργία του το 2003 στο Τορόντο του Καναδά, στις εγκαταστάσεις της εταιρείας Kinectrics Inc. Μέχρι το 2004 το σύστημα είχε συμπληρώσει 1100 ώρες λειτουργίας.



Εικόνα 3.6: Μονάδα SOFC 250 kW ,εγκατεστημένη στην εταιρεία Kinectrics, στο Τορόντο του Καναδά

Παρακάτω εικονίζεται το πρώτο σύστημα συμπαραγωγής ισχύος 220kW, αποτελούμενο από κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων ισχύος 200kW και αεριοστρόβιλο ισχύος 20 kW, εγκατεστημένο στο εθνικό Κέντρο Ερευνών για κυψέλες καυσίμου, στο πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας – Irvine, την άνοιξη του 2002. Λειτουργήσε για 3400 ώρες και είχε απόδοση περίπου 53%.



Εικόνα 3.7: Μονάδα συμπαραγωγής SOFC 220 kW ,εγκατεστημένη στο πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια.

Η εταιρεία Westinghouse έχει κατασκευάσει στις Ηνωμένες Πολιτείες μονάδες ισχύος 25 kW, ενώ η γερμανική Sulzer αναπτύσσει μονάδες ισχύος 2kW για οικιακή χρήση σε συστήματα συνδυασμένου κύκλου. Επίσης, στην Ευρώπη δοκιμάζεται μία μονάδα ισχύος 100kW, ενώ στην Ιαπωνία δύο άλλες μικρότερες ετοιμάζονται για τη γραμμή παραγωγής.

3.8 ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΗΓΜΑΤΟΣ ΑΝΘΡΑΚΙΚΩΝ ΑΛΑΤΩΝ (MCFC)

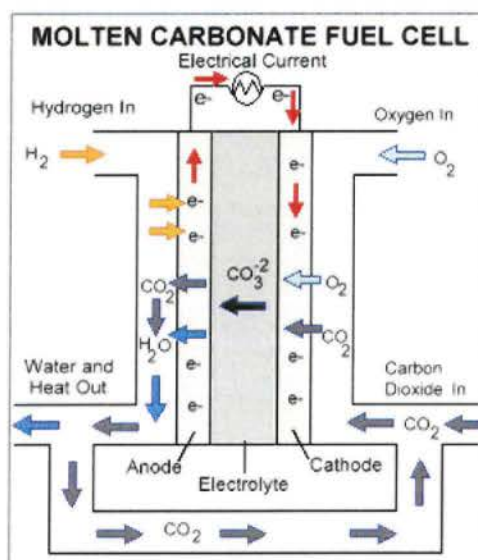
3.7.1 Εισαγωγή

Στις κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων, ο ηλεκτρολύτης είναι συνήθως τήγμα αλκαλικού μετάλλου ανθρακικού άλατος (λιθίου, ποτάσας ή νατρίου) , το οποίο συγκρατείται σε κεραμική μήτρα. Η άνοδος είναι κράμα νικελίου-χρωμίου και η κάθοδος οξείδιο του νικελίου.

Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι μεταξύ 600°C και 700°C και η πίεση ατμοσφαιρική. Η παραγόμενη πυκνότητα ισχύος είναι 0.1 – 0.2 W/cm², η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής είναι 40 000 ώρες και το κόστος εκτιμάται ότι θα ανέρχεται στα 1000\$/kW.

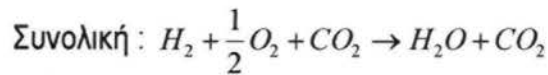
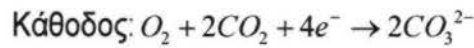
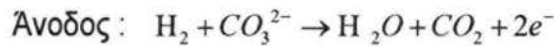
3.7.2 Αρχή λειτουργίας

Η δομή της κυψέλης καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC) φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 3.6: Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις δίνονται παρακάτω.



Στην κάθοδο, το οξυγόνο (O_2) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) του αέρα αντιδρούν μεταξύ τους και παράγουν ανθρακικά ιόντα (CO_3^{2-}), τα οποία διαπερνούν μέσα από τον ηλεκτρολύτη της κυψέλης. Αυτά αντιδρούν με το υδρογόνο (H_2) ή το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) στην άνοδο, και παράγεται νερό (H_2O), διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), ενώ τα ηλεκτρόνια μέσω εξωτερικού κυκλώματος οδηγούνται από την άνοδο, στην κάθοδο.

Όπως φαίνεται και από τις χημικές αντιδράσεις το διοξείδιο του άνθρακα ανακυκλώνεται από την άνοδο στην κάθοδο. Η μεταφορά γίνεται είτε μέσω της καύσης των καυσαερίων της ανόδου με περίσσεια αέρα, απομακρύνοντας στη συνέχεια το νερό, είτε χρησιμοποιώντας συσκευή ανταλλαγής προϊόντων, για τον διαχωρισμό του διοξειδίου του άνθρακα από τα καυσαέρια της ανόδου.

3.7.5 Περιγραφή της κυψέλης

Οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), έχουν το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό ότι για να λειτουργήσουν χρειάζονται οπωσδήποτε το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) που περιέχεται στον αέρα. Επειδή λειτουργούν σε υψηλή θερμοκρασία μπορούν, όπως και οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC), να αναμορφώσουν εσωτερικά τα αέρια όπως το μεθάνιο (CH_4), το οποίο συνδυάζουν με ατμό ($H_2O_{(g)}$) για να σχηματίσουν ένα πλούσιο σε υδρογόνο καύσιμο. Παρ' όλο που η υψηλή θερμοκρασία επιτρέπει την ύπαρξη άνθρακα στην κυψέλη, το θείο (S) μπορεί να την "δηλητηριάσει", ακόμα και σε μικρές ποσότητες.

Το κύριο πρόβλημα με τη λειτουργία και κατασκευή των κυψελών καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC) σχετίζεται με τον σχεδιασμό και

την κατασκευή των ηλεκτροδίων τους, τα οποία χρησιμοποιούν καταλύτη από νικέλιο. Τα ηλεκτρόδια αυτά πρέπει να είναι ανθεκτικά στο θερμό και οξειδωτικό περιβάλλον του ηλεκτρολύτη, ο οποίος είναι ένα μίγμα αποτελούμενο κατά 68% από ανθρακικό λίθιο (K_2CO_3) και 32% από υδροξείδιο του καλίου (KOH). Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος αυτού, όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμένο κύκλο φτάνει το 50%.

3.7.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC).

Οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), έχουν τα ίδια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας με τις κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων.

3.7.5 Εφαρμογές

Οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), χρησιμοποιούνται ως μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος 300kW έως 1MW .

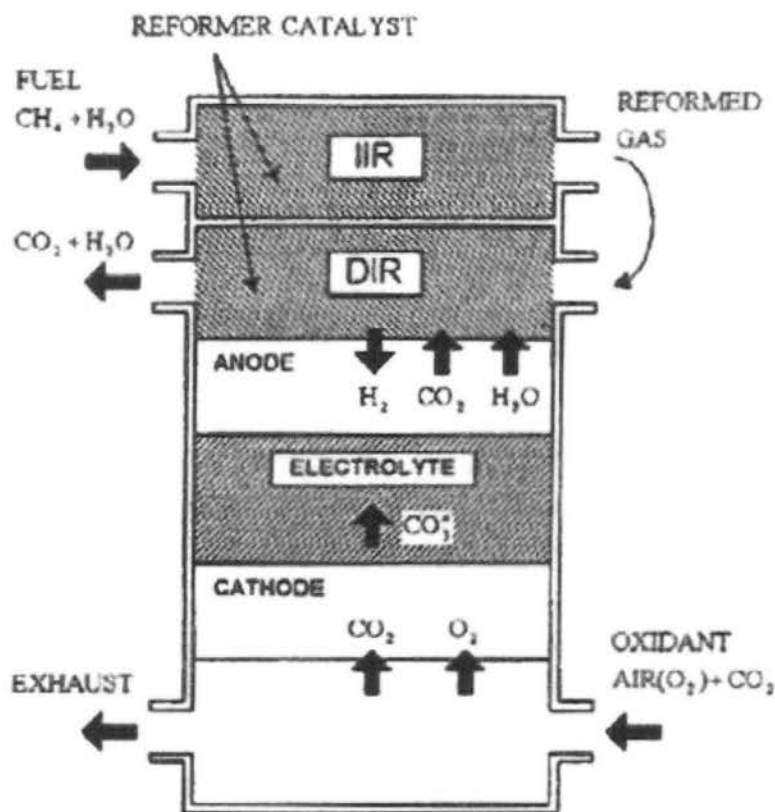
Η μεγαλύτερη μονάδα, ισχύος 2MW, εγκαταστάθηκε στην Santa Clara στην Καλιφόρνια και ξεκίνησε να παράγει ενέργεια τον Απρίλιο του 1996. Η μονάδα η οποία αναπτύχθηκε από την Fuel Cell Energy (FCE), αποτελείται από 16 συστοιχίες κυψελών καυσίμου, κάθε συστοιχία της οποίας παράγει 125kW



Εικόνα 3.8: Μονάδα κυψελών καυσίμου MCFC, αποτελούμενη από 16 συστοιχίες, συνολικής ισχύος 2 MW, στην Santa Clara της Καλιφόρνια.

Στη μονάδα αυτή, το φυσικό αέριο αναμορφώνεται εσωτερικά, μερικώς σε μια εσωτερική μονάδα και μερικώς στις κυψέλες, εξαλείφοντας την ανάγκη των μεγάλων εξωτερικών μονάδων αναμόρφωσης, για την παραγωγή του υδρογόνου.

Ο συνδυασμός αυτός άμεσης (DIR) και έμμεσης (IIR) εσωτερικής αναμόρφωσης του καυσίμου, εικονίζεται παρακάτω.



Σχήμα 3.7: Συνδυασμός άμεσης και έμμεσης εσωτερικής αναμόρφωσης

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ο συνδυασμός έμμεσης εσωτερικής (IIR) και άμεσης εσωτερικής αναμόρφωσης (DIR), ο οποίος δίνει το πλεονέκτημα καλύτερης θερμικής διαχείρισης. Στο σχέδιο της Fuel Cell Energy, η εσωτερική αναμόρφωση επιτυγχάνεται σε δυο ξεχωριστά στάδια. Στο IIR στάδιο, η μονάδα αναμόρφωσης που περιέχει καταλύτη με βάση το νικέλιο, τοποθετείται κάθε 10 κυψέλες καυσίμου στη συστοιχία. Οι μονάδες αναμόρφωσης, μετατρέπουν περίπου 50-60 % του φυσικού αερίου σε υδρογόνο, πριν την είσοδό του στην άνοδο. Το μερικώς αναμορφωμένο φυσικό αέριο υφίσταται περαιτέρω αναμόρφωση στην άνοδο της κυψέλης, η οποία επίσης φέρει καταλύτες αναμόρφωσης. Ο σχεδιασμός αυτός διασφαλίζει όλα τα πλεονεκτήματα της εσωτερικής αναμόρφωσης, περιλαμβάνοντας ολοκληρωτική μετατροπή του

φυσικού αερίου σε υδρογόνο, μείωση της θερμότητας της κυψέλης και απλότητα της κατασκευής.

Όμως, το κατασκευαστικό εγχείρημα απέτυχε λόγω της κακής ποιότητας κατασκευής, με αποτέλεσμα την χημική καταστροφή των μισών συστοιχιών της μονάδας. Αφού εντοπίστηκε και διορθώθηκε το πρόβλημα, οι άλλες 8 κυψέλες που απέμειναν, ενεργοποιήθηκαν ξανά και λειτούργησαν έως τον Οκτώβριο του ίδιου έτους.

3.8 Αναγέννηση του συστήματος της κυψέλης καυσίμου

Σε αυτό το σύστημα το νερό αρχικά εισέρχεται στη συσκευή ηλεκτρόλυσης, η οποία δύναται να τροφοδοτείται από ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, όπως ο άνεμος, ο ήλιος, ή ο συνδυασμός τους. Η συσκευή ηλεκτρόλυσης διαχωρίζει το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στη κυψέλη καυσίμου. Το νερό που παράγεται από την κυψέλη, ανατροφοδοτείται πίσω στη συσκευή ηλεκτρόλυσης και η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται. Η Nasa καθώς και άλλες εταιρίες σε παγκόσμιο επίπεδο ερευνούν τη λειτουργία του κλειστού αυτού συστήματος.

3.9 Επίδειξη και εμπορευματοποίηση των κυψελών καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC), έχει μπει στην παραγωγή κυρίως για σταθερές μονάδες παραγωγής, ισχύος μέχρι 11MW. Οι κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC) και στερεών οξειδίων (SOFC), παρουσίασαν μονάδες παραγωγής ισχύος μέχρι 250kW και 100kW αντίστοιχα, από το τέλος του 1990. Παρόλο που οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) έχουν παρουσιάσει μοντέλα σε λεωφορεία, αυτοκίνητα, μοτοσικλέτες και κινητές μονάδες ισχύος μέχρι 250kW, σε όλο τον κόσμο από την αρχή του 1990, υπάρχουν ακόμη προβλήματα για να μπουν στην

παραγωγή, κυρίως λόγω του υψηλού κατασκευαστικού κόστους τους. Οι PEMFC αναμένεται να βγουν ευρέως στην παραγωγή, σε δέκα με δεκαπέντε χρόνια.

Η Ευρώπη, οι Η.Π.Α., ο Καναδάς και η Ιαπωνία, είναι κυρίαρχοι στις έρευνες, στην ανάπτυξη και εμπορευματοποίηση των κυψελών καυσίμου. Η Ισλανδία έκανε το τολμηρό βήμα της μετατροπής της σε οικονομία υδρογόνου το 2003. Νομοθετική πράξη για το υδρογόνο, ψηφίστηκε επίσης από τη γερουσία των Η.Π.Α., για την προετοιμασία των Η.Π.Α., στην μελλοντική οικονομία του υδρογόνου. Περισσότερα από ένα δισεκατομμύρια δολάρια θα δαπανηθούν από την αμερικάνικη κυβέρνηση τα επόμενα 5 χρόνια, για την εμπορευματοποίηση των κυψελών καυσίμου και την προετοιμασία της υποδομής των Η.Π.Α., για τη μελλοντική οικονομία του υδρογόνου.

Στον Πίνακα 1, φαίνεται η κατάσταση εμπορευματοποίησης και οι μελλοντικές τάσεις, για διάφορους τύπους κυψελών καυσίμου. Στον Πίνακα 2, δίνεται η κατάσταση εμπορευματοποίησης και οι μελλοντικές τάσεις στις διάφορες χώρες.

Πίνακας 1

Κυψέλη καυσίμου	Κατάσταση εμπορευματοποίησης	Μελλοντικές τάσεις
PAFC	Εμπορικές μονάδες: 50-200kW και 1-11MW Σύνολο: 65MW παγκοσμίως. Κυρίαρχη εταιρεία: United Technologies	Αυξανόμενη τοποθέτηση μονάδων PAFC Διεύρυνση της αγοράς των PAFC
MCFC	Μονάδα επίδειξης στην Καλιφόρνια το 1997: 2MW Ικανότητα παραγωγής 250kW πρωτοτύπων, στα 400MW το 2004 Κυρίαρχη εταιρεία: Fuel Cell Energy Onc.	Αυξανόμενες σταθερές εφαρμογές
SOFC	Μονάδα επίδειξης στην Ολλανδία το 1998: 100kW Κυρίαρχη εταιρεία: Siemens Westinghouse	Αυξανόμενες σταθερές εφαρμογές
PEMFC	Επίδειξη λεωφορείου από την Ballard το 1993 Εμπορική διάθεση λεωφορείων από το 2005 Όλοι οι μεγάλοι κατασκευαστές έχουν πρωτότυπα αυτοκίνητα, κινούμενα από PEM Πρωτότυπα για παραγωγή ισχύος (250kW) και για οικιακές εφαρμογές (1-50kW) Κυρίαρχη εταιρεία: Ballard	Βελτίωση της απόδοσης των PEM, για την λειτουργία στον στόλο των λεωφορείων. Διεύρυνση της αγοράς των PEM

Πίνακας 2

Χώρα	Κατάσταση εμπορευματοποίησης	Μελλοντικές τάσεις
Ευρώπη	PAFC, PEMFC, DMFC για φορητές και κινητές εφαρμογές, SOFC και MCFC, για μονάδες παραγωγής ισχύος	Βελτίωση των εγκαταστάσεων PAFC
Η.Π.Α	Μικρών επιδόσεων αυτοκίνητα Μονάδες ισχύος SOFC, για επίδειξη	Βελτίωση της υποδομής ανεφοδιασμού
Καναδάς	PEMFC για λεωφορεία και αυτοκίνητα	Βελτίωση των PEMFC για τη λειτουργία του στόλου
Ιαπωνία	PEMFC, MCFC και SOFC, για σταθερές και κινητές εφαρμογές	Αύξηση των εγκαταστάσεων PAFC Διεύρυνση της αγοράς των PAFC

3.10 Συμπεράσματα

Σημαντικές είναι οι αλλαγές που συντελούνται στον χώρο της ενέργειας και των μεταφορών. Στο χώρο της ενέργειας προβλέπεται η μετάβαση από την εποχή των μεγάλων ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων στην εποχή της διάσπαρτης, αποκεντρωμένης παραγωγής. Στις μεταφορές υπάρχει η ανάγκη για σημαντικό περιορισμό των εκλυόμενων ρύπων, καθώς και η απεξάρτηση από το πετρέλαιο. Κοινός παρονομαστής στις αλλαγές αυτές είναι το υδρογόνο σαν φορέας ενέργειας και οι κυψέλες καυσίμου σαν μέσο παραγωγής καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας από το υδρογόνο.

Στα πλαίσια των επικείμενων αλλαγών, οι ΗΠΑ και η Ιαπωνία έχουν επιδοθεί σε έναν αγώνα δρόμου όσον αφορά την ανάπτυξη τεχνολογιών παραγωγής και χρήσης υδρογόνου. Πρόσφατα και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έδωσε προτεραιότητα στην έρευνα σχετικά με το υδρογόνο και τις κυψέλες καυσίμου. Πολλές αυτοκινητοβιομηχανίες αναπτύσσουν αυτή την στιγμή οχήματα που θα κινούνται με υδρογόνο, ενώ εκτιμάται ότι το 2020 το ένα τρίτο ή το ένα τέταρτο των οχημάτων θα κινείται με υδρογόνο. Σημαντικές είναι και οι αλλαγές που θα πρέπει να συντελεστούν στον χώρο των υποδομών για την μεταφορά και διανομή αυτού του νέου ενεργειακού φορέα.

Ειδικό ενδιαφέρον για το υδρογόνο επιδεικνύουν ορισμένες χώρες με πλούσιο δυναμικό σε ΑΠΕ, με στόχο την απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και μακροπρόθεσμα την εξαγωγή υδρογόνου σε άλλες χώρες. Έτσι, στην Νορβηγία εκπονήθηκε εθνική μελέτη προετοιμασίας για την χρήση του υδρογόνου ως φιλικού προς το περιβάλλον καυσίμου. Αντίστοιχα αναπτύσσονται ειδικές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου από διάσπαση υδρογονανθράκων. Σε κέντρο της «οικονομίας του υδρογόνου» επιδιώκει να εξελιχθεί η Ισλανδία, όπου στοχεύουν μέχρι το 2020 να απεξαρτηθούν πλήρως από το πετρέλαιο, κάνοντας χρήση υδρογόνου που θα έχει παραχθεί από ηλεκτρόλυση του νερού, με ηλεκτρική ενέργεια από υδροηλεκτρικές μονάδες (χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι τον 21^ο αιώνα, ο OPEC θα αντικατασταθεί από τον HYPEC – Hydrogen Producing Countries).

Σε αυτό το ανταγωνιστικό περιβάλλον, είναι πολύ εύκολο η Ελλάδα να μείνει και πάλι ουραγός και τελικά αποδέκτης τεχνολογιών που θα παράγονται στο εξωτερικό. Και όμως, τμήματα του εξοπλισμού για την παραγωγή (ηλεκτρολυτική μονάδα) και

χρήση του υδρογόνου (κυψέλες καυσίμου) θα μπορούσαν να κατασκευαστούν στην Ελλάδα. Επιπλέον, εκτιμάται ότι στην «εποχή του υδρογόνου», η Ελλάδα θα μπορεί να παίξει έναν σημαντικό ρόλο σαν προμηθευτής του καυσίμου αυτού, μια και είναι προικισμένη με πλούσιο δυναμικό ΑΠΕ. Δεν μπορεί βέβαια η Ελλάδα να συγκριθεί με τεχνολογικά εξελιγμένες χώρες όπως την Νορβηγία και την Ισλανδία, αλλά οι νέες τεχνολογίες για το υδρογόνο είναι μία ευκαιρία να μειωθεί η απόσταση που την χωρίζει από τις εξελιγμένες χώρες [27].