

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΑΡΙΘΜΟΣ 1187

# ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ: ΜΙΑ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΗ ΠΗΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ:  
ΗΛΙΟΠΟΥΛΟΣ ΗΛΙΑΣ

RENEWABLE  
ENERGIES

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:  
ΣΤΑΘΑΤΟΣ ΗΛΙΑΣ

ΠΑΤΡΑ ΙΟΥΝΙΟΣ 2012

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Κεντρικό θέμα της παρούσας πτυχιακής εργασίας αποτελούν οι κυψέλες καυσίμου. Θα διεξαχθεί μια μελέτη λαμβάνοντας υπ'οψιν διάφορες παραμέτρους οι οποίες εκτείνονται από την εξελικτική πορεία που έχουν ακολουθήσει οι κυψέλες καυσίμων, την πολλαπλή χρήση τους και την οικονομική ωφέλεια τους. Επομένως ο κύριος στόχος της παρακάτω εργασίας είναι να επιτύχει την απόδοση μιας σφαιρικής εικόνας για το τι εστί κυψέλη καυσίμου ως μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη των κυψελών καυσίμου, ως μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Τα συστήματα κυψελών καυσίμου αναμένεται να παίξουν σπουδαίο ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της αποδοτικότητας, της καθαρότητας και της αξιοπιστίας τους. Οι εφαρμογές τους εκτείνονται από την ενεργειακή αυτονομία κτιρίων μέχρι και τα τροχοφόρα οχήματα. Δηλαδή εκτός από οικίες, εργοστάσια και γενικά κτιριακές εγκαταστάσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη και σε αυτοκίνητα, φορτηγά και μέσα μαζικής μεταφοράς.

Στην παρούσα εργασία θα παρουσιάσουμε την αρχή λειτουργίας των κυψελών αυτών, και μέσω της ιστορικής αναδρομής, θα χαραχθεί η αναπτυσσόμενη πορεία και κατάληξη των κυψελών μέχρι και τις μέρες μας. Στην συνέχεια, αναλύονται τα είδη και τα κύρια στοιχεία των κυψελών αυτών, καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους. Επιπλέον, γίνεται μια σύντομη αναφορά στα είδη καυσίμου, όπου μπορούν να χρησιμοποιήσουν οι κυψέλες αυτές. Και συγκεκριμένα, το καύσιμο με το οποίο θα ασχοληθούμε είναι το υδρογόνο.

Θα αναλύσουμε επίσης τις ιδιότητες του υδρογόνου, τον τρόπο παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς του. Ενώ τέλος, κάνοντας μια οικονομική μελέτη για το στοιχείο αυτό, θα έχουμε μια πλήρη εικόνα για την οικονομία και την χρησιμότητα του.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>i) ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	1
<b>ii) ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	1
<b>iii) Κεφάλαιο 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	
1.1) Εισαγωγή.....	3
1.2) Παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές από την καύση των ορυκτών Καυσίμων.....	4
1.3) Τεχνολογία Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Τεχνολογία ΑΠΕ).....	7
1.4) Ηλεκτρική Ενέργεια.....	10
<b>iv) Κεφάλαιο 2: ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ</b>	
2.1) Εισαγωγή στις κυψέλες καυσίμου υδρογόνου.....	11
2.2) Ιστορική αναδρομή.....	12
2.3) Εφαρμογές των κυψελών καυσίμου.....	15
2.4) Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου.....	17
2.5) Πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου.....	20
2.5.1) Έναντι των μηχανών εσωτερικής καύσης.....	20
2.5.2) Έναντι των μπαταριών.....	20
2.6) Μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου.....	21
<b>v) Κεφάλαιο 3: ΤΥΠΟΙ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ</b>	
3.1) Τύποι κυψελών καυσίμου.....	22
3.1.1) Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC).....	23
3.1.2) Κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC).....	25
3.1.3) Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC).....	27
3.1.4) Κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC).....	30
3.1.5) Κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC).....	34
3.2) Οι αναμορφωτές των υδρογονούχων καυσίμων.....	37
3.3) Απόδοση κυψελών καυσίμου.....	39
3.3.1) Θεωρητική προσέγγιση της απόδοσής τους.....	39
3.3.2) Πρακτική προσέγγιση της απόδοσής τους.....	41
<b>vi) Κεφάλαιο 4: ΥΔΡΟΓΟΝΟ</b>	
4.1) Γενικά για το υδρογόνο.....	44
4.2) Τεχνολογία Υδρογόνου.....	45
4.3) Το υδρογόνο ως ενεργειακό καύσιμο - Οικονομία του υδρογόνου.....	47
4.4) Βασικότερες κατηγορίες εμπορικών μεθόδων παραγωγής του υδρογόνου.....	52
4.4.1) Παραγωγή του υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού.....	52
4.5) Διανομή του υδρογόνου	
4.5.1) Τρόποι διανομής του υδρογόνου – πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα των συστημάτων διανομής του.....	54
4.6) Αποθήκευση του υδρογόνου	
4.6.1) Εισαγωγή στην αποθήκευση του υδρογόνου – Δυνατές μέθοδοι αποθήκευσης του υδρογόνου.....	58
4.6.2) Αποθήκευση του υδρογόνου σαν αέριο.....	59
4.6.2.1) Μειονεκτήματα.....	59
4.6.3) Αποθήκευση του υδρογόνου σαν υγρό.....	60
4.6.3.1) Μειονεκτήματα.....	61
<b>vii) ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	62

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1)Εισαγωγή

Ένα από τα βασικά ορυκτά καύσιμα, όπως το πετρέλαιο, γίνεται συνεχώς σπανιότερο και η καύση του παράγει ρύπους που μολύνουν το περιβάλλον. Τα αποτελέσματα αυτής της συνεχούς και αυξανόμενης καταστροφής, είναι φανερά στις μέρες μας, όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η αύξηση των θανάτων παγκοσμίως, λόγω της ρύπανσης της ατμόσφαιρας. Με στόχο να ανατραπεί η καταστροφή του περιβάλλοντος, είναι επιθυμητή η αλλαγή της ενεργειακής πολιτικής προς μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περισσότερο οικολογικές, όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (αιολική, γεωθερμική, ηλιακή ενέργεια).

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, προς το παρόν, χρησιμοποιούνται σε μικρή κλίμακα, καθώς απαιτείται ιδιαίτερο περιβάλλον για την αποτελεσματική τους λειτουργία. Αντίθετα, οι κυψέλες καυσίμου δεν απαιτούν ιδιαίτερο περιβάλλον για την ομαλή τους λειτουργία, παράγουν από ελάχιστους ως μηδενικούς ρύπους και είναι ιδιαίτερα αποδοτικές, τόσο για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος όσο και για την παραγωγή θερμότητας.

Η κυψέλη καυσίμου είναι ηλεκτροχημική συσκευή, η οποία μετατρέπει συνεχώς την χημική ενέργεια του καυσίμου, σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ενέργεια αυτή χρησιμοποιείται σε οχήματα, ηλεκτρονικές συσκευές, κατοικίες και ηλεκτρικά δίκτυα. Η ραγδαία ανάπτυξη των κυψελών καυσίμου, τις τελευταίες δεκαετίες, οφείλεται στον μεγάλο βαθμό απόδοσης τους και στην εξαιρετικά καθαρή επεξεργασία του καυσίμου. Η κυψέλη καυσίμου παρομοιάζεται με τον συσσωρευτή αφού περιέχει ηλεκτρόδια (άνοδος και κάθοδος) διαχωρισμένα από έναν ηλεκτρολύτη. Η διαφορά της είναι η συνεχής παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας. Το καύσιμο και το οξειδωτικό μέσο, το οποίο είναι συνήθως οξυγόνο, παρέχονται αδιάκοπα στην κυψέλη καυσίμου από εξωτερική πηγή. Στον συσσωρευτή, το καύσιμο και το οξειδωτικό μέσο περιέχονται στο εσωτερικό του και όταν τα αντιδρώντα καταναλωθούν, ο συσσωρευτής θα πρέπει να αντικατασταθεί ή να επαναφορτιστεί.

Οι κυψέλες καυσίμου είναι εξώθερμες διατάξεις, παράγοντας θερμότητα ως υποπροϊόν της χημικής αντίδρασης η οποία είναι διαθέσιμη για εφαρμογές συμπαραγωγής. Η διαφορά της με τις συμβατικές θερμικές μηχανές, είναι ότι η κυψέλη καυσίμου μετατρέπει την χημική ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια, χωρίς να μεσολαβεί η μετατροπή της σε μηχανική ενέργεια. Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν υγρά ή αέρια καύσιμα, όπως το υδρογόνο, τους υδρογονάνθρακες και το φυσικό αέριο. Όταν το καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο, το μόνο παραπροϊόν είναι το νερό και η θερμότητα. Το οξειδωτικό μέσο είναι αέριο οξυγόνο ή αέρας.

## 1.2) Παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές από την καύση των ορυκτών Καυσίμων

Η ενέργεια που παράγεται από τα διάφορα ορυκτά καύσιμα, παράγεται από την καύση του άνθρακα, που περιέχουν αυτά, με το οξυγόνο που περιέχεται στον ατμοσφαιρικό αέρα. Από τη διεργασία αυτή παράγεται θερμότητα, καθώς και διάφορες, αέριες κυρίως, χημικές ενώσεις όπως π.χ. το  $\text{CO}_2$ , τα  $\text{N}_2\text{Ox}$  και τα  $\text{SxO}_2$ . Οι χημικές αυτές ενώσεις παράγονται σε ανάλογη σύσταση με τη σύσταση των κύριων στοιχείων τους (C, N και S αντίστοιχα) στην αρχική μάζα του ορυκτού καυσίμου από το οποίο προήλθαν. Από τα διάφορα χημικά στοιχεία που περιέχουν τα ορυκτά καύσιμα, ο C υπάρχει σε μεγαλύτερη αναλογία στη μάζα τους. Επομένως, το  $\text{CO}_2$  που παράγεται κατά την καύση τους, παράγεται κι αυτό σε μεγαλύτερη αναλογία από τα υπόλοιπα καυσαερίά τους ( $\text{N}_2\text{Ox}$ ,  $\text{SxO}_2$  κ.λπ.). Το  $\text{CO}_2$  όμως (και δευτερευόντως τα υπόλοιπα καυσαερίά τους), αποτελούν σήμερα τα κύρια αέρια που είναι υπεύθυνα για την εντατικοποίηση του γνωστού “φαινομένου του θερμοκηπίου” στην ατμόσφαιρα της Γης. [1]

Το συγκεκριμένο φαινόμενο υπό κανονικές συνθήκες, δηλαδή χωρίς τη μαζική παρέμβαση του ανθρώπου, αποτελεί ένα άκρως φυσιολογικό και χρήσιμο φαινόμενο που έχει δημιουργηθεί στην ατμόσφαιρα του πλανήτη εδώ και δισεκατομμύρια χρόνια. Λόγω αυτού, τα διάφορα αέρια της ατμόσφαιρας που βρίσκονται εγκλωβισμένα στο εσωτερικό της εξαιτίας της βαρυτικής έλξης, επιτρέπουν στη Γη να εμφανίζει μια ισορροπημένη και ομαλή ανταλλαγή θερμότητας με το διάστημα. Η θερμότητα αυτή προέρχεται από τις ακτίνες του Ηλίου που προσπίπτουν πάνω στην επιφάνειά της και την θερμαίνουν και στη συνέχεια εκπέμπονται εν μέρει από αυτή με τη μορφή θερμότητας πάλι πίσω προς το διάστημα. Η θερμότητα αυτή, που στην ουσία αποτελεί ένα είδος θερμικής ακτινοβολίας, φτάνοντας στην ατμόσφαιρα “φιλτράρεται” από ένα μίγμα αερίων το οποίο την εμποδίζει να εκλυθεί μαζικά προς το διάστημα (η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται κυρίως από το  $\text{CO}_2$  και δευτερευόντως από τα υπόλοιπα αέρια που αποτελούν το μίγμα).

Έτσι στον πλανήτη μας εδώ και εκατομμύρια χρόνια έχει δημιουργηθεί ένα εύκρατο σχετικά κλίμα, το οποίο έχει επιτρέψει την εμφάνιση και εξέλιξη των διαφόρων μορφών ζωής πάνω σ’ αυτόν. Με άλλα λόγια, η γήινη ατμόσφαιρα και τα διάφορα αέρια που την αποτελούν, έχει λειτουργήσει σαν ένα τεράστιο “θερμοκήπιο” ζωής γι’ αυτόν, εξ ου και η ονομασία του, “φαινομένου του θερμοκηπίου” που περιγράφηκε προηγουμένως.

Όταν όμως ο άνθρωπος, καταναλώνοντας μαζικά τα διάφορα ορυκτά καύσιμα και εκπέμποντας μέσω της καύσης τους τα καυσαερίά τους προς την ατμόσφαιρα, αυξάνει τις συγκεντρώσεις του τεραστίου αυτού «θερμοκηπίου» σε αέρια (κυρίως όπως είπαμε σε  $\text{CO}_2$ ), τότε δημιουργούνται πολλαπλές αλυσιδωτές αντιδράσεις στο εσωτερικό του, οι οποίες έχουν δημιουργήσει διάφορες ανωμαλίες στην ομαλή λειτουργία του. Το κυριότερο από αυτά τα φαινόμενα είναι η υπερθέρμανση του πλανήτη, η οποία επέρχεται από την αυξημένη κατακράτηση θερμότητας μέσα στην ατμόσφαιρα αυτού, εξαιτίας της απότομης αύξησης των επιπέδων συγκέντρωσης  $\text{CO}_2$  σ’ αυτή.

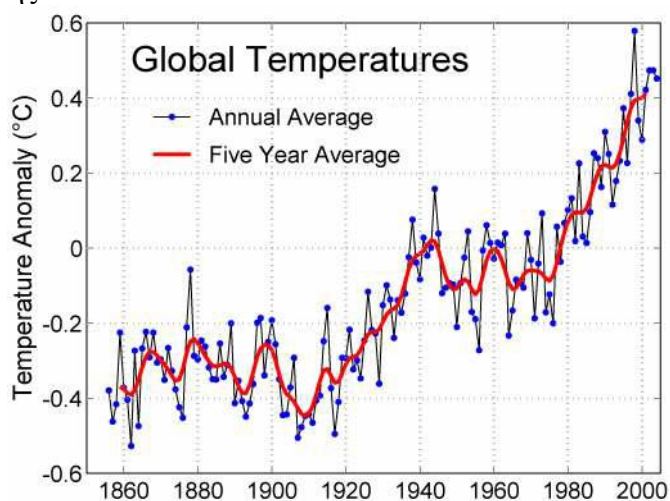
Η υπερθέρμανση, μαζί και με τις υπόλοιπες μεταβολές που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα της Γης, έχουν σαν αποτέλεσμα να εμφανίζονται διάφορα «αφύσικα» μετεωρολογικά φαινόμενα στο εσωτερικό της, τα οποία δεν θα είχαν παρατηρηθεί αλλιώς (π.χ. έντονες ξηρασίες και βροχοπτώσεις ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος, εκτεταμένες περιόδους υψηλών θερμοκρασιών ή πολικά ψύχη σε εύκρατες

προηγούμενως περιοχές, καταστροφικοί τυφώνες κ.λ.π.). Τα φαινόμενα αυτά με τη σειρά τους αλλάζουν απότομα τα μικροκλίματα των διαφόρων περιοχών της, με αποτέλεσμα οι άνθρωποι και τα διάφορα άλλα έμβια όντα που ζουν μέσα σ' αυτά να παρεμποδίζονται ή και να απειλούνται ως προς την συνέχιση της ύπαρξής τους (π.χ. μέσω της μείωσης του υδροφόρου ορίζοντα, της «ερημοποίηση» του εδάφους, την καταστροφή των γεωργικών εκτάσεων και των βιοτόπων κ.λ.π.). Η υπερθέρμανση της Γης, εξαιτίας της μαζικής καύσης των ορυκτών καυσίμων, έχει στις μέρες μας ήδη εμφανείς και μετρήσιμες επιπτώσεις.

Από μελέτες της διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) που έχουν γίνει στην περιοχή της Ανταρκτικής έχει διαπιστωθεί, ότι με εξαίρεση τις μικρές παραλλαγές στη γήινη τροχιά και του ηλιακού κύκλου δραστηριότητας, οι διάφορες κλιματικές αλλαγές της Γης τα τελευταία 50 χρόνια, οφείλονται κατά κύριο λόγο στα εκπεμπόμενα από τον άνθρωπο αέρια του «φαινομένου του θερμοκηπίου».

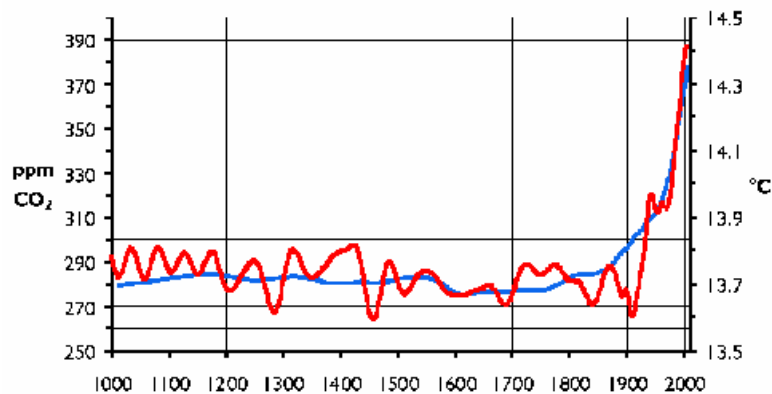
Σύμφωνα με την IPCC, από τα τέλη του 19ου αιώνα και μετά, η μέση παγκόσμια θερμοκρασία έχει αυξηθεί κατά  $0,2 \div 0,6$  οC, με το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης αυτής (0,5 οC) να σημειώνεται μετά το 1950. Η χρονική περίοδος 1950 – σήμερα συμπίπτει απόλυτα με την κατακόρυφη αύξηση χρήσης των ορυκτών καυσίμων από τον άνθρωπο και της μαζικής εκπομπής των καυσαερίων αυτών προς τη γήινη ατμόσφαιρα. Η IPCC υποστηρίζει επίσης, ότι ακόμα και αν τα επόμενα 100 χρόνια δεν λάβει χώρα περαιτέρω αλλαγή της γήινης ατμοσφαιρικής σύνθεσης μέσω της ανθρώπινης παρέμβασης, η Γη θα θερμανθεί επιπλέον κατά ένα μέσο ποσό της τάξης των 0,4 έως 0,7 οC, εξαιτίας της μεγάλης περιόδου που θα μεσολαβήσει έως ότου οι ωκεανοί της να μπορέσουν κι αυτοί να αποβάλλουν επαρκώς την αποθηκευμένη πλεονάζουσα θερμότητά τους.

Στο παρακάτω σχήμα 1.1 απεικονίζεται το διάγραμμα της μέσης μεταβολής της παγκόσμιας θερμοκρασίας της Γης από το 1860 μέχρι σήμερα, δηλαδή από την αρχή της εκβιομηχάνισης των ανθρώπινων κοινωνιών έως σήμερα, όπως έχει προκύψει από τις μελέτες της IPCC:



Σχήμα 1.1: διάγραμμα μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας της γης τα τελευταία 150 χρόνια. [2]

Επίσης, στο παρακάτω σχήμα 1.2 απεικονίζεται το διάγραμμα μεταβολής των μέσων επιπέδων συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> στη γήινη ατμόσφαιρα τα τελευταία 1000 χρόνια (μπλε καμπύλη, άξονας τιμών αριστερά) σε συνάρτηση με τη διακύμανση της μέσης θερμοκρασίας αυτής (κόκκινη γραμμή, άξονας τιμών δεξιά) κατά το ίδιο χρονικό διάστημα:



Σχήμα 1.2: διάγραμμα μεταβολής των επιπέδων συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα της Γης σε συνάρτηση με τη μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας αυτής

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω σχήματα 1.1 και 1.2, η έντονη αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της Γης τα τελευταία 50 χρόνια συμβαδίζει με την μαζική αύξηση της εκπομπής του CO<sub>2</sub>, λόγω της καύσης των ορυκτών καυσίμων από τον άνθρωπο. Να αναφερθεί, ότι η διαφαινόμενη άμεση απειλή από την παγκόσμια υπερθέρμανση τα αμέσως επόμενα χρόνια, αφορά πρωτίστως τις αλλαγές που θα συμβούν στη Γη εξαιτίας της βαθμιαίας ανόδου του επιπέδου των θαλασσών της, από τους πάγους που λιώνουν κυρίως στους δύο Πόλους της και της θερμικής διαστολής που παρατηρείται στα ωκεάνια ύδατά της.

Τα αποτελέσματα απ' αυτό αναμένεται να είναι δραματικά, μιας και ως γνωστόν, ένα μεγάλο μέρος του παγκόσμιου πληθυσμού διαβιώνει σήμερα σε διάφορες παράκτιες περιοχές της. Οι κάτοικοι των περιοχών αυτών, αναμένεται στο μέλλον να αντιμετωπίσουν σημαντική επίπτωση στην καθημερινή τους ζωή, μιας και είναι πολύ πιθανό να έρθουν αντιμέτωποι με συνεχή «ακραία» καιρικά φαινόμενα όπως π.χ. πλημμύρες και τυφώνες, τα οποία θα προκαλέσουν την καταστροφή των τόπων διαβίωσής τους, προξενώντας μεγάλες οικονομικές ζημιές.

Από την άλλη μεριά, σε μακροπρόθεσμη κλίμακα, η υπερθέρμανση του πλανήτη λόγω της έντασης του «φαινομένου του θερμοκηπίου» από τον άνθρωπο, αναμένεται να επηρεάσει σχεδόν συνολικά όλο τον παγκόσμιο πληθυσμό, μιας και είναι σχεδόν βέβαιη η μαζικής κλίμακας «ερημοποίηση» των περισσότερων εύκρατων περιοχών του, η μείωση της αγροτικής παραγωγής και των αποθεμάτων του νερού, η εξάπλωση της πείνας και των ασθενειών, η όλο και πιο συχνή δημιουργία «ακραίων» καιρικών φαινομένων η μείωση της παγκόσμιας βιοποικιλότητας κ.λ.π.

### 1.3)Τεχνολογία Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Τεχνολογία ΑΠΕ)

Η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελεί ένα αποτελεσματικό μέτρο για τις ανθρώπινες κοινωνίες σε παγκόσμιο επίπεδο, προκειμένου αυτές να αντικαταστήσουν τη χρησιμοποίηση των ορυκτών καυσίμων σαν κύρια μέσα μαζικής παραγωγής της ενέργειας τους και να μειώσουν τις επιπτώσεις που προκαλούνται από αυτά στη κλιματική ισορροπία του πλανήτη.

Επιπλέον, στο επίπεδο των διαφόρων κρατών που δεν διαθέτουν πλούσια φυσικά αποθέματα σε ορυκτά καύσιμα (π.χ. πετρέλαιο), οι ΑΠΕ αποτελούν την καλύτερη λύση προκειμένου αυτά να στηρίξουν από μόνα τους τις ενεργειακές τους οικονομίες, χωρίς να χρειάζεται να εξαρτώνται ενεργειακά από άλλα κράτη-παραγωγούς και προμηθευτές τους σε ορυκτές πρώτες ύλες. Τέλος, οι ΑΠΕ θεωρούνται, τουλάχιστον μέχρι σήμερα, ως η μόνη πρακτικά εφαρμόσιμη εναλλακτική λύση έναντι της μαζικής χρήσης της πυρηνικής ενέργειας, μιας και τα αδιέξοδα που προκύπτουν από την εκτεταμένη χρησιμοποίηση αυτής είναι ως γνωστόν πολλά (π.χ. χρησιμοποίησή της για μη ειρηνικούς σκοπούς, ενδεχόμενα πυρηνικά ατυχήματα, μη ύπαρξη ολοκληρωμένου σχεδίου ασφαλούς και μακροπρόθεσμης διαχείρισης των πυρηνικών αποβλήτων της κ.λπ.).

Το πλεονέκτημα που προκύπτει από την χρησιμοποίηση των ΑΠΕ έναντι της πυρηνικής ενέργειας ενισχύεται εξάλλου και από την άποψη, ότι προκειμένου να προσπαθήσει μελλοντικά η ανθρωπότητα να δημιουργήσει πολλούς «μικρούς τεχνητούς ήλιους» πάνω στη γη, με τη μορφή των πυρηνικών αντιδραστήρων, είναι πιο ασφαλές και πιο σίγουρο να εδραιώσει και να αναπτύξει την τεχνολογία των ΑΠΕ, η οποία είναι περισσότερο ήπια απ' ότι η πυρηνική ενέργεια και βασίζεται εξάλλου και η ίδια στη μετατροπή της ενέργειας του Ηλίου σε εκμεταλλεύσιμη ενέργεια για τον άνθρωπο.

Θα πρέπει πάντως να τονίσουμε, ότι κάθε τεχνολογία ΑΠΕ στην πράξη, προκαλεί λιγότερο ή περισσότερο, ορισμένες μικρές αρνητικές συνέπειες στο φυσικό περιβάλλον. Κι αυτό γιατί οι διάφορες διαδικασίες μετατροπής της ενέργειας που παράγει, υφίστανται σε κάποιο βαθμό και κάποιες μη αναστρέψιμες μεταβολές. ωστόσο αυτές οι μεταβολές είναι προφανώς πολύ μικρότερες από αυτές που προκαλούν στο περιβάλλον οι συμβατικές τεχνολογίες των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με αποτέλεσμα η μαζική χρήση των ΑΠΕ συνολικά να καθίσταται πολύ λιγότερο επιζήμια σε σχέση μ' αυτές.

Συνήθως, μια σειρά από περιβαλλοντικά κριτήρια / κατευθυντήριες γραμμές χρησιμοποιούνται προκειμένου να καθορίσουν τότε μια οποιαδήποτε νέα τεχνολογία μπορεί να θεωρηθεί σημαντική ως προς τις προοπτικές της αειφορίας της.

Τα κριτήρια αυτά είναι τα εξής:**[3]**

- Η αποφυγή της χρήσης, κατά την εφαρμογή της, καυσίμων που εξαντλούνται εύκολα ή σχετικά εύκολα.
- Η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητάς της, στην περίπτωση που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα, δηλαδή η αύξηση της εκμετάλλευσης του ενεργειακού περιεχομένου των ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιεί σε σχέση με τις προγενέστερες τεχνολογίες της, αλλά αυτό μόνο με το σκεπτικό, ότι η χρήση της θα αποτελέσει ένα προσωρινό μέτρο το οποίο δεν θα ισχύει όταν θα αντικατασταθεί από μία νέα τεχνολογία πραγματικών ΑΠΕ.



- Η βελτίωση της αποδοτικότητας των ενεργειακών συστημάτων μετατροπής της πρωτογενούς ενέργειας που χρησιμοποιεί, η οποία θα πρέπει οπωσδήποτε να είναι υψηλή.
- Η χρησιμοποίηση των καταλληλότερων καυσίμων για την εκάστοτε ενεργειακή μετατροπή που πραγματοποιεί και η σωστή συσχέτιση αυτών με τις τελικές ανάγκες του χρήστη.
- Η αποφυγή απόσπασης, από τις φυσικές ενεργειακές της ροές, ποσοτήτων ενέργειας μεγαλύτερων από αυτές που χρειάζονται τα εκάστοτε τοπικά οικοσυστήματα από τα οποία τις αντλεί προκειμένου αυτά να λειτουργήσουν ομαλά.
- Ο συνυπολογισμός, κατά τον ενεργειακό της σχεδιασμό, των άμεσων αλλά και των έμμεσων επιπτώσεων για τις τοπικές ανθρώπινες κοινωνίες εκτός από το ευρύτερο κοινωνικό σύνολο.
- Η ήπια και οργανωμένη ανάπτυξή της, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η μη υπέρβαση της μέγιστης ικανότητας του φυσικού περιβάλλοντος σε παραγωγή πρώτων υλών της, μιας και ως γνωστόν το περιεχόμενο αυτού σε φυσικούς ενεργειακούς πόρους δεν είναι ανεξάντλητο.
- Η συνεκτίμηση του περιβαλλοντικού κόστους της με τα καθαρά οικονομικά κόστη που προκύπτουν από την εφαρμογή της και η συνεκτίμηση αυτών με το συνολικό κόστος που συνεπάγεται παγκοσμίως ο άνθρωπος.
- Η στενή παρακολούθηση των εκπεμπόμενων ρύπων της, μέσα από μία λεπτομερή ανάλυση του ενεργειακού κύκλου ζωής της ως προς το περιβάλλον της Γης.

Είναι γνωστό, ότι οι περισσότερες μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σήμερα προέρχονται, άμεσα ή έμμεσα, από την ενέργεια του Ηλίου. Τα ορυκτά καύσιμα για παράδειγμα, τα οποία ως γνωστόν αποτελούν σήμερα την «κινητήρια» δύναμη της σύγχρονης παγκόσμιας ενεργειακής οικονομίας, δεν είναι τίποτε άλλο παρά η αποθηκευμένη ποσότητα της ενέργειας του Ηλίου η οποία δεσμεύτηκε κάποια στιγμή από διάφορους φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς και οι οποίοι στη συνέχεια, κάτω από ειδικές συνθήκες και με την πάροδο πολλών εκατομμυρίων ετών, μετατράπηκαν τελικά σε διάφορες μορφές ορυκτών καυσίμων.

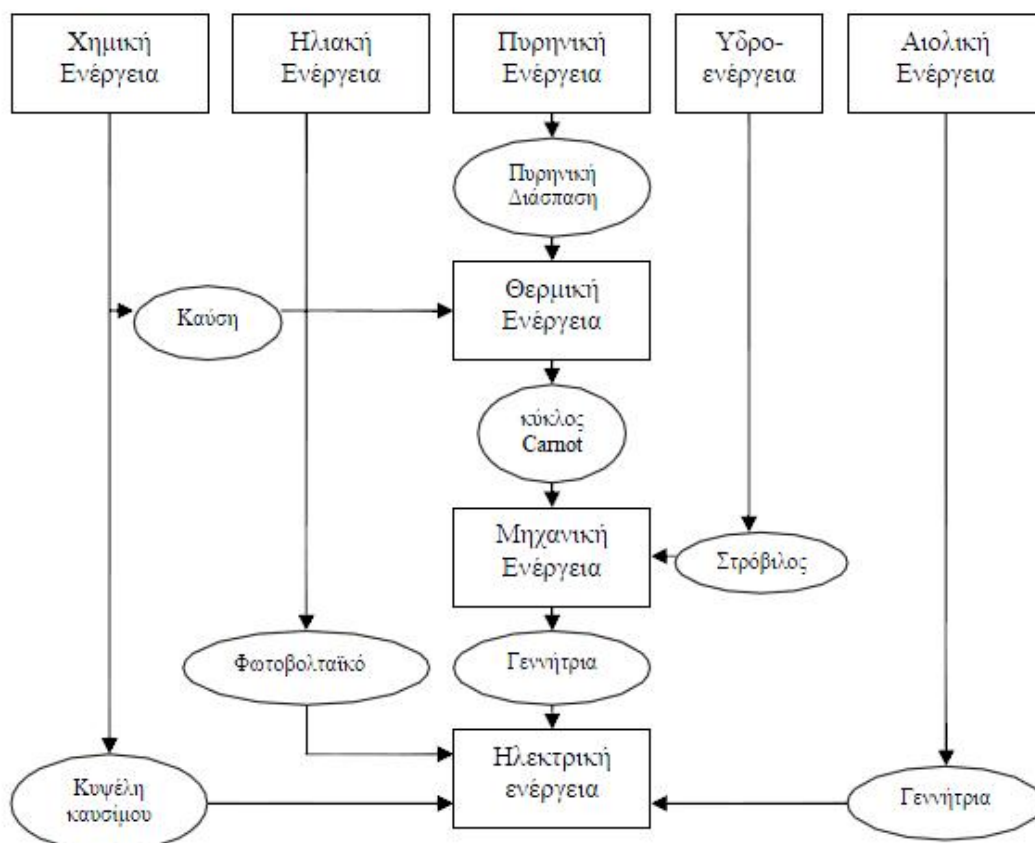
Επειδή όμως οι ποσότητες των διαφόρων ορυκτών καυσίμων της Γης απαιτούν τόσο μεγάλα χρονικά διαστήματα προκειμένου να σχηματιστούν, μόλις τα αποθέματά τους που βρίσκονται στο υπέδαφός της υπερκαταναλωθούν από τον άνθρωπο, δεν προλαβαίνουν να αντικατασταθούν άμεσα από άλλα νέα αποθέματα προκειμένου να εξυπηρετήσουν τις επόμενες ανθρώπινες γενεές, με αποτέλεσμα στην ουσία να χάνονται για πάντα.

Αντιθέτως, οι διάφορες μορφές ΑΠΕ βασίζονται σε συνεχείς ενεργειακές εισροές από τον Ήλιο, οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα να δημιουργούνται ανεξάντλητα αποθέματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειάς τους, τα οποία με τη σειρά τους μπορούν να εκμεταλλευτούν σε πιο μακροπρόθεσμη κλίμακα από τον άνθρωπο. Τα τεράστια αυτά αποθέματα υπάρχουν στις διάφορες μορφές ΑΠΕ, είτε στην πρωτογενή τους μορφή, δηλαδή σαν «καθαρή» ηλιακή ενέργεια, είτε σε δευτερογενείς μορφές ενέργειας μέσα στα διάφορα φυσικά υλικά του πλανήτη (π.χ. στον αέρα με τη μορφή της αιολικής ενέργειας, στο υπέδαφος της γης με τη μορφή των ζεστών υδάτων και πετρωμάτων της (γεωθερμία), στους υδάτινους όγκους των θαλασσών, των ποταμών και των λιμνών με τη μορφή της κινητικής ενέργειας των κυμάτων ή της δυναμικής ενέργειας των υδάτινων ροών, στους φυτικούς και στους ζωικούς οργανισμούς με τη μορφή της βιομάζας κ.τ.λ.).

Στις διάφορες μορφές ΑΠΕ που δημιουργούνται κατά την αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας μέσα στη μάζα των διαφόρων φυσικών υλικών του πλανήτη, ανήκει και η χημική ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη στο φυσικό στοιχείο υδρογόνο (H<sub>2</sub>), του αφθονότερου στοιχείου του σύμπαντος. Οι μέθοδοι με τις οποίες ο άνθρωπος θα μπορέσει μελλοντικά να παράγει μαζικά ενέργεια από το στοιχείο αυτό καθώς και οι διάφορες ενεργειακές τεχνολογίες που θα τον βοηθήσουν σ' αυτό, αποτελούν και το κύριο θέμα της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

## 1.4) Ηλεκτρική Ενέργεια

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της σύγχρονης κοινωνίας. Σε αντίθεση με άλλες μορφές ενέργειας, η ηλεκτρική, ως επί το πλείστον, δεν εμφανίζεται στη φύση από μόνη της ή σε μορφή που μπορεί να αξιοποιηθεί άμεσα από τον άνθρωπο. Η αποθήκευση της σε μεγάλες ποσότητες είναι πολύ δύσκολη έως και ακατόρθωτη. Επομένως είναι αναγκαίο να δημιουργείται ηλεκτρική ενέργεια τη στιγμή που χρειάζεται και στην ποσότητα που απαιτείται. Με τον όρο παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εννοούμε τη μετατροπή από άλλες μορφές ενέργειας σε ηλεκτρική. Η μετατροπή αυτή έχει ως βάση διάφορες μορφές πρωταρχικής ενέργειας, όπως αποτυπώνεται στο παρακάτω σχήμα.



Στη μετατροπή της ενέργειας από μια μορφή στην άλλη πρωταρχικό ρόλο διακατέχει ο βαθμός απόδοσης, που είναι ο λόγος της εξερχόμενης προς την εισερχόμενη ενέργεια. Στα περισσότερα σύγχρονα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπεται η χημική ενέργεια ενός ορυκτού καυσίμου σε θερμική, έπειτα σε μηχανική - μέσω ατμοστροβίλου - και τέλος σε ηλεκτρική - μέσω γεννήτριας. Ο βαθμός απόδοσης της όλης διαδικασίας κυμαίνεται μεταξύ 30-35%. Στη μηχανή εσωτερικής καύσης, ο βαθμός απόδοσης είναι ακόμα χειρότερος. Ακόμη και σύγχρονες μηχανές εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούνται στα αυτοκίνητα παρουσιάζουν βαθμούς απόδοσης κάτω από 20%. Αυτός ο μικρός βαθμός απόδοσης, δίνει το έναυσμα για τη μελέτη μιας πιο αποδοτικής διαδικασίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Μια από τις πολλές εκδοχές που έχουν μελετηθεί τις τελευταίες δεκαετίες αποτελεί η τεχνολογία της κυψέλης καυσίμου, σύμφωνα με την οποία η χημική ενέργεια ορισμένων καυσίμων μετατρέπεται άμεσα σε ηλεκτρική χωρίς να υπόκειται στον περιορισμό που επιβάλλει η διαδικασία Carnot.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

### 2.1) Εισαγωγή στις κυψέλες καυσίμου υδρογόνου

Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου (ή απλά κυψέλες καυσίμου – fuel cells) αποτελούν σήμερα τις σημαντικότερες διατάξεις παραγωγής ενέργειας μέσω υδρογόνου. Με τη χρήση αυτών, η αποθηκευμένη χημική ενέργεια του υδρογόνου μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρισμό και σε θερμότητα, μέσω της ηλεκτρόλυσης του υδρογόνου από το ατμοσφαιρικό οξυγόνο.

Από τον ηλεκτρισμό και την θερμότητα που παράγεται από αυτές, μπορεί στη συνέχεια να προκύψει οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος στις καθημερινές ενεργειακές του ανάγκες. Κατά την παραγωγή ενέργειας (ηλεκτρισμού ή θερμότητας) από μία κυψέλη καυσίμου υδρογόνου, σημαντικότερο ρόλο στην απόδοσή της διαδραματίζει η διαδικασία της κατάλυσης.

Η κατάλυση αυτή, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, αποτελεί μια διεργασία η οποία λαμβάνει χώρα κατεξοχήν στη διάσταση του νανομέτρου. Για τον λόγο αυτό σήμερα, η έρευνα πάνω στους διάφορους τύπους κυψελών καυσίμου επικεντρώνεται κυρίως σ' αυτόν τον τομέα. Όπως προείπαμε, οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου παράγουν ηλεκτρισμό και θερμότητα από την ηλεκτρόλυση του υδρογόνου με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο. Η βασική αυτή ηλεκτροχημική διαδικασία, λαμβάνει χώρα μέσα σε μία διάταξη ηλεκτρόλυσης του υδρογόνου που περιέχουν και η οποία καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του όγκου τους.

Το κυριότερο προϊόν αυτής της διαδικασίας είναι προφανώς το νερό, ενώ παράγονται επίσης και ορισμένα οξείδια του αζώτου, αλλά σε πολύ μικρότερες ποσότητες σε σχέση μ' αυτό. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή μόνο ηλεκτρισμού, με τη μορφή συνεχούς ρεύματος, ή για τη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Παρόλο που οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν μια σχετικά νέα τεχνολογία, η πρώτη υποτυπώδης διάταξη παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας μέσω της ηλεκτρόλυσης του υδρογόνου τοποθετείται χρονικά αρκετά πιο παλιά όπως θα δούμε στην ιστορική αναδρομή που ακολουθεί. Έκτοτε, οι κυψέλες καυσίμου έχουν εξελιχθεί αρκετά και γίνονται όλο και περισσότερο χρήσιμες στις καθημερινές ενεργειακές ανάγκες του ανθρώπου.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν σήμερα οι διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου, που έχουν κατασκευαστεί, αποτελεί το γεγονός, ότι σαν διατάξεις παραγωγής ενέργειας χαρακτηρίζονται από μια ιδιαίτερη πολυμορφία ως προς το είδος των καυσίμων που μπορούν να χρησιμοποιήσουν. Εκτός δηλαδή από το «καθαρό» υδρογόνο, οι περισσότεροι τύποι των κυψελών καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιήσουν πολυάριθμα άλλα υδρογονούχα καύσιμα, χωρίς να μειώνουν σημαντικά την απόδοσή τους σε ισχύ.

Παραδείγματα άλλων υδρογονούχων καυσίμων, πλην του «καθαρού» υδρογόνου, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις κυψέλες καυσίμου είναι η μεθανόλη ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), η αιθανόλη ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{OH}$ ), το φυσικό αέριο, ακόμη και τα διάφορα υγρά ορυκτά καύσιμα που περιέχουν υδρογόνο, όπως το πετρέλαιο και η βενζίνη. Απαραίτητη πάντως προϋπόθεση για την χρησιμοποίηση των συγκεκριμένων καυσίμων σ' αυτές, είναι να υπάρχει μια διάταξη μετατροπής τους σε υδρογόνο, έτσι ώστε να μπορούν να διοχετευτούν στο εσωτερικό της κάθε κυψέλης καυσίμου. Η διάταξη αυτή, είναι γνωστή ως αναμορφωτής των υδρογονούχων καυσίμων.[4]

Θα πρέπει επίσης να τονίσουμε, ότι οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου αποτελούν πολύ πλεονεκτικές διατάξεις παραγωγής ενέργειας όχι μόνο γι' αυτή την

πολυπλοκότητα των διαφορετικών καυσίμων που μπορούν να χρησιμοποιήσουν, αλλά και για δύο άλλα σημαντικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν την λειτουργία τους: το πρώτο είναι η δυνατότητά τους να παράγουν μεγάλα ποσά ενέργειας από το καύσιμο που χρησιμοποιούν (το υδρογόνο) και το άλλο, ότι από περιβαλλοντική σκοπιά, η μαζική τους χρησιμοποίηση συμφέρει έναντι αυτής των συμβατικών διατάξεων παραγωγής ενέργειας (ΜΕΚ ορυκτών καυσίμων) μιας και το κύριο προϊόν από την ηλεκτρόλυση του υδρογόνου που επιτελείται στο εσωτερικό τους είναι, όπως αναφέραμε, το νερό.

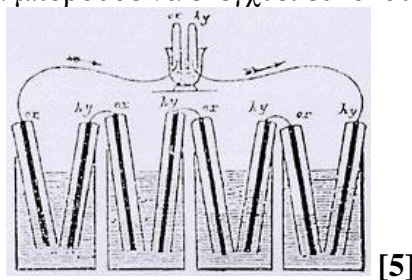
## 2.2) Ιστορική αναδρομή



Η βασική αρχή της τεχνολογίας Κυψελών Καυσίμου επινοήθηκε το 1839. Ο Γερμανοελβετός Christian Friedrich Schönbein δημοσίευσε το άρθρο του για τις κυψέλες καυσίμου υδρογόνου-οξυγόνου στο "Philosophical Magazine" τον Ιανουάριο του 1839. Την ίδια περίπου εποχή, ο Άγγλος sir William Grove εργαζόταν πάνω σε μια μέθοδο συνδεσμολογίας του ισχυρού συσσωρευτή πλατίνας-ψευδαργύρου, παράλληλα και σε σειρά. Στο υστερόγραφο του άρθρου του, ο sir William Grove, είχε υποδείξει την πιθανότητα, η αντίδραση υδρογόνου-οξυγόνου να παράγει ηλεκτρισμό. Πραγματοποίησε την περιγραφή ενός "ηλεκτρολυτικού συσσωρευτή αερίων", ο οποίος με "ψυχή

καύση" του υδρογόνου και του οξυγόνου θα παρήγαγε ηλεκτρικό ρεύμα με θεωρητική απόδοση σχεδόν 100%.

Το 1842, ο sir William Grove παρουσίασε την μέθοδο Κυψελών Καυσίμου λεπτομερώς. Ένας από τους πρώτους που αναγνώρισε την σημασία των κυψελών καυσίμου υδρογόνου - οξυγόνου ήταν ο Westphal το 1880. Το 1894, ο Ostwald πρότεινε μια διαδικασία συνδυασμού άνθρακα (C) και οξυγόνου (O<sub>2</sub>). Η πραγματοποίηση αυτής της ιδέας απέτυχε, εξ' αιτίας των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας (της τάξης των 1000°C) και των προβλημάτων που δημιουργήθηκαν, όσον αφορά την αντοχή και την ομαλή συμπεριφορά των υλικών σε αυτές τις θερμοκρασίες. Από τότε και μετά, οι ερευνητικές προσπάθειες εστιάστηκαν στην αντίδραση H<sub>2</sub> / O<sub>2</sub>, η οποία μπορούσε να ελεγχθεί ευκολότερα.



Εικόνα Η ιστορική πρώτη δομή, τεσσάρων κυψελών καυσίμου [5]

Η τεχνική εξέλιξη των κυψελών καυσίμου ξεκίνησε λίγο μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο όταν ο Francis T. Bacon από το Cambridge στην Αγγλία, κατασκεύασε επιτυχώς μία κυψέλη υψηλής πίεσης.

Η πρώτη λειτουργική συσκευή παρουσιάστηκε το 1954. Στη συνέχεια, αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC) και κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) αναπτύχθηκαν για τα διαστημικά προγράμματα (Gemini, Apollo, Spacelab). Εκείνη την περίοδο, η NASA χρησιμοποιούσε τις κυψέλες καυσίμου, οι οποίες ήταν κατασκευασμένες από την Pratt & Whitney (USA), για να παρέχουν ηλεκτρικό ρεύμα κατά τη διάρκεια των αποστολών του διαστημόπλοιου Gemini. Το γεγονός αυτό, ενθάρρυνε τους επιστήμονες, με αποτέλεσμα, πλήθος χωρών να ξεκινήσει μία αυξανόμενη δραστηριότητα γύρω από τις κυψέλες καυσίμου, τόσο σε πανεπιστήμια και σε εργαστήρια, όσο και στη βιομηχανία. Αλλά ο αρχικός ενθουσιασμός εξασθένησε σύντομα στην αρχή της δεκαετίας του '70, εξ' αιτίας του υψηλού κόστους. Έτσι οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά και μόνο σε διαστημικές και στρατιωτικές εφαρμογές.

Στην συνέχεια το ενδιαφέρον των αμερικάνικων βιομηχανιών αναπτέρωθηκε και πάλι με τις χρηματοδοτήσεις για έρευνα από το Τμήμα Ενέργειας (DOE), το Ινστιτούτο Έρευνας Ηλεκτρικής Ενέργειας (EPRI) και το Ινστιτούτο Έρευνας Αερίων (GRI) στη δεκαετία του '70. Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον εκδηλώθηκε για τις κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC), τις κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC) και τις κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC), δηλαδή για τις κυψέλες καυσίμου μέσης και υψηλής θερμοκρασίας. Η εξέλιξη όλων αυτών των τεχνολογιών στόχευε αρχικά στην εφαρμογή σε μονάδες ισχύος, μερικών εκατοντάδων MW.

Την ίδια περίοδο η Ιαπωνία ξεκίνησε ένα νέο ερευνητικό πρόγραμμα, το Moonlight Programme, το οποίο υποστηριζόταν αφειδώς από την κυβέρνηση. Αντίθετα, το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα για την έρευνα των κυψελών καυσίμου είχε περικοπεί στο ελάχιστο. Όταν η Ευρωπαϊκή ερευνητική δραστηριότητα ξεκίνησε πάλι στα μέσα της δεκαετίας του '80, η Αμερικανική και η Ιαπωνική βιομηχανία είχαν ήδη αναπτύξει τις κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) για μη κινητές εγκαταστάσεις. Έτσι, οι έρευνες εστιάστηκαν στις κυψέλες καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών, για να ανταγωνιστούν τις νέες τεχνικές και ιδέες των Η.Π.Α. και της Ιαπωνίας.

Το ενδιαφέρον για κινητές μονάδες ενεργοποιείται και πάλι σήμερα αφού η περιβαλλοντική ευαισθησία προωθεί την εισαγωγή στην αγορά αυτοκινούμενων οχημάτων με μηδενικές ή έστω πολύ χαμηλές εκπομπές ρύπων. Η χρήση στη βιομηχανία οχημάτων, της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου με την εγγενή υψηλή απόδοση, την υψηλή παραγωγή πυκνότητας ρεύματος και τη μηδενική εκπομπή ρύπων, έχει εξελιχθεί σημαντικά την τελευταία δεκαετία και σήμερα αποτελεί ένα σοβαρό ανταγωνιστή στην αγορά οχημάτων μηδενικών εκπομπών ρύπων.

Το πρώτο λεωφορείο που χρησιμοποίησε την τεχνολογία κυψελών καυσίμου, ολοκληρώθηκε το 1993 και αρκετά μικρότερα οχήματα κατασκευάζονται στην Ευρώπη και τις Ενωμένες Πολιτείες. Η ONSI στις Ηνωμένες Πολιτείες έχει ήδη προμηθεύσει σχεδόν 100 μονάδες συμπαραγωγής φωσφορικού οξέος (PAFC) των 200 kW, σε πελάτες της στις Ηνωμένες Πολιτείες και σε όλο τον κόσμο για δοκιμαστικές εφαρμογές. Η διάθεση τους στην αγορά το 1998 ήταν 1.500 \$/kW. Οι κυψέλες MCFC (ERC/MTU, Ansaldo, ECN, MC Power, IHI, Hitachi, MELCO, Tonen, κτλ.) και SOFC (Westinghouse, Siemens, Daimler-Benz, Sulzer, Ceramtec,

Statoil, κτλ.) μετεπήδησαν από τα εργαστήρια, στις εμπορικές εφαρμογές μετά το 2000.

Οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) δεν ερευνήθηκαν σοβαρά πριν το τέλος της δεκαετίας του 70 αρχές '80. Οι έντονες δραστηριότητες, κυρίως από τις εταιρείες Ballard, Siemens, H-Power και διάφορων Αμερικάνικων πανεπιστημίων και ερευνητικών κέντρων, είχαν ως αποτέλεσμα την κατασκευή βελτιωμένων συσκευών MEA (Membrane-Electrode-Assemblies). Έτσι το βάρος και το κόστος των κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) μειώθηκε δραστικά και η εφαρμογή τους αυξήθηκε θεαματικά. Αυτό με τη σειρά του, έδωσε κίνητρα σε πολλές κατασκευάστριες εταιρείες αυτοκινήτων και λεωφορείων (Ballard/ New Flyer, Chrysler, Daimler-Benz, Ford, GM, Honda, Man, Neoplan, PSA, Renault, Toyota, Volvo) να θεωρήσουν τις κυψέλες ως ένα εναλλακτικό σύστημα κίνησης των οχημάτων, έναντι των μηχανών εσωτερικής καύσης. Παγκοσμίως, τουλάχιστον 600 εκατομμύρια Euro το χρόνο επενδύονται στην τεχνολογία των κυψελών καυσίμου μόνο και μόνο για την επίτευξη ενός "καθαρότερου" μέλλοντος.

Μέχρι το 1999, σε παγκόσμια κλίμακα, είχαν εγκατασταθεί μονάδες συνολικής ισχύος 40.000 kW περίπου, κυρίως ως γεννήτριες ισχύος και θερμότητας, από τις οποίες περίπου το 90% είναι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC). Σήμερα, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την τεχνολογία κυψελών καυσίμου και στην Ευρώπη. Η μονάδα PAFC της US ONSI 200kW, κατέγραψε 349.693 ώρες στην Ευρώπη, με μέγιστη συνεχόμενη λειτουργία 5.729 ώρες και συνολική παραγωγή ηλεκτρικού ενέργειας 54.086 MWh (30 Σεπτεμβρίου 1998). Μερικές από αυτές τις μονάδες ξεπέρασαν την αναμενόμενη διάρκεια ζωής τους στην Ιαπωνία και την Αμερική, κάτι το οποίο αναδεικνύει την υψηλή αξιοπιστία της τεχνολογίας.[5]

### 2.3) Εφαρμογές των κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν οπουδήποτε χρειάζεται ηλεκτρική ενέργεια. Το φάσμα των απαιτήσεων σε ισχύ που μπορούν να καλύψουν είναι πολύ ευρύ. Υπάρχουν συστήματα κυψελών υδρογόνου ονομαστικής ισχύος που ξεκινά από τα λίγα Watt και φτάνει μέχρι και την τάξη των MW. Ένας τομέας στον οποίο έχει γίνει αρκετή έρευνα πάνω στις κυψέλες καυσίμου είναι η βιομηχανία οχημάτων. Ήδη από το 1995 η Ballard Systems είχε δοκιμάσει κυψέλες PEM σε λεωφορεία.

Μέχρι αυτή τη στιγμή όλες οι μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν κατασκευάσει μοντέλα ηλεκτρικών ή και υβριδικών αυτοκινήτων που χρησιμοποιούν κυψέλες υδρογόνου για τη λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα. Σημειώνεται ότι έχουν κατασκευαστεί και πρωτότυπα μοτοσυκλετών που λειτουργούν με κυψέλες υδρογόνου. Εκτός από τα λεωφορεία, τα αυτοκίνητα και τις μηχανές, οι κυψέλες υδρογόνου βρίσκουν εφαρμογή και σε άλλα οχήματα όπως αεροπλάνα, πλοία, υποβρύχια και διαστημόπλοια. Αξίζει να αναφερθεί εδώ ότι οι πρώτες κυψέλες καυσίμου του εμπορίου χρησιμοποιήθηκαν από τη NASA στη δεκαετία του 1960 για την παροχή ενέργειας σε διαστημόπλοια. Οι κυψέλες υδρογόνου συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται στα διαστημόπλοια. Ακόμα, έχουν κατασκευαστεί και πρωτότυπα αεροπλάνα που λειτουργούν με κυψέλες. Ένα παράδειγμα είναι το πρωτότυπο μη επανδρωμένο "Helios", που είχε συλλέκτες ηλιακής ενέργειας στα φτερά του ώστε να παράγει υδρογόνο με ηλεκτρόλυση κατά την πτήση και στη συνέχεια να το χρησιμοποιεί.



[6]

Πρωτότυπα πλοία και υποβρύχια που χρησιμοποιούν κυψέλες υδρογόνου έχουν κατασκευαστεί στη Γερμανία, στην Αγγλία, στις ΗΠΑ και στον Καναδά. Ειδικά για τέτοιες εφαρμογές, οι κυψέλες παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις ντιζελομηχανές, όπως αυξημένη αποδοτικότητα, χαμηλότερο κόστος καυσίμων, μικρότερες εκπομπές θερμότητας, λιγότερες δονήσεις και χαμηλότερα επίπεδα θορύβου. Ειδικά τα δυο τελευταία είναι πολύ σημαντικά γιατί κάνουν πιο δύσκολη την ανίχνευση των πλοίων και των υποβρυχίων.

Επιπλέον, με τις κυψέλες τα υποβρύχια μπορούν να μείνουν για εβδομάδες στο βυθό χωρίς να ανέβουν στην επιφάνεια. Οι κυψέλες καυσίμου βρίσκουν εφαρμογές και στην παραγωγή ενέργειας για οικίες και βιομηχανίες. Καταρχήν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βοηθητικές πηγές ενέργειας, αντί για τις γεννήτριες που χρησιμοποιούνται σήμερα, σε περίπτωση διακοπής του ρεύματος λόγω προβλημάτων του δικτύου ηλεκτροδότησης. Μπορούν ακόμα να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή ενέργειας σε μόνιμη βάση, σε ένα σύστημα με καταναμημένη παραγωγή ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση σε κάθε κτήριο στο οποίο θα χρησιμοποιούνται κυψέλες θα εγκαθίστανται φωτοβολταϊκές γεννήτριες και ανεμογεννήτριες. Η ενέργεια που θα παράγεται από αυτές και που δε θα μπορεί να καταναλωθεί αμέσως, θα χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου με τη μέθοδο της ηλεκτρόλυσης, το οποίο στη συνέχεια θα αποθηκεύεται για μελλοντική χρήση.



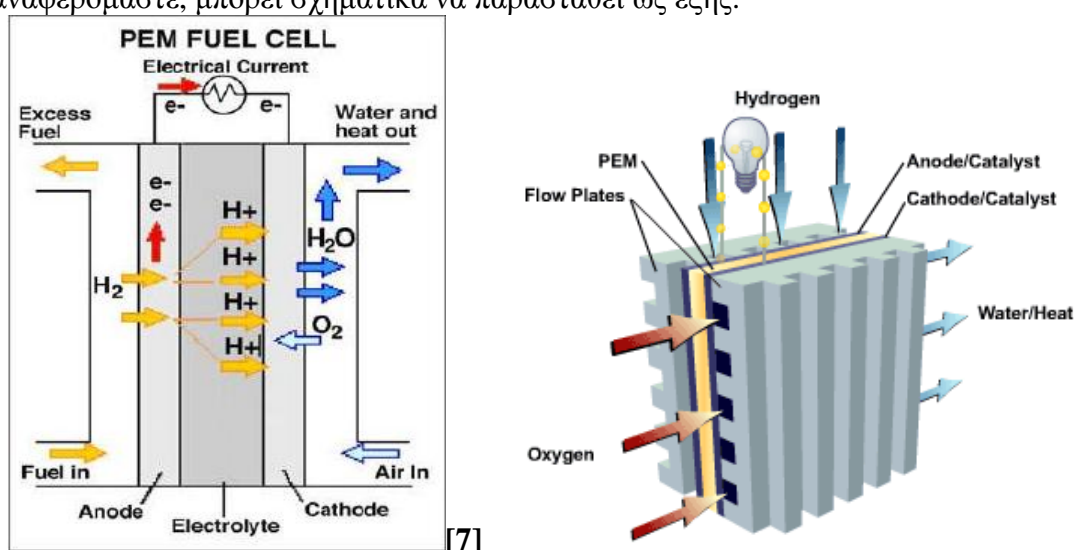
Παράλληλα όταν η ενέργεια που θα παράγεται από τις ανανεώσιμες πηγές και από τις κυψέλες δε θα είναι επαρκής, αυτή θα παρέχεται από το δίκτυο, ενώ όταν είναι πλεονάζουσα θα διοχετεύεται σε αυτό. Σε πολύ μεγάλες εγκαταστάσεις το υδρογόνο μπορεί να παράγεται και με την αναμόρφωση του φυσικού αερίου. Ακόμα, όταν η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από κυψέλες καυσίμου συνδυάζεται με την αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας που εκλύεται (συμπαραγωγή), ο βαθμός απόδοσης φτάνει το 80% .

Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν ακόμα να αντικαταστήσουν τις μπαταρίες στις ηλεκτρονικές συσκευές, με κύριο πλεονέκτημα τη μεγάλη πυκνότητα ενέργειας. Για παράδειγμα, ένα κινητό που λειτουργεί με κυψέλες υδρογόνου θα μπορεί να έχει αυτονομία μέχρι και ένα μήνα, ενώ ένας φορητός υπολογιστής μέχρι και δέκα ώρες. Αντίστοιχα οφέλη θα υπάρχουν για φωτογραφικές μηχανές, κάμερες, ηλεκτρικά εργαλεία και πολλές άλλες συσκευές . Σημειώνεται ότι οι κυψέλες που έχουν κατασκευαστεί ειδικά για τέτοιες εφαρμογές χρησιμοποιούν μεθανόλη, ένα πολύ φθινό καύσιμο.

## 2.4) Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου

Σήμερα, υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τύποι κυψελών καυσίμου οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά, προκειμένου να παραχθεί ενέργεια από το υδρογόνο. Το βασικότερο χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί αυτούς τους τύπους των κυψελών καυσίμου, αποτελεί το είδος του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιεί ο καθένας τους, προκειμένου να διευκολύνει την ένωση του καυσίμου τους υδρογόνου με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα και να παράγει έτσι τον ηλεκτρισμό ή τη θερμότητα.

Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενη κυψέλη είναι η κυψέλη καυσίμου τύπου PEMFC (κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων ή proton exchange membrane fuel cell). Στον συγκεκριμένο τύπο κυψέλης καυσίμου, η πολυμερής μεμβράνη της ανταλλαγής πρωτονίων, κατέχει τον ρόλο του ηλεκτρολύτη. Η λειτουργία του συγκεκριμένου τύπου κυψέλης καυσίμου PEMFC στον οποίο αναφερόμαστε, μπορεί σχηματικά να παρασταθεί ως εξής:



Όπως παρατηρούμε από την αριστερή εικόνα του παραπάνω σχήματος, το κυριότερο μέρος μιας κυψέλης καυσίμου PEMFC αποτελείται από την ηλεκτρολυτική διάταξη που αυτή περιέχει στο εσωτερικό της. Στην ηλεκτρολυτική αυτή διάταξη, τα δύο ηλεκτρόδια της διαχωρίζονται μεταξύ τους από την μεμβράνη της κυψέλης καυσίμου η οποία, όπως είπαμε, είναι κατασκευασμένη από πολυμερές υλικό.

Η μεμβράνη αυτή αποτελεί τον ηλεκτρολύτη της κυψέλης. Μεταξύ της πολυμερούς μεμβράνης της και των ηλεκτροδίων της ηλεκτρολυτικής της διάταξης, υπάρχει ένα λεπτό στρώμα από μεταλλικό υλικό, το οποίο λειτουργεί σαν καταλύτης της. Ο καταλύτης και ο ηλεκτρολύτης (πολυμερής μεμβράνη), αποτελούν τα βασικότερα τμήματα της δομής, όχι μόνο της ίδιας, αλλά και γενικότερα όλων των γνωστών τύπων κυψελών καυσίμου που υπάρχουν σήμερα.

Η κυψέλη καυσίμου PEMFC που εξετάζουμε επί του παρόντος, χρησιμοποιείται σήμερα κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο παράγεται από την οξείδωση του καυσίμου υδρογόνου της με το οξυγόνο του.

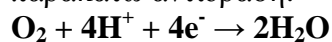
Αυτό επιτυγχάνεται με την αντίδραση των δύο αυτών υλικών, μέσα στην ηλεκτρολυτική διάταξη που περιέχει στο εσωτερικό της. Η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος από μία κυψέλη έχει ως εξής : [7]

- Αρχικά, το υδρογόνο που εισέρχεται στην ηλεκτρολυτική της διάταξη, τροφοδοτεί την άνοδό της (το αρνητικό της ηλεκτρόδιο) και αφού έρθει εκεί σε επαφή με τον καταλύτη της, διαχωρίζεται στη συνέχεια σε πρωτόνια (θετικά ιόντα υδρογόνου (H<sup>+</sup>)) και σε αρνητικά σωματίδια (ηλεκτρόνια (e<sup>-</sup>)). Η άνοδος της ηλεκτρολυτικής διάταξης και ο μεταλλικός καταλύτης της κυψέλης είναι κατασκευασμένοι έτσι, ώστε το υδρογόνο να διαχέεται στο εσωτερικό τους με ομοιογενή τρόπο.

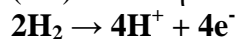
Η ομοιογενής αυτή διάχυση, συντελεί στην ομαλότερη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου και επομένως και στην αποδοτικότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ηλεκτρόνια τα οποία, όπως αναφέραμε προηγουμένως, απελευθερώνονται από το υδρογόνο στην άνοδο της κυψέλης, μεταφέρονται στη συνέχεια μέσω ενός εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος προς την κάθοδο αυτής (δηλαδή προς το θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο της). Από την κίνηση αυτή των ηλεκτρονίων, δημιουργείται το συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα της κυψέλης.

Θα πρέπει να τονίσουμε, ότι η πολυμερής μεμβράνη που υπάρχει μεταξύ της ανόδου και της καθόδου κάθε κυψέλης, διευκολύνει αυτή τη κίνηση των ηλεκτρονίων μέσα στο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα, με το να τα εμποδίζει να εισέλθουν στο εσωτερικό της μάζας της, επιτρέποντας παράλληλα μόνο στα θετικά ιόντα του υδρογόνου (H<sup>+</sup>) να εισέλθουν μέσα σ' αυτό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από τις κυψέλες να είναι συνεχές και να έχει ικανοποιητική ισχύ. Επίσης, τόσο η άνοδος όσο και ο καταλύτης των κυψελών, κατασκευάζονται πάντα από αγωγίμο υλικό, προκειμένου να διευκολύνουν την κίνηση των θετικών ιόντων υδρογόνου στην περιοχή τους.

- Μετά τον διαχωρισμό του υδρογόνου, στην άνοδο των κυψελών, σε πρωτόνια και σε ηλεκτρόνια, τα πρωτόνια του υδρογόνου διαπερνούν την εξωτερική επιφάνεια των πολυμερών μεμβρανών τους και εισέρχονται στο εσωτερικό της μάζας τους. Εξερχόμενα από αυτές, στη συνέχεια φτάνουν στην κάθοδο των PEMFC, όπου ενώνονται με το μοριακό οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα που έχει διοχετευτεί στο εσωτερικό των κυψελών. Από την ένωσή τους αυτή, προκύπτει νερό σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



Στον χώρο της καθόδου των κυψελών, υπάρχει ένα δεύτερο στρώμα από μεταλλικό καταλύτη, όμοιο με το πρώτο μεταλλικό στρώμα της ανόδου τους, το οποίος συντελεί στον σχηματισμό του παραπάνω νερού. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από την παραπάνω αντίδραση σχηματισμού του νερού στην κάθοδο των κυψελών, κατά την αντίδραση των πρωτονίων του υδρογόνου με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα, συμμετέχουν σ' αυτή και ορισμένα ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά δεν είναι άλλα, από τα ηλεκτρόνια που έχουν προκύψει στην άνοδο της κυψέλης, κατά τη διάσπαση του μοριακού της υδρογόνου σε πρωτόνια υδρογόνου (H<sup>+</sup>) και σε ηλεκτρόνια:



Τα ηλεκτρόνια αυτά, έχουν διοχετευτεί μέσω του εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος της κυψέλης, στην κάθοδο αυτής.

- Όπως αναφέραμε παραπάνω, ο μεταλλικός καταλύτης επιταχύνει στην κάθοδο την ένωση των πρωτονίων υδρογόνου με το μοριακό οξυγόνο. Εκτός από αυτό, ο μεταλλικός καταλύτης επιταχύνει επίσης την διάσπαση του μοριακού υδρογόνου σε πρωτόνια υδρογόνου στην άνοδο αυτών.

Το κάθε ένα από τα δύο παράλληλα στρώματα του μεταλλικού καταλύτη, αποτελείται συνήθως από μία πολύ λεπτή επιφάνεια από λευκόχρυσο (Pt), η οποία βρίσκεται πάνω σε μία παχύτερη επιφάνεια από άνθρακα (C). Η λεπτή επιφάνεια του Pt είναι το μέρος εκείνο του μεταλλικού καταλύτη το οποίο έρχεται σε επαφή με την μεμβράνη των κυψελών. Ο μεταλλικός καταλύτης χαρακτηρίζεται από τραχύτητα της εξωτερικής του επιφάνειας και από πορώδη διαμόρφωση της μάζας του, έτσι ώστε να μπορεί να μεγιστοποιεί την εκτεθειμένη επιφάνειά του στα υλικά με τα οποία έρχεται σε επαφή (πρωτόνια υδρογόνου, ηλεκτρόνια και μοριακό οξυγόνο).

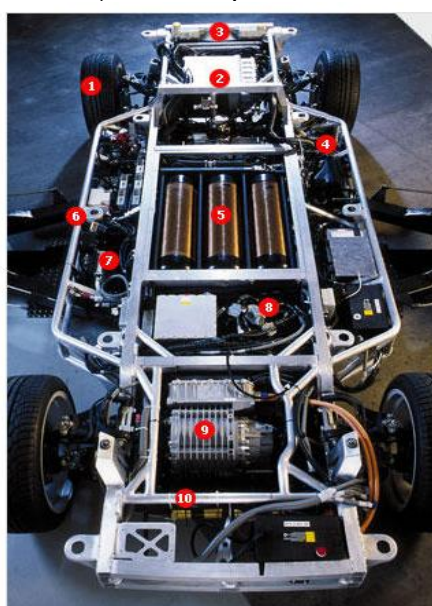
Η παραπάνω διαδικασία που μόλις περιγράψαμε, συνοψίζει σε γενικές γραμμές τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος από μια κυψέλη καυσίμου. Οι αντιδράσεις που χαρακτηρίζουν αυτή τη διαδικασία, μπορούν να αποδοθούν συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα:[7]

Στην ανοδο	$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$
Στην κάθοδο	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
Ολική αντίδραση	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

Η τάση που παράγεται συνήθως στη πράξη, κατά τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης του υδρογόνου με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα, μέσα σε μία κυψέλη καυσίμου, είναι της τάξης των 0,7 Volt.

Επειδή όμως η παραγόμενη αυτή τάση είναι πολύ μικρή για τις περισσότερες εφαρμογές, συνήθως χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία κυψέλες καυσίμου, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η συνολική τάση που παράγεται από αυτές κατά την ηλεκτρόλυση του υδρογόνου, να επαρκεί για τις πρακτικές εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται.

Η συνδεσμολογία, περισσότερων από μία σε σειρά για την παραγωγή επαρκούς και αξιοποιήσιμης ηλεκτρικής τάσης, αναφέρεται σαν συστοιχία κυψελών καυσίμου ή fuel cell stack. Ο ίδιος τρόπος συνδεσμολογίας χρησιμοποιείται στη πράξη και για τους υπόλοιπους τύπους κυψελών καυσίμου που θα δούμε στη συνέχεια, προκειμένου να παραχθεί η αναγκαία ηλεκτρική τάση για τις πρακτικές τους εφαρμογές. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται μια συστοιχία κυψελών καυσίμου συνδεδεμένων σε σειρά, η οποία χρησιμοποιείται για να κινήσει ένα αυτοκίνητο υδρογόνου:



[8]

## **2.5) Πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου**

### **2.5.1) Έναντι των μηχανών εσωτερικής καύσης**

- Αποτελούν πιο καθαρή πηγή ενέργειας. Οι κυψέλες καυσίμου παράγουν μόνο ηλεκτρική ενέργεια, θερμότητα και νερό.

Το υδρογόνο όμως δεν απαντάται μόνο του στη φύση, οπότε πρέπει να παραχθεί.

Η παραγωγή υδρογόνου γίνεται βασικά με τρεις τρόπους:

- 1) με τη χρήση ορυκτών καυσίμων,
- 2) με τη βοήθεια ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η φωτοβολταϊκή, η αιολική, η υδραυλική, η γεωθερμική και η βιομάζα, και τέλος
- 3) με ηλεκτρόλυση.

Επικρατέστερη μέθοδος παραγωγής υδρογόνου αυτή τη στιγμή είναι η αναμόρφωση του φυσικού αερίου.

Ακόμα πάντως και σε αυτή την περίπτωση, που το υδρογόνο παράγεται από ορυκτό καύσιμο, η ρύπανση που προκαλείται είναι αρκετά μικρότερη σε σύγκριση με τις μηχανές που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα.

- Έχουν μεγαλύτερη απόδοση. Οι κυψέλες καυσίμου δε λειτουργούν σε θερμοδυναμικό κύκλο, επομένως δεν έχουν το αντίστοιχο αυστηρό όριο για την απόδοση, αλλά ισχύει για αυτές το όριο απόδοσης της χημικής αντίδρασης, το οποίο όμως είναι υψηλότερο. Ακόμα, τα μηχανικά μέρη που χρειάζονται, για παράδειγμα οι αντλίες, έχουν πολύ λιγότερες απώλειες από τα κινούμενα μέρη μιας μηχανής. Με συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, η απόδοση μπορεί να ξεπεράσει το 90%.

- Είναι πολύ πιο αθόρυβα, καθώς τα κινούμενα μηχανικά μέρη είναι ελάχιστα.

- Είναι πιο αξιόπιστα, για τον ίδιο λόγο.

- Η συντήρησή τους είναι ευκολότερη.

- Λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

- Ανταποκρίνονται πιο γρήγορα στις μεταβολές του φορτίου.

- Ευνοούν την κατανεμημένη παραγωγή ενέργειας.

### **2.5.2) Έναντι των μπαταριών**

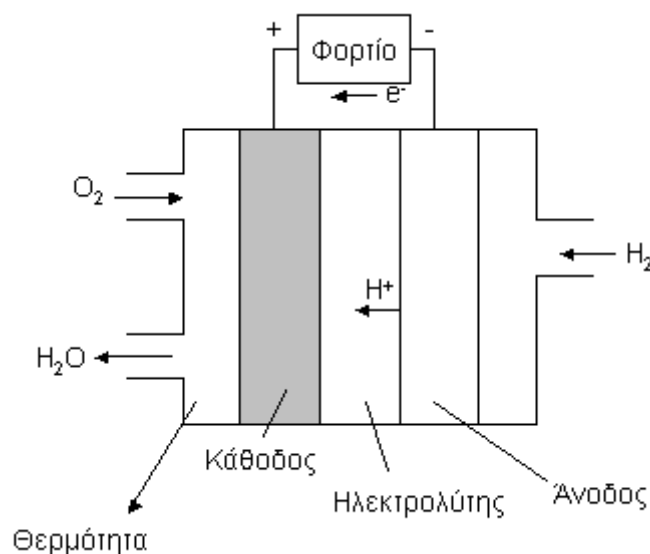
- Οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ενέργεια όσο τροφοδοτούνται με υδρογόνο και οξυγόνο. Αντίθετα οι μπαταρίες χρειάζονται φόρτιση.

- Τα συστήματα κυψελών υδρογόνου είναι ελαφρύτερα σε σχέση με τα αντίστοιχα συστήματα με μπαταρίες.

- Οι κυψέλες υδρογόνου είναι πιο αξιόπιστες, χρειάζονται λιγότερο τακτικά συντήρηση και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

## 2.6) Μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου

- Το κόστος των κυψελών καυσίμου είναι ακόμα πολύ μεγάλο.
- Η παραγωγή, η μεταφορά, η διανομή και η αποθήκευση του υδρογόνου παρουσιάζουν πολλές δυσκολίες. Ακόμα, η δημιουργία των κατάλληλων υποδομών για το δίκτυο μεταφοράς και διανομής του υδρογόνου απαιτεί τεράστια κεφάλαια.
- Το αέριο υδρογόνο έχει πολύ μεγάλο όγκο και αποθηκεύεται δύσκολα. Ακόμα και το υγρό υδρογόνο έχει πολύ μεγαλύτερο όγκο από ποσότητα πετρελαίου που αποδίδει την ίδια ποσότητα ενέργειας.
- Συνυπολογίζοντας όλο τον εξοπλισμό που χρειάζονται για τη λειτουργία τους, τα συστήματα κυψελών καυσίμου είναι βαρύτερα και πιο ογκώδη από μηχανές εσωτερικής καύσης, που είναι ικανές να παράγουν αντίστοιχη ποσότητα ενέργειας. ως προς τη δομή, η κυψέλη καυσίμου αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια – άνοδο και κάθοδο - τα οποία χωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη (σχήμα). Το στρώμα της ανόδου και της καθόδου αποτελείται από το στρώμα διάχυσης αερίων, που είναι υπεύθυνο για την ομοιόμορφη κατανομή των αερίων στην επιφάνεια του καταλύτη. Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην κυψέλη συμβαίνουν στην επιφάνεια πριν τον ηλεκτρολύτη, η οποία είναι εμπλουτισμένη με έναν καταλύτη – συνήθως λευκόχρυσος ή παλλάδιο



[9]

Η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την αντίδραση του οξυγόνου με το καύσιμο (υδρογόνο, μεθάνιο, μεθανόλη) μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Για την ακρίβεια η απόσπαση των ηλεκτρονίων από τα μόρια του καυσίμου οδηγούνται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα, παράγοντας με αυτόν τον τρόπο ηλεκτρική ενέργεια. Η θεωρητική τιμή της τάσεως για κυψέλες καυσίμου υδρογόνου κυμαίνεται στα 1.23V για θερμοκρασία 25°C. Στην πράξη όμως το φάσμα των τιμών της τάσεως βρίσκεται περίπου στο 0.5-1V. Για την επίτευξη μεγαλύτερης τάσεως συνδέονται πολλές κυψέλες μαζί, δημιουργώντας μια συστοιχία κυψελών (stack)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΥΠΟΙ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

### 3.1) Τύποι κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου διακρίνονται ανάλογα με τον τύπο του ηλεκτρολύτη που διαθέτουν. Έτσι έχουμε :[10]

- 1) Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC)
- 2) Κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC)
- 3) Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC),
- 4) Κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC),
- 5) Κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC)

Ένα άλλος τρόπος διάκρισης είναι η θερμοκρασία λειτουργίας:

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

Μεσαίας θερμοκρασίας είναι οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC), ενώ υψηλής θερμοκρασίας είναι οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) και οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC).

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

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

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

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

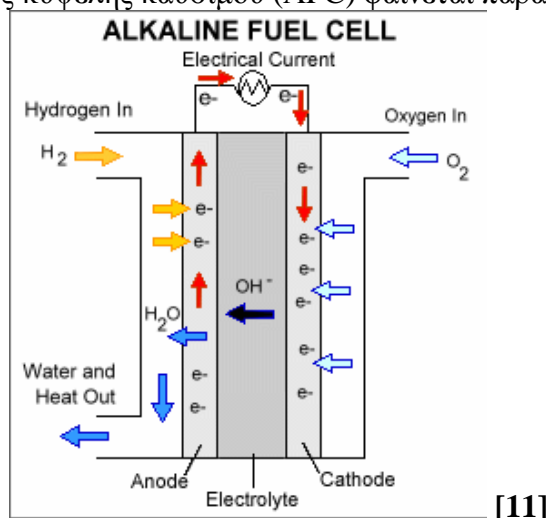
### 3.1.1) ΑΛΚΑΛΙΚΕΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (AFC)

#### Εισαγωγή

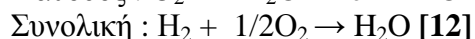
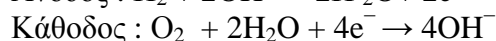
Στην αλκαλική κυψέλη καυσίμου, ο ηλεκτρολύτης είναι υδροξείδιο του καλίου (KOH), λόγω της υψηλής αγωγιμότητας των ιόντων υδροξυλίου. Η κυψέλη λειτουργεί σε θερμοκρασίες 60-100°C και σε πίεση ατμοσφαιρική. Τυπική πυκνότητα ισχύος είναι 0.2-0.3W/cm<sup>2</sup>. Οι προβλεπόμενες ώρες λειτουργίας της είναι πάνω από 10000 ώρες, ενώ το κόστος της προβλέπεται να είναι 200\$/kW. Το καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο.[10]

#### Αρχή λειτουργίας

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



Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις δίνονται παρακάτω.



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

#### Περιγραφή της κυψέλης καυσίμου

Οι κυψέλες αυτού του τύπου χρησιμοποιούν διάλυμα υδροξειδίου του καλίου, ως ηλεκτρολύτη και μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια ποικιλία πολύτιμων ή μη, μετάλλων ως καταλύτες στην άνοδο και την κάθοδο. Έτσι στην άνοδο ο καταλύτης μπορεί να είναι από νικέλιο (Ni) ή λευκόχρυσο (Pt), ενώ στην κάθοδο ο καταλύτης είναι από λευκόχρυσο (Pt) ή οξείδια του νικελίου. Μεταξύ των αντιδράσεων στην άνοδο και την κάθοδο, η αντίδραση της καθόδου είναι η πιο αργή, αφού χρειάζεται περισσότερος χρόνος για να πραγματοποιηθεί, από αυτή της ανόδου.

Παρόλα αυτά στην αλκαλική κυψέλη καυσίμου, η αντίδραση στο ηλεκτρόδιο της καθόδου, πραγματοποιείται πολύ πιο γρήγορα από ότι στους άλλους τύπους κυψελών, με αποτέλεσμα η τάση λειτουργίας κάθε κυψέλης να φτάνει τα 0.875V, αρκετά υψηλότερη από τις υπόλοιπες κυψέλες καυσίμο



## Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αλκαλικών κυψελών(AFC).

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

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

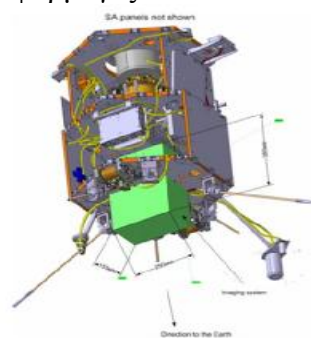
Η χρήση διαβρωτικού ηλεκτρολύτη είναι ένα ακόμα μειονέκτημα. Ο ηλεκτρολύτης διαβρώνει τα υλικά γύρω του, με αποτέλεσμα την μείωση της διάρκειας ζωής της κυψέλης και την αύξηση του κόστους της. Στην αύξηση του κόστους της συντελεί και η χρήση ακριβού καταλύτη όπως ο λευκόχρυσος. Η χρησιμοποίηση λιγότερο ακριβών καταλυτών όπως ο άνθρακας και ηλεκτρόδια κατασκευασμένα από οξείδια μετάλλων, είναι υπό διερεύνηση. [10]

## Εφαρμογές

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



[13]



[14]

Σε σχέση με τις PAFC, είναι ελκυστικότερες για χρήση στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Αυτό οφείλεται στη δυνατότητα της χρησιμοποίησης λιγότερο ακριβού καταλύτη, όπως το νικέλιο στην άνοδο και το οξείδιο του νικελίου στην κάθοδο. Όσο οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου, απαιτούν για την λειτουργία τους καθαρό υδρογόνο και οξυγόνο, δεν μπορεί να γίνει ευρεία χρήση τους σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Παρακάτω φαίνεται μια φορητή γεννήτρια ισχύος 2.4kW στα 48Vdc. Ο βαθμός απόδοσης υπερβαίνει το 50% και είναι πολύ μεγαλύτερος από τον βαθμό απόδοσης των γεννητριών που λειτουργούν με βενζίνη.[10]



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

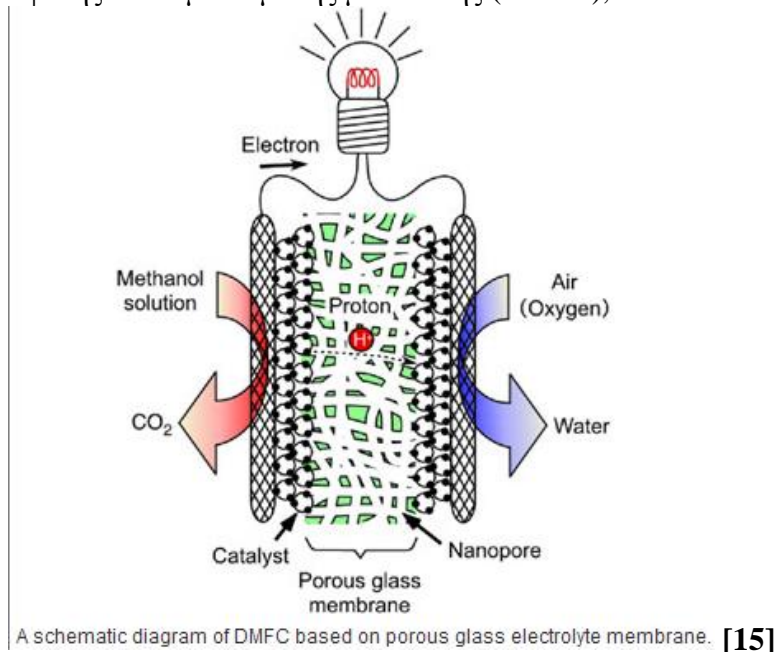
### 3.1.2)ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΑΜΕΣΗΣ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ (DMFC)

#### Εισαγωγή

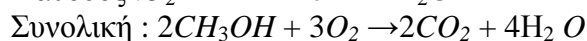
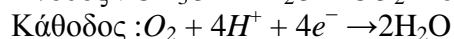
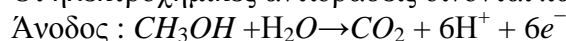
Ο τύπος αυτός είναι νέος σε σχέση με τις υπόλοιπες κυψέλες καυσίμου. Είναι υβρίδιο της PEM, αλλά αντί υδρογόνου, χρησιμοποιεί μεθανόλη ως καύσιμο. Η θερμοκρασία λειτουργίας της είναι μεταξύ 50-100°C, σε ατμοσφαιρική πίεση και δίνει πυκνότητα ισχύος 0.04-0.23 W/cm<sup>2</sup>. Η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής είναι πάνω από 10000 ώρες και το κόστος της προβλέπεται να είναι 200\$/kW. .[10]

#### Αρχή λειτουργίας

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



Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις δίνονται παρακάτω.



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

#### Περιγραφή της κυψέλης

Ο ηλεκτρολύτης είναι μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM), έχει όμως μεγαλύτερο πάχος. Ο καταλύτης στην άνοδο είναι διμεταλλικός από λευκόχρυσο και στη κάθοδο λευκόχρυσος. Στην άνοδο, ο καταλύτης από μόνος τους έλκει το υδρογόνο, από το υγρό μεθάνιο. [10]

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

Η κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC), έχει παρόμοια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα με την κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM). Δεν χρειάζεται όμως αναμορφωτή για τη λειτουργία της, γεγονός που μειώνει το κόστος. Η μεθανόλη είναι το απλούστερο οργανικό καύσιμο, το οποίο πολύ οικονομικά και αποδοτικά μπορεί να παραχθεί σε μεγάλη κλίμακα, από καύσιμα όπως το κάρβουνο και το φυσικό αέριο. Η μεθανόλη είναι υγρό καύσιμο και είναι πολύ εύκολη η αποθήκευση η διανομή της, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, τομείς όπου το υδρογόνο πάσχει.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα οφείλεται στην αργή αντίδραση της ανόδου, όπου η οξείδωση της μεθανόλης, είναι πολύπλοκότερη από αυτή του υδρογόνου και πραγματοποιείται πολύ αργά. Αυτό έχει αποτέλεσμα η ισχύς να είναι πολύ μικρή, σε σχέση με το μέγεθος της κυψέλης.[10]

### Εφαρμογές

Η κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης, είναι κατάλληλη για εφαρμογή σε ηλεκτρονικές συσκευές, όπου χρειάζεται μικρή ισχύς και μεγάλη διάρκεια λειτουργίας, όπως τα κινητά τηλέφωνα, τους φορητούς υπολογιστές, τις φωτογραφικές μηχανές. Η αντικατάσταση των μπαταριών λιθίου, είναι ο κύριος στόχος τους, αφού επαναφορτίζονται πολύ πιο γρήγορα, απλά βάζοντας λίγη μεθανόλη, μέσα στη συσκευή. Για να εφαρμοστεί στον τομέα των ηλεκτρικών οχημάτων, θα πρέπει να αυξηθεί η πυκνότητα ισχύος της και να μειωθεί το κόστος της. Παρακάτω φαίνεται mp3 player της Toshiba, το οποίο λειτουργεί με κυψέλη καυσίμου άμεσου μεθανόλης.



[16]



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

### 3.1.3)ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΦΩΣΦΟΡΙΚΟΥ ΟΞΕΟΣ (PAFC)

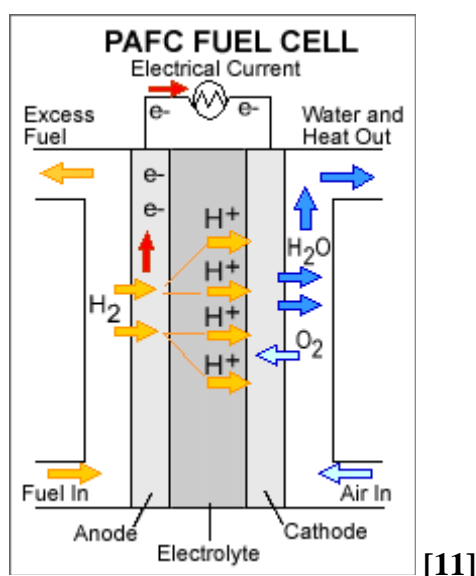
#### Εισαγωγή

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

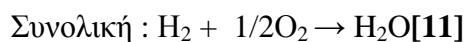
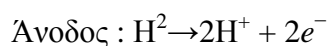
Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι μεταξύ 150°C και 210°C και η πίεση ατμοσφαιρική ή λίγο μεγαλύτερη. Η παραγόμενη πυκνότητα ισχύος είναι 0.2 – 0.25 W/cm<sup>2</sup>, η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής είναι 40 000 ώρες και το κόστος της προβλέπεται να είναι μεγαλύτερο των 1000\$/kW. Το καύσιμο, εκτός από υδρογόνο, μπορεί να είναι φυσικό αέριο ή μεθανόλη σε συνδυασμό με αναμορφωτή καυσίμου.[10]

#### Αρχή λειτουργίας

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



Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις δίνονται παρακάτω.



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

## **Περιγραφή της κυψέλης**

Στην αρχή της εξελίξεως τους, πολλοί διαφορετικοί τύποι οξέων δοκιμάζονταν για ηλεκτρολύτες, όπως το θειικό οξύ, τα υπερχλωρικά οξέα και το φωσφορικό οξύ. Τελικά επικράτησε το φωσφορικό οξύ, κυρίως λόγω της ανοχής της στο CO<sub>2</sub> που βρίσκεται στο καύσιμο και στο οξειδωτικό μέσο. Επιπλέον είναι σταθερό κατά τη λειτουργία της κυψέλης σε υψηλές θερμοκρασίες και έχει μεγάλη αγωγιμότητα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 150°C.

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

Η θερμοκρασία λειτουργίας της PAFC είναι διπλάσια από ότι της PEM. Η υψηλή αυτή θερμοκρασία είναι αναγκαία λόγω του νερού που παράγεται ως παραπροϊόν. Εάν η θερμοκρασία ήταν χαμηλότερη, αυτό θα διαλυόταν στον ηλεκτρολύτη. Έτσι η θερμοκρασία πρέπει να είναι αρκετά υψηλή έτσι ώστε το νερό να εξέρχεται της κυψέλης υπό μορφή ατμού. Η θερμοκρασία δεν μπορεί να είναι υπερβολικά υψηλή καθώς το φωσφορικό οξύ αποσυντίθεται μετά τους 210°C.[10]

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

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

Το μειωμένο κόστος επεξεργασίας του καυσίμου μειώνει με τη σειρά του το κόστος όλης της μονάδας PAFC και της δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί και άλλα καύσιμα, προερχόμενα είτε από τα αέρια των χωματερών (μεθάνιο- CH<sub>4</sub>) είτε από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού και επεξεργασίας λυμάτων. Σε μια τέτοια περίπτωση χρήσης κάποιου άλλου καυσίμου, η μοναδική αλλαγή που απαιτείται είναι μικρές προσαρμογές στο σύστημα επεξεργασίας και παροχής του καυσίμου.

Ένα δεύτερο πλεονέκτημα είναι ότι η τεχνολογία γύρω από την PAFC είναι η πλέον ώριμη, σε επίπεδο ανάπτυξης και εμπορευματοποίησης. Ο συγκεκριμένος τύπος αναπτύσσεται για περισσότερο από 20 χρόνια. Έτσι, όπως και με τις αλκαλικές κυψέλες καυσίμου, το κόστος έχει μειωθεί ενώ η απόδοση αυξάνεται. Η δυνατότητα συμπαραγωγής λόγω της λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες, κάνει την PAFC αποδοτικότερη από τις κυψέλες καυσίμου χαμηλών θερμοκρασιών.

Μειονέκτημα της PAFC, όπως και στην PEM, είναι η χρήση του πολύ ακριβού λευκόχρυσου ως καταλύτη, το οποίο αυξάνει το συνολικό κόστος. Η υψηλή θερμοκρασία είναι ταυτόχρονα και μειονέκτημα, καθώς υπάρχει περίοδος αναμονής, μέχρι η κυψέλη να ζεσταθεί και να λειτουργήσει σωστά. Η κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος, παράγει σχετικά μικρή πυκνότητα ρεύματος και ισχύος και έχει μεγάλο μέγεθος. Οι κυψέλες αυτές είναι αρκετά μεγάλες και βαριές. Συνεπώς είναι δύσκολη η χρησιμοποίησή τους σε οχήματα και σε κινητές εφαρμογές.[10]

## Εφαρμογές

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

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC), έχουν εύρος ισχύος από 50 έως 500kW. Τα μοντέλα παραγωγής, παράγουν συνήθως ισχύ 200kW. Παρακάτω φαίνεται η μονάδα συμπαραγωγής ενέργειας και θερμότητας (PureCell 200), ισχύος 200kW της εταιρείας United Technology. Η παραγωγή θερμότητας φτάνει τα 925 Btu/h. Από το 1991, έχουν εγκατασταθεί παγκοσμίως περισσότερες από 257 μονάδες.



[17]

Το μεγαλύτερο εργοστάσιο κυψελών καυσίμου φωσφορικού οξέος σε λειτουργία, έχει φτιαχτεί από τις εταιρείες International Fuel Cells Corporation και την Toshiba, για την Tokyo Electric Power Company στην Ιαπωνία, ισχύος 11MW. Οι έρευνες επικεντρώνονται στην διεσπαρμένη παραγωγή και στη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας.

Οι σημαντικότεροι κατασκευαστές είναι η UTC Fuel Cells (United Technologies Corp) στις Ηνωμένες Πολιτείες και η Fuji Electric, Toshiba Mitsubishi Electric Companies στην Ιαπωνία.

### 3.1.4)ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΕΡΕΩΝ ΟΞΕΙΔΙΩΝ (SOFC)

#### Εισαγωγή

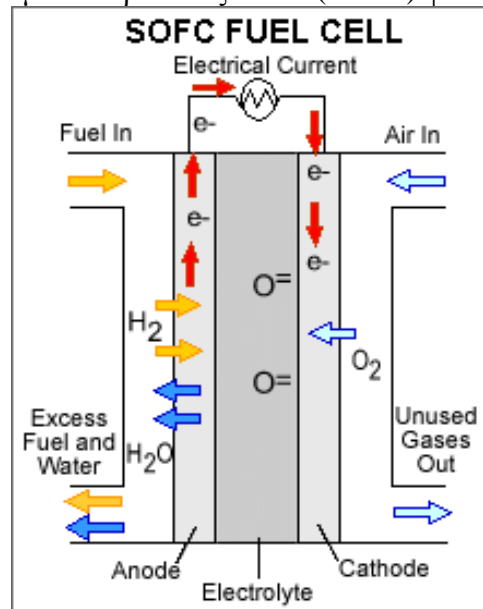
Η κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων, είναι εξ ολοκλήρου στερεή κατασκευή. Ο ηλεκτρολύτης είναι μη πορώδες κεραμικό υλικό, αγωγίμο στα ανιόντα του οξυγόνου, που διέρχονται από το πλέγμα του κρυστάλλου. Για το λόγω αυτό είναι πιο απλή από τα υπόλοιπα συστήματα κυψελών καυσίμου.

Ο ηλεκτρολύτης είναι κράμα υττρίας ( $Y_2O_3$ ) και ζirkονίου, η άνοδος είναι κεραμικό μίγμα νικελίου και ζirkονίου και η κάθοδος είναι μαγγανίτης λανθανίου στρόντιου. Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι μεταξύ  $800^{\circ}C$  και  $1100^{\circ}C$  και η πίεση ατμοσφαιρική.

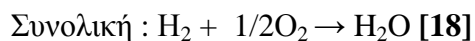
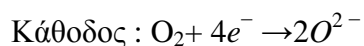
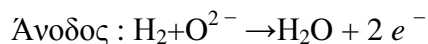
Η παραγόμενη πυκνότητα ισχύος είναι  $0.24 - 0.3 W/cm^2$ , η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής είναι 40 000 ώρες και το κόστος εκτιμάται ότι θα ανέρχεται στα  $1500\$/kW$ . Μπορεί να χρησιμοποιήσει σαν καύσιμο, υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογονάνθρακες και σαν οξειδωτικό μέσο αέρα ή οξυγόνο.[10]

#### Αρχή λειτουργίας

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



Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις δίνονται παρακάτω:



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

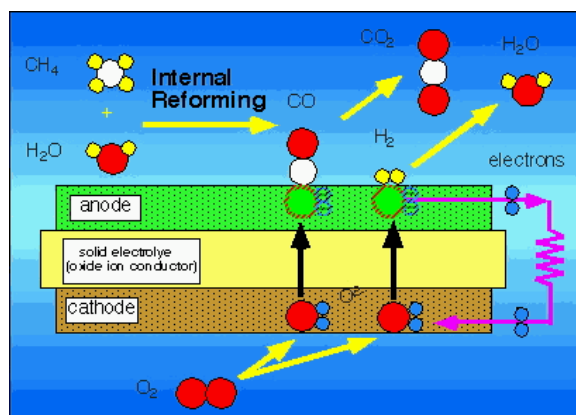
## Περιγραφή της κυψέλης

Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου, δεν είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση πολύτιμων μετάλλων για τον καταλύτη. Όπως και στην MCFC, το καύσιμο μπορεί να είναι τόσο υδρογόνο, όσο και μονοξείδιο του άνθρακα.

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

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

Λειτουργώντας στους  $1000-1100^\circ C$ , τα στερεά οξείδια σχηματίζουν ιόντα υδρογόνου, τα οποία άγονται προς τη ροή του καυσίμου, όπου αντιδρούν με το μονοξείδιο του άνθρακα ( $CO$ ) και το υδρογόνο ( $H_2$ ), ελευθερώνοντας ηλεκτρόνια. Αυτή η διαδικασία είναι αντίθετη με το τι συμβαίνει στις άλλες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου, στις οποίες το υδρογόνο ( $H_2$ ) κατευθύνεται προς τα ηλεκτρόδια και μετά προς την πηγή του οξυγόνου ( $O_2$ ). Αυτή η διαφορά, σε συνδυασμό με τη σταθερότητα των στερεών οξειδίων, επιτρέπει στα συστήματα SOFC να εξαλείψουν την ανάγκη προσθήκης επεξεργαστή καυσίμου και συνεπώς να είναι πιο ευέλικτα από τα συστήματα MCFC, ως προς τον τύπο του καυσίμου που τροφοδοτούνται. Επιπλέον, τα συστήματα SOFC μπορούν να επιτύχουν ακόμα μεγαλύτερες "πυκνότητες" ισχύος, αφού τα στερεά οξείδια έχουν την δυνατότητα να σχηματίζονται σε μεγάλη ποικιλία μορφών και σχημάτων. [10]



Εσωτερική αναμόρφωση κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων



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

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

### **Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC)**

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

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

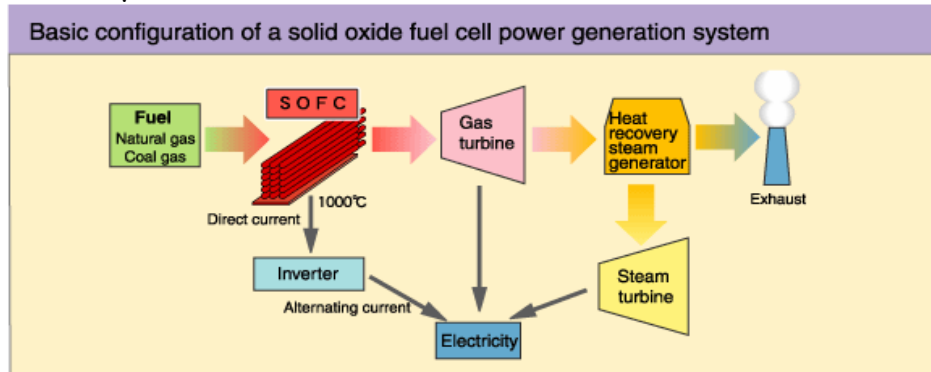
Με τη χρησιμοποίηση στερεού ηλεκτρολύτη, εκλείπουν τα προβλήματα διάβρωσης και διαχείρισης που έχουν οι υγροί ηλεκτρολύτες. Έτσι το σύστημα γίνεται απλούστερο και πιο οικονομικό.

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

[10]

## Εφαρμογές

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



Βασικός σχεδιασμός μονάδας συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (CHP)

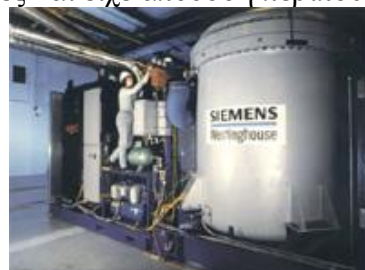
Η μεγαλύτερη κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων που έχει κατασκευαστεί, είναι της Siemens, ισχύος 250kW. Ξεκίνησε τη λειτουργία του το 2003 στο Τορόντο του Καναδά, στις εγκαταστάσεις της εταιρείας Kinectrics Inc. Μέχρι το 2004 το σύστημα είχε συμπληρώσει 1100 ώρες λειτουργίας.



[19]

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

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



[20]

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

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

### 3.1.5) ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΗΓΜΑΤΟΣ ΑΝΘΡΑΚΙΚΩΝ ΑΛΑΤΩΝ (MCFC)

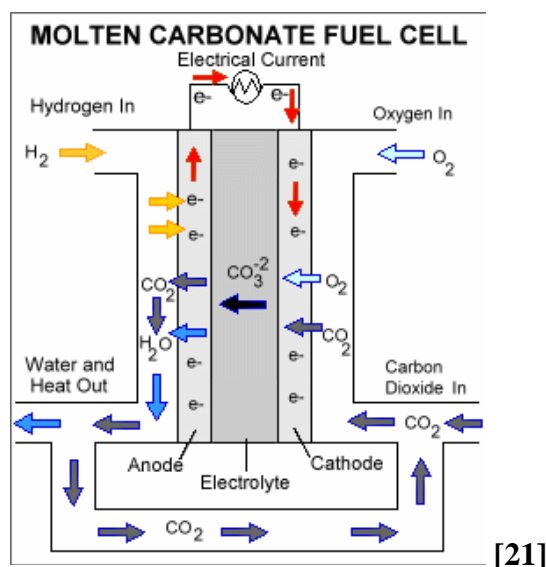
#### Εισαγωγή

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

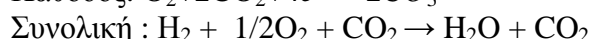
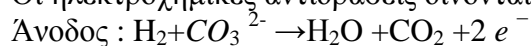
Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι μεταξύ 600°C και 700°C και η πίεση ατμοσφαιρική. Η παραγόμενη πυκνότητα ισχύος είναι 0.1 – 0.2 W/cm<sup>2</sup>, η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής είναι 40 000 ώρες και το κόστος εκτιμάται ότι θα ανέρχεται στα 1000\$/kW. [10]

#### Αρχή λειτουργίας

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



Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις δίνονται παρακάτω.



Στην κάθοδο, το οξυγόνο (O<sub>2</sub>) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) του αέρα αντιδρούν μεταξύ τους και παράγουν ανθρακικά ιόντα (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), τα οποία διαπερνούν μέσα από τον ηλεκτρολύτη της κυψέλης. Αυτά αντιδρούν με το υδρογόνο (H<sub>2</sub>) ή το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) στην άνοδο, και παράγεται νερό (H<sub>2</sub>O), διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), ενώ τα ηλεκτρόνια μέσω εξωτερικού κυκλώματος οδηγούνται από την άνοδο, στην κάθοδο.

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

## Περιγραφή της κυψέλης

Οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), έχουν το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό ότι για να λειτουργήσουν χρειάζονται οπωσδήποτε το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) που περιέχεται στον αέρα. Επειδή λειτουργούν σε υψηλή θερμοκρασία μπορούν, όπως και οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC), να αναμορφώσουν εσωτερικά τα αέρια όπως το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ), το οποίο συνδυάζουν με ατμό ( $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ ) για να σχηματίσουν ένα πλούσιο σε υδρογόνο καύσιμο. Παρ' όλο που η υψηλή θερμοκρασία επιτρέπει την ύπαρξη άνθρακα στην κυψέλη, το θείο (S) μπορεί να την "δηλητηριάσει", ακόμα και σε μικρές ποσότητες .

Το κύριο πρόβλημα με τη λειτουργία και κατασκευή των κυψελών καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC) σχετίζεται με τον σχεδιασμό και την κατασκευή των ηλεκτροδίων τους, τα οποία χρησιμοποιούν καταλύτη από νικέλιο. Τα ηλεκτρόδια αυτά πρέπει να είναι ανθεκτικά στο θερμό και οξειδωτικό περιβάλλον του ηλεκτρολύτη, ο οποίος είναι ένα μίγμα αποτελούμενο κατά 68% από ανθρακικό λίθιο ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) και 32% από υδροξείδιο του καλίου (KOH). Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος αυτού, όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμένο κύκλο φτάνει το 50%. [10]

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

Οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), έχουν τα ίδια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας με τις κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων. [10]

## Εφαρμογές

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

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

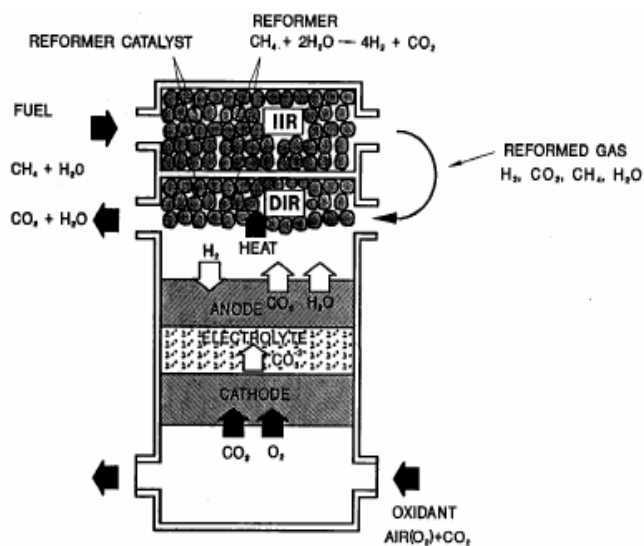


[22]

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

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

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



[10]

Συνδυασμός άμεσης και έμμεσης εσωτερικής αναμόρφωσης

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

Όμως, το κατασκευαστικό εγχείρημα απέτυχε λόγω της κακής ποιότητας κατασκευής, με αποτέλεσμα την χημική καταστροφή των μισών συστοιχιών της μονάδας. Αφού εντοπίστηκε και διορθώθηκε το πρόβλημα, οι άλλες 8 κυψέλες που απέμειναν, ενεργοποιήθηκαν ξανά και λειτούργησαν έως τον Οκτώβριο του ίδιου έτους. [10]

## 3.2) Οι αναμορφωτές των υδρογονούχων καυσίμων

### Ο ρόλος των αναμορφωτών

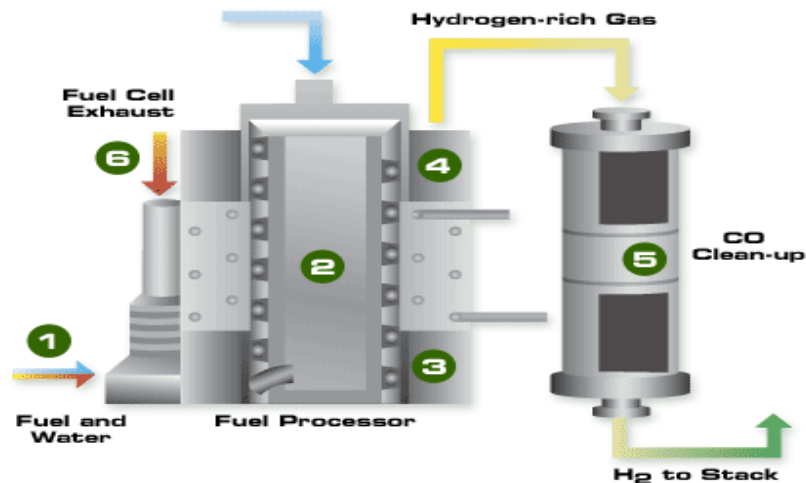
Όπως έχουμε αναφέρει, οι διάφορες κυψέλες καυσίμου υδρογόνου λειτουργούν στο μέγιστο της απόδοσής τους χρησιμοποιώντας «καθαρό» (ή υψηλής περιεκτικότητας) υδρογόνο. ωστόσο, οποιοδήποτε υλικό, το οποίο περιέχει στη μάζα του ποσότητες από υδρογόνο ικανές να τις τροφοδοτήσουν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από αυτές σαν καύσιμο, χωρίς αυτό να επηρεάζει σημαντικά την απόδοσή τους.

Παραδείγματα τέτοιων άλλων υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σ' αυτές αντί του «καθαρού» υδρογόνου, αποτελούν η μεθανόλη, η αιθανόλη, το φυσικό αέριο, τα παράγωγα του πετρελαίου, το υγρό προπάνιο κτλ.. Η μόνη διαφορά που υπάρχει κατά την χρησιμοποίηση των υλικών αυτών στις κυψέλες καυσίμου υδρογόνου αντί του «καθαρού» υδρογόνου είναι, ότι τα υλικά αυτά δεν μπορούν εφαρμοστούν κατά κανόνα ως έχει (εκτός από την περίπτωση των κυψελών άμεσης μεθανόλης (DMFC) και άμεσης αιθανόλης (DEFC) που είδαμε παραπάνω, αλλά αντίθετα θα πρέπει πρώτα να μετατραπούν σε «καθαρό» υδρογόνο, προκειμένου να γίνει εφικτή η χρήση τους.

Η μετατροπή τους αυτή, πραγματοποιείται μέσω μιας βασικής θερμοχημικής επεξεργασίας τους, η οποία ονομάζεται αναμόρφωση (reforming procedure). Γενικά, με τον όρο αναμόρφωση, ονομάζουμε την θερμοχημική εκείνη επεξεργασία ενός αερίου υδρογονάνθρακα, κατά την οποία ο υδρογονάνθρακας αυτός διοχετεύεται σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας διαμέσου ενός χημικού αντιδραστήρα και κατά την οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε αέριο ρεύμα πλούσιο σε «καθαρό» υδρογόνο.

Στην τεχνολογία των ενεργειακών συστημάτων με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, με την εφαρμογή της συγκεκριμένης διαδικασίας σε ειδικές διατάξεις που ονομάζονται αναμορφωτές καυσίμου (fuel processors ή reformers), οι οποίοι μπορούν να έχουν τέτοιο μέγεθος ώστε να τους επιτρέπει για παράδειγμα να τοποθετούνται σε μεταφορικά οχήματα, μπορεί να παραχθεί το υψηλής περιεκτικότητας υδρογόνο που είναι απαραίτητο για την ομαλή λειτουργία των περισσότερων τύπων των κυψελών καυσίμου. [10]

Η χρήση των αναμορφωτών καυσίμου πολλές φορές επιβάλλεται σε διάφορα συστήματα που λειτουργούν με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, αφού στις περισσότερες περιπτώσεις είναι τεχνικά δύσκολο ή δαπανηρό να λειτουργήσουν με «καθαρό» υδρογόνο. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται ένας τυπικός αναμορφωτής υδρογονούχων καυσίμων και επεξηγούνται οι διάφορες διεργασίες που συμβαίνουν στο εσωτερικό του κατά την μετατροπή αυτών σε «καθαρό» υδρογόνο:



[23]

- 1 Air, fuel, and water are preheated
- 2 The mixture enters the reformer where it forms hydrogen and carbon monoxide
- 3 Carbon monoxide reacts with steam to produce additional hydrogen and carbon dioxide
- 4 Sulfur compounds are removed from the fuel
- 5 Any remaining carbon monoxide is preferentially oxidized (burnt) to remove it
- 6 Waste hydrogen returning from the fuel cell is combusted and used in the fuel processor for higher efficiency operation

Η αναμόρφωση των υδρογονούχων καυσίμων από αναμορφωτές είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί σε μεγάλη ή και σε μικρή κλίμακα. Παράδειγμα μεγάλης κλίμακας αναμόρφωσης υδρογονούχων καυσίμων μέσω αναμορφωτή τους, αποτελεί η αναμόρφωση υδρογονούχων υλικών μέσα σε μεγάλα εργοστάσια που υπάρχουν σήμερα για την παραγωγή «καθαρού» υδρογόνου, στα οποία το «καθαρό» υδρογόνο παράγεται από διάφορα υγρά ή αέρια υδρογονούχα καύσιμα (π.χ. μεθάνιο, βιοντίζελ κ.τ.λ.).

Παράδειγμα μικρής κλίμακας αναμόρφωσης υδρογονούχων καυσίμων μέσω αναμορφωτή τους, αποτελεί η τοπική και άμεση τροφοδότηση των κυψελών καυσίμου υδρογόνου σε ένα μεταφορικό όχημα υδρογόνου, στο οποίο σαν πρωτογενές καύσιμό του χρησιμοποιείται για παράδειγμα η συμβατική βενζίνη ή η αιθανόλη.[10]

### 3.3) Απόδοση κυψελών καυσίμου

#### 3.3.1) Θεωρητική προσέγγιση της απόδοσής τους

Γενικά, για μια οποιαδήποτε μηχανή παραγωγής ενέργειας (και επομένως και για μια οποιαδήποτε κυψέλη καυσίμου), ένα από τα βασικότερα στοιχεία που χαρακτηρίζουν την αποδοτικότητά της σε παραγωγή ενέργειας και ισχύος, αποτελεί ο λεγόμενος **πρακτικός (ή πραγματικός) βαθμός απόδοσής της**. Ο πρακτικός βαθμός απόδοσης κάθε ενεργειακής μηχανής, παριστάνει το ποσοστό της συνολικής ισχύος που καταναλώνει η ενεργειακή αυτή μηχανή στην είσοδό της και στη συνέχεια τη μετατρέπει σε ωφέλιμη ισχύ στην έξοδό της. Η γνώση του πρακτικού βαθμού απόδοσης κάθε ενεργειακής μηχανής είναι πολύ χρήσιμη, αφού μέσω αυτής μπορεί να αξιολογηθεί η πρακτική της συμπεριφορά σε ικανότητα παραγωγής ισχύος. Πολλές φορές όμως, είναι εξίσου σημαντική και η γνώση του λεγόμενου θεωρητικού βαθμού απόδοσης κάθε ενεργειακής μηχανής, δηλαδή του μέγιστου ποσοστού της ισχύος εισόδου αυτής, το οποίο θεωρητικά μπορεί να μετατραπεί σε ωφέλιμη ισχύς στην έξοδό της.

Κατά την εξέταση του θεωρητικού βαθμού απόδοσης κάθε ενεργειακής μηχανής, θεωρούμε πάντοτε ότι αυτή λειτουργεί με «ιδανικό» τρόπο, ακολουθώντας πιστά τους νόμους της θερμοδυναμικής κατά την ενεργειακή της παραγωγή. Αυτό σημαίνει, ότι η ενεργειακή μηχανή που εξετάζουμε αποτελεί μια «ιδανική» ενεργειακή μηχανή, η οποία λειτουργεί χωρίς κάποιες απώλειες ισχύος προς το περιβάλλον της (αντίθετα, κατά την πραγματική της λειτουργία, κάθε ενεργειακή μηχανή παρουσιάζει πάντοτε ορισμένες απώλειες ισχύος είτε π.χ. λόγω τριβών στο εσωτερικό της και με το περιβάλλον της, είτε λόγω απαγωγής θερμότητας από το εσωτερικό της, είτε λόγω εμφάνισης κρουστικών φαινομένων κατά τη λειτουργία της κ.α.). Αποτέλεσμα αυτής της μη ύπαρξης κάποιων απωλειών ισχύος κατά τον «ιδανικό» τρόπο λειτουργίας μιας ενεργειακής μηχανής είναι, η ισχύς και ενέργεια που παράγεται από στην έξοδό της να είναι κατά τι μεγαλύτερη από την ισχύ και ενέργειά της που παράγεται κατά την «πραγματική» της λειτουργία. Το γεγονός αυτό προκύπτει και κατά τη σύγκριση του θεωρητικού με τον πραγματικό βαθμό της απόδοσής της, μιας και ο πρώτος προκύπτει πάντα μεγαλύτερος από τον δεύτερο. [24]

Η εξέταση του θεωρητικού βαθμού απόδοσης μιας ενεργειακής μηχανής μας βοηθάει να αξιολογήσουμε τις (θεωρητικές) μέγιστες δυνατότητες αυτής σε παραγωγή ισχύος, έτσι ώστε να βελτιώσουμε την απόδοση ισχύος της και στην πραγματική της λειτουργία. Αυτό επιτυγχάνεται με την κατάλληλη τροποποίηση των εσωτερικών μηχανικών μερών της και την συνεχόμενη σύγκριση του πραγματικού βαθμού απόδοσής της που προκύπτει από αυτή τη μετατροπή, με τον μέγιστο (θεωρητικό) βαθμό της απόδοσής της. Στη διαδικασία αυτή, η γνώση του μέγιστου θεωρητικού βαθμού απόδοσής της στην ουσία βοηθάει στην αποτελεσματική προσέγγιση της πραγματικής της λειτουργίας με αυτή της θεωρητικής της, μιας και προϋποθέτει την καλή γνώση των ενεργειακών διεργασιών που συμβαίνουν στο εσωτερικό της πρακτικά και τη σύγκριση αυτών με την πραγματική της λειτουργία.

Με βάση τα παραπάνω, στη συνέχεια στην παρούσα και στην επόμενη ενότητα, θα συγκρίνουμε τον «ιδανικό» και τον πραγματικό τρόπο λειτουργίας μιας τυχαίας ενεργειακής μηχανής που λειτουργεί με κυψέλες καυσίμου με τον «ιδανικό» και τον πραγματικό τρόπο λειτουργίας μιας οποιασδήποτε θερμικής μηχανής παραγωγής ενέργειας μέσω μηχανικού έργου η οποία τροφοδοτείται από κάποιο ορυκτό καύσιμο.



Η σύγκριση αυτή θα γίνει μέσω των πραγματικών και των θεωρητικών βαθμών απόδοσης των δύο μηχανών.

Όπως υποδεικνύει το 2ο θερμοδυναμικό θεώρημα του Carnot, για κάθε «ιδανική» θερμική ενεργειακή μηχανή παραγωγής ενέργειας μέσω έργου υπάρχει ένα μέγιστο όριο στην θεωρητική απόδοση αυτής. Αυτό σημαίνει, ότι κατά την «ιδανική» της λειτουργία, η θερμική αυτή μηχανή δεν μπορεί να μετατρέψει εξ ολοκλήρου το ποσό της θερμότητας που καταναλώνει στην είσοδό της σε μηχανικό έργο στην έξοδό της. Αιτία γι' αυτό αποτελεί το γεγονός, ότι η «ιδανική» αυτή μηχανή πρέπει κατά τη λειτουργία της να αποβάλλει ένα μέρος της θερμότητας εισόδου της προς το περιβάλλον υπό τη μορφή των θερμικών απωλειών. Μαθηματικά, το θεώρημα αυτό εκφράζεται με την εξής γνωστή σχέση :[25]

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Η σχέση αυτή υπολογίζει τον θεωρητικό βαθμό απόδοσης μιας «ιδανικής» θερμικής μηχανής συναρτήσει δύο χαρακτηριστικών θερμοκρασιών λειτουργίας της (των T1 και T2). Από τις δύο αυτές θερμοκρασίες, η T1 συμβολίζει την θερμοκρασία της «θερμής» δεξαμενής της «ιδανικής» αυτής θερμικής μηχανής, από την οποία αντλεί θερμότητα στην είσοδό της. Η θερμοκρασία T2 (για την οποία πάντοτε ισχύει T2 < T1), συμβολίζει τη θερμοκρασία της «ψυχρής» δεξαμενής της στην οποία αυτή αποβάλλει ένα μέρος της θερμότητας εισόδου της, την οποία είχε αντλήσει από την «θερμή» δεξαμενή της.

Από τη συγκεκριμένη σχέση μπορούμε να συμπεράνουμε, ότι όσο μεγαλύτερη γίνεται η διαφορά μεταξύ των δύο χαρακτηριστικών θερμοκρασιών λειτουργίας T1 και T2 της «ιδανικής» θερμικής μηχανής, δηλαδή αντίστοιχα όσο περισσότερο απέχει η θερμοκρασία T1 της «θερμής» δεξαμενής της από τη θερμοκρασία T2 της «ψυχρής» της, τόσο μικρότερος γίνεται ο θεωρητικός βαθμός της απόδοσής της. Αυτό προφανώς συνεπάγεται, ότι οποιαδήποτε «ιδανική» θερμική μηχανή παρουσιάζει αναγκαστικά ένα θεωρητικό μέγιστο όριο στην αποδοτικότητά της, μιας και ο θεωρητικός βαθμός της απόδοσής της δεν μπορεί να γίνει ποτέ ίσος με 1 (δηλαδή ίσος με 100%).

Αντίθετα, στην περίπτωση μιας «ιδανικής» ενεργειακής μηχανής που λειτουργεί με κυψέλες καυσίμου, ο θεωρητικός βαθμός της απόδοσής της ουσιαστικά δεν περιορίζεται άνω από κάποιο μέγιστο όριο και γι' αυτό μπορεί θεωρητικά να γίνει ίσος με τη μονάδα. Αυτό γιατί, αντίθετα με μία «ιδανική» θερμική μηχανή, κάθε «ιδανική» ενεργειακή μηχανή κυψελών καυσίμου δεν εμπεριέχει τη μετατροπή κάποιου ποσού θερμότητας σε μηχανικό έργο κατά τη λειτουργία της, δηλαδή δεν υφίσταται θερμικές απώλειες κατ' αυτή προς το περιβάλλον της. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η διαφορά των δύο χαρακτηριστικών θερμοκρασιών λειτουργίας της T1 και T2 να μπορεί θεωρητικά να γίνει οσοδήποτε μεγάλη, με αποτέλεσμα ο θεωρητικός βαθμός της απόδοσής να προσεγγίζει τη μονάδα .[25]

Στη πράξη βέβαια, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, κατά την πραγματική λειτουργία μιας ενεργειακής μηχανής κυψελών καυσίμου, ο πρακτικός βαθμός απόδοσης αυτής δεν προκύπτει ποτέ τόσο μεγάλος, μιας και εμφανίζονται πάντοτε κάποιες απώλειες ισχύος προς το περιβάλλον της (οι οποίες οφείλονται κατά κύριο λόγο σε περιφερειακές απώλειές της κατά τον ενεργειακό κύκλο λειτουργίας της).

Παρόλ αυτά, εξαιτίας της μη ύπαρξης ουσιαστικών θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον τους, οι πραγματικές μηχανές κυψελών καυσίμου παρουσιάζουν γενικά

μεγαλύτερα όρια ανοχής σε χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου σε σχέση με τις πραγματικές ενεργειακές θερμικές μηχανές (οι οποίες, όπως γνωρίζουμε, φτάνουν μέχρι και τους 50 °C), γεγονός το οποίο τις καθιστά περισσότερο ικανές από αυτές σε παραγωγή μεγάλων ωφέλιμων ισχύων εξόδου τους και μεγαλύτερων πραγματικών βαθμών απόδοσής τους σε σχέση μ' αυτές. [25]

### 3.3.2) Πρακτική προσέγγιση της απόδοσής τους

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε την απόδοση ισχύος που παρουσιάζουν οι διάφορες κυψέλες καυσίμου στην πράξη, κατά την εφαρμογή τους σε διάφορες μηχανικές διατάξεις παραγωγής ενέργειας. Η απόδοσή τους αυτή θα συγκριθεί με την πραγματική απόδοση ισχύος που παρουσιάζουν οι διάφορες θερμικές μηχανές παραγωγής ενέργειας ορυκτών καυσίμων στη πράξη, όταν λειτουργούν στις ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος μ' αυτές. [26]

Ας θεωρήσουμε έτσι ένα πραγματικό μεταφορικό όχημα υδρογόνου το οποίο τροφοδοτείται από κυψέλες καυσίμου υδρογόνου που ανήκουν σε κάποιο συνηθισμένο τύπο τους (π.χ. κυψέλες καυσίμου PEMFC). Όταν το όχημα αυτό καταναλώσει «καθαρό» υδρογόνο αποδεικνύεται, ότι ο βαθμός απόδοσης της ηλεκτρικής ισχύος των κυψελών καυσίμου του θα ανέλθει σε υψηλά ποσοστά, τα οποία κυμαίνονται μέχρι το 80% περίπου. Ο υψηλός όμως αυτός βαθμός απόδοσης της ισχύος στη συνέχεια θα μειωθεί αρκετά, κατά τη μετατροπή παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική, μέσα στα διάφορα εσωτερικά μέρη του οχήματος που εξετάζουμε. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται κυρίως στις υψηλές τριβές που αναπτύσσουν τα μέρη αυτά μεταξύ τους κατά τη λειτουργία τους και την μετατροπή της ισχύος. Εκτός όμως από αυτό, σε ένα πραγματικό όχημα κυψελών καυσίμου υδρογόνου, ο αρχικά υψηλός βαθμός απόδοσης της ηλεκτρικής ισχύος του μειώνεται περαιτέρω και λόγω της απαγωγής θερμότητας που παρατηρείται από το εσωτερικό του, εξαιτίας της μικρής θερμοκρασιακής διαφοράς που παρουσιάζει συνήθως με το εξωτερικό του περιβάλλον. Η μείωση βέβαια αυτή είναι πολύ μικρότερη από αυτή εξαιτίας των τριβών, μιας και η θερμοκρασιακή διαφορά είναι, όπως είπαμε, σχετικά μικρή. Θα πρέπει επίσης να πούμε, ότι τα περισσότερα οχήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου που έχουν κατασκευαστεί μέχρι σήμερα και χρησιμοποιούνται, δεν έχουν την δυνατότητα να καταναλώνουν απευθείας «καθαρό» υδρογόνο (λόγω της αδυναμίας αποθήκευσής του με κάποια μέθοδο αποθήκευσης εκτός της αέριας και της υγρής), αλλά αντίθετα λειτουργούν με ορισμένα υδρογονούχα καύσιμα τα οποία απαιτούν έναν **αναμορφωτή καυσίμου (reformer)** για να μετατραπούν σε «καθαρό» υδρογόνο και να καταναλωθούν στη συνέχεια στις κυψέλες καυσίμου. Για τον λόγο αυτό, ο υψηλός βαθμός απόδοσης της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από τις κυψέλες καυσίμου τους αναμένεται ότι θα μειωθεί κι άλλο, εξαιτίας της ηλεκτρικής ενέργειας που δαπανάται στον αναμορφωτή τους προκειμένου να μετατρέψει τα υδρογονούχα τους καύσιμα σε «καθαρό» υδρογόνο. Όπως αποδεικνύεται στη πράξη, ο τελικός συνολικός βαθμός απόδοσης ισχύος ενός οποιουδήποτε μεταφορικού οχήματος κυψελών καυσίμου υδρογόνου με κυψέλες καυσίμου, δεν μπορεί να υπερβεί το 25% με 35% περίπου. Αυτό σημαίνει, ότι ο αρχικά πολύ υψηλός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης των κυψελών καυσίμου ενός μεταφορικού οχήματος υδρογόνου μειώνεται κατά 45% με 55% περίπου κατά την μετατροπή της ισχύος σε ωφέλιμη ενέργεια του οχήματος, γεγονός το οποίο οφείλεται κυρίως στις αυξημένες απώλειες ενέργειας που παρατηρούνται μέσα στο όχημα αυτό, όταν αυτή μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική στα εσωτερικά μηχανικά του μέρη.

Ας θεωρήσουμε τώρα ένα άλλο ρεαλιστικό μεταφορικό όχημα, όμοιας κατασκευής με το μεταφορικό όχημα του υδρογόνου που εξετάσαμε, το οποίο όμως τροφοδοτείται από μία MEK ενός ορυκτού καυσίμου (π.χ. συμβατικής βενζίνης), δηλαδή από έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης αυτού. Το μεταφορικό αυτό όχημα λειτουργεί υπό τις ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος με το προηγούμενο όχημα (πίεση, θερμοκρασία, μορφολογία εδάφους κ.τ.λ.), έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκρισή του μ' αυτό. Στο δεύτερο αυτό όχημα εμφανίζονται, ως γνωστόν, αρκετά αυξημένες απώλειες ενέργειας λόγω της θερμότητας που εκλύεται από το εσωτερικό του προς το περιβάλλον και η οποία προέρχεται από την υψηλή θερμική ενέργεια που παράγεται κατά την καύση του ορυκτού του καυσίμου (της συμβατικής βενζίνης στη συγκεκριμένη περίπτωση). Οι αυξημένες αυτές απώλειες ενέργειας έχουν προφανώς σαν αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η αποδοτικότητά του σε παραγωγή ισχύος, όπως θα δούμε και παρακάτω. Στο δεύτερο αυτό όχημα παρατηρούνται επίσης και κάποιες απώλειες ενέργειας λόγω της τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ των διαφόρων μηχανικών μερών του κινητήρα του αλλά και λόγω της επιπλέον ενέργειας που δαπανάται σε διάφορα μέρη του κινητήρα του προκειμένου να μπορέσει να λειτουργήσει αποτελεσματικά (π.χ. ανεμιστήρες, αντλίες κ.τ.λ.). Όπως μπορεί να αποδειχτεί μετά από πειραματικές μετρήσεις, ένα οποιοδήποτε ρεαλιστικό μεταφορικό όχημα με MEK συμβατικής βενζίνης δεν μπορεί να παρουσιάσει τελικό συνολικό βαθμό απόδοσης ισχύος μεγαλύτερο από 20% περίπου, δηλαδή υπολείπεται σε αποδοτικότητα ισχύος σε σχέση με το μεταφορικό όχημα των κυψελών καυσίμου υδρογόνου κατά 5% με 15% περίπου.

Από τα δύο παραπάνω πρακτικά παραδείγματα των μεταφορικών οχημάτων που εκτέθηκαν μπορεί συγκεντρωτικά να εξαχθεί το συμπέρασμα, ότι το μεταφορικό όχημα κυψελών καυσίμου υδρογόνου εμφανίζει από τη μία ελαφρώς μεγαλύτερη αποδοτικότητα ισχύος σε σχέση με το μεταφορικό όχημα MEK συμβατικής βενζίνης, αλλά όχι τόσο μεγαλύτερη ώστε να δικαιολογείται η απευθείας χρησιμοποίησή του έναντι αυτού. Το συμπέρασμα αυτό ισχύει γενικότερα και για τα περισσότερα από τα υπόλοιπα ενεργειακά συστήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου, συγκρινόμενα με τα περισσότερα από τα υπόλοιπα ενεργειακά συστήματα με MEK, όχι μόνο συμβατικής βενζίνης, αλλά και των λοιπών ορυκτών καυσίμων (π.χ. πετρέλαιο, φυσικό αέριο, γαιάνθρακας (λιγότερο) κ.τ.λ.).[25.26] Η διαφορά σε αποδοτικότητα ισχύος που παρατηρείται σ' αυτά, δεν είναι συνήθως τόσο μεγάλη ώστε να δικαιολογείται η απρόσκοπτη αντικατάστασή τους από ενεργειακά συστήματα με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου. Παρολα αυτά, αν λάβουμε υπόψη μας και κάποιους επιπλέον σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την μακροπρόθεσμη εξέλιξη των ενεργειακών συστημάτων κυψελών καυσίμου υδρογόνου στο μέλλον, μπορούμε με βεβαιότητα να πούμε, ότι η μερική ή και ολική αντικατάσταση των συστημάτων με MEK ορυκτών καυσίμων είναι αφενός επιβεβλημένη και αφετέρου πολύ πιθανή. Κι αυτό γιατί, όπως έχουμε αναφέρει από την αρχή της παρούσας εργασίας, το μέλλον των διαφόρων ορυκτών καυσίμων σαν ενεργειακά υλικά και ιδιαίτερα αυτό του πετρελαίου, παρουσιάζει αποδεδειγμένα πλέον πολύ μικρό ακόμα χρόνο ζωής. Ακόμα και με τις πιο ελαστικές μετρήσεις και προβλέψεις, τα ικανά να αντληθούν και να αξιοποιηθούν αποδοτικά στο μέλλον υπάρχοντα ακόμα αποθέματα πετρελαίου στο υπέδαφος της Γης, δεν θα διαρκέσουν περισσότερο από 40 το πολύ χρόνια, γεγονός το οποίο καθιστά αναγκαία την αντικατάσταση των διαφόρων ενεργειακών συστημάτων που χρησιμοποιούν αυτό και τα διάφορα παράγωγά του (π.χ. βενζίνη) από κάποια άλλα εναλλακτικής μορφής ενεργειακά συστήματα μέσα στο συγκεκριμένο διάστημα. Τα ενεργειακά συστήματα με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου μπορούν πράγματι να αποτελέσουν αυτή την εναλλακτική μορφή μιας και, από

πλευράς αποδοτικότητας τουλάχιστον, ανταποκρίνονται όπως είπαμε πλήρως σ' αυτό. Εκτός αυτού, είναι και γενικά παραδεκτό πλέον, ότι ο ανθρώπινος πολιτισμός σε παγκόσμιο επίπεδο δεν έχει την πολυτέλεια να συνεχίσει να εξελίσσεται πάνω στη Γη βασιζόμενος στο τωρινό ενεργειακό μοντέλο ανάπτυξής του, το οποίο έχει διαμορφωθεί ήδη εδώ και 150 περίπου χρόνια (από την αρχή της χρησιμοποίησης της ατμομηχανής και του γαιάνθρακα) και το οποίο συνεχίζει να υπάρχει μέχρι και σήμερα. Το ενεργειακό αυτό μοντέλο ανάπτυξής του έχει φτάσει το φυσικό περιβάλλον της Γης στα όρια της ενεργειακής του αντοχής, γεγονός το οποίο αποδεικνύεται συνεχώς από την γενικότερη διατάραξη της οικολογικής ισορροπίας του και της εξάντλησης των φυσικών ενεργειακών του πόρων. Τα ενεργειακά συστήματα των κυψελών καυσίμου υδρογόνου και γενικότερα η τεχνολογία παραγωγής ενέργειας με πρώτη ύλη το υδρογόνο, προσφέρουν ριζική λύση στο πρόβλημα αυτό, μιας και, ως γνωστό, η εφαρμογή τους συνεπάγεται την σημαντική μείωση των ποσοτήτων του CO<sub>2</sub> και των υπολοίπων αέριων ρύπων που εκπέμπονται από τις συμβατικές τεχνολογίες των ορυκτών καυσίμων. Να επισημανθεί επίσης, ότι εκτός του ότι οι διάφορες ενεργειακές τεχνολογίες κυψελών καυσίμου υδρογόνου είναι ιδιαίτερα «φιλικές» προς το φυσικό περιβάλλον της Γης, απαιτούν πολύ μικρότερες ποσότητες υδρογονούχων «καυσίμων» και υδρογόνου για να λειτουργήσουν, το μεγαλύτερο μέρος των οποίων μπορεί να ανακυκλωθεί και να ξαναχρησιμοποιηθεί στη διαδικασία παραγωγής ενέργειας από το υδρογόνο. Είναι δηλαδή αειφόρες ως προς τη λειτουργικότητά τους, συνδυάζοντας την πολύ μικρή επίδρασή τους στην οικολογική ισορροπία του φυσικού περιβάλλοντος με τις πολύ μικρές απαιτήσεις τους σε φυσικές πρώτες ύλες αυτού.

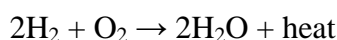
Καταλήγοντας, μπορούμε να πούμε, ότι οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου και τα ενεργειακά τους συστήματα αποτελούν πράγματι συμφέρουσα εναλλακτική λύση στο ενεργειακό πρόβλημα που αντιμετωπίζει σήμερα η ανθρωπότητα, λόγω της ολικής σχεδόν εξάρτησης αυτής από τα ορυκτά καύσιμα και τις ΜΕΚ. Υπάρχει ακόμα βεβαίως το πρόβλημα της οικονομικότητας της εφαρμογής τους σε μαζική και σε τοπική κλίμακα, αλλά κι αυτό αναμένεται ότι στο μέλλον θα λυθεί σίγουρα. Η συνεχής ανακάλυψη και ανάπτυξη συνθέτων υλικών αποθήκευσης του υδρογόνου σε «στερεά» κατάσταση και η βελτίωση της αποδοτικότητας των κυψελών καυσίμων του με τη χρήση νέων αποδοτικότερων μεμβρανών ηλεκτρόλυσης αυτών, είναι μερικά μόνο από τα επιτεύγματα τα οποία αναμένεται να μειώσουν σημαντικά το κόστος χρήσης και εκμετάλλευσης του υδρογόνου σαν ενεργειακό καύσιμο, καθιστώντας το ανταγωνιστικότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα ορυκτά καύσιμα και την χρησιμοποίηση αυτών για ενεργειακούς σκοπούς. Εκτός αυτού, η μαζική ανάπτυξη και επέκταση του δικτύου διανομής του υδρογόνου στο μέλλον, θα μειώσει αρκετά το κόστος χρήσης του, έτσι ώστε να μπορέσει να αποτελέσει ένα φτηνό και προσιτό ενεργειακό καύσιμο σε διατάξεις με κυψέλες καυσίμου του, όπως ακριβώς συμβαίνει και σήμερα με τα διάφορα ορυκτά καύσιμα. Σημαντική ώθηση σ' αυτό αναμένεται ότι θα δώσει και η ανάπτυξη των διαφόρων εναλλακτικών τεχνολογιών παραγωγής του μέσω ΑΠΕ (π.χ. μέσω της ηλιακής ή της αιολικής ενέργειας) οι οποίες με τη μαζική εφαρμογή τους θα μπορέσουν να το παράγουν φθηνά και χωρίς την κατανάλωση σημαντικών ποσοτήτων ενέργειας

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΔΡΟΓΟΝΟ

### 4.1) Γενικά για το υδρογόνο

Το υδρογόνο αποτελεί το 90% της συνολικής μάζας του σύμπαντος και είναι το ελαφρύτερο στοιχείο που υπάρχει στη φύση. Σε καθαρή μορφή (αέρια) στο περιβάλλον της γης σπάνια συναντάται, αλλά δεσμευμένο, υπάρχει σχεδόν σε όλα τα ορυκτά της. Το υδρογόνο απαντιέται και σε πολλές σημαντικές δομικές οργανικές ενώσεις των έμβιων όντων της γης, μεταξύ αυτών των οργανικών ενώσεων στην κερατίνη, στα ένζυμα που συντελούν στη πέψη και στα μόρια του DNA. Επίσης, υπάρχει άφθονο και στις διάφορες τροφές που καταναλώνει ο άνθρωπος, υπό τη μορφή των λιπών, των πρωτεϊνών και των υδρογονανθράκων. Λόγω του μικρού του βάρους, δεν αποτελεί περισσότερο από το 1% της συνολικής μάζας της γης. Καθώς το υδρογόνο συντήκεται, παράγονται διάφορα βαρύτερα στοιχεία από αυτό, με σημαντικότερο μεταξύ αυτών το Ήλιο (He). Η συγκεκριμένη διαδικασία της σύντηξης του υδρογόνου παράγει την ενέργεια που εκλύουν τα άστρα μέσα στο σύμπαν, ενώ βάσει αυτής πιστεύεται ότι δημιουργήθηκε αρχικά και το ίδιο το σύμπαν.[27]

Σε συνήθη θερμοκρασία περιβάλλοντος, το υδρογόνο βρίσκεται πάντα σε αέρια φάση, στην οποία σαν υλικό είναι άχρωμο, άοσμο, και εύφλεκτο. Όταν καίγεται με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα (ή και με το «καθαρό» οξυγόνο), το υδρογόνο σχηματίζει νερό και παράγει θερμότητα σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:

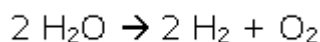


Η ονομασία του, οφείλεται στον Γάλλο χημικό Antoine Lavoisier και προέρχεται από τη σύμπτυξη δύο αρχαιοελληνικών λέξεων: «ύδωρ» και «γίγνομαι». ις ξεχωριστό χημικό στοιχείο αναγνωρίστηκε για πρώτη φορά από τον Άγγλο χημικό Henry Cavendish το 1766. Το υδρογόνο κατέχει την πρώτη θέση στον περιοδικό πίνακα των χημικών στοιχείων και το άτομό του συμβολίζεται με το λατινικό γράμμα H.

Κάθε άτομό του αποτελείται από ένα πρωτόνιο και από ένα ηλεκτρόνιο, ενώ κατά την ένωση δύο διαφορετικών ατόμων του παράγεται ένα μόριο υδρογόνου με μοριακό τύπο: H<sub>2</sub> (H – H). Το υδρογόνο μπορεί να συνδυαστεί χημικά με σχεδόν οποιοδήποτε άλλο χημικό στοιχείο και έτσι δίνει τις περισσότερες χημικές ενώσεις από οποιοδήποτε άλλο του περιοδικού πίνακα. Στις σημαντικότερες από τις ενώσεις του συγκαταλέγονται το νερό, οι ενώσεις του με τον άνθρακα (οργανικές ενώσεις) και οι διάφοροι φυσικοί υδρογονάνθρακες όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο.

## 4.2) Τεχνολογία Υδρογόνου

Το υδρογόνο δεν υπάρχει στη φύση με τη μορφή καθαρού αερίου. Οι μέθοδοι παρασκευής χωρίζονται σε 3 κύριες κατηγορίες, τις θερμοχημικές, τις ηλεκτρολυτικές και τις φωτολυτικές. Οι περισσότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή του περιλαμβάνουν τη διαδικασία της υδρόλυσης:



Μεταξύ των κυριώτερων χρήσεων του είναι:

- Στην παρασκευή αμμωνίας, μεθανίου ή μεθανόλης. Αυτά χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την παρασκευή άλλων προϊόντων, όπως εκρηκτικά, λιπάσματα, αντιψυκτικά κτλ.
- Στην τεχνολογία τροφίμων για την παρασκευή υδρογονανθράκων.
- Στην επιστήμη της φυσικής με εφαρμογή στη μελέτη των στοιχειωδών σωματιδίων.
- Με τη μορφή υγρού βρίσκει χρήση στη μελέτη της υπεραγωγιμότητας.

Πέρα από τις πολλές του χρήσεις στη χημική βιομηχανία, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φορέας ενέργειας. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η τάση κατανάλωσης καυσίμων όλο και λιγότερης περιεκτικότητας σε άνθρακα είναι εμφανής. Το υδρογόνο απαλλαγμένο από κάθε ποσό άνθρακα μπορεί να προσφέρει αρκετή ενέργεια για καθημερινές χρήσεις όπως η ηλεκτροδότηση κτιρίων ή η κίνηση των μεταφορικών μας μέσων. Μάλιστα αυτή τη στιγμή γίνονται σημαντικές προσπάθειες, κυρίως στα ιδιαίτερα ανεπτυγμένα κράτη, για τη μετατροπή της προσαρμοσμένης στα καύσιμα άνθρακα υποδομής σε υποδομή με βάση το υδρογόνο. Ενδεικτικά, η Ισλανδία, προβλέπει σε μία υποδομή πλήρως βασισμένη στο υδρογόνο μέχρι το 2030-2040, ενώ μέχρι το 2030 στόχος του υπουργείου ενέργειας των Η.Π.Α. είναι η αντικατάσταση του 10% της ενεργειακής κατανάλωσης από ενέργεια υδρογόνου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα για το πως το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παραχθεί ενέργεια είναι οι λεγόμενες κυψέλες καυσίμου (fuel cells) στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση αυτό.

### Πλεονεκτήματα έναντι συμβατικών πηγών ενέργειας

- Το υδρογόνο έχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους από οποιοδήποτε άλλο γνωστό καύσιμο, 120,7 kJ/kg, περίπου τρεις φορές μεγαλύτερο από αυτό της συμβατικής βενζίνης.
- Καθαρή καύση. Όταν καίγεται με οξυγόνο παράγει μόνο νερό και θερμότητα. Όταν καίγεται με τον ατμοσφαιρικό αέρα, ο οποίος αποτελείται περίπου από 68% άζωτο, παράγονται επίσης αμελητέες ποσότητες οξειδίων του αζώτου.
- Εξαιτίας της καθαρής καύσης του δε συμβάλει στη μόλυνση του περιβάλλοντος. Το ποσό του νερού που παράγεται κατά τη καύση είναι τέτοιο ώστε να θεωρείται επίσης αμελητέο και μη ικανό να επιφέρει κάποια κλιματολογική αλλαγή δεδομένης ακόμα και μαζικής χρήσης.
- Είναι το ίδιο ακίνδυνο όσο η βενζίνη, το πετρέλαιο diesel ή το φυσικό αέριο. Το υδρογόνο μάλιστα είναι το λιγότερο εύφλεκτο σε απουσία αέρα με θερμοκρασία αυθόρμητης ανάφλεξης τους 585 °C (230 °C έναντι 480 °C της βενζίνης).

- Μπορεί να συμβάλει στη μείωση του ρυθμού κατανάλωσης των περιορισμένων φυσικών καυσίμων. Αν και σε πολλές περιπτώσεις αυτά τα ίδια καύσιμα χρησιμοποιούνται για την παρασκευή υδρογόνου το ενεργειακό όφελος είναι μεγάλο. Μάλιστα η πιο συμφέρουσα οικονομικά αυτή τη στιγμή μέθοδος παρασκευής υδρογόνου βασίζεται στη μετατροπή του μεθανίου του φυσικού αερίου.
- Μπορεί να παρασκευαστεί με πάρα πολλές μεθόδους σε οποιαδήποτε χώρα και σε οποιοδήποτε μέρος κι επομένως μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη αποκεντροποιημένων συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Αυτό θα ωφελήσει φτωχότερα και λιγότερο αναπτυγμένα κράτη τα οποία σήμερα εξαρτώνται ενεργειακά από άλλα ισχυρότερα.

### **Μειονεκτήματα έναντι συμβατικών πηγών ενέργειας**

Τα περισσότερα μειονεκτήματα χρήσης του υδρογόνου έχουν να κάνουν με την ελλιπή σημερινή υποδομή και αποτελούν κυρίως τεχνικά προβλήματα τα οποία αναζητούν λύση.

- Η αποθήκευση του. Δεδομένου του ότι το υδρογόνο είναι πολύ ελαφρύ, η συμπίεση μεγάλης ποσότητας σε μικρού μεγέθους δεξαμενή είναι δύσκολη λόγω των υψηλών πιέσεων που χρειάζονται για να επιτευχθεί η υγροποίηση.
- Η έλλειψη οργανωμένου δικτύου διανομής του.
- Η τιμή του είναι σχετικά υψηλή σε σύγκριση με αυτή της βενζίνης ή του πετρελαίου. Η περισσότερο διαδεδομένη λόγω χαμηλού κόστους μέθοδος παραγωγής υδρογόνου αυτή τη στιγμή είναι η μετατροπή του φυσικού αερίου. Ωστόσο όσο εξελίσσονται και άλλες μέθοδοι, όπως η μετατροπή της αιολικής ενέργειας, το κόστος θα συνεχίσει να μειώνεται.
- Αν και στις περισσότερες των περιπτώσεων το υδρογόνο θεωρείται περισσότερο ασφαλές από οποιοδήποτε άλλο καύσιμο, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες μπορεί να γίνει εξαιρετικά επικίνδυνο.
- Η αυξημένη τιμή των κυψέλων καυσίμου με τις οποίες αυτή τη στιγμή γίνεται η μεγαλύτερη εκμετάλλευση του υδρογόνου ως καύσιμο. Επιπλέον η τεχνολογία τους δε μπορεί να θεωρηθεί ολοκληρωτικά αξιόπιστη αφού προς το παρόν υπάρχουν αρκετά τεχνικά προβλήματα τα οποία αναζητούν αξιόπιστες λύσεις. Κυψέλες προσανατολισμένες για οικιακή και μεταφορική χρήση χαρακτηρίζονται από μικρή ανοχή σε καύσιμα μη υψηλής καθαρότητας. Αυτό με τη σειρά του αυξάνει το κόστος παραγωγής του καυσίμου. Κυψέλες καυσίμου προσανατολισμένες για βιομηχανική χρήση πάλι χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας.[28]

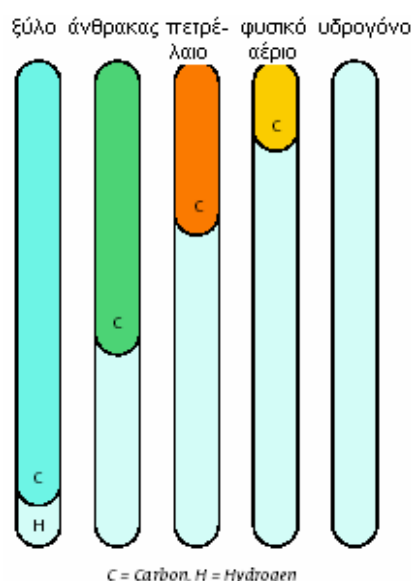
### 4.3) Το υδρογόνο ως ενεργειακό καύσιμο - Οικονομία του υδρογόνου

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, το υδρογόνο έχει μία σημαντική ιδιότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ωφέλιμο τρόπο. Μπορεί να αποτελέσει πρώτη ύλη, δηλαδή «καύσιμο», για την παραγωγή ενέργειας.

Όπως έχει αποδείξει η ιστορία, ο άνθρωπος κατά την διάρκεια της εξέλιξής του, έχει χρησιμοποιήσει διάφορες πηγές ενέργειας οι οποίες περιείχαν αφενός σαν βασικό συστατικό τους τον άνθρακα, αλλά αφετέρου σε ολόένα και μικρότερες περιεκτικότητες στο εσωτερικό τους. Από τον ξυλάνθρακα (ξύλο) για παράδειγμα που αποτέλεσε την κύρια πηγή ενέργειας της ανθρωπότητας στην Αρχαιότητα, στον γαιάνθρακα κατά την διάρκεια της Βιομηχανικής Επανάστασης και στο πετρέλαιο κατά την Σύγχρονη Εποχή, ο άνθρωπος χρησιμοποίησε τον άνθρακα σαν βασικό μέσο παραγωγής της αναγκαίας του ενέργειας, με τη μορφή των διαφόρων φυσικών πηγών του που του ήταν κάθε φορά περισσότερο εύκολα προσβάσιμες σ' αυτόν.

Επιπλέον, η εξέλιξη και ανάπτυξη των τεχνολογικών του εφευρέσεων, τον οδήγησαν να αναζητεί συνεχώς νέες πηγές άνθρακα, οι οποίες, περιείχαν όλο και λιγότερο αυτόν σαν βασικό συστατικό στη μάζα τους. Ποτέ όμως, οποιοδήποτε καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε από τον άνθρωπο για την μαζική παραγωγή ενέργειας του δεν περιείχε στη μάζα του μηδενικές ποσότητες από άνθρακα και αυτό συνεχίζεται έως τις μέρες μας με τη μαζική χρησιμοποίηση των διαφόρων ορυκτών καυσίμων (π.χ. πετρέλαιο, φυσικό αέριο, γαιάνθρακας) από τον σύγχρονο πολιτισμό για την παραγωγή ενέργειας.

Το υδρογόνο, απ' αυτή τη σκοπιά, αποτελεί πράγματι μια τομή για την ιστορική εξέλιξη της ενεργειακής παραγωγής από τον άνθρωπο, μιας και είναι ουσιαστικά το πρώτο καύσιμο που δεν βασίζεται καθόλου στον άνθρακα. Στο παρακάτω σχήμα, απεικονίζεται ποσοτικά η διαφορετική σύσταση σε περιεκτικότητα σε άνθρακα, των κυριότερων ορυκτών καυσίμων που έχουν χρησιμοποιηθεί ιστορικά από τα αρχαία χρόνια μέχρι σήμερα από τον άνθρωπο, καθώς επίσης και η διαφοροποίηση του υδρογόνου έναντι αυτών, σαν πιθανό μελλοντικό καύσιμο μαζικής παραγωγής ενέργειας:





Εκτός από την μηδενική του περιεκτικότητα σε άνθρακα, ένα εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό που παρουσιάζει το υδρογόνο σαν καύσιμο, είναι ότι μπορεί να προσφέρει πολύ μεγαλύτερα ποσά ενέργειας από τα αντίστοιχα ποσά των διαφόρων ορυκτών καυσίμων, τα οποία είναι ικανά να τροφοδοτήσουν τις περισσότερες από τις καθημερινές ανάγκες του ανθρώπου, ξεκινώντας από την ηλεκτροδότηση των σπιτιών και των πόλεών του, την κίνηση των μεταφορικών του μέσων και την ικανοποίηση των μικρότερων καθημερινών του αναγκών (π.χ. οικιακές εργασίες, θέρμανση χώρων κ.τ.λ.).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα ηλεκτρομηχανολογικής χημικής διάταξης παραγωγής ενέργειας από το υδρογόνο, αποτελούν οι λεγόμενες κυψέλες καυσίμου του (fuel cells), οι οποίες χρησιμοποιούν την αντίδραση σύντηξης του με το «καθαρό» οξυγόνο (ή με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα) και μέσω ηλεκτρόλυσης παράγουν ηλεκτρική ενέργεια ή θερμότητα. Μια δεύτερη κατηγορία, θερμοχημικών κυρίως, διατάξεων παραγωγής ενέργειας από το υδρογόνο, αποτελούν οι μηχανές εσωτερικής καύσης αυτού (MEK υδρογόνου), οι οποίες, όσον αφορά την κατασκευή τους, δεν παρουσιάζουν κάποια ιδιαίτερη διαφοροποίηση από τις συμβατικές μηχανές εσωτερικής καύσης των ορυκτών καυσίμων. Όπως και στις κυψέλες καυσίμου, στις MEK υδρογόνου η πρωταρχική μορφή ενέργειας που παράγεται από αυτές είναι είτε ο ηλεκτρισμός είτε η θερμότητα, οι οποίες στη συνέχεια μετατρέπονται σε άλλες δευτερεύουσες μορφές ενέργειας ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη.

Το υδρογόνο μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στις ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας στο μέλλον, μιας και οι δυνατότητες που υπάρχουν από αυτό για την μαζική παραγωγή ενέργειας είναι πολύ μεγάλες και μάλιστα μέσου ανανεώσιμου τρόπου. Η χρήση του υδρογόνου σαν ενεργειακό μέσο μπορεί να συνδυαστεί με την εφαρμογή των περισσοτέρων από τις υπόλοιπες ΑΠΕ (π.χ. ηλιακή και αιολική ενέργεια, υδροηλεκτρισμός κ.λπ.), μέσω των οποίων μπορεί να εξασφαλιστεί η επαρκής ποσότητα παραγωγής του, η οποία επιτυγχάνεται κατά βάση μέσω της παραγωγής του από το νερό (ηλεκτρόλυση), του οποίου και αποτελεί βασικό συστατικό.

Ο τρόπος αυτός παραγωγής του υδρογόνου παρουσιάζει ιδιαίτερα ευοίωνες προοπτικές για το μέλλον, μιας και ως γνωστόν, το νερό αποτελεί το πλουσιότερο στοιχείο του πλανήτη μας και υπάρχει άφθονο στα περισσότερα μέρη της γης (είτε σαν συστατικό των ποταμών και των λιμνών, είτε πολύ περισσότερο σαν συστατικό των ωκεανών). Προς το παρόν πάντως, η κύρια μέθοδος παραγωγής του υδρογόνου πραγματοποιείται μέσω της θερμοχημικής επεξεργασίας του φυσικού αερίου, μιας και αποτελεί τον οικονομικότερο τρόπο γι' αυτό. Το υδρογόνο, εκτός από υλικό παραγωγής ενέργειας, αποτελεί και ιδανική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (ΑΠΕ), μιας και η ένωσή του στη πράξη με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο με σκοπό την παραγωγή ενέργειας, είτε μέσω της ηλεκτρόλυσης είτε μέσω της καύσης του, δημιουργεί ως κύρια υποπαράγωγα της το νερό και τη θερμότητα και δευτερευόντως ορισμένα άλλα αέρια (κυρίως οξείδια του αζώτου), τα οποία όμως βρίσκονται σε πολύ μικρές ποσότητες ώστε να μην επηρεάζουν σημαντικά το περιβάλλον τους.

Έτσι το υδρογόνο, μπορεί στο μέλλον να αποτελέσει την κύρια εναλλακτική λύση για την μαζική παραγωγή ενέργειας έναντι των ορυκτών καυσίμων, μιας και αυτή βασίζεται σήμερα κυρίως στην χρησιμοποίηση αυτών (μέσω της καύσης τους). Η πιθανή όμως υιοθέτησή του υδρογόνου ως βασικού ενεργειακού μέσου στο μέλλον, προϋποθέτει και την ριζική μεταστροφή της παγκόσμιας ενεργειακής οικονομίας σε έναν καινούργιο και διαφορετικό τρόπο λειτουργίας της, ο οποίος θα βασίζεται κατά κύριο λόγο σ' αυτό και στις διάφορες τεχνολογίες του.

Η νέα αυτή μορφή, χαρακτηρίζεται σήμερα από τους επιστήμονες που ασχολούνται με την τεχνολογία του σαν παγκόσμια «Οικονομία του υδρογόνου». Μεταξύ των άλλων, οι διάφοροι σχεδιασμοί που γίνονται σήμερα όσον αφορά την πιθανή υιοθέτηση της «Οικονομίας του υδρογόνου» στο μέλλον, αφορούν τη μετατόπιση του παρόντος ενεργειακού ενδιαφέροντος της ανθρωπότητας από τα διάφορα δίκτυα μεταφοράς του ηλεκτρισμού και των ορυκτών καυσίμων της, στα καινούργια δίκτυα μαζικής μεταφοράς υδρογόνου είτε σε υγρή είτε σε αέρια μορφή, μέσα από μεγάλους αγωγούς ή μεταφερόμενο πάνω σε δεξαμενές πλοίων (που ήδη υπάρχει).

Το μελλοντικό δίκτυο διανομής του υδρογόνου που προβλέπεται να εφαρμοστεί στο μέλλον, παρουσιάζει ορισμένα θετικά σημεία έναντι του παρόντος δικτύου διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται σήμερα (δευτερευόντως έναντι του δικτύου διανομής του πετρελαίου και του φυσικού αερίου), τα οποία μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

Η διανομή του υδρογόνου (σε αέρια κυρίως μορφή), θεωρείται πολύ πιο αποδοτική από την διανομή του ηλεκτρισμού μέσω μετασχηματιστών και καλωδίων, ενώ το αέριο υδρογόνο μπορεί επίσης να αποθηκευτεί πιο εύκολα και πιο αποδοτικά από την ηλεκτρική ενέργεια.

Υπάρχουν πάντως και ορισμένα μειονεκτήματα, όσον αφορά τη διανομή του υδρογόνου σε αέρια ή υγρή κατάσταση, τα οποία αφορούν κυρίως την δυσκολία κατά την αποθήκευση και διανομή του σε κλειστούς χώρους, λόγω της δυνατότητάς του για εύκολη ανάφλεξη σ' αυτούς.

Ένα δεύτερο, μικρότερης σημασίας μειονέκτημα, αφορά το γεγονός, ότι το υδρογόνο σε συνήθεις συνθήκες περιβάλλοντος σαν αέριο είναι άχρωμο και άοσμο, με αποτέλεσμα να είναι εύκολη η διαφυγή του από τα δίκτυα μεταφοράς του προς το περιβάλλον, χωρίς αυτό να γίνει άμεσα αντιληπτό. Το συγκεκριμένο όμως μειονέκτημα μπορεί να λυθεί σχεδόν ουσιαστικά, χρησιμοποιώντας τον τεχνητό χρωματισμό του ή την προσδότηση σ' αυτό τεχνητής οσμής, όπως εφαρμόζεται και κατά την διανομή του φυσικού αερίου.

Θα πρέπει επίσης να τονίσουμε, ότι οι νέες τεχνικές μέθοδοι αποθήκευσης του υδρογόνου που έχουν αρχίσει να εξελίσσονται τα τελευταία χρόνια, κυρίως μέσω της αποθήκευσης του μέσα σε στερεά υλικά (π.χ. μεταλλικά υδρίδια και στερεές ενώσεις του με τον άνθρακα) έχουν επίσης αρχίσει να επιφέρουν πολλές λύσεις στο εξίσου σημαντικό, σε σχέση με την διανομή του, πρόβλημα της αποθήκευσής του, με αποτέλεσμα η νέα γενιά τεχνολογιών του στα επόμενα από τώρα χρόνια να μπορεί να βασίζεται σε ασφαλή και αποτελεσματική του αποθήκευση.

Ο σχεδιασμός της μελλοντικής «οικονομίας του υδρογόνου», συνδυάζεται σήμερα κυρίως με την ιδέα της αποκεντρωμένης και τοπικής ενεργειακής μετατροπής του υδρογόνου (local hydrogen generation), η οποία μπορεί να ενταχθεί σε κάθε ενεργειακό σύστημα μιας οποιασδήποτε χώρας (ανεξάρτητα από την έκτασή της και τον πληθυσμό της). Κατά την ενεργειακή αυτή μετατροπή, η τοπικά παραγόμενη πλεονάζουσα ενέργεια υδρογόνου από διάφορες ΑΠΕ, π.χ. βιομάζα, Φ/Β κύτταρα, μικρούς υδροστρόβιλους, Α/Γ κ.ά. σε οικίες, αιολικά πάρκα, εγκαταστάσεις ΑΠΕ τοπικών αυτοδιοικήσεων κ.λπ., προβλέπεται ότι θα διοχετεύεται έναντι αμοιβής ή μέσω ανταλλαγής μέσα στο εθνικό δίκτυο της κάθε χώρας. Με τον τρόπο αυτό, θα αποφεύγονται οι διάφορες απώλειες ισχύος που υπάρχουν σήμερα στο εθνικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικού ρεύματος αυτών, που ως γνωστόν λειτουργεί κατά πλείστον με «κεντροποιημένο» τρόπο, δηλαδή μέσω παραγωγής και διανομής του ηλεκτρικού ρεύματος από μεγάλους ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς. Σε αντίθεση δηλαδή με το

«κεντροποιημένο» σύστημα παραγωγής και διανομής του ηλεκτρικού ρεύματος που ισχύει σήμερα, το μελλοντικό «αποκεντρωμένο» ενεργειακό σύστημα του υδρογόνου θα χαρακτηρίζεται σε μεγάλο ποσοστό από την ενσωματωμένη ενεργειακή μετατροπή αυτού (embedded hydrogen generation), δηλαδή την τοπικά ασκούμενη μετατροπή του υδρογόνου σε ενέργεια από τοπικούς σταθμούς παραγωγής του.

Το «αποκεντρωμένο» αυτό σύστημα παραγωγής και διανομής του υδρογόνου, εκτός από την αποφυγή απωλειών σε εθνικό επίπεδο, παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι αποτελεί και ένα νέο «καθαρό» σύστημα παραγωγής ενέργειας, το οποίο αξιοποιεί και διάφορες άλλες μορφές ΑΠΕ εκτός από το υδρογόνο. Για να έχουμε μια εικόνα για τον τρόπο λειτουργίας του αποκεντρωμένου συστήματος διανομής του υδρογόνου, θα αναφέρουμε τα στάδια από τα οποία αυτό αποτελείται, ξεκινώντας από το στάδιο της παραγωγής του μέσω κυρίως διαφόρων ΑΠΕ, μέχρι το στάδιο της κατανάλωσης της ενέργειάς του από τον τελικό αποδέκτη του (τον άνθρωπο) [29]:

1. Το πρώτο στάδιο, περιλαμβάνει την παραγωγή του υδρογόνου, μέσω κατάλληλων τεχνικών, χρησιμοποιώντας γι' αυτό σαν πρώτες ύλες κυρίως το νερό (μέσω της ηλεκτρόλυσης ή της υδρόλυσής του) ή εναλλακτικά τα ορυκτά καύσιμα και εφαρμόζοντας τις διάφορες άλλες τεχνολογίες ΑΠΕ για την παραγωγή του (π.χ. ηλιακή ή αιολική ενέργεια).
2. Το δεύτερο στάδιο, περιλαμβάνει την αποθήκευση του παραχθέντος υδρογόνου του πρώτου σταδίου, με τη βοήθεια διαφόρων φυσικών ή χημικών διεργασιών αποθήκευσής του (π.χ. αποθήκευσή του σε στερεά υλικά).
3. Το τρίτο και τελευταίο στάδιο του «αποκεντρωμένου» συστήματος παραγωγής και διανομής του υδρογόνου, περιλαμβάνει την μετατροπή της εσωτερικής χημικής ενέργειας του υδρογόνου, αρχικά σε ηλεκτρισμό ή θερμότητα και στη συνέχεια σε οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας, στο σημείο όπου γίνεται η κατανάλωσή του. Οι ενεργειακές απαιτήσεις του μέλλοντος μπορούν πράγματι να καλυφθούν από την μαζική χρησιμοποίηση του υδρογόνου ως φορέα ενέργειας, μιας και το υδρογόνο, εκτός από την δυνατότητα που έχει να παράγει σχεδόν «καθαρή» ενέργεια στη πράξη, αποτελεί, όπως έχουμε αναφέρει και το πιο συμφέρον, από άποψη ενεργειακών δυνατοτήτων, καύσιμο σε σχέση με όλα τα ενεργειακά καύσιμα που χρησιμοποιούνται σήμερα.

Καύσιμο	Υδρογόνο	Φυσικό αέριο	LPG (προπάνιο)	Πετρέλαιο (αργό)	Μεθανόλη	Βενζίνη	Μπαταρίες Μολύβδου
Ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα βάρους (kWh/kg)*	33.3	13.9	12.9	12.1	5.6	12.7	0.03
Ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου (kWh/Lt)	0.53	2.6	7.5	10.8	4.4	8.7	0.09

Σχήμα 2.5 :Συγκριτικά στοιχεία ενεργειακής πυκνότητας μεταξύ του υδρογόνου και των κυριότερων από τα σημερινά ενεργειακά καύσιμα.\*το βάρος κάθε καυσίμου αποτελεί το καθαρό βάρος αυτού, χωρίς τον συμψηφισμό κάποιου άλλου βάρους που προστίθεται στο συνολικό του βάρος (π.χ. βάρος εξοπλισμού για την αποθήκευσή του κ.τ.λ.).

Όπως παρατηρούμε από τον παραπάνω πίνακα, το υδρογόνο παρουσιάζει την μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα βάρους του (33.3 kWh/kg) σε σχέση με αυτή των υπολοίπων (ορυκτών ή μη) ενεργειακών καυσίμων που χρησιμοποιούνται σήμερα. Από την άλλη μεριά όμως, παρουσιάζει και την μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου του (0.53 kWh/l) σε σχέση με αυτά, γεγονός που οφείλεται στην εξαιρετικά μικρή του αέρια πυκνότητα υπό συνθήκες περιβάλλοντος. Αυτό, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, αποτελεί σήμερα το κυριότερο εμπόδιο στην ανάπτυξη της τεχνολογίας του, κυρίως στον τομέα της ασφαλούς και αποτελεσματικής αποθήκευσής του. Όπως όμως έχουμε αναφέρει, τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες να επιλυθεί και το πρόβλημα αυτό, μέσω κυρίως της ανάπτυξης των τεχνικών μεθόδων αποθήκευσής του σε διάφορα υλικά. Τα αποτελέσματα από αυτές τις προσπάθειες έχουν ήδη αρχίσει σιγά – σιγά να γίνονται ορατά.

Ένας επιστημονικός τομέας του οποίου η εφαρμογή αποτελεί το βασικό κλειδί για την ανάπτυξη της τεχνολογίας του υδρογόνου, είναι η επιστήμη νανομέτρου (ή η νανοεπιστήμη). Αυτό, διότι πολλά υλικά προοριζόμενα για την αποθήκευσή του στη μάζα τους ή και για την κατασκευή βασικών μερών διατάξεων παραγωγής ενέργειας του (π.χ. μεμβρανών και ηλεκτροδίων από κυψέλες καυσίμου του), βελτιώνουν ριζικά τις επιδόσεις τους, όταν αποκτήσουν νανοκρυσταλλική. Ο λόγος γι' αυτό είναι, ότι όταν τα συγκεκριμένα αυτά υλικά, όταν αντιδρούν στην διάσταση του nm, παρουσιάζουν κάποιες ξεχωριστές ιδιότητες που συντελούν σημαντικά στην απόσπαση ενέργειας από το υδρογόνο. Οι ξεχωριστές αυτές ιδιότητες, προέρχονται κυρίως από τις μεγάλες επιφάνειες που έχουν οι θεμελιώδη λίθοι τους (κόκκοι), όταν αυτοί βρίσκονται δομημένοι στη διάσταση του nm. Εξετάζοντας, από την άλλη μεριά, τη χρησιμοποίηση του υδρογόνου σαν μαζικού φορέα ενέργειας σε μακροσκοπική κλίμακα, η μαζική του εφαρμογή, από ενεργειακή και περιβαλλοντική σκοπιά, προφανώς αποτελεί μια εξαιρετικά ελπιδοφόρα λύση για το μέλλον, όσον αφορά το ενεργειακό και περιβαλλοντικό πρόβλημα που σήμερα αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα. ωστόσο, δεν θα πρέπει να ξεχνάμε, ότι η τεχνολογία αξιοποίησης του υδρογόνου σαν ενεργειακό καύσιμο αποτελεί μια σχετικά καινούργια επιστήμη, η οποία μόλις τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχει αρχίσει να κάνει τα πρώτα δυναμικά της βήματα.

Επομένως, είναι φυσιολογικό να υπάρχουν ακόμα πολλοί τομείς στους οποίους αυτή θα πρέπει να εξελιχτεί περαιτέρω, πριν η μαζική της χρησιμοποίηση εφαρμοστεί και στην πράξη. Υπάρχουν δηλαδή ακόμη αρκετά τεχνολογικά ζητήματα τα οποία πρέπει πρώτα να ξεπεραστούν, πριν το υδρογόνο μπορέσει να αποτελέσει μια αξιόπιστη εναλλακτική λύση έναντι των διαφόρων ορυκτών καυσίμων που κατά πλείστον χρησιμοποιούνται σήμερα για τη μαζική παραγωγή ενέργειας. Ένας σημαντικός τομέας στον οποίο η ενέργεια του υδρογόνου θα πρέπει να κάνει ακόμα αρκετά βήματα, είναι ο τομέας της μαζικής παραγωγής των διαφόρων ενεργειακών τεχνολογιών της σε οικονομική κλίμακα, η οποία προς το παρόν δεν έχει ακόμα επιτευχθεί. Υπάρχουν αρκετά αίτια που συντελούνε σ' αυτό, μεταξύ των οποίων προφανώς βρίσκεται και η κατασκευή μηχανών της οι οποίες θα αποτελούνται από φθηνά και προσβάσιμα υλικά.

Η βασικότερη όμως αιτία που συντελεί στην καθυστέρηση της ανάπτυξής της, είναι η κατασκευή ενός μαζικού δικτύου διανομής της ενέργειάς του υδρογόνου, η οποία κατά κύριο λόγο οφείλεται στην υποσκέλιση αυτής από τη χρησιμοποίηση των ορυκτών καυσίμων σαν βασικά μέσα παραγωγής ενέργειας. ωστόσο, σε διάφορες χώρες ανά το κόσμο έχουν ήδη γίνει βήματα προς αυτή τη κατεύθυνση, κυρίως μέσω της χρησιμοποίησης του υδρογόνου σε διάφορα μεταφορικά μέσα.

#### **4.4)Βασικότερες κατηγορίες εμπορικών μεθόδων παραγωγής του υδρογόνου**

Οι εμπορικές μέθοδοι παραγωγής του υδρογόνου χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- τις θερμοχημικές
- τις ηλεκτρολυτικές
- τις φωτολυτικές

##### **4.4.1)Παραγωγή του υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού**

Υπάρχει μία και μοναδική μέθοδος παραγωγής του υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης και αυτή είναι από το νερό. ως γνωστόν, το νερό κατά τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης διασπάται στα δύο στοιχεία που το αποτελούν, δηλαδή το υδρογόνο και το οξυγόνο. Η ηλεκτρόλυση του νερού, προς παραγωγή υδρογόνου, πραγματοποιείται μέσα σε ειδικές διατάξεις που ονομάζονται διατάξεις ηλεκτρόλυσης και απαιτεί την ταυτόχρονη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος.

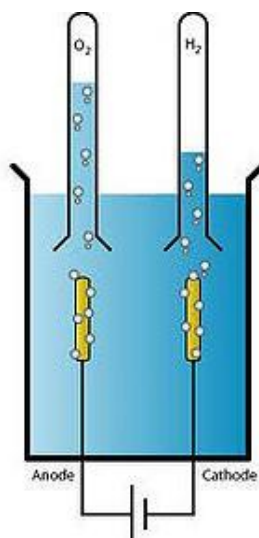
Το βασικό πλεονέκτημα που προκύπτει κατά την ηλεκτρόλυση του νερού προς παραγωγή υδρογόνου, είναι ότι το υδρογόνο που παράγεται χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα υψηλές τιμές «καθαρότητας» και επομένως δύναται να χρησιμοποιηθεί απευθείας σε κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, χωρίς περαιτέρω επεξεργασία. Η ηλεκτρόλυση του νερού, για την παραγωγή υδρογόνου, μέσω της χρησιμοποίησης του ηλεκτρικού ρεύματος που προέρχονταν από το κλασσικό δίκτυο ηλεκτρισμού, σαν μέθοδος, βρήκε ευρεία απήχηση από τις αρχές του 1900 μέχρι και τη δεκαετία του 1950 περίπου. Μετά τη δεκαετία του '50 όμως, λόγω των διαφόρων φθηνότερων μεθόδων που ανακαλύφθηκαν για την παραγωγή του υδρογόνου (κυρίως της καταλυτικής αναμόρφωση φυσικού αερίου), η ηλεκτρόλυση του νερού εγκαταλείφθηκε στο μεγαλύτερο μέρος της, με αποτέλεσμα στις μέρες μας, μόνο ένα σχετικά μικρό ποσοστό της συνολικής ποσότητας του παραγόμενου υδρογόνου σε παγκόσμια κλίμακα να παράγεται πλέον με αυτόν τον τρόπο.

Η εφαρμογή της ηλεκτρόλυσης του νερού προς παραγωγή του υδρογόνου εφαρμόζεται σήμερα κυρίως όταν υπάρχουν αυξημένες απαιτήσεις σε «καθαρό» υδρογόνο και οι ποσότητες αυτού που απαιτούνται δεν είναι πολύ μεγάλες. Από την άλλη μεριά, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σταδιακά μια σταδιακή αύξηση του παγκόσμιου ενδιαφέροντος για την παραγωγή του υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού, κυρίως εξαιτίας της σύγχρονης δυνατότητας κατασκευής ολοκληρωμένων συστημάτων από ηλεκτρολυτικές διατάξεις νερού, οι οποίες λειτουργούν μέσω της παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος με τη βοήθεια διαφόρων ΑΠΕ (κυρίως της ηλιακής και αιολικής ενέργειας).

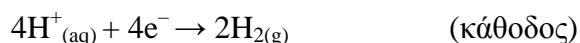
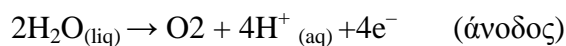
Τα ολοκληρωμένα αυτά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω διαφόρων ΑΠΕ παρουσιάζουν το σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τα παραδοσιακά ηλεκτρολυτικά συστήματα, ότι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν παράγεται χωρίς κάποιο σημαντικό κόστος, μιας και βασίζεται όπως είπαμε στην παραγωγή της από διάφορες ΑΠΕ. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η εφαρμογή τους για την μαζική παραγωγή του υδρογόνου να γίνεται πολύ φθηνότερα από την κλασσική μέθοδο παραγωγής του υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης (παραγωγή με

χρησιμοποίηση της συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου) και να εφαρμόζεται σταδιακά όλο και περισσότερο. Από την άλλη μεριά βέβαια, το κόστος κυρίως των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αυτών των ολοκληρωμένων ηλεκτρολυτικών συστημάτων παραγωγής υδρογόνου μέσω ΑΠΕ, είναι προς το παρόν ακόμα αρκετά υψηλό ώστε η παραγωγή αυτού μέσω των συγκεκριμένων διατάξεων να μπορεί να υποσκελίσει τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής του μέσω π.χ. των ορυκτών καυσίμων, με αποτέλεσμα η παραγωγή υδρογόνου μέσω ολοκληρωμένων ηλεκτρολυτικών διατάξεων να μην χρησιμοποιείται τόσο μαζικά όσο αυτές.

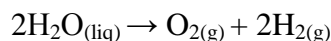
Μία χαρακτηριστική ηλεκτρολυτική διάταξη παραγωγής υδρογόνου που χρησιμοποιείται σήμερα για την παραγωγή του σε εργαστηριακή κλίμακα, είναι αυτή που φαίνεται στο παρακάτω αριστερά. Στο διπλανό σχήμα φαίνεται επίσης και η διαδικασία της εσωτερικής λειτουργίας, κατά την παραγωγή του υδρογόνου μέσω αυτής:



Κατά την ηλεκτρόλυσή του νερού, μέσα σε μία ηλεκτρολυτική διάταξη, προς παραγωγή υδρογόνου, αυτό οξειδώνεται αρχικά στην άνοδο της διάταξης σε μοριακό οξυγόνο και σε θετικά ιόντα υδρογόνου (ή πρωτόνια υδρογόνου, H<sup>+</sup>). Στη συνέχεια, τα πρωτόνια υδρογόνου που έχουν προκύψει, διέρχονται διαμέσου του νερού, που βρίσκεται μέσα στην ηλεκτρολυτική διάταξη, προς την κάθοδο αυτής και εκεί ανάγονται σε μοριακό υδρογόνο. Οι συγκεκριμένες διεργασίες παριστάνονται με αντιδράσεις ως εξής:**[30]**



Οπότε η συνολική αντίδραση ηλεκτρόλυσης του νερού έχει ως εξής:



Το οξυγόνο που παράγεται κατά τη διαδικασία ηλεκτρόλυσης του νερού από ηλεκτρολυτικές διατάξεις, μπορεί και αυτό, όπως και το υδρογόνο, να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω σε διάφορες εφαρμογές, οι οποίες όμως είναι κυρίως βιομηχανικού τύπου. Αποδεικνύεται θεωρητικά, ότι η παραγωγή του υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης

του νερού, απαιτεί ηλεκτρική τάση η οποία ισούται με 1,23 V . Στην πράξη όμως, η ηλεκτρική τάση που συνήθως εφαρμόζεται γι' αυτόν το σκοπό είναι κατά τι μεγαλύτερη (μεταξύ 1,55 V και 1,65V). Η αυξημένη αυτή τιμή της, οφείλεται κυρίως στις διάφορες απώλειες που υφίσταται το ηλεκτρικό ρεύμα (απώλειες θερμότητας και ηλεκτρομαγνητικού πεδίου) όταν διοχετεύεται μέσα στις ηλεκτρολυτικές διατάξεις.

Η απόδοση παραγωγής υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού, ορίζεται από τον λόγο της τάσης των 1,23 V η οποία απαιτείται θεωρητικά για την παραγωγή του, προς την ηλεκτρική τάση την οποία εφαρμόζουμε κάθε φορά στη πράξη γι' αυτό. Για παράδειγμα, με πρακτικά εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση ίση με 1,60 V, θα έχουμε απόδοση παραγωγής υδρογόνου:

$$\frac{1,23}{1,60} = 0,77 = 77\%$$

Παρατηρούμε, ότι από ενεργειακής τουλάχιστον σκοπιάς, η παραγωγή του υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού παρουσιάζει σημαντικό πλεονέκτημα έναντι της παραγωγής του από τα διάφορα ορυκτά καύσιμα (των οποίων η απόδοση παραγωγής δεν υπερβαίνει συνήθως το 60%).

## 4.5) Διανομή του υδρογόνου

### 4.5.1) Τρόποι διανομής του υδρογόνου – πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα των συστημάτων διανομής του

Η διανομή του υδρογόνου παίζει ξεχωριστό ρόλο στην ανάπτυξη και εδραίωση της «Οικονομίας του υδρογόνου». Ο τρόπος συγκρότησης του δικτύου διανομής του υδρογόνου, τόσο σε τοπικό, όσο και σε ευρύτερο επίπεδο, διαφέρει σημαντικά από αυτόν που χρησιμοποιείται σήμερα, σε παγκόσμια κλίμακα, για τη διανομή των διαφόρων συμβατικών ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, φυσικό αέριο κ.τ.λ.). ως γνωστόν, τα περισσότερα συμβατικά ορυκτά καύσιμα που καταναλώνονται στις μέρες μας από τον άνθρωπο (με εξαίρεση το φυσικό αέριο), μεταφέρονται αποκλειστικά σε υγρή ή στερεά μορφή.

Το γεγονός αυτό καθιστά τις υπάρχουσες υποδομές μεταφοράς τους ακατάλληλες για την μεταφορά του υδρογόνου, το οποίο σε συνήθεις συνθήκες περιβάλλοντος είναι αέριο. Ακόμα και αν το υδρογόνο μετατρέπονταν σε υγρό, μέσω συμπίεσης και μεταφέρονταν από το σημερινό υπάρχον σύστημα μαζικής διανομής των υγρών ορυκτών καυσίμων, η μεταφορά του αυτή θα σήμαινε αφενός την κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας για την μετατροπή του σε υγρό (με αποτέλεσμα το κόστος για τη μεταφορά του να γινότανε υπερβολικά μεγάλο) και αφετέρου θα παρουσίαζε αυξημένα προβλήματα ασφάλειας και αξιοπιστίας εξαιτίας των ιδιαίτερων συνθηκών που επικρατούν κατά τη μεταφορά του υδρογόνου σε υγρή μορφή (υψηλές πιέσεις).

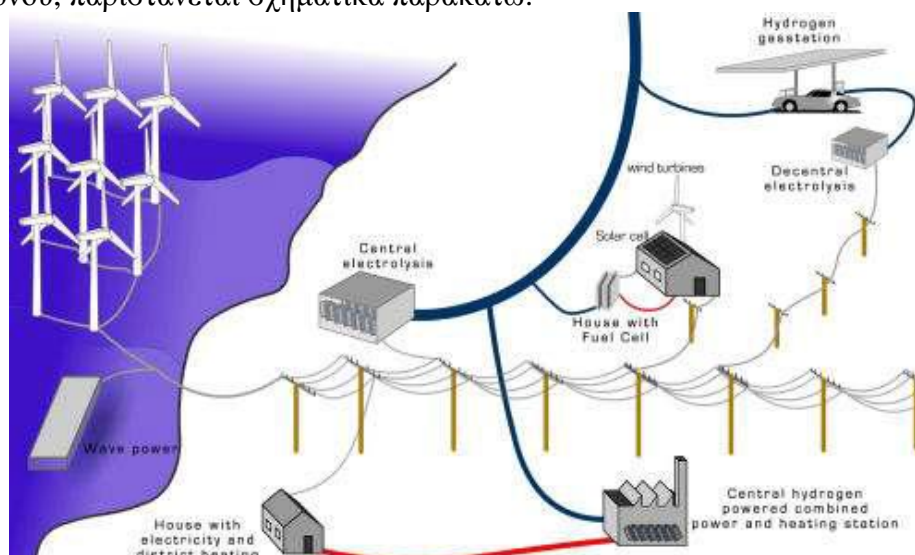
Από την άλλη μεριά, η υποδομή του παγκόσμιου δικτύου διανομής που χρησιμοποιείται σήμερα για τη μεταφορά του φυσικού αερίου σαν αέριο, είναι εξίσου ανεπαρκής για τη μεταφορά του αερίου υδρογόνου, μιας και οι συνθήκες πιέσεων που απαιτούνται για τη μεταφορά του φυσικού αερίου σε συνήθεις θερμοκρασίες περιβάλλοντος είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες της μεταφοράς του

υδρογόνου. Έτσι, από τα παραπάνω μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα, ότι η μελλοντική διανομή του υδρογόνου με ασφαλή και αποτελεσματικό τρόπο, μπορεί να γίνει μόνο μέσω ειδικού σχεδιασμού του μελλοντικού δικτύου μεταφοράς του, ο οποίος αναγκαστικά θα είναι μεγαλύτερων απαιτήσεων από αυτόν που εφαρμόζεται σήμερα για τη μεταφορά των συμβατικών υγρών ή αέριων ορυκτών καυσίμων.

Σε θεωρητικό επίπεδο, υπάρχουν σήμερα ήδη αρκετοί σχεδιασμοί όσον αφορά τη μελλοντική δομή του δικτύου διανομής του υδρογόνου σε παγκόσμια κλίμακα. Οι σχεδιασμοί αυτοί, διαφοροποιούνται ανάλογα με την φιλοσοφία με την οποία προσεγγίζεται γενικότερα το ζήτημα της μελλοντικής συγκρότησης της Οικονομίας του υδρογόνου, λαμβάνοντας υπόψη και τις τοπικές γεωγραφικές και περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε περιοχή της Γης. Από τους διάφορους αυτούς θεωρητικούς σχεδιασμούς, δύο είναι οι σημαντικότεροι, κυρίως επειδή δίνουν μια εύγλωττη εικόνα του ριζικά διαφορετικού τρόπου προσέγγισης της μελλοντικής συγκρότησης της Οικονομίας του υδρογόνου.

Η πρώτη προσέγγιση συγκρότησης του μελλοντικού δικτύου διανομής του υδρογόνου, έχει αρκετά παρόμοια μορφή μ' αυτή που εφαρμόζεται σήμερα για τη μαζική διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο σε τοπικό, όσο και σε ευρύτερο πλαίσιο. Σύμφωνα μ' αυτή μελλοντικά προβλέπεται, ότι πολλές μεγάλες μονάδες παραγωγής του υδρογόνου ικανές να παράγουν μεγάλες ποσότητες αυτού, θα βρίσκονται συνδεδεμένες μεταξύ τους μέσω κατάλληλων αγωγών μεταφοράς του, οι οποίοι θα το μεταφέρουν σε αέρια μορφή. Μέρος του δικτύου αυτού θα αποτελούν και τα διάφορα κέντρα ελέγχου διανομής του υδρογόνου, τα οποία θα αναλαμβάνουν να το τροφοδοτούν σε μικρότερους σταθμούς διανομής του (όπως για παράδειγμα σε πρατήρια ανεφοδιασμού οχημάτων του, ηλεκτρικά εργοστάσια κ.τ.λ.).

Επειδή η παραγωγή, κατά τη συγκεκριμένη προσέγγιση συγκρότησης του μελλοντικού δικτύου διανομής του υδρογόνου, λαμβάνει χώρα μακριά από τις τοπικές πηγές κατανάλωσής του, ο συγκεκριμένος τρόπος διανομής του χαρακτηρίζεται σαν «κεντροποιημένος» [31]. Το όλο σκεπτικό της «κεντροποιημένης» μελλοντικής συγκρότησης του δικτύου διανομής του υδρογόνου, παριστάνεται σχηματικά παρακάτω:



Η δεύτερη προσέγγιση της πιθανής μελλοντικής συγκρότησης του δικτύου διανομής του υδρογόνου, βρίσκεται στον αντίποδα της πρώτης και αναφέρεται σαν «μη κεντροποιημένη» διανομή του υδρογόνου [31]. Σύμφωνα μ' αυτή, το υδρογόνο θα παράγεται μελλοντικά απευθείας στα διάφορα τοπικά σημεία της κατανάλωσής του, δηλαδή απευθείας στα διάφορα τοπικά κέντρα της ζήτησής του,



μέσω της εκάστοτε μεθόδου παραγωγής του που θα είναι περισσότερο κατάλληλη γι' αυτό (ανάλογα με τις εκάστοτε γεωγραφικές, τεχνολογικές και κοινωνικές συνθήκες που θα επικρατούν στα σημεία αυτά).

Εκτός από αυτό, οι μελλοντικές ποσότητες του που θα παράγονται στα διάφορα τοπικά σημεία της ζήτησής του θα είναι τέτοιες, ώστε να μπορούν αφενός να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες του κάθε τοπικού πληθυσμού και αφετέρου να διοχετευτούν και στο ευρύτερο δίκτυο διανομής, είτε για εσωτερική κατανάλωση (για ένα κράτος) είτε για εξαγωγή. Έτσι, η συγκεκριμένη διανομή του υδρογόνου προς τα διάφορα σημεία της κατανάλωσής του, θα ακολουθεί έναν, λίγο ή περισσότερο, τοπικό δρόμο μεταφοράς, ο οποίος δεν θα απέχει ιδιαίτερα από τα εκάστοτε κέντρα της παραγωγής του.

Ένα βήμα παραπέρα, αποτελεί επίσης η απευθείας παραγωγή του υδρογόνου στο κάθε σημείο της ζήτησής του, όπου αυτό προφανώς κρίνεται δυνατό, χωρίς την απαραίτητη μεσολάβηση οποιονδήποτε ενδιάμεσων σταθμών παραγωγής του. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε για παράδειγμα να συμβεί με την παραγωγή του υδρογόνου από τον ίδιο τον χρήστη του, δηλαδή της ενέργειάς του, π.χ. στο χώρο του σπιτιού μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού από οικιακά ηλιακά ή αιολικά ηλεκτροπαραγωγικά συστήματα με σκοπό την κάλυψη των διαφόρων οικιακών αναγκών ή στο χώρο της εργασίας για μικρές ή μεσαίες επιχειρήσεις.

Από την παραπάνω ανάλυση της πιθανούς συγκρότησης του μελλοντικού δικτύου διανομής του υδρογόνου μπορούμε να συμπεράνουμε, ότι το σημαντικό πλεονέκτημα που παρουσιάζει η «μη κεντροποιημένη» διανομή του είναι η σημαντική ενεργειακή ανεξαρτησία που αυτή προσφέρει σε σχέση με την «κεντροποιημένη» του διανομή. Αυτό γιατί, η δυσλειτουργία που ενδεχομένως θα μπορούσε αυτή να παρουσιάσει σε κάποιο σημείο του δικτύου της, δε θα είχε οπωσδήποτε σαν συνέπεια την παρεμπόδιση ή διακοπή της λειτουργίας και κάποιων άλλων σημείων του δικτύου της, μιας και, όπως αναφέραμε, τα διάφορα σημεία του ευρύτερου δικτύου της λειτουργούν σχεδόν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Κάτι τέτοιο προφανώς δεν μπορεί να ισχύσει στην περίπτωση της «κεντροποιημένης» διανομής του υδρογόνου, αφού η ελαττωματική λειτουργία οποιουδήποτε τυχαίου σημείου του δικτύου της θα επηρεάσει πιθανότατα ένα ή περισσότερα γειτονικά του σημεία (όπως συμβαίνει σήμερα με την «κεντροποιημένη» διανομή που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας).

Από το συγκεκριμένο γεγονός μπορούμε να συμπεράνουμε, ότι η «μη κεντροποιημένη» διανομή του υδρογόνου μπορεί να λειτουργήσει ομαλά και σε πιθανές περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης που καταστρέφουν ή θέτουν προσωρινά εκτός λειτουργίας κάποια σημεία του δικτύου της (όπως π.χ. συμβαίνει σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών, δηλαδή εκτεταμένων πυρκαγιών, σεισμών, χιονοπτώσεων κ.τ.λ.). Αντίθετα, μια τέτοια προοπτική είναι σχεδόν αδύνατη για την «κεντροποιημένη» διανομή του υδρογόνου. Εκτός από την προστασία, λόγω ενεργειακής ανεξαρτησίας, απέναντι σε φυσικές καταστροφές και σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, το «μη κεντροποιημένο» σύστημα διανομής του υδρογόνου προσφέρει σημαντική διευκόλυνση και στην κάλυψη των ευρύτερων ενεργειακών αναγκών οποιουδήποτε κράτους, το οποίο συνεπάγεται γι' αυτό την οικονομική και ενεργειακή του ανεξαρτησία από άλλα κράτη. Αυτός είναι και ο λόγος που σε παγκόσμια κλίμακα σήμερα, αρκετά μικρά ή μεγαλύτερα κράτη επενδύουν αρκετά μεγάλα ποσά σε αναπτυξιακά προγράμματα που αφορούν την μελλοντική συγκρότηση της «Οικονομίας του υδρογόνου», μιας και αυτή θα σημάνει την ανεξαρτητοποίηση από τον μικρό εκείνο αριθμό των σημερινών κρατών –

παραγωγών που ελέγχουν την παραγωγή και διακίνηση των ορυκτών καυσίμων σε παγκόσμια κλίμακα.

Όσον αφορά τώρα την ασφάλεια των μελλοντικών δικτύων διανομής του υδρογόνου και των κέντρων παραγωγής και διοχέτευσής του, υπάρχουν ακόμα αρκετά σημαντικά ζητήματα που πρέπει να επιλυθούν, πρώτου αυτά λειτουργήσουν πρακτικά με αξιόπιστο και ασφαλή τρόπο. Όπως και στην περίπτωση του φυσικού αερίου, οι αγωγοί μεταφοράς του (αερίου) υδρογόνου και οι διάφοροι σταθμοί ανεφοδιασμού του, θα πρέπει να εξοπλιστούν με κατάλληλες τεχνολογίες διαχείρισής του. Οι τεχνολογίες αυτές θα πρέπει να είναι υψηλότερων απαιτήσεων από αυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα για το φυσικό αέριο (εξαιτίας των αρκετά υψηλότερων πιέσεων που απαιτούνται για τη διανομή του υδρογόνου). Όλες επίσης οι τεχνικές προφυλάξεις ανίχνευσης πιθανούς διαρροής που εφαρμόζονται σήμερα κατά την διανομή του φυσικού αερίου (π.χ. ανιχνευτές διαρροής, βαλβίδες πιέσεων, βαλβίδες ασφαλείας κ.τ.λ.) θα πρέπει να εφαρμοστούν και στο μελλοντικό δίκτυο διανομής του υδρογόνου, καθώς η διαρροή του υδρογόνου κατά τη διανομή του είναι το ίδιο επικίνδυνη με αυτή του φυσικού αερίου (υπάρχει κίνδυνος έκρηξης!). Επειδή η διανομή και ο ανεφοδιασμός του υδρογόνου γίνονται κάτω από πολύ υψηλές πιέσεις, τα υλικά με τα οποία θα κατασκευάζονται οι μελλοντικοί αγωγοί μεταφοράς του θα πρέπει να έχουν μεγαλύτερη αντοχή από τους αγωγούς που χρησιμοποιούνται σήμερα για τη μεταφορά του φυσικού αερίου. Αυτή είναι και η σημαντικότερη διαφοροποίηση μεταξύ των δύο δικτύων διανομής αερίων (υδρογόνου και φυσικού αερίου), αφού οι τεχνολογίες των υλικών που απαιτούνται για το πρώτο διαφοροποιούνται αρκετά απ' αυτές του δευτέρου.

Τέλος, να αναφέρουμε, ότι εκτός από τη χρησιμοποίηση εξελιγμένων υλικών για την κατασκευή των αγωγών διακίνησης του υδρογόνου, είναι αναγκαίο αυτοί να εφοδιαστούν και με κατάλληλες διατάξεις συμπίεστών του σε διάφορα σημεία τους, μιας και εκτός από υψηλές πιέσεις κατά τη μεταφορά του, το υδρογόνο σαν αέριο απαιτεί οι υψηλές αυτές πιέσεις να παραμένουν και συνεχώς σταθερές. Αυτό οφείλεται κυρίως στην μεγάλη πτώση πίεσης που παρατηρείται στο δίκτυο διανομής του όταν αυτό απάγεται απ' αυτό και χρησιμοποιείται για λόγους ανεφοδιασμού [31]. Παρά τις διάφορες τεχνικές δυσκολίες που υπάρχουν ακόμη για την ευρύτερη εφαρμογή της διανομής του υδρογόνου, αρκετά τεχνολογικά προηγμένα κράτη σήμερα (μεταξύ αυτών και αρκετά κράτη της Ε.Ε.), έχουν ήδη αρχίσει να αναπτύσσουν τις πρώτες, μικρής κλίμακας, υποδομές διανομής και ανεφοδιασμού του υδρογόνου, κυρίως δε για τον ανεφοδιασμό με υδρογόνο αστικών μεταφορικών οχημάτων του λεωφορεία, Ι.Χ. κ.τ.λ.).

Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί ο τοπικός σταθμός ανεφοδιασμού με υδρογόνο ο οποίος έχει κατασκευαστεί στη περιοχή Spandau του Βερολίνου της Γερμανίας, ο οποίος χρησιμοποιείται για τον ανεφοδιασμό των 14 αστικών επιβατικών λεωφορείων υδρογόνου που υπάρχουν στην πόλη του Βερολίνου:



**Σταθμός Ανεφοδιασμού υδρογόνου στο Spandau του Βερολίνου στη Γερμανία [31]**

## 4.6) Αποθήκευση του υδρογόνου

### 4.6.1) Εισαγωγή στην αποθήκευση του υδρογόνου – Δυνατές μέθοδοι αποθήκευσης του υδρογόνου

Όπως έχουμε αναφέρει, σε συνήθεις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας περιβάλλοντος (δηλαδή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με 25°C (298.15 K) και πίεση ίση με 100 kPa (0.987atm)), το υδρογόνο σαν υλικό είναι αέριο. Σαν αέριο, το υδρογόνο χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλους όγκους για περιορισμένες ποσότητες μάζας του, γεγονός που οφείλεται στην πολύ χαμηλή του πυκνότητα. Για το λόγο αυτό, προκειμένου να αποθηκευτεί σε συνήθεις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας περιβάλλοντος, θα πρέπει να μειωθεί ο πολύ μεγάλος αέριος όγκος του, γεγονός που συνεπάγεται την ταυτόχρονη αύξηση της πίεσής του ή την ταυτόχρονη μείωση της θερμοκρασίας του (ή και τα δύο). Είναι γνωστό, ότι 1 kg αερίου υδρογόνου σε συνήθεις συνθήκες περιβάλλοντος, καταλαμβάνει όγκο ίσο με 11m<sup>3</sup> περίπου, δηλαδή πολύ μεγάλο για να αξιοποιηθεί πρακτικά από τον άνθρωπο.

Για τον λόγο αυτό, προκειμένου να αξιοποιηθεί πρακτικά, θα πρέπει να μειωθεί ο πολύ μεγάλος του όγκος υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες, δηλαδή να αυξηθεί η πολύ μικρή του πυκνότητα (είναι  $\rho = m / V$ ). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των διαφόρων τεχνικών αποθήκευσής του σε κατάλληλες διατάξεις ή σε διάφορα υλικά. Η αύξηση της πυκνότητας της αέριας μάζας του (ή αντίστοιχα η μείωση του αερίου όγκου του) που αυτό διαθέτει υπό συνήθεις συνθήκες περιβάλλοντος, επιτυγχάνεται με τρεις διαφορετικούς τρόπους: είτε μέσω της αύξησης της πίεσης του, είτε μέσω της μείωσης της θερμοκρασίας του, είτε, τέλος, μέσω της μείωσης της άπωσης που ασκείται μεταξύ των μορίων του, κατά τη διοχέτευσή του σε διάφορα στερεά υλικά (μεταλλικά υδρίδια, νανοσωλήνες κ.τ.λ.). Όποια πάντως μέθοδος και να ακολουθηθεί, το σημαντικό ζητούμενο κατά την αύξηση της πυκνότητάς του αποτελεί το γεγονός, κατά πόσο η μέθοδος αποθήκευσής του που ακολουθήθηκε δύναται στη συνέχεια να αντιστραφεί, δηλαδή κατά πόσο το αποθηκευμένο υδρογόνο δύναται να ανακτηθεί στη συνέχεια, κατά την φάση της κατανάλωσής του. Οι κυριότερες μέθοδοι που έχουν ανακαλυφθεί μέχρι σήμερα για την αποτελεσματική αποθήκευση του υδρογόνου είναι οι εξής [32]:

1. Σε φιάλες αερίου κάτω από υψηλές συνθήκες πίεσης.
2. Σαν υγρό σε κρυογονικές δεξαμενές.
3. Προσροφημένο σε διάφορα στερεά υλικά που χαρακτηρίζονται από μεγάλη ειδική επιφάνεια των δομικών τους λίθων.
4. Συγκρατούμενο πάνω σε ενδοπλεγματικές θέσεις μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα διαφόρων μετάλλων.
5. Δεσμευμένο μέσω χημικών δεσμών ιοντικής ή ομοιοπολικής φύσης από διάφορες χημικές ενώσεις.

## 4.6.2) Αποθήκευση του υδρογόνου σαν αέριο

Το πιο κοινό σύστημα που χρησιμοποιείται σήμερα για την αποθήκευση του υδρογόνου, είναι οι φιάλες αερίου οι οποίες το αποθηκεύουν σε αρκετά υψηλές πιέσεις. Οι πιέσεις στις οποίες το υδρογόνο αποθηκεύεται στις συγκεκριμένες φιάλες κυμαίνονται συνήθως στα 5000 psi περίπου (όπου  $1 \text{ psi} = 6,894 \text{ kPa} = 0,0680 \text{ atm}$ ). Κάτω από αυτές τις πιέσεις, το αποθηκευμένο υδρογόνο αποκτά μια ογκομετρική πυκνότητα η οποία κυμαίνεται στα  $36 \text{ kg/m}^3$  περίπου, δηλαδή σχεδόν μισή από αυτή που το χαρακτηρίζει όταν είναι υγρό και υπό θερμοκρασία κορεσμού (δηλαδή για  $T = 32,976$  βαθμούς K ή  $-252,732$  οC,  $P = 7,04 \text{ kPa}$  ή  $1,02 \text{ psi}$ , με  $\rho = 31,43 \text{ kg/m}^3$ ) [32]. Οι μέγιστες πιέσεις που έχουν επιτευχθεί ποτέ κατά την αποθήκευση του υδρογόνου σε αέρια φάση, κυμαίνονται στα 10000 psi περίπου (μέσα σε ειδικά ενισχυμένες φιάλες αερίου).

Οι συνηθισμένες φιάλες αερίου που χρησιμοποιούνται σήμερα στη βιομηχανία και στην τεχνολογία παραγωγής ενέργειας υδρογόνου για την αποθήκευση αυτού, κατασκευάζονται από πολλαπλά ομοκυλινδρικά μεταλλικά τοιχώματα, μιας και οι πιέσεις που επικρατούν στο εσωτερικό τους είναι πολύ υψηλές για να συγκρατηθούν από ένα και μοναδικό εξωτερικό μεταλλικό τοίχωμα (όπως συμβαίνει στις κοινές φιάλες αερίου πιέσεων που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση των λοιπών αερίων). Εκτός από αυτό, για την επιπλέον ενίσχυση της ανθεκτικότητάς τους έχουν χρησιμοποιηθεί και εξωτερικά τοιχώματα κατασκευασμένα από νανοσωλήνες άνθρακα με αρκετή επιτυχία (αύξηση των πιέσεων συμπίεσης στα 10000psi) [33].

### 4.6.2.1) Μειονεκτήματα

Ένα από τα κυριότερα μειονεκτήματα αποθήκευσης του υδρογόνου σε φιάλες αερίου υψηλών πιέσεων, είναι η σχετικά χαμηλή του πυκνότητα που εξακολουθεί να έχει μετά την αποθήκευσή του στο εσωτερικό της.

Ένα άλλο προφανές μειονέκτημα της αέριας αποθήκευσής του σε φιάλες υψηλών πιέσεων, αποτελούν οι ίδιες οι υψηλές πιέσεις που απαιτούνται για την αέρια αποθήκευσή του, οι οποίες ανεβάζουν το κόστος της αέριας αποθήκευσής του, εξαιτίας των ειδικών υλικών που απαιτούνται για την κατασκευή των φιαλών. Εκτός από αυτό, οι φιάλες αποθήκευσης του υδρογόνου κατά κανόνα κατασκευάζονται αναγκαστικά, για λόγους ανθεκτικότητας, από μεταλλικά κράματα που είναι ευαίσθητα στην ατμοσφαιρική οξειδωση (π.χ. κράματα χαλκού ή αλουμινίου), τα οποία κάτω από κατάλληλες συνθήκες μπορούν να διαβρωθούν από τον ατμοσφαιρικό αέρα και να απελευθερώσουν βίαια το αποθηκευμένο υδρογόνο προς την ατμόσφαιρα (κίνδυνος έκρηξης).

Φιάλες κατασκευασμένες από λιγότερο οξειδωτικά μεταλλικά υλικά (όπως π.χ. φιάλες κατασκευασμένες από τιτάνιο), δεν είναι αρκετά ανθεκτικές στις υψηλές πιέσεις που απαιτούνται για την αποθήκευση του αερίου υδρογόνου και γι' αυτό συνήθως δεν χρησιμοποιούνται. Η καταστροφή των φιαλών αποθήκευσης υδρογόνου σαν αέριο, εξαιτίας της οξειδωσης των συνήθων μεταλλικών υλικών από τα οποία κατασκευάζονται (κράματα χαλκού ή αλουμινίου) εξηγείται ως εξής: Καθώς το υδρογόνο αποθηκεύεται στο εσωτερικό τους και ενόσω αυτό βρίσκεται ακόμα υπό χαμηλές πιέσεις, διαχέεται διαμέσου των πολύ μικρών πόρων που εμφανίζει πάντα το υλικό κατασκευής τους στην εσωτερική τους επιφάνεια και συγκεντρώνεται στα σημεία εκείνα των τοιχωμάτων τους όπου το υλικό κατασκευής παρουσιάζει κάποιες ατέλειες στη κρυσταλλική του δομή. Τότε, αναφερόμενοι σε υλικά κατασκευής που

οξειδώνονται εύκολα με τον ατμοσφαιρικό αέρα (π.χ. χαλκός και αλουμίνιο), το υδρογόνο αντιδρά με τα οξείδια που έχουν σχηματίσει τα εν λόγω υλικά με αυτόν. Από την αντίδρασή του μ' αυτά, το υδρογόνο παράγει μεταλλικά υδρίδια τα οποία, αφού παραχθούν, παραμένουν στο χώρο που έχουν σχηματιστεί και αυξανόμενα συνεχώς σε συγκέντρωση, ασκούν ολοένα και μεγαλύτερες πιέσεις στην συνολική μάζα του μεταλλικού υλικού κατασκευής, αναγκάζοντας έτσι αυτό να διογκώνεται (διόγκωση φιάλης).

Οι ολοένα και αυξανόμενες πιέσεις μέσα στην μεταλλική επιφάνεια των φιαλών αποθήκευσης του υδρογόνου, από ένα όριο και πάνω και ανάλογα και με το υλικό της κατασκευής τους, προκαλούν τελικά την ολική θραύση τους μέσω έκρηξης. Μέχρι το σημείο της θραύσης, το φαινόμενο της διόγκωσής τους μπορεί να γίνει αντιστρεπτό, απομακρύνοντας το υδρογόνο που έχει αποθηκευτεί στο εσωτερικό της. Επειδή όμως η ανίχνευση μεγάλων ποσοτήτων από μεταλλικά υδρίδια στο εσωτερικό των μεταλλικών επιφανειών γίνεται μόνο μέσω εξωτερικής οπτικής παρατήρησης (έλεγχος διόγκωσης)· συχνά είναι δυνατό η ανίχνευση αυτή να μην γίνει σωστά και να εξαχθούν εσφαλμένα συμπεράσματα.

Καταλαβαίνουμε δηλαδή, ότι η αποθήκευση του υδρογόνου μέσα σε φιάλες υψηλών πιέσεων θα πρέπει πάντα να ακολουθείται από αυστηρούς κανόνες ελέγχου και συντήρησης (π.χ. επικάλυψη εξωτερικών τοιχωμάτων φιάλης με αντιοξειδωτική μπογιά), προκειμένου να μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς κίνδυνο και με αποτελεσματικότητα. Να αναφέρουμε επίσης, ότι το φαινόμενο της ευθραυστότητας των φιαλών αποθήκευσης του υδρογόνου υπό υψηλές πιέσεις, εξαιτίας της παρουσίας των μεταλλικών υδριδίων στο εσωτερικό τους, είναι γνωστό και ως hydrogen induced phenomenon of embrittlement [33].

#### 4.6.3) Αποθήκευση του υδρογόνου σαν υγρό

Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σαν υγρό μέσα σε ειδικές διατάξεις που ονομάζονται κρυογονικές δεξαμενές. Γενικά, οι κρυογονικές δεξαμενές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση και άλλων υγρών υλικών, που κανονικά σε συνθήκες συνθήκες περιβάλλοντος είναι αέρια, αποθηκευοντάς τα σαν υγρά κάτω από πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και πολύ υψηλές πιέσεις. Οι εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες που επικρατούν στο εσωτερικό των κρυογονικών δεξαμενών, επιτυγχάνονται με τη βοήθεια διαφόρων αερίων (π.χ. υγρό οξυγόνο, αργό, άζωτο, αιθυλένιο κ.τ.λ.), τα οποία, λόγω του πολύ χαμηλού σημείου της υγροποίησής τους, έχουν την δυνατότητα να αφαιρούν θερμότητα από άλλα υλικά με υψηλότερο σημείο υγροποίησης.

Από την άλλη μεριά, οι εξαιρετικά υψηλές και σταθερές πιέσεις που επικρατούν στο εσωτερικό των κρυογονικών δεξαμενών, επιτυγχάνονται με τη βοήθεια διαφόρων διατάξεων απαγωγής κενού, καθώς επίσης και μέσω της σωστής στεγανοποίησης των κρυογονικών δεξαμενών. Κατά την αποθήκευση του υδρογόνου σαν αέριο μέσα σε μία κρυογονική δεξαμενή, η πυκνότητα που αυτό αποκτά σαν υγρό ανέρχεται συνήθως στα  $70,8 \text{ kgm}^{-3}$  περίπου (η αποθήκευσή του μέσα στη κρυογονική δεξαμενή γίνεται κοντά στο σημείο της υγροποίησής του).

Η πυκνότητά του αυτή παραμένει σχεδόν σταθερή καθ' όλη την περιοχή των πιέσεων και των θερμοκρασιών που χαρακτηρίζουν την υγρή του κατάσταση μέσα στην κρυογονική δεξαμενή (το υγρό υδρογόνο όπως και όλα τα άλλα υγρά είναι κατά προσέγγιση μη εκτατό). Η πυκνότητα που αποκτά το υγρό υδρογόνο κατά την αποθήκευσή του μέσα σε μία κρυογονική δεξαμενή, είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτή

που χαρακτηρίζει τη στερεή του κατάσταση στο σημείο της τήξης του (δηλαδή  $70,6 \text{ kgm}^{-3}$ ). Η αποθήκευση του υδρογόνου μέσω υγροποίησης σε κρυογονικές δεξαμενές, αποτελεί μια εξώθερμη διαδικασία και η θερμότητα που εκλύεται κατά την αποθήκευσή του σ' αυτές εκλύεται με συνεχή τρόπο.

Η ποσότητα της θερμότητας που εκλύεται κατά την αποθήκευση του υδρογόνου μέσα σε κρυογονικές δεξαμενές, εξαρτάται από το τελικό σημείο στο οποίο σταματάει η υγροποίηση του αέριου υδρογόνου και ο ρυθμός της έκλυσής της από το εκάστοτε σημείο της υγροποίησης στο οποίο βρίσκεται το υδρογόνο. Συγκεκριμένα, μέχρι τους  $77 \text{ K}$ , ο ρυθμός αυτός αυξάνεται με σταθερό και σχεδόν εκθετικό ρυθμό, ενώ μετά τους  $77 \text{ K}$  και μέχρι το τελικό σημείο βρασμού του υδρογόνου ( $20,268 \text{ βαθμοί K}$ ), ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας από τη μάζα του γίνεται σταθερός. Συνέπεια της εξώθερμης φύσης της υγρής αποθήκευσης του υδρογόνου σε κρυογονικές δεξαμενές είναι, ότι αν θελήσουμε να αποθηκεύσουμε μια ορισμένη αέρια ποσότητα αυτού, θα πρέπει να καταναλώσουμε κάποιο ποσό ενέργειας το οποίο είναι σχετικά μεγάλο.

Για να μειώσουμε το μεγάλο αυτό ποσό της ενέργειας, στις κρυογονικές δεξαμενές που χρησιμοποιούμε για την αποθήκευση του αέριου υδρογόνου, τις εφοδιάζουμε με πολλαπλές καταλυτικές επιφάνειες στο εσωτερικό τους, οι οποίες είναι κατασκευασμένες από κατάλληλα υλικά που επιταχύνουν την υγρή αποθήκευση του υδρογόνου (π.χ. βολφράμιο, νικέλιο, οξείδιο του χρωμίου κ.τ.λ.). Εκτός από αυτό, οι κρυογονικές δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου εφοδιάζονται και από αλληπάλληλα εξωτερικά στρώματα από θερμική μόνωση, τα οποία τις βοηθάνε να εμποδίζουν την απαγωγή της θερμότητας από το αποθηκευμένο πλέον σ' αυτές υγρό υδρογόνο.

#### **4.6.3.1) Μειονεκτήματα**

Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα που εμφανίζει η υγρή αποθήκευση του υδρογόνου μέσα σε κρυογονικές δεξαμενές είναι, ότι τα ποσά της ενέργειας που απαιτούνται για την αποθήκευσή του σ' αυτές είναι αρκετά υψηλά, παρά τις παραπάνω προφυλάξεις που αναφέραμε. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι τα ποσά της θερμότητας που πρέπει να αφαιρεθούν από το αέριο υδρογόνο, προκειμένου αυτό να μετατραπεί σε υγρό, είναι πολύ μεγάλα. Το ποσά αυτά απάγονται από τη μάζα του προφανώς μέσω της ταυτόχρονης κατανάλωσης ενέργειας από εμάς. Για τον λόγο αυτό, η υγρή αποθήκευσή του υδρογόνου σε κρυογονικές δεξαμενές χρησιμοποιείται σήμερα κυρίως σε εφαρμογές όπου το κόστος αποθήκευσής του δεν αποτελεί την πρώτη προτεραιότητα, ενώ οι ανάγκες που υπάρχουν σ' αυτό είναι μεγάλες και απαιτούν γρήγορο ρυθμό κατανάλωσής του (π.χ. κατά την χρησιμοποίηση του υγρού υδρογόνου σαν προωθητικό αέριο σε διαστημικούς πυραύλους).

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Η εικόνα στο εξώφυλλο είναι διαθέσιμη στη διεύθυνση:

[http://apostolospapafotiu.blogspot.gr/2012/03/blog-post\\_17.html](http://apostolospapafotiu.blogspot.gr/2012/03/blog-post_17.html) (17/06/12)

[1] Παγκόσμια κλιματική αλλαγή, φαινόμενο του θερμοκηπίου, Διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

<http://users.sch.gr/xtsamis/OkosmosMas/FainThermoKip.htm>

[2] Εικόνα Διαθέσιμη στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση:

[http://e-cynical.blogspot.gr/2008\\_11\\_01\\_archive.html](http://e-cynical.blogspot.gr/2008_11_01_archive.html) (17/06/12)

[3] Νόμος και Φύση, , δίκαιο Περιβάλλοντος και Αειφόρου Ανάπτυξης – Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Η εναλλακτική τεχνολογία για ένα αειφόρο μέλλον, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

[http://www.nomosphysis.org.gr/articles.php?artid=353&lang=1&catpid=1#\\_ftnr\\_ef4](http://www.nomosphysis.org.gr/articles.php?artid=353&lang=1&catpid=1#_ftnr_ef4). (17/06/12)

[4] κυνέλες καυσίμου διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

[http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%85%CF%88%CE%AD%CE%BB%CE%B7\\_%CE%BA%CE%B1%CF%85%CF%83%CE%AF%CE%BC%CE%BF%CF%85](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%85%CF%88%CE%AD%CE%BB%CE%B7_%CE%BA%CE%B1%CF%85%CF%83%CE%AF%CE%BC%CE%BF%CF%85) (17/06/12)

[5] Ιστορική Αναδρομή

[http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell)

[http://en.wikipedia.org/wiki/William\\_Robert\\_Grove](http://en.wikipedia.org/wiki/William_Robert_Grove)

<http://www.docstoc.com/docs/22923907/Timeline-History-of-Fuel-cells>

[http://en.wikipedia.org/wiki/William\\_Robert\\_Grove](http://en.wikipedia.org/wiki/William_Robert_Grove) (17/06/12)

[6] Εικόνα Διαθέσιμη στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Helios\\_in\\_flight.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Helios_in_flight.jpg) (17/06/12)

[7] κυνέλες καυσίμου διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση

[http://en.wikipedia.org/wiki/Proton\\_exchange\\_membrane\\_fuel\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Proton_exchange_membrane_fuel_cell) (17/06/12)

[8] <http://www.popsci.com/cars/article/2002-10/hy-wire-act>

[9] <http://www.allaboutenergy.gr/Paragogi3327.html>

[10] Fuel Cell Handbook (Seventh Edition) By EG&G Technical Services, Inc. 2004

[11] [http://en.wikipedia.org/wiki/Phosphoric\\_acid\\_fuel\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Phosphoric_acid_fuel_cell)

- [12] [http://en.wikipedia.org/wiki/Alkaline\\_fuel\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Alkaline_fuel_cell)
- [13] <http://psipunk.com/82/>
- [14] <http://www.fastcompany.com/1703225/first-un-satellite-will-evaluate-bacteria-that-can-turn-feces-into-energy>
- [15] [http://www.aist.go.jp/aist\\_e/latest\\_research/2003/20031203\\_2/20031203\\_2.html](http://www.aist.go.jp/aist_e/latest_research/2003/20031203_2/20031203_2.html)
- [16] <http://www.engadget.com/2005/09/16/toshiba-develops-mp3-player-with-60-hour-fuel-cell-battery/>
- [17] <http://www.dailytech.com/Fujitsu+Installs+Hydrogen+Fuel+Cell+on+Its+Sunnyvale+Campus/article8500.htm>
- [18] [http://www.fuelcellmarkets.com/fuel\\_cell\\_markets/solid\\_oxide\\_fuel\\_cells\\_sofc/4,1,1,2503.html](http://www.fuelcellmarkets.com/fuel_cell_markets/solid_oxide_fuel_cells_sofc/4,1,1,2503.html)
- [19] [http://www.fossil.energy.gov/programs/powersystems/fuelcells/fuelcells\\_solidoxide.html](http://www.fossil.energy.gov/programs/powersystems/fuelcells/fuelcells_solidoxide.html)
- [20] <http://www.fuelcell.no/>
- [21] [http://en.wikipedia.org/wiki/Molten\\_carbonate\\_fuel\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Molten_carbonate_fuel_cell)
- [22] [http://www.netl.doe.gov/publications/press/1997/tl\\_mfc.html](http://www.netl.doe.gov/publications/press/1997/tl_mfc.html)
- [23] Nuvera Fuel Cells, "How a fuel processor works" διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:  
[http://www.nuvera.com/technology/processors\\_work.php](http://www.nuvera.com/technology/processors_work.php) (17/06/12)
- [24] Wikipedia, "Thermal efficiency", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Thermodynamic\\_efficiency](http://en.wikipedia.org/wiki/Thermodynamic_efficiency) (17/06/12)
- [25] Θεωρητική προσέγγιση, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:  
<http://www.hy2.gr/reference.php?item=210> (28/12/11)
- [26] Πρακτική προσέγγιση, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:  
<http://www.hy2.gr/reference.php?item=211> (28/12/11)
- [27] Wikipedia "Υδρογόνο", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:  
<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF> (17/06/12)



[28] Τεχνολογία Υδρογόνου

<http://www.allaboutenergy.gr/Paragogi34.html> (17/06/12)

[29] J. Rifkin, “Η οικονομία του Υδρογόνου (Η δημιουργία του Παγκόσμιου Ενεργειακού Ιστού και η Ανακατανομή της Εξουσίας στη Γη, Η επόμενη Μεγάλη Οικονομική Επανάσταση)”, Αθήνα 2003, Εκδόσεις Λιβάνη

[30] <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CF%8C%CE%BB%CF%85%CF%83%CE%B7>

(17/06/12)

[31] Sciencenews.gr, διανομή υδρογόνου, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:  
<http://www.sciencenews.gr/afieromata/ydrogono/ydrogono3.asp> (28/12/11)

[32] National Aeronautics and Space Administration (NASA), July 25 2005, "Safety Standard For Hydrogen And Hydrogen Systems - Guidelines for Hydrogen System Design, Materials Selection, Operations, Storage, and Transportation", διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

[www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/canceled/871916.pdf](http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/canceled/871916.pdf)

[33] Hydrogen embrittlement, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση:

[http://www.uni-saarland.de/fak8/wwm/research/phd\\_barnoush/hydrogen.pdf](http://www.uni-saarland.de/fak8/wwm/research/phd_barnoush/hydrogen.pdf)