



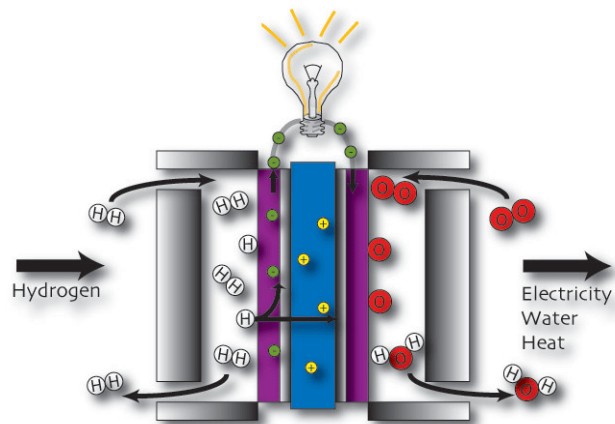
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ - ΑΡΙΘΜΟΣ 1178

**ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ
ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ H₂ (Hydrogen Fuel Cells) -
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΓΑΛΑΝΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ-ΒΛΑΣΙΟΣ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΜΠΟΥΡΔΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η πτυχιακή εργασία αυτή πραγματεύεται την ανάπτυξη και τη μελέτη συστημάτων Κυψελών Καυσίμου Υδρογόνου (Hydrogen Fuel Cells) τα οποία εκμεταλλεύονται το υδρογόνο και τις ιδιότητές του με σκοπό την ενεργειακή κάλυψη πληθώρας εφαρμογών.

Η εργασία πραγματοποιήθηκε στους χώρους του Εργαστηρίου των Ηλεκτρονικών Ισχύος του Τμήματος Ηλεκτρολογίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου για την βοήθειά τους, και συγκεκριμένα:

τον κ. Γεώργιο Μπουρδόπουλο υπό την επίβλεψη του οποίου έγινε η παρούσα εργασία,

τον κ. Ηλία Σταθάτο για την καθοδήγηση και για την ευκαιρία που μου έδωσε, με εκπαιδευτικό ταξίδι στο εξωτερικό, να έχω την πρώτη μου γνωριμία με τις Κυψέλες Καυσίμου (Fuel Cells),

καθώς επίσης και τον κ. Μάριο Χατζηπροκοπίου για την υποστήριξη και τον συμβουλευτικό του χαρακτήρα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και το Α.Τ.Ε.Ι Πατρών για τις σπουδές που μου παρείχε.

Στους γονείς και
τον αδερφό μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εξάντληση των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων και η συνεχής επιβάρυνση της ατμόσφαιρας από τη χρήση τους έχει φέρει τις τελευταίες δεκαετίες στο προσκήνιο την προσπάθεια εξεύρεσης εναλλακτικών πηγών ενέργειας.

Κύρια χαρακτηριστικά γύρω από τα οποία κινούνται οι ερευνητικές διαδικασίες αποτελούν η οικονομική βιωσιμότητα και η φιλική συμπεριφορά προς το περιβάλλον. Υπό το πρίσμα αυτό, μία εκ των πλέον υποσχόμενων τεχνολογιών αποτελεί η τεχνολογία υδρογόνου.

Πιο συγκεκριμένα, η παρούσα εργασία αφού παρουσιάσει μία ιστορική αναδρομή ως προς την εξέλιξη της τεχνολογίας υδρογόνου, εκθέτει τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και την αρχή λειτουργίας των κυψελών καυσίμου.

Ακολούθως, γίνεται εκτενής αναφορά στα διαφορετικά είδη κυψελών που έχουν αναπτυχθεί ως σήμερα, εκθέτοντας τα λειτουργικά χαρακτηριστικά που τις διαφοροποιούν.

Εν συνεχεία, η εργασία επικεντρώνεται στις εφαρμογές των κυψελών παραθέτοντας αναλυτικά κάθε εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιούνται.

Ακόμη, παρουσιάζονται όλοι οι τρόποι με τους οποίους μπορούμε να παρασκευάσουμε υδρογόνο και να το αποθηκεύ-

σουμε καθώς και τα εμπόδια, οι κίνδυνοι και οι κανόνες ασφάλειας χρήσης του.

Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα σχετικά με την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου και ο ρόλος που διαδραματίζει η χώρα μας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Παγκόσμια ενεργειακή κατάσταση	1
1.2 Ανάγκη για νέο ενεργειακό μοντέλο	5
1.3 Γιατί H ₂ ;	6
1.4 Ιδιότητες H ₂	7
1.4.1 Φυσικές ιδιότητες H ₂	8
1.4.2 Χημικές ιδιότητες H ₂	9
1.5 Προώθηση οικονομίας H ₂ στην διεθνή κοινότητα	10

Κεφάλαιο 2^ο: ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

2.1 Ιστορική αναδρομή.....	16
2.2 Αρχή λειτουργίας ΚΚ – Δομή ΚΚ	21
2.2.1 Αρχή λειτουργίας ΚΚ	21
2.2.2 Δομή ΚΚ	26
2.2.2.1 Ηλεκτρολύτης	28
2.2.2.2 Ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου	29
2.2.2.2.1 Πλάκα ροής αερίων & διπολική πλάκα.....	30
2.2.2.2.2 Στρώμα διάχυσης αερίων (Gas Diffusion Layer). 31	
2.2.3 Συστοιχίες κυψελών καυσίμου	32
2.3 Τύποι κυψελών καυσίμου	33
2.3.1 Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC)	35
2.3.2 Κυψέλες Καυσίμου Τήγματος Ανθρακικών Αλάτων (MOFC)	37
2.3.3 Κυψέλες Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (PAFC)	39
2.3.4 Κυψέλες Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων	

(PEMFC)	41
2.3.5 Κυψέλες Καυσίμου Στερεών Οξειδίων (SOFC)	43
2.3.6 Κυψέλες Καυσίμου Άμεσης Μεθανόλης (DMFC).....	46
2.3.7 Άλλα Είδη Κυψελών Καυσίμου	48
2.3.7.1 Αναγεννώμενες κυψέλες καυσίμου (RFC).....	48
2.3.7.2 Κυψέλες καυσίμου ψευδαργύρου-αέρα (ZAFC).....	50
2.3.7.3 Μικροβιακές κυψέλες καυσίμου (MFC)	52
2.3.7.4 Πρωτονικές κεραμικές κυψέλες καυσίμου (PCFC).....	53
2.4 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα κυψελών καυσίμου	54
2.4.1 Πλεονεκτήματα κυψελών καυσίμου.....	55
2.4.2 Μειονεκτήματα κυψελών καυσίμου	57

Κεφάλαιο 3^ο: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

3.1 Μεταφορές	59
3.2 Χρήση των κυψελών καυσίμου στα επιβατικά αυτοκίνητα	61
3.3 Χρήση των κυψελών καυσίμου σε επαγγελματικά οχήματα και λεωφορεία.....	64
3.4 Χρήση των κυψελών καυσίμου στα αεροσκάφη.....	65
3.5 Χρήση των κυψελών καυσίμου σε μικρά βιομηχανικά οχήματα	66
3.6 Χρήση των κυψελών καυσίμου στα τρένα	67
3.7 Χρήση των κυψελών καυσίμου σε ποδήλατα και μοτοποδήλατα	68
3.8 Μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	68
3.9 Μικρο-ισχύς.....	71
3.10 Οικιακά συστήματα	72
3.11 Άλλες εφαρμογές	73
3.11.1 Διάστημα.....	73
3.11.2 Στρατιωτικές εφαρμογές	75
3.11.3 Ιατρική	76

**Κεφάλαιο 4^ο: ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ – ΑΣΦΑΛΕΙΑ –
ΔΙΑΝΟΜΗ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

4.1 Αποθήκευση παραγόμενης ενέργειας.....	78
4.1.1 Συμπιεσμένο αέριο	80
4.1.2 Υγροποιημένο υδρογόνο	82
4.1.3 Μεταλλικά υβρίδια	83
4.1.4 Πορώδη υλικά.....	85
4.2 Ασφάλεια.....	86
4.3 Διανομή παραγόμενης ενέργειας.....	88

**Κεφάλαιο 5^ο: ΤΡΟΠΟΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ
– ΕΜΠΟΔΙΑ & ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ**

5.1 Τρόποι παρασκευής υδρογόνου.....	91
5.1.1 Υδρογόνο από ορυκτά καύσιμα	93
5.1.1.1 Παραγωγή από φυσικό αέριο/υδρογονάνθρακες.....	94
5.1.1.1.1 Αναμόρφωση με ατμό (Οξειδωση με υδρατμό) .	95
5.1.1.1.2 Οξειδωση μεθανίου με παρουσία καταλύτη.....	97
5.1.1.1.3 Αναμόρφωση με θέρμανση.....	98
5.1.1.1.4 Πυρόλυση υδρογονανθράκων	99
5.1.1.2 Αεριοποίηση άνθρακα	101
5.1.2 Υδρογόνο από την διάσπαση του νερού.....	103
5.1.2.1 Ηλεκτρόλυση του νερού	103
5.1.2.2 Φωτόλυση - Φωτοηλεκτροχημικές κυψέλες	106
5.1.2.3 Παραγωγή υδρογόνου από βακτήρια.....	107
5.1.2.4 Θερμοχημική διάσπαση του νερού.....	110

5.1.3 Υδρογόνο από βιομάζα	112
5.1.3.1 Ζύμωση βιομάζας	114
5.1.3.2 Αεριοποίηση και πυρόλυση βιομάζας	116
5.2 Εμπόδια και προοπτικές	117

Κεφάλαιο 6^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

6.1 Συμπεράσματα.....	119
6.2 Ρόλος Ελλάδας	120

<i>Βιβλιογραφία</i>	123
----------------------------------	-----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Παγκόσμια ενεργειακή κατάσταση

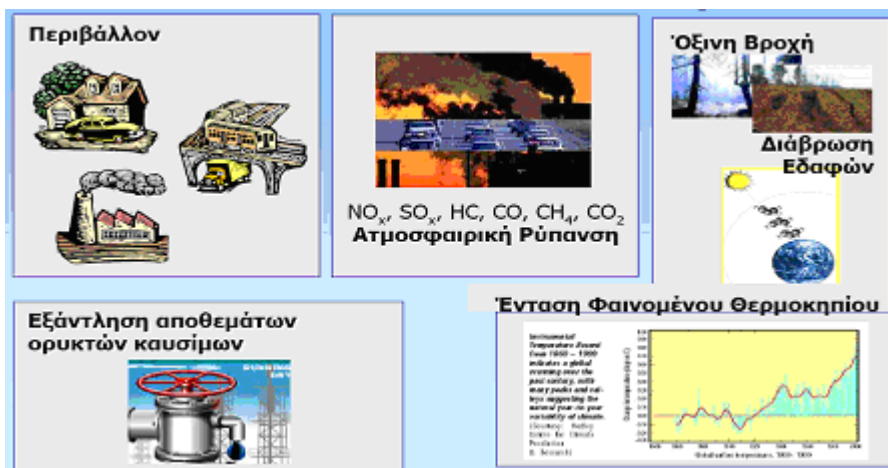
Στην σύγχρονη εποχή η παγκόσμια κοινότητα καλείται να επιλύσει δύο σημαντικά ενεργειακά ζητήματα:

1. Του ανεπαρκούς και ανασφαλούς ενεργειακού εφοδιασμού υπό οικονομικά πλαίσια και
2. Των δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων λόγω της έντονης εκμετάλλευσης των ενεργειακών πόρων.

Η ενθύμηση του ουσιώδους ρόλου που διαδραματίζει η ενέργεια στην οικονομική ανάπτυξη και εν γένει στην προαγωγή του ανθρώπινου πολιτισμού προήλθε σχετικά πρόσφατα, μέσω των αυξήσεων των τιμών στην παραγωγή και κατανάλωση της ενέργειας αλλά και των γεωπολιτικών γεγονότων. Η ασφαλής προμήθεια της ενέργειας είναι καίριο θέμα στις διεθνείς πολιτικές ατζέντες. Η εξασφάλιση της ασφάλειας στον εφοδιασμό με

την ταυτόχρονη ελάττωση των περιβαλλοντικών παρεμβάσεων απαιτεί την συνδυασμένη αρωγή των κυβερνήσεων και των πολιτών. Η ενεργειακή κατανάλωση σχετίζεται με τους ακόλουθους παράγοντες:

- Την αύξηση του πληθυσμού.
- Την οικονομική ανάπτυξη.
- Τη μείωση των αποθεμάτων των φυσικών καυσίμων.
- Τις συνέπειες της παρέμβασης του ανθρώπου στο περιβάλλον.



Σχήμα 1.1: Αιτίες που μας ώθησαν σε εναλλακτικά καύσιμα.

Οι κύριοι παράγοντες για τους οποίους αυξάνεται η ζήτηση για ενεργειακές υπηρεσίες είναι η αύξηση του πληθυσμού και η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου. Με αυτούς τους παράγοντες σχετίζεται και η αύξηση του Εθνικού Ακαθάριστου Προϊόντος (Gross Domestic Product, GDP). Κατά την διάρκεια των

τριών τελευταίων δεκαετιών, η ενεργειακή ζήτηση έτεινε σε ευθεία γραμμική αύξηση με το GDP. Από το 1990 και έπειτα, η εξάρτηση αυτή μεταβλήθηκε: μία αύξηση του GDP κατά 1% σημαίνει αύξηση κατά 0,5% στην ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια, η ζήτηση αυξάνεται με μικρότερο βαθμό σε σχέση με αυτή του GDP, κυρίως λόγω θερμότερου κλίματος στο βόρειο ημισφαίριο, αλλά και την ενεργειακή βελτίωση των συσκευών με τεχνολογικά μέτρα. Παρόλη την αύξηση της τιμής του πετρελαίου από το 2002 και μετά, οι οικονομίες των περισσότερων χωρών συνέχισαν να αναπτύσσονται. Σύμφωνα με εκτιμήσεις της International Energy Agency (IEA), για την περίοδο 2005-2030, η παγκόσμια ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας εμφανίζει μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης 1,8%. Η ζήτηση κατά το έτος 2010 έφτανε τα 11,7 δις τόνους ισοδύναμου πετρελαίου και υπάρχει η πρόβλεψη που θέλει να προσεγγίζει τα 17,7 δις το έτος 2030.

Πίνακας 1.1: Παγκόσμια ζήτηση για πρωτογενή ενέργεια ανά καύσιμο(δισ-
ton).

	1980	2000	2005	2015	2030	2005-2030*
Άνθρακας	1786	2292	2892	3988	4994	2.2%
Πετρέλαιο	3106	3647	4000	4720	5585	1.3%
Φυσικό Αέριο	1237	2089	2354	3044	3948	2.1%
Πυρηνική	186	675	721	804	854	0.7%
Υδροηλεκτρική	147	226	251	327	416	2.0%
Βιομάζα και Απόβλητα	753	1041	1149	1334	1615	1.4%
Άλλες Αναν. Πηγές	12	53	61	145	308	6.7%
Σύνολο	7228	10023	11429	14361	17721	1.8%

* (μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης για κάθε καύσιμο και ο αριθμός 1,8 που αναγράφεται στο σύνολο είναι ο μέσος όρος ετήσιου ρυθμού αύξησης των καυσίμων)

Παρατηρούμε ότι τα ορυκτά καύσιμα, πετρέλαιο, φυσικό αέριο και άνθρακας, συνεχίζουν να είναι η κύρια πηγή πρωτογενούς ενέργειας. Τα μερίδια του άνθρακα και του φυσικού αερίου μεταβάλλονται από 25% σε 28% και 21% σε 22%, αντίστοιχα. Μικρότερους ρυθμούς αύξησης της κατανάλωσης εμφανίζουν κάποιες από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως π. χ η βιομάζα.

Η αύξηση στην χρήση των φυσικών καυσίμων(άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) θα έχει ως συνέπεια την αύξηση των εκπομπών του CO₂ κατά 57% για το 2030 σε σχέση με τις εκπομπές του 2005, αν φυσικά δεν ληφθούν υπ` όψιν μέτρα για

το περιορισμό αυτών. Η εξέλιξη αυτή θα έχει αρνητικές συνέπειες με επιτάχυνση της κλιματικής αλλαγής, περαιτέρω επιδείνωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, και τάχιστα μείωση των ενεργειακών αποθεμάτων.

1.2 Ανάγκη για νέο ενεργειακό μοντέλο

Στις επόμενες δεκαετίες, τα σημαντικότερα ζητήματα που καλούνται να αντιμετωπιστούν από τη διεθνή ενεργειακή πολιτική και τις αντίστοιχες βιομηχανικές και τεχνολογικές καινοτομίες είναι τα εξής:

- Η αναμενόμενη εξάντληση των πετρελαϊκών αποθεμάτων.
- Η εξασφάλιση της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού.
- Η αντιστροφή της κλιματικής αλλαγής και η προστασία του περιβάλλοντος.
- Η κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών.
- Η δημιουργία μίας νέας βιομηχανικής και τεχνολογικής ενεργειακής βάσης που να αποβλέπει στην οικονομική ευμάρεια.

Επομένως νέα ενεργειακά συστήματα και πηγές ή φορείς ενέργειας θα πρέπει να αξιοποιηθούν σε ευρύτατο βαθμό.

1.3 Γιατί H₂;

Οι νέες πηγές και φορείς ενέργειας θα πρέπει να είναι σε θέση να εγγυηθούν ένα ασφαλές και φιλικό προς το περιβάλλον ενεργειακό σύστημα. Το υδρογόνο εμφανίζει μία σειρά σχετικών πλεονεκτημάτων:

- Εξασφάλιση ενεργειακού εφοδιασμού: Το υδρογόνο είναι ένας μη ρυπογόνος φορέας ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από πρωτογενής πηγές, από πυρηνική ενέργεια αλλά και από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτή η ποικιλότητα των μεθόδων παραγωγής συνδράμει στην εξασφάλιση του ενεργειακού εφοδιασμού. Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κεντρικές και αποκεντρωμένες ή αυτόνομες εφαρμογές για παραγωγή ενέργειας.
- Προστασία του περιβάλλοντος: Η χρήση του συνοδεύεται από πολύ χαμηλές έως και μηδενικές εκπομπές ρύπων CO₂ (κυψέλες καυσίμου).
- Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου: το υδρογόνο αν και μπορεί να παραχθεί με τρόπους, οι οποίοι έχουν μικρές εκπομπές CO₂, μας δίνει την δυνατότητα να παραχθεί από πηγές χωρίς την καύση άνθρακα (ανανεώσιμες) ή από ορυκτά καύσιμα εφαρμόζοντας μεθόδους κατακράτησης και αποθήκευσης του διοξειδίου του άνθρακα (Carbon Dioxide Capture and Storage, CDCCS).
- Οικονομική ανάπτυξη: η ανάπτυξη της αγοράς ενεργειακών συστημάτων που χρησιμοποιούν το υδρογόνο συνεπάγεται

την οικονομική ανάπτυξη κυρίως σε αναπτυσσόμενες χώρες όπου έχουμε μεγάλες ενεργειακές ανάγκες.

1.4 Ιδιότητες H₂

Το υδρογόνο φαίνεται ότι είναι το περισσότερο διαδεδομένο στοιχείο στο σύμπαν. Η φασματοσκοπική ανάλυση του φωτός που εκπέμπεται από τους αστέρες, δείχνει ότι οι περισσότεροι από αυτούς αποτελούνται κυρίως από υδρογόνο. Στην επιφάνεια της γης το υδρογόνο σχηματίζεται κυρίως από την διάσπαση οργανικών ουσιών (όπως π.χ. η κυτταρίνη, η αλβουμίνη κ.α.) από βακτήρια. Υπάρχει στα αέρια των ηφαιστείων και σε σημαντικότερα ποσά ελευθερώνεται από διάφορες βιομηχανικές αντιδράσεις.

Ενωμένο το υδρογόνο βρίσκεται κυρίως στο νερό όπου έχει πάρει και το όνομά του, δηλαδή έχει ρίζες τις ελληνικές λέξεις "ύδωρ" και "γένομαι". Κατά βάρος το υδρογόνο δεν αποτελεί περισσότερο από το 1% του στερεού φλοιού της γης. Σε καθαρή αέρια μορφή συναντάται σπάνια παρόλο που πολλά ορυκτά και όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί περιέχουν ενώσεις του σε πολύ μεγάλο βαθμό. Στην ατμόσφαιρα είναι σε αναλογία 1/10⁶.

Το υδρογόνο είναι το πρώτο στοιχείο στον περιοδικό πίνακα. Στη φύση συναντώνται τρία διαφορετικά ισότοπα. Το ισότοπο που αποτελεί το 99,98% των ατόμων υδρογόνου ονομά-

ζεται πρώτιο και αποτελείται από ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο. Σε ποσοστό 0,02% συναντούμε ένα δεύτερο ισότοπο, το δευτέριο, το οποίο αποτελείται από ένα πρωτόνιο, ένα νετρόνιο και ένα ηλεκτρόνιο (χρησιμοποιείται σε πλήθος επιστημονικών εφαρμογών). Τέλος, το τρίτο ισότοπο, το τρίτιο (ραδιενεργό στοιχείο) αποτελείται από ένα πρωτόνιο, δύο νετρόνια και ένα ηλεκτρόνιο και υπάρχει σε ιδιαίτερα χαμηλές συγκεντρώσεις $1/10^{17}$.

Προκειμένου να μελετήσουμε το υδρογόνο στο ρόλο του καυσίμου πρέπει να έχουμε καλή γνώση της ίδιας της φύσης του. Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά κάποιες βασικές ιδιότητες του.

1.4.1 Φυσικές ιδιότητες H₂

Όπως και τα περισσότερα αέρια, το μόριο του υδρογόνου είναι διατομικό και σε θερμοκρασία δωματίου βρίσκεται σε αέρια φάση. Το αέριο υδρογόνο είναι άοσμο, άχρωμο, εύφλεκτο και πιο ελαφρύ από τον αέρα. Με εξαίρεση το ήλιο, το υδρογόνο έχει το χαμηλότερο σημείο βρασμού ($20 \text{ }^{\circ}\text{K}$) και πήξεως ($14 \text{ }^{\circ}\text{K}$).

Επειδή είναι ιδιαίτερα ελαφρύ το υδρογόνο είναι πολύ διαπιδυτικό. Επίσης έχει την ιδιότητα να απορροφάται από τα στερεά μέταλλα.

1.4.2 Χημικές ιδιότητες H₂

Το μόριο του υδρογόνου (H₂) είναι πολύ σταθερό. Για τον λόγο αυτό, σε θερμοκρασία δωματίου δεν είναι δραστικό και συνήθως δεν αντιδρά με άλλα χημικά. Αυτό διότι ο δεσμός μεταξύ των ατόμων είναι εξαιρετικά δυνατός και απαιτεί μεγάλες ποσότητες ενέργειας για να διασπαστεί ώστε τα ξεχωριστά πια άτομα να αντιδράσουν με άλλα στοιχεία ή ενώσεις.

Όλα τα αμέταλλα στοιχεία, εκτός από τα ευγενή αέρια, σχηματίζουν με το υδρογόνο αέριες ή πτητικές υδρογονούχες ενώσεις. Στον αέρα καίγεται και σχηματίζει νερό ($2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{θερμότητα}$).

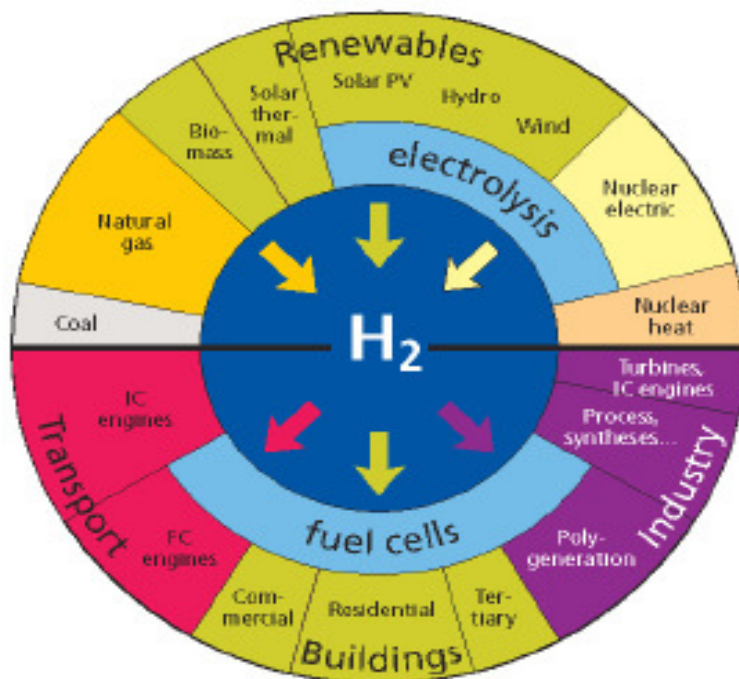
Επίσης σε μίγμα με το οξυγόνο, με διάφορες αναλογίες, όταν αναφλεγεί εκρήγνυται. Σε ελεγχόμενη καύση με αναλογία 2:1 με το οξυγόνο, αναπτύσσει φλόγα υψηλής θερμοκρασίας (οξυυδρική φλόγα) κατάλληλη για συγκόλληση δύστηκτων μετάλλων. Επίσης όταν το υδρογόνο καίγεται εκπέμπει υπεριώδη ακτινοβολία και γι' αυτό η φλόγα που παράγεται είναι σχεδόν αόρατη. Για την ανίχνευση φλόγας από διαρροή μπορεί να χρειαστεί ειδικός ανιχνευτής και γι' αυτό είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη.

Καίγεται επίσης και με το χλώριο με το οποίο σχηματίζει εκρηκτικά μίγματα. Με το φθόριο ενώνεται με έκρηξη ακόμα και στην θερμοκρασία των -250⁰C και σχηματίζει υδροφθόριο. Τα άτομα υδρογόνου σχηματίζουν ομοιοπολικούς δεσμούς εκτός από μεταξύ τους και με άλλα στοιχεία. Οι δεσμοί αυτοί δεν είναι πάντα ισχυροί αλλά σπάνε εύκολα όπως στην περίπτωση των

οξέων. Διαλυόμενα σε νερό, ο ασθενής δεσμός του υδρογόνου σπάει, με το υδρογόνο να αφήνει πίσω το ηλεκτρόνιο του και να μετατρέπεται σε ιόν οξωνίου (H_3O^+) ή στην απλοποιημένη μορφή ιόν υδρογόνου (H^+). Τέλος, σχηματίζει ιοντικούς δεσμούς με άλλα στοιχεία υπό μεγάλη πίεση.

1.5 Προώθηση οικονομίας H_2 στην διεθνή κοινότητα

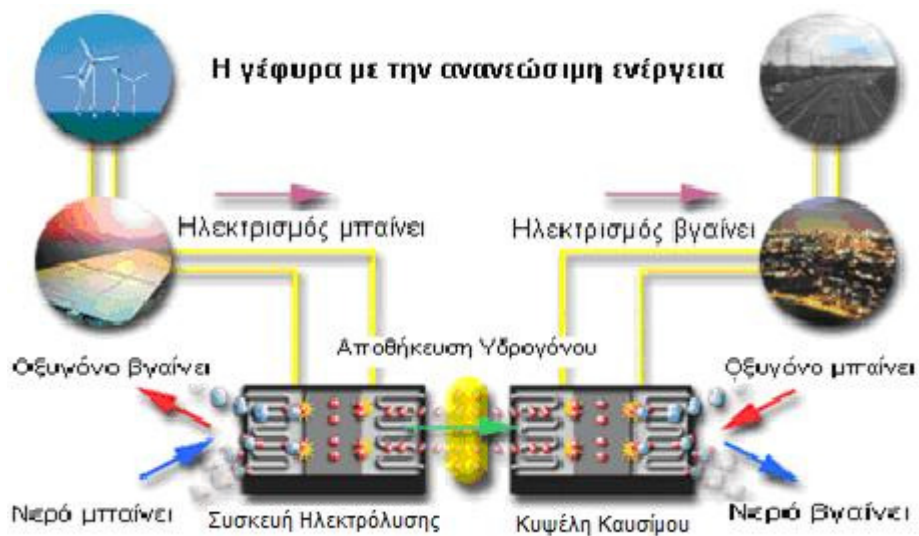
Καλούμε «οικονομία υδρογόνου» ένα είδος συστημάτων όπου οι κυψέλες υδρογόνου λειτουργούν παράλληλα με συστήματα τα οποία πραγματοποιούν ηλεκτρόλυση και τεχνολογίες ανανεώσιμης ενέργειας, όπως αιολική ή ηλιακή, για την δημιουργία ενός συστήματος κλειστού βρόχου απολύτως φιλικού προς το περιβάλλον. Σε μια τέτοια διάταξη οι κυψέλες καυσίμου θα διαδραματίσουν πρωτεύοντα ρόλο, με κυριότερο πλεονέκτημά την προσαρμοστικότητά τους. Όταν υπάρχει ηλιοφάνεια ή φυσάει ικανοποιητικός αέρας ο ηλεκτρισμός που παράγεται μέσω ηλιακής και αιολικής ενέργειας χρησιμοποιείται για την κάλυψη της ζήτησης ενώ το πλεόνασμα ενέργειας παράγει υδρογόνο με τη βοήθεια ηλεκτρόλυσης, το οποίο και αποθηκεύεται. Όταν ο αέρας κοπάζει ή νυχτώνει οι κυψέλες τίθενται σε λειτουργία παρέχοντας ισχύ, καταναλώνοντας το υδρογόνο που έχει ήδη αποθηκευτεί. Από ένα τέτοιο σύστημα ορυκτά καύσιμα αποκλείονται εντελώς.



Σχήμα 1.2: "Οικονομία υδρογόνου".

Προς το παρόν είναι αβέβαιο πότε η «οικονομία υδρογόνου» θα γίνει πραγματικότητα. Πολλές μελέτες έχουν εξετάσει τα τεχνοοικονομικά εμπόδια που παρουσιάζονται και καθιστούν σαφές ότι η μετάβαση στην «οικονομία υδρογόνου» θα είναι χρονοβόρα, δύσκολη και δαπανηρή. Παρ' όλα αυτά, είναι σημαντική η συνειδητοποίηση πως σε ένα κόσμο ορυκτών καυσίμων οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να παρέχουν αυξημένη απόδοση, μεγαλύτερη ευελιξία, μειωμένες εκπομπές ρύπων και άλλα πλεονεκτήματα συγκρινόμενες με τις συμβατικές τεχνολογίες ισχύος. Οι κυψέλες καυσίμου έχουν βρει και θα συνεχίσουν

να βρίσκουν νέες εφαρμογές, διαγράφοντας νέα βήματα προόδου και οδηγώντας ίσως μια μέρα στην «οικονομία υδρογόνου».



Σχήμα 1.3: Η γέφυρα με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η ΙΕΑ έχει εφαρμόσει ήδη από το 1977, τη συμφωνία Hydrogen Implementing Agreement (HIA), με σκοπό τη διασφάλιση της συνεργασίας στην έρευνα και την ανάπτυξη αλλά και την ανταλλαγή τεχνογνωσίας μεταξύ των συμμετεχόντων μελών (Η.Π.Α., Ε.Ε., Ιαπωνία, Αυστραλία, κ.α.). Η ΙΕΑ οραματίζεται ένα μέλλον με αειφόρο ενεργειακό εφοδιασμό που να χρησιμοποιεί το υδρογόνο, το οποίο θα έχει επίδραση σε πολλούς τομείς της παγκόσμιας οικονομίας. Οι στόχοι της ΙΕΑ μπο-

ρεί να χωριστούν στις εξής κατηγορίες: α) τεχνολογία β) περιβάλλον γ) εμπόριο και ανάπτυξη β) προώθηση.

- Τεχνολογία: η έρευνα στην χρήση του υδρογόνου ως φορέα ενέργειας, μέσω των εξής δράσεων:
 - Η ανάπτυξη αποδοτικών, ασφαλών και οικονομικών συστημάτων παραγωγής, αποθήκευσης, μεταφοράς και διανομής του υδρογόνου.
 - Η παρουσίαση ολοκληρωμένων συστημάτων υδρογόνου.
 - Η συλλογή και η ανάλυση διάφορων τεχνολογιών που χρησιμοποιούν το υδρογόνο.
 - Ανάπτυξη εργαλείων για την αξιολόγηση και βελτιστοποίηση των συστημάτων που χρησιμοποιούν υδρογόνο.
 - Προώθηση της μετάβασης από συστήματα που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα σε αειφόρα συστήματα βασισμένα στο υδρογόνο.
 - Ανάπτυξη εργαλείων για την αξιολόγηση και βελτιστοποίηση των συστημάτων που χρησιμοποιούν υδρογόνο.

- Περιβάλλον: ανάδειξη των πλεονεκτημάτων του υδρογόνου σχετικά με το περιβάλλον, μέσω των εξής δράσεων:
 - Δράσεις έρευνας και ανάπτυξης σχετικά με τη παραγωγή H_2 από ΑΠΕ.
 - Προώθηση του υδρογόνου ως “καθαρό” καύσιμο.

- Δράσεις έρευνας και ανάπτυξης για την απανθράκωση του ορυκτών καυσίμων.
- Εμπόριο και Ανάπτυξη: αναγνώριση και υπερνίκηση των εμποδίων της ενσωμάτωσης του υδρογόνου στην αγορά ενέργειας και στην αγορά καυσίμων, μέσω των εξής δράσεων:
 - Συμβολή στην εφαρμογή επικυρωμένων κωδίκων και προτύπων.
 - Δημιουργία του δικτύου τροφοδοσίας, αποθήκευσης και χρήσης του H₂.
 - Διεξαγωγή εξειδικευμένων μελετών για αναπτυσσόμενες χώρες.
 - Παροχή σχεδιαστικής υποστήριξης για επιδείξεις των τεχνολογιών του H₂.
- Προώθηση: προώθηση της χρήσης του υδρογόνου, μέσω των εξής δράσεων:
 - Ενθάρρυνση δημόσιων και ιδιωτικών οργανισμών για μεγαλύτερη συμμετοχή ιδιωτικών και δημόσιων οργανισμών στις δράσεις της IEA.
 - Χρήση πολυμέσων στην εκπαιδευτική δραστηριότητα σχετικά με το υδρογόνο.
 - Προώθηση προγραμμάτων έρευνας και ανάπτυξης με στόχο την συνεργασία διεθνών φορέων.

- Παροχή αρωγής σε αναπτυσσόμενες χώρες στην αξιοποίηση ενδογενών πηγών για παραγωγή υδρογόνου.
- Ενθάρρυνση της βιομηχανίας για συμμετοχή στις δράσεις IEA.
- Προώθηση τεχνολογιών που οδηγούν σε αυξημένη διείσδυση του H₂ στην αγορά.
- Δραστηριότητες σχετικές με την εκπαίδευση και την ενημέρωση γύρω από θέματα ασφάλειας.

Ενδεικτικές δράσεις σε κάποια ερευνητικά προγράμματα της EIA που έχουν ολοκληρωθεί(2010) περιλαμβάνουν τη φωτο-βιολογική παραγωγή H₂ (Δράση 15), την αποθήκευση H₂ σε στέρεα και υγρή κατάσταση (Δράση 17), την αξιολόγηση ολοκληρωμένων συστημάτων (Δράση 18), την ανάπτυξη βασικών και εφαρμοσμένων υλικών αποθήκευσης (Δράση 22), κ.α. (η Ελλάδα συμμετείχε στις δράσεις 18 και 22 μέσω του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Κ.Α.Π.Ε.).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

2.1 Ιστορική αναδρομή

“Γπιστεύω ότι το νερό θα είναι, μία μέρα καύσιμη ύλη. Το Υδρογόνο και το Οξυγόνο, από τα οποία συντίθεται το νερό, αν χρησιμοποιηθούν ξεχωριστά ή σε συνδυασμό θα προσφέρουν μία ανεξάντλητη πηγή θερμότητας και φωτός, με ισχύ μεγαλύτερη από εκείνη του άνθρακα...

Το νερό είναι ο μελλοντικός άνθρακας!”

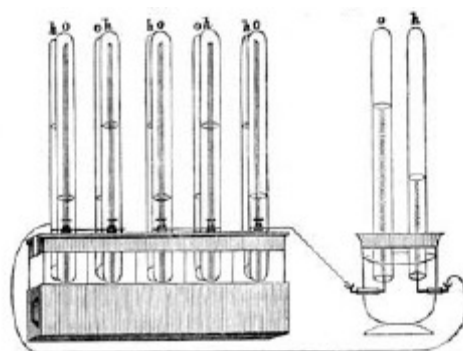
Ιούλιος Βερν

1875

Παρά τη μοντέρνα –από τεχνολογική άποψη- φύση της τεχνολογίας υδρογόνου, οι κυψέλες καυσίμου είναι γνωστές στην επιστήμη για περισσότερο από ενάμιση αιώνα. Ο ανεξερεύνητος αυτός τομέας της επιστήμης έγινε αντικείμενο εντατι-

κών ερευνών και ανάπτυξης από τις πρώτες κιόλας δεκαετίες του 20ου αιώνα.

Οι Βρετανοί επιστήμονες William Nicholson και Anthony Carlisle είχαν περιγράψει πρώτοι τη διαδικασία χρήσης ηλεκτρισμού για το διαχωρισμό του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο, τη γνωστή σήμερα ηλεκτρόλυση. Ωστόσο, ο Ουαλός δικηγόρος και αργότερα επιστήμονας William Robert Grove το 1838 πήγε την ιδέα της ηλεκτρόλυσης ένα στάδιο παρακάτω. Κατασκεύασε μια μπαταρία «υγρής κυψέλης» που έμεινε στην ιστορία με την ονομασία «κυψέλη Grove» και η οποία συνδύαζε αέριο υδρογόνο και οξυγόνο και παρήγαγε ηλεκτρικό ρεύμα και νερό. Η ανακάλυψή του αυτή συνοδεύτηκε με την κατασκευή της μηχανής που ο ίδιος ονόμαζε «μπαταρία αερίων» και η οποία αποτέλεσε την πρώτη κυψέλη καυσίμου.



Σχήμα 2.1: "Μπαταρία αερίων".

Ο Friedrich Wilhelm Ostwald θα συνεισφέρει σημαντικά στη θεωρητική κατανόηση της λειτουργίας μιας κυψέλης καυσί-

μου. Με τη βοήθεια των πειραματικών του μεθόδων θα εξηγήσει τους συνυφασμένους ρόλους των διαφόρων συστατικών στοιχείων μιας κυψέλης: ηλεκτροδίων, ηλεκτρολύτη, οξειδωτικών παραγόντων, ανιόντων και κατιόντων. Η έρευνα του στην τεχνολογία της χημείας των κυψελών καυσίμου θα αποτελέσει σημαντικό κληροδότημα για μεταγενέστερους ερευνητές.

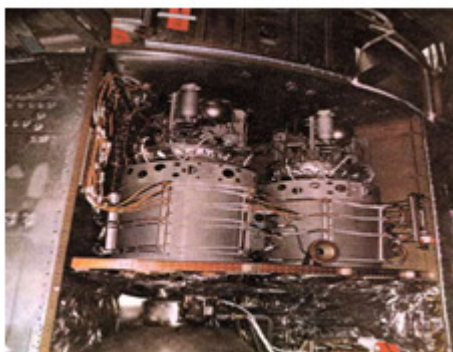
Το 1889 οι χημικοί Ludwig Mond και Charles Langer θα είναι οι πρώτοι που θα χρησιμοποιήσουν τον όρο «κυψέλη καυσίμου» στην προσπάθειά τους να κατασκευάσουν την πρώτη πρακτική συσκευή που θα χρησιμοποιεί αέρα και αέριο βιομηχανικού άνθρακα.

Το ίδιο διάστημα οι Charles Alder Wright και C. Thompson κατασκευάζοντας μια παρόμοια κυψέλη, εκφράζουν τον προβληματισμό τους για τους περιορισμούς ως προς τη λειτουργία τους για την εποχή. Η συσκευή τους λειτουργεί στο εργαστήριο για πειραματική έρευνα παράγοντας μικρές ποσότητες ρεύματος, ωστόσο είναι εξαιρετικά ασύμφορη η κατασκευή της σε καταναλωτική εμβέλεια. Για ένα διάστημα, λόγω της πολυπλοκότητας και του κόστους της τεχνολογίας τους, οι κυψέλες καυσίμου παραμένουν περιορισμένες σε εργαστηριακό επίπεδο.

Ο μηχανικός Francis Thomas Bacon θα γράψει το επόμενο μεγάλο κεφάλαιο στην ιστορία των κυψελών καυσίμου. Το 1932 θα επαναφέρει το μοντέλο που ανέπτυξαν οι Mond και Langer και εφαρμόζοντας μια σειρά μετατροπών θα κατασκευάσει το 1939 την «κυψέλη Bacon», όπως ο ίδιος την ονόμαζε,

και η οποία στην ουσία θα είναι η πρώτη αλκαλική κυψέλη καυσίμου. Κατά τη διάρκεια του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου θα δουλέψει στο πρόγραμμα ανάπτυξης κυψελών καυσίμου για χρήση από το βασιλικό στόλο υποβρυχίων, ωστόσο η απασχόλησή του με ένα άλλο στρατιωτικό πρόγραμμα θα παγώσει την έρευνά. Μετά το τέλος του πολέμου θα γίνει μέλος του πανεπιστημίου του Cambridge και το 1958 θα παρουσιάσει μια αλκαλική κυψέλη ικανή να παράξει 5kW ισχύος.

Στα τέλη της δεκαετίας του 50' το ενδιαφέρον για τις κυψέλες καυσίμου θα αναπτρωθεί. Η NASA στην προσπάθειά της να τροφοδοτήσει με ενέργεια μια σειρά από διαστημικές επανδρωμένες αποστολές θα στραφεί στην τεχνολογία των κυψελών, επενδύοντας μεγάλα χρηματικά ποσά. Αποτέλεσμα των ερευνών αυτών ήταν οι Κυψέλες Μembrάνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (P.E.M.F.C.).



Σχήμα 2.2: Κυψέλες καυσίμου σε διαστημόπλοιο.

Η πρώτη εμπορική χρήση των κυψελών καυσίμου θα έρθει με το πρόγραμμα GEMINI της NASA, ενώ οι προσπάθειες της εταιρείας κατασκευής μηχανών αεροσκαφών Pratt & Whitney για εξέλιξη της αλκαλικής κυψέλης του Bacon θα οδηγήσει στη χρήση τους για το διαστημικό πρόγραμμα Apollo.

Σήμερα οι κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούνται σε πολλές διαφορετικές εφαρμογές, π.χ. σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα, σκάφη, λεωφορεία και στην Ιαπωνία υπάρχουν ήδη σπίτια που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρισμού και τη θέρμανση του νερού.

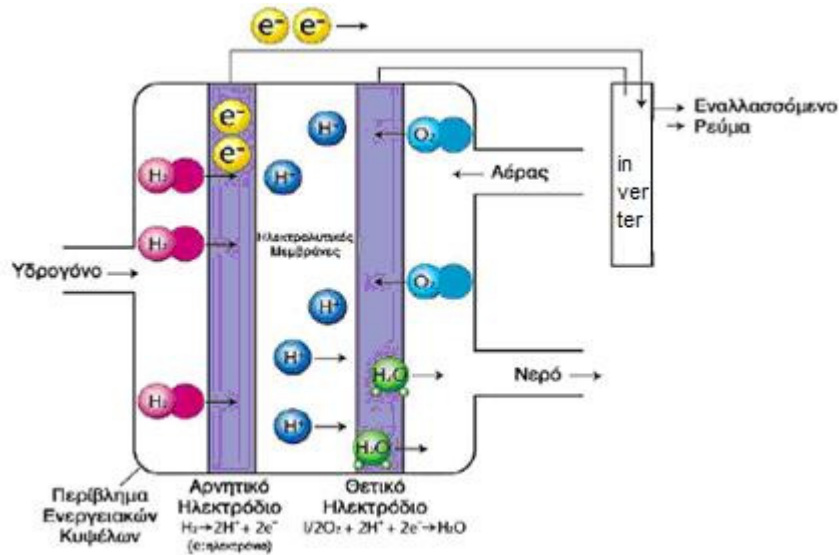


Σχήμα 2.3: Κυψέλη καυσίμου για χρήση σε ιαπωνική κατοικία.

2.2 Αρχή λειτουργίας – Δομή

2.2.1 Αρχή λειτουργίας κυψελών καυσίμου

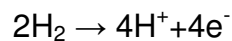
Η κυψέλη καυσίμου είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρισμό χωρίς τη μεσολάβηση της καύσης. Στη βασική της μορφή, αποτελείται από 2 ηλεκτρόδια μεταξύ των οποίων υπάρχει ένας ηλεκτρολύτης (δηλαδή κάποιο ηλεκτρολητικό διάλυμα, ή κάποια μεμβράνη σε συνδυασμό με κάποιο διάλυμα, κ.α.) και λειτουργεί ως εξής: υδρογόνο και οξυγόνο αντιδρούν και παράγουν νερό, ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσεται ένα ηλεκτροχημικό δυναμικό σε κάθε ηλεκτρόδιο που προκαλεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο εξωτερικό κύκλωμα (φορτίο). Καθώς η αντίδραση είναι εξώθερμη, παράγεται και θερμότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα.



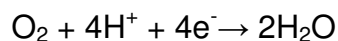
Σχήμα 2.4: Απεικόνιση κυψέλης καυσίμου(AFC) σε απλοποιημένη μορφή για την κατανόηση της λειτουργίας τους.

Οι χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται είναι οι παρακάτω:

Στην άνοδο:



Στην κάθοδο:



Ολική αντίδραση:

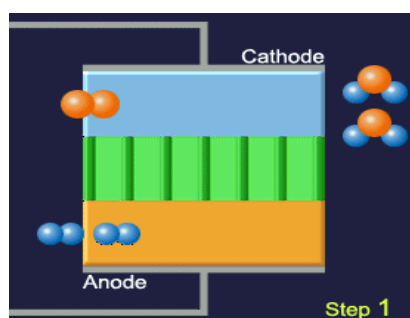


(οι παραπάνω αντιδράσεις σε μία απλή κυψέλη καυσίμου παράγουν τάση περίπου στα 0,7V) .

Συνοπτικά, η διαδικασία λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου περιγράφεται από τις παρακάτω φάσεις, οι οποίες εκτελούνται ταυτόχρονα:

1η φάση:

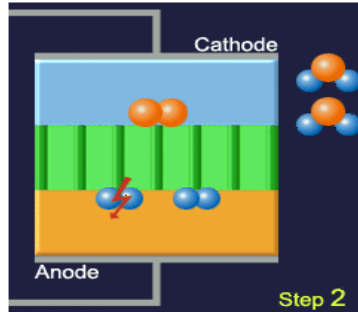
Αρχίζει και ρέει αέριο οξυγόνο (O_2) --πορτοκαλί χρώμα-- και αέριο υδρογόνο (H_2) --μπλε χρώμα-- στα δύο ηλεκτρόδια ξεχωριστά (το υδρογόνο στην άνοδο και το οξυγόνο στην κάθοδο). Έτσι έχουμε 1 μόριο O_2 επάνω και 2 μόρια H_2 κάτω.



Σχήμα 2.5: 1^η φάση.

2η φάση:

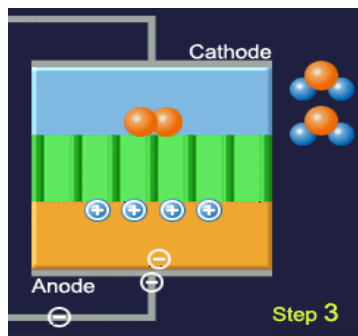
Όταν έρθουν σε επαφή τα δύο μόρια H_2 με τον καταλύτη ιονίζονται προς τέσσερα πρωτόνια και τέσσερα ηλεκτρόνια. Την ίδια στιγμή τα 4 ελεύθερα ηλεκτρόνια φεύγουν προς το εξωτερικό κύκλωμα, μέσω του οποίου έρχονται προς την κάθοδο.



Σχήμα 2.6: 2^η φάση.

3η φάση:

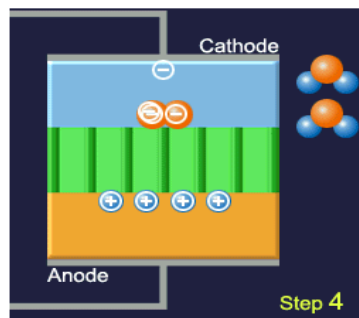
Τα 4 ηλεκτρόνια κινούνται από την άνοδο προς την κάθοδο και δημιουργούν έτσι ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Το κάτω μέρος, δηλαδή το ηλεκτρόδιο της ανόδου, έχει έλλειμμα ηλεκτρονίων (θετικός πόλος) ενώ το πάνω μέρος, δηλαδή το ηλεκτρόδιο της καθόδου, έχει περίσσεια ηλεκτρονίων (αρνητικός πόλος). Αυτό το ηλεκτρικό κύκλωμα μπορεί να τροφοδοτήσει μια ηλεκτρική συσκευή.



Σχήμα 2.7: 3^η φάση.

4η φάση:

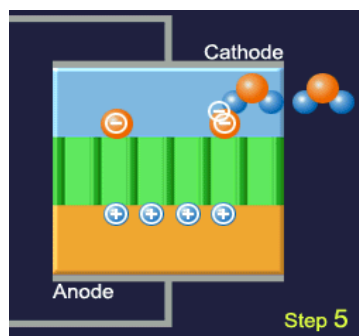
Εν συνεχεία τα τέσσερα ηλεκτρόνια, που βρίσκονται στην κάθοδο, ενώνονται με τα δύο άτομα οξυγόνου και τα φορτίζουν αρνητικά.



Σχήμα 2.8: 4^η φάση.

5η φάση:

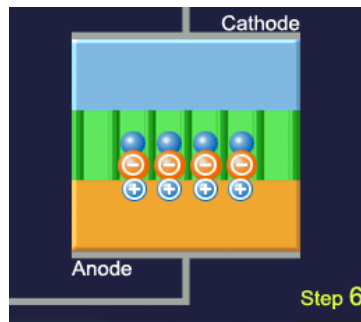
Τα δύο μόρια του νερού, που βρίσκονται ήδη στην κάθοδο (στο δεξί μέρος) ενώνονται με τα δύο ιόντα οξυγόνου (πορτοκαλί σφαίρα) σχηματίζοντας 4 ιόντα υδροξυλίου OH^- .



Σχήμα 2.9: 5^η φάση.

6η φάση:

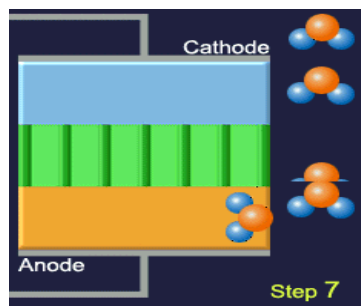
Αυτά τα 4 ιόντα του OH^- κινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη προς την άνοδο .



Σχήμα 2.10: 6^η φάση.

7η φάση:

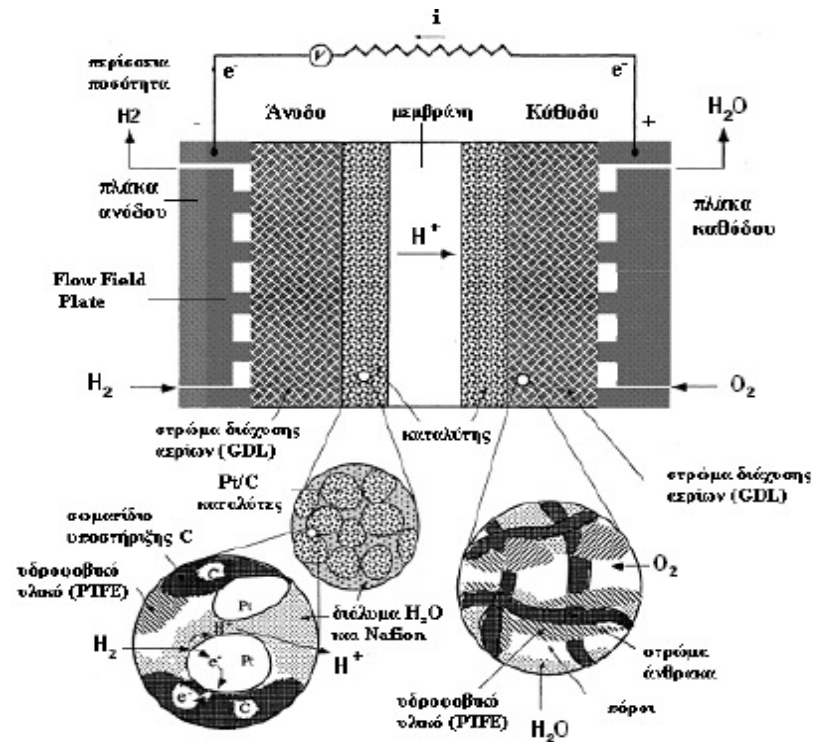
Τα ιόντα υδροξυλίου OH^- αντιδρούν στην άνοδο με τα ιόντα H^+ προς δημιουργία νερού. Αυτό το νερό μερικώς οδηγείται στην εξάτμιση και μερικώς οδηγείται πίσω στην κάθοδο για να συμμετάσχει ξανά στην αντίδραση που ακολουθεί.



Σχήμα 2.11: 7^η φάση.

2.2.2 Δομή κυψελών καυσίμου

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η εσωτερική δομή της κυψέλης(AFC).



Σχήμα 2.12: Εσωτερική δομή κυψέλης.

Τα κύρια δομικά στοιχεία της είναι:

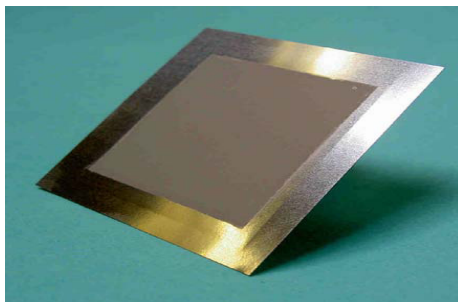
- Ο ηλεκτρολύτης (μεμβράνη σε συνδυασμό με διάλυμα H₂O και Nafion).
- Τα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου (τα οποία αποτελούνται από το στρώμα διάχυσης αερίων (Gas Diffusion Layer-GDL), την πλάκα ροής αερίων(Flow Field Plate-FFP) και την διπολική πλάκα).

2.2.2.1 Ηλεκτρολύτης

Ηλεκτρολύτες ονομάζονται τα σώματα τα οποία περιέχουν ιόντα τα οποία μπορούν να κινηθούν. Γενικά είναι σώματα υγρής μορφής π.χ. ένα διάλυμα κάποιου άλατος. Στον παραπάνω τύπο κυψέλης τον ρόλο του ηλεκτρολύτη παίζει μία μεμβράνη από πολυμερές υλικό σε συνδυασμό με διάλυμα H_2O και Nafion η οποία επιτρέπει την διέλευση των ιόντων H^+ .

Ταυτόχρονα, εμποδίζει τη διέλευση ηλεκτρονίων περιορίζοντας τις απώλειες της κυψέλης. Σε περίπτωση που επιτραπεί η διέλευση ηλεκτρονίων μέσα από τον ηλεκτρολύτη η ομαλή λειτουργία της κυψέλης διακόπτεται λόγω φαινομένων βραχυκύκλωσης. Τέλος, παρότι η μεμβράνη είναι λεπτή, αποτελεί σχετικά δυνατή και σταθερή ουσία, λειτουργώντας αποτελεσματικά σαν απομονωτής αερίων. Έτσι, επιτυγχάνει το διαχωρισμό του καυσίμου (αέριο H_2) από το οξειδωτικό μέσο (αέριο O_2), αποτρέποντας ενδεχόμενη απευθείας αντίδρασή τους.

Γενικά ο ηλεκτρολύτης είναι και το στοιχείο που προσδιορίζει της συνθήκες λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου. Η θερμοκρασία λειτουργίας σχετίζεται άμεσα με τη φύση του ηλεκτρολύτη, καθώς σε υψηλές τιμές της υπάρχει ενδεχόμενο αλλοίωσης της δομής του, ανάλογα με το είδος που χρησιμοποιείται. Το είδος του ηλεκτρολύτη είναι και αυτό που καθορίζει και τον τύπο μιας κυψέλης καυσίμου.



Σχήμα 2.13: Μεμβράνη για κυψέλες καυσίμου τύπου AFC.

2.2.2.2 Ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου

Είναι το μέρος της κυψέλης όπου γίνεται η μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Τα ηλεκτρόδια είναι δύο, η άνοδος και η κάθοδος.

Άνοδος: Το ηλεκτρόδιο της ανόδου αποτελεί το αρνητικό ηλεκτρόδιο της διάταξης. Ερχόμενο σε επαφή με το υδρογόνο προκαλεί το διαχωρισμό του σε κατιόντα και ηλεκτρόνια, τα οποία και οδηγεί στο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα, προκαλώντας τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος.

Κάθοδος: Το ηλεκτρόδιο της καθόδου αποτελεί το θετικό ηλεκτρόδιο της διάταξης. Σε αυτό πραγματοποιείται η αντίδραση των ηλεκτρονίων που προέρχονται από το εξωτερικό κύκλωμα με το οξυγόνο και τα κατιόντα υδρογόνου που κινούνται μέσω της μεμβράνης από την άνοδο προς την κάθοδο για την παραγωγή νερού.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε την ανάγκη τα ηλεκτρόδια να είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού και να είναι

φτιαγμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι διαπερατά από τα μόρια των αερίων που διοχετεύονται σε αυτά, και των ιόντων που παράγονται, αλλά και να βρίσκονται σε επαφή με το διάλυμα που υπάρχει εντός της κυψέλης μέσα στο οποίο κινούνται τα ιόντα, για να κλείσει το κύκλωμα και να δημιουργηθεί το ηλεκτρικό ρεύμα του εξωτερικού κυκλώματος.

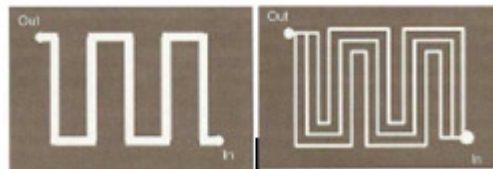
Η ταχύτητα των παραπάνω αντιδράσεων είναι αποφασιστικής σημασίας για τη λειτουργία και την απόδοση της κυψέλης καυσίμου και σχετίζεται με την ενεργό επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Έτσι, πορώδη ηλεκτρόδια αυξάνουν την ενεργό επιφάνειά τους και κατ' επέκταση την ταχύτητα με την οποία λαμβάνουν χώρα οι παραπάνω αντιδράσεις.

Πέραν της αύξησης της επιφάνειας των ηλεκτροδίων, άλλες μέθοδοι για την αύξηση του ρυθμού των αντιδράσεων είναι η αύξηση της θερμοκρασίας και η προσθήκη καταλυτικών επενδύσεων επί των ηλεκτροδίων. Οι τελευταίες μειώνουν την απαιτούμενη ενέργεια ενεργοποίησης, επιτρέποντας στις αντιδράσεις να πραγματοποιηθούν ταχύτερα ή σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

2.2.2.2.1 Πλάκα ροής αερίων και η διπολική πλάκα

Η πλάκα ροής αερίων (φτιαγμένη από γραφίτη) χαράσσεται γύρω από ηλεκτρόδια (άνοδο και κάθοδο της κυψέλης) με σκοπό τα αέρια να μπορούν να διοχετεύονται ομοιόμορφα σε

όλη την επιφάνεια τους. Επειδή όμως η τάση που εμφανίζει μία συγκεκριμένη κυψέλη καυσίμου είναι μικρή, ενώνονται σε σειρά πολλές κυψέλες, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο τη λειτουργική τάση. Επομένως είναι αναγκαίο να υπάρχουν πλάκες που να έχουν και από τις δύο πλευρές τους χαραγμένα κανάλια (εξ' ου και το όνομα διπολική πλάκα) ώστε να υπάρχει πιο ομοιόμορφη κατανομή των αερίων στο στρώμα διάχυσης. Τα κανάλια αυτά μπορούν να έχουν, ανάλογα με την κατασκευή, διαφορετική διάθροση.

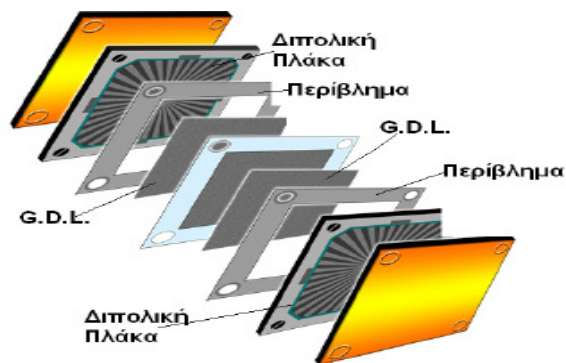


Σχήμα 2.14: Πλάκες ροής αερίων.

2.2.2.2 Στρώμα διάχυσης αερίων (Gas Diffusion Layer)

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.12 Το στρώμα αυτό είναι στην πραγματικότητα το ηλεκτρόδιο, το οποίο είναι πορώδες υλικό (έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μεγάλη επιφάνεια) μέσα στο οποίο μπορεί να διαχέεται το αέριο αλλά να εισέρχεται και το νερό και να συμβαίνει η αντίδραση (αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την ταχύτητά της. Το στρώμα διάχυσης αερίων αποτελείται από τεμαχίδια υδροφοβικού (δεν προσροφούν νερό και δεν διογκώνονται) χαρτιού γραφίτη που επιτρέπει την εύκολη μετα-

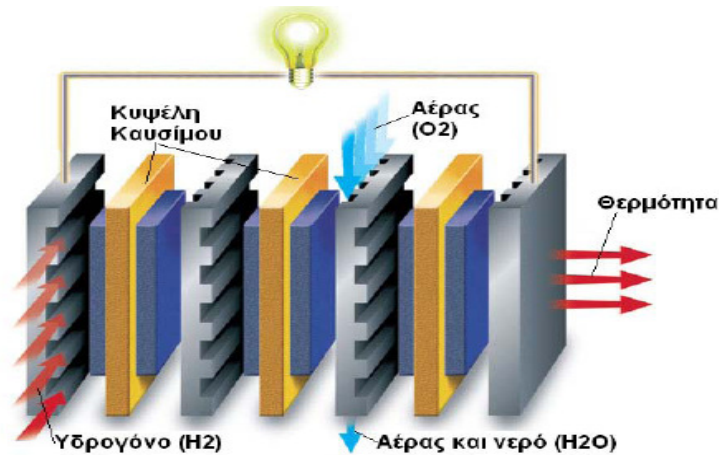
φορά των αερίων καθώς και την ηλεκτρική αγωγιμότητα των ηλεκτροδίων. Το νερό (προϊόν της αντίδρασης του ενός ηλεκτροδίου) που συγκεντρώνεται στο στρώμα διάχυσης πρέπει να εξαχθεί για να μην οδηγήσει την κυψέλη σε πλημμύρισμα, όμως παράλληλα πρέπει να αφήνεται μια ισορροπημένη ποσότητα νερού να διαπερνάται ώστε να καταφθάνει στα ηλεκτρόδια και στη μεμβράνη.



Σχήμα 2.15: Τα διάφορα μέρη της κυψέλης καυσίμου(AFC) και η κατασκευή της.

2.2.3 Συστοιχία κυψελών καυσίμου

Επειδή η τάση που εμφανίζει μία συγκεκριμένη κυψέλη καυσίμου είναι μικρή, στην πράξη ενώνονται σε σειρά πολλές κυψέλες, δημιουργώντας συστοιχίες κυψελών όπως στο επόμενο σχήμα, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την παραγόμενη τάση.



Σχήμα 2.16: Δομή συστοιχίας κυψέλης καυσίμου.

2.3 Τύποι κυψελών καυσίμου

Για την αντιμετώπιση των διαφόρων δυσκολιών που παρουσιάζει η τεχνολογία υδρογόνου έχουν αναπτυχθεί πολλά διαφορετικά είδη κυψελών καυσίμου. Τα διαφορετικά αυτά είδη βασίζονται στις ίδιες ηλεκτροχημικές αρχές, ωστόσο παρουσιάζουν διαφορές στα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους, τη θερμοκρασία λειτουργίας τους και τα καύσιμα που χρησιμοποιούν. Στις περισσότερες περιπτώσεις η κατηγοριοποίηση γίνεται με βάση το είδος του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν. Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί δεκάδες τύποι κυψελών καυσίμου, ωστόσο υπάρχουν έξι βασικές κατηγορίες:

- Αλκαλικές Κυψέλες Καυσίμου (Alkaline Fuel Cells – AFC).
- Κυψέλες Καυσίμου Τήγματος Ανθρακικών Αλάτων (Molten Carbonate Fuel Cells – MCFC).

- Κυψέλες Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cells – PAFC).
- Κυψέλες Καυσίμου Μembrάνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cells - PEMFC).
- Κυψέλες Καυσίμου Στερεών Οξειδίων (Solid Oxide Fuel Cells - SOFC).
- Κυψέλες Καυσίμου Άμεσης Μεθανόλης (Direct Methanol Fuel Cells – DMFC).

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά Ειδών Κυψελών Καυσίμου.

	PEMFC	PAFC	AFC	MCFC	SOFC	DMFC
Ηλεκτρολύτης	Πολυμερής μεμβράνη(διάλυμα H ₂ O και Nafion)	Υγρό H ₃ PO ₄	Υγρό KOH	Τήγμα ανθρακικών αλάτων	Κεραμικό	Πολυμερής μεμβράνη
Ανταλλάξιμο φορτίο	H ⁺	H ⁺	OH ⁻	CO ₃ ⁻²	O ⁻²	H ⁺
Θερμοκρασία	80°C	200 °C	60-220 °C	650 °C	600-1000 °C	90 °C
Καύσιμο	H ₂ , Μεθανόλη	H ₂	H ₂	H ₂ , CH ₄	H ₂ , CH ₄ , CO	Μεθανόλη
Καταλύτης	Λευκόχρυσος	Λευκόχρυσος		Νικέλιο	Κεραμικό	Λευκόχρυσος
Ηλεκτρική απόδοση	40-50%	40%	50%	45-55%	50-60%	25-40%
Ισχύς (kW)	0,001 -1.000	50-1.000	1 -100	100-100.000	100-100.000	0,01-10
Πυκνότητα ισχύος (mW/cm²)	300 -1.000	150 -300	150-400	100 - 300	250 - 350	

Πίνακας 2.2: Αντιδράσεις στα διάφορα είδη κυψελών καυσίμου.

	Αντίδραση ανόδου	Αντίδραση καθόδου	Συνολική αντίδραση
PEMFC	$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
PAFC	$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	$\text{O}_2(\text{g}) + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
AFC	$2\text{H}_2 + 4\text{OH}^- \rightarrow 4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
MCFC	$\text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	$\text{CO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$	$\text{H}_2(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{CO}_2$
SOFC	$2\text{H}_2 + 2\text{O}^{2-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	$\text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{O}^{2-}$	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
DMFC	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$	$\frac{3}{2}\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{CH}_3\text{OH} + \frac{3}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

Τα χαρακτηριστικά του κάθε είδους κυψελών επηρεάζουν και το εύρος των εφαρμογών στις οποίες βρίσκουν χρήση.

2.3.1 Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC)

Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFCs) είναι μία από τις πιο ανεπτυγμένες τεχνολογίες και έχουν χρησιμοποιηθεί ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του 1960 από τη NASA στα προγράμματα Apollo και Space Shuttle. Οι κυψέλες που βρίσκονται πάνω σε αυτά τα διαστημικά οχήματα παρέχουν ηλεκτρική ισχύ για τα διάφορα συστήματά τους, καθώς και πόσιμο νερό.

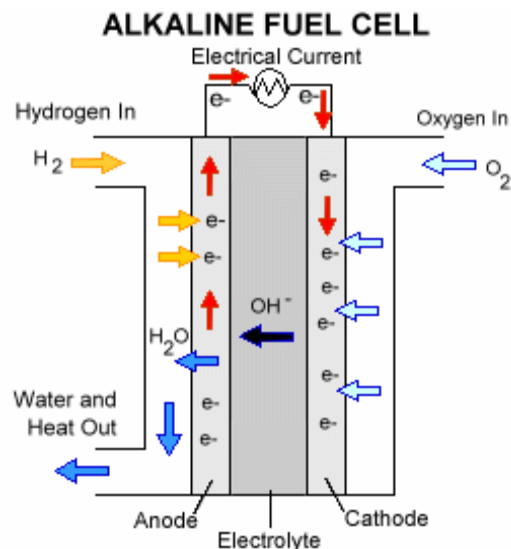
Οι αλκαλικές κυψέλες είναι παράλληλα ανάμεσα στις πλέον αποδοτικές στην παραγωγή ηλεκτρισμού με αποδόσεις που μπορούν να φτάσουν το 60%. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον

υψηλό ρυθμό με τον οποίο λαμβάνουν χώρα οι χημικές αντιδράσεις στο εσωτερικό τους.

Χαρακτηριστικό στοιχείο των αλκαλικών κυψελών καυσίμου είναι η μεγάλη τους ευαισθησία σε CO₂ που μπορεί να ενυπάρχει στο καύσιμο ή τον αέρα. Επομένως, οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου δε χρησιμοποιούνται για εφαρμογές μετακινήσεων, περιορίζονται μόνο σε κλειστό περιβάλλον όπως διαστημικά ή υποθαλάσσια οχήματα. Η ευαισθησία τους στη μόλυνση αποτελεί αξεπέραστο εμπόδιο προς το παρόν.

Στα θετικά τους σημεία συγκαταλέγεται η οικονομικότητα τους, καθώς αποτελούν το πιο φθηνό είδος κυψελών καυσίμου ως προς την κατασκευή τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο καταλύτης για τα ηλεκτρόδια μπορεί να κατασκευαστεί από μια σειρά υλικών φθηνών συγκριτικά με τους καταλύτες που χρειάζονται για άλλου είδους κυψέλες καυσίμου.

Συστοιχίες κυψελών AFC έχουν μετρηθεί, παρέχοντας ικανοποιητικά σταθερή λειτουργία για περισσότερες από 8000 ώρες. Για να γίνουν οικονομικά βιώσιμες σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, οι κυψέλες αυτές πρέπει να επιτύχουν χρόνους λειτουργίας οι οποίοι θα ξεπερνούν τις 40000 ώρες, κάτι αδύνατο προς το παρόν λόγω προβλημάτων ανθεκτικότητας υλικών. Το εμπόδιο αυτό είναι πιθανότατα το πιο σημαντικό για την εμπορευματοποίησή τους.



Σχήμα 2.17: Δομή αλκαλικής κυψέλης καυσίμου.

2.3.2 Κυψέλες Καυσίμου Τήγματος Ανθρακικών Αλάτων (MOFC)

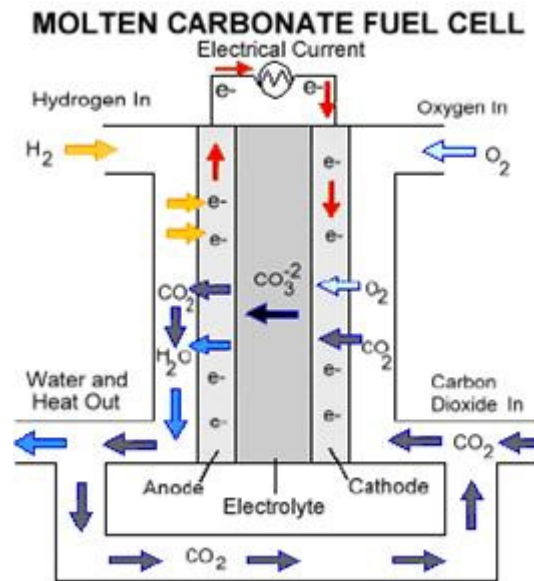
Οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MOFCs) ανήκουν στην κατηγορία των κυψελών καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών. Η υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας τους επιτρέπει να χρησιμοποιούν φυσικό αέριο απευθείας χωρίς την ανάγκη επεξεργαστή καυσίμου, ενώ έχουν ακόμη χρησιμοποιηθεί με χαμηλής ισχύος αέριο καύσιμο από βιομηχανικές διαδικασίες και άλλες πηγές καυσίμων.

Αναπτύχθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1960, ενώ οι μέθοδοι κατασκευής, η απόδοση και η διάρκειά τους έχουν βελτιωθεί σημαντικά. Σήμερα, το είδος αυτό κυψελών καυσίμου αναπτύσσεται για την κατασκευή μονάδων παραγωγής ισχύος για βιομηχανικές και στρατιωτικές εφαρμογές.

Οι MCFC δεν είναι ευαίσθητες σε μονοξειδίο και διοξείδιο του άνθρακα, τα οποία μπορούν ακόμη και να τα χρησιμοποιήσουν σαν καύσιμα, καθιστώντας τες ελκυστικές για εφοδιασμό με καύσιμα παραγόμενα από κάρβουνο. Όντας πιο ανθεκτικές σε ακαθαρσίες απ' ότι άλλα είδη κυψελών καυσίμου, οι επιστήμονες πιστεύουν ότι θα μπορούσαν να είναι ικανές ακόμη και για εσωτερική αναμόρφωση γαιάνθρακα, υποθέτοντας ότι μπορούν να αποδειχθούν ανθεκτικές σε ακαθαρσίες όπως θείο και μόρια που προκύπτουν από τη μετατροπή γαιάνθρακα σε υδρογόνο. Τέλος, η πλεονάζουσα θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης που μπορεί να αξιοποιηθεί σε πολλές βιομηχανικές και εμπορικές εφαρμογές, επιτυγχάνοντας αποδόσεις καυσίμου της τάξεως του 85%.

Η υψηλή θερμοκρασία και η χημεία του ηλεκτρολύτη έχουν επίσης και μειονεκτήματα. Πρωταρχικό πρόβλημα αποτελεί η ανθεκτικότητα. Οι υψηλές θερμοκρασίες και ο διαβρωτικός ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται επιταχύνουν την αστοχία και τη διάβρωση των υλικών, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής των κυψελών. Ακόμη, σημαντικός χρόνος απαιτείται για την επίτευξη των θερμοκρασιών λειτουργίας ενώ οι αποκρίσεις σε μεταβολές της ζητούμενης ισχύος είναι αργές. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν τις κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων κατάλληλες για εφαρμογές σταθερής ισχύος. Ακόμη, καθώς το CO₂ καταναλώνεται στην άνοδο και μεταφέρεται στην κάθοδο, η παροχή του και η επιρροή του στο ρεύμα του αέρα αποτελούν

θέματα ερευνών για την επίτευξη ιδανικής λειτουργίας, αδύνατης για οποιοδήποτε άλλο είδος κυψέλης καυσίμου.



Σχήμα 2.18: Δομή κυψέλης καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων.

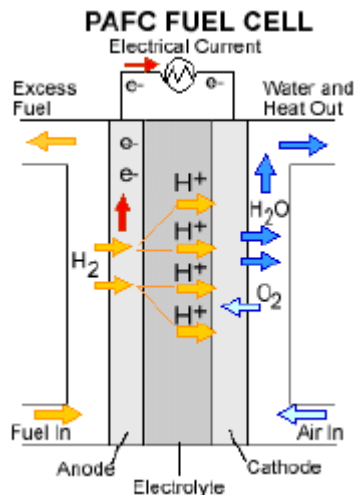
2.3.3 Κυψέλες Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (PAFC)

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFCs) ήταν οι πρώτες που εμπορευματοποιήθηκαν. Αναπτύχθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1960 και δοκιμάζονται από το 1970, έχοντας βελτιώσει σημαντικά τη σταθερότητα, την αποδοτικότητα και το κόστος τους. Αυτά τα χαρακτηριστικά τις έχουν καταστήσει σημαντικό υποψήφιο για ακίνητες εφαρμογές, ωστόσο έχουν χρησιμοποιηθεί και για την τροφοδοσία με ισχύ οχημάτων όπως αστικά λεωφορεία.

Όταν λειτουργούν σε εφαρμογές που χρησιμοποιείται και η εκλυόμενη θερμότητα η συνολική απόδοση φτάνει περίπου το 85%. Στη θερμοκρασία λειτουργίας τους η πλεονάζουσα θερμότητα είναι ικανή να θερμάνει νερό ή να παράξει ατμό σε ατμοσφαιρική πίεση. Η υψηλή απόδοση σε τέτοιου είδους εφαρμογές είναι ένα από τα πλεονεκτήματα των κυψελών αυτών.

Ακόμη, το CO₂ δεν επηρεάζει τον ηλεκτρολύτη ή τη λειτουργία της κυψέλης, η οποία μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί με αναμορφωμένα ορυκτά καύσιμα. Η απλή κατασκευή, η χαμηλή πτητικότητα του ηλεκτρολύτη και η μακρά σε χρονική διάρκεια σταθερότητα είναι επιπλέον πλεονεκτήματα αυτού του είδους κυψελών καυσίμου.

Στα μειονεκτημά τους συγκαταλέγεται η χαμηλή ισχύς τους σε σχέση με άλλα είδη κυψελών καυσίμου για διατάξεις ίδιου βάρους και όγκου. Έτσι, οι κυψέλες αυτές είναι συχνά μεγάλες και βαριές. Ακόμη, οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος είναι ακριβές, με την απαίτηση για καταλύτη λευκόχρυσου να ανεβάζει περαιτέρω το κόστος. Μέχρι σήμερα περίπου 57MW ικανότητας παραγωγής ισχύος από PAFC έχουν εγκατασταθεί και λειτουργούν. Τυπικές εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν κτήρια, ξενοδοχεία, νοσοκομεία και ηλεκτρικές εγκαταστάσεις στην Ιαπωνία, την Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής.



Σχήμα 2.19: Δομή κυψέλης καυσίμου φωσφορικού οξέως.

2.3.4 Κυψέλες Καυσίμου Μembrάνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFC)

Οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFCs) πιστεύεται ότι αποτελούν το καλύτερο είδος κυψελών καυσίμου για την αντικατάσταση της βενζίνης και των μηχανών εσωτερικής καύσης ως πηγή ενέργειας οχημάτων. Χρησιμοποιήθηκαν πρώτη φορά τη δεκαετία του 1960 για το πρόγραμμα GEMINI της NASA ενώ σήμερα αναπτύσσονται και επιδεικνύονται για συστήματα ισχύος από 1W ως 2kW.

Συγκρινόμενες με άλλα είδη κυψελών καυσίμου οι κυψέλες μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων παράγουν μεγαλύτερη ισχύ για δεδομένο όγκο ή βάρος της διάταξης. Αυτή η υψηλή πυκνότητα ισχύος τις καθιστά συμπαγείς και ελαφριές.

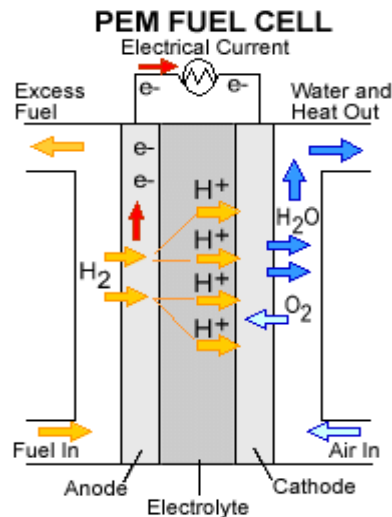
Ακόμη, η θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι χαμηλότερη από 100 °C, γεγονός που τους επιτρέπει γρήγορη εκκίνηση ενώ περιορίζει και τη φθορά των υλικών τους. Τα στοιχεία αυτά καθώς και η ικανότητα γρήγορης ανταπόκρισης σε μεταβολές της ισχύος εξόδου είναι κάποια από τα χαρακτηριστικά που καθιστούν τις PEMFCs τον κυριότερο υποψήφιο για εφαρμογές αυτοκίνησης.

Επίσης, η στεγανοποίηση των αερίων καθόδου και ανόδου είναι απλούστερη και επομένως λιγότερο δαπανηρή στην υλοποίησή της. Ακόμη, η μεμβράνη επηρεάζεται λιγότερο από δυσκολίες περιορισμού λειτουργίας και αντιμετωπίζει λιγότερα προβλήματα με διαβρώσεις, συγκρινόμενος με άλλα είδη ηλεκτρολυτών και οδηγώντας σε μεγαλύτερους χρόνους ζωής την κυψέλη και τη συστοιχία.

Ένα από τα μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων για κάποιες εφαρμογές, είναι η λειτουργία τους σε χαμηλές θερμοκρασίες. Θερμοκρασίες κοντά στους 100 °C δεν είναι υψηλές αρκετά ώστε η εκλυόμενη θερμότητα να μπορεί να αξιοποιηθεί ιδιαίτερα. Ακόμη, καθώς η μεμβράνη είναι αναγκαίο να διαποτίζεται από νερό ώστε να λειτουργεί βέλτιστα, καθίσταται πολύ σημαντικός ο προσεκτικός έλεγχος της υγρασίας των ρευμάτων των αερίων σε άνοδο και κάθοδο.

Επιπροσθέτως, η απαίτηση χρήσης ευγενούς μετάλλου για την κατασκευή του καταλύτη, όπως για παράδειγμα λευκόχ-

ρυσου, αυξάνει το κόστος του συστήματος. Τέλος, ο ίδιος ο καταλύτης λευκόχρυσου είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος σε μόλυνση από μονοξείδιο του άνθρακα, καθιστώντας απαραίτητη τη μείωση του CO στο αέριο καύσιμο αν το υδρογόνο εξάγεται από κάποια αλκοόλη ή κάποιον υδρογονάνθρακα. Κατασκευαστές ερευνούν τη χρήση καταλυτών λευκόχρυσου-ρουθίνιου η οποίοι θα είναι πιο ανθεκτικοί στις μολύνσεις αυτές.



Σχήμα 2.20: Δομή κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων.

2.3.5 Κυψέλες Καυσίμου Στερεών Οξειδίων (SOFC)

Οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFCs) αποτελούν αυτή τη στιγμή τις πλέον υψηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου που αναπτύσσονται. Οι SOFCs αναπτύσσονται από τα τέλη της δεκαετίας του 1950 και έχουν δύο υλοποιήσεις οι οποίες ερευνούνται: την επίπεδη και την κυλινδρική.

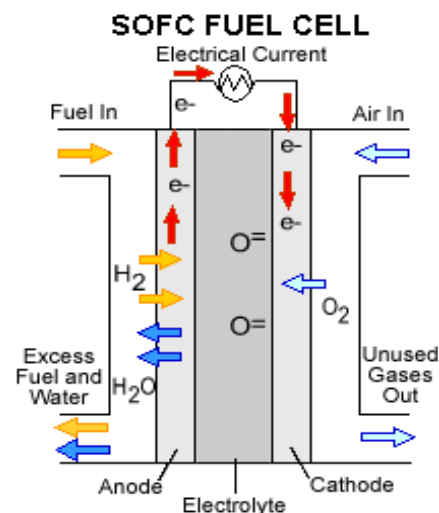
Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας δίνει την δυνατότητα για την χρησιμοποίηση της εκλυόμενης θερμότητας στη δημιουργία ατμού υψηλής πίεσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές. Ο συνδυασμός κυψέλης υψηλής θερμοκρασίας με τουρμπίνα μέσα σε μια υβριδική κυψέλη καυσίμου αυξάνει περαιτέρω τη συνολική απόδοση παραγωγής ηλεκτρισμού με τις προοπτικές για αποδόσεις πάνω από 70%.

Οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων απαιτούν σημαντικό χρόνο για να φθάσουν τη θερμοκρασία λειτουργίας τους και ανταποκρίνονται αργά σε μεταβολές της ζήτησης ηλεκτρισμού. Επομένως, θεωρούνται υποψήφιες για εφαρμογές υψηλής ισχύος, συμπεριλαμβανομένων βιομηχανικών σταθμών και κεντρικών υψηλής κλίμακας σταθμών παραγωγής ηλεκτρική ενέργειας.

Η πολύ υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας των SOFCs παρουσιάζει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Από τη μία επιτρέπει τη χρήση σχετικά μη καθαρών καυσίμων, όπως αυτά που προκύπτουν από την αεριοποίηση άνθρακα καθώς οι SOFCs δε μολύνονται από το CO αναμορφώνοντάς τα εσωτερικά, ενώ δεν παρουσιάζει και ανάγκη χρήσης ακριβών καταλυτών. Οι δυνατότητες αυτές μειώνουν σημαντικά το κόστος κατασκευής. Από την άλλη, πέραν της αργής εκκίνησης και των αργών αποκρίσεων σε μεταβολές της ζητούμενης ηλεκτρικής ενέργειας, οι υψηλές θερμοκρασίες δημιουργούν σημαντικές

απαιτήσεις για θερμική προστασία για τον περιορισμό της θερμότητας και την προστασία του προσωπικού.

Τέλος, απαιτούνται ακριβότερα υλικά κατασκευής, καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες προκαλούν και μεγαλύτερες φθορές. Η ανάπτυξη υλικών χαμηλού κόστους και μεγάλης ανθεκτικότητας σε αυτές τις συνθήκες λειτουργίας είναι η κυριότερη τεχνική πρόκληση που αντιμετωπίζει αυτή η τεχνολογία.

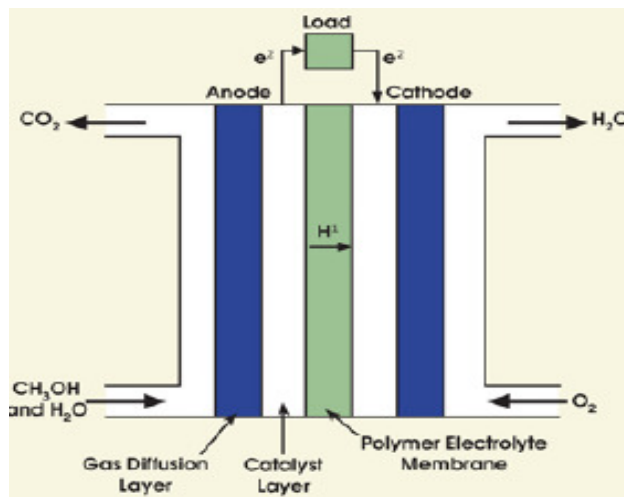


Σχήμα 2.21: Δομή κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων.

2.3.6 Κυψέλες Καυσίμου Άμεσης Μεθανόλης (DMFC)

Η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFCs) βρίσκεται ακόμη σε πρώιμα στάδια ανάπτυξης αλλά έχει τροφοδοτήσει με επιτυχία κινητά τηλέφωνα και υπολογιστές επίδειξης, πιθανούς στόχους χρήσης στο μέλλον. Οι DMFCs αναπτύχθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Η χαμηλή τους απόδοση και πυκνότητα ισχύος μαζί με άλλα προβλήματα δε συνέβαλαν στη δημοτικότητά τους.

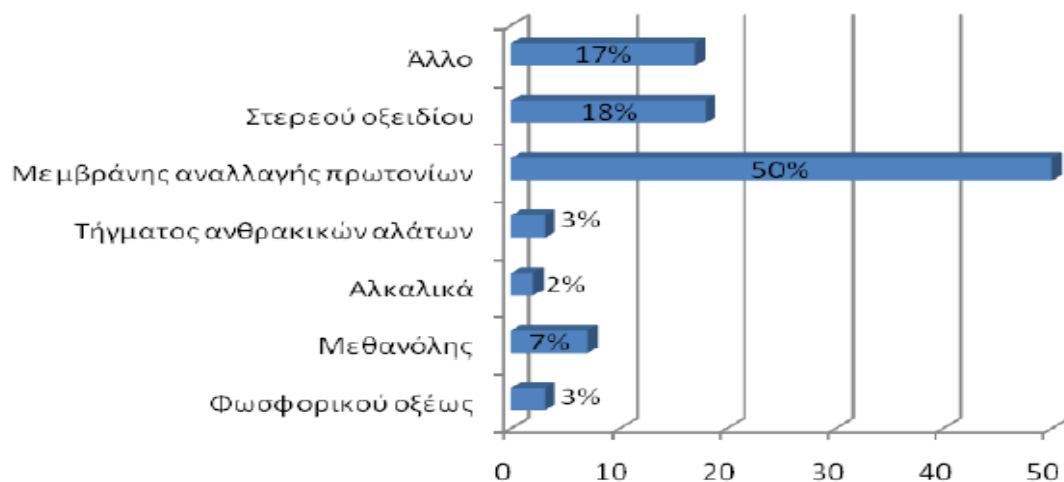
Βελτιώσεις στους καταλύτες και άλλες πρόσφατες εξελίξεις έχουν αυξήσει την πυκνότητα ισχύος τους είκοσι φορές ενώ η απόδοσή τους μπορεί να φτάσει πλέον το 40%. Οι κυψέλες αυτές έχουν δοκιμαστεί σε ένα θερμοκρασιακό εύρος από 50 °C ως 120 °C. Αυτή η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας και η μη αναγκαιότητα χρήσης αναμορφωτή καυσίμου καθιστούν τις κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης ιδανικό υποψήφιο για πολύ μικρές ή μεσαίου μεγέθους εφαρμογές, όπως κινητά τηλέφωνα. Ακόμη, οι DMFCs δεν εμφανίζουν προβλήματα αποθήκευσης όπως άλλα είδη κυψελών χάρη στη μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα της μεθανόλης συγκριτικά με το υδρογόνο.



Σχήμα 2.22: Δομή κυψέλης καυσίμου άμεσης μεθανόλης.

Ένα από τα προβλήματα των κυψελών αυτών είναι ότι η χαμηλής θερμοκρασίας οξειδωση της μεθανόλης σε ιόντα υδρογόνου και διοξείδιο του άνθρακα απαιτεί πιο ενεργό καταλύτη, πράγμα που ουσιαστικά σημαίνει μεγαλύτερη ποσότητα ακριβού λευκόχρυσου. Ωστόσο, η αύξηση αυτή του κόστους αναμένεται να ξεπερασθεί από την ευκολία που παρέχει η χρήση υγρών καυσίμων και τη δυνατότητα λειτουργίας χωρίς μονάδα αναμόρφωσης.

Ένας άλλος ανασταλτικός παράγοντας στην ανάπτυξη κυψελών καυσίμου βασισμένων σε αλκοόλες είναι η τοξικότητα της μεθανόλης. Έτσι, κάποιες εταιρείες έχουν στραφεί στην ανάπτυξη μιας κυψέλης καυσίμου άμεσης αιθανόλης (DEFC), της οποίας η απόδοση προς το παρόν βρίσκεται στο μισό σε σχέση με τις κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης, κενό που αναμένεται να περιοριστεί με περαιτέρω ανάπτυξη.



Σχήμα 2.23: Κατανομή παραγόμενων κυψελών καυσίμου ανά είδος (2007).

2.3.7 Άλλα Είδη Κυψελών Καυσίμου

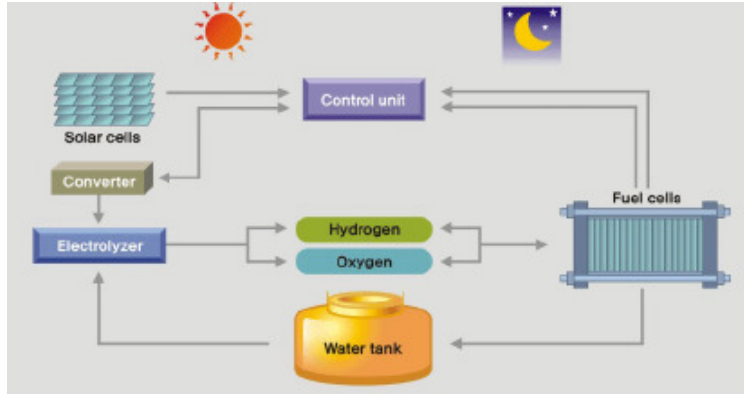
Εκτός από τις βασικές κατηγορίες κυψελών καυσίμου που αναπτύχθηκαν παραπάνω, υπάρχουν και κάποια άλλα είδη που αναφέρονται ως «κυψέλες καυσίμου» χωρίς να είναι στην πραγματικότητα. Η διαφορά στις περισσότερες περιπτώσεων αυτών των κυψελών είναι το γεγονός ότι τα ηλεκτρόδια ή ο ηλεκτρολύτης καταναλώνονται κατά τη λειτουργία των διατάξεων αυτών.

2.3.7.1 Αναγεννώμενες κυψέλες καυσίμου (RFC)

Η αναγεννώμενη κυψέλη καυσίμου (Regenerative Fuel Cell – RFC) είναι ένα σύστημα που μπορεί να λειτουργεί σε κλειστό βρόχο και να αποτελεί τη βάση μιας οικονομίας υδρογόνου.

Παράγει ηλεκτρισμό από υδρογόνο και οξυγόνο, καθώς και θερμότητα και νερό σαν παραπροϊόντα, όπως ακριβώς και οι υπόλοιπες κυψέλες καυσίμου. Ωστόσο, ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιήσει ηλεκτρισμό από ηλιακή ενέργεια ή κάποια άλλη ανανεώσιμη πηγή για να διαχωρίσει το πλεονάζον νερό σε οξυγόνο και υδρογόνο, η γνωστή διαδικασία της ηλεκτρόλυσης.

Αυτή τη στιγμή υπάρχει κάποιο πρόγραμμα της NASA που ασχολείται με την ανάπτυξη μιας ελαφριάς και αποδοτικής αναγεννώμενης κυψέλης η οποία θα εγκατασταθεί σε ένα αεροσκάφος που καλείται “Helios” και το οποίο μπορεί να φτάσει σε ύψη κοντά στα 100.000 πόδια. Ο στόχος είναι να ενσωματωθούν σε αυτό ηλιακές κυψέλες και κυψέλες καυσίμου οι οποίες θα τροφοδοτούν με ισχύ το αεροσκάφος κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας αντίστοιχα, με τα ηλιακά να παράγουν υδρογόνο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους το οποίο αργότερα θα χρησιμοποιηθεί από την κυψέλη καυσίμου.



Σχήμα 2.24: Τυπικό σύστημα αναγεννώμενης κυψέλης καυσίμου.

2.3.7.2 Κυψέλες καυσίμου ψευδαργύρου-αέρα (Z AFC)

Οι κυψέλες καυσίμου ψευδαργύρου-αέρα (Zinc-Air Fuel Cells – Z AFCs) μοιράζονται κοινά χαρακτηριστικά με πολλές από τις άλλες κυψέλες καυσίμου καθώς και με τις μπαταρίες. Οι Z AFCs περιέχουν μια «δεξαμενή καυσίμου» ψευδαργύρου και έναν καταψύκτη ψευδαργύρου που αυτόματα και αθόρυβα αναπαράγουν το καύσιμο. Σε αυτό το σύστημα κλειστού βρόχου, ηλεκτρισμός παράγεται καθώς ο ψευδάργυρος και το οξυγόνο αναμειγνύονται υπό την παρουσία ηλεκτρολύτη, δημιουργώντας το οξείδιο ψευδαργύρου. Όταν το καύσιμο καταναλωθεί, το σύστημα συνδέεται στο δίκτυο και η διαδικασία αντιστρέφεται δημιουργώντας και πάλι δισκία καθαρού καυσίμου ψευδαργύρου.

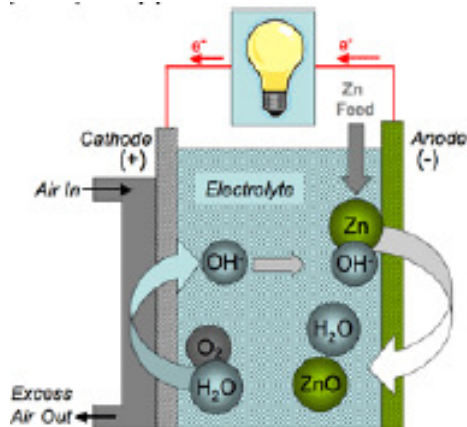
Σημαντικό στοιχείο αποτελεί ο μικρός χρόνος που διαρκεί αυτή η αντίστροφη διαδικασία – περί τα 5 λεπτά. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της τεχνολογίας ψευδαργύρου-αέρα σε σχέ-

ση με τις μπαταρίες είναι η υψηλή της ειδική ενέργεια (το ποσό της ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί/ βάρος), παράγοντας που καθορίζει τη διάρκεια λειτουργίας μιας μπαταρίας σε σχέση με το βάρος της.

Ακόμη, η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας των κυψελών ψευδαργύρου-αέρα επιτρέπει την εσωτερική αναμόρφωση υδρογονανθράκων, εξαλείφοντας την ανάγκη εξωτερικού αναμορφωτή για την παραγωγή υδρογόνου. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας είναι ότι η πλεονάζουσα θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης, χρήσιμου σε πολλές βιομηχανικές και εμπορικές εφαρμογές.

Ο ηλεκτρολύτης των Z AFCs εμφανίζει κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με τους ηλεκτρολύτες άλλων κυψελών. Δε χρειάζεται να διαποτίζεται με νερό όπως κάνει η πολυμερής μεμβράνη των PEMFCs και επομένως δεν μπορεί να στεγνώσει, εξαλείφοντας την ανάγκη προσεκτικής καταγραφής και ελέγχου των επιπέδων υγρασίας σε άνοδο και κάθοδο. Ακόμη, καθώς είναι στερεός, καμία διαρροή ηλεκτρολύτη δεν μπορεί να προκύψει, όπως γίνεται με αυτούς που βρίσκονται σε υγρή κατάσταση.

Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγεται η ανάγκη αντικατάστασης της ανόδου, καθώς λόγω του ότι αποτελείται από ψευδάργυρο καταναλώνεται κατά τη λειτουργία της κυψέλης.



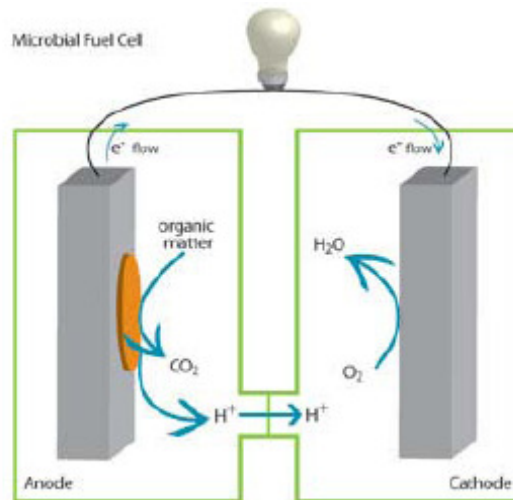
Σχήμα 2.25: Δομή κυψέλης καυσίμου ψευδαργύρου-αέρα.

2.3.7.3 Μικροβιακές κυψέλες καυσίμου (MFC)

Οι μικροβιακές κυψέλες καυσίμου (Microbial Fuel Cells – MFCs) χρησιμοποιούν την καταλυτική αντίδραση μικροοργανισμών όπως τα βακτηρίδια για να μετατρέψουν οποιοδήποτε οργανικό υλικό σε καύσιμο. Κοινές ενώσεις αποτελούν η γλυκόζη, ο οξικός εστέρας και τα υγρά απόβλητα. Εμπειροχόμενες σε μη οξυγονούχες ανόδους, οι οργανικές ενώσεις οξειδώνονται από τα βακτήρια ή άλλα μικρόβια. Κατά τη διαδικασία της πέψης ηλεκτρόνια διαχωρίζονται από την ένωση και οδηγούνται σε κάποιο κύκλωμα με τη βοήθεια ανόργανου διαμεσολαβητή.

Οι MFCs λειτουργούν καλά σε ήπιες συνθήκες σχετικά με άλλα είδη κυψελών καυσίμου, όπως 20 °C με 40 °C και είναι ικανές για αποδόσεις πάνω από 50%. Οι κυψέλες αυτές είναι κατάλληλες για εφαρμογές μικρής κλίμακας όπως πιθανές ιατρικές συσκευές τροφοδοτούμενες από τη γλυκόζη του αίματος, ή με-

γαλύτερες όπως εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού ή ζυθοποι-
ίες που παράγουν οργανικά απόβλητα τα οποία θα μπορούσαν
να χρησιμοποιηθούν σαν καύσιμο για μικροβιακές κυψέλες κα-
υσίμου.



Σχήμα 2.26: Δομή μικροβιακής κυψέλης καυσίμου.

2.3.7.4 Πρωτονικές κεραμικές κυψέλες καυσίμου (PCFC)

Οι πρωτονικές κεραμικές κυψέλες καυσίμου (Protonic Ceramic Fuel Cells – PCFCs) παρουσιάζουν παρόμοια θερμικά και κινητικά πλεονεκτήματα λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες όπως 700 °C με τις κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων και τήγματος ανθρακικών αλάτων, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζουν όλα τα εγγενή πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων και φωσφορικού οξέος.

Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας είναι απαραίτητη για την επίτευξη πολύ υψηλής ηλεκτρικής απόδοσης καυσίμου. Οι PCFCs μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές θερμοκρασίες και να οξειδώσουν ηλεκτροχημικά ορυκτά καύσιμα απευθείας στην άνοδο. Το γεγονός αυτό εξαλείφει το ενδιάμεσο βήμα παραγωγής υδρογόνου μέσω της δαπανηρής διαδικασίας αναμόρφωσης καυσίμου.

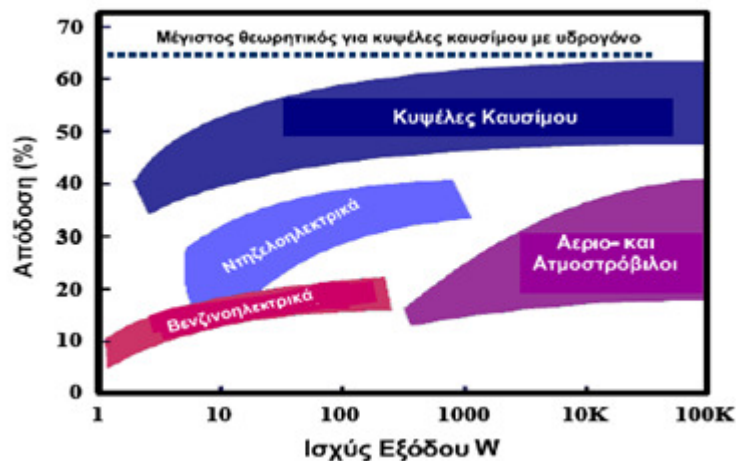
Επιπροσθέτως, στα πλεονεκτήματα των πρωτονικών κεραμικών κυψελών καυσίμου περιλαμβάνεται και ο ηλεκτρολύτης τους. Όντας στερεός εξαλείφει τον κίνδυνο η μεμβράνη να στεγνώσει όπως γίνεται στις PEMFCs ενώ είναι αδύνατη και πιθανή διαρροή του καθώς δεν είναι υγρός, όπως μπορεί να συμβεί στις PAFCs.

2.4 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα συγκρινόμενες με συμβατικές πηγές ενέργειας, όπως οι μηχανές εσωτερικής καύσης και οι μπαταρίες. Παρ' ότι κάποια από τα χαρακτηριστικά τους ισχύουν για συγκεκριμένους τύπους κυψελών, τα περισσότερα πλεονεκτημά τους είναι γενικότερα. Ωστόσο, υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα που θα είναι δύσκολο να ξεπεραστούν και τα οποία προς το παρόν περιορίζουν την υιοθέτηση της τεχνολογίας υδρογόνου.

2.4.1 Πλεονεκτήματα κυψελών καυσίμου

- **Απόδοση:** Οι κυψέλες καυσίμου παράγουν μέσω ηλεκτροχημικών διεργασιών ενέργεια και θερμότητα διαθέσιμες απευθείας προς χρήση. Έτσι, επιτυγχάνουν πολύ ψηλότερους δείκτες αποδοτικότητας, οι οποίοι μπορούν να φτάσουν το 65% ή και ακόμη το 90% σε περιπτώσεις μονάδων που παράγουν και τα δύο, ηλεκτρισμό και θερμότητα. Είναι κατά μέσο όρο 30 - 40% πιο αποδοτικές από τις συμβατικές μηχανές εσωτερικής καύσης, ανάλογα με το καύσιμο που επιλέγεται.



Σχήμα 2.27: Διάγραμμα σύγκρισης απόδοσης-ισχύος εξόδου κυψελών καυσίμου και συμβατικών μηχανών εσωτερικής καύσης.

- **Αξιοπιστία και συντήρηση:** Οι κυψέλες περιέχουν πολύ λίγα κινητά μέρη, τα περισσότερα εκ των οποίων εμπλέκονται με νερό, θερμότητα και διαχείριση αέρα. Έτσι, εξασφαλί-

ζονται μικρότερες απαιτήσεις συντήρησης και άρα χαμηλότερο κόστος λειτουργίας.

- **Χαμηλό επίπεδο θορύβου και δονήσεων:** Ο μικρός αριθμός κινητών μερών σημαίνει και χαμηλά επίπεδα θορύβου καθώς και πολύ μικρό ποσοστό δονήσεων στην κυψέλη.
- **Ευελξία καυσίμου:** Διαφορετικοί τύποι κυψελών καυσίμου μπορούν να λειτουργήσουν με ένα εύρος διαφορετικών καυσίμων, όπως για παράδειγμα καθαρό υδρογόνο, μεθανόλη και υδρογονάνθρακες όπως πετρέλαιο, προπάνιο, μεθάνιο και φυσικό αέριο.
- **Περιορισμός οικονομικών εξαρτήσεων:** Οι κυψέλες καυσίμου δε χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα όπως το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο και έτσι περιορίζουν τις οικονομικές εξαρτήσεις σε πολιτικά ασταθείς χώρες.
- **Εύκολη ανατροφοδότηση:** Οι κυψέλες καυσίμου ανατροφοδοτούνται γρήγορα απλώς με την παροχή περαιτέρω καυσίμου, αντιθέτως με τις μπαταρίες, για παράδειγμα, οι οποίες μετά τη χρήση τους πρέπει να πεταχτούν ή να επαναφορτιστούν για μεγάλο χρονικό διάστημα.
- **Μεγάλη διάρκεια λειτουργίας:** Η ενέργεια που μπορεί να φυλαχτεί σε μία διάταξη κυψέλης καυσίμου σχετικά με τον όγκο της είναι μεγάλη συγκρινόμενη με άλλες μεθόδους, όπως για παράδειγμα συμβαίνει στις μπαταρίες.

- **Μεγάλο εύρος εφαρμογών:** Οι κυψέλες καυσίμου έχουν προσαρμοσμένο σχεδιασμό για εφαρμογές από λίγα Watt ως και αρκετά MegaWatt.
- **Πολλαπλές ενεργειακές πηγές:** Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί με διάφορες διεργασίες από πολλές πηγές ενέργειας, από ορυκτά καύσιμα όπως βενζίνη και φυσικό αέριο έως από ΑΠΕ.

2.4.2 Μειονεκτήματα κυψελών καυσίμου

- **Κόστος:** Το κόστος κατασκευής των κυψελών καυσίμου αποτελεί ακόμη σημαντικό πρόβλημα και περιορίζει τη χρήση τους σε εξειδικευμένες εφαρμογές. Ακόμη, σε ορισμένες περιπτώσεις το κόστος παραγωγής του υδρογόνου που χρησιμοποιείται σαν καύσιμο ξεπερνά το κέρδος από την τελική παραγωγή ενέργειας.
- **Τροφοδοσία:** Η παραγωγή, μεταφορά και κυρίως η διανομή και αποθήκευση του υδρογόνου αποτελούν ακόμη σημαντικά προβλήματα.
- **Εκπομπές αερίων:** Η παραγωγή υδρογόνου από υδρογονάνθρακες με τη βοήθεια αναμορφωτή καυσίμου δεν είναι απολύτως φιλική προς το περιβάλλον παρόλα αυτά είναι οι εκπομπές είναι πολύ λιγότερες σε σχέση με εκείνες άλλων μεθόδων. Ακόμη, οι διαρροές υδρογόνου προς την ατμόσφαιρα ίσως βλάψουν τις επόμενες δεκαετίες σοβαρά το στρώμα του όζοντος.

- **Μέγεθος συστήματος:** Το μέγεθος των κυψελών καυσίμου αποτελεί ακόμη πρόβλημα. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια διαρκώς μειώνεται αφήνοντας υποσχέσεις για το κοντινό μέλλον.
- **Διαρροές:** Σύμφωνα με υπολογισμούς οι διαρροές από τις μονάδες αποθήκευσης υδρογόνου ίσως να αγγίζουν και το 20%, καθιστώντας οικονομικά δυσμενέστερη την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου.
- **Συντήρηση:** Ανάγκη για ειδικά εκπαιδευμένους τεχνικούς και εξειδικευμένα εργαλεία για την συντήρηση των κυψελών.
- **Τυποποίηση:** Εκτός από την συμφωνία μεταξύ Ιαπωνίας και ΕΕ σχετικά με τα πρότυπα για τις κυψέλες καυσίμου δεν υπάρχει συντονισμός μεταξύ των κατασκευαστών και των κυβερνήσεων προς την ανάπτυξη ενός κοινού συστήματος τυποποίησης.
- **Κίνδυνος έκρηξης:** Εξ' αιτίας της μεγάλης εκρηξιμότητας του υδρογόνου και της μεγάλης πιθανότητας διαρροής (που αναφέρθηκε παραπάνω) είναι υπαρκτός ο κίνδυνος πυρκαγιάς ή έκρηξης.



Σχήμα 2.28: Κίνδυνος έκρηξης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

3.1 Μεταφορές

Οι κατασκευαστικές εταιρίες των κυψελών καυσίμου επικεντρώνουν το ενδιαφέρον τους για εφαρμογές των τεχνολογιών που αναπτύσσουν στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα λόγω του προβλεπόμενου μεγέθους της αγοράς. Τα καινοτόμα αυτοκίνητα αποτελούν ένα μεγάλο κίνητρο για την ανάπτυξη τεχνολογιών κυψελών καυσίμου, αφού τα συμβατικά συμβάλουν σημαντικά στην μόλυνση της ατμόσφαιρας.

Σχεδόν όλες οι αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν κατασκευάσει πρότυπα οχήματα κυψελών καυσίμου και έχουν ανακοινώσει τη μαζική παραγωγή τους στο άμεσο μέλλον. Αρκετά από αυτά χρησιμοποιούν μόνο κυψέλες υδρογόνου ως πηγή τροφοδοσίας, ενώ κάποια άλλα χρησιμοποιούν και μπαταρίες ως εναλλακτική πηγή τροφοδοσίας. Το καύσιμο είναι είτε καθαρό υδρογόνο σε υγρή ή αέρια μορφή, είτε από αναμόρφωση. Στο

επόμενο σχήμα φαίνονται μερικές φωτογραφίες οχημάτων που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου.



Σχήμα 3.1: Εφαρμογές κυψελών καυσίμου σε τομείς μεταφορών.

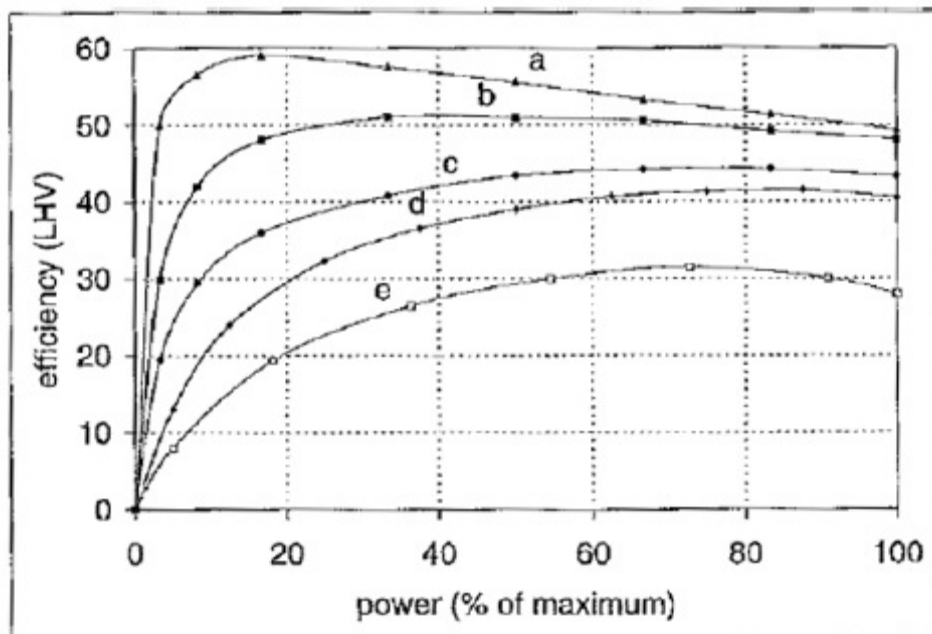
Παρακάτω παρουσιάζεται η χρήση των κυψελών καυσίμου στις πλέον διαδεδομένες κατηγορίες οχημάτων όπως:

- Κοινά επιβατικά οχήματα.
- Επαγγελματικά οχήματα – Λεωφορεία.
- Αεροσκάφη.
- Μικρά βιομηχανικά οχήματα.
- Τρένα.
- Ποδήλατα – Μοτοποδήλατα.

3.2 Χρήση των κυψελών καυσίμου στα επιβατικά αυτοκίνητα

Η δυσκολία παραγωγής και η έλλειψη υποδομών για τη διάθεση του υδρογόνου αποτελεί, προς το παρόν, ένα εμπόδιο για την ευρεία χρήση αυτοκινήτων με κυψέλες καυσίμου. Πολλά πρότυπα οχήματα έχουν εγκατεστημένο έναν αναμορφωτή καυσίμου και έτσι μπορούν να τροφοδοτούνται απευθείας με υδρογονάνθρακες. Βέβαια, η εγκατάσταση αναμορφωτών αυξάνει το κόστος, την πολυπλοκότητα της κατασκευής του αυτοκινήτου και επιπλέον έχουμε έκλυση επιβλαβών καυσαερίων στην ατμόσφαιρα, λιγότερα βεβαίως από αυτά των μηχανών εσωτερικής καύσης.

Οι αποδόσεις των κυψελών καυσίμου και των μηχανών εσωτερικής καύσης δεν πρέπει να συγκρίνονται μόνο στα σημεία μέγιστης ισχύος τους. Οι δύο αυτές τεχνολογίες παρουσιάζουν δυο εντελώς διαφορετικές χαρακτηριστικές καμπύλες απόδοσης – ισχύος:



Σχήμα 3.2: Σύγκριση αποδόσεων ΚΚ και μηχανών εσωτερικής καύσης:

- a : σύστημα ΚΚ σε λειτουργία χαμηλής θερμοκρασίας και πίεσης.
- b : σύστημα ΚΚ σε λειτουργία υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης.
- c : σύστημα ΚΚ με αναμορφωτή καυσίμου.
- d : μηχανή εσωτερικής καύσης με ανάφλεξη μέσω συμπιεστή (diesel).
- e : μηχανή εσωτερικής καύσης με ανάφλεξη μέσω σπινθήρα (βενζινοκινητήρας).

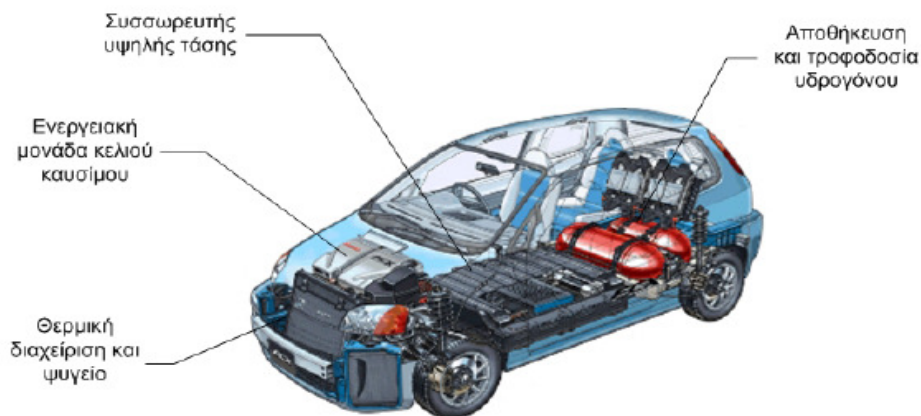
Αν και οι μηχανές εσωτερικής καύσης παρουσιάζουν μέγιστη απόδοση κοντά στη μέγιστη ισχύ τους, ένα σύστημα κυψελών καυσίμου παρουσιάζει μέγιστη ισχύ σε μερική φόρτιση. Εξαιτίας αυτού, η απόδοση των οχημάτων που χρησιμοποιούν υδρογόνο ως καύσιμο για μία τυπική αστική διαδρομή με συνήθη οδική συμπεριφορά, όπου η μηχανή του οχήματος λειτουργεί ως επί το πλείστον σε μερική φόρτιση, μπορεί να είναι έως

και διπλάσια σε σύγκριση με αυτή των μηχανών εσωτερικής καύσης. Η απόδοση ενός οχήματος που διαθέτει κυψέλες καυσίμου και τροφοδοτείται με υδρογόνο για ένα τυπικό τρόπο οδήγησης παίρνει τιμές πάνω από 40%, όπως φαίνεται στο προηγούμενο σχήμα. Η απόδοση των οχημάτων που διαθέτουν και αναμορφωτή καυσίμου μειώνεται σε σύγκριση με αυτή των οχημάτων που τροφοδοτούνται με καθαρό υδρογόνο, αλλά εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερη αυτής των μηχανών εσωτερικής καύσης.

Ένα συμβατικό αυτοκίνητο για την κάλυψη 400 km καίει καταναλώνει περίπου 24 kg πετρελαίου. Για την κάλυψη της ίδιας απόστασης χρειάζονται μόλις 4 kg υδρογόνου σε FC car. Ωστόσο, το υγρό H₂ απαιτεί τον 4-πλάσιο όγκο από ότι η ισοδύναμη ενεργειακά ποσότητα βενζίνης.



Σχήμα 3.3: Πλεονεκτήματα FC αυτοκινήτου έναντι συμβατικών.



Σχήμα 3.4: Δομή αυτοκινήτου με κυψέλες καυσίμου.

3.3 Χρήση των κυψελών καυσίμου σε επαγγελματικά οχήματα και λεωφορεία

Πέραν των μικρών επιβατικών αυτοκινήτων, τα συστήματα κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούνται και σε επαγγελματικά οχήματα καθώς και σε αστικά λεωφορεία. Όσον αφορά τα αστικά λεωφορεία, οι απαιτήσεις είναι αρκετά διαφορετικές σε σχέση με τα μικρά αυτοκίνητα. Απαιτούν περισσότερη ισχύ, τυπικά από 250 kW και άνω, και ο τρόπος χρήσης τους διαφέρει αφού απαιτούν συχνές εκκινήσεις και στάσεις. Τα αστικά λεωφορεία έχουν κεντρικούς σταθμούς τροφοδότησης καυσίμου και αυτό διευκολύνει τη δημιουργία σταθμών παραγωγής υδρογόνου. Μπορούν εύκολα να αποθηκεύσουν μεγάλες ποσότητες υδρογόνου, συνήθως πάνω από 20 kg σε φιάλες των 250 ή και 300 bar στην οροφή του λεωφορείου. Επειδή το υδρογόνο είναι πιο ε-

λαφρύ από τον αέρα, η τοποθέτηση στην οροφή αποτελεί μια αρκετά ασφαλή λύση.



Σχήμα 3.5: Πρατήριο εφοδιασμού υδρογόνου.

3.4 Χρήση των κυψελών καυσίμου στα αεροσκάφη

Επίσης στην αεροπλοΐα οι κινητήρες αεροσκαφών έχουν δύο λειτουργίες: η μία είναι να παρέχει την πρόωση στο σκάφος και η άλλη, η οποία είναι δευτερεύουσα, είναι να παρέχει άνετες συνθήκες για τους επιβάτες. Προς το παρόν, η πρόωση προβλέπεται ότι θα παρέχεται αποκλειστικά από τα υγρά καύσιμα, επειδή ο σχεδιασμός ενός αεροσκάφους με πρόωση H_2 παρουσιάζει τεχνολογικά και κοινωνικά προβλήματα. Ωστόσο, βοηθητική ισχύς για την άνεση των επιβατών (φωτισμός, θέρμανση φαγητών, ψύξη, κ.τ.λ.) μπορεί να παρέχεται από κυψέλες καυσίμου. Με την αφαίρεση των ηλεκτρικών φορτίων από τους κινητήρες, υπολογίζεται ότι η κατανάλωση καυσίμου μπορεί να μειωθεί κατά τρία τέταρτα εάν το αεροπλάνο βρίσκεται στο έδαφος και μέχρι 40% κατά τη διάρκεια της πτήσης. Τόσο η Airbus

(ΕΕ) και η Boeing (ΗΠΑ) εργάζονται για την ανάπτυξη βοηθητικών μονάδων ισχύος αυτού του τύπου. Η κλίμακα των μονάδων αυτών είναι μεγάλη, της τάξης των 200-600 kW, και ο στόχος του σχεδιασμού είναι να ελαχιστοποιηθεί το βάρος της μονάδας και το μέγεθος στο επίπεδο που για την τοποθέτηση επί του σκάφους δεν έρχεται σε αντίθεση με την ανάγκη εξυπηρέτησης του χώρου των επιβατών. Ως εκ τούτου, ακόμη και το ενδεχόμενο της παραγωγής υδρογόνου μέσω της αναμόρφωσης του συστήματος των καυσίμων JP8/JP12 επί του σκάφους, για τις αερομεταφορές είναι ιδιαίτερα ελκυστικό για τη μείωση της πολυπλοκότητας του συστήματος τροφοδοσίας, του κόστους των καυσίμων, και της ρύπανσης. Το πρώτο πρωτότυπο επί του σκάφους αναπτύχθηκε από την Airbus σε μια επίδειξη στον αέρα στο Βερολίνο το 2008.

3.5 Χρήση των κυψελών καυσίμου σε μικρά βιομηχανικά οχήματα

Επίσης μικρά βιομηχανικά οχήματα, όπως τα περονοφόρα ανυψωτικά μηχανήματα, τα ρυμουλκά και οι μεταφορείς αποσκευών προσελκύουν το ενδιαφέρον για την χρήση των κυψελών καυσίμου. Στα αεροδρόμια ο οδικός εξοπλισμός και η υποστήριξη των οχημάτων που λειτουργούν με επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και επιτελούν σημαντικά καθήκοντα κάθε ημέρα και είναι μια άλλη ευκαιρία για την κίνηση με χρήση υδρογόνου. Επί

του παρόντος, οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται απαιτούν σημαντική ικανότητα αποθήκευσης, το να αλλάζονται είναι χρονοβόρο, και είναι περίπλοκη η ανακύκλωσή τους. Ο εξοπλισμός των οχημάτων που κινούνται εκτός του οδικού δικτύου με κυψέλες καυσίμου θα είναι πολύ ελκυστικός γιατί προσφέρει μηδενικές εκπομπές, γρήγορο ανεφοδιασμό καυσίμων και καλύτερη δυναμική απόδοση.

3.6 Χρήση των κυψελών καυσίμου στα τρένα

Οι σιδηρόδρομοι αποτελούν άλλο ένα χώρο με υψηλό δυναμικό για εφαρμογές κυψελών καυσίμου. Για παράδειγμα η κοινοπραξία Hydrogen Train Project της ΕΕ ελπίζει να επιδείξει ένα τρένο που θα κινείται με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου μέσα στο 2010. Από τεχνικής άποψης, αυτό θα είναι ένα υβριδικό σύστημα με φορτίο βάσης 150-200 kW προερχόμενο από κυψέλη καυσίμου τύπου PEM και με μπαταρία 50-100 kW, για την ανταπόκριση κατά τη διάρκεια κορυφών ισχύος. Η Ιαπωνία έχει επικεντρωθεί στην ανάπτυξη αξιόπιστων και φιλικών προς το περιβάλλον επιβατικών τρένων κυψελών καυσίμου, με την επίδειξη επί των γραμμών το 2010, που θα χρησιμοποιούν επίσης ένα υβριδικό σύστημα με ΚΚ τύπου PEM τύπου σε συνδυασμό με μπαταρία, με μια αυτονομία των 300-400 χιλιομέτρων και της ταχύτητας των 120 χιλιομέτρων την ώρα.

3.7 Χρήση των κυψελών καυσίμου σε ποδήλατα και μοτοποδήλατα

Τέλος, ποδήλατα και μοτοποδήλατα είναι δημοφιλή μέσα μετακίνησης αντί των αυτοκινήτων στις πόλεις και στις αστικές περιοχές σε όλο τον κόσμο, αλλά κατά κύριο λόγο στην Ασία. Η μείωση των εκπομπών ρύπων και βελτίωση της ενεργειακής κατανάλωσης αυτών των οχημάτων θα ήταν ένα μεγάλο βήμα για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και διατήρηση της ποιότητας του περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης του θορύβου. Η Honda, η Yamaha, και πολλές άλλες εταιρείες έχουν επιδείξει με επιτυχία σκούτερ με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου.



Σχήμα 3.6: Φορητή μονάδα κυψέλης καυσίμου.

3.8 Μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Πολλά συστήματα κυψελών καυσίμου έχουν κατασκευαστεί για στατικές εφαρμογές. Ο βασικός σχεδιασμός τέτοιων συσ-

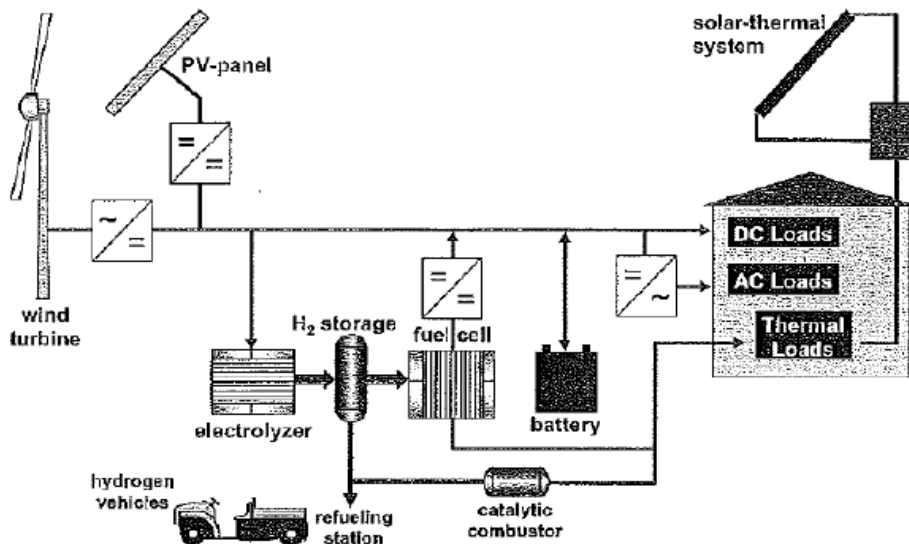
τημάτων δεν διαφέρει και πολύ από εκείνων που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα. Παρόλα αυτά, σε αυτές τις εφαρμογές υπάρχουν κάποια κρίσιμα ζητήματα όπως είναι:

- Η επιλογή του καυσίμου.
- Οι κλιματολογικές συνθήκες.
- Η απομάκρυνση της εκλυόμενης θερμότητας.
- Οι απαιτήσεις σε βάρος και όγκο δεν είναι τόσο κρίσιμες όπως στις φορητές εφαρμογές.
- Τα επιτρεπτά επίπεδα θορύβου είναι χαμηλότερα για αυτές τις εφαρμογές, ειδικά στην περίπτωση που είναι εγκατεστημένες σε εσωτερικούς χώρους.
- Οι χρόνοι εκκίνησης στα ηλεκτρικά οχήματα που διαθέτουν κυψέλες καυσίμου είναι τις τάξεις των μερικών δευτερολέπτων, ενώ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός για την εκκίνηση παρά μόνο αν χρησιμοποιούνται ως εφεδρικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι κύριες εφαρμογές των κυψελών καυσίμου σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι:

- α) Πηγή παροχής ηλεκτρικής ενέργειας αντικαθιστώντας το δίκτυο σε απομακρυσμένες περιοχές.
- β) Πηγή διασυνδεδεμένη παράλληλα με το δίκτυο, λειτουργώντας είτε ως σταθμός βάσης είτε καλύπτοντας τις αιχμές ζήτησης.

- γ) Συνδυασμός με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια σε περιόδους που οι άλλες πηγές δεν καλύπτουν τη ζήτηση.
- δ) Εφεδρικά συστήματα τροφοδοσίας όταν το δίκτυο αδυνατεί να παρέχει ενέργεια λόγω βλάβης.



Σχήμα 3.7: Τυπική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

3.9 Μικρο-ισχύς

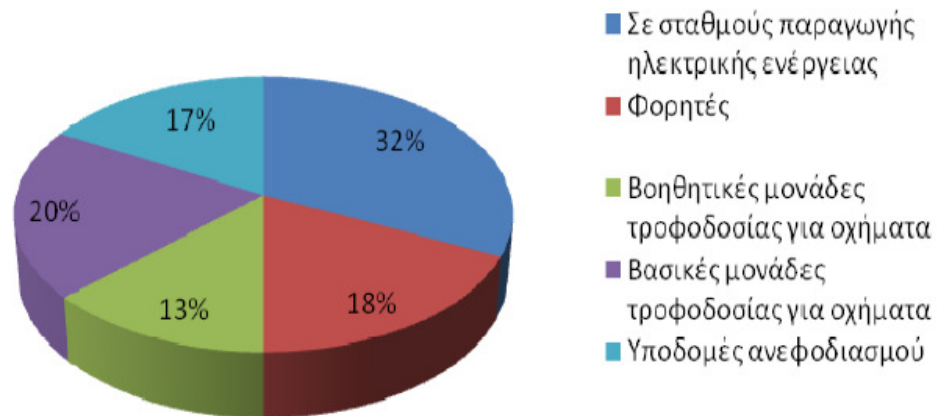
Οι κυψέλες καυσίμου θα αλλάξουν τον κόσμο των τηλεπικοινωνιών, τροφοδοτώντας κινητά τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές και πλοηγούς χειρός για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα απ' ό,τι οι μπαταρίες. Εταιρείες έχουν ήδη παρουσιάσει κυψέλες καυσίμου που μπορούν να τροφοδοτούν με ενέργεια κινητά τηλέφωνα για 30 μέρες χωρίς επαναφόρτιση και φορητούς υπολογιστές για 20 ώρες. Άλλες εφαρμογές για κυψέλες καυσίμου περιλαμβάνουν βομβητές, εγγραφείς βίντεο, φορητά μηχανοκίνητα εργαλεία και κινητές συσκευές χαμηλής ισχύος, όπως ακουστικά αυτιού, ανιχνευτές καπνού, συναγερμούς, κλειδαριές ξενοδοχείων και συσκευές μέτρησης κατανάλωσης. Αυτές οι μικρού μεγέθους κυψέλες καυσίμου συνήθως λειτουργούν με μεθανόλη, φθηνή ξυλαλκοόλη που χρησιμοποιείται και σαν υγρό υαλοκαθαριστήρα.



Σχήμα 3.8: Χρησιμοποίηση κυψελών καυσίμου για τροφοδοσία φορητών υπολογιστών και κινητών τηλεφώνων.

3.10 Οικιακά συστήματα

Η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου επιτρέπει το σχεδιασμό και την κατασκευή τους για μονάδες ισχύος διαφόρων μεγεθών. Για οικιακές εφαρμογές, η βιομηχανία βρίσκεται στο στάδιο της ανάπτυξης μικρών σταθερών μονάδων ονομαστικής ισχύος μικρότερης των 10 kW, με χρήση κυψελών καυσίμου τεχνολογίας στερεών οξειδίων (SOFC) ή πολυμερούς μεμβράνης. Η πλειοψηφία των μονάδων είναι της τάξης του 1 kW, και χρησιμοποιούνται για να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια για οικιακές συσκευές και παραγωγή ζεστού νερού. Μεγαλύτερες μονάδες, της τάξης των 5 kW, χρησιμοποιούνται για να παρέχουν συνεχή ισχύ σε νοικοκυριά με μικρές περιόδους αιχμής της ζήτησης που καλύπτονται από το δίκτυο. Οι περισσότερες από αυτές τις μονάδες αναπτύσσονται ώστε να λειτουργούν με φυσικό αέριο, προπάνιο ή υγραέριο (LPG). Η τρέχουσα τάση είναι να προσαρμοστούν και για χρήση της βιομάζας. Ως παράδειγμα, στις Ηνωμένες Πολιτείες το σύστημα κυψελών καυσίμου GenCore προσφέρεται για συστήματα ισχύος συνεχούς παραγωγής εκτός δικτύου από την Plug Power, ενώ είναι διαθέσιμα για οικιακή χρήση και ως πηγή εφεδρικής ισχύος. Τα GenCore παραδίδουν μέχρι 5 kW ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα ευρύ φάσμα λειτουργίας.



Σχήμα 3.9: Κατανομή της παγκόσμιας παραγωγής συστημάτων κυψελών καυσίμου ανά εφαρμογή.



Σχήμα 3.10: Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με κυψέλες καυσίμου.

3.11 Άλλες εφαρμογές

3.11.1 Διάστημα

Η σημασία και η απόδοση των κυψελών καυσίμου στο χώρο των διαστημικών πτήσεων έχουν συμβάλει σημαντικά

στην περαιτέρω ανάπτυξή τους. Η αποστολή του διαστημοπλίου Απόλλων έκανε χρήση κυψελών καυσίμου αλκαλικής τεχνολογίας. Πιο πρόσφατα, τα διαστημικά λεωφορεία χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου από πολυμερές υλικό για την κάλυψη των αναγκών μεγάλου μέρους της απαιτούμενης ενέργειας του εξοπλισμού τους. Η NASA αναπτύσσει κυψέλες καυσίμου που θα αντέχουν τα σκληρά περιβάλλοντα διαστημικών μεταφορών. Τα συστήματα κυψελών καυσίμου που βρίσκονται αυτή τη στιγμή στο στάδιο της έρευνας μπορούν να παρέχουν ισχύ με ενεργειακή πυκνότητα μεγαλύτερης των 500 Wh/kg και θα επιτρέψουν μεγαλύτερες διαστημικές αποστολές.



Σχήμα 3.11: Πειραματική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με κυψέλες καυσίμου σε εκπαιδευτικό ίδρυμα.

3.11.2 Στρατιωτικές εφαρμογές

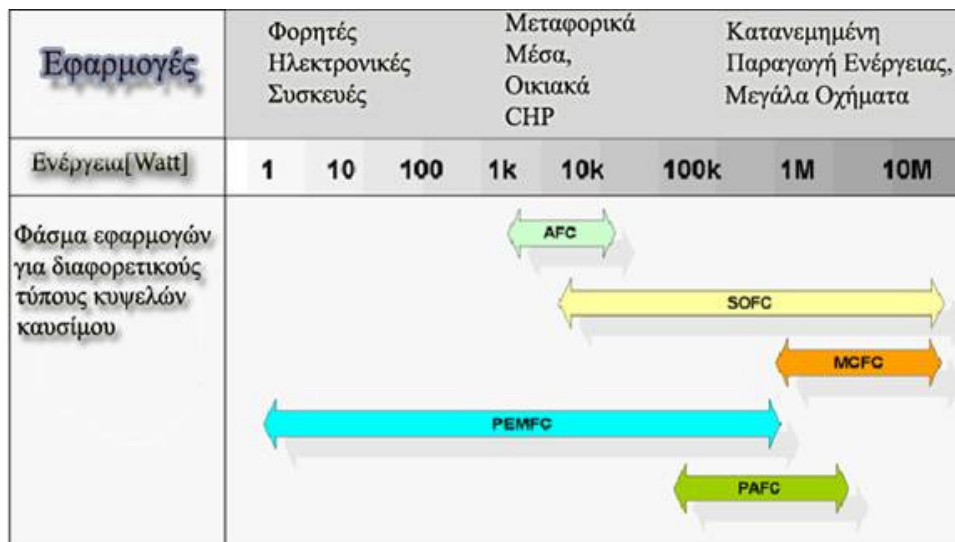
Η τεχνολογία κυψελών καυσίμου μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του εξοπλισμού, ειδικά σε εξειδικευμένες λειτουργίες όπως λειτουργία stealth (μη-εντοπισμού από τα ραντάρ) ή εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη εκκίνηση. Για παράδειγμα, ένα σύστημα με χαμηλή εκπομπή θερμότητας και θορύβου καθιστά τον εντοπισμό του από τον εχθρό πιο δύσκολη. Επίσης, το νερό που προκύπτει ως παραπροϊόν της λειτουργίας των κυψελών καυσίμου μπορεί να είναι χρήσιμο για πολλούς σκοπούς.

Επίσης κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή ενέργειας σε στρατιωτικό εξοπλισμό, όπως συστήματα εντοπισμού της θέσης, ανιχνευτές ακτίνας λέιζερ, ψηφιακά συστήματα επικοινωνίας, αισθητήρες συλλογής πληροφοριών, και προσδιορισμού στόχων.

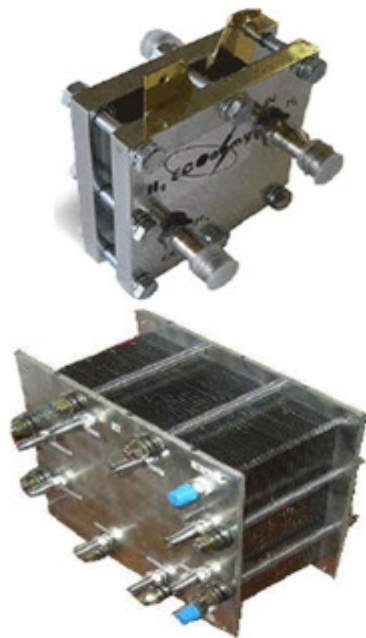
Επίσης υβριδικά συστήματα κυψελών καυσίμου και ΜΕΚ μπορούν να έχουν ως αποτέλεσμα οχήματα με καλύτερα χαρακτηριστικά (αυτονομίας, επιτάχυνσης, έλξης) σε σύγκριση με συμβατικά οχήματα. Το πιο ελπιδοφόρο πεδίο στο ναυτικές εφαρμογές είναι τα υποβρύχια που κινούνται με κυψέλες καυσίμου. Εφαρμογή των κυψελών καυσίμου στην πρόωση προσφέρει υψηλή απόδοση, χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας, και ταυτόχρονα μηδενική στάθμη θορύβου, καθιστώντας πολύ δύσκολη την ανίχνευση του υποβρύχιου μέσω ανίχνευσης θορύβου ή υπέρυθρους αισθητήρες.

3.11.3 Ιατρική

Αν και βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο υπάρχει δυνατότητα λειτουργίας τεχνητής καρδιάς αλλά και άλλων τεχνητών οργάνων με ενέργεια από ΚΚ.



Σχήμα 3.12: Φάσμα εφαρμογών ανά τύπο κυψέλης καυσίμου.



Σχήμα 3.13: Κυψέλη και συστοιχία κυψελών καυσίμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ – ΑΣΦΑΛΕΙΑ – – ΔΙΑΝΟΜΗ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1 Αποθήκευση παραγόμενης ενέργειας

Οι τεχνολογίες παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς του υδρογόνου χρησιμοποιούνται ευρέως στην χημική και πετρελαιοχημική βιομηχανία. Όμως αυτές οι τεχνολογίες θεωρούνται ακριβές για περαιτέρω χρήση σε ενεργειακές εφαρμογές. Από αυτές ιδιαίτερα σημαντική είναι η αποθήκευση του υδρογόνου, η οποία για να γίνει αποδοτική για την χρήση του ως ενεργειακό φορέα και εμπορικά βιώσιμη θεωρείται ως μια από τις πιο κρίσιμες προκλήσεις από τεχνολογική άποψη.

Το H_2 περιέχει περισσότερη ενέργεια κατά βάρος από κάθε άλλη ουσία. Δυστυχώς όμως, επειδή είναι το πιο ελαφρύ χημικό στοιχείο του περιοδικού πίνακα, έχει επίσης και πολύ χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα όγκου. Είναι αναμενόμενο ότι η οικονομία του υδρογόνου απαιτεί δύο τύπους συσ-

τημάτων αποθήκευσης υδρογόνου, έναν για στατικές εφαρμογές και έναν για κινητές εφαρμογές (οχήματα). Κάθε σύστημα έχει τις δικούς του περιορισμούς και απαιτήσεις. Ωστόσο, είναι αποδεδειγμένο ότι οι κινητές εφαρμογές είναι πολύ πιο απαιτητικές αντιμετωπίζοντας για παράδειγμα τις παρακάτω ανάγκες:

- Χαμηλές πιέσεις λειτουργίας για λόγους ασφαλείας.
- Θερμοκρασία λειτουργίας από -50 °C ως 150 °C.
- Υψηλούς ρυθμούς φόρτισης και από-φόρτισης του υδρογόνου για εφοδιασμό των οχημάτων σε σύντομους χρόνους.
- Χαμηλό κόστος του συστήματος αποθήκευσης.

Οι προαναφερθείσες απαιτήσεις επιβάλλουν την αντιμετώπιση αρκετών επιστημονικών και τεχνολογικών προκλήσεων για την ανάπτυξη αποτελεσματικών συστημάτων αποθήκευσης σε κινητές εφαρμογές. Δυστυχώς, μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν συστήματα αποθήκευσης υδρογόνου που να ανταποκρίνονται σε όλα τα παραπάνω κριτήρια.

Οι στατικές εφαρμογές, από την άλλη, δεν έχουν περιορισμούς βάρους και χώρου, μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες και έχουν την επιπλέον ικανότητα να αντισταθμίζουν τους χαμηλούς ρυθμούς αντίδρασης. Οι σύγχρονες εμπορικά εφαρμόσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης H₂ έχουν επικεντρωθεί σε δοχεία υψηλής πίεσης (250 - 700 bar) ή σε υγρό υδρογόνο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (20 - 30 °K). Αποθήκευση του υδρογόνου σε υπόγειους ταμειυτήρες υδρο-

γονανθράκων αποτελεί μια πιθανή εναλλακτική λύση, αποδοτική σε κόστος, αλλά μόνο για στατικές εφαρμογές.

Η χρήση προηγμένων υλικών για την αποθήκευση του υδρογόνου που περιλαμβάνουν, μεταλλικά και χημικά υδρίδια κ.τ.λ., μπορεί να αποτελέσει μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση, ωστόσο, η ανάγκη για μεγάλες ποσότητες των υλικών αυτών σε συνδυασμό με το κόστος καθώς και ζητήματα σταθερότητας περιορίζουν προς το παρόν την παραπάνω μέθοδο σε εφαρμογές μικρής κλίμακας.

4.1.1 Συμπιεσμένο αέριο

Η απλούστερη μέθοδος αποθήκευσης του υδρογόνου είναι αυτή όπου τα υδρογόνα αποθηκεύεται ως συμπιεσμένο αέριο. Ο βασικός εξοπλισμός που απαιτείται για να γίνει αυτό είναι ένας συμπιεστής-κομπρεσέρ υδρογόνου και τα αντίστοιχο πιεστικό δοχείο, ή δεξαμενή αποθήκευσης. Το αέριο υδρογόνο μπορεί να αποθηκεύεται είτε σε φιάλες είτε σε δεξαμενές υψηλής πίεσης. Με δεδομένο ότι το υδρογόνο έχει χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα όγκου, πρέπει να συμπιεστεί σε πολύ υψηλές πιέσεις ώστε να αποθηκευτεί επαρκής ποσότητα υδρογόνου σε περιορισμένο όγκο, πρόβλημα το οποίο συναντάται ιδιαίτερα σε κινητές εφαρμογές. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της αποθήκευσης συμπιεσμένου υδρογόνου (Compressed Gas Hydrogen, CGH₂) είναι ότι αποτελεί μία σχετικά απλή και ταχεία διαδικασία, αφού ο εφοδιασμός της δεξαμενής ενός οχή-

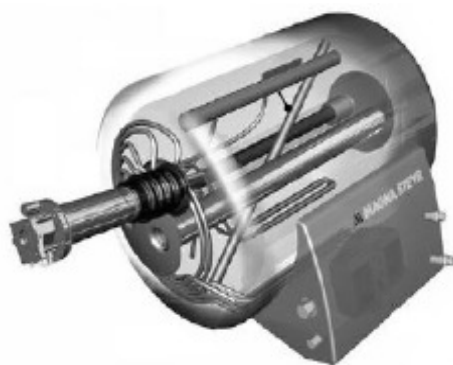
ματος μπορεί να ολοκληρωθεί μέσα σε 3 λεπτά και έχουμε μεγάλη αποθηκευτική δυνατότητα με σχετικά μικρό κόστος. Εξαιτίας αυτών των πλεονεκτημάτων, η μέθοδος αυτή έχει υιοθετηθεί σε πολλά πρωτότυπα οχήματα με κυψέλες καυσίμου. Τα κύρια μειονεκτήματα σχετίζονται με τις σχετικά χαμηλές πυκνότητες που επιτυγχάνονται, συγκρινόμενες με διαφορετικές μεθόδους αποθήκευσης. Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα για τη διαδεδομένη χρήση της μεθόδου είναι η φοβία του κοινού για τα θέματα ασφαλείας που σχετίζεται με τις εξαιρετικά υψηλές πιέσεις των δοχείων υδρογόνου κατά τη λειτουργία ενός κοινού επιβατικού αυτοκινήτου. Η φοβία αυτή δεν θα πρέπει να υπάρχει καθώς τα αυτοκίνητα που θα βγουν στην παραγωγή έχουν κατασκευαστεί έτσι ώστε να πληρούν όλες τις προϋποθέσεις ασφαλείας για το κοινό.



Σχήμα 4.1: Φιάλες αποθήκευσης συμπιεσμένου αερίου.

4.1.2 Υγροποιημένο υδρογόνο

Το αέριο υδρογόνο κάτω από κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης μπορεί να μετατραπεί σε υγρό όπως όλα τα αέρια. Είναι χαρακτηριστικό ότι το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί ακόμα και σε ατμοσφαιρική πίεση σε μορφή υγρού. Η υγροποίηση του αερίου υδρογόνου προϋποθέτει την ψύξη του αερίου υδρογόνου σε θερμοκρασία γύρω στους $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η όλη διαδικασία απαιτεί μια διάταξη από ψυκτικές, συμπιεστές, μηχανές εκτόνωσης και στραγγαλιστικές βαλβίδες, η οποία πετυχαίνει την ψύξη του αερίου υδρογόνου σε τόσο χαμηλή θερμοκρασία. Όμως για όλες τις παραπάνω διαδικασίες απαιτούνται μεγάλα ποσά ενέργειας, εξειδικευμένη τεχνολογία που μεταφράζεται σε κόστος και συνεχή εξάτμιση υδρογόνου για την οποία γίνονται συνεχώς μελέτες για την εξάλειψη της. Τέλος, ένα από τα θετικά της μεθόδου αυτής είναι η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου.



Σχήμα 4.2: Φιάλη αποθήκευσης υγροποιημένου υδρογόνου.

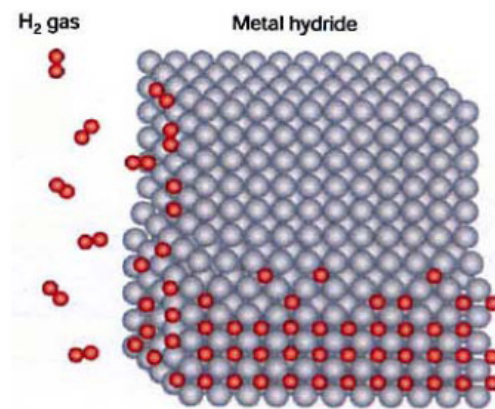
4.1.3 Μεταλλικά υβρίδια

Τα υδρίδια μετάλλων είναι συγκεκριμένοι συνδυασμοί μεταλλικών κραμάτων (μαγνησίου, νικελίου, τιτανίου και σιδήρου) τα οποία δρουν σαν σε ένα σφουγγάρι που απορροφά νερό. Τα υδρίδια μετάλλων έχουν την μοναδική ικανότητα να απορροφούν υδρογόνο και να το απελευθερώνουν αργότερα, είτε σε θερμοκρασία δωματίου είτε μέσω θέρμανσης του δοχείου. Η συνολική ποσότητα του υδρογόνου που απορροφάται είναι γενικά 1% - 2% του συνολικού βάρους του δοχείου. Μερικά μεταλλικά υδρίδια (τελευταίας γενιάς) είναι σε θέση να αποθηκεύουν 7% - 10% του δικού τους βάρους αλλά μόνο όταν θερμαίνονται σε υψηλές θερμοκρασίες.

Το ποσοστό του αερίου που απορροφάται στον βαθμό του μετάλλου είναι ακόμη σχετικά χαμηλό αλλά τα υδρίδια προσφέρουν μια αξιόπιστη λύση για την αποθήκευση υδρογόνου. Τα υδρίδια μετάλλων προσφέρουν τα πλεονεκτήματα της ασφαλούς μεταφοράς υδρογόνου κάτω από μεγάλη πίεση.

Η διάρκεια ζωής του δοχείου αποθήκευσης μεταλλικών υδριδίων είναι άμεσα συνδεδεμένο με την καθαρότητα του υδρογόνου όταν αποθηκεύεται. Τα κράματα δρουν σαν σφουγγάρι, τα οποία απορροφούν υδρογόνο, αλλά επίσης απορροφούν κάθε ρύπους που εισάγεται στο δοχείο μέσω του υδρογόνου. Το αποτέλεσμα είναι το υδρογόνο απελευθερώνεται από το δοχείο είναι εξαιρετικά καθαρό, αλλά η διάρκεια ζωής του δοχείου

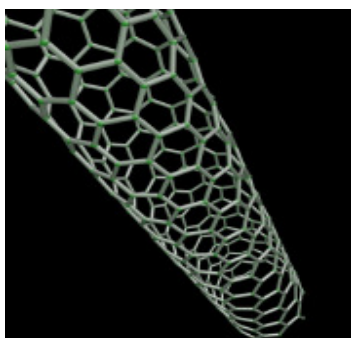
και η ικανότητα να αποθηκεύει υδρογόνο μειώνεται καθώς οι ρύποι μένουν και γεμίζουν τα κενά στο μέταλλο τα οποία κατείχε το υδρογόνο.



Σχήμα 4.3: Μεταλλικό Υβρίδιο.

4.1.4 Πορώδη υλικά

Τα τελευταία χρόνια μια νέα κατηγορία πορωδών υλικών, οι νανοσωλήνες του άνθρακα, προτάθηκαν για να χρησιμοποιηθούν ως νάνο-δεξαμενές για την αποθήκευση υδρογόνου με πολύ χαμηλό κόστος. Πολύ σύντομα όμως έγινε αντιληπτό ότι η απορρόφηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος δεν ήταν τόσο μεγάλη ώστε να δικαιολογήσει την χρήση τους για αυτό το σκοπό. Έτσι η προσπάθεια μετατέθηκε στο να βρεθεί τρόπος να αυξηθεί η απορροφητική τους ικανότητα. Το επόμενο βήμα είναι η παρασκευή νανοσωλήνων - νανοπαπύρων άνθρακα που θεωρητικά θα παρουσιάζουν μεγαλύτερη απορροφητικότητα υδρογόνου, καθώς και η πειραματική μέτρηση της προσρόφησης αυτής. Τέλος αν επαληθευτούν οι θεωρητικές προβλέψεις τα νέα υλικά αυτά θα δοκιμαστούν κάτω από πραγματικές συνθήκες ως μπαταρίες υδρογόνου σε αυτοκίνητα.



Σχήμα 4.4: Νανοσωλήνας.

4.2 Ασφάλεια

Όπως κάθε άλλο καύσιμο, ή φορέας ενέργειας, το υδρογόνο ενέχει κινδύνους, αν δεν χρησιμοποιείται σωστά ή δεν ελέγχεται. Ο κίνδυνος του υδρογόνου, ως εκ τούτου, πρέπει να εξεταστεί σε σχέση με τα κοινά καύσιμα όπως η βενζίνη, το προπάνιο ή το φυσικό αέριο. Τα ειδικά φυσικά χαρακτηριστικά του υδρογόνου και οι ιδιότητες που του προσδίδουν είναι αρκετά διαφορετικές από τα κοινά καύσιμα. Ορισμένες από αυτές τις ιδιότητες καθιστούν το υδρογόνο δυνητικά λιγότερο επικίνδυνο, ενώ άλλα χαρακτηριστικά του υδρογόνου θα μπορούσαν να το καταστήσουν πιο επικίνδυνο σε ορισμένες περιπτώσεις. Το υδρογόνο έχει μια σειρά ιδιοτήτων σε ότι έχει να κάνει με την ασφάλεια χρήσης του. Αρχικά, πλεονεκτήματα μπορούν να αποτελέσουν τα εξής:

- Είναι πολύ ελαφρύτερο από τον αέρα και διαχέεται με μεγάλη ταχύτητα. Αυτό σημαίνει πως όταν απελευθερώνεται σε ανοιχτό περιβάλλον διασκορπίζεται γρήγορα σε μη αναφλεγόμενες συγκεντρώσεις.
- Το υδρογόνο είναι μη τοξικό και μη δηλητηριώδες. Δεν μολύνει υπόγεια νερά και υπό φυσιολογικές ατμοσφαιρικές συνθήκες έχει πολύ χαμηλή διαλυτότητα στο νερό. Η διαρροή υδρογόνου δεν είναι γνωστή για τη συνεισφορά της στη μόλυνση της ατμόσφαιρας ή του νερού.

Αντίθετα, η χρήση του υδρογόνου παρουσιάζει τα παρακάτω μειονεκτήματα:

- Είναι άοσμο, άχρωμο και άγευστο και επομένως μη ανιχνεύσιμο από τις ανθρώπινες αισθήσεις. Συγκριτικά, το φυσικό αέριο είναι επίσης άοσμο, άχρωμο και άγευστο αλλά κατά τη βιομηχανική του χρήση προστίθεται σε αυτό ένα θειούχο αρωματικό ώστε να γίνεται αντιληπτό από τον άνθρωπο. Αρωματικά δεν προστίθενται στο υδρογόνο καθώς δεν υπάρχει κάποια γνωστή ουσία που να είναι αρκετά ελαφριά ώστε να μετακινηθεί μαζί του ή να διασκορπιστεί με τον ίδιο ρυθμό στον αέρα. Επίσης, τα αρωματικά μολύνουν τις κυψέλες καυσίμου. Η βιομηχανία λαμβάνει υπ' όψιν της αυτές τις ιδιότητες όταν σχεδιάζει διατάξεις όπου χρησιμοποιείται ή αποθηκεύεται υδρογόνο και ενσωματώνει επιπλέον συστήματα ασφαλείας που περιλαμβάνουν ανιχνευτές διαρροής και συστήματα εξαερισμού.
- Το υδρογόνο εκρήγνυται εκπέμποντας μια απαλή, μπλε, σχεδόν άορατη φλόγα η οποία έχει χαμηλή ακτινοβολία θερμότητας σε σχέση με φλόγες υδρογονανθράκων. Ανιχνευτές εντεταγμένοι σε συστήματα υδρογόνου μπορούν γρήγορα να εντοπίσουν κάθε διαρροή, εξαλείφοντας τον κίνδυνο ενδεχόμενης φωτιάς. Καθώς οι φλόγες υδρογόνου εκπέμπουν σχετικά χαμηλά επίπεδα θερμότητας, ο κίνδυνος δευτερευουσών πυρκαγιών από ανάφλεξη άλλων εύφλεκτων υλικών σε κοντινή απόσταση είναι χαμηλότερος.
- Υπό ιδανικές συνθήκες ανάφλεξης, η απαραίτητη ενέργεια για την πρόκληση καύσης υδρογόνου είναι σημαντικά χαμη-

λότερη απ' ότι άλλων συνήθων καυσίμων, συμπεριλαμβανομένου του φυσικού αερίου και της βενζίνης. Σε χαμηλές συγκεντρώσεις καυσίμου υδρογόνου στον αέρα, η απαραίτητη ενέργεια για την εκκίνηση καύσης είναι παρόμοια με αυτήν άλλων καυσίμων.

4.3 Διανομή παραγόμενης ενέργειας

Το υδρογόνο μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες ποσότητες μέσω υπόγειων αγωγών (αέριο υδρογόνο) ή με δεξαμενόπλοια (υγρό υδρογόνο). Επί του παρόντος, η μεταφορά υδρογόνου μέσω αγωγών χρησιμοποιείται είτε σε σύνδεση μεταξύ της παραγωγής και των γύρω χώρων χρήσης (μέχρι 10 χλμ.) ή σε πιο εκτεταμένα δίκτυα (περίπου 200 χλμ.).

Για την κατασκευή των αγωγών υδρογόνου, είναι αναγκαία η χρήση του χάλυβα που είναι ανθεκτικός ως προς την ευθραυστότητα (φαινόμενο Hydrogen Embrittlement, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως) κατά την χρήση υδρογόνου υπό πίεση, ιδίως για το πολύ καθαρό υδρογόνο (περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 99,5%). Εμβολοφόροι συμπιεστές αερίου που χρησιμοποιούνται για το φυσικό αέριο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το υδρογόνο χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις του σχεδιασμού.

Ωστόσο, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην σφράγιση (για την αποφυγή διαρροών του υδρογόνου) και την επιλογή των βασικών υλικών για τα μέρη που υπόκεινται σε μηχανική

κόπωση. Η χρήση των φυγοκεντρικών συμπιεστών για το υδρογόνου δημιουργεί περισσότερα προβλήματα που οφείλονται στην εξαιρετική ελαφρότητα του υδρογόνου.

Κατά κανόνα, η μετάδοση του υδρογόνου μέσω αγωγών απαιτεί μεγαλύτερη διάμετρο σωληνώσεων και μεγαλύτερη δύναμη συμπίεσης από τους αντίστοιχους του φυσικού αερίου για την ίδια απόδοση ενέργειας. Ωστόσο, λόγω των χαμηλότερων απωλειών πίεσης στην περίπτωση του υδρογόνου, οι σταθμοί συμπίεσης μπορούν να είναι τοποθετημένοι δύο φορές μακρύτερα μεταξύ τους. Σε οικονομικό επίπεδο, σε περισσότερες από τις μελέτες διαπιστώθηκε ότι το κόστος της μεταφοράς του υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα είναι μεγαλύτερο περίπου 1,5 -1,8 φορές του κόστους της μεταφοράς φυσικού αερίου.



Σχήμα 4.5: Διανομή υδρογόνου μέσω αγωγών.

Προς αντιμετώπιση της ζήτησης της κατανάλωσης, το υδρογόνο μπορεί να μεταφέρεται και να διανέμεται σε περιφερειακό επίπεδο, είτε ως αέριο είτε ως υγρό, με αγωγούς ή σε ειδικές περιπτώσεις, σε δοχεία με οδικές και σιδηροδρομικές μεταφο-

ρές. Αέριο (και υγρό) υδρογόνο κατά την μεταφορά υπόκειται σε αυστηρές ρυθμίσεις που να διασφαλίζουν τη δημόσια ασφάλεια, η οποίες σε ορισμένες χώρες είναι πολύ περιοριστικές. Μεταφορά αερίου ή υγρού υδρογόνου σε ασυνεχή (βυτιοφόρα ή φιάλες) τρόπο πραγματοποιείται και σήμερα από την περιστασιακή χρήση ή για χρήστες με απαιτήσεις για σχετικά μικρές ποσότητες. Το κόστος της ασυνεχούς μεταφοράς είναι πολύ υψηλό (αυτό μπορεί να φθάνει μέχρι και 2-5 φορές το κόστος παραγωγής).



Σχήμα 4.6: Μεταφορά υδρογόνου με βυτιοφόρα και δεξαμενόπλοια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΤΡΟΠΟΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ – – ΕΜΠΟΔΙΑ & ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

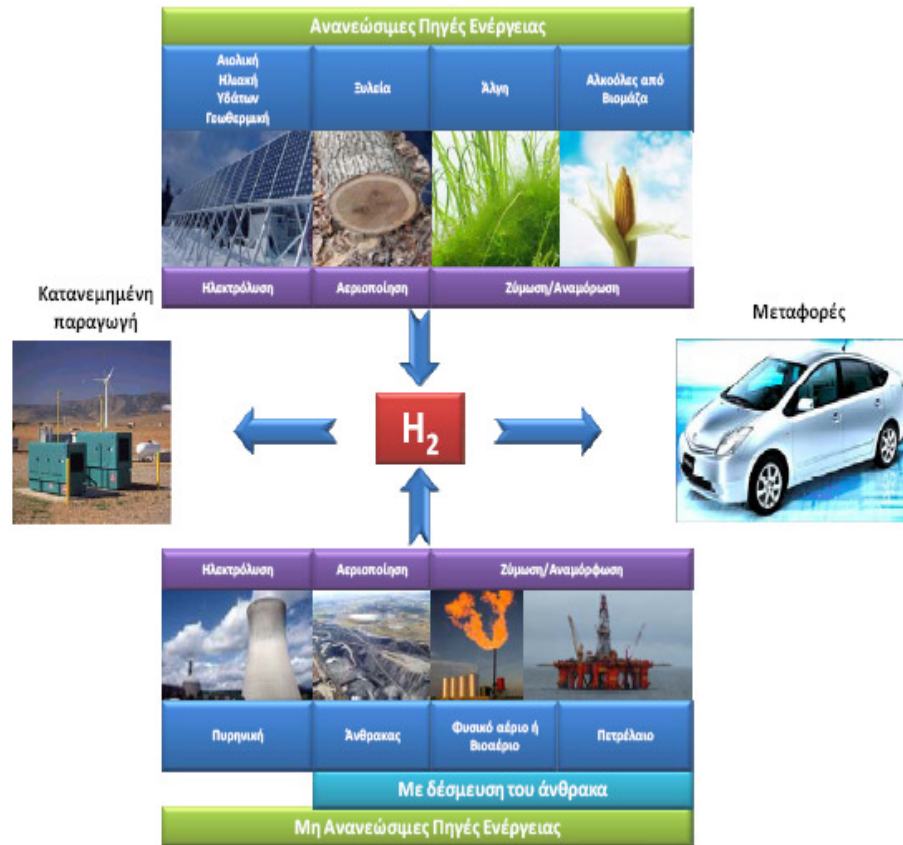
5.1 Τρόποι παρασκευής υδρογόνου

Το υδρογόνο (H_2) υπάρχει σχεδόν παντού, αλλά υπό μορφή χημικών ενώσεων με άλλα στοιχεία και όχι ελεύθερο. Σε μεγάλο ποσοστό βρίσκεται στο νερό (ένωση με το οξυγόνο) και στους υδρογονάνθρακες (ενώσεις με τον άνθρακα). Το υδρογόνο που υφίσταται δεσμευμένο στο νερό και σε οργανικές ενώσεις αποτελεί περισσότερο από το 70% της γήινης επιφάνειας.

Αυτό το άχρωμο, άοσμο, και άγευστο χημικό στοιχείο αποτελεί μία χρήσιμη "πρώτη ύλη" για ποικίλες βιομηχανικές δραστηριότητες και ένα σημαντικότερο καύσιμο που επαρκεί να τροφοδοτήσει το σύνολο των δραστηριοτήτων της κοινωνίας, από τις ανάγκες για ηλεκτρικό στα σπίτια, στις επιχειρήσεις, στη βιομηχανία ακόμα και ως καύσιμο στις μεταφορές. Το υδρογόνο αποτελεί έναν υψηλής ποιότητας δευτερεύων ενεργειακό φορέα και δεν πρέπει να θεωρείται ως πρωτογενής πηγή ενέργειας.

Επομένως, πρέπει να παραχθεί από μία άλλη πρώτη ύλη, γεγονός που θέτει προκλήσεις και πολυπλοκότητα, αλλά συγχρόνως προσφέρει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ένα εναλλακτικό υλικό ως ενεργειακό μίγμα που θα μειώσει την εξάρτηση από τις εισαγωγές πετρελαίου, θα μειώσει τις εκπομπές αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και θα αποτελεί ένα βιώσιμο ενεργειακό σύστημα. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από μία ποικιλία ευρέως διαθέσιμων πρώτων υλών συμπεριλαμβανομένων των διάφορων ορυκτών καυσίμων και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με χρήση διαφορετικών τεχνολογιών ανά περίπτωση:

- Ορυκτά καύσιμα (αναμόρφωση του φυσικού αερίου, αεριοποίηση άνθρακα).
- Ανανεώσιμη και πυρηνική ενέργεια (διεργασίες αξιοποίησης της βιομάζας, φωτόλυση, βιολογική παραγωγή, διάσπαση του νερού σε υψηλή θερμοκρασία).
- Ηλεκτρική ενέργεια (ηλεκτρόλυση του νερού).

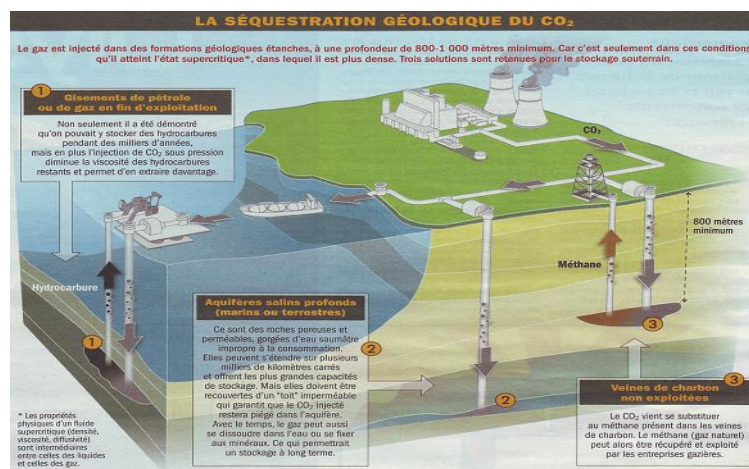


Σχήμα 5.1: Πρώτες ύλες και εναλλακτικές διεργασίες για παραγωγή υδρογόνου.

5.1.1 Υδρογόνο από ορυκτά καύσιμα

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από τα περισσότερα ορυκτά καύσιμα (π.χ. φυσικό αέριο, πετρέλαιο, κ.τ.λ.). Η πολυπλοκότητα των διεργασιών ποικίλλει και η βιωσιμότητα της κάθε διεργασίας θα διαφέρει ανάλογα με το μέγεθος της κλίμακας, δηλαδή σε κεντρικές ή καταναεμημένες εγκαταστάσεις πα-

ραγωγής υδρογόνου. Δεδομένου ότι το διοξείδιο του άνθρακα παράγεται ως παραπροϊόν, το CO₂ πρέπει να συλλέγεται και να αποθηκεύεται προκειμένου να εξασφαλιστεί μια βιώσιμη (με μηδενικές εκπομπές) διεργασία.



Σχήμα 5.2: Παραγωγή υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα.

5.1.1.1 Παραγωγή από φυσικό αέριο/υδρογονάνθρακες

Έναντι των υπολοίπων ορυκτών καυσίμων, το φυσικό αέριο αποτελεί μία ιδανική, από οικονομική άποψη πρώτη ύλη για την παραγωγή υδρογόνου, επειδή είναι ευρέως διαθέσιμο, είναι εύκολο να διαχειριστεί και έχει υψηλή αναλογία υδρογόνου/άνθρακα, η οποία ελαχιστοποιεί το σχηματισμό CO₂ ως παραπροϊόν. Το υδρογόνο σήμερα μπορεί να παραχθεί από το φυσικό αέριο χρησιμοποιώντας τις παρακάτω διεργασίες:

1. Αναμόρφωση με ατμό (Steam Methane Reforming, SMR).
2. Οξειδωση μεθανίου με παρουσία καταλύτη (Partial Oxidation, POX).
3. Αναμόρφωση με θέρμανση (Auto Thermal Reforming, ATR).
4. Πυρόλυση υδρογονανθράκων.

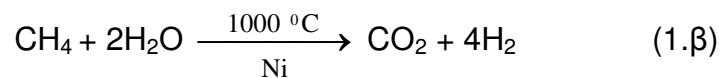
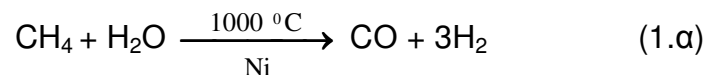
Στην συνέχεια περιγράφονται πιο αναλυτικά οι παραπάνω κατηγορίες.

5.1.1.1 Αναμόρφωση με ατμό (Οξειδωση με υδρατμό)

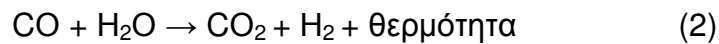
Η αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιημένη και λιγότερο δαπανηρή μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου. Είναι μία από τις κυριότερες διεργασίες που χρησιμοποιούνται στις πετροχημικές και χημικές βιομηχανίες για παραγωγή H_2 σε μεγάλη κλίμακα. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι το μεθάνιο αποτελεί το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου.

Διάφορες εταιρείες αναπτύσσουν μικρής κλίμακας συσκευές αναμόρφωσης του μεθανίου (παρόλο που το μεθάνιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και αυτό ως καύσιμο με καλύτερα αποτελέσματα) με ατμούς σε αποκεντρωμένους σταθμούς καυσίμων, οι οποίοι μπορούν να αποδειχθούν η πλέον βιώσιμη, βραχυπρόθεσμα, επιλογή παραγωγής υδρογόνου. Η μέθοδος SMR περιλαμβάνει αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό προς παρα-

γωγής αερίου σύνθεσης (το οποίο είναι μίγμα υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα) μέσω της επόμενης χημικής αντίδρασης. Η παρακάτω αντιδράσεις είναι ενδόθερμες ενώ χρειάζεται υψηλή θερμοκρασία καθώς επίσης και την ύπαρξη καταλύτη.



Η θερμότητα παρέχεται συχνά από την καύση ενός ποσοστού της τροφοδοσίας. Η διεργασία πραγματοποιείται σε υψηλή θερμοκρασία 1000 °C και σε πιέσεις από 3 έως 25 bar. Το προϊόν της αντίδρασης (αέριο σύνθεσης) περιέχει περίπου 25% κ.ο CO, που μπορεί να μετατραπεί περαιτέρω σε CO₂ και περίσσεια H₂ μέσω της επόμενης χημικής αντίδρασης με χρήση περίσσειας ατμού.



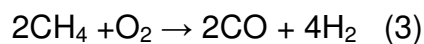
Η αναμόρφωση με ατμό των περισσότερων υδρογονανθράκων και φυσικά του μεθανίου πραγματοποιείται μόνο με τους κατάλληλους καταλύτες. Οι καταλύτες για την αναμόρφωση με ατμό είναι συνήθως μέταλλα της ομάδας VIII, με το Ni να φαίνεται να είναι το πιο αποτελεσματικό. Ανάλογα με την εκλογή του καταλύτη και το ποσοστό κορεσμού των χρησιμοποιούμενων υδρογονανθράκων, η διάσπαση του υδρογονάνθρακα μπορεί να ευνοηθεί κατά τη διάρκεια της αντίδρασης με τον ατμό.

Προκειμένου να ληφθεί καθαρό υδρογόνο, το αέριο τελικά καθαρίζεται σε μια μονάδα απορρόφησης με εναλλαγή πίεσης. Μια νέα τεχνική που ονομάζεται "absorption enhanced reaction process" προσφέρει την δυνατότητα της ταυτόχρονης διεξαγωγής της αντίδρασης και του διαχωρισμού σε ένα στάδιο. Σε αυτή την μέθοδο χρησιμοποιείται ένα σύστημα ηλιακών συλλεκτών για την συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας, έτσι ώστε να παρασχεθεί η απαιτούμενη ποσότητα θερμότητας. Το όφελος αυτής της διεργασίας αφορά στην παραγωγή καθαρού H₂ (90%).

5.1.1.1.2 Οξείδωση μεθανίου με παρουσία καταλύτη

Η διεργασία της οξείδωσης αυτής χρησιμοποιείται στα διυλιστήρια για τη μετατροπή των διαφόρων υδρογονανθράκων που προκύπτουν ως παραπροϊόντα σε υδρογόνο, CO, CO₂ και νερό.

Το μεθάνιο μπορεί να μετατραπεί σε υδρογόνο μέσω της οξείδωσης του παρουσία καταλύτη νικελίου. Κατά την διάρκεια της αντίδρασης αυτής το μεθάνιο αντιδρά με το οξυγόνο (παρουσία καταλύτη) δίνοντας μας μονοξείδιο του άνθρακα υδρογόνο:



Τέλος, το CO που παράγεται μετατρέπεται σε H₂, όπως περιγράφηκε προηγουμένως από την χημική αντίδραση (2).

Επιπλέον, το υδρογόνο μπορεί επίσης να παραχθεί από το πετρέλαιο, τη βενζίνη, και τη μεθανόλη μέσω της αναμόρφωσης τους. Αυτή όμως η διεργασία μερική οξειδωσης απαιτεί επίσης τη χρήση καθαρού οξυγόνου, και όπως με την περίπτωση αεριοποίησης του άνθρακα (που θα δούμε παρακάτω), είναι λιγότερο αποδοτική και εκπέμπει περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα σε σχέση με την αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει τις πετροχημικές βιομηχανίες να εστιάσουν και αυτές το ενδιαφέρον τους στην ανάπτυξη τεχνολογιών απομάκρυνσης και δέσμευσης του άνθρακα. Αυτή η μη-καταλυτική διεργασία λαμβάνει χώρα στους 1300-1500 °C και σε πιέσεις 30-100 bar. Η μερική οξειδωση ακολουθείται από μια διεργασία αποθείωσης, μετατροπής σε CO και τέλος απομάκρυνσης του CO₂. Η μέθοδος της μερικής οξειδωσης των βαρέων υδρογονανθράκων αφορά μόνο στην παραγωγή υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα.

5.1.1.1.3 Αναμόρφωση με θέρμανση

Συνδυάζοντας την αναμόρφωση με ατμό και την οξειδωση μεθανίου με παρουσία καταλύτη (νικέλιο) καταφέρνουμε να εκμεταλλευτούμε το ποσό θερμότητας που παράγεται από την δεύτερη με τέτοιο τρόπο ώστε να τροφοδοτηθεί η πρώτη. Η συγκεκριμένη μέθοδος χαρακτηρίζεται από την υψηλή απόδοση και την γρήγορη εκκίνηση.

5.1.1.1.4 Πυρόλυση υδρογονανθράκων

Πυρόλυση υδρογονανθράκων ονομάζεται η θερμική διάσπαση τους. Δηλαδή με την θέρμανση τους σε υψηλή θερμοκρασία και απουσία οξυγόνου, διασπώνται σε μίγμα κορεσμένων και ακόρεστων υδρογονανθράκων μικρότερου μοριακού βάρους. Μία από τις αντιδράσεις που συμβαίνει κατά την διαδικασία της πυρόλυσης είναι και η αφυδρογόνωση, όπου παράγεται υδρογόνο. Κατά την διαδικασία της πυρόλυσης δεν παράγεται CO₂. Μία ακραία περίπτωση αφυδρογόνωσης είναι και η απανθράκωση, η οποία για το μεθάνιο είναι η εξής:



Ο άνθρακας μπορεί είτε να απομονωθεί είτε να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω από διάφορες βιομηχανίες, π.χ. στη μεταλλουργική βιομηχανία είτε στην κατασκευή ελαστικών αυτοκινήτου.

Πίνακας 5.1: Σύγκριση τεχνολογιών παραγωγής υδρογόνου από φυσικό αέριο.

Τεχνολογία	SMR	ATR ή POX
Πλεονεκτήματα	Υψηλή απόδοση	Μικρότερο μέγεθος
	Υψηλό κόστος για μεγάλες μονάδες	Υψηλό κόστος για μικρές μονάδες
		Απλό σύστημα
Μειονεκτήματα	Πολυπλοκότητα συστήματος	Χαμηλότερη απόδοση
	Ευαίσθητη στη ποιότητα του φυσικού αερίου	Καθαρισμός H ₂
		Εκπομπές

Η κατανεμημένη (μη-αποκεντρωμένη) παραγωγή υδρογόνου χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη το φυσικό αέριο θα μπορούσε να είναι η χαμηλότερου κόστους επιλογή κατά τη διάρκεια μετάβασης στην εποχή της οικονομίας υδρογόνου. Η κύρια πρόκληση είναι να αναπτυχθεί μια συσκευή παραγωγής υδρογόνου με αποδεδειγμένη ικανότητα να μπορεί να παρασκευαστεί μαζικά και να λειτουργεί αξιόπιστα και ακίνδυνα με όσο το δυνατό μικρότερη περιοδική συντήρηση.

Αυτές οι μονάδες θα πρέπει αρχικά να διακρίνονται από την υψηλή απόδοση που θα πρέπει να επιτυγχάνουν και να συμπεριλαμβάνουν όλα εκείνα τα απαραίτητα βοηθητικά υποσυστήματα προκειμένου να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις για υψηλής καθαρότητας υδρογόνου που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε κυψέλες καυσίμου. Η τεχνολογία για τη δι-

εργασία της αναμόρφωσης με ατμό είναι διαθέσιμη για αυτήν την εφαρμογή.

5.1.1.2 Αεριοποίηση άνθρακα

Ο άνθρακας (λιγνίτης) μπορεί επίσης να αναμορφωθεί για να παραχθεί υδρογόνο, μέσω ποικίλων διεργασιών αεριοποίησης (π.χ. σταθερής κλίνης (αποτελείται από μια σταθερή κλίνη βιομάζας, μέσα από την οποία περνάει το μέσο αεριοποίησης αέρας, νερό σε αντίθετη φορά ροής, είναι απλή και αξιόπιστη τεχνολογία με καλό βαθμό απόδοσης, αλλά το παραγόμενο αέριο είναι πλούσιο σε πίσσα και μεθάνιο και χρειάζεται φιλτράρισμα), ρευστοστερεάς κλίνης (χρησιμοποιείται για σχετικά μεγάλα μεγέθη παροχής βιομάζας και ισχείς. Το καύσιμο αεριοποιείται με οξυγόνο, ενώ απαιτείται μεγάλη επεξεργασία του καυσίμου διότι οι αντιδράσεις αεριοποίησης λαμβάνουν χώρα μέσα σε ένα σύννεφο σωματιδίων. Οι υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες συνεπάγονται την απουσία πίσσας και μεθανίου στο προϊόν αέριο, αλλά υπάρχει κίνδυνος συσσωσμάτων) κ.α.). Η συγκεκριμένη διεργασία εφαρμόζεται εμπορικά αλλά μπορεί να θεωρηθεί ανταγωνιστικότερη της αναμόρφωσης του μεθανίου μόνο σε περιπτώσεις όπου το φυσικό αέριο είναι ακριβό. Το μέγεθος των παγκόσμιων αποθεμάτων άνθρακα έχει προτρέψει τους επιστήμονες να προτείνουν ότι ο άνθρακας μπορεί να θεωρηθεί ως κύρια πρώτη ύλη για την παραγωγή υδρογόνου, το

οποίο θα μπορούσε να επιτρέψει σε χώρες όπως η Κίνα ή η Ινδία να στραφούν προς την οικονομία υδρογόνου. Εντούτοις, αυτό θα απαιτούσε την δέσμευση του CO₂ που απελευθερώνεται από την αεριοποίηση. Αυτό ίσως διαδραματίσει έναν συμπληρωματικό ρόλο προκειμένου να απαλλαχθεί το ενεργειακό μίγμα από το CO₂ και να βελτιωθεί η απόδοση τόσο στην παροχή όσο και στη ζήτηση. Η αεριοποίηση του άνθρακα είναι μια διεργασία που μετατρέπει το στερεό άνθρακα σε ένα αέριο μίγμα που αποτελείται κυρίως από H₂, CO, CO₂ και CH₄. Η επόμενη χημική αντίδραση δείχνει την μετατροπή του άνθρακα σε υδραέριο (ισομοριακό μίγμα CO και H₂), η οποία επιτυγχάνεται όταν περάσει ρεύμα υδρατμών από διάπυρο άνθρακα:



Ο άνθρακας μπορεί να αεριοποιηθεί με πολλούς τρόπους διαφοροποιώντας το μίγμα άνθρακα, οξυγόνου και ατμού μέσα στον αεριοποιητή. Δεδομένου ότι αυτή η αντίδραση είναι ενδόθερμη, απαιτείται επιπλέον θερμότητα, όπως και με την αναμόρφωση του μεθανίου. Το CO που παράγεται μετατρέπεται περαιτέρω σε CO₂ και H₂ μέσω της χημικής αντίδρασης (2).

Το τελικό προϊόν αποτελείται από σχετικά καθαρό CO₂, έτοιμο να συμπιεστεί και να αποθηκευθεί (CCS – Παράγραφος 1.3). Η παραγωγή υδρογόνου από τον άνθρακα είναι εμπορικά ώριμη, αλλά είναι περισσότερο πολύπλοκη σε σχέση με την παραγωγή υδρογόνου με τη μέθοδο SMR. Για τις περισσότερες εφαρμογές απαιτείται ο τελικός καθαρισμός του H₂. Το κόστος

του παραγόμενου υδρογόνου είναι επίσης υψηλότερο εξαιτίας του αεριοποιητή και της απαίτησης για O₂.

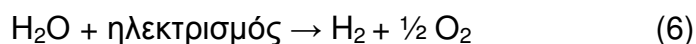
5.1.2 Υδρογόνο από την διάσπαση του νερού

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται οι εξής τρόποι παραγωγής υδρογόνου από το νερό:

1. Ηλεκτρόλυση του νερού.
2. Φωτόλυση.
3. Φωτο-Βιολογική παραγωγή.
4. Θερμοχημική διάσπαση του νερού.

5.1.2.1 Ηλεκτρόλυση του νερού

Μια συνήθης μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου είναι η ηλεκτρόλυση του νερού. Πρόκειται για μια ηλεκτροχημική διεργασία η οποία περιλαμβάνει τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για τον διαχωρισμό του νερού στα συστατικά του, υδρογόνο και οξυγόνο, και είναι η εξής:



Σήμερα, περίπου 4% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου παράγεται από την ηλεκτρόλυση του νερού. Αυτή η διεργασία είναι ήδη οικονομικά αποδοτική για την παραγωγή πολύ καθαρού υδρογόνου σε μικρές ποσότητες, εντούτοις, εξακολουθεί να παραμένει ακριβή για εφαρμογές μεγαλύτερης κλίμακας,

λόγω κυρίως της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία κοστίζει αυτήν την περίοδο τρεις έως πέντε φορές περισσότερο έναντι των αντίστοιχων πρώτων υλών ορυκτών καυσίμων.

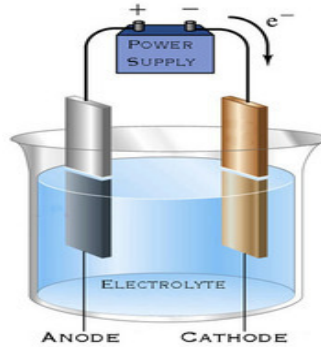
Με την αύξηση της θερμοκρασίας πετυχαίνουμε να κάνουμε ηλεκτρόλυση χρησιμοποιώντας λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια η οποία είναι δαπανηρή. Μια διεργασία ηλεκτρόλυσης σε υψηλές θερμοκρασίες πιθανόν να είναι προτιμητέα όταν υπάρχει διαθέσιμη θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας.

Ενώ η ηλεκτρόλυση του νερού είναι η ακριβότερη διεργασία παραγωγής υδρογόνου σήμερα, κυρίως λόγω της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας, το συνολικό κόστος αναμένεται να μειωθεί λαμβάνοντας υπόψη την υψηλή απόδοση των νέων συστημάτων και την ένταξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες είναι δυνατό να συνδυαστούν με την ηλεκτρόλυση του νερού. Το κόστος της ηλεκτρόλυσης που βασίζεται στην ηλιακή και αιολική ενέργεια είναι ακόμα υψηλό, αλλά αναμένεται να μειωθεί στο μισό κατά τη διάρκεια της επόμενης δεκαετίας. Επιπλέον, επειδή το υδρογόνο παράγεται επιτόπου και την στιγμή που χρειάζεται χωρίς να απαιτείται η μεταφορά παρά μόνο η αποθήκευση του, καθιστά την ηλεκτρόλυση οικονομικά βιώσιμη και ανταγωνιστική.

Τα οικονομικά μεγέθη είναι δυνατό να βελτιωθούν επίσης με την αναμενόμενη μελλοντική μαζική παραγωγή (οικονομίες κλίμακας) των μικρών συσκευών ηλεκτρόλυσης, οι οποίες θα δύνανται να κλιμακώνονται από μικρές σε μεγάλες μονάδες με

σχετικά απλό τρόπο, θα χρησιμοποιούν λιγότερο ακριβή ενέργεια (και υδροηλεκτρική) τις ώρες αιχμής, και θα επιτυγχάνουν αποδόσεις της τάξης του 70–85%. Η ηλεκτρόλυση από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι δυνατό να οδηγήσει σε έναν καθαρό κύκλο υδρογόνου. Υδρογόνο από την ηλιακή και την αιολική ενέργεια θα μπορούσε να καλύψει μελλοντικές ενεργειακές απαιτήσεις, αν και το κόστος παράδοσης της ενέργειας μπορεί να είναι υψηλότερο σε σχέση με την περίπτωση παραγωγής υδρογόνου με την μέθοδο SMR. Σε βάθος χρόνου, το υδρογόνο θα παρέχει επίσης ένα ιδεατό μέσο αποθήκευσης για ανανεώσιμη ενέργεια.

Το υδρογόνο αναμένεται να επιτρέψει την ένταξη στο ενεργειακό σύστημα, ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με μη-μόνιμη παροχή (ήλιος, άνεμος). Κατά συνέπεια, μπορούμε να οραματιστούμε ένα φωτοβολταϊκό ηλιακό πάνελ (ή έναν ανεμόμυλο) συνδεδεμένο με μία αντιστρεπτής λειτουργίας κυψέλη καυσίμου/κυψέλη ηλεκτρόλυσης, που χρησιμοποιεί ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας για να παραγάγει H_2 κατά τη διάρκεια της ημέρας (ή σε ανέμους με υψηλή ταχύτητα), και να καταναλώνει το υδρογόνο κατά τη διάρκεια της νύχτας (ή απουσία αέρα) για να παραγάγει ηλεκτρική ενέργεια. Παρά την αναμφισβήτητη μειωμένη απόδοση αυτού του συστήματος, είναι σαφές ότι θα αποτελούσε μία αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 5.3: Ηλεκτρόλυση νερού.

5.1.2.2 Φωτόλυση - Φωτοηλεκτροχημικές κυψέλες

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα (PV) που συνδυάζονται με συσκευές ηλεκτρόλυσης διατίθενται σήμερα στο εμπόριο. Τα συστήματα αυτά διακρίνονται από τη σχετική ευελιξία τους, όπως η ταυτόχρονη/διαδοχική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά και υδρογόνου από τη συσκευή ηλεκτρόλυσης.

Η άμεση διάσπαση του νερού με την βοήθεια του φωτός με Φωτοβολταϊκές – Ηλεκτρολυτικές διατάξεις (σε μία ενιαία συσκευή) αντιπροσωπεύει μια προηγμένη εναλλακτική λύση. Αυτές οι διατάξεις, γνωστές ως Φωτοηλεκτροχημικές κυψέλες (Photoelectrochemical cells ή εν συντομία – PEC cells), αποτελούνται από φωτοευαίσθητα ηλεκτρόδια, τα οποία είναι φτιαγμένα από ημιαγώγιμα υλικά, και τα οποία βρίσκονται εντός ηλεκτρολυτικών διαλυμάτων ή νερού. Όταν φωτίζονται αυτές οι κυψέλες το φως διεγείρει τους ημιαγωγούς των φωτοηλεκτρο-

δίων δημιουργώντας ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών τα οποία στην συνέχεια συμβάλλουν στην διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο.

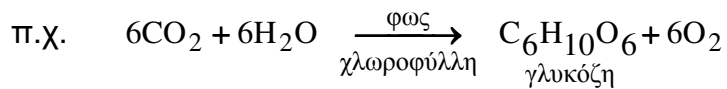
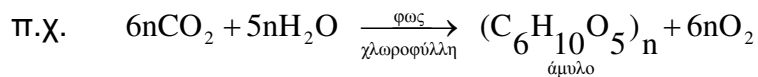
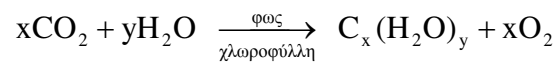
Το κόστος τέτοιων παρόμοιων συστημάτων μπορεί να είναι μικρότερο σε σχέση με τα συνδυασμένα συστήματα φωτοβολταϊκών-ηλεκτρόλυσης. Η άμεση παραγωγή του υδρογόνου μέσω της διάσπασης του νερού από το φως του ήλιου απαιτεί μια διάταξη συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (συστοιχία ηλιακών κατόπτρων) και ειδικών καταλυτικών συστημάτων αποδοτικών για την διάσπαση του νερού. Γίνονται πολλές προσπάθειες παγκοσμίως που αφορούν τις φωτοηλεκτροχημικές κυψέλες, οι οποίες κυρίως εστιάζονται στα πεδία της επιστήμης και μηχανικής των υλικών. Οι στόχοι προκειμένου να εισχωρήσουν στην αγορά οι κυψέλες PEC, είναι να επιτευχθεί 10% απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε υδρογόνο, να έχουν μία μέση διάρκεια ζωής περίπου 10 ετών και το κόστος παραγωγής του υδρογόνου να ανέρχεται σε 2 €/kg.

5.1.2.3 Παραγωγή υδρογόνου από βακτήρια

Φωτοσύνθεση είναι η διαδικασία κατά την οποία τα πράσινα φυτά και ορισμένοι άλλοι οργανισμοί μετασχηματίζουν την φωτεινή ενέργεια σε χημική. Συγκεκριμένα τα φυτά παίρνουν CO₂ από την ατμόσφαιρα και νερό από το έδαφος και σχηματί-

ζουν υδατάνθρακες (σάκχαρα) τα οποία τα χρησιμοποιούν για την θρέψη τους.

Η χημική αντίδραση της φωτοσύνθεσης γίνεται με την βοήθεια της χλωροφύλλης (την πράσινη χρωστική ουσία των φυτών) την οποία χρησιμοποιούν ως καταλύτη. Στην απλοποιημένη μορφή της είναι:

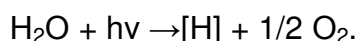


Στην πραγματικότητα όμως οι παραπάνω αντιδράσεις γίνονται με μία σειρά πολύπλοκων αντιδράσεων. Συνοπτικά ο μηχανισμός είναι ο εξής:

Μηχανισμός φωτοσύνθεσης

Σήμερα εν γένει γίνεται δεκτό ότι ο μηχανισμός της φωτοσύνθεσης είναι ο ακόλουθος:

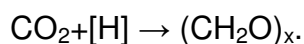
Το νερό διαλύει και μεταφέρει το διοξείδιο του άνθρακα μέχρι τα κύτταρα και τους χλωροπλάστες των φύλλων. Εκεί, με την ενέργεια του φωτός ($h\nu$) που απορροφά η φωτοδεδεσμευτική ουσία (συνήθως η χλωροφύλλη, αλλά υπάρχουν και άλλες φωτοδεδεσμευτικές ουσίες, όπως η ξανθοφύλλη, η φυκοερυθρίνη, η φυκοκυανίνη κ.τ.λ., οι οποίες δεν έχουν πράσινο χρώμα) διασπάται το νερό (φωτόλυση) στα στοιχεία του:



Το οξυγόνο απελευθερώνεται στο περιβάλλον, ενώ το ατομικό υδρογόνο δεσμεύεται από διάφορα ένζυμα (NADP). Συγκεκριμένα γίνεται η αντίδραση:



Με τη βοήθεια αυτών των ενζύμων το υδρογόνο οδηγείται στις αντιδράσεις με το διοξείδιο του άνθρακα:



Στο δεύτερο αυτό στάδιο αντιδράσεων δεν απαιτείται ηλιακή ενέργεια, γι' αυτό οι αντιδράσεις αυτές ονομάζονται "σκοτεινές". Η βασική ουσία που παράγεται είναι η γλυκόζη, η οποία, προκειμένου να αποθηκευτεί, μετατρέπεται στο πολυμερές της άμυλο. Αυτό μεταφέρεται σε άλλες θέσεις του φυτού κατά τη νύχτα, όταν σταματά το φαινόμενο της φωτοσύνθεσης.

Εκτός από τα ανώτερα πράσινα φυτά, υπάρχουν και κατώτεροι οργανισμοί χωρίς χλωροφύλλη (με άλλες φωτοδεδεσμευτικές ουσίες, όπως η βακτηριοχλωροφύλλη), που διασπούν το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας και συνθέτουν οργανικές ουσίες. Οι λειτουργίες τους ονομάζονται χημειοσύνθεση και φωτοχημειοσύνθεση. Τέτοιοι οργανισμοί είναι μερικά βακτήρια (σιδηροβακτήρια, θειοβακτήρια κ.τ.λ.) αλλά και ορισμένα πρωτίστα, όπως η ευγλήνη η πρασίνη (*Euglena*) και σχεδόν όλα τα φύκη.

5.1.2.4 Θερμοχημική διάσπαση του νερού

Η διάσπαση του νερού σε υψηλή θερμοκρασία πραγματοποιείται περίπου στους 3000 °C. Σε αυτήν την θερμοκρασία, διασπάται το 10% του νερού και το υπόλοιπο 90% μπορεί να ανακυκλωθεί. Για να μειωθεί η θερμοκρασία, έχουν προταθεί άλλες διεργασίες για το διαχωρισμό του νερού σε υψηλή θερμοκρασία, όπως:

- Θερμο-χημικοί κύκλοι.
- Υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν τη θερμική διάσπαση και ηλεκτρόλυση.
- Άμεση, με χρήση καταλύτη, διάσπαση του νερού ("θερμοφυσικός κύκλος").
- Χημική διάσπαση του νερού με χρήση τεχνολογίας πλάσματος σε έναν κύκλο CO₂ δύο σταδίων.

Για τις παραπάνω διεργασίες αναμένεται να επιτευχθούν αποδόσεις υψηλότερες από 50%, οι οποίες θα μπορούσαν ενδεχομένως να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση του κόστους παραγωγής υδρογόνου. Τα κύρια τεχνολογικής φύσεως ζητήματα που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν για αυτές τις διεργασίες υψηλών θερμοκρασιών, αφορούν στην ανάπτυξη υλικών με υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, στην κατασκευή μεμβρανών υψηλών θερμοκρασιών, στους εναλλάκτες θερμότητας (συσσκευές μεταφοράς θερμικής ενέργειας μεταξύ δύο ρευστών), και στα μέσα που απαιτούνται για την αποθήκευση της θερμότητας. Οι σχεδιαστικές παράμετροι καθώς και θέματα που αφορούν την ασφάλεια είναι επίσης σημαντικά για τις διεργασίες υψηλών θερμοκρασιών.

Η θερμοχημική διάσπαση του νερού αφορά στην μετατροπή του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο μέσω μίας σειράς θερμικών χημικών αντιδράσεων. Οι κύκλοι θερμοχημικής διάσπασης είναι γνωστοί εδώ και 35 χρόνια. Η θερμική διάσπαση του νερού πραγματοποιείται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τους 2500 °C, αλλά οι θερμοχημικές διεργασίες όπως οι κύκλοι ιωδίου/θείου ή του βρωμίου/ασβεστίου μπορούν να μειώσουν τη θερμοκρασία κάτω από τους 1000 °C. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι οι θερμοχημικοί κύκλοι υπόκεινται στους περιορισμούς του κύκλου Carnot, και για μια ανώτερη θερμοκρασία 1000 °K και μια χαμηλότερη θερ-

μοκρασία 300 °K, η μέγιστη θεωρητική απόδοση που μπορεί να επιτευχθεί είναι ίση με 70%.

Ενώ δεν γεννάται θέμα για την τεχνική δυνατότητα πραγματοποίησης και τη δυνατότητα για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων, απομένουν πολλά ακόμα βήματα για την είσοδο αυτών των διατάξεων στην αγορά. Οι συγκεκριμένες διεργασίες απαιτούν υψηλές ποσότητες θερμότητας σε χαμηλό κόστος από πυρηνική ή ηλιακή ενέργεια, καθώς επίσης και υλικά ανθεκτικά στη διάβρωση.

5.1.3 Υδρογόνο από βιομάζα

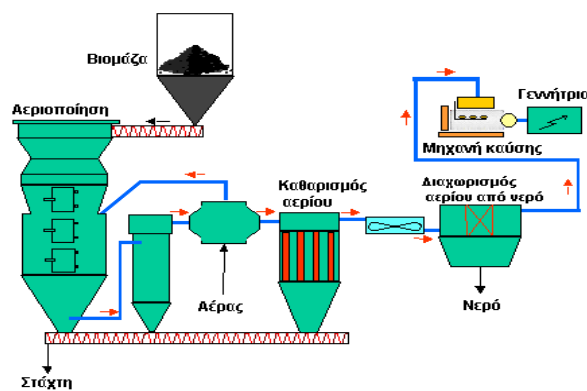
Η βιομάζα είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που θα μπορούσε να διαδραματίσει έναν ουσιαστικό και σημαντικό ρόλο σε ένα διαφοροποιημένο και βιώσιμο ενεργειακό μίγμα. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να παραχθεί υδρογόνο χωρίς να απαιτούνται σημαντικές τεχνολογικές προκλήσεις και μεταβολές. Η βιομάζα δύναται λοιπόν να αποτελέσει την πλέον πρακτική και βιώσιμη (χωρίς παραγωγή άνθρακα) επιλογή για την παραγωγή υδρογόνου. Δεδομένου ότι η βιομάζα είναι ανανεώσιμη και καταναλώνει το ατμοσφαιρικό CO₂ κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης της, η συνεισφορά της σε εκπομπές CO₂ είναι πάρα πολύ μικρή σε σχέση με τη χρήση ορυκτών καυσίμων. Οι διεργασίες για την παραγωγή του υδρογόνου από βιομάζα μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες:

- Άμεσοι μέθοδοι παραγωγής (π.χ., αεριοποίηση, πυρόλυση όμοια με αυτή στην περίπτωση του άνθρακα).
- Έμμεσοι τρόποι παραγωγής μέσω της αναμόρφωσης των παραγόμενων βιοκαυσίμων (π.χ. βιοαέριο, βιοέλαιο).
- Διεργασίες μεταβολισμού για την διάσπαση του νερού μέσω της φωτοσύνθεσης (παρ. 5.1.2.3)ή για την διεξαγωγή της αντίδρασης μετατόπισης του υδραερίου με χρήση βακτηρίων.

Η καύση αφορά στην άμεση οξείδωση της βιομάζας με αέρα για να μετατρέψει τη χημική ενέργεια της βιομάζας σε θερμότητα, μηχανική ή ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας εξοπλισμό όπως οι σόμπες, οι φούρνοι, οι λέβητες ή οι αεριοστροβίλοι. Δεδομένου ότι η ενεργειακή απόδοση είναι χαμηλή (10–30%) και τα προϊόντα της διεργασίας αποτελούν αέριους ρύπους, η καύση δεν μπορεί να θεωρηθεί ως η καταλληλότερη διεργασία για την βιώσιμη παραγωγή υδρογόνου.

Κατά την ταχεία πυρόλυση της βιομάζας, αυτή θερμαίνεται στους 525-600 °K σε πίεση 50-200 bar απουσία αέρα. Ένας διαλύτης ή ένας καταλύτης μπορεί να προστεθεί στη διεργασία. Τα μειονεκτήματα της διεργασίας της ταχείας πυρόλυσης της βιομάζας αφορούν στις δυσκολίες που πρέπει να αντιμετωπιστούν προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές συνθήκες λειτουργίας και στην αναμενόμενη χαμηλή παραγωγή υδρογόνου. Επομένως, η διεργασία της ταχείας πυρόλυσης της βιομάζας δεν ευνοεί την παραγωγή υδρογόνου.

Άλλες βιοχημικές (βιο-φωτόλυση, βιολογική αντίδραση μετατόπισης του υδραερίου, ζύμωση) και θερμοχημικές (πυρόλυση και αεριοποίηση) διεργασίες είναι εφικτές και έχουν συγκεντρώσει την προσοχή και το ενδιαφέρον πολλών για την παραγωγή υδρογόνου.



Σχήμα 5.4: Υδρογόνο από βιομάζα.

5.1.3.1 Ζύμωση βιομάζας

Η ζύμωση είναι μια αναερόβια διεργασία απουσία φωτός, όμοια με την αναερόβια χώνευση, για την παραγωγή H_2 . Τα βακτήρια που παράγουν το H_2 στο σκοτάδι μπορούν να καλλιεργηθούν σε καθαρές καλλιέργειες ή να εμφανιστούν σε μικτές καλλιέργειες, όπως η αναερόβια χώνευση της λυματολάσπης ενός βιολογικού καθαρισμού. Το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής του H_2 με αυτή την διαδικασία προέρχεται από τον αναε-

ρόβιο μεταβολισμό ενζύμων που προκύπτουν κατά τη διάρκεια του καταβολισμού των διάφορων υποστρωμάτων.

Αντίθετα από τη βιο-φωτόλυση που παράγει μόνο H_2 , τα προϊόντα της ζύμωσης απουσίας φωτός είναι συνήθως H_2 και CO_2 που συνδυάζονται με άλλα αέρια, όπως το CH_4 ή το H_2S , ανάλογα με την αντίδραση και το χρησιμοποιούμενο υπόστρωμα. Η ποσότητα του παραγόμενου υδρογόνου από τη ζύμωση απουσία φωτός εξαρτάται από το pH, τον υδραυλικό χρόνο (δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για να ανατροφοδοτηθεί πλήρως η κυψέλη μέσω της φυσικής ροής του νερού που την τροφοδοτεί) παραμονής και τη μερική πίεση του αερίου. Για τη βέλτιστη παραγωγή υδρογόνου, το pH πρέπει να διατηρείται μεταξύ 5 και 6. Η μερική πίεση του H_2 είναι μια ακόμα σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την παραγωγή υδρογόνου. Όταν η συγκέντρωση του υδρογόνου αυξάνεται, η αντίδραση μετατοπίζεται προκειμένου να παράγει περισσότερα οξειδωμένα υποστρώματα, όπως λακτόζη, αιθανόλη, ακετόνη, βουτανόλη ή αλανίνη, τα οποία, στη συνέχεια, μειώνουν την αναμενόμενη παραγωγή υδρογόνου.

5.1.3.2 Αεριοποίηση και πυρόλυση βιομάζας

Η θερμοχημική μέθοδος της αεριοποίησης αφορά στην μετατροπή ενός υλικού με περιεκτικότητα σε άνθρακα, σε ένα χαμηλού ή μέσου ενεργειακού περιεχομένου αέριο μίγμα μέσω της μερικής οξειδωσης σε υψηλές θερμοκρασίες. Η αεριοποίηση του άνθρακα είναι μία καθιερωμένη τεχνολογία και κατά συνέπεια και η τεχνολογία της αεριοποίησης της βιομάζας έχει ωφεληθεί σημαντικά από την υφιστάμενη τεχνογνωσία. Εντούτοις, οι δύο τεχνολογίες δεν είναι δυνατό να συγκριθούν άμεσα λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων στην πρώτη ύλη (π.χ. γενική σύσταση υλικού τροφοδοσίας, περιεκτικότητα σε υγρασία, πυκνότητα).

Η πυρόλυση αφορά στην θερμική διάσπαση που πραγματοποιείται απουσία οξυγόνου. Αποτελεί πάντα το πρώτο βήμα σε διεργασίες καύσης και αεριοποίησης, όπου ακολουθείται από τη συνολική ή μερική οξειδωση των αρχικών προϊόντων. Η χαμηλότερη απαιτούμενη θερμοκρασία για τη διεργασία και οι μεγαλύτεροι χρόνοι παραμονής ευνοούν την παραγωγή ενεργού άνθρακα. Η υψηλή θερμοκρασία και οι μεγαλύτεροι χρόνοι παραμονής αυξάνουν τη μετατροπή της βιομάζας σε βιοαέριο (μίγμα αερίων με κύριο συστατικό το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα) ενώ μία μέση θερμοκρασία και μικρότεροι χρόνοι παραμονής ευνοούν την παραγωγή υγρών προϊόντων (π.χ. βιοέλαιο).

Γενικά, τα κυριότερα αέρια προϊόντα που παράγονται από την πυρόλυση της βιομάζας είναι το H_2 , το CO_2 , το CO και διάφοροι αέριοι υδρογονάνθρακες, ενώ στην περίπτωση της αεριοποίησης της βιομάζας είναι το H_2 , το CO_2 , το CO και το N_2 . Είναι πλέον γνωστό ότι ο συνδυασμός χρήσης συστημάτων αεριοποίησης και πυρόλυσης επιτρέπει την αντιμετώπιση πλήθους τεχνικών και μη, εμποδίων, υποδεικνύοντας ουσιαστικά την ταυτόχρονη χρήση και των δύο τεχνολογιών. Ενώ η έρευνα και η ανάπτυξη εστιάζουν στην αεριοποίηση της βιομάζας, συνδυασμός με άλλες διεργασίες παραγωγής καυσίμων από την βιομάζα (βιοκαύσιμα), θα μπορούσαν να ανοίξουν το δρόμο σε άλλες επιλογές και να επιταχύνουν την ανάπτυξη της συγκεκριμένης αγοράς. Γενικά, δεδομένου ότι η διαθεσιμότητα της βασικής πρώτης ύλης είναι περιορισμένη, η παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα δεν αναμένεται να έχει μεγάλη εφαρμογή. Το κόστος αναμένεται να είναι υψηλότερο έναντι της αεριοποίησης του άνθρακα ή της αναμόρφωσης του φυσικού αερίου.

5.2 Εμπόδια και προοπτικές

Το υδρογόνο είναι πιθανό να κερδίσει ένα σημαντικό μερίδιο της αγοράς ενέργειας κατά τη διάρκεια των ερχόμενων δεκαετιών εάν το κόστος παραγωγής, διανομής και τελικής χρήσης του υδρογόνου μειωθούν σημαντικά, και εάν τεθούν σε ισχύ αποτελεσματικές πολιτικές για αύξηση της απόδοσης, μείωση

των εκπομπών του CO₂ και βελτίωση του ενεργειακού εφοδιασμού και της σχετιζόμενης ασφάλειας. Το κόστος παραγωγής H₂ πρέπει να μειωθεί κατά 3 έως 10 φορές (ανάλογα με την τεχνολογία και την διεργασία). Συγχρόνως τα οικονομικά κίνητρα μείωσης των εκπομπών σε 17–33 €/ton CO₂ (ανάλογα με την τιμή των ορυκτών καυσίμων) θα βοηθούσαν να καταστήσουν το καύσιμο H₂ ανταγωνιστικότερο οικονομικά. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η αύξηση των εκπομπών κατά τη διάρκεια των ερχόμενων δεκαετιών θα μπορούσε να μειωθεί σημαντικά ώστε οι αναμενόμενες εκπομπές το 2050 να έχουν ελαττωθεί κατά το ήμισυ.

Το ανανεώσιμο υδρογόνο αναμένεται ότι θα διαδραματίσει έναν σημαντικό ρόλο μακροπρόθεσμα. Ο σχεδιασμός της μετάβασης προς τις τεχνολογίες παραγωγής ανανεώσιμου υδρογόνου θα επηρεαστεί έντονα από την αρχική υποδομή που θα απαιτηθεί για να επιτρέψει σε ένα αρχικό στάδιο την μαζική διείσδυση του στην αγορά. Λόγω της διάρκειας ζωής μιας τυπικής εγκατάστασης (περίπου 20 έτη) για τον βασικό εξοπλισμό, όπως οι συσκευές ηλεκτρόλυσης, οι σταθμοί ανεφοδιασμού ή οι μεγάλης κλίμακας αναμορφωτές, οι επιλογές που θα γίνουν τώρα θα φέρουν τα πρώτα αποτελέσματα μετά το 2030. Ως εκ τούτου, μια μελλοντική ενεργειακή πολιτική πρέπει να εξετάσει το θέμα της χρήσης των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας θεωρώντας ότι οι (συγκριτικά φθηνοί) ανανεώσιμοι πόροι είναι περιορισμένοι.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

6.1 Συμπεράσματα

Η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο καθώς υπάρχουν πολλές πτυχές του αντικειμένου που δεν έχουν μελετηθεί. Η μείωση των αποθεμάτων ορυκτών πόρων θα οδηγήσει στην αναζήτηση νέων πηγών ενέργειας και στην βελτιστοποίηση αυτών. Οι κυψέλες καυσίμου έχουν την δυνατότητα συνδυασμένης παραγωγής ενέργειας, δηλαδή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, πράγμα το οποίο τα καθιστά ιδανικά για οικιακή χρήση. Εταιρίες έχουν παρουσιάσει ολοκληρωμένα συστήματα για οικίες, τα οποία με συνδυασμό εγκατεστημένων ΑΠΕ μπορούν να παράγουν και καύσιμο υδρογόνο το οποίο μπορεί να διατεθεί και για χρήση στο αυτοκίνητο. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αντικατάσταση των μπαταριών σε οποιοδήποτε σύστημα τις χρησιμοποιεί, (π.χ. UPS), καθώς είναι πιο οικονομικά, έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και δεν απαιτούν κύκλους συντήρη-

σης. Επίσης, η παρούσα πτυχιακή αποτελεί μια γνωστική βάση για μηχανικούς για αυτή την πρωτόγνωρη, για τα ελληνικά δεδομένα, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας ώστε να καταλάβουν και να κατανοήσουν την λειτουργία, τα βασικά χαρακτηριστικά, τις εφαρμογές και τις προοπτικές των κυψελών καυσίμου καθώς και τους τρόπους παρασκευής και τους κινδύνους που ελλοχεύει η χρήση του υδρογόνου. Προσωπικά, πιστεύω ότι οι κυψέλες καυσίμου είναι μια δυναμικά εξελισσόμενη τεχνολογία η οποία θα βρει εφαρμογή σε πολλούς τομείς καλύπτοντας ενεργειακές ανάγκες, φιλική προς το περιβάλλον και με μικρότερο κόστος παραγωγής.

6.2 Ρόλος Ελλάδας

Σε αυτό το ανταγωνιστικό περιβάλλον, η Ελλάδα δεν πρέπει να μείνει ουραγός και εν τέλει αποδέκτης τεχνολογιών που θα παράγονται στο εξωτερικό. Τμήματα του εξοπλισμού για την παραγωγή (ηλεκτρολυτική μονάδα) και χρήση του υδρογόνου (κυψελίδες καυσίμου) θα μπορούσαν να κατασκευαστούν στην Ελλάδα. Επιπλέον, εκτιμάται ότι στην «εποχή του υδρογόνου», η Ελλάδα θα μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο ως προμηθευτής του καυσίμου αυτού μιας και έχει πλούσιο δυναμικό Α.Π.Ε. Σε μία τέτοια εθνική προσπάθεια, σημαντικός είναι ο ρόλος του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), το οποίο σαν Εθνικό Συντονιστικό Κέντρο για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργει-

ιας και την Ορθολογική Χρήση Ενέργειας, προχωρεί στην εξασφάλιση ελληνικής τεχνογνωσίας στις τεχνολογίες υδρογόνου μέσω της απόκτησης και λειτουργίας:

- Εργαστηριακού εξοπλισμού για την παραγωγή υδρογόνου από ΑΠΕ.
- Εξοπλισμού «βιομηχανικής κλίμακας» για την παραγωγή υδρογόνου από ηλιακή ή αιολική ενέργεια.
- Εξοπλισμού για την αποθήκευση - μεταφορά και καθαρή χρήση του υδρογόνου (κυψελίδες καυσίμου).
- Τεχνογνωσίας, λογισμικού και εξοπλισμού ή τμημάτων εξοπλισμού για την παραγωγή και χρήση υδρογόνου σε ενεργειακές εφαρμογές, στις μεταφορές, τη βιομηχανία και στα κτίρια.

Η εμπειρία και ο ανωτέρω εξοπλισμός επιδιώκεται να αποκτηθούν μέσω ανταγωνιστικών προγραμμάτων της ΕΕ, εθνικών προγραμμάτων ή μέσω ιδίων κεφαλαίων. Έχει ήδη υπογραφεί το σχετικό συμβόλαιο με την Ευρωπαϊκή Κοινότητα, στο πλαίσιο του Προγράμματος ENERGIE, που προβλέπει την κατασκευή εργοστασίου παραγωγής, αποθήκευσης και συμπίεσης υδρογόνου, αποκλειστικά από μέρος της αιολικής ενέργειας που παράγεται στο Αιολικό Πάρκο του Λαυρίου. Σε πρώτη φάση το υδρογόνο θα διατεθεί σε βιομηχανική χρήση ενώ ανοίγει ο δρόμος για τη μελλοντική χρήση του για παραγωγή ενέργειας. Μεταξύ άλλων, μέσω της Δ/σης ΑΠΕ και των Τμημάτων Υδρο-

γόνου και Φωτοβολταϊκών Συστημάτων το ΚΑΠΕ συμμετέχει στα ακόλουθα ερευνητικά έργα της Ευρωπαϊκής Κοινότητας:

- Ανάπτυξης ενός συστήματος απρόσκοπτης λειτουργίας εφαρμογών τηλεπικοινωνιών (π.χ. αναμεταδότες κινητής τηλεφωνίας), με χρήση τεχνολογιών υδρογόνου. Πρόκειται για ένα σύστημα που μπορεί να καλύψει φορτίο 5 kW για διακοπές ρεύματος διάρκειας έως 5 ώρες.
- Αντικατάσταση των συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται σήμερα σε κινητά τηλέφωνα με αντίστοιχες τεχνολογίες υδρογόνου (αποθήκευση / παραγωγή υδρογόνου μέσω οξειδοαναγωγής δύο στερεών και χρήση υδρογόνου σε κυψέλες καυσίμου).
- Μελέτης της αγοράς σχετικά με την εφαρμογή τεχνολογιών υδρογόνου σε αποκεντρωμένα ηλεκτρικά συστήματα έως 200 kW ισχύος, τα οποία έχουν ενσωματωμένες τεχνολογίες ΑΠΕ.



Σχήμα 6.1: Αιολικό Πάρκο Λαυρίου.

Βιβλιογραφία

- Διευθύνσεις στο Internet σχετικές με τις κυψέλες καυσίμου:

<http://www.eyeforfuelcells.com>

<http://www.fuelcelltoday.com>

- Διευθύνσεις στο Internet σχετικές με εκπαίδευση πάνω στις τεχνολογίες του υδρογόνου:

<http://people.howstuffworks.com/hydrogen-economy.htm>

- Διευθύνσεις στο Internet σχετικές με εύρεση πληροφοριών:

<http://el.wikipedia.org>

<http://www.fuelcells.org>

<http://www.rae.gr>

<http://www.physics4u.gr>

- Διευθύνσεις στο Internet Οργανισμών και Φορέων:

<http://www.hydrogenenergycenter.org>

<http://www.eere.energy.gov/RE/hydrogen.html>

<http://www.hydrogenus.org>