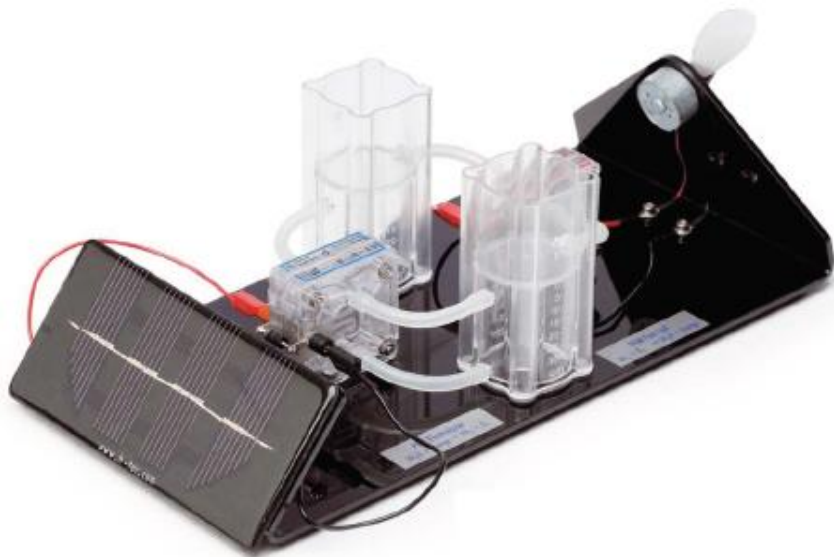


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ.



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΠΟΥΛΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ  
ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΠΑΝΑΓΙΩΤΑΡΑΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2017



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ.

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και αναφέρεται στην μελέτη και κατασκευή πειραματικού μοντέλου αυτόνομης λειτουργίας για την παραγωγή υδρογόνου ως καύσιμο. Είναι γνωστό ότι η αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας και η εξάντληση των συμβατικών καυσίμων, έχουν στρέψει την επιστήμη στην έρευνα και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών για την παραγωγή ενέργειας.

Αρχικά γίνεται μία αναφορά στις βασικές έννοιες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, των υβριδικών συστημάτων, της ηλεκτρόλυσης και του υδρογόνου. Στην συνέχεια αναλύεται το πειραματικό μοντέλο, γίνεται καταγραφή των πειραματικών μετρήσεων και ανάλυση αυτών.

Ευχαριστούμε θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή μας κ. Διονύσιο Παναγιωτάρα, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε., για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μας προσέφερε για την πραγματοποίηση της Εργασίας.

Πουλάκης Γεώργιος  
Παπαδάκης Παναγιώτης  
Σεπτέμβριος 2017

**Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών:** Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδαστές

(Ονοματεπώνυμο)

(Ονοματεπώνυμο)

.....  
(Υπογραφή)

.....  
(Υπογραφή)



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ.

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία αναφέρεται στον σχεδιασμό και την κατασκευή πειραματικού μοντέλου αυτόνομης λειτουργίας με σκοπό την παραγωγή υδρογόνου και την χρήση αυτού ως καύσιμο σε μια κυψέλη καυσίμου, η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια και την διοχετεύει σε έναν ηλεκτρικό κινητήρα. Η παραγωγή του πραγματοποιείται ηλεκτρολύοντας το νερό και η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για την ηλεκτρόλυση προέρχεται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Αυτή η μονάδα είναι εντελώς φιλική προς το φυσικό περιβάλλον, καθώς η εκπομπή ρύπων είναι μηδενική. Αυτός είναι και ο λόγος που αξίζει να πραγματοποιηθεί και να δοθεί μια ιδιαίτερη σημασία σε μία τέτοια μελέτη.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε τρία Κεφάλαια. Στο πρώτο Κεφάλαιο αναλύονται βασικές έννοιες. Αρχικά γίνεται μια αναφορά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπου αναλύονται τα είδη, οι τεχνολογίες τους, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους. Στη συνέχεια αναπτύσσονται τα υβριδικά συστήματα και οι κατηγορίες αυτών. Ακολουθεί, ο ορισμός και η ανάλυση του υδρογόνου ως καύσιμο, που είναι και το βασικό στοιχείο σε αυτή τη μελέτη. Επίσης, αναφέρονται οι εναλλακτικοί τρόποι παραγωγής του, η ιστορία του υδρογόνου και τα πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα του. Τέλος, εξηγείται η αρχή λειτουργίας της ηλεκτρόλυσης του νερού και αναλύονται οι διάφορες μέθοδοι ηλεκτρόλυσης του νερού και διάφορα εισαγωγικά και ιστορικά στοιχεία σχετικά με την ηλεκτρόλυση.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται και αναλύονται τα βασικά μέρη του πειραματικού μοντέλου, τα οποία είναι η φωτοβολταϊκή συστοιχία, η συσκευή ηλεκτρόλυσης, τα δοχεία συλλογής των αερίων υδρογόνου-οξυγόνου, το στοιχείο καυσίμου και το μοτέρ κίνησης-πτερωτή. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται μια ανάλυση του φωτοβολταϊκού φαινομένου, των ειδών των φωτοβολταϊκών πάνελ, των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών που σχετίζονται με το φωτοβολταϊκό στοιχείο, των διαγραμμάτων που το χαρακτηρίζουν και των παραγόντων που επηρεάζουν τα διαγράμματα αυτά. Όσον αφορά τη συσκευή ηλεκτρόλυσης γίνεται μια περεταίρω ανάλυση του συγκεκριμένου τύπου ηλεκτρόλυσης με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM). Στα δοχεία συλλογής μελετώνται οι χημικές, φυσικές, μαγνητικές ιδιότητες του υδρογόνου, οι κίνδυνοι του υδρογόνου και οι τρόποι αποθήκευσης του υδρογόνου. Στη συνέχεια, αναφέρονται κάποια εισαγωγικά και ιστορικά στοιχεία για τις κυψέλες καυσίμου, η αρχή λειτουργίας τους, οι κατηγορίες αυτών και αναλύονται τα επιμέρους τμήματα που αποτελούν μια κυψέλη καυσίμου. Επίσης, αναγράφονται οι ιδιότητες, τα χαρακτηριστικά και οι εφαρμογές των κυψελών καυσίμου. Σχετικά με το μοτέρ κίνησης περιγράφεται η αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών κινητήρων και των κατηγοριών τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται η καταγραφή των πειραματικών μετρήσεων. Ακολουθεί η επεξεργασία αυτών και η κατασκευή των χαρακτηριστικών καμπύλων του φωτοβολταϊκού πάνελ, της ηλεκτρολυτικής συσκευής και της κυψέλης καυσίμου. Επίσης υπολογίζονται οι βαθμοί απόδοσης αυτών και αναφέρονται τα συμπεράσματα που

προκύπτουν. Τέλος, περιγράφονται οι λειτουργικοί περιορισμοί της ηλεκτρολυτικής συσκευής και της κυψέλης καυσίμου.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτή την εργασία είναι πως τα οφέλη από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με αυτή τη διάταξη είναι ικανοποιητικά, καθώς ο βαθμός απόδοσης της είναι μεγαλύτερος σε σχέση με άλλες μεθόδους χωρίς να επιβαρύνεται το περιβάλλον. Επίσης, αυτή η τεχνολογία είναι αρκετά ώριμη για ευρεία εφαρμογή και περαιτέρω ανάπτυξη με σκοπό την μελλοντική ανεξαρτητοποίηση από τις συμβατικές πηγές ενέργειας.

## **ABSTRACT.**

The following thesis project is deals with the design and construction of an autonomous prototype, in order to produce hydrogen and use it in a fuel cell to produce electricity that will set an electric motor in motion. Hydrogen is produced by electrolyzing water and the required electricity for the electrolytic cell is provided by a photovoltaic panel. This model is friendly to the environment as it has zero emissions. This is the reason for this thesis to be accomplished and to be given specific emphasis.

The analysis of the project takes place in three chapters. The first chapter is about basic concepts. Initially, it starts with renewable energy sources where are mentioned their species, their technologies, their advantages and their disadvantages. After that, the hybrid systems and their categories are being developed. There are also mentioned some alternative modes of production, the history of hydrogen and its advantages and disadvantages. Finally, the principle of water electrolysis is explained and the various water electrolysis methods are analyzed along with various introductory and historical data on electrolysis.

In the second chapter, the basic parts of the experimental model are described and analyzed, which are the photovoltaic array, the electrolysis device, the hydrogen-oxygen gas storage tanks, the fuel cell and the motor. Specifically, there is being made an analysis of the photovoltaic phenomenon, the types of photovoltaic panels, the electrical characteristics associated with the photovoltaic element, the diagrams that characterize it and the factors affecting these diagrams. With regard to the electrolysis device, a further analysis of this type of proton exchange membrane electrolysis (PEM) is performed. In the subchapter of storage tanks, there is being made a reference in chemical, physical, magnetic properties of hydrogen, the dangers of hydrogen and ways of storing hydrogen. Next, some introductory and historical data on fuel cells, their operating principle, these categories and the individual fuel cell components are analyzed. Also, the properties, characteristics and applications of the fuel cells are listed. At last, there is a reference in the drive motor, the operating principle of the electric motors and their categories.

In the third chapter, the experimental measurements are recorded. Thereafter, they are processed and the characteristic curves of the photovoltaic panel, the electrolytic device and the fuel cell are constructed. Also, their performance grades are calculated and the resulting conclusions are reported. Finally, the operating limitations of the electrolytic device and the fuel cell are described.

The conclusions from this paper are that the benefits of electricity generation with this project are satisfactory as its efficiency is higher than other methods without

polluting the environment. Also, this technology is mature enough for broad application and further development for future independence from conventional energy sources.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.

### ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. ....	1
1.1.1	Ηλιακή ενέργεια. ....	3
1.1.2	Αιολική Ενέργεια. ....	9
1.1.3	Υδροδυναμική Ενέργεια.....	9
1.1.4	Γεωθερμία. ....	9
1.1.5	Βιοκαύσιμα.....	10
1.2	ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΥΣΕ).....	10
1.2.1	Αυτόνομα υβριδικά συστήματα ενέργειας.....	11
1.2.2	Διασυνδεδεμένα υβριδικά συστήματα ενέργειας. ....	12
1.3	ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ.....	13
1.3.1	Γενικές πληροφορίες για τα υδρογόνο.....	13
1.3.2	Ιστορική αναδρομή του υδρογόνου.....	15
1.3.3	Τρόποι παραγωγής υδρογόνου.....	17
1.3.3.1	Παραγωγή υδρογόνου από ηλεκτρόλυση του νερού.....	18
1.3.3.2	Ορυκτά καύσιμα. ....	19
1.3.3.3	Βιολογική παραγωγή-φωτοβιολογική μέθοδος παραγωγής υδρογόνου. ....	23
1.3.3.4	Θερμο-χημική διάσπαση του νερού.....	24
1.3.3.5	Παραγωγή από την βιομάζα.....	25
1.4	ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ.....	28
1.4.1	Εισαγωγικά και ιστορικά στοιχεία για την ηλεκτρόλυση. ....	28
1.4.2	Θεωρία ηλεκτρόλυσης του νερού. ....	29
1.4.3	Μέθοδοι ηλεκτρόλυσης του νερού. ....	30
1.4.3.1	Αλκαλική ηλεκτρόλυση. ....	31
1.4.3.2	Μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων για ηλεκτρόλυση του νερού (PEM). ....	33

1.4.3.3 Ηλεκτρόλυση ατμού.....	33
1.4.3.4 Ηλεκτρόλυση χλωρίου-αλκαλίων.....	35
1.4.3.4 Φωτοηλεκτρόλυση.....	35
1.4.4 Σύγκριση τεχνολογιών ηλεκτρόλυσης.....	36
2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	39
2.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ.....	39
2.1.1 Γενικά για το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	39
2.1.2 Είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	44
2.1.2.1 Φ/Β στοιχεία μεγάλου πάχους.....	44
2.1.2.2 Φ/Β στοιχεία λεπτών στρωμάτων.....	46
2.1.2.3 Φ/Β στοιχεία από νέες τεχνολογίες.....	49
2.1.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	49
2.2 ΣΥΣΚΕΥΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ.....	53
2.2.1 Μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων για ηλεκτρόλυση του νερού (PEM).....	53
2.3 ΔΟΧΕΙΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΑΕΡΙΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ-ΟΞΥΓΟΝΟΥ.....	57
2.3.1 Γενικά για την αποθήκευση του υδρογόνου.....	57
2.3.2 Μαγνητικές ιδιότητες.....	57
2.3.3 Φυσικές ιδιότητες.....	59
2.3.4 Χημικές ιδιότητες.....	60
2.3.5 Κίνδυνοι υδρογόνου.....	63
2.3.6 Αποθήκευση υδρογόνου.....	65
2.4 ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	67
2.4.1 Εισαγωγή και ιστορική αναδρομή για την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου.....	67
2.4.2 Κατηγορίες των κυψελών καυσίμου.....	69
2.4.3 Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC).....	70
2.4.3.1 Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου PEMFC.....	70
2.4.3.2 Δομή της κυψέλης καυσίμου.....	71
2.4.4 Ιδιότητες και χαρακτηριστικά των κυψελών καυσίμων.....	74
2.4.5 Εφαρμογές κυψελών καυσίμου.....	76
2.5 ΜΟΤΕΡ ΚΙΝΗΣΗΣ – ΦΤΕΡΩΤΗ.....	78
2.5.1 Αρχή λειτουργίας του μοτέρ κίνησης.....	78
2.5.2 Είδη ηλεκτρικών κινητήρων.....	79
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	81

3.1 ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	81
3.1.1 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (I-V) και ισχύος-τάσης (P-V) για το φωτοβολταϊκό πάνελ.....	81
3.1.2 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (I-V) για τον PEM ηλεκτρολύτη.....	86
3.1.3 Ενεργειακή απόδοση και απόδοση Faraday για τον PEM ηλεκτρολύτη.....	88
3.1.4 Απόδοση Faraday του ηλεκτρολύτη.....	91
3.1.5 Πείραμα με την PEM κυψέλη καυσίμου.....	93
3.1.6 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης και καμπύλη ισχύος για την κυψέλη καυσίμου...	93
3.1.7 Απόδοση Faraday για την PEM κυψέλη καυσίμου.....	98
3.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ.....	99
3.2.1 Λειτουργικοί περιορισμοί ηλεκτρολύτη PEM. ....	99
3.2.2 Λειτουργικοί περιορισμοί κυψέλης καυσίμου PEM.....	100
3.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	101
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	103



# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.

## 1.1 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ορίζονται ως οι ανεξάντλητες πηγές ενέργειας που μας παρέχει η φύση σε απεριόριστο βαθμό. Τέτοιες είναι η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η υδροδυναμική ενέργεια, η γεωθερμία και τα βιοκαύσιμα. Αυτές η φυσικές πηγές ενέργεια δεν μας αποφέρουν κανένα όφελος εάν δεν τις εκμεταλλευτούμε με κάποιο τρόπο. Οι τρόποι εκμετάλλευσης αυτών είναι οι εξής:

- Φωτοβολταϊκά στοιχεία, που εκμεταλλεύονται την ακτινοβολία του ηλίου την οποία μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια.
- Ανεμογεννήτριες, οι οποίες εκμεταλλεύονται την ροή του αέρα και την μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια.
- Υδροηλεκτρικά φράγματα, τα οποία εκμεταλλεύονται την υδροδυναμική ενέργεια του νερού και την μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια.
- Αντλίες θερμότητας εδάφους, οι οποίες εκμεταλλεύονται την θερμική ενέργεια των εσωτερικών στρωμάτων της γης για να θερμάνουν νερό το οποίο χρησιμοποιείται για θέρμανση εσωτερικών χώρων και για βασικές ανθρώπινες ανάγκες.
- Βιοκαύσιμα, είναι έφλεκτα υλικά τα οποία είναι σε αέρια, στερεά ή υγρή μορφή και καίγονται σε καυστήρες για να αποδώσουν θερμική ενέργεια. Παράγονται από την βιομάζα με την κατάλληλες χημικές και βιολογικές διεργασίες.

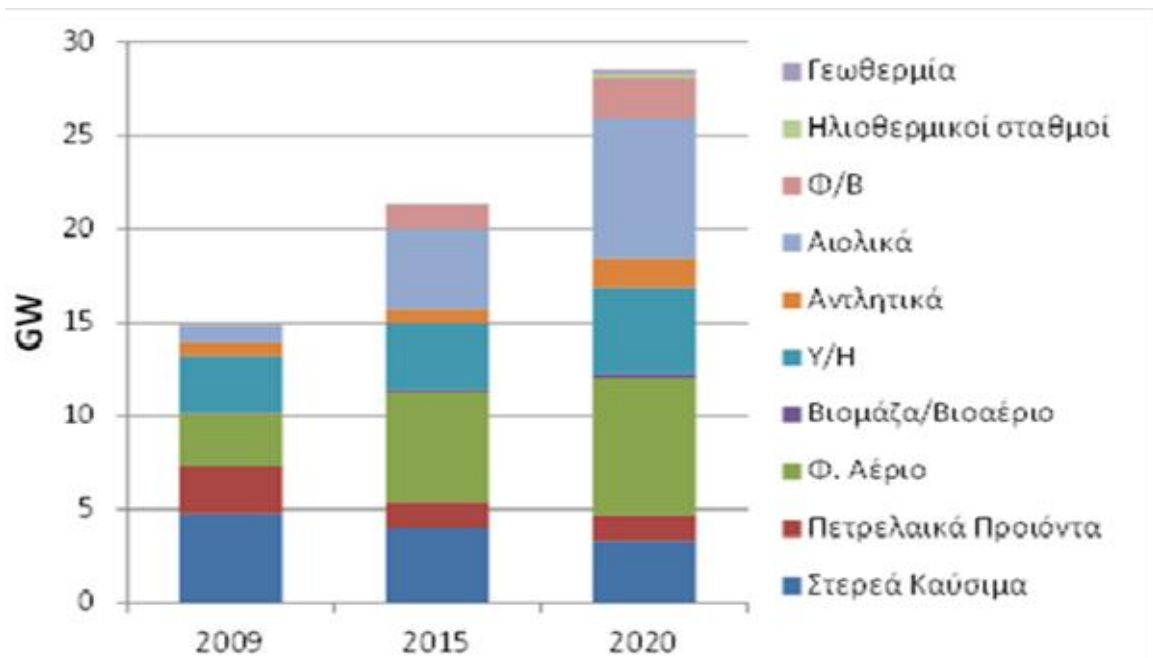
Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν μια εναλλακτική μορφή ενέργειας, φιλική προς το περιβάλλον και αειφόρο. Η ενεργειακή ζήτηση συνεχώς αυξάνεται λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας και των ανθρώπινων αναγκών, ενώ οι συμβατικές πηγές ενέργειας εξαντλούνται όλο και περισσότερο. Αυτό το γεγονός έχει συμβάλλει στην αύξηση της χρήσης των Α.Π.Ε. για παραγωγή ενέργειας σε σύγκριση με τις συμβατικές μορφές παραγωγής ενέργειας. Για όλους αυτούς τους λόγους η παγκόσμια οικονομία έχει προσανατολιστεί προς την ανάπτυξη τεχνολογιών εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η τεχνολογία των ΑΠΕ είναι εφικτή οικονομικά είτε με την χορήγηση δανείου, είτε με την οικονομική βοήθεια από χορηγό ή με την οικονομική βοήθεια από τον κόσμο μέσω ιστοσελίδας, το λεγόμενο crowd funding. Στις παρακάτω δύο εικόνες απεικονίζονται τα μέσα από τα οποία παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια από το 1990 έως το 2020. Σε αυτή την χρονική περίοδο έχει μειωθεί αισθητά η χρήση στερεών καυσίμων

και προϊόντων πετρελαίου, ενώ έχει αυξηθεί η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, φυσικού αερίου και πυρηνικής θερμότητας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

1.000 τόνοι, ισοδύναμο πετρελαίου



Σχήμα 1.1: Εξέλιξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά καύσιμο από το 1990 έως το 2010.<sup>[1]</sup>



Σχήμα 1.2: Εξέλιξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά καύσιμο από το 2009 έως το 2020.<sup>[2]</sup>

Πλεονεκτήματα των ΑΠΕ.

- § Ανεξαρτησία από τις συμβατικές μορφές παραγωγής ενέργειας.
- § Φιλικά προς το περιβάλλον και βοηθούν στην μείωση των ρύπων της ατμόσφαιρας και του φαινομένου του θερμοκηπίου.
- § Το κόστος λειτουργίας δεν εξαρτάται από την διεθνή οικονομία και από τις τιμές των συμβατικών καυσίμων.
- § Προσαρμογή στις διαφορετικές ενεργειακές ανάγκες του κάθε χρήστη.
- § Ενεργειακή ανεξαρτησία και ασφάλεια σε εθνικό επίπεδο.
- § Οικονομική και πολιτιστική αναβάθμιση πόλεων.
- § Προσελκύουν επενδυτές και δημιουργούν θέσεις εργασίας.

Μειονεκτήματα των ΑΠΕ.

- § Εξάρτηση της απόδοσης από την εποχή και τα γεωγραφικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής.
- § Έχουν μικρή απόδοση.
- § Έχουν πολύ υψηλό κόστος αγοράς.
- § Δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλες τις περιοχές λόγω της εξάρτησης τους από τα καιρικά φαινόμενα και την περιοχή εγκατάστασης.
- § Καταλαμβάνουν πολύ χώρο.
- § Θα πρέπει να υπάρχει ειδικός χώρος που θα εγκατασταθούν με συγκεκριμένες προδιαγραφές.

### 1.1.1 Ηλιακή ενέργεια.

Ο ήλιος είναι αιεφόρος πηγή ενέργειας και αποτελείται από υδρογόνο  $H_2$  και ήλιο He. Στην επιφάνεια του εκτελούνται άπειρες πυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης, κατά τις οποίες το υδρογόνο μετατρέπεται σε ήλιο και κατά την αντίδραση εκλύεται ηλιακή ακτινοβολία προς την γη. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε διάφορες μορφές όπως στα φυτά μέσω της φωτοσύνθεσης, στα πετρώματα της γης και στην θάλασσα μέσω της ακτινοβολίας. Τα τελευταία χρόνια λόγω της σταδιακής εξάντλησης των συμβατικών πηγών ενέργειας και της όξυνσης περιβαλλοντικών φαινομένων, όπως η επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου και της όξινης βροχής κλπ., το παγκόσμιο ενδιαφέρον έχει στραφεί στην ανάπτυξη τεχνολογιών εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και οι ηλιακοί συλλέκτες αποτελούν τα μοναδικά συστήματα εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας και έχουν μελετηθεί επαρκώς όσον αφορά την τεχνολογία τους, την κατασκευή τους και τον σχεδιασμό τους.

Πλεονεκτήματα ηλιακής ενέργειας.

- ✓ Ο ήλιος αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και όσο υφίσταται θα υπάρχει και ηλιακή ακτινοβολία.

- ✓ Η ηλιακή ενέργεια δεν βρίσκεται σε συγκεκριμένες περιοχές όπως για παράδειγμα το πετρέλαιο. Όπου και να βρίσκεται ένα σύστημα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας θα παράγει ηλεκτρική ενέργεια αβίαστα.
- ✓ Για άλλες μορφές ενέργειας χρειάζονται μεγάλες εγκαταστάσεις, όπως η γεωθερμία, οι οποίες συνεπάγονται υψηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας. Στην περίπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας, υπάρχει το κόστος της αγοράς των φωτοβολταϊκών στοιχείων, των μπαταριών και άλλων συσκευών ενώ έχουν χαμηλό κόστος συντήρησης και εγκατάστασης.
- ✓ Η ηλιακή ενέργεια είναι δωρεάν και δεν εξαρτάται από την διεθνή οικονομία.
- ✓ Δεν προκαλεί ρύπανση του περιβάλλοντος και δεν επιδεινώνει περιβαλλοντικά προβλήματα όπως την τρύπα του όζοντος, το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την όξινη βροχή.
- ✓ Δεν υπάρχουν δαπάνες για εισαγωγή ενέργειας από εξωτερικούς φορείς.
- ✓ Ενίσχυση της εγχώριας αγοράς και οικονομίας με την κατάλληλη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, με αποτέλεσμα την αύξηση της ποιότητας των ελληνικών προϊόντων.
- ✓ Νέες θέσεις εργασίας στην εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της ανάπτυξης της εγχώριας αγοράς.
- ✓ Στην χώρα μας ένα ποσό της παραγόμενης ενέργειας προέρχεται από την εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας και χωρίς αυτήν θα υπήρχε σημαντικό έλλειμα ισχύος, ιδιαίτερα στα απομονωμένα ηλεκτρικά δίκτυα των νησιών που θα αντιμετώπιζαν έτσι συχνές διακοπές ρεύματος, ιδίως κατά την καλοκαιρινή τουριστική περίοδο.

Μειονεκτήματα ηλιακής ενέργειας.

- ✓ Υψηλό αρχικό κόστος συσκευών αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας όπως ηλιακοί συλλέκτες και φωτοβολταϊκά. Αυτό το γεγονός είναι ικανό να αποτρέψει οικιακούς χρήστες, οι οποίοι θέλουν να αλλάξουν τρόπο ζωής και να στραφούν προς την περιβαλλοντική διαχείριση.
- ✓ Εξαρτάται άμεσα από τις καιρικές συνθήκες και επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό η απόδοσή τους σε άσχημα καιρικά φαινόμενα.
- ✓ Δεν είναι ισόποσα κατανομημένη η ακτινοβολία του ηλίου σε όλα τις περιοχές, άρα και η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

#### 1.1.1.1 Συστήματα εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας.

Τα συστήματα μέσω των οποίων εκμεταλλευόμαστε την ηλιακή ενέργεια διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

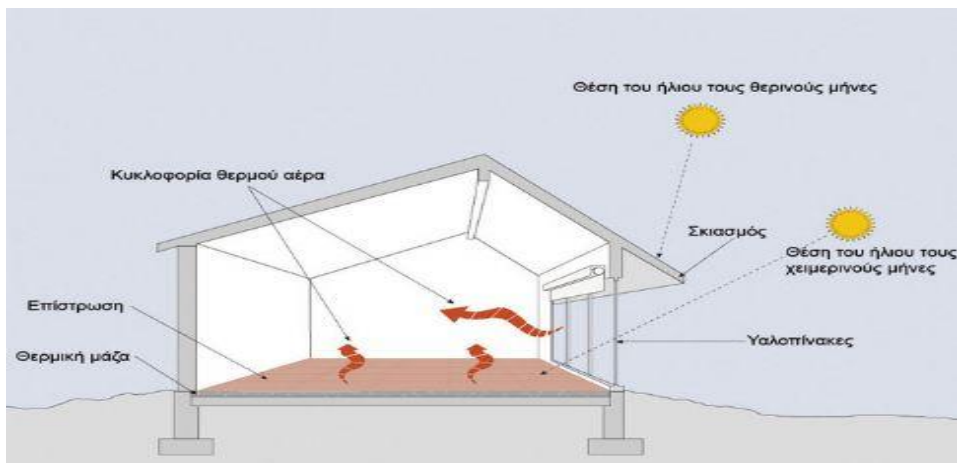
i. Παθητικά ηλιακά συστήματα.

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα χρησιμοποιούνται για την φυσική θέρμανση και φωτισμό κτιρίων τον χειμώνα και τον φυσικό αερισμό και την σκίαση κτιρίων το



καλοκαίρι χωρίς την χρήση μηχανικών μέσων, αλλά μέσω των δομικών στοιχείων των κτηρίων. Τον χειμώνα, ο σκοπός είναι η αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας ώστε να παρέχεται μεγάλο ποσό θερμότητας στα κτίρια και να εγκλωβίζεται σε αυτά. Το καλοκαίρι, ο σκοπός είναι να σκιάζονται τα κτίρια τις ώρες με την μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία και να αερίζονται με φυσική ροή αέρα, ώστε να παραμένουν δροσερά. Οι τρόποι με τους οποίους επιτυγχάνονται οι παραπάνω στόχοι περιγράφονται και εφαρμόζονται στον βιοκλιματικό σχεδιασμό των κτιρίων.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται δομικά υλικά (κεραμικά υλικά, μπετόν, πέτρα κ.α.) για την κατασκευή των κτιρίων τα οποία συγκρατούν την θερμότητα και την διανέμουν σε όλο το κτίριο. Τα υλικά αυτά θα πρέπει να έχουν υψηλή θερμοχωρητικότητα για να έχουν την δυνατότητα να αποθηκεύουν μεγάλα ποσά θερμότητας και υψηλή θερμική αγωγιμότητα για να προσλαμβάνουν εύκολα θερμότητα και να την διανέμουν ισόποσα σε όλη την επιφάνεια των κτιρίων. Ακόμα, χρησιμοποιούνται διαφανή υλικά τα οποία επιτρέπουν την διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας π.χ. υαλοπίνακες, θερμοπλαστικά πολυμερή κ.α. Τέλος, τα κτίρια θα πρέπει να είναι μονωμένα με την χρήση των κατάλληλων υλικών, ώστε να προστατεύονται από την υγρασία, την μούχλα, το κρύο και την ζέστη.



**Σχήμα 1.3:** Μετάδοση ηλιακής ακτινοβολίας σε κτίριο σχεδιασμένο σύμφωνα με τον Βιοκλιματικό σχεδιασμό.<sup>[3]</sup>

ii. Ενεργητικά ηλιακά συστήματα.

Αυτά τα συστήματα αποτελούνται από μηχανικά μέρη και όπως υποδεικνύει και η ονομασία τους εκμεταλλεύονται ενεργά την ηλιακή ακτινοβολία. Διακρίνονται από δύο μέρη, το πρώτο είναι ο ηλιακός συλλέκτης που αξιοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται σε θερμική ενέργεια που αποδίδεται σε κάποιο ρευστό (συνήθως νερό) και το δεύτερο είναι ο εναλλάκτης θερμότητας που μεταφέρει την θερμική ενέργεια μέσω του ρευστού σε μια δεξαμενή αποθήκευσης. Μία άλλη μορφή των ενεργητικών ηλιακών συστημάτων είναι η αντλία θερμότητας, η οποία αντί για συλλέκτες για την συλλογή

θερμική ενέργειας, χρησιμοποιεί απλές σωληνώσεις μεγάλου μήκους που τοποθετούνται στο έδαφος και διαρρέονται από νερό. Η λειτουργία των αντλιών θερμότητας θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Ηλιακοί συλλέκτες.

**Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες** αποτελούνται από μια απορροφητική επιφάνεια που εφάπτεται με αγωγούς οι οποίοι μεταφέρουν ρευστό. Η απορροφητική επιφάνεια εσωκλείεται από υαλοπίνακα στην μία πλευρά και στην άλλη από πλαίσιο αλουμινίου. Οι αγωγοί μεταφέρουν συνήθως νερό, αέρα ή άλλο ψυκτικό μέσο το οποίο ρέει φυσικά ή εξαναγκασμένα με την χρήση αντλίας. Η θερμική ενέργεια που αποκτά η απορροφητική επιφάνεια, λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας, μεταφέρεται στους αγωγούς μέσω συναγωγής και στην συνέχεια στο ρευστό μέσω συναγωγής. Το χρώμα της απορροφητικής επιφάνειας καθορίζει την απορροφητικότητα της επιφάνειας, συνήθως είναι μαύρου χρώματος αλλά μπορεί να έχει και διαφορετικό χρωματισμό. Ο υαλοπίνακας που βρίσκεται πάνω από την απορροφητική επιφάνεια επιτρέπει στις ακτίνες του ηλίου να τον διαπεράσουν αλλά εγκλωβίζει την θερμότητα που δεν απορροφάται από την απορροφητική επιφάνεια να διαφύγει. Η θερμότητα η οποία εκπέμπεται με την μορφή ακτινοβολίας από την απορροφητική επιφάνεια και οι απώλειες θερμότητας των αγωγών εγκλωβίζονται από μονωτικό υλικό το οποίο τοποθετείται κάτω από την απορροφητική επιφάνεια. Η θερμική ενέργεια η οποία εγκλωβίζεται αναθερμαίνει το ρευστό. Έχουν μέτρια απόδοση και χρησιμοποιούνται κυρίως για θέρμανση νερού ανθρώπινης χρήσης, θέρμανση εσωτερικών χώρων και ηλιακό κλιματισμό.

**Οι ηλιακοί συλλέκτες χωρίς κάλυμμα** δεν διαθέτουν υαλοπίνακα, μόνωση και εξωτερικό πλαίσιο, αλλά το μοναδικό χαρακτηριστικό τους είναι η απορροφητική επιφάνεια, η οποία έχει οπές που λειτουργούν ως αγωγοί μεταφοράς του ρευστού (νερό). Δεν συνδέονται με αποθηκευτική δεξαμενή ή εναλλάκτη θερμότητας αλλά συνδέονται απευθείας με την θερμαινόμενη πηγή, συνήθως θερμαινόμενη πισίνα. Η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει απευθείας στην απορροφητική επιφάνεια, αλλά η θερμική ενέργεια που δεν απορροφάται ή αποβάλλεται, χάνεται ολοκληρωτικά προς το περιβάλλον. Έχουν χαμηλή απόδοση, χαμηλό κόστος και χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την θέρμανση πισίνας.

**Οι ηλιακοί συλλέκτες κενού** αποτελούνται από έναν εξωτερικό και έναν εσωτερικό κυλινδρικό αγωγό από υαλοπίνακα. Ο εσωτερικός αγωγός με τον εξωτερικό δεν ακουμπούν, αλλά υπάρχει κενό αέρος μεταξύ τους που λειτουργεί ως μονωτικό υλικό. Ο εσωτερικός αγωγός περικλείει την απορροφητική επιφάνεια κυλινδρικού σχήματος, η οποία έχει συνήθως σκούρο χρωματισμό. Στην συνέχεια, η απορροφητική επιφάνεια εσωκλείει ένα πτερύγιο αλουμινίου, το οποίο έρχεται σε επαφή με έναν κυλινδρικό χάλκινο αγωγό. Ο αγωγός διαρρέεται από οινόπνευμα και καταλήγει σε μία αμπούλα, η οποία βρίσκεται εντός ενός κυλινδρικού σωλήνα, τον οποίο διαρρέει νερό. Η ηλιακή ακτινοβολία, σε οποιαδήποτε θέση και να βρίσκεται ο ήλιος, προσπίπτει κάθετα στον κυλινδρικό αγωγό λόγω του σχήματός του και αυτός είναι και ο λόγος που έχει μεγάλη απόδοση. Οι απώλειες λόγω ανάκλασης είναι μικρές, εφόσον η ακτινοβολία

προσπίπτει κάθετα και οι απώλειες λόγω μεταφοράς θερμότητας και εκπομπής ακτινοβολίας δεν απορρίπτονται στο περιβάλλον αφού τις εμποδίζει το κενό αέρος μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού αγωγού από υαλοπίνακα. Το οινόπνευμα που ρέει στον χάλκινο αγωγό ζεσταίνεται, γίνεται πιο ελαφρύ αφού μικραίνει η πυκνότητά του και κινείται ανοδικά προς την αμπούλα που την θερμαίνει και αυτή με την σειρά της μεταφέρει την θερμότητα στο νερό με το οποίο έρχεται σε επαφή. Έχουν υψηλό κόστος και χρησιμοποιούνται για θέρμανση εσωτερικών χώρων και ηλιακό κλιματισμό.

**Ο εναλλάκτης θερμότητας** είναι μια μεταλλική δεξαμενή στην οποία αποθηκεύεται η θερμική ενέργεια του μεταφερόμενου ρευστού, ενώ το ρευστό ρέει σε κλειστό ή ανοιχτό κύκλωμα. Η δεξαμενή είναι μονωμένη ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον. Είναι συνδεδεμένη με τους ηλιακούς συλλέκτες στο πάνω μέρος της που είναι και η έξοδος των συλλεκτών και η είσοδος της είναι κρύο νερό το οποίο προέρχεται από την παροχή νερού. Μέσα στην δεξαμενή το κρύο νερό καταλαμβάνει περίπου τον μισό όγκο αυτής από το κάτω μέρος της μέχρι την μέση και το άλλο μισό το καταλαμβάνει το νερό το οποίο έχει θερμανθεί από τους ηλιακούς συλλέκτες. Αν το κύκλωμα των σωληνώσεων είναι ανοικτό, τότε το ζεστό νερό μέσα στον εναλλάκτη μεταφέρεται απευθείας με σωληνώσεις για διάφορες χρήσεις όπως ζεστό νερό χρήσης, θέρμανση εσωτερικών χώρων και ηλιακό κλιματισμό. Το μειονέκτημα αυτού του κυκλώματος είναι ότι το ζεστό νερό καταναλώνεται άμεσα από την στιγμή που θερμαίνεται και φυσικά τις ώρες που η ένταση του ηλίου είναι χαμηλή δεν θα έχουμε ζεστό νερό. Στην περίπτωση που το κύκλωμα των σωληνώσεων του εναλλάκτη είναι κλειστό τότε η θερμική ενέργεια του ρευστού που κυκλοφορεί μέσα στον εναλλάκτη, το οποίο ρευστό δεν είναι συνήθως νερό, δεν καταναλώνεται απευθείας αλλά διατηρείται. Στο εσωτερικό του εναλλάκτη τοποθετούνται σωληνώσεις στις οποίες ρέει νερό και το ρευστό που θερμαίνεται από τους ηλιακούς συλλέκτες θερμαίνει με την σειρά του τις σωληνώσεις και το νερό που ρέει σε αυτές. Το νερό θερμαίνεται ομοιόμορφα από το θερμαινόμενο ρευστό και σε περιπτώσεις που η ένταση του ηλίου είναι χαμηλή το νερό συνεχίζει να θερμαίνεται από το ρευστό με μικρότερες απώλειες θερμικής ενέργειας.

### iii. Φωτοβολταϊκά ηλιακά συστήματα.

Τα φωτοβολταϊκά ηλιακά συστήματα χρησιμοποιούνται για να μετατρέψουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια, σύμφωνα με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Τα σώματα που αλληλοεπιδρούν με τον ηλεκτρισμό είναι οι αγωγοί, οι ημιαγωγοί και οι μονωτές.

Τα ιόντα των **αγωγών** συνδέονται με πολύ χαλαρούς χημικούς δεσμούς και συνεπώς είναι εύκολο να σπάσει ο δεσμός που τα συγκρατεί. Συνεπώς χρειάζονται μικρό ποσό ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας για να υπάρξει ροή ηλεκτρονίων. Αν συνδυάσουμε αυτό με το γεγονός ότι η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται ένα σώμα είναι ανάλογη με το ρεύμα που δημιουργείται και με το γεγονός ότι οι αγωγοί έχουν μεγαλύτερη αντίσταση από τους ημιαγωγούς, τότε καταλαβαίνουμε ότι θα δημιουργηθεί πολύ μικρής έντασης ρεύμα στον αγωγό και δεν θα μπορούμε να το αξιοποιήσουμε κατάλληλα.

Στους **μονωτές** τα ιόντα συγκρατούνται με πολύ ισχυρούς χημικούς δεσμούς και είναι πολύ δύσκολο να αποδεσμευτούν μεταξύ τους, εφόσον χρειάζονται μεγάλο ποσό ενέργειας για να συμβεί αυτό. Επίσης, οι μονωτές έχουν πολύ μεγάλη αντίσταση. Η ηλιακή ακτινοβολία δεν μεταφέρει τόσο μεγάλα ποσά ενέργειας, ώστε να διασπάσει τόσο ισχυρούς χημικούς δεσμούς, καθώς το μεγαλύτερο ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας χάνεται στο διάστημα και μόνο ένα μικρό ποσό μεταφέρεται στην γη.

Οι **ημιαγωγοί** έχουν την μικρότερη αντίσταση από τις τρεις κατηγορίες. Τα ιόντα συγκρατούνται μεταξύ τους με χαλαρούς ομοιοπολικούς δεσμούς και απαιτείται ένα μέτριο ποσό ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας για να διασπαστούν οι δεσμοί τους και να υπάρξει ελεύθερη κίνηση ηλεκτρονίων μέσα στον ημιαγωγό, γεγονός το οποίο συνεπάγεται αξιοποιήσιμο ηλεκτρικό ρεύμα.

Φωτοβολταϊκό φαινόμενο συνοπτικά.

Το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην γη περιέχει φωτόνια, τα οποία είναι ιόντα φωτός που μεταφέρουν διαφορετικά ποσά ενέργειας ανάλογα με το μήκος κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτά προσπίπτουν στην επιφάνεια διαφόρων σωμάτων και άλλα απορροφώνται από αυτά, άλλα ανακλώνται και άλλα τα διαπερνούν σαν να είναι διαφανή. Μόνο στους ημιαγωγούς μπορούν να δημιουργήσουν αξιοποιήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο πραγματοποιείται όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει σε ημιαγωγούς που βρίσκονται σε επαφή κι έτσι αν τους συνδέσουμε με ένα ηλεκτρικό φορτίο ανταλλάσσουν ηλεκτρόνια, τα οποία κινούνται προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση και έτσι παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα και οι δύο ημιαγωγοί αποκτούν διαφορά δυναμικού.

iv. Υβριδικά ηλιακά συστήματα.

Τα υβριδικά ηλιακά συστήματα είναι παθητικά ηλιακά συστήματα τα οποία προάγουν την φυσική ροή θερμότητας και μηχανικά συστήματα τα οποία την διευκολύνουν με κάποιον τρόπο ή εκτελούν εντελώς διαφορετική λειτουργία. Μερικά παραδείγματα αυτών των συστημάτων είναι:

- Φωτοβολταϊκά στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται αντί για υαλοπίνακες σε κτήρια. Τα στοιχεία αυτά είναι διαφανή και επιτρέπουν την διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μεγάλο βαθμό. Ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από τα φωτοβολταϊκά, τα οποία το μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια σύμφωνα με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από όλα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, εφόσον αυτά είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους και αποθηκεύεται σε μπαταρίες για να χρησιμοποιηθεί αργότερα ή χρησιμοποιείται κατευθείαν από τα ηλεκτρικά φορτία του κτηρίου αφού πρώτα έχει μετατραπεί σε εναλλασσόμενης τάσης με τη βοήθεια ενός μετατροπέα τάσης.
- Κινητό σκίαστρο το οποίο έχει τοποθετηθεί στην οροφή κτιρίου για να αποτρέπει την διέλευση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο κτίριο. Το πλεονέκτημα της χρήσης του

σκιάστρου θα είναι η διατήρηση της θερμοκρασίας σε σταθερά επίπεδα καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας το καλοκαίρι και έτσι διευκολύνεται ο φυσικός δροσισμός του κτιρίου.

### **1.1.2 Αιολική Ενέργεια.**

Η αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια του ανέμου και μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω των ανεμογεννητριών. Η αιολική ενέργεια είναι αποτέλεσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει σε ψυχρές μάζες αέρα, τις θερμαίνει και αυτές κινούνται προς ψυχρότερες περιοχές σύμφωνα με τους νόμους της μετάδοσης θερμότητας. Αυτή η ροή αέρα συγκροτεί την αιολική ενέργεια. Οι ανεμογεννήτριες αποτελούνται από μεγάλους έλικες, οι οποίες κινούνται σύμφωνα με την κατεύθυνση του ανέμου και συνδέονται με μια γεννήτρια εναλλασσόμενης ή συνεχής τάσης που παράγει αντίστοιχο είδος ρεύματος. Οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται συνήθως σε περιοχές με υψηλή μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου, ώστε να έχουν την μέγιστη δυνατή απόδοση.

### **1.1.3 Υδροδυναμική Ενέργεια.**

Η υδροδυναμική ενέργεια αποτελείται από την δυναμική ενέργεια του νερού των λιμνών και την κινητική ενέργεια του νερού των ποταμών. Είναι αποτέλεσμα της ηλιακής ενέργειας, η οποία θερμαίνει την επιφάνεια θαλασσών, ποταμών και λιμνών και το νερό που θερμαίνεται εξατμίζεται. Στην συνέχεια μεταφέρεται με την υδατόπτωση σε άλλη περιοχή και έτσι δημιουργείται μία ροή νερού που εξασφαλίζει την δυναμική και την κινητική ενέργεια του νερού. Εκμεταλλεύεται από υδροηλεκτρικά φράγματα ή υδροηλεκτρικά εργοστάσια τα οποία με την βοήθεια υδροστρόβιλων, συνδεδεμένων με γεννήτριες που παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα.

### **1.1.4 Γεωθερμία.**

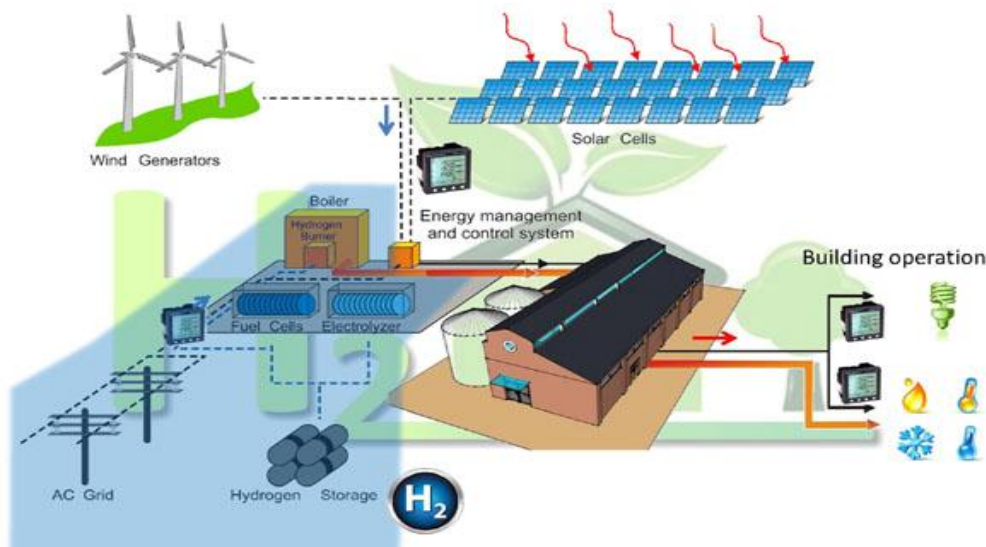
Τα εσωτερικά στρώματα του φλοιού της γης θερμαίνονται από την ηλιακή ακτινοβολία και η θερμική ενέργεια που αποκτούν εγκλωβίζεται εκεί και μπορεί να αξιοποιηθεί με την χρήση αντλιών θερμότητας. Οι αντλίες θερμότητας είναι μεταλλικοί αγωγοί στους οποίους κυκλοφορεί νερό ή αέρας και τοποθετούνται οριζόντια ή κάθετα κάτω από την επιφάνεια της γης. Η θερμική ενέργεια των εσωτερικών στρωμάτων της γης μεταφέρεται στο ρευστό που κυκλοφορεί μέσα στους αγωγούς και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ζεστό νερό ανθρώπινης χρήσης, θέρμανση εσωτερικών χώρων και κλιματισμό.

### 1.1.5 Βιοκαύσιμα.

Τα βιοκαύσιμα προέρχονται από προϊόντα γεωργικών (π.χ. κλαδιά δέντρων) και ζωικών αποβλήτων και μορφοποιούνται σε προϊόντα διαφορετικής σύστασης και σχήματος με χημικές και βιολογικές διεργασίες. Είναι έφλεκτα υλικά τα οποία αν θερμανθούν αποδίδουν θερμική ενέργεια και μέσω ενός λέβητα μεταφέρεται σε αγωγούς στους οποίους ρέει κάποιου είδους ρευστό, συνήθως αέρας ή νερό. Το ρευστό χρησιμοποιείται για ανθρώπινες ανάγκες, θέρμανση εσωτερικών χώρων και κλιματισμό.

### 1.2 ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΥΣΕ).

Η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών με μία μορφή ΑΠΕ πολλές φορές θέτει κάποιους λειτουργικούς και τεχνοοικονομικούς περιορισμούς. Για παράδειγμα η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας απαιτεί την χρήση συσσωρευτών για την αποθήκευση της λόγω των διακυμάνσεων διάθεσής της. Το ίδιο ισχύει και για την ηλιακή ενέργεια. Ωστόσο υπάρχουν και άλλες μορφές ΑΠΕ όπως η γεωθερμία και η βιομάζα οι οποίες έχουν μεγαλύτερη σταθερότητα και προβλεψιμότητα. Η ύπαρξη των παραπάνω περιορισμών και ο σκοπός για την εξάλειψή τους έχει οδηγήσει στην έρευνα και την ανάπτυξη των υβριδικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από δύο και περισσότερες ηλεκτρικές γεννήτριες διαφορετικής τεχνολογίας ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους. Πιο συγκεκριμένα ένα ΥΣΕ (εικόνα 1.1) περιλαμβάνει μία συμβατική πηγή ενέργειας (π.χ. γεννήτρια ντίζελ) σε συνδυασμό με δύο ή και περισσότερες μορφές ΑΠΕ, διατάξεις αποθήκευσης, συστήματα ελέγχου και διαχείρισης φορτίου.



Εικόνα 1.1: Υβριδικό Σύστημα Ενέργειας.<sup>[4]</sup>

Τα βασικότερα οφέλη από την αξιοποίηση των υβριδικών συστημάτων ενέργειας είναι:

- Η σταθερότητα στην απόδοση του συστήματος λόγω του ότι υπάρχουν περισσότερες από μια ΑΠΕ οπότε όταν υστερεί η μία πηγή ενέργειας συνήθως πλεονεκτεί η άλλη.
- Το χαμηλό κόστος παραγωγής ενέργειας τους καθώς το μεγαλύτερο ποσό αυτής λαμβάνεται από τις ΑΠΕ.
- Η μεγάλη διάρκεια ζωής του.
- Η δυνατότητα ανεξαρτητοποίησης από συγκεκριμένες συμβατικές πηγές ενέργειας.
- 

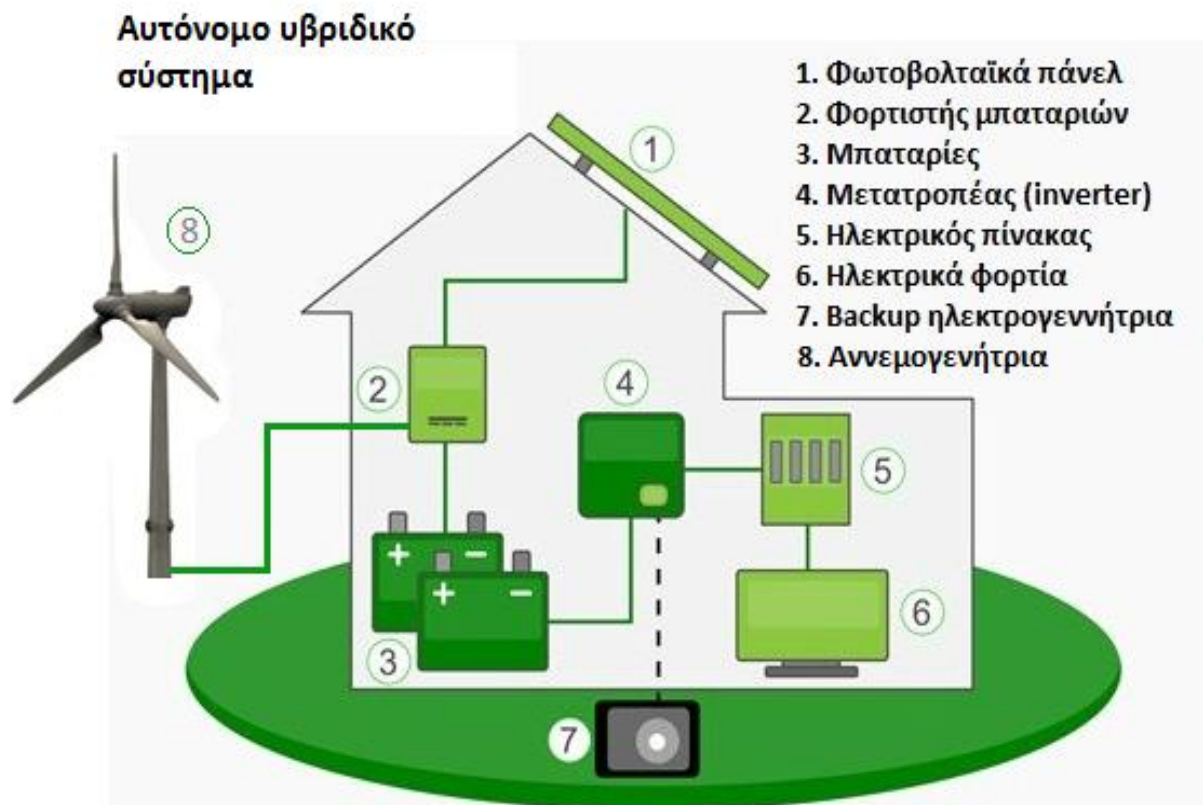
Ο σχεδιασμός ενός υβριδικού συστήματος πρέπει να λαμβάνει υπόψη ένα σύνολο παραγόντων όπως:

- Την εθνική πολιτική για την προώθηση των υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας και γενικότερα την προώθηση των ΑΠΕ.
- Τη διαθεσιμότητα και την εκμεταλλευσιμότητα των ΑΠΕ.
- Το ποσοστό διείσδυσης της τεχνολογίας των ΑΠΕ στα υβριδικά συστήματα ενέργειας.
- Τα χαρακτηριστικά του φορτίου και η τοποθεσία στην οποία βρίσκεται (ημερήσιες KWh, μέγιστο φορτίο).
- Το κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης.
- Η αξιοπιστία του και η επίδραση στο περιβάλλον.

Τα υβριδικά συστήματα ενέργειας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα αυτόνομα και τα διασυνδεδεμένα υβριδικά συστήματα.

### **1.2.1 Αυτόνομα υβριδικά συστήματα ενέργειας.**

Τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα (ΑΥΣ) χρησιμοποιούνται κυρίως για την ηλεκτροδότηση απομονωμένων φορτίων, περιοχών οι οποίες δεν έχουν την δυνατότητα σύνδεσης με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο ( π.χ. νησιωτικές περιοχές, φάρμες). Το αυτόνομο σύστημα πρέπει να έχει την ικανότητα να τροφοδοτήσει με ενέργεια το φορτίο οποιαδήποτε στιγμή ή να κάνει αποκοπή φορτίου όταν αυτό δεν είναι εφικτό. Επιπλέον οφείλει να έχει την ικανότητα ρύθμισης συχνότητας και παραγωγής έργου ισχύος, ώστε να ρυθμίζει την τάση του δικτύου. Όταν η ηλεκτρική παραγωγή από ΑΠΕ ξεπερνά το φορτίο, η περίσσεια ενέργειας πρέπει να αποθηκευτεί ή και να απορριφθεί με κάποιο τρόπο, ώστε να μην προκαλέσει αστάθεια στο σύστημα. Για τους παραπάνω λόγους, τα περισσότερα ΑΥΣ περιλαμβάνουν διατάξεις αποθήκευσης και συστήματα ελέγχου και διαχείρισης φορτίου. Στην παρακάτω εικόνα 1.2 παρουσιάζεται ένα αυτόνομο υβριδικό σύστημα.



**Εικόνα 1.2:** Παράδειγμα αυτόνομου υβριδικού συστήματος.<sup>[5]</sup>

### 1.2.2 Διασυνδεδεμένα υβριδικά συστήματα ενέργειας.

Τα διασυνδεδεμένα υβριδικά συστήματα (εικόνα 1.3) είναι συστήματα στα οποία δεν συμπεριλαμβάνεται η συμβατική ηλεκτρική γεννήτρια για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Επίσης δεν περιέχονται συσσωρευτές για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο οι ενεργειακές ανάγκες που δεν μπορούν να καλυφθούν από τις ΑΠΕ, λαμβάνουν την απαιτούμενη ενέργεια από το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Το βασικό μειονέκτημα του αυτόνομου σε σχέση με το διασυνδεδεμένο είναι πως το πρώτο πρέπει να μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες οποιαδήποτε χρονική στιγμή ή να παρακάμψει το φορτίο όταν δεν υπάρχει παραγωγή ρεύματος.

Στην περίπτωση που το σύστημα παράγει περισσότερη ενέργεια από την καταναλισκόμενη γίνεται απορρόφηση της περίσσειας ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο με κάποιους περιορισμούς για την στιγμιαία παραγωγή ισχύος του υβριδικού συστήματος. Στην περίπτωση ασθενούς δικτύου, όπου η ρύθμιση τάσης και συχνότητας μπορεί να επηρεαστεί από την ύπαρξη του υβριδικού συστήματος, απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός και διατάξεις ελέγχου.



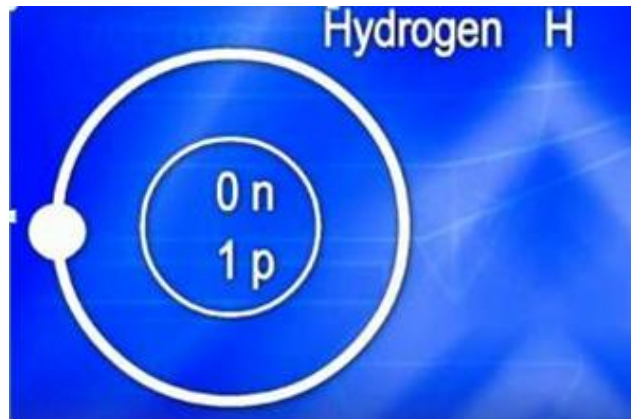


Εικόνα 1.3: Διασυνδεδεμένο υβριδικό σύστημα.<sup>[6]</sup>

### 1.3 ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ.

#### 1.3.1 Γενικές πληροφορίες για τα υδρογόνο.

Το υδρογόνο είναι ένα χημικό στοιχείο το οποίο βρίσκεται στην πρώτη θέση του περιοδικού πίνακα και συμβολίζεται με το αγγλικό γράμμα H, το οποίο είναι συντομογραφία για το Hydrogen (Υδρογόνο). Έχει το μικρότερο βάρος από όλα τα χημικά στοιχεία και ο ατομικός του αριθμός είναι ίσος με ένα. Αποτελείται από τον πυρήνα και ένα ηλεκτρόνιο στην εξωτερική του στοιβάδα (σχήμα 1.4). Στην φύση δεν συναντάται ως άτομο αλλά σε χημικές ενώσεις, καθώς σχηματίζει ομοιοπολικούς δεσμούς με άλλα άτομα με μεγάλη ευκολία.



**Σχήμα 1.4:** Το άτομο του υδρογόνου.<sup>[7]</sup>

Αποτελεί μια πηγή ενέργειας, η οποία είναι άμεσα διαθέσιμη εφόσον το υδρογόνο προέρχεται κυρίως από την αναμόρφωση υδρογονανθράκων και άλλων χημικών ενώσεων που το περιέχουν και ένα μικρό ποσοστό από την ηλεκτρόλυση του νερού. Ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών είναι δυνατόν να παραχθεί υδρογόνο, το οποίο είναι φιλικό προς το περιβάλλον καθώς με την καύση του παράγονται κυρίως υδρατμοί νερού. Η θερμότητα των υδρατμών που αποβάλλονται μπορεί να αξιοποιηθεί για περαιτέρω θέρμανση π.χ. σε εναλλάκτη θερμότητας. Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον ως αντικαταστάτης των συμβατικών καυσίμων στην αυτοκινητοβιομηχανία και στα μέσα μαζικής μεταφοράς (μηχανές εσωτερικής καύσης), στις αερομεταφορές (αεροστρόβιλοι), στα πλοία (κυψέλες καυσίμου) και σε διάφορες εφαρμογές όπως θέρμανση εσωτερικών χώρων (λέβητες αερίου και καταλυτικοί καυστήρες) και διαστημικές εφαρμογές. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρισμού μέσω μηχανών εσωτερικής καύσης, αεροστροβίλων και κυψελών καυσίμου.

Πλεονεκτήματα του υδρογόνου.

- Περιέχει μεγάλο ποσό ενέργειας σε σχέση με το βάρος του, πολύ μεγαλύτερο από τα συμβατικά καύσιμα.
- Όταν καίγεται με καθαρό οξυγόνο τότε αποδίδει νερό και θερμότητα. Όταν καίγεται με ατμοσφαιρικό αέρα αποδίδει και οξειδία του αζώτου σε τόσο μικρό βαθμό όμως που δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον.
- Με την χρήση του περιορίζεται η χρήση των συμβατικών μη ανανεώσιμων καυσίμων που ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές με περιορισμένη παραγωγή συμβατικών καυσίμων και ηλεκτρικής ενέργειας.

Μειονεκτήματα του υδρογόνου.

- Το υδρογόνο είναι δύσκολο να αποθηκευτεί καθώς αν βρίσκεται σε αέρια μορφή θα πρέπει να συμπυκνωθεί πρώτα σε υγρό, να συμπιεστεί και μετά να αποθηκευτεί σε μικρού μεγέθους δεξαμενή.

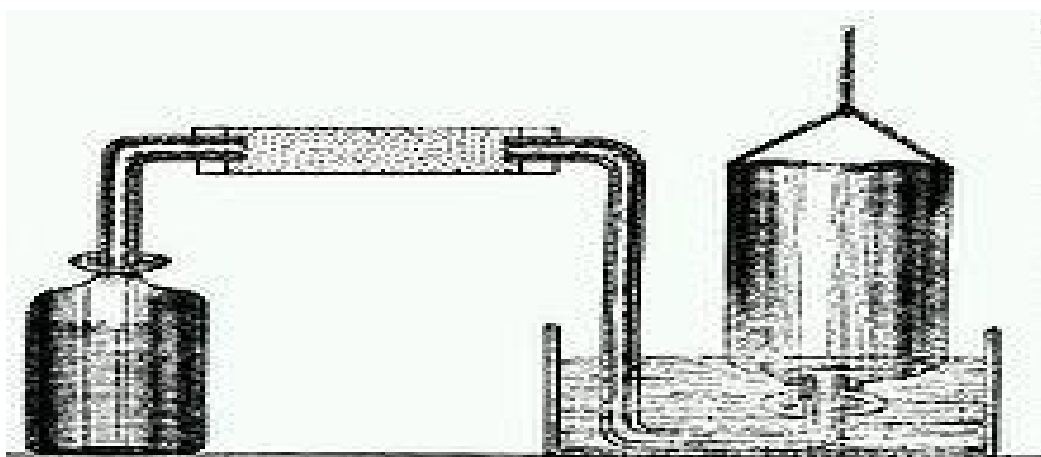
- Είναι επικίνδυνο καθώς αν αναμειχθεί με ατμοσφαιρικό οξυγόνο υπάρχει κίνδυνος έκρηξης.
- Δεν είναι οργανωμένη η παραγωγή του και δεν υπάρχει δίκτυο διανομής του.
- Έχει υψηλή τιμή σε σχέση με συμβατικά καύσιμα όπως π.χ. το πετρέλαιο.
- Οι συσκευές παραγωγής και εκμετάλλευσης υδρογόνου έχουν υψηλό κόστος όπως π.χ. κυψέλες καυσίμου.
- Χρειάζεται υψηλά ποσά ενέργειας για να παραχθεί.

### 1.3.2 Ιστορική αναδρομή του υδρογόνου.

Ανακαλύφθηκε αρχικά από τον Henry Cavendish το 1766, ο οποίος τοποθέτησε σε ένα δοχείο ψευδάργυρο (Zn) και άλλα οξέα σε υγρή μορφή όπως υδροχλώριο (HCl) κι έτσι δημιούργησε ένα μείγμα, όπως φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 1.5. Ο παρακάτω τύπος περιγράφει την αντίδραση:



Έπειτα παρατήρησε στο μείγμα αυτό μικρές φυσαλίδες αερίου. Έτσι συνέλεξε το αέριο, το ανέλυσε και αντιλήφθηκε ότι τα δύο στοιχεία που είχε τοποθετήσει στο δοχείο δημιούργησαν μια χημική ένωση όταν αλληλοεπίδρασαν μεταξύ τους. Υπέθεσε λανθασμένα ότι αυτή η χημική ένωση περιεχόταν από πριν στην δομή του υδραργύρου, αλλά περιέγραψε σωστά τις ιδιότητές της. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποίησε ο Cavendish για να παραγάγει υδρογόνο φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 1.5.

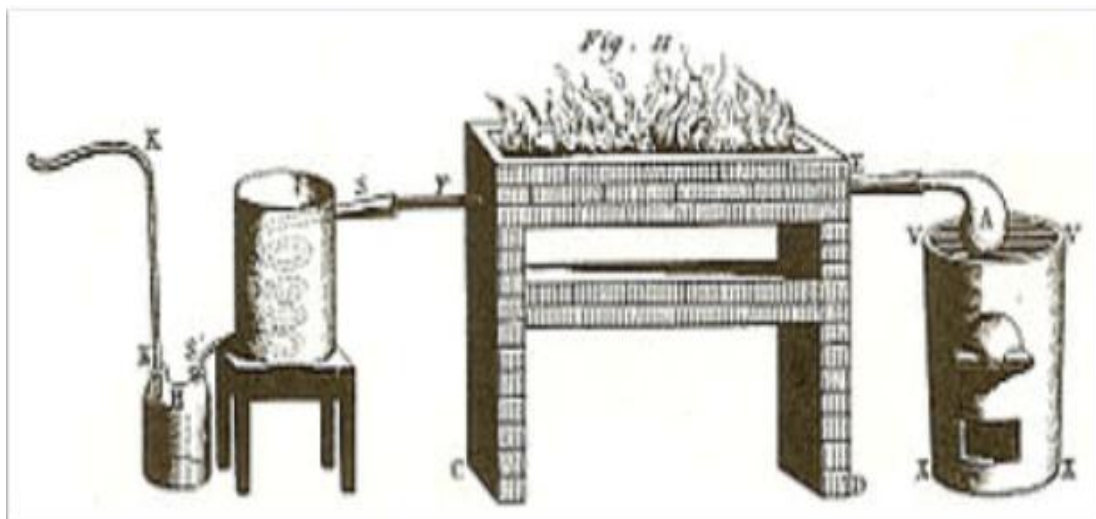


**Σχήμα 1.5:** Διάταξη παραγωγής υδρογόνου από τον Henry Cavendish.<sup>[8]</sup>

Στην συνέχεια το 1787 ο Antoine Lavoisier προσπάθησε να αποδείξει την διατήρηση της μάζας σε κάθε χημική αντίδραση. Έτσι τοποθέτησε σε ένα δοχείο νερό και το συνέδεσε μέσω ενός χάλκινου αγωγού με ένα συμπυκνωτή και αυτόν με ένα μικρότερο δοχείο που είχε στο πάνω μέρος του ένα σωληνάριο (Σχήμα 1.6). Θέρμανε το πρώτο δοχείο μέχρι να εξατμιστεί το νερό που περιείχε και είχε τοποθετήσει μια πηγή θερμότητας κάτω από τον χάλκινο αγωγό σε κάποιο σημείο ώστε να μην υγροποιηθούν οι υδρατμοί όταν ρέουν μέσα σε αυτόν. Όταν το νερό εξατμίζεται και γίνεται αέριο σπάνε οι δεσμοί που συγκρατούν το οξυγόνο με τα μόρια του υδρογόνου και τα δύο αυτά αέρια απελευθερώνονται χωρίς να συνδέονται μεταξύ τους. Κατά την ροή των υδρατμών στον αγωγό μια μικρή ποσότητα υδρατμών επικάθεται στον αγωγό και το αέριο οξυγόνο αντιδράει με τον χαλκό (οξειδωση) και το αέριο υδρογόνο απελευθερώνεται.

Στην συνέχεια, οι υπόλοιποι υδρατμοί και το αέριο υδρογόνο διαρρέουν τον συμπυκνωτή που είναι ένας σπειροειδής αγωγός όπου οι υδρατμοί μετατρέπονται σε νερό καθώς εκτονώνονται και ανταλλάσσουν θερμότητα με το περιβάλλον, ενώ το αέριο υδρογόνο θερμαίνεται και παραμένει στην αέρια κατάσταση. Το αέριο υδρογόνο παρουσιάζει ένα αντίστροφο φαινόμενο Joule-Thomson από τους  $-70^{\circ}\text{C}$  και πάνω, όπου όταν εκτονώνεται θερμαίνεται αντί να ψύχεται όπως τα περισσότερα αέρια. Η θερμοκρασία υγροποίησης του αερίου υδρογόνου είναι  $-253^{\circ}\text{C}$ . Έτσι στο δεύτερο δοχείο υπάρχει μόνο αέριο υδρογόνο και νερό. Το αέριο υδρογόνο περιέχεται σε φυσαλίδες, οι οποίες ανεβαίνουν στην επιφάνεια του δοχείου και απελευθερώνονται προς το περιβάλλον από τον αγωγό στο επάνω μέρος του δοχείου. Αν πλησιάσουμε έναν αναμμένο αναπτήρα στις φυσαλίδες που περιέχουν το υδρογόνο, αυτές εκρήγνυνται αποδεικνύοντας ότι το αέριο αυτό που περιέχεται μέσα στις φυσαλίδες είναι υδρογόνο.

Τέλος, ο Lavoisier μέτρησε το επιπλέον βάρος του χάλκινου αγωγού, του δοχείου συλλογής του νερού και του υδρογόνου που συνέλεξε, τα προσέθεσε, τα σύγκρινε με το βάρος του νερού που είχε τοποθετήσει στο δοχείο και βρήκε ότι είναι ίσα και δεν χάθηκε μάζα κατά την χημική αντίδραση. Έτσι, απέδειξε και την θεωρία της διατήρησης της μάζας σε μια χημική αντίδραση.

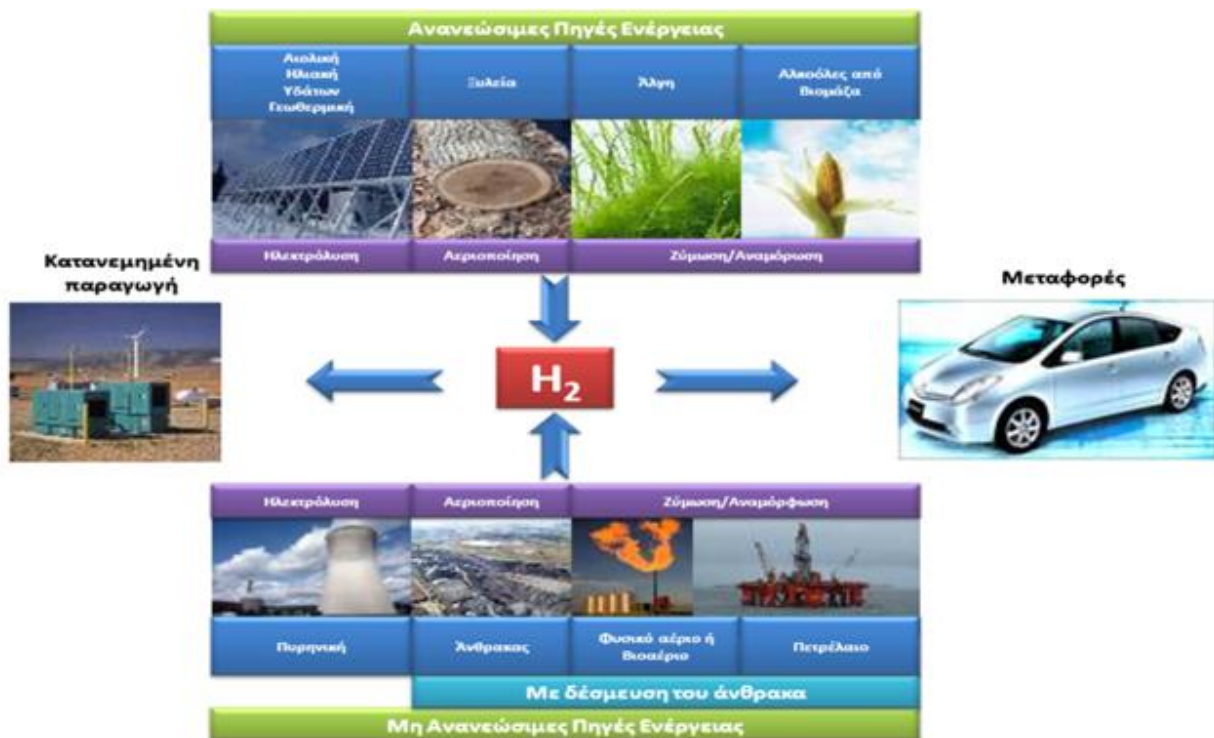


**Σχήμα 1.6:** Διάταξη παραγωγής υδρογόνου από τον Antoine Lavoisier.<sup>[9]</sup>

### 1.3.3 Τρόποι παραγωγής υδρογόνου.

Το υδρογόνο δεν συναντάται στην φύση σαν μεμονωμένο άτομο. Συνήθως ενώνεται με άλλα στοιχεία και σχηματίζει χημικές ενώσεις, όπως το νερό (υδρογόνο H<sub>2</sub> και οξυγόνο O) ή υδρογονάνθρακες (υδρογόνο H<sub>2</sub> και άνθρακας C). Όπου υπάρχει νερό και οργανικές ενώσεις όπως υδρογονάνθρακες, υπάρχει και υδρογόνο. Ένα μικρό ποσοστό 5% είναι εμπορεύσιμο και μπορεί να αποθηκευτεί και να μεταφερθεί σε στερεή ή σε υγρή κατάσταση. Οι κύριες χρήσεις του υδρογόνου που αποτελούν το 95% περιλαμβάνουν τον εξευγενισμό του πετρελαίου, την παραγωγή λιπασμάτων, διαλυτών, πλαστικών και άλλων προϊόντων. Δεν μπορεί να θεωρηθεί ως πηγή ενέργειας, καθώς χρειάζεται να καταναλωθεί άλλη πηγή ενέργειας για να παραχθεί π.χ. ηλεκτρισμός στην ηλεκτρόλυση. Η αύξηση της χρήσης του υδρογόνου θα συμβάλει στην λιγότερη χρήση των ορυκτών καυσίμων, στην μείωση των ρύπων που μολύνουν την ατμόσφαιρα, συμβάλλουν στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου και θα χρησιμοποιηθεί ως κύρια μορφή ελεύθερης και ανεξάντλητης ενέργειας. Οι πρώτες ύλες για την παραγωγή ενέργειας είναι:

- Ø Ηλεκτρική ενέργεια (π.χ. αλκαλική ηλεκτρόλυση, φωτοηλεκτρόλυση).
- Ø Ανανεώσιμη και πυρηνική ενέργεια (π.χ. φωτοβιολογική μέθοδος, παραγωγή από βιομάζα).
- Ø Χημική ενέργεια (π.χ. αντίδραση χλωρίου και αλκαλίων).
- Ø Ορυκτά καύσιμα (π.χ. παραγωγή από φυσικό αέριο.)



Σχήμα 1.7: Πρώτες ύλες παραγωγής υδρογόνου.<sup>[10]</sup>

### 1.3.3.1 Παραγωγή υδρογόνου από ηλεκτρόλυση του νερού.

Η ηλεκτρόλυση του νερού είναι μια ηλεκτροχημική διαδικασία, κατά την οποία χρησιμοποιείται ηλεκτρισμός για να διασπαστούν μόρια νερού σε μόρια υδρογόνου και οξυγόνου. Ένα ποσοστό 4% της συνολικής ποσότητας υδρογόνου παράγεται από την ηλεκτρόλυση του νερού. Η μέθοδος της ηλεκτρόλυσης συμφέρει μόνο για μικρές ποσότητες παραγόμενου υδρογόνου, λόγω του μεγάλου κόστους του ηλεκτρικού ρεύματος και είναι τρεις με πέντε φορές μεγαλύτερη σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερες ποσότητες παραγόμενου υδρογόνου. Η χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα κατά την ηλεκτρόλυση είναι η παρακάτω:



Το μεγαλύτερο αρνητικό χαρακτηριστικό αυτής της διαδικασίας είναι ότι αποτελεί την πιο ακριβή διαδικασία παραγωγής στις μέρες μας. Αυτό το γεγονός οφείλεται στην μεγάλη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία είναι ακριβή εκτός αν παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το συνολικό κόστος της ηλεκτρόλυσης αναμένεται να μειωθεί τα επόμενα χρόνια, εφόσον θα αυξηθεί η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και σε συνδυασμό με την αύξηση των ΑΠΕ και των ηλεκτρολυτικών κελιών, λόγω της άνθισης της τεχνολογίας, η ηλεκτρόλυση θα είναι μια βιώσιμη τεχνική παραγωγής υδρογόνου. Το βασικό πλεονέκτημα της ηλεκτρόλυσης είναι ότι το υδρογόνο παράγεται αμέσως και κατ' εντολή και δεν απαιτείται η μεταφορά ή η αποθήκευσή του, γεγονός που καθιστά το υδρογόνο άμεσα διαθέσιμο, οικονομικά βιώσιμο και ανταγωνιστικό. Η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ηλεκτρόλυση θα οδηγήσει στην ανεξαρτητοποίηση της παραγωγής του υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα και θα οδηγήσει σε μια ακόμα καθαρή μορφή ενέργειας, φιλική προς το περιβάλλον.

Τα είδη της ηλεκτρόλυσης έχουν αναλυθεί εκτενώς στο κεφάλαιο 1.2 και θα αναφερθούν ονομαστικά. Είναι τα εξής:

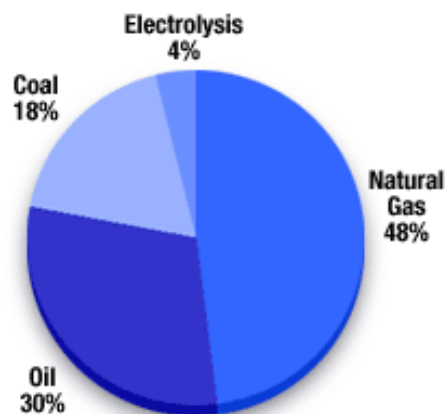
- Αλκαλική ηλεκτρόλυση.
- Μembrάνη ανταλλαγής πρωτονίων για ηλεκτρόλυση του νερού PEM.
- Ηλεκτρόλυση ατμού.
- Παραγωγή υδρογόνου ως παραπροϊόν από παραγωγή χλωρίου-αλκαλίων.
- Ηλεκτρόλυση υδρογόνου με την βοήθεια ΑΠΕ.
- Φωτοηλεκτρόλυση.
- Ηλεκτρόλυση του νερού σε υψηλή θερμοκρασία.

Το υδρογόνο αποτελεί ουσιαστικά ένα προϊόν το οποίο μεταφέρει ανανεώσιμη ενέργεια, εφόσον αν τροφοδοτήσει μια κυψέλη καυσίμου θα αποδώσει ηλεκτρική ενέργεια. Εάν έχουμε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο ή μια ανεμογεννήτρια, τα οποία τροφοδοτούν μια συσκευή ηλεκτρόλυσης όταν έχουμε ήλιο ή άνεμο. Όταν δεν έχουμε ήλιο ή άνεμο η συσκευή θα λειτουργεί αντίστροφα, σαν κυψέλη καυσίμου και θα χρησιμοποιεί

το παραγόμενο υδρογόνο για να παράγει ηλεκτρισμό. Αυτό το σύστημα παρόλο που θα είχε χαμηλή απόδοση, θα εξασφάλιζε μια αέναη παραγωγή ηλεκτρισμού.

### 1.3.3.2 Ορυκτά καύσιμα.

Μεγάλο ποσοστό ορυκτών καυσίμων όπως (κάρβουνο, φυσικό αέριο, πετρέλαιο) χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου. Συγκεκριμένα, το 96% της παραγωγής υδρογόνου παράγεται από ορυκτά καύσιμα και το 4% από την διεργασία της ηλεκτρόλυσης (σχήμα 1.8). Οι διεργασίες που χρησιμοποιούνται για την κάθε μια πρώτη ύλη είναι διαφορετικές, αλλά έχουν όλες ως παραπροϊόν το διοξείδιο του άνθρακα  $\text{CO}_2$ . Το διοξείδιο του άνθρακα συλλέγεται και αποθηκεύεται ώστε να μην υπάρχουν εκπομπές ρύπων προς το περιβάλλον.



**Σχήμα 1.8:** Ποσοστιαία παγκόσμια παραγωγή υδρογόνου.<sup>[11]</sup>

#### I. Παραγωγή από φυσικό αέριο.

Το φυσικό αέριο είναι μια οικονομική λύση για την παραγωγή υδρογόνου. Είναι εύκολο να διεργαστεί, έχει υψηλή αναλογία υδρογόνου/άνθρακα, έχει μικρό ποσοστό εκπομπών ρύπων όπως διοξείδιο του άνθρακα  $\text{CO}_2$ , είναι άμεσα διαθέσιμο και υπάρχει σε αφθονία. Το 80% του φυσικού αερίου αποτελείται από μεθάνιο  $\text{CH}_4$ , το οποίο χρησιμοποιείται ως προϊόν για την παραγωγή υδρογόνου στις εξής διαδικασίες:

- Αναμόρφωση μεθανίου/υδρογονανθράκων με ατμό (SMR).
- Μερική οξείδωση βαρέων υδρογονανθράκων.
- Αυτόθερμη αναμόρφωση ATR.

#### II. Αναμόρφωση μεθανίου/υδρογονανθράκων με ατμό (SMR).

Αυτή η διεργασία παραγωγής υδρογόνου (σχήμα 1.9) χρησιμοποιείται πιο συχνά στις πετροχημικές, χημικές βιομηχανίες και είναι η πιο οικονομική ταυτόχρονα, ενώ με αυτήν παράγεται μεγάλο ποσοστό υδρογόνου παγκόσμια. Εκτός όμως από μεγάλες

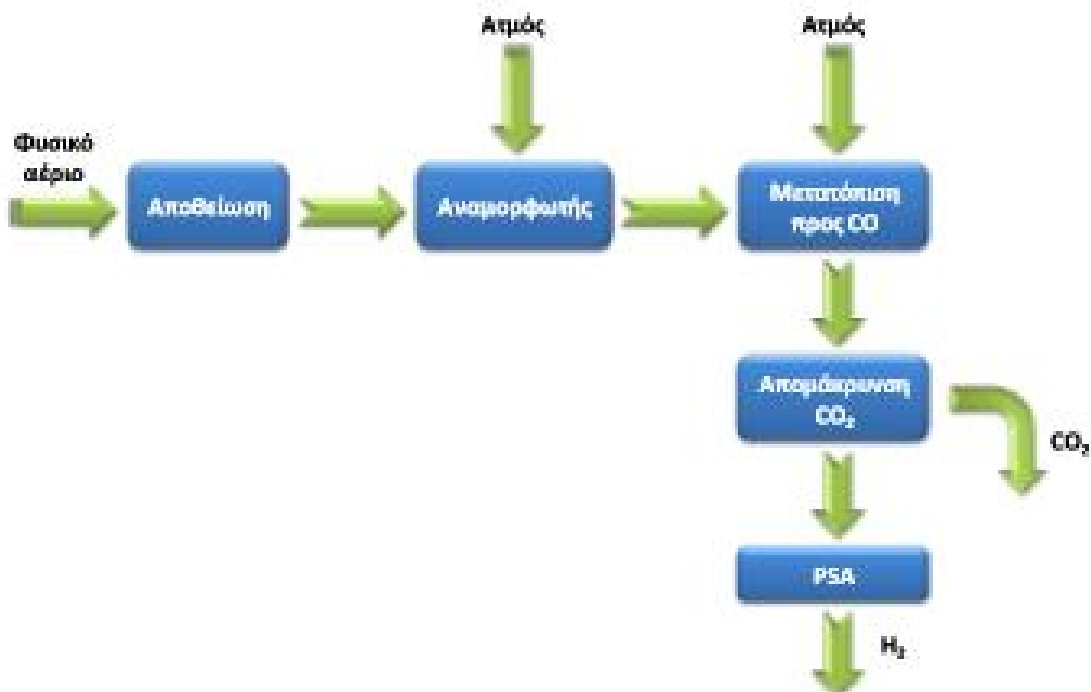
εγκαταστάσεις παραγωγής υδρογόνου, παράγονται και μικρές συσκευές οι οποίες αναμορφώνουν το μεθάνιο(μετατρέπουν το μεθάνιο σε υδρογόνο) με την χρήση ατμού και έχουν ενταχθεί σε αποκεντρωμένους σταθμούς καυσίμων. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας, γίνεται ενδόθερμη αναμόρφωση του μεθανίου με την χρήση ατμού και παράγεται ένα αέριο που περιέχει 88% υδρογόνο H<sub>2</sub> και 12% μονοξείδιο του άνθρακα CO κατά την παρακάτω εξίσωση:



Οι θερμοκρασίες που πρέπει να επιτευχθούν για να πραγματοποιηθεί η αναμόρφωση είναι πού υψηλές, από 700-850 °C και πιέσεις των 3 ως 25 bar. Το παραγόμενο μονοξείδιο του άνθρακα (12%), χρησιμοποιείται για να παραχθεί κι άλλη ποσότητα υδρογόνου στην αντίδραση μετατόπισης του υδραερίου.



Η διαδικασία της αναμόρφωσης με ατμό πραγματοποιείται με την βοήθεια καταλυτών, οι οποίοι είναι μέταλλα της VII ομάδας, το συνηθέστερο και πιο αποδοτικό είναι το Νικέλιο Ni. Η απόδοση της αντίδρασης εξαρτάται από τον καταλύτη και από τον βαθμό κορεσμού των υδρογονανθράκων. Τέλος, το αέριο υδρογόνο H<sub>2</sub> φιλτράρεται και διαχωρίζεται από το διοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub>, σε μονάδα ρόφησης με μεταβαλλόμενη πίεση (PSA).



**Σχήμα 1.9:** Αναμόρφωση μεθανίου/υδρογονανθράκων με ατμό (SMR).<sup>[10]</sup>



### III. Μερική οξειδωση βαρέων υδρογονανθράκων.

Σε αυτή την διαδικασία, οι αντιδράσεις γίνονται στα διυλιστήρια, χρησιμοποιούνται παραπροϊόντα υδρογονανθράκων, όπως το μεθάνιο, που μετατρέπονται σε υδρογόνο  $H_2$ , μονοξείδιο του άνθρακα  $CO$ , διοξείδιο του άνθρακα  $CO_2$  και νερό  $H_2O$ . Στην μερική οξειδωση, λαμβάνει χώρα αναμόρφωση παραπροϊόντων υδρογονανθράκων, με την χρήση καταλύτη ή όχι ή με συνδυασμό των δύο. Παραπροϊόντα, όπως το μεθάνιο, αντιδρούν μερικώς με το οξυγόνο σε μία αντίδραση καύσης και εκλύεται θερμότητα, η οποία χρησιμεύει στην πραγματοποίηση άλλων αντιδράσεων στο σύστημα αναμόρφωσης. Αυτές οι αντιδράσεις έχουν ως προϊόντα μονοξείδιο του άνθρακα  $CO$  και υδρογόνο  $H_2$ .



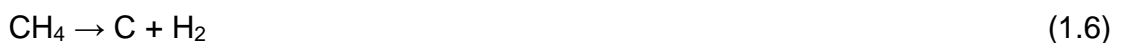
Άλλα παραπροϊόντα από τα οποία παράγεται υδρογόνο με αυτή τη μέθοδο είναι το πετρέλαιο, η βενζίνη και η μεθανόλη. Κατά την μερική οξειδωσή τους, απαιτείται η χρήση καθαρού οξυγόνου, εκπέμπεται περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα από την διεργασία της αναμόρφωσης μεθανίου με ατμό και έχει μικρή απόδοση. Λόγω αυτών, οι πετροχημικές βιομηχανίες αναπτύσσουν τεχνολογίες απομάκρυνσης και αποθήκευσης του άνθρακα. Στην μερική οξειδωσή τους δεν χρησιμοποιούνται καταλύτες και η θερμοκρασία και η πίεση φτάνουν  $1300-1500\text{ }^\circ C$  και  $30-100\text{ bar}$  αντίστοιχα. Τελικά, λαμβάνει χώρα μια διεργασία αποθείωσης, μετατόπισης του υδραερίου και απομάκρυνσης του  $CO_2$ . Η μέθοδος της μερικής οξειδωσης των βαρέων υδρογονανθράκων αφορά μόνο στην παραγωγή υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα.

### IV. Αυτόθερμη αναμόρφωση ATR.

Η θερμοκρασία αυτής της αντίδρασης είναι πολύ υψηλή,  $850\text{ }^\circ C$  και συνδυάζονται η αναμόρφωση με ατμό SMR και η μερική οξειδωση, του μεθανίου. Στην αυτόθερμη αναμόρφωση ATR η απόδοση αναμόρφωσης μεθανίου είναι  $60-65\%$ , με εκλεκτικότητα  $80\%$ . Το μεθάνιο αρχικά οξειδώνεται για να παραχθεί διοξείδιο του άνθρακα και νερό και έπειτα παράγεται αέριο σύνθεσης από την περαιτέρω αναμόρφωση του υδρογονάνθρακα. Στην συνέχεια, πραγματοποιείται άμεση μερική οξειδωση του  $CH_4$ , όπου το  $CO_2$  και το  $H_2O$  παράγονται μέσω των παράλληλων αντιδράσεων καύσης ή από την περαιτέρω οξειδωση του  $CO$  και του  $H_2$ .

### V. Πυρόλυση υδρογονανθράκων.

Σε αυτή την διεργασία, οι υδρογονάνθρακες μετατρέπονται σε υδρογόνο χωρίς την παραγωγή ρυπογόνου διοξειδίου του άνθρακα  $CO_2$ , με προϋπόθεση η διάσπασή τους να γίνει αναερόβια, σε υψηλή θερμοκρασία που παράγεται από έναν καυστήρα πλάσματος. Με την χρήση καταλύτη το μεθάνιο διασπάται και παράγεται άνθρακας και υδρογόνο.



Ο άνθρακας συλλέγεται και χρησιμοποιείται σε άλλες βιομηχανίες. Αυτή η διαδικασία έχει αναπτυχθεί εμπορικά από τη Νορβηγική εταιρεία KVAERNER ENGINEERING S.A.

#### VI. Παραγωγή από άνθρακα.

Στην διαδικασία αυτή ο άνθρακας αεριοποιείται και μετατρέπεται σε υδρογόνο. Ο άνθρακας είναι ένα από τα στοιχεία που υπάρχουν σε πολλές ενώσεις στη γη, κι έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κύρια πηγή για να παραχθεί υδρογόνο. Χώρες που έχουν μεγάλα αποθέματα άνθρακα όπως η Ινδία και η Κίνα θα μπορούσαν να στραφούν στην παραγωγή και πώληση υδρογόνου και θα έπρεπε να συλλέγουν τον άνθρακα που εκλύεται από την αεριοποίηση ως μονοξείδιο του άνθρακα. Κατά την διεργασία αυτή καίγεται στερεός άνθρακας και παράγεται ένα αέριο που περιέχει υδρογόνο  $H_2$ , διοξείδιο του άνθρακα  $CO_2$ , μονοξείδιο του άνθρακα  $CH_4$  και μεθάνιο  $CH_4$  όπως φαίνεται στην παρακάτω αντίδραση:



Το μονοξείδιο του άνθρακα που παράγεται, μετατρέπεται σε υδρογόνο με την αντίδραση της μετατόπισης του υδραερίου:



Το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται, συμπιέζεται και αποθηκεύεται για να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω. Η διεργασία αυτή είναι πιο πολύπλοκη σε σχέση με την αναμόρφωση υδρογονανθράκων με ατμό, αλλά είναι εμπορικά ώριμη. Το κόστος παραγωγής του υδρογόνου σε αυτή την μέθοδο είναι μεγαλύτερο καθώς χρησιμοποιείται ο αεριοποιητής και οξυγόνο. Στο τέλος, θα πρέπει να καθαριστεί το υδρογόνο από άλλα αέρια για να χρησιμοποιηθεί.

#### VII. Δέσμευση και αποθήκευση του $CO_2$ .

Σε όλες τις αντιδράσεις παραγωγής υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα εμφανίζεται το διοξείδιο του άνθρακα  $CO_2$  ως παραπροϊόν, η ποσότητα του οποίου μεταβάλλεται ανάλογα με το ποσοστό υδρογόνου/άνθρακα που υπάρχει στην πρώτη ύλη και συνεπώς θα πρέπει να συλλέγεται και να αποθηκεύεται. Θα πρέπει να συλλεχθούν τα προϊόντα που περιέχουν άνθρακα, από τα απαέρια του αεριοποιητή ή του αναμορφωτή ατμού του μεθανίου και να αποθηκευτούν σε υπόγεια μη πληρωμένα πεδία εξόρυξης πετρελαίου ή αερίου, βαθιά κοιτάσματα άνθρακα ή σε βαθύ ωκεανό. Οι τρόποι συλλογής του διοξειδίου του άνθρακα είναι τρεις:

##### · Μετά-καύση.

Σε αυτήν την διεργασία το διοξείδιο του άνθρακα είναι ένα από τα παραπροϊόντα, όταν καίγεται ένας υδρογονάνθρακας, μαζί με μονοξείδιο του άνθρακα, υδρατμούς, άζωτο και οξείδια του αζώτου. Όλα αυτά τα παραπροϊόντα ονομάζονται και απαέρια και

μπορούν να απομακρύνουν με την ροή τους το διοξείδιο του άνθρακα, όπως ακριβώς απομακρύνεται κι από μια καμινάδα.

- Προ-καύση.  
Εδώ γίνεται δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα, κατά την παραγωγή του υδρογόνου με τις διεργασίες που αναφέρθηκαν παραπάνω.
- Καύση οξυγόνου-καυσίμου.  
Στην διαδικασία της καύσης, το καύσιμο διασπάται και μετατρέπεται σε θερμά αέρια με τροφοδοσία καθαρού οξυγόνου ως μέσο οξειδωσης. Παράγεται διοξείδιο του άνθρακα και υδρατμοί και διαχωρίζονται μετά από μια διαδικασία συμπύκνωσης των θερμών αερίων.

### 1.3.3.3 Βιολογική παραγωγή-φωτοβιολογική μέθοδος παραγωγής υδρογόνου.

Η φωτοβιολογική παραγωγή του υδρογόνου αφορά την φωτοσύνθεση των φυτών. Τα βακτήρια που ζουν στην χλωροφύλλη των φυτών παράγουν το ένζυμο υδρογενάση, στις μεταβολικές δραστηριότητες τους, χρησιμοποιώντας την ενέργεια του φωτός. Βακτήρια που παράγουν τις υδρογενάσες είναι η πράσινη άλγη που βλέπουμε στις πέτρες που βρίσκονται στην θάλασσα, φύκια, φωτοσυνθετικά βακτήρια, κυανοβακτήρια κ.α. Η διαδικασία αυτή γίνεται σε δύο βήματα, α) φωτοσύνθεση και β) παραγωγή υδρογόνου που καταλύεται από υδρογενάσες.

α) Φωτοσύνθεση:  $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- + \text{O}_2$  Φωτο-σύστημα II (PSII)

β) Παραγωγή υδρογόνου από υδρογενάσες:  $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$  Φωτο-σύστημα I (PSII)

Η πράσινη άλγη παράγει το ένζυμο υδρογενάση, με την απουσία αέρα ή αλλιώς αναερόβια. Η υδρογενάση παράγει υδρογόνο από το νερό μέσω της διαδικασίας της βιο-φωτόλυσης. Το ένζυμο της υδρογενάσης λειτουργεί χωρίς την παρουσία φωτός και είναι πολύ ευαίσθητο στο οξυγόνο, γεγονός που καθιστά αυτήν την διαδικασία πολύ δύσκολη να πραγματοποιηθεί φυσικά χωρίς ελεγχόμενες συνθήκες. Επίσης η απόδοση της διαδικασίας μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε υδρογόνο από τα ένζυμα υδρογενάσες είναι πολύ χαμηλή, σχεδόν 6%. Η απόδοση αυτού του συστήματος παραγωγής υδρογόνου μπορεί να φτάσει μέχρι και 24%. Η διεργασία αυτή δεν έχει αναπτυχθεί επαρκώς και χρειάζεται περαιτέρω έρευνα, όμως αν γίνει αυτό θα είναι μία βιώσιμη ανανεώσιμη πηγή υδρογόνου.

Έχουν γίνει κάποιες έρευνες με σκοπό να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά ένζυμα πιο ανθεκτικά στο οξυγόνο και να δημιουργηθούν νέες γενετικές μορφές οργανισμών που παράγουν υδρογόνο χωρίς να επηρεάζονται από το οξυγόνο, για να βελτιωθεί η απόδοση της διεργασίας. Έχει αναπτυχθεί ένα νέο σύστημα που μεταξύ των φάσεων της φωτοσυνθετικής αύξησης και της παραγωγής υδρογόνου, ανακυκλώνονται τα κύτταρα των φυκών εφόσον στερούνται το θείο σκόπιμα. Τα φωτοσυνθετικά βακτήρια δεν οξειδώνουν το νερό όπως τα κυανοβακτήρια ή τα φύκια και παράγουν το υδρογόνο

από την βιομάζα, η οποία έχει παραχθεί από το φως του ηλίου, το διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα και το νερό από το έδαφος. Η διαδικασία παραγωγής του υδρογόνου από την βιομάζα σε αυτά τα βακτήρια είναι άμεση, χρησιμοποιώντας διάφορους ενζυματικούς μηχανισμούς.

#### 1.3.3.4 Θερμο-χημική διάσπαση του νερού.

Το νερό διασπάται σε υψηλή θερμοκρασία, περίπου στους 3000°C. Η διαδικασία αυτή έχει 10% απόδοση και το υπόλοιπο 90% του νερού που δεν διασπάται ανατροφοδοτείται στο σύστημα. Κατά αυτήν την διαδικασία, το νερό διασπάται σε μόρια υδρογόνου και μόρια οξυγόνου με κύκλους θερμικών και χημικών αντιδράσεων, οι οποίοι είναι γνωστοί εδώ και 35 χρόνια. Το νερό υφίσταται θερμική διάσπαση σε υψηλές θερμοκρασίες πάνω από 2500°C. Ορισμένες θερμικές χημικές διεργασίες π.χ. κύκλοι ιωδίου-θείου ή βρωμίου-ασβεστίου μπορούν να μειώσουν την θερμοκρασία κάτω από τους 1000°C. Αυτό το παράδειγμα κάνει εμφανές το γεγονός ότι το είδος του θερμο-χημικού κύκλου έχει μεγάλη επίδραση σε αυτήν την διαδικασία. Υπάρχουν περιορισμοί στους θερμο-χημικούς κύκλους όπως στον κύκλο Carnot, η μέγιστη απόδοση στην θεωρία είναι 88%, με ανώτερη θερμοκρασία 1000°C και χαμηλότερη 300°C. Υπάρχει η δυνατότητα να πραγματοποιηθεί αυτή η διαδικασία και με πολύ μεγάλη απόδοση μάλιστα, αλλά αυτές οι συσκευές που θα λειτουργούν με αυτόν τον τρόπο δεν έχουν εισέλθει στην αγορά. Τα προαπαιτούμενα για να επιτευχθεί η διαδικασία αυτή είναι να διασφαλίζονται υψηλές ποσότητες θερμότητας από πυρηνική ή ηλιακή ενέργεια και τα υλικά της συσκευής να είναι ανθεκτικά στην διάβρωση.

Έχουν προταθεί συσκευές που λειτουργούν με διαφορετικό τρόπο και έχουν το ίδιο αποτέλεσμα ώστε να μειωθεί η θερμοκρασία και να αυξηθεί η απόδοση. Κάποιες από αυτές χρησιμοποιούν ίδια τεχνολογία με συσκευές που βρίσκονται ήδη στην αγορά και έχουν διαφορετικό σκοπό.

Αυτές είναι οι εξής:

- Θερμο-χημικοί κύκλοι.
- Υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν τη θερμική διάσπαση και ηλεκτρόλυση.
- Άμεση καταλυτική διάσπαση του νερού ("θερμο-φυσικός κύκλος").
- Χημική διάσπαση του νερού με χρήση τεχνολογίας πλάσματος σε έναν κύκλο CO<sub>2</sub> δύο σταδίων.

Οι παραπάνω τρόποι λειτουργίας έχουν εκτιμηθεί ότι θα είχαν απόδοση πάνω από 50% και θα μειωνόταν το κόστος παραγωγής υδρογόνου σημαντικά, εφόσον η απόδοση αυξήθηκε 40% σε σχέση με την υπάρχων διεργασία. Τα εμπόδια που θα πρέπει να ξεπεραστούν για να λειτουργήσουν οι παραπάνω διεργασίες, περιλαμβάνουν την χρησιμοποίηση υλικών ανθεκτικών στην διάβρωση, την κατασκευή μεμβρανών που να αντέχουν στις υψηλές θερμοκρασίες μέσα σε εναλλάκτες θερμότητας και τα μέσα αποθήκευσης της θερμότητας.

### 1.3.3.5 Παραγωγή από την βιομάζα.

Η βιομάζα προέρχεται από προϊόντα γεωργικών (π.χ. κλαδιά δέντρων, καρποί δέντρων, γεωργικά υπολείμματα κ.α.) και ζωικών, αστικών, βιομηχανικών αποβλήτων και μορφοποιείται σε προϊόντα (βιοκαύσιμα) διαφορετικής σύστασης και σχήματος με χημικές, θερμικές και βιολογικές διεργασίες. Τα βιοκαύσιμα είναι έφλεκτα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για να παραχθεί υδρογόνο, χωρίς να εκλύεται σημαντική ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα CO<sub>2</sub> και δεν υπάρχουν τεχνολογικά εμπόδια ή εμπόδια λόγω μη αρκετής έρευνας της συμπεριφοράς τους στην διαδικασία παραγωγής υδρογόνου. Επίσης, εάν σκεφτούμε ότι τα δέντρα καταναλώνουν το διοξείδιο του άνθρακα που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα και ότι η βιομάζα είναι παραπροϊόν τους, τότε καταλαβαίνει κανείς ότι είναι μια μορφή ενέργειας φιλική προς το περιβάλλον. Οι θερμοχημικές διεργασίες που προανέφερα είναι οι εξής:

#### 1. Καύση.

Κατά την καύση, η βιομάζα θερμαίνεται(καίγεται) με παρουσία αέρα και η χημική ενέργεια της μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια, ηλεκτρικό ρεύμα ή μηχανικό έργο με την χρήση μέσων όπως λέβητες, καυστήρες, ατμοστρόβιλοι ή αεριοστρόβιλοι, σόμπες. Η απόδοση της καύσης κυμαίνεται από 10% μέχρι 30% και ως προϊόντα έχουμε ρύπους όπως το διοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub> και το επικίνδυνο αν το εισπνεύσουμε μονοξείδιο του άνθρακα CO, οπότε δεν είναι η κατάλληλη διεργασία για την παραγωγή υδρογόνου οικονομικά και περιβαλλοντικά μιλώντας.

#### 2. Πυρόλυση.

Η πυρόλυση είναι μία διεργασία, κατά την οποία πραγματοποιείται αναερόβια θερμική διάσπαση της βιομάζας. Γίνεται πρώτη απ' όλα σε διεργασίες καύσης και αεριοποίησης και στην συνέχεια γίνεται ολική ή μερική οξειδωση των πρώτων υλών. Χρειάζονται υψηλές θερμοκρασίες και μεγάλο χρονικό διάστημα για να μετατραπεί η βιομάζα σε βιοαέριο, ενώ σε μια μέση θερμοκρασία και μικρότερο χρονικό διάστημα η βιομάζα θα μετατραπεί σε βιοέλαιο. Τα προϊόντα αυτής της διεργασίας είναι το υδρογόνο H<sub>2</sub>, το διοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub>, το μονοξείδιο του άνθρακα CO και το άζωτο N<sub>2</sub>. Συχνά χρησιμοποιούνται οι διεργασίες της αεριοποίησης και της πυρόλυσης μαζί για να αντιμετωπιστούν τεχνικά και μη εμπόδια.

#### 3. Ταχεία πυρόλυση.

Στην διαδικασία αυτή, λαμβάνει χώρα η αναερόβια θέρμανση της βιομάζας στους 525-600 K, σε πίεση 50-200 bar με την χρήση καταλύτη ή όχι για να επιταχυνθεί η διαδικασία. Ορισμένα βασικά μειονεκτήματα αυτής της διεργασίας είναι η δυσκολία να επιτευχθούν υψηλές θερμοκρασίες, τα υλικά του περιβάλλοντος να αντέχουν στις υψηλές θερμοκρασίες και η χαμηλή παραγωγή υδρογόνου, τα οποία κάνουν την ταχεία πυρόλυση λιγότερο ελκυστική από τις υπόλοιπες διεργασίες. Η ταχεία πυρόλυση έχει ως προϊόν ένα υγρό, το οποίο ονομάζεται βιοέλαιο που με την σειρά του αν χρησιμοποιηθεί αποδίδει υδρογόνο με την αναμόρφωση ατμού.

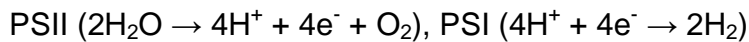
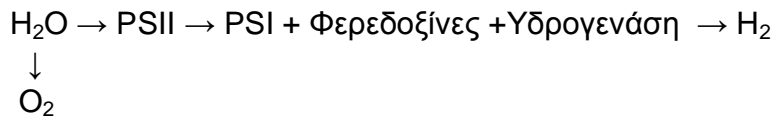
#### 4. Αεριοποίηση.

Η αεριοποίηση είναι ουσιαστικά η θέρμανση μιας ένωσης π.χ. άνθρακα σε υψηλές θερμοκρασίες με ελεγχόμενη παρουσία αέρα ή καθαρού οξυγόνου, ώστε να μετατραπεί σε ένα αέριο μείγμα χαμηλού ή μέσου ενεργειακού περιεχομένου. Η διεργασία αυτή χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια και είναι παρόμοια με την αεριοποίηση της βιομάζας, όμως η βιομάζα δεν αποτελείται μόνο από άνθρακα. Πολλά στοιχεία είναι διαφορετικά στην πρώτη ύλη (άνθρακας, βιομάζα) όπως η πυκνότητα, η υγρασία, η παροχή.

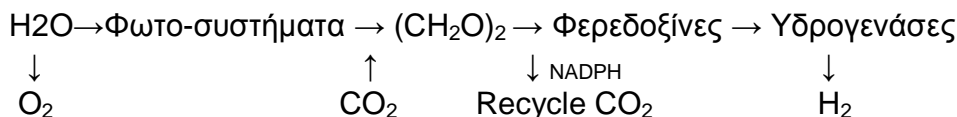
Οι βιολογικές διεργασίες είναι οι παρακάτω:

##### 1. Άμεση και έμμεση βιο-φωτόλυση.

Κατά την διάρκεια της βιο-φωτόλυσης λαμβάνουν χώρα οι φωτοσυνθετικές διαδικασίες των φυτών και είναι οι ίδιες με αυτές που περιεγράφηκαν στην φωτοβιολογική μέθοδο παραγωγής υδρογόνου. Στην άμεση βιο-φωτόλυση τα δύο βήματα παραγωγής γίνονται από δύο φωτο-συστήματα (PSII, PSI) απευθείας και παράγεται αμέσως υδρογόνο. Ο τύπος που περιγράφει την διαδικασία αυτή είναι ο παρακάτω:



Στην έμμεση βιο-φωτόλυση το διοξείδιο του άνθρακα μένει σταθερό κατά περιόδους και όταν δεν είναι, μεταφέρει ηλεκτρόνια από το PSII στο PSI, ώστε να δημιουργηθεί το υδρογόνο από τις υδρογενάσες. Οι τύποι που περιγράφουν την διαδικασία αυτή είναι οι παρακάτω:



##### 2. Βιολογική αντίδραση μετατόπισης του υδραερίου.

Κατά την διαδικασία αυτή το μονοξείδιο του άνθρακα CO αντιδράει με το νερό H<sub>2</sub>O, παράγεται διοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub> και υδρογόνο H<sub>2</sub>, θερμότητα εκλύεται προς το περιβάλλον.



### 3. Φωτο-ζύμωση.

Η φωτο-ζύμωση είναι ακριβώς η ίδια διαδικασία με την ζύμωση απουσία φωτός με μόνη διαφορά ότι είναι αερόβια διεργασία και τα βακτήρια καλλιεργούνται σε περιβάλλον με την παρουσία φωτός.

### 4. Ζύμωση απουσία φωτός.

Η ζύμωση απουσία φωτός είναι μια αναερόβια διαδικασία με σκοπό την παραγωγή υδρογόνου. Σε αυτήν την διεργασία το υδρογόνο  $\text{H}_2$  παράγεται από μικροοργανισμούς (βακτήρια) σε απόλυτο σκοτάδι, οι οποίοι μπορούν να καλλιεργηθούν μεικτά ή σε καθαρές καλλιέργειες. Τα βακτήρια παράγουν ένζυμα τα οποία με την σειρά τους παράγουν το υδρογόνο στον αναερόβιο μεταβολισμό τους. Συγκεκριμένα, κατά την διάρκεια του καταβολισμού διαφόρων υποστρωμάτων, που είναι τα προϊόντα του κατάβολισμού των βακτηρίων, παράγονται τα ένζυμα, χημικές ενώσεις που βοηθούν στην παραγωγή υδρογόνου. Τα προϊόντα της διεργασίας αυτής είναι υδρογόνο  $\text{H}_2$  και διοξείδιο του άνθρακα  $\text{CO}_2$ , τα οποία προκύπτουν από αέρια όπως το μεθάνιο  $\text{CH}_4$  και υδρόθειο  $\text{H}_2\text{S}$  με βάση την αντίδραση και το εκάστοτε υπόστρωμα.

Το υδρογόνο που παράγεται εξαρτάται από το pH του εδάφους, την μερική πίεση του αερίου και τον υδραυλικό χρόνο παραμονής. Για να επιτευχθεί η μέγιστη παραγωγή υδρογόνου θα πρέπει το pH να είναι μεταξύ 5-6, η συγκέντρωση του υδρογόνου να μένει σταθερή. Φυσικά η συγκέντρωση του υδρογόνου αυξάνεται ή μειώνεται κατά διαστήματα και δεν μένει σταθερή, γεγονός το οποίο μεταβάλλει την ποσότητα παραγόμενου υδρογόνου καθώς η αντίδραση μετατοπίζεται προκειμένου να παράγει περισσότερα ή λιγότερα υποστρώματα.

Όταν η συγκέντρωση του υδρογόνου αυξάνεται η αντίδραση μετατοπίζεται, τα υποστρώματα όπως λακτόζη, αιθανόλη, ακετόνη κ.α., αυξάνονται και κατά συνέπεια μειώνεται η παραγωγή υδρογόνου.

Σύμφωνα με την φύση αυτών των διεργασιών μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες:

- Άμεσοι μέθοδοι παραγωγής (π.χ. αεριοποίηση, πυρόλυση).
- Έμμεσοι τρόποι παραγωγής μέσω της αναμόρφωσης των παραγόμενων βιοκαυσίμων (π.χ. βιοαέριο, βιο-έλαιο).
- Διεργασίες μεταβολισμού για την διάσπαση του νερού με χρήση φωτο-βιολογικών οργανισμών(π.χ. ζύμωση απουσία φωτός, φωτο-ζύμωση).

## 1.4 ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ.

### 1.4.1 Εισαγωγικά και ιστορικά στοιχεία για την ηλεκτρόλυση.

Η ηλεκτρόλυση είναι μία ηλεκτροχημική διαδικασία όπου με την παρουσία της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιούνται ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που έχουν ως αποτέλεσμα, την αποσύνθεση των ουσιών του νερού εξαιτίας της διέλευσης ρεύματος μέσα από αυτό. Η παρατήρηση του φαινομένου αυτού καταγράφηκε για πρώτη φορά το 1789, οι Nicholson και Carlisle ήταν οι πρώτοι που ανέπτυξαν την τεχνική της ηλεκτρόλυσης το 1800. Ενώ στις αρχές του εικοστού αιώνα δημιουργούνται πάνω από 400 βιομηχανικές μονάδες ηλεκτρόλυσης νερού και το 1939 λειτούργησε η πρώτη μεγάλη μονάδα ηλεκτρόλυσης νερού με χωρητικότητα 10,000 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> / h. Το 1948, κατασκευάζεται η πρώτη βιομηχανική μονάδα ηλεκτρόλυσης με συμπίεση. Επίσης, το 1966 φτιάχτηκε το πρώτο σύστημα ηλεκτρόλυσης από στερεό πολυμερές και το 1978, ξεκίνησαν τα πρώτα προηγμένα αλκαλικά. Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί οι μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων, που χρησιμοποιούνται στις μονάδες ηλεκτρόλυσης του νερού και των κυψελών καυσίμου.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κατά την ηλεκτρόλυση γίνεται διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο, καθώς το ρεύμα περνά μέσα από αυτό με την παρουσία κατάλληλων ουσιών, που ονομάζονται ηλεκτρολύτες. Στην συνέχεια, τα θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου λόγω του ηλεκτρικού ρεύματος μετακινούνται στην αρνητικά φορτισμένη κάθοδο, όπου δημιουργείται μια μείωση, προκειμένου να σχηματιστούν άτομα υδρογόνου. Μετέπειτα τα άτομα αυτά ενώνονται και σχηματίζουν μόρια υδρογόνου (H<sub>2</sub>). Αντιθέτως, στο άλλο ηλεκτρόδιο που είναι θετικά φορτισμένο (άνοδος) σχηματίζεται το οξυγόνο. Η στοιχειομετρία των προϊόντων της αντίδρασης αυτής είναι δύο όγκοι υδρογόνου για κάθε έναν όγκο οξυγόνου.

Πολύ μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται στην κατασκευή των μονάδων ηλεκτρόλυσης, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται κατάλληλα ηλεκτρόδια για να αποφευχθούν ανεπιθύμητες αντιδράσεις, που θα έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή ενός ακάθαρτου αέριου υδρογόνου. Επίσης άλλο ένα σημαντικό στοιχείο που πρέπει να φέρει μία μονάδα ηλεκτρόλυσης είναι η μεμβράνη διαχωρισμού που αποτρέπει την διέλευση του οξυγόνου και του υδρογόνου αλλά επιτρέπει μόνο των ιόντων και των ηλεκτρονίων. Η λειτουργία της μεμβράνης αυτής είναι να φυλάσσει τα δύο αέρια χωριστά ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας ενός εκρηκτικού μείγματος στην μονάδα ηλεκτρόλυσης. Αρχικά οι πρώτες πειρατικές μονάδες ηλεκτρόλυσης χρησιμοποιούσαν όξινο υδατικό διάλυμα, όμως σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως αλκαλικοί διαλύτες, όπως είναι το υδροξείδιο του καλίου (KOH). Η χρήση των δεύτερων προτιμάται λόγω του ότι είναι φθηνότερα και λιγότερο επιρρεπή στη διάβρωση σε σύγκριση με αυτά που απαιτούνται για να χρησιμοποιηθούν με τα οξέα.

Η ηλεκτρόλυση γίνεται κάτω από κανονικές συνθήκες πίεσεως ή λίγο αυξημένη πίεση, με θερμοκρασία στους 70-90°C και τάση 1,85-2,05 V. Η κατανάλωση ισχύος για την παραγωγή ενός m<sup>3</sup> υδρογόνου ανέρχεται στις 4-5 kWh/m<sup>3</sup> και η καθαρότητα αυτού



είναι 99,8% και περισσότερο, που είναι ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα. Λόγω του ότι η παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση του νερού απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας σήμερα χρησιμοποιείτε μόνο για το 4% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου. Η παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση είναι ο καθαρότερος τρόπος, εφόσον η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείτε προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

#### 1.4.2 Θεωρία ηλεκτρόλυσης του νερού.

Το κύριο μέρος μιας ηλεκτρολυτικής μονάδας είναι το ηλεκτροχημικό στοιχείο, το οποίο είναι γεμάτο με καθαρό νερό και έχει δύο ηλεκτρόδια που είναι συνδεδεμένα με εξωτερικό κύκλωμα. Όταν η τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων ξεπεράσει μία οριακή τιμή, η οποία ονομάζεται κρίσιμη τάση, τότε αρχίζει η αποσύνθεση του νερού και η παραγωγή υδρογόνου στην κάθοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο) και οξυγόνου στην άνοδο (θετικό ηλεκτρόδιο). Ο ρυθμός παραγωγής των αερίων είναι ευθέως ανάλογος με την τιμή του ρεύματος που διαρρέει το ηλεκτροχημικό κελί.

Η ελάχιστη τάση ( $E$ ) που απαιτείται για την εκκίνηση της ηλεκτρόλυσης υπό κανονικές συνθήκες ( $P$ ,  $T$  σταθερά) δηλαδή σε ανοιχτό ηλεκτροχημικό στοιχείο, δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$E^{\circ}_{\text{cell}} = - \frac{\Delta G^{\circ}}{nF} \quad (1.12)$$

όπου  $\Delta G^{\circ}$  είναι η μεταβολή στην ελεύθερη ενέργεια Gibbs κάτω από ορισμένες συνθήκες, το  $n$  είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που μεταφέρονται και  $F$  είναι η σταθερά Faraday.

Επίσης για να πραγματοποιηθεί η αντίδραση της ηλεκτρόλυσης πρέπει να ξεπεραστεί ένα ενεργειακό φράγμα, η ενέργεια ενεργοποίησης  $E_{ACT}$ . Δηλαδή ο αριθμός των μορίων που είναι ικανός να ξεπεράσει αυτό το εμπόδιο είναι ο παράγοντας ελέγχου του ρυθμού αντίδρασης,  $r$ , και δίνεται από τη στατιστική σχέση Maxwell-Boltzman που έχει εκθετική συμπεριφορά:  $r \sim \exp r_0 (-E_{ACT}/ RT)$ . Έτσι, η ενέργεια ενεργοποίησης εκφράζει την ταχύτητα με την οποία λαμβάνει χώρα μία αντίδραση. Η μέγιστη δυνατή απόδοση ενός ιδανικού κλειστού ηλεκτροχημικού δοχείου ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$E_{\text{max}} = \frac{\Delta H}{\Delta A} = - \frac{\Delta H}{nFE_{\text{cell}}} \quad (1.13)$$

Στην πραγματικότητα, η απόδοση ενός ηλεκτροχημικού στοιχείου δίνεται από τη σχέση:

$$E_{\text{real}} = - \frac{\Delta H}{n\Delta E_{\text{elec}}} \quad (1.14)$$

Όπου  $\Delta E_{elec}$  είναι η τάση που δίνεται στο ηλεκτροχημικό στοιχείο για να διαρρέεται από ρεύμα  $I$  :

$$\Delta E_{elec} = \Delta A + I \cdot R + \Sigma \eta \quad (1.15)$$

όπου  $R$  είναι η συνολική ωμική αντίσταση του στοιχείου, των εξωτερικών αντιστάσεων του κυκλώματος, του ηλεκτρολύτη, των ηλεκτροδίων και του υλικού της μεμβράνης. Το  $\Sigma \eta$  είναι το άθροισμα των υπερδυναμικών. Η υπερδυναμική ενεργοποίηση μπορεί να αυξηθεί με την αύξηση της πυκνότητας ρεύματος και μειώνεται με την χρήση ηλεκτροδίων με χαμηλή καταλυτική δράση, όπως είναι ο λευκόχρυσος. Η μέγιστη θεωρητική απόδοση της ηλεκτρόλυσης του νερού σε σχέση με την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι  $E_{max} = 120\%$ . Όταν η τιμή του παρονομαστή της σχέσης (1-2) γίνει 1,48 nF με υπερδυναμικό 0,25 V, τότε η απόδοση του ηλεκτροχημικού στοιχείου θα είναι 100%. Υπό αυτές τις συνθήκες το  $\Delta S = 0$ ,  $\Sigma \eta = 0$ , οπότε το  $\Delta G = \Delta H$ , επίσης το στοιχείο δεν θερμαίνεται ούτε ψύχεται και η τιμή του είναι  $E_{tn} = \Delta H / nF = 1,48$  V που ορίζεται ως θερμοουδέτερο δυναμικό.

Παραγωγή θερμότητας γίνεται μόνο όταν τα δυναμικά του ηλεκτροχημικού στοιχείου είναι πάνω από 1,48 V ενώ απορροφά θερμότητα όταν τα δυναμικά είναι μικρότερα από αυτή την τιμή. Για να μεγιστοποιηθεί η απόδοση και να ελαχιστοποιηθεί η παραγωγή θερμότητας θα πρέπει το υπερδυναμικό να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Όμως, όσο χαμηλότερο είναι το υπερδυναμικό τόσο αυξάνεται ο χρόνος που απαιτείται για να γίνει η αντίδραση, για αυτό τον λόγο πρέπει να παρθεί μία ενδιάμεση τιμή ώστε να είναι σε μία ικανοποιητική απόδοση και ταχύτητα της αντίδρασης. Μία καλή λύση είναι η αύξηση του ρεύματος χωρίς να αυξηθεί το υπερδυναμικό, αυξάνοντας την επιφάνεια επαφής μεταξύ των ηλεκτροδίων και του υγρού.

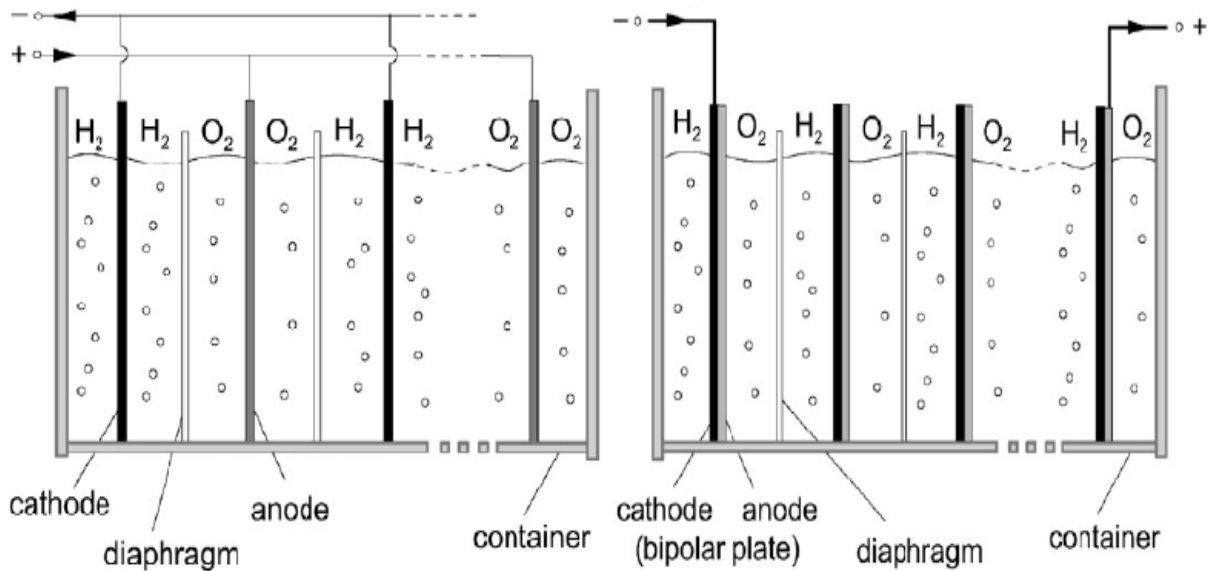
### 1.4.3 Μέθοδοι ηλεκτρόλυσης του νερού.

Αρχικά η διάσπαση του νερού γινόταν μέσω της ηλεκτρόλυσης σε όξινα διαλύματα, παρόλα αυτά αυτή η μέθοδος δεν προτιμάται διότι προκαλεί μεγάλες διαβρώσεις. Έτσι χρησιμοποιούνται κυρίως αλκαλικά μέσα στα οποία η διάβρωση είναι μικρότερη και ελεγχόμενη. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν φθηνότερα κατασκευαστικά υλικά σε σύγκριση με την τεχνολογία της όξινης ηλεκτρόλυσης. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί και άλλες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου, όπως είναι η ηλεκτρόλυση με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων, ηλεκτρόλυση ατμού, ηλεκτρόλυση χλωρίου-αλκαλίων και η φωτοηλεκτρόλυση. Επιπλέον, λόγω της σημερινής επιβαρυνμένης κατάστασης του περιβάλλοντος έχουν αναπτυχθεί και άλλες τεχνολογίες για την παραγωγή υδρογόνου. Μερικές από αυτές είναι η παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση νερού η οποία λαμβάνει την ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως είναι η γεωθερμία, η αιολική και ηλιακή ενέργεια.

### 1.4.3.1 Αλκαλική ηλεκτρόλυση.

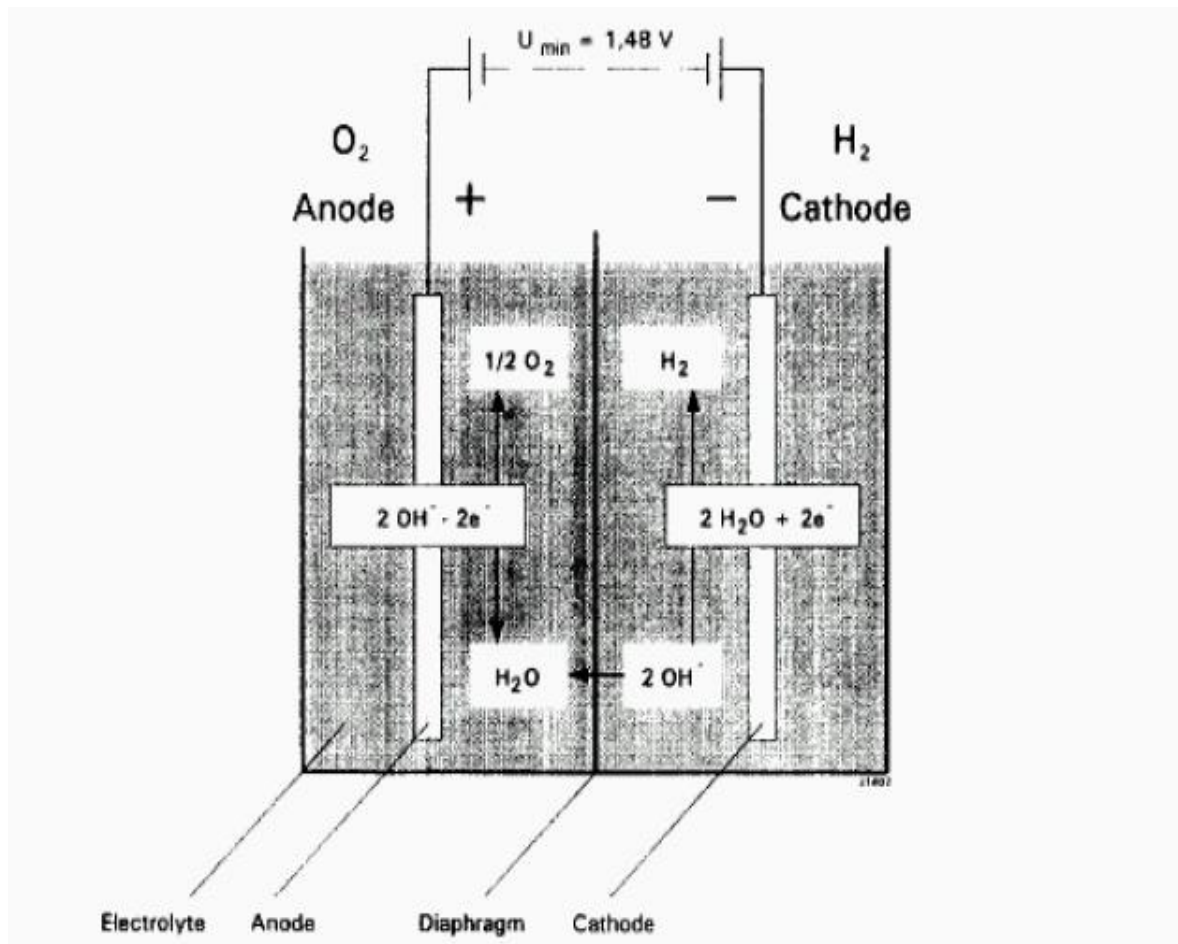
Σε αυτήν τη μέθοδο η ηλεκτρόλυση νερού γίνεται με αλκαλικό διάλυμα του οποίου η περιεκτικότητα του ηλεκτρολύτη κυμαίνεται μεταξύ 20-30% κατά βάρος, επιλέγεται αυτή η ποσότητα διότι σε αυτό το εύρος η ηλεκτρική αγωγιμότητα γίνεται μέγιστη και παρατηρείται σημαντική αντίσταση του μετάλλου στη διάβρωση. Οι συνήθεις τιμές πίεσης και θερμοκρασίας λειτουργίας των αλκαλικών ηλεκτρολυτών είναι 1-30 bar και 70-100°C. Η τεχνολογία της αλκαλικής ηλεκτρόλυσης έχει δύο τρόπους διάταξης και σύνδεσης των κελιών, τον μονοπολικό και τον διπολικό.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες αυτών των ηλεκτρολυτών, οι μονοπολικοί και οι διπολικοί (σχήμα 1.10). Στους μονοπολικούς τα θετικά ηλεκτρόδια είναι συνδεδεμένα παράλληλα μεταξύ τους, αυτό ισχύει και για τα αρνητικά ηλεκτρόδια. Αντιθέτως, στους διπολικούς ηλεκτρολύτες τα κελία συνδέονται σε σειρά. Οι δεύτεροι πλεονεκτούν διότι είναι περισσότερο συμπαγείς από τις μονοπολικές συστοιχίες και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των απωλειών λόγω της ωμικής αντίστασης του ηλεκτρολύτη, οπότε και την αύξηση της απόδοσης του. Άλλο ένα πλεονέκτημα είναι πως γίνεται εξοικονόμηση χώρου και ηλεκτρικών ζυγών, που είναι πολύ σημαντικό για εγκαταστάσεις μεγάλης ονομαστικής ισχύος. Το μειονέκτημα των διπολικών συστοιχιών είναι πως εμφανίζουν παρασιτικά ρεύματα τα οποία προκαλούν προβλήματα διάβρωσης. Επίσης, οι διπολικοί ηλεκτρολύτες έχουν μεγάλο κόστος κατασκευής σε σχέση με τους μονοπολικούς, λόγω του ότι έχουν σύνθετο σχεδιασμό και κατασκευή. Συνήθως οι ηλεκτρολύτες ατμοσφαιρικής πίεσης είναι μονοπολικοί και οι ηλεκτρολύτες υψηλής πίεσης κατασκευάζονται με διπολική διάταξη.



**Σχήμα 1.10:** Αριστερά, διάταξη μονοπολικού ηλεκτρολύτη. Δεξιά, διάταξη διπολικού ηλεκτρολύτη.<sup>[11]</sup>

Στην αλκαλική ηλεκτρόλυση η διάσπαση του νερού πραγματοποιείται με τη διέλευση συνεχούς ρεύματος ανάμεσα στα ηλεκτρόδια του κελιού μέσω του διαλύματος ηλεκτρολύτη. Στο σχήμα 1.11 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας του αλκαλικού ηλεκτρολύτη.



**Σχήμα 1.11:** Αρχή λειτουργίας της ηλεκτρόλυσης σε αλκαλικό διάλυμα.<sup>[12]</sup>

Κατά την διαδικασία των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων της αλκαλικής ηλεκτρόλυσης τα δύο μόρια νερού διασπώνται σε ένα μόριο υδρογόνου και δύο ιόντα υδροξυλίου στην κάθοδο. Το υδρογόνο φεύγει από την επιφάνεια της καθόδου σε αέρια μορφή και τα ιόντα υδροξυλίου υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου, διαπερνούν το πορώδες διάφραγμα και οδεύουν προς την άνοδο. Όπου εκεί γίνονται μισό μόριο οξυγόνου και ένα μόριο νερού και ταυτόχρονα αποδίδονται δύο ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα. Το οξυγόνο ανασχηματίζεται στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου και απελευθερώνεται σαν αέριο όπως το υδρογόνο. Τα ηλεκτρόδια του αλκαλικού ηλεκτρολύτη πρέπει να είναι ανθεκτικά στη διάβρωση, να είναι καλοί αγωγοί και να έχουν καταλυτικές ιδιότητες. Ενώ, η αντίσταση του διαφράγματος πρέπει να είναι χαμηλή.

#### 1.4.3.2 Μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων για ηλεκτρόλυση του νερού (PEM).

Η ηλεκτρόλυση του νερού με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων βασίζεται στη χρήση μιας πολυμερούς μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Μελετήθηκε για πρώτη φορά από την General Electric για την κατασκευή κυψελών καυσίμου και αργότερα για εφαρμογές ηλεκτρόλυσης. Κάποια από τα πλεονεκτήματα της μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων σε σχέση με τους αλκαλικούς είναι:

- i. η μεγαλύτερη αξιοπιστία και ασφάλεια.
- ii. η δυνατότητα λειτουργίας των στοιχείων μέχρι και αρκετά αμπέρ ανά τετραγωνικό εκατοστό με πάχος μερικών χιλιοστών.
- iii. διατήρηση υψηλής διαφοράς πίεσεως χωρίς φθορές.

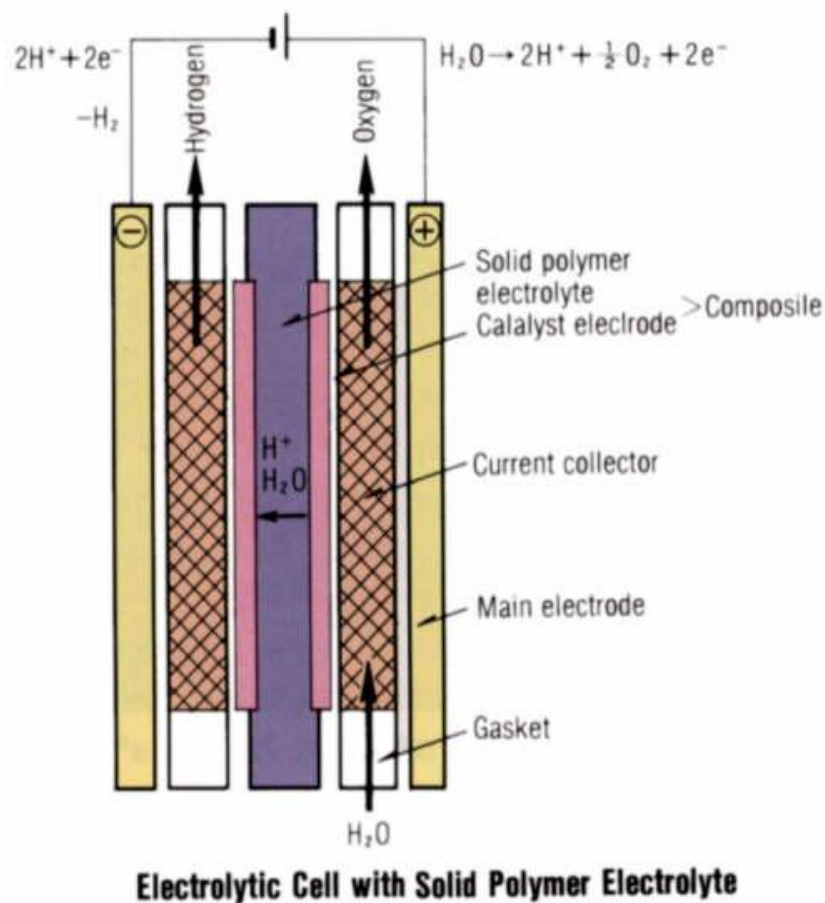
Παρά το γεγονός ότι η αρχή λειτουργίας τους είναι αντίστροφη από αυτήν των κυψελών καυσίμου, τα υλικά κατασκευής τους είναι διαφορετικά από αυτά των κυψελών καυσίμου PEM, αυτό οφείλεται σε προβλήματα διάβρωσης.

#### 1.4.3.3 Ηλεκτρόλυση ατμού.

Το βασικότερο πρόβλημα των συμβατικών τύπων ηλεκτρόλυσης είναι η υψηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Το πλεονέκτημα της ηλεκτρόλυσης ατμού είναι πως μπορεί να πετύχει μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση σε σχέση με την ηλεκτρόλυση ανταλλαγής πρωτονίων μέσω μεμβράνης και την αλκαλική ηλεκτρόλυση. Από τη θερμοδυναμική πλευρά της αποσύνθεσης νερού, είναι καλύτερα η ηλεκτρόλυση να γίνεται σε μεγάλη θερμοκρασία στους 800-1000 °C, διότι παρέχεται ταυτόχρονα ηλεκτρική και θερμική ενέργεια. Δηλαδή το μεγαλύτερο μέρος της απαιτούμενης ενέργειας για τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης προστίθεται ως θερμότητα, που είναι πολύ φθηνότερη από την ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης, μειώνεται η απώλεια ενέργειας λόγω της πόλωσης των ηλεκτροδίων αφού η υψηλή θερμοκρασία επιταχύνει την κινητική της αντίδραση, έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Η ηλεκτρόλυση σε υψηλή θερμοκρασία μπορεί να επιτυγχάνει έως και 92% ηλεκτρική απόδοση, όπως το γερμανικό σύστημα H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ELLY (σχήμα 1.12), αντιθέτως η ηλεκτρόλυση σε χαμηλή θερμοκρασία μπορεί να αποδώσει το πολύ έως 85%.

Σε αυτού του τύπου την ηλεκτρόλυση χρησιμοποιείται ως ηλεκτρολύτης κεραμικός αγωγός ιόντων οξυγόνου. Για τον διαχωρισμό του ρευστού απαιτείται ατμός ατμός στους 200 °C, όπου στη συνέχεια μετά από περαιτέρω θέρμανση στους 800-1000 °C εισέρχεται στην πλευρά της καθόδου. Καθώς γίνεται διαχωρισμός του ατμού σε υδρογόνο και ιόντα O<sup>2-</sup>, τα ιόντα οξυγόνου μεταφέρονται στην άνοδο μέσω του κεραμικού υλικού όπου εκεί αποφορτίζονται και σχηματίζουν αέριο οξυγόνο. Επιπλέον, ένα ακόμη πλεονέκτημα του συστήματος υψηλής θερμοκρασίας είναι ότι παράγεται υδρογόνου περίπου τέσσερις φορές του κόστους του ανασχηματιζόμενου ατμού υδρογόνου.

Στους συμβατικούς τύπους ηλεκτρόλυσης ατμού, το παρεχόμενο αέριο προς την κάθοδο συνήθως είναι ένα μείγμα ατμού και υδρογόνου, ενώ στην άνοδο εισέρχεται αέρας. Η τάση ανοιχτού κυκλώματος του συστήματος σε μηδενικό ρεύμα είναι από 0,8 έως 0,9 V, αναλόγως και την αναλογία υδρογόνου / ατμού και των θερμοκρασιών λειτουργίας. Για την ηλεκτρόλυση του νερού, αυτή η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι υψηλότερη. Αυτό συμβαίνει διότι για την πραγματοποίηση της ηλεκτρόλυσης πρέπει να εφαρμοστεί μια τάση που θα αντιτίθεται και θα είναι υψηλότερη από την τάση ανοικτού κυκλώματος, έτσι ώστε να αντλείται το οξυγόνο από την πλευρά του ατμού προς την πλευρά του αέρα. Φανερό είναι πως το ποσοστό (60-70 %) της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας ξοδεύεται για τον αναγκασμό της ηλεκτρόλυσης να λειτουργεί ενάντια στον υψηλού βαθμού χημικό δυναμικό για το οξυγόνο.



**Σχήμα 1.12:** Σύστημα ηλεκτρόλυσης HOT ELLY. [13]

Επιπλέον, έχει επιτευχθεί μια νέα προσέγγιση με σκοπό την μείωση κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας σε συσκευές ηλεκτρόλυσης. Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας φυσικό αέριο έτσι ώστε να μειωθεί η χημική διαφορά δυναμικού στα άκρα του

δοχείου ηλεκτρόλυσης. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται Natural-Gas-Assisted-Steam Electrolysis (NGASE). Στην νέα αυτή τεχνολογία, στην πλευρά της ανόδου ο αέρας αντικαθίσταται με φυσικό αέριο, με σκοπό την μείωση της τάσης ανοικτού κυκλώματος που σημαίνει και μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η ιδέα στηρίζεται στο ότι το φυσικό αέριο συνεισφέρει στην μείωση της χημικής διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δύο πλευρών της συσκευής ηλεκτρόλυσης.

#### 1.4.3.4 Ηλεκτρόλυση χλωρίου-αλκαλίων.

Η ηλεκτρόλυση χλωρίου-αλκαλίων έχει ως βασικό προϊόν το χλώριο, σε μεγάλο ποσοστό η παραγωγή του γίνεται με σχετικά νέες διαδικασίες μεμβράνης εξαιτίας περιβαλλοντικών και οικονομικών λόγων. Στη διεργασία της ηλεκτρόλυσης η κάθοδος με την άνοδο χωρίζονται από μία επιλεκτική μεμβράνη κατιόντων πάχους 50-200  $\mu\text{m}$ . Η άνοδος τροφοδοτείται με ένα διάλυμα άλμης και τα χλωριούχα ιόντα μετατρέπονται σε αέριο χλώριο. Ενώ η κάθοδος τροφοδοτείται με νερό το οποίο μετατρέπεται σε αέριο υδρογόνο και ιόντα υδροξυλίου. Μέσω της επιλεκτικής μεμβράνης κατιόντων, τα ιόντα νατρίου διαχέονται και μεταφέρονται από την άνοδο στην περιοχή της καθόδου. Μεταξύ του νατρίου και των ιόντων υδροξυλίου γίνεται μία αντίδραση η οποία αφήνει τη μεμβράνη του δοχείου ως υδροξείδιο του νατρίου με συγκέντρωση 23-25% κ.β. Μεταξύ της ανόδου και της καθόδου κυμαίνεται μια διαφορά δυναμικού από 2 έως 4 V, έτσι ώστε η πυκνότητα ρεύματος να φτάσει την επιθυμητή τιμή 2000-5000  $\text{A}/\text{m}^2$ .

Οι μεμβράνες των δοχείων είναι συνδεδεμένες σε σειρά σε μία στοίβα και η κάθε μεμβράνη καταλαμβάνει επιφάνεια περίπου 1-3  $\text{m}^2$ . Οι μεμβράνες αυτές είναι κατασκευασμένες από ένα διασυνδεδεμένο πολυμερικό δίκτυο στο οποίο καθορίζονται οι λειτουργικές ομάδες. Σε κάθε μεμβράνη συνδέονται δύο τύποι ενεργών ομάδων, οι καρβοξυλικές και οι σουλφονικές ομάδες. Σε ένα συγκεκριμένο στρώμα οι ιδιότητες μεταφοράς και απορρόφησης μπορούν να ρυθμιστούν από τον αριθμό των moles των ενεργών ομάδων ανά χιλιόγραμμο ξηρού πολυμερούς. Οι σουλφονικές ομάδες των μεμβρανών ενισχύονται με σύρματα Teflon, έτσι ώστε να αυξηθεί η μηχανική σταθερότητα τους. Το σουλφονικό στρώμα τοποθετείται στην πλευρά της ανόδου για την αποφυγή πρωτονίωσης των καρβοξυλικών ομάδων του καρβοξυλικού στρώματος που θα μπορούσε να συμβεί σε σχετικώς όξινο περιβάλλον. Μεταξύ της ανόδου και της καθόδου υπάρχει μια μικρή διαφορά πίεσης 0,1 bar, αυτό έχει ως αποτέλεσμα να πιέζεται η μεμβράνη έναντι της ανόδου και να μειώνεται η μάζα που μεταφέρεται από την άνοδο προς την κάθοδο, όπου λόγω της χαμηλότερης συγκέντρωσης ηλεκτρολύτη, η ηλεκτρική αντίσταση είναι μεγαλύτερη από αυτή της καθόδου. Η απόσταση ανάμεσα στην μεμβράνη και την κάθοδο είναι περίπου 1 mm. Η λειτουργία αυτών των μονάδων ηλεκτρόλυσης γίνεται σε ατμοσφαιρική πίεση και σε θερμοκρασία 80-95 °C.

#### 1.4.3.4 Φωτοηλεκτρόλυση.

Μία άλλη εκδοχή διάσπασης του νερού για την παραγωγή υδρογόνου είναι η φωτοηλεκτρόλυση, η οποία έχει ως κινητήρια δύναμη την ηλιακή ενέργεια. Η τεχνολογία αυτή εφαρμόστηκε για πρώτη φορά από τους Fujishima και Honda, παράγοντας

υδρογόνο και οξυγόνο σε μια φωτοηλεκτροχημική κυψέλη με την χρήση ενός ηλεκτροδίου από διοξείδιο του τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ ) φωτίζοντας το με φως κοντά στο υπεριώδες.

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε χρήσιμες μορφές ενέργειας μέσω θερμικών ή φωτονικών διεργασιών. Στις ηλιακές φωτονικές διεργασίες, πραγματοποιείται άμεση απορρόφηση των ηλιακών φωτονίων από έναν απορροφητή, χωρίς όμως να μετατραπεί όλη η ενέργεια σε θερμότητα. Ο απορροφητής έχει την ικανότητα να μετατρέπει ένα μέρος της ενέργειας των φωτονίων σε ηλεκτρική π.χ. ένα φωτοβολταϊκό πάνελ, ή να αποθηκεύει μέρος αυτής ως χημική ενέργεια σε μια ενδόθερμη χημική αντίδραση π.χ. η φωτοσύνθεση και η διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο. Η διάσπαση του νερού είναι η διαδικασία της φωτοηλεκτρόλυσης του νερού ή αλλιώς φωτοπαραγωγή. Αυτά τα συστήματα ταξινομούνται στις παρακάτω κατηγορίες:

- i. Φωτοχημικά συστήματα, όπου το ηλιακό φως απορροφάται από απομονωμένα μόρια σε διάλυμα.
- ii. Φωτοβιολογικά συστήματα, όπου γίνεται απορρόφηση του ηλιακού φωτός από έναν χλωροπλάστη ή άλγη σε μια διάταξη συζευγμένη με ένα ένζυμο παραγωγής υδρογόνου.
- iii. Συστήματα ημιαγωγών, όπου το ηλιακό φως απορροφάται από έναν ημιαγωγό, είτε ως μια μακροσκοπική μονάδα σε μια φωτοβολταϊκή κυψέλη ή ως σωματίδιο σε ένα υγρό ή μια ηλεκτροχημική κυψέλη.
- iv. Υβριδικά συστήματα, που είναι ο συνδυασμός των παραπάνω συστημάτων.

Στις φωτοηλεκτροχημικές κυψέλες χρησιμοποιείται ένας φωτο-απορροφητικός ημιαγωγός σαν άνοδος ή σαν κάθοδος. Οι Fujishima και Honda χρησιμοποίησαν στην κυψέλη τους ως φωτοάνοδο ένα ενιαίο κρύσταλλο διοξειδίου του τιτανίου. Επίσης, τα ηλεκτρόνια που διέφευγαν από την άνοδο κατευθύνονταν μέσω ενός καλωδίου σε ένα ηλεκτρόδιο από λευκόχρυσο (Pt), όπου εκεί αναπτυσσόταν το υδρογόνο. Οι αποδοτικότερες κυψέλες είναι αυτές που περιλαμβάνουν μια φωτοκάθοδο από p-InP, όπου πάνω σε αυτή υπάρχουν μικροσκοπικά κομμάτια λευκόχρυσου.

#### 1.4.4 Σύγκριση τεχνολογιών ηλεκτρόλυσης.

Οι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες είναι πιο οικονομικοί και εμπορικά διαθέσιμοι σε μεσαία και μεγάλη κλίμακα σε αντίθεση με τους PEM ηλεκτρολύτες. Το επενδυτικό κόστος ενός αλκαλικού ηλεκτρολύτη σήμερα είναι περίπου το μισό από αυτό ενός PEM ηλεκτρολύτη. Ωστόσο, η τεχνολογία των PEM ηλεκτρολυτών έχει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των αλκαλικών ηλεκτρολυτών, τα οποία είναι:

- i. Ο υψηλότερος βαθμός ασφάλειας και αξιοπιστίας λόγω του ότι τα κελιά δεν διαρρέονται από καυστικό ηλεκτρολύτη.
- ii. Μηδαμινά διαβρωτικά και περιβαλλοντικά προβλήματα εξαιτίας της απουσίας του καυστικού ηλεκτρολύτη.



- iii. Προηγούμενες δοκιμές που έγιναν σε γυμνές μεμβράνες έδειξαν ότι ορισμένα από τα υλικά θα μπορούσαν να διατηρήσουν υψηλή διαφορά πίεσης χωρίς φθορές και ήταν αποτελεσματικό στην πρόληψη της ανάμειξης αερίων.
- iv. Ευκολότερη συντήρηση.
- v. Παραγωγή υδρογόνου πολύ υψηλής καθαρότητας έως και 99,99% σε υψηλό βαθμό απόδοσης μέχρι 95%.
- vi. Δυνατότητα λειτουργίας των στοιχείων έως μεγάλες τιμές αμπέρ ανά τετραγωνικό εκατοστό με πάχος μερικών χιλιοστών.
- vii. Γρηγορότερη απόκριση στις μεταβολές ισχύος εισόδου.



## 2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.

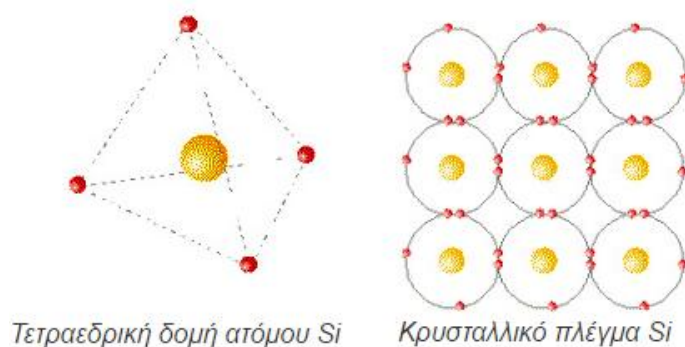
### 2.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ.

#### 2.1.1 Γενικά για το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από ημιαγωγούς, συνήθως φτιαγμένους από πυρίτιο. Οι ημιαγωγοί αποτελούνται από έναν ή πολλούς κρυστάλλους, οι οποίοι αποτελούνται από άτομα πυριτίου Si (εικόνα 2.1) που συνδέονται μεταξύ τους με ομοιοπολικούς δεσμούς. Τα άτομα αποτελούνται από τον πυρήνα που περιέχει πρωτόνια (θετικό φορτίο) και νετρόνια (ουδέτερο φορτίο) και από εσωτερικές στοιβάδες και μία εξωτερική στοιβάδα ηλεκτρονίων (αρνητικό φορτίο).

Οι στοιβάδες περιβάλλουν τον πυρήνα και τα ηλεκτρόνια των στοιβάδων με τα πρωτόνια που βρίσκονται στον πυρήνα συγκρατούνται μεταξύ τους με ελκτικές δυνάμεις, λόγω ηλεκτρικού πεδίου, ώστε να μην διαφύγουν. Πιο εύκολα διαφεύγουν τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας. Τα άτομα που βρίσκονται στον ίδιο κρύσταλλο συνδέονται μεταξύ τους με ομοιοπολικούς δεσμούς. Οι ομοιοπολικοί δεσμοί δημιουργούνται από δύο ηλεκτρόνια εξωτερικής στοιβάδας, το ένα βρίσκεται στην εξωτερική στοιβάδα ενός ατόμου και το άλλο στην εξωτερική στοιβάδα ενός άλλου ατόμου.

Τα άτομα συμπληρώνονται με οκτώ ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στοιβάδα και ανταλλάσσουν ηλεκτρόνια μεταξύ τους μέχρι να το πετύχουν αυτό. Τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας όταν διαφύγουν κινούνται ελεύθερα μέσα στον κρύσταλλο μέσω των ατόμων τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με ομοιοπολικούς δεσμούς και βρίσκονται σε ένα επίπεδο (κρύσταλλος).

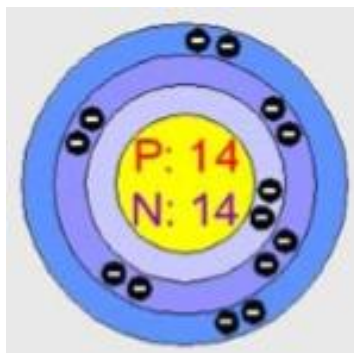


Εικόνα 2.1: Άτομο πυριτίου και κρύσταλλος πυριτίου.<sup>[14]</sup>

Οι ημιαγωγοί πυριτίου διακρίνονται από την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα, που εξαρτάται από το είδος των ηλεκτροστατικών δεσμών που συνδέονται τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας τους με τα πρωτόνια που βρίσκονται στον πυρήνα. Όσο ισχυροί είναι οι ηλεκτροστατικοί δεσμοί τόσο δυσκολότερα δύναται να υπάρξει ροή ηλεκτρονίων προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, άρα και ηλεκτρικό ρεύμα (χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα). Για να διασπαστεί ο δεσμός μεταξύ ενός πρωτονίου και ενός ηλεκτρονίου εξωτερικής στοιβάδας, θα πρέπει να προσφερθεί συγκεκριμένο ποσό ενέργειας μέσω θερμότητας ή φωτός, αυτό το ποσό ενέργειας ονομάζεται ενεργειακό χάσμα. Η ενέργεια των φωτονίων (φωτοβολταϊκό φαινόμενο) θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από το ενεργειακό χάσμα για να την απορροφήσει το ηλεκτρόνιο και να διεγερθεί (ρήξη χημικού δεσμού, το ηλεκτρόνιο κινείται ελεύθερα μέσα στον κρύσταλλο).

Στην περίπτωση που η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη ή ίση από το ενεργειακό χάσμα, τότε αν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο αυτής (διπλάσια, τριπλάσια κλπ.) διεγείρει αντίστοιχο αριθμό ηλεκτρονίων αλλιώς το υπόλοιπο ποσό ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα. Το ηλεκτρόνιο αποδεσμεύεται από τον χημικό δεσμό που το συγκρατεί και κινείται άτακτα μέσα στον κρύσταλλο, όπου αυτή η κίνηση δεν δημιουργεί ηλεκτρικό ρεύμα. Εφόσον το άτομο έχασε ένα αρνητικό φορτίο είναι φορτισμένο θετικά. Το ηλεκτρόνιο θα κινηθεί μέχρι να πάρει την θέση μίας οπής σε ένα άτομο που χρειάζεται ηλεκτρόνια και η οπή που βρίσκεται εκεί θα καταλάβει την θέση που βρισκόταν το ηλεκτρόνιο πριν διεγερθεί. Το άτομο το οποίο πήρε το ηλεκτρόνιο θα φορτιστεί αρνητικά. Το ηλεκτρόνιο αφού σταμάτησε να κινείται και πήρε την θέση του στην εξωτερική στοιβάδα ενός ατόμου, αποδιεγείρεται και αποδεσμεύει την ενέργεια που του δόθηκε εκπέμποντάς την με την μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

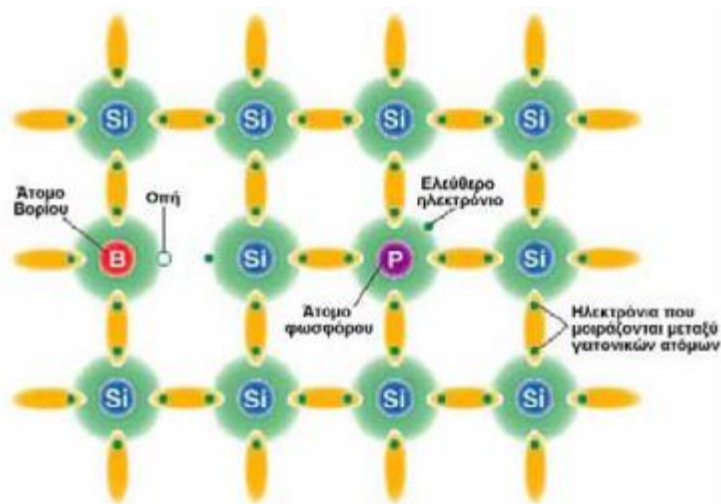
Το κάθε άτομο πυριτίου Si έχει δεκατέσσερα ηλεκτρόνια και δεκατέσσερα πρωτόνια. Οι δύο πρώτες στοιβάδες ηλεκτρονίων περιέχουν η πρώτη δύο και η δεύτερη οκτώ ηλεκτρόνια. Η εξωτερική στοιβάδα του ατόμου του πυριτίου περιέχει τέσσερα ηλεκτρόνια όπως φαίνεται στην εικόνα 2.2. Η εξωτερική στοιβάδα κάθε ατόμου μπορεί να είναι συμπληρωμένη με μέχρι οκτώ ηλεκτρόνια και κάθε άτομο που έχει λιγότερα ψάχνει κάποιο άλλο άτομο με το οποίο να ανταλλάξει ή να μοιραστεί ηλεκτρόνια ώστε να συμπληρωθεί η εξωτερική στοιβάδα του και να ολοκληρωθεί το κρυσταλλικό του πλέγμα.



**Εικόνα 2.2:** Άτομο πυριτίου.<sup>[15]</sup>

Οπότε όταν τοποθετηθούν άτομα πυριτίου σε ένα χώρο, τότε αυτά θα δημιουργήσουν μεταξύ τους ομοιοπολικούς δεσμούς και θα ενωθούν, δημιουργώντας έτσι κρυσταλλικό πλέγμα (εικόνα 2.1), χωρίς όμως να μπορούν να ανταλλάξουν ηλεκτρόνια. Αυτό συμβαίνει διότι όλα τα άτομα πυριτίου έχουν τον ίδιο αριθμό ηλεκτρονίων στην εξωτερική τους στοιβάδα κι έτσι δεν υπάρχει διαφορά φορτίου ώστε να ανταλλάξουν ηλεκτρόνια και να υπάρξει κίνηση ηλεκτρονίων που συνεπάγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Γι' αυτό το λόγο θα πρέπει να προστεθούν άτομα διαφορετικού φορτίου στο κρυσταλλικό πλέγμα του πυριτίου για να αλληλοεπιδράσουν με τα άτομα του πυριτίου. Αυτό επιτυγχάνεται αν προσθέσουμε τεχνητά στον ημιαγωγό άτομα τα οποία έχουν ένα ηλεκτρόνιο περισσότερο ή λιγότερο από αυτά ώστε να ανταλλάξουν ηλεκτρόνια και να υπάρξει ροή ηλεκτρονίων προς μια κατεύθυνση. Τέτοια άτομα είναι άτομα από την τρίτη (3 ηλεκτρόνια σθένους) και την πέμπτη ομάδα (πέντε ηλεκτρόνια σθένους) του περιοδικού πίνακα.

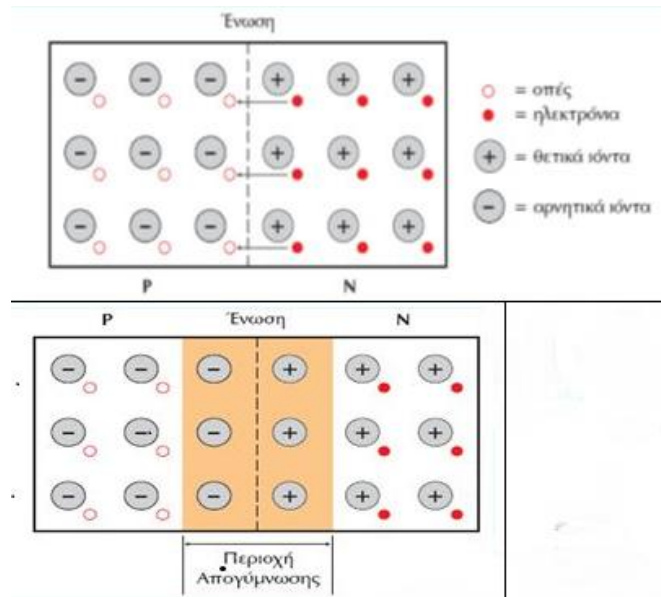
Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3 το κρυσταλλικό πλέγμα του πυριτίου (τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους), εάν αντικαταστήσουμε ένα άτομο πυριτίου με ένα άτομο που έχει τρία ηλεκτρόνια σθένους (ηλεκτρόνια εξωτερικής στοιβάδας) όπως το Βόριο Β, τότε ο ημιαγωγός αυτός θα χάσει ένα ηλεκτρόνιο και θα αποκτήσει μία οπή που αντιπροσωπεύει το θετικό φορτίο. Αν περισσότερα άτομα από το κρυσταλλικό πλέγμα του πυριτίου αντικατασταθούν τότε θα υπάρχει περίσσεια οπών. Αυτού του τύπου οι ημιαγωγοί που είναι φορτισμένοι θετικά ονομάζονται τύπου p. Στον αντίποδα όταν στο κρυσταλλικό πλέγμα του πυριτίου αντικαταστήσουμε άτομα πυριτίου με άτομα που έχουν 5 ηλεκτρόνια σθένους όπως ο Φώσφορος P, τότε ο ημιαγωγός αυτός θα φορτιστεί αρνητικά εφόσον θα έχει περίσσεια ηλεκτρονίων. Αυτοί ονομάζονται ημιαγωγοί τύπου n.



**Εικόνα 2.3:** Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με προσμίξεις Βορίου και Φωσφόρου.<sup>[16]</sup>

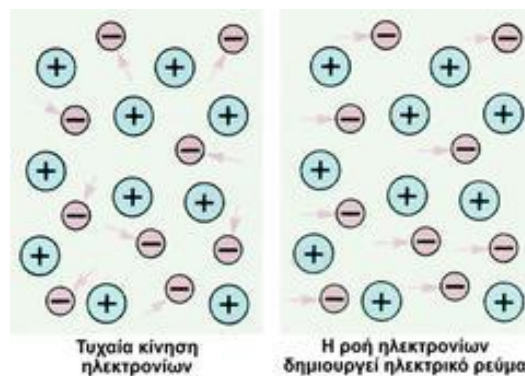
Στην συνέχεια φέρνουμε σε επαφή τους δύο ημιαγωγούς p και n (εικόνα 2.4). Τότε δημιουργείται μία περιοχή στην οποία τα αρνητικά ιόντα με μία οπή του ημιαγωγού p και τα θετικά ιόντα με ένα ηλεκτρόνιο του ημιαγωγού n έρχονται πολύ κοντά. Μερικά

ελεύθερα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού n που βρίσκονται κοντά στην περιοχή αυτή περνούν στον ημιαγωγό p, παίρνουν την θέση των οπών και δημιουργείται μία περιοχή με ιόντα που εμποδίζουν την διέλευση φορτίων εφόσον είναι φορτισμένα αντίστοιχα. Ουσιαστικά δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο που εμποδίζει την ροή ηλεκτρονίων, αναγκάζοντας τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να περάσουν εξωτερικά αν συνδέσουμε τους ημιαγωγούς με ένα φορτίο.



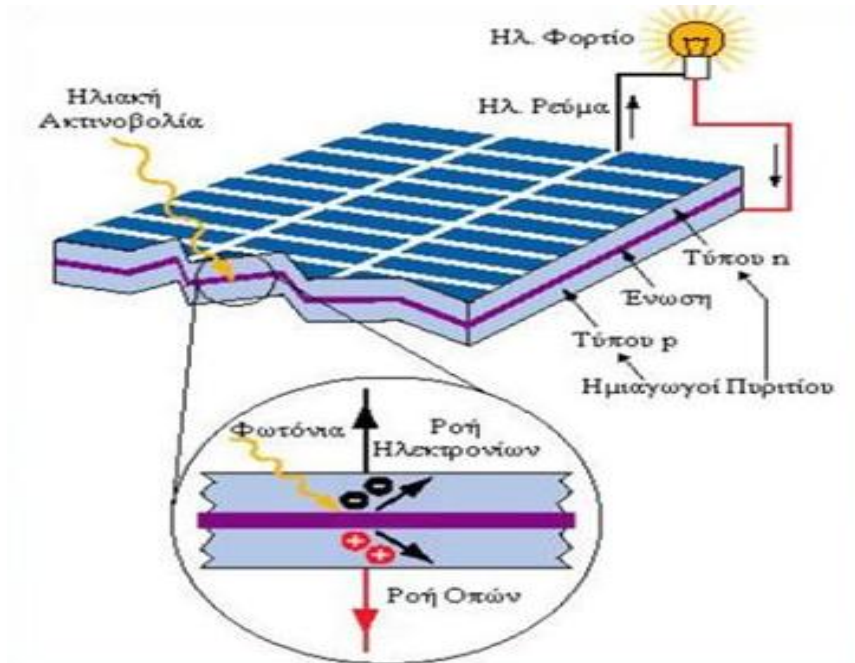
**Εικόνα 2.4:** Δημιουργία της περιοχής απογύμνωσης.<sup>[17]</sup>

Ο μόνος τρόπος να εκμεταλλευτούμε την κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων, είναι με την δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου στους ημιαγωγούς που θα αναγκάσει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να κινηθούν προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση (εικόνα 2.5) και θα δημιουργηθεί ηλεκτρικό ρεύμα με αρκετή ένταση ώστε να το αξιοποιήσουμε.



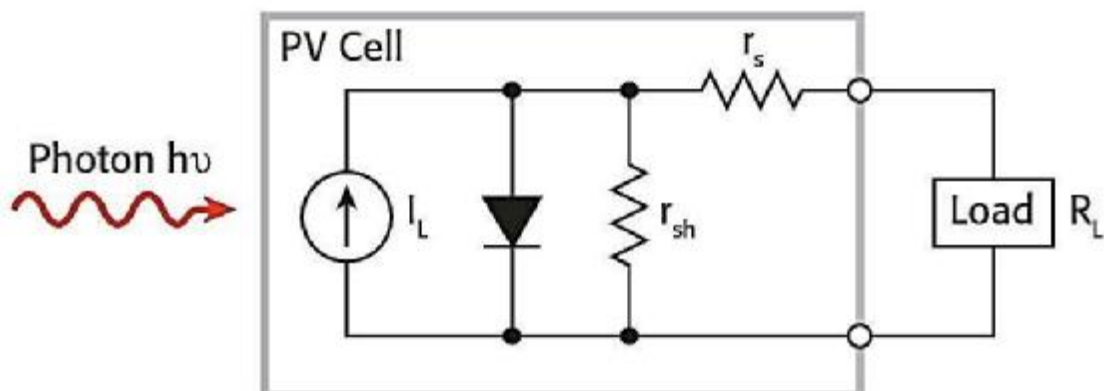
**Εικόνα 2.5:** Είδη ροής ηλεκτρονίων.<sup>[18]</sup>

Αυτό θα επιτευχθεί αν συνδέσουμε τους δύο ημιαγωγούς με ένα ηλεκτρικό φορτίο ώστε να δημιουργηθεί ένα ηλεκτρικό πεδίο από τους ημιαγωγούς προς το ηλεκτρικό φορτίο και να αναγκάσει τα ηλεκτρόνια να κινηθούν προς αυτήν την κατεύθυνση και τις οπές προς την αντίθετη (Εικόνα 2.6).



**Εικόνα 2.6:** Ροή ηλεκτρονίων σε ημιαγωγό τύπου p-n.<sup>[19]</sup>

Έτσι δημιουργείται ένα αξιοποιήσιμο ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο αποκαλείται φωτορεύμα  $I_L$ , η τιμή του οποίου είναι ευθέως ανάλογη με τον αριθμό των φωτονίων που παράγει το φωτοβολταϊκό στοιχείο (σχήμα 2.1).



**Σχήμα 2.1:** Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού πλαισίου με συνδεδεμένο φορτίο.

Όπου  $r_s$  είναι η αντίσταση που αντιτίθεται στην κίνηση των ηλεκτρονίων ανάμεσα στον ημιαγωγό και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια και η αντίσταση  $r_{sh}$  εκφράζει τις διαρροές ρεύματος λόγω κατασκευαστικών λαθών.

## 2.1.2 Είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων.

### 2.1.2.1 Φ/Β στοιχεία μεγάλου πάχους.

Φ/Β στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (single-crystalline silicon).

- Απόδοση πλαισίου από 15-18% .
- Πάχος 0,3 mm.
- Υψηλό κόστος κατασκευής.
- Απόδοση πλαισίου 24,7% σε εργαστηριακές συνθήκες.
- Παράγεται με τις μεθόδους Czochralski και float zone, με την χρήση ράβδων πυριτίου.



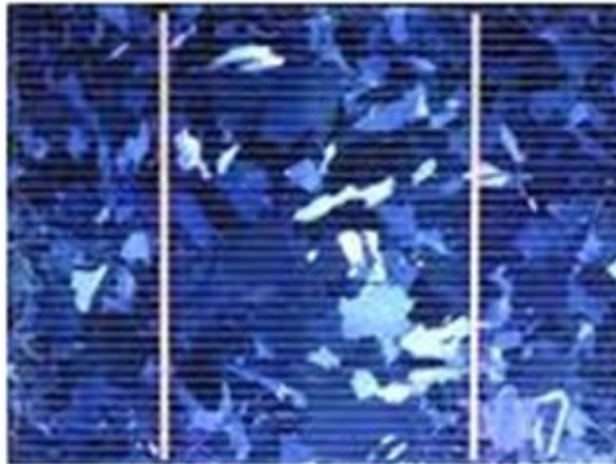
**Εικόνα 2.8:** Φ/Β στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου.<sup>[20]</sup>

Φ/Β στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (multi-crystalline silicon).

- Η απόδοση πλαισίου κυμαίνεται από 13% έως και 15%.
- Πάχος 0,3 mm.
- Αντέχουν στον χρόνο.
- Μέτριο κόστος κατασκευής.
- Αποτελείται από πολλούς κρυστάλλους πυριτίου.
- Απόδοση πλαισίου 20% σε εργαστηριακές συνθήκες.



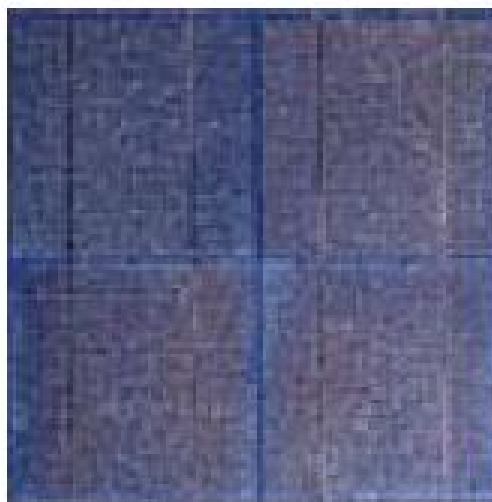
- Παράγεται με απευθείας στερεοποίηση, με χύτευση ή με ηλεκτρομαγνητική χύτευση.



**Εικόνα 2.9:** Φ/Β στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου.<sup>[20]</sup>

Φ/Β στοιχεία ταινίας πυριτίου (ribbon silicon).

- Δημιουργία λεπτού στρώματος κρυστάλλων (ribbon, film) από τηγμένο πολυκρυσταλλικό πυρίτιο.
- Πάχος 0,3 mm.
- Εξοικονόμηση πυριτίου έως 50% σε σχέση με τα φ/β στοιχεία μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου.
- Απόδοση στοιχείου περίπου 13%.
- Απόδοση στοιχείου 18% σε εργαστηριακές συνθήκες.
- Υψηλό κόστος κατασκευής και περιορισμένη βιομηχανική παραγωγή.



**Εικόνα 2.10:** Φ/Β στοιχεία ταινίας πυριτίου.<sup>[20]</sup>

### 2.1.2.2 Φ/Β στοιχεία λεπτών στρωμάτων.

Φ/Β στοιχεία άμορφου πυριτίου (amorphous or thin film silicon).

- Διαδοχικές ενώσεις δύο ή τριών στρωμάτων κρυστάλλων (films) με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα.
- Δεν σχηματίζει κρυσταλλικό πλέγμα με διατεταγμένα άτομα, αλλά με τυχαία διάταξη, γι' αυτό ονομάζεται άμορφο.
- Πάχος πυριτίου 0,0001 nm και πάχος υποστρώματος 1-3 nm.
- Πολύ χαμηλό κόστος παραγωγής.
- Η απόδοση πλαισίου κυμαίνεται στα επίπεδα του 6 έως 8%.
- Απόδοση στοιχείου 14% σε εργαστηριακές συνθήκες.
- Η απόδοση του δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες.
- Έχει καλύτερη απόδοση από τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία όταν έχει συννεφιά και εκμεταλλεύεται περισσότερο από αυτά την διάχυτη ακτινοβολία.
- Έχουν χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, εξ' ου και η χαμηλή απόδοση.

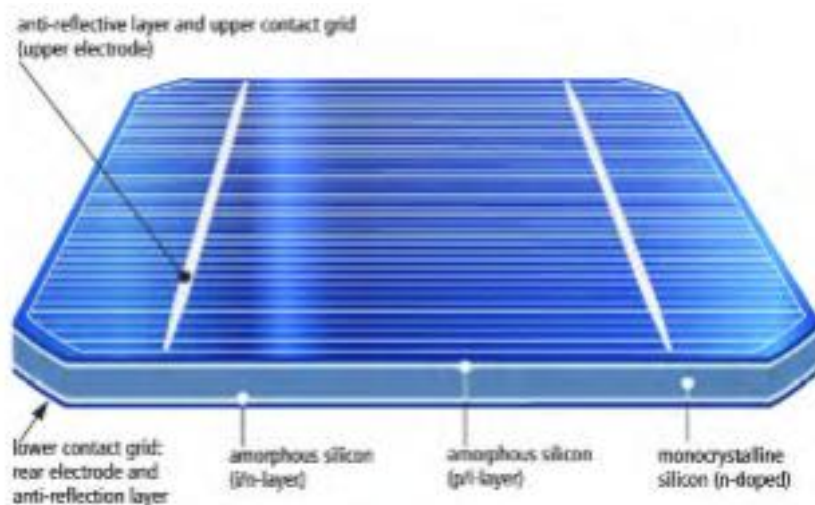


**Εικόνα 2.11:** Φ/Β στοιχείο άμορφου πυριτίου.<sup>[20]</sup>

Πολυστρωματικά ή υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία (heterojunction with intrinsic thin-layer).

- Αποτελούνται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών π.χ. δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω) ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου.
- Υψηλή απόδοση πλαισίου 17,2%.
- Υψηλή απόδοση στοιχείου 19,7%.
- Εκμεταλλεύονται σε μεγάλο βαθμό την διάχυτη ακτινοβολία και αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες.

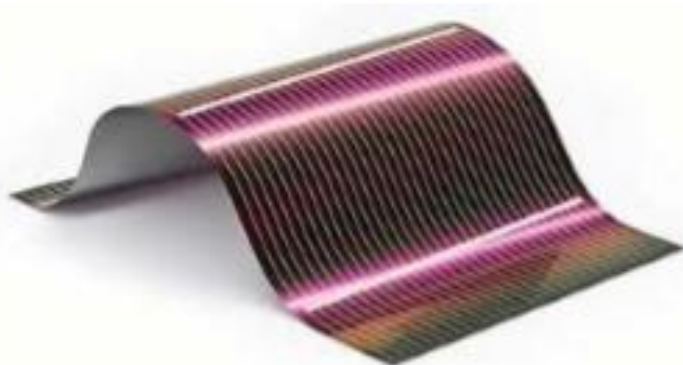
- Πολύ υψηλό κόστος κατασκευής.



**Εικόνα 2.12:** Πολυστρωματικό φωτοβολταϊκό στοιχείο.<sup>[21]</sup>

Φ/Β στοιχεία από δισεληνοϊνδιούχο χαλκό ( $\text{CuInSe}_2$  με προσθήκη γάλλιου).

- Χρησιμοποιούνται μικρές ποσότητες ημιαγωγικών υλικών.
- Κατασκευάζονται με σεληνιούχο υδρογόνο που είναι ένα εξαιρετικά τοξικό αέριο.
- Πολύ υψηλό κόστος.
- Αντοχή στην γήρανση.
- Εκμεταλλεύεται σε μεγάλο βαθμό την ηλιακή ακτινοβολία.
- Η απόδοση του πλαισίου κυμαίνεται στο 11%.
- Περιορισμένη διαθεσιμότητα του ίνδιου στην φύση.
- Απόδοση πλαισίου 18,8% σε εργαστηριακές συνθήκες.
- Η απόδοση του αυξάνεται με την προσθήκη γάλλιου.



**Εικόνα 2.13:** Φ/Β στοιχείο από δισεληνοϊνδιούχο χαλκό.<sup>[20]</sup>

Φ/Β στοιχεία από Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe).

- Απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, καθώς έχει ενεργειακό χάσμα σχεδόν ίσο με το ενεργειακό χάσμα των φωτονίων, που εκπέμπονται από τον ήλιο.
- Το κάδμιο είναι καρκινογόνο και υπάρχει έλλειψη του Τελούριου.
- Ενθυλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό, κατάλληλο για ενσωμάτωση στα κτίρια.
- Απόδοση πλαισίου γύρω στο 6-8%.
- Απόδοση πλαισίου 16% σε εργαστηριακές συνθήκες.
- Υψηλό κόστος κατασκευής.

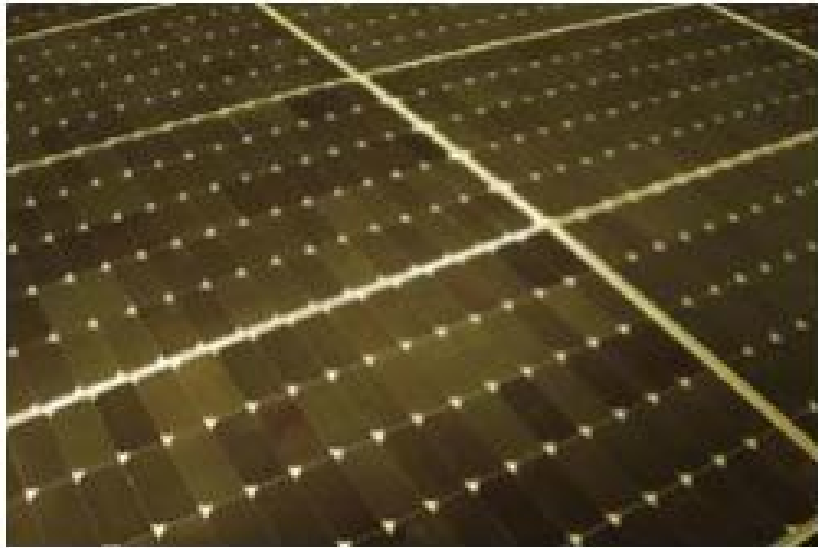


**Εικόνα 2.14:** Φ/Β στοιχείο από Τελουριούχο Κάδμιο.<sup>[20]</sup>

Φ/Β στοιχεία από αρσενικούχο γάλλιο (GaAs).

- Παράγεται από την ρευστοποίηση άλλων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος.
- Το αρσενικό είναι δηλητηριώδες.
- Η απόδοση τους φθάνει το 29%.
- Ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες και σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας.
- Χρησιμοποιούνται σε διαστημικές εφαρμογές.

- Εξαιρετικά υψηλό κόστος.



**Εικόνα 2.15:** Φ/Β στοιχεία από αρσενικούχο γάλλιο.<sup>[20]</sup>

#### 2.1.2.3 Φ/Β στοιχεία από νέες τεχνολογίες.

Φ/Β στοιχεία από οργανικά πολυμερή.

- Αποτελούνται από συζυγή πολυμερή που συνδυάζουν τις οπτικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των ημιαγωγών με τις μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών.
- Κατασκευάζονται από διάλυμα με στάξιμο σταγόνων, φυγοκέντριση ή τρισδιάστατη εκτύπωση σε θερμοκρασίες δωματίου.

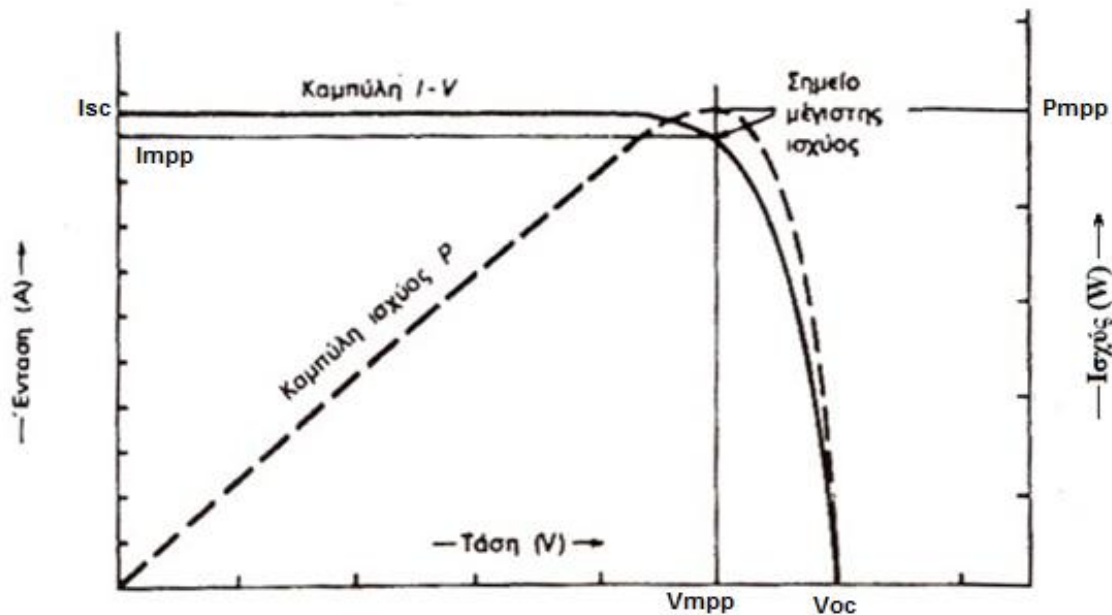
Φ/Β στοιχεία από νανοκρυσταλλικά υλικά.

- Αποτελούνται από νανοκρυστάλλους που έχουν πολύ μικρό μέγεθος.
- Είναι εύκαμπτα και έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής.
- Απόδοση έως και 65%.
- Βασίζονται στο φωτοηλεκτροχημικό φαινόμενο.

#### 2.1.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Αρχικά όταν προσκρούουν τα πρώτα φωτόνια στους ημιαγωγούς  $p$  και  $n$ , δημιουργείται το φωτορεύμα, το οποίο μπορεί να μετρηθεί αν το κύκλωμα είναι βραχυκυκλωμένο. Όταν το κύκλωμα είναι βραχυκυκλωμένο, η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος παίρνει την μέγιστη τιμή  $I_{sc}$  και η ηλεκτρική τάση  $V$  μηδενίζεται. Αντίθετα όταν

το κύκλωμα είναι ανοιχτό, η ένταση του ρεύματος μηδενίζεται και η τάση παίρνει την μέγιστη τιμή  $V_{oc}$ . Σε πρώτο στάδιο το ρεύμα παίρνει την μέγιστη τιμή χωρίς συνδεδεμένο φορτίο  $I_{sc}$  και στην συνέχεια μειώνεται, αυξάνοντας έτσι την τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$ . Η ισχύς του φ/β στοιχείου αρχικά είναι μηδενική και μετά αυξάνεται συναρτήσει της τάσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου, μέχρι να φτάσει στην μέγιστη τιμή  $P_{mpp}$ . Η μέγιστη τιμή της ισχύς  $P_{mpp}$  αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο ζεύγος τιμών τάσης  $V_{mpp}$  και έντασης  $I_{mpp}$ .



**Σχήμα 2.2:** Χαρακτηριστική καμπύλη Έντασης ρεύματος-Τάσης ρεύματος I-V και Ισχύος-Τάσης ρεύματος P-V.<sup>[22]</sup>

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν διαφορετική απόδοση ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται. Για αυτό το λόγο έχουν καθοριστεί κάποιες συνθήκες λειτουργίας, οι οποίες προτείνονται για την ομαλή λειτουργία τους. Επίσης, έχουν καθοριστεί συγκεκριμένες πρότυπες συνθήκες που πρέπει να τηρούνται όταν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ελέγχονται από διαπιστευμένα εργαστήρια.

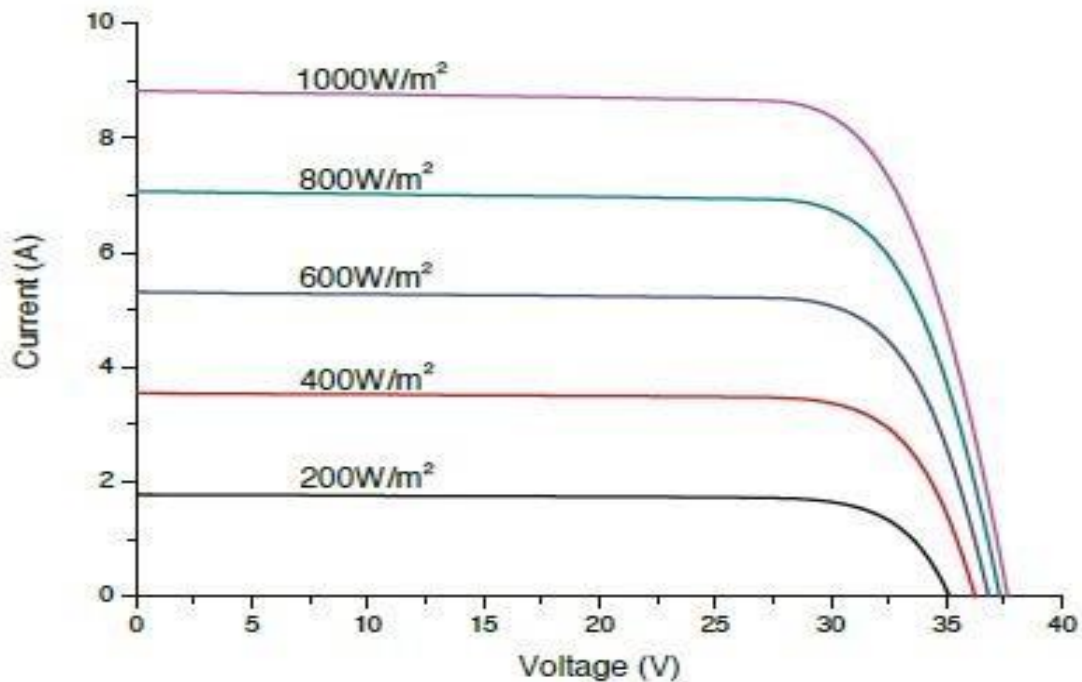
Τυπικές συνθήκες λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων (Nominal Operating Conditions).

- Θερμοκρασία αέρα (περιβάλλοντος),  $T_a=20$  °C.
- Ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας,  $I_T=800$  W/m<sup>2</sup>.
- Ταχύτητα ανέμου,  $u=1$  m/s.
- Προσανατολισμός προς Νότο,  $\omega=0$ .
- Μετρήσεις όταν ο ήλιος μεσουρανάει (AHX=12:00).
- Μετρήσεις υπό συνθήκες ανοικτού κυκλώματος.

Πρότυπες συνθήκες ελέγχου (Standard Test Conditions):

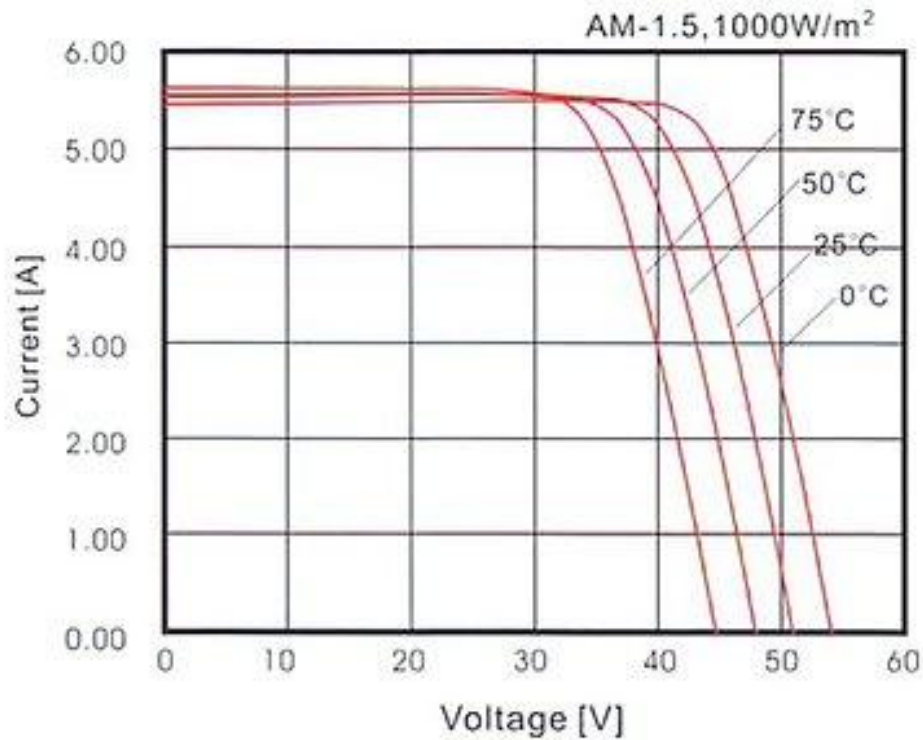
- Θερμοκρασία φωτοβολταϊκού πλαισίου,  $T_c=25^\circ\text{C}$ .
- Ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας,  $I_T=800\text{ W/m}^2$ .
- Αέριος μάζα,  $A.M=1,5$ .

Ένας από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Όταν αυξάνεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, αυξάνεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ , σχεδόν το διπλάσιο όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3, ενώ η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  αυξάνεται ελάχιστα. Τέλος, εφόσον μετατοπίζεται ολόκληρη η συνάρτηση, μεταβάλλεται και το σημείο μέγιστης ισχύος.



**Σχήμα 2.3:** Επίδραση ακτινοβολίας στην λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων.<sup>[23]</sup>

Επιπροσθέτως, η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου επηρεάζεται και από την θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται. Κατά την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στο φωτοβολταϊκό στοιχείο, ένα μέρος της μετατρέπεται σε θερμότητα και επιδρά στην απόδοση του πλαισίου. Ακόμη, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος επηρεάζει και αυτή με τη σειρά της την απόδοση του πλαισίου καθώς μεταβάλλει την θερμοκρασία του. Αυτό το φαινόμενο προκαλεί μεγάλη μείωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  και μικρή αύξηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.



**Σχήμα 2.4:** Επίδραση θερμοκρασίας λειτουργίας στην απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων.<sup>[24]</sup>

Ένα μέγεθος το οποίο χαρακτηρίζει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι ο συντελεστής πλήρωσης FF, ο οποίος αντικατοπτρίζει το ποσοστό κατά το οποίο ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο συμπεριφέρεται σαν μια πηγή συνεχούς ρεύματος. Οι τιμές του συντελεστή πλήρωσης είναι από 0 έως 1, μια καλή τιμή είναι από 0,7 και πάνω. Εξαρτάται από το υλικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου και τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Η τιμή του συντελεστή πλήρωσης προκύπτει από τον παρακάτω τύπο.

$$FF = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (2.1)$$

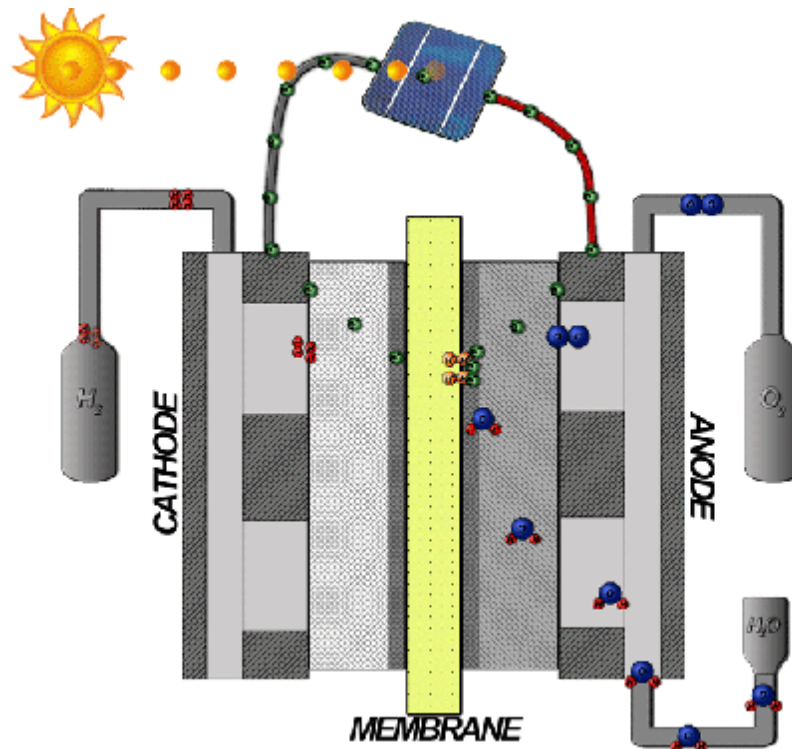
Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι η ενεργειακή απόδοση του. Εξαρτάται από το ρεύμα, την τάση που αντιστοιχούν στο σημείο μέγιστης ισχύος και από την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου, την ηλιακή ακτινοβολία. Όπως φαίνεται και από τον παρακάτω τύπο.

$$\eta_c = \frac{P_{mpp}}{P_{in}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{I_T \cdot A} \quad (2.2)$$



## 2.2 ΣΥΣΚΕΥΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ.

Σε αυτήν την πειραματική διάταξη ο τύπος της συσκευής ηλεκτρόλυσης που χρησιμοποιήθηκε για την διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο είναι ηλεκτρόλυση με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) (εικόνα 2.16). Στη συνέχεια αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας της.

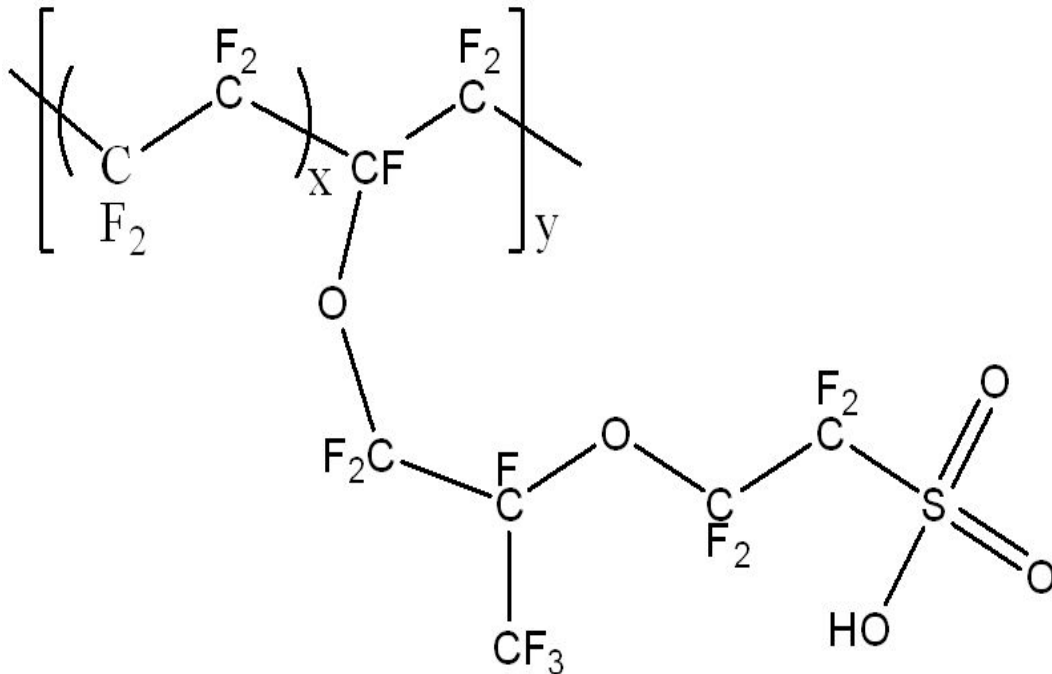


**Εικόνα 2.16:** Ηλεκτρόλυση με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων και πηγή ενέργειας τον ήλιο.<sup>[25]</sup>

### 2.2.1 Μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων για ηλεκτρόλυση του νερού (PEM).

Η ηλεκτρόλυση νερού με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων βασίζεται στη χρήση μιας πολυμερούς μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Η άνοδος του στοιχείου ηλεκτρόλυσης κατασκευάζεται από πορώδες τιτάνιο και ενεργοποιείται από έναν καταλύτη ο οποίος αποτελείται από ένα μείγμα οξειδίων ευγενών μετάλλων και τροφοδοτείται με καθαρό νερό. Μέσω της μεμβράνης η οποία είναι κατασκευασμένη από Nafion<sup>TM</sup> (εικόνα 2.17), τα πρωτόνια πηγαίνουν από την άνοδο προς την κάθοδο. Επίσης, με κατάλληλες διαδικασίες μπορεί να δημιουργηθεί χαμηλή ωμική αντίσταση που θα επιτρέπει στα στοιχεία να έχουν υψηλή πυκνότητα ρεύματος. Η κάθοδος αποτε-

λείται από ένα συλλέκτη ρεύματος κατασκευασμένο από ένα μικτό οξειδίο ή από πορώδη γραφίτη και λευκόχρυσο ως ηλεκτροκαταλύτη.



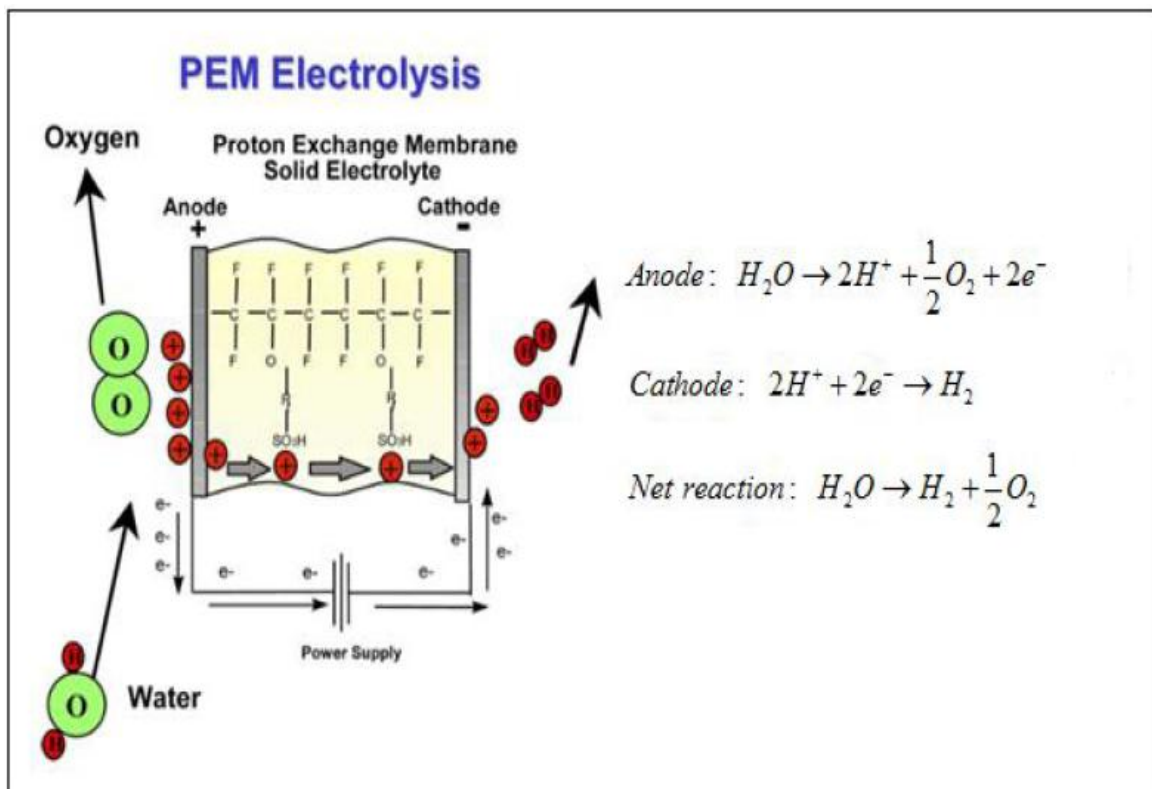
**Εικόνα 2.17:** Δομή του υλικού Nafion.<sup>[26]</sup>

Τα κελιά στοιχίζονται διπολικά με διαχωριστές γραφίτη και απαραίτητους αγωγούς για την διαφυγή των αερίων και την τροφοδοσία νερού. Η ροή του νερού γίνεται είτε από την κάθοδο είτε από την άνοδο. Η τεχνολογία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί από εμπορικές μονάδες για παραγωγή ενέργειας έως και 100 kW. Ένα σημαντικό μειονέκτημα που έχει αυτή η διαδικασία ηλεκτρόλυσης είναι η περιορισμένη διάρκεια ζωής των στοιχείων ηλεκτρόλυσης. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας των PEM ηλεκτρολυτών κυμαίνονται από 70-80 °C.

Είναι αποδεδειγμένο πως οι υπερφθοριωμένες μεμβράνες σουλφονικού οξέος, όπως το Nafion έχουν πολύ καλές ανθεκτικές ιδιότητες ως προς την οξειδωτική δράση του οξυγόνου και του όζοντος που αναπτύσσεται στις ανόδους. Το Nafion είναι ένα συμπολυμερές τετραφθοροαιθυλενίου και ενός υπερφθοριωμένο βίνυλοαιθεροσουλφοφθορίδιο. Το βίνυλοαιθεροσουλφοφθορίδιο είναι ένα μονομερές το οποίο έχει την ιδιότητα να δημιουργεί πλευρικές αλυσίδες με διακλαδώσεις σουλφονικού οξέος. Το συμπέρασμα που προέκυψε από διερευνήσεις σε διάφορες εφαρμογές για την μορφολογία του πολυμερούς και τις σχετικές ιδιότητες αυτών των μεμβρανών, είναι πως σε αυτά τα πολυμερή εμφανίζεται ο διαχωρισμός φάσεων.

Ουσιαστικά η PEM ηλεκτρόλυση είναι η αντίστροφη διαδικασία από αυτή που πραγματοποιείται σε μία PEM κυψέλη καυσίμου. Όπου το νερό διασπάτε σε οξυγόνο,

πρωτόνια και ηλεκτρόνια υπό την εφαρμογή μίας DC τάσης μεγαλύτερης από την θερμοουδέτερη τάση (1,482 V). Το οξυγόνο και το νερό που παράγονται και δεν συμμετέχουν στην αντίδραση συλλέγονται στο κανάλι ροής της ανόδου. Τα πρωτόνια διαπερνώντας τη μεμβράνη του πολυμερούς ηλεκτρολύτη και φτάνοντας στην κάθοδο συνδέονται με τα ηλεκτρόνια του εξωτερικού κυκλώματος με αποτέλεσμα τον σχηματισμό μορίων υδρογόνου, παράλληλα λαμβάνει χώρα το φαινόμενο μεταφοράς νερού. Στην παρακάτω εικόνα 2.18 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας ενός PEM ηλεκτρολύτη και οι εξισώσεις των αντιδράσεων.



**Εικόνα 2.18:** Αρχή λειτουργίας PEM ηλεκτρολύτη και χημικές αντιδράσεις.<sup>[27]</sup>

Η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος τάσης για κάθε κελί του ηλεκτρολύτη περιγράφεται μαθηματικά από τη παρακάτω μη γραμμική σχέση:

$$U_{cell} = U_{ref} + \frac{r_1 + r_2 \cdot T_{el}}{A} \cdot I_{el} + (S_1 + S_2 \cdot T_{el} + S_3 \cdot T_{el}^2) \cdot \log\left(\frac{t_1 + \frac{t_2}{T_{el}} + \frac{t_3}{T_{el}^2}}{A} \cdot I_{el} + 1\right) \quad (2.3)$$

Όπου:

$U_{cell}$  = η τάση στα άκρα του κάθε κελιού

$U_{ref}$  = η αναστρέψιμη τάση

$I_{el}$  = το ρεύμα που διαρρέει τα κελιά του ηλεκτρολύτη

$T_{el}$  = η θερμοκρασία λειτουργίας του ηλεκτρολύτη

$A$  = το εμβαδόν της επιφάνειας της ανόδου και της καθόδου

$r_1$  = οι παράμετροι ωμικής αντίστασης του ηλεκτρολύτη

$S_i, t_i$  = παράμετροι υπερδυναμικού στα ηλεκτρόδια

Οπότε, η τάση  $U_{el}$  στα άκρα του ηλεκτρολύτη υπολογίζεται από τον τύπο:

$$U_{el} = n_c \cdot U_{cell} \quad (2.4)$$

Όπου  $n_c$  ο αριθμός των εν σειρά συνδεδεμένων κελιών.

Παρατηρώντας τις παραπάνω εξισώσεις, φαίνεται πως ο ηλεκτρολύτης συμπεριφέρεται σαν ένα μεταβλητό μη γραμμικό αντιστάτη. Επίσης, οι μεταβολές της θερμοκρασίας επηρεάζουν τον τρόπο λειτουργίας του, μεταβάλλοντας τα υπερδυναμικά στα ηλεκτρόδια. Δηλαδή, η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί ελάττωση των υπερδυναμικών που σημαίνει ελάττωση και της τάσης λειτουργίας του κελιού. Υποθέτοντας ότι διατηρείται σταθερή η ισχύς εισόδου και μειώνοντας την τάση θα προκύψει αύξηση του ρεύματος λειτουργίας και κατ' επέκταση του ρυθμού παραγωγής υδρογόνου. Αυτό σημαίνει πως αυξάνοντας την θερμοκρασία βελτιώνεται η λειτουργική συμπεριφορά του ηλεκτρολύτη.

Η σχέση μεταξύ της παραγωγής υδρογόνου και της έντασης του ρεύματος λειτουργίας του ηλεκτρολύτη είναι ευθέως ανάλογη. Ο λόγος της πραγματικής ποσότητας του παραγόμενου υδρογόνου ως προς τη θεωρητική μέγιστη ποσότητα που μπορεί να παραχθεί, ορίζει τον βαθμό απόδοσης Faraday. Ο βαθμός απόδοσης Faraday μπορεί να μειωθεί λόγω απωλειών που οφείλονται σε παρασιτικά ρεύματα κατά μήκος των αγωγών των αερίων. Τα παρασιτικά αυτά ρεύματα αυξάνονται καθώς μειώνεται η πυκνότητα του ρεύματος που διαρρέει τον ηλεκτρολύτη που οφείλεται στην αύξηση της ενεργούς επιφάνειας του αγώγιμου διαλύματος και κατ' επέκταση την ελάττωση της ηλεκτρικής αντίστασης. Επιπλέον, η ένταση των παρασιτικών ρευμάτων σε κάθε κελί είναι ανάλογη της τάσης του κελιού, οπότε και ο λόγος των παρασιτικών ρευμάτων ως προς το ολικό ρεύμα του ηλεκτρολύτη αυξάνεται όσο μικραίνει η πυκνότητα του ρεύματος. Επίσης, η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της αντίστασης του διαλύματος, που σημαίνει μεγαλύτερες απώλειες παρασιτικών ρευμάτων, δηλαδή μικρότερο βαθμό απόδοσης Faraday.

Ο βαθμός απόδοσης Faraday περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\eta_F = \frac{\left(\frac{I_{el}}{A}\right)^2}{f_1 + \frac{I_{el}}{A}} \cdot f_2 \quad (2.5)$$

Όπου  $f_1$  και  $f_2$  παράμετροι εξαρτώμενοι από την θερμοκρασία:

$$f_1 = 2,5 \cdot T_{el} + 50 \quad (2.6)$$

$$f_2 = -0,00075 \cdot T_{el} + 1 \quad (2.7)$$

Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday ο ρυθμός παραγωγής υδρογόνου είναι ευθέως ανάλογος με το ρυθμό μεταφοράς των ηλεκτρονίων στα ηλεκτρόδια, με άλλα λόγια του ρεύματος που ρέει από το εξωτερικό κύκλωμα.

## 2.3 ΔΟΧΕΙΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΑΕΡΙΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ-ΟΞΥΓΟΝΟΥ.

### 2.3.1 Γενικά για την αποθήκευση του υδρογόνου.

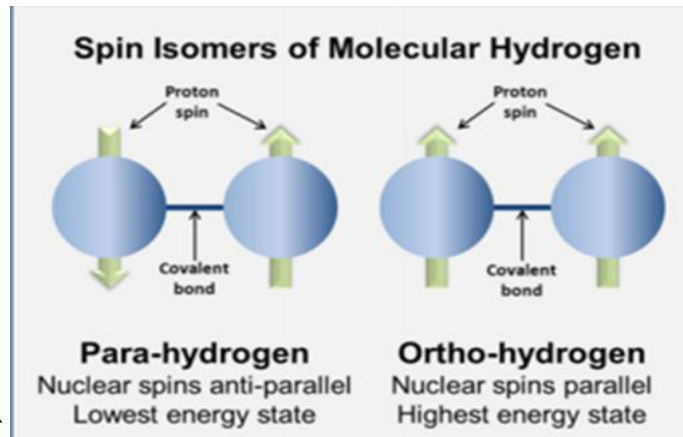
Το υδρογόνο μέχρι στιγμής παράγεται σε μικρές ποσότητες και καταναλώνεται άμεσα από την στιγμή παραγωγής του, αυτός είναι ο λόγος που δεν υπάρχουν μεγάλα αποθηκευτικά μέσα για το υδρογόνο π.χ. μεγάλες δεξαμενές αποθήκευσης όπως η βενζίνη.

Για να αναλυθεί σε βάθος η αποθήκευση του υδρογόνου θα πρέπει πρώτα να αναλυθούν οι μαγνητικές, φυσικές, χημικές ιδιότητες του και οι κίνδυνοι που προκύπτουν από την αποθήκευση και την χρήση του υδρογόνου.

### 2.3.2 Μαγνητικές ιδιότητες.

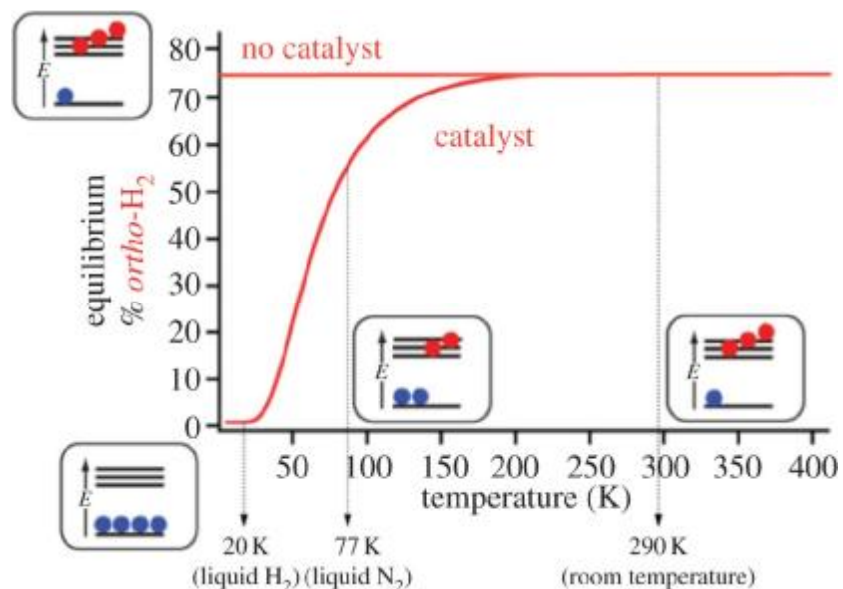
Το υδρογόνο ανάλογα με τις συνθήκες που βρίσκεται παρουσιάζει διαφορετική μορφή και ιδιότητες. Όταν βρίσκεται σε κανονικές συνθήκες ( $P=1 \text{ atm}$ ,  $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), το αέριο υδρογόνο αποτελείται από δύο διαφορετικές φυσικές καταστάσεις, το παραυδρογόνο π- $\text{H}_2$  και το ορθοϋδρογόνο ο- $\text{H}_2$ , σε ποσοστό 25% και 75% αντίστοιχα. Η μόνη διαφορά που έχουν είναι ότι τα πρωτόνια στον πυρήνα των δύο ατόμων που αποτελούν κάθε μοριακή κατάσταση περιστρέφονται διαφορετικά (εικόνα 2.19), γεγονός που τους δίνει διαφορετικές μαγνητικές ιδιότητες.

Τα πρωτόνια στο ορθοϋδρογόνο περιστρέφονται παράλληλα με spin 1, ενώ στο ορθοϋδρογόνο αντιπαράλληλα με spin 0 καθώς εξουδετερώνονται οι αντίρροπες μαγνητικές δυνάμεις τους. Επομένως το ορθοϋδρογόνο έχει μικρές μαγνητικές δυνάμεις, ενώ το παραυδρογόνο δεν έχει καθόλου. Επίσης το ορθοϋδρογόνο έχει μεγαλύτερη ενέργεια από το παραυδρογόνο.



**Εικόνα 2.19:** Άτομα παραϋδρογόνου και ορθοϋδρογόνου που συγκρατούνται από έναν ομοιοπολικό δεσμό.<sup>[28]</sup>

Όταν βρίσκεται σε υγρή κατάσταση το υδρογόνο σε θερμοκρασία μικρότερη των 20,28 K αποτελείται από 99,79% παραϋδρογόνο και 0,21% ορθοϋδρογόνο. Σε θερμοκρασία  $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  το υδρογόνο αποτελείται 100% από παραϋδρογόνο. Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται το ποσοστό του ορθοϋδρογόνου (άρα και του παραϋδρογόνου) που περιέχεται στο υδρογόνο ανάλογα με την θερμοκρασία που βρίσκεται αυτό. Όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα του υδρογόνου σε ορθοϋδρογόνο, τόσο αυξάνεται και η ενεργειακή πυκνότητα του υδρογόνου, μέχρι να φτάσει σε ποσοστό 75%, εφόσον το ορθοϋδρογόνο περιέχει υψηλότερα ποσά ενέργειας από ότι το παραϋδρογόνο (100-ορθοϋδρογόνο).

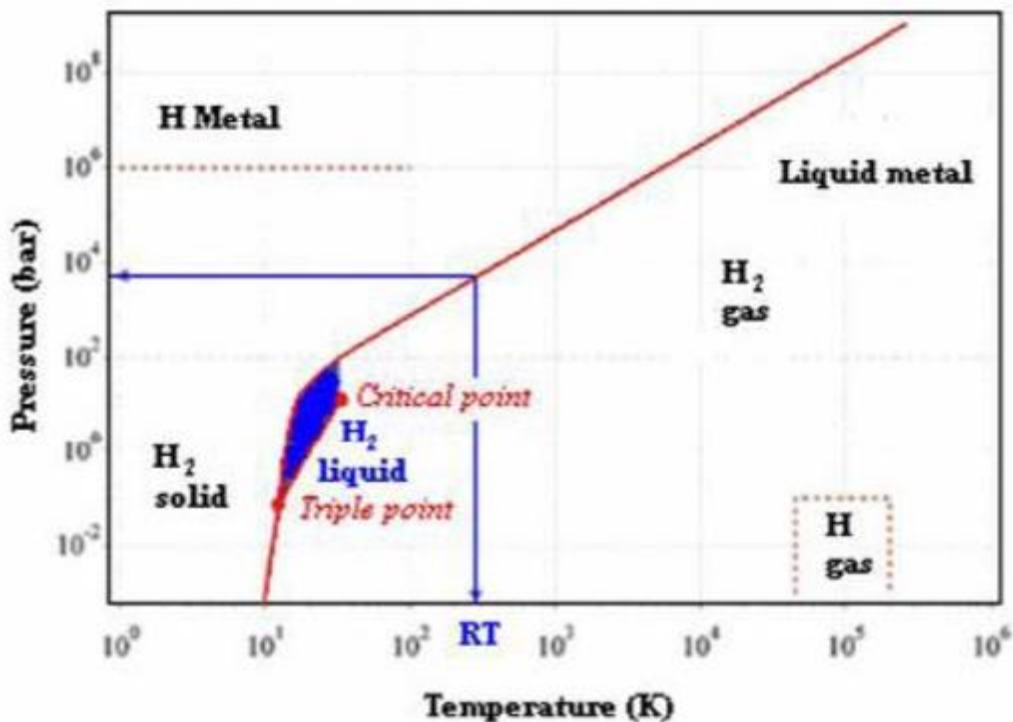


**Σχήμα 2.5:** Ποσοστό περιεκτικότητας υδρογόνου σε ορθοϋδρογόνο ανάλογα με την θερμοκρασία.<sup>[29]</sup>

Όταν το υδρογόνο ψύχεται και βρίσκεται στην αέρια κατάσταση, όπου περιέχει 75% ο-H<sub>2</sub> και 25% n-H<sub>2</sub>, τότε αυξάνεται η περιεκτικότητα του σε παραϋδρογόνο n-H<sub>2</sub> και μειώνεται η περιεκτικότητά του σε ορθοϋδρογόνο ο-H<sub>2</sub>. Τα πρωτόνια στον πυρήνα αρχίζουν να επιβραδύνονται και να περιστρέφονται αντιπαράλληλα, με αργό ρυθμό, λόγω της ψύξης.

### 2.3.3 Φυσικές ιδιότητες.

Το αέριο υδρογόνο παρουσιάζει ιδιόμορφες φυσικές ιδιότητες και οι καταστάσεις της ύλης (μεταλλικό, στερεό, υγρό, αέριο, υγρό μεταλλικό) στις οποίες μπορεί να βρίσκεται είναι σε μεγάλο εύρος θερμοκρασίας και πίεσης. Οι ιδιότητες ενός στοιχείου διαφέρουν σε κάθε κατάσταση της ύλης (σχήμα 2.6) και εξαρτώνται από την πίεση και την θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



Σχήμα 2.6: Διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων της ύλης του υδρογόνου.<sup>[30]</sup>

Όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος του υδρογόνου είναι από 10<sup>6</sup> K μέχρι 20,39 K, τότε το υδρογόνο βρίσκεται στην αέρια κατάσταση. Αν μειωθεί κι άλλο η θερμοκρασία κάτω από τους 20,39 K, τότε το υδρογόνο υγροποιείται και παραμένει στην υγρή κατάσταση μέχρι τους 14 K. Κατά την περαιτέρω ψύξη του υδρογόνου (10 K < T < 14 K) λίγο πριν μορφοποιηθεί σε στερεό, πριν σχηματιστεί το κρυσταλλικό πλέγμα του στερεού υδρογόνου, βρίσκεται στην μορφή ζελέ. Αυτό το ζελέ έχει μεγαλύτερη πυκνό-

τητα από το υγρό υδρογόνο κι έτσι χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας σε διαστημικούς πυραύλους και σε διαστημικές εξερευνήσεις γενικότερα. Στο τριπλό σημείου που αναγράφεται στο διάγραμμα, το υδρογόνο βρίσκεται σε στερεή, αέρια, υγρή μορφή ταυτόχρονα, σε θερμοκρασία  $T=13,8\text{ K}$  και σε πίεση  $P=0,071\text{ bar}$ .

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6 υπάρχουν άλλες δύο καταστάσεις της ύλης για το υδρογόνο, το μεταλλικό υδρογόνο και το υγρό μεταλλικό υδρογόνο. Αυτές οι καταστάσεις της ύλης υπάρχουν θεωρητικά σε μεγάλες πιέσεις πάνω από  $10^6\text{ bar}$ , όπου το υδρογόνο παρουσιάζει ιδιότητες των μετάλλων. Στην ουσία, αυξάνεται η αγωγιμότητα του υδρογόνου στον ηλεκτρισμό και στην θερμότητα. Αυτή η κατάσταση της ύλης του υδρογόνου μπορεί να υπάρχει φυσικά σε άλλους πλανήτες όπου η πίεση είναι πολύ μεγάλη ή τεχνητά σε εργαστηριακές συνθήκες που είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί τόσο υψηλή πίεση και αν γινόταν θα είχε μικρή διάρκεια. Αυτή η κατάσταση του μεταλλικού υδρογόνου έχει επιτευχθεί στο παρελθόν σε εργαστηριακές συνθήκες, από μια ομάδα επιστημών στο Lawrence Livermore National Laboratory. Υπέθεσαν ότι όταν η πίεση του περιβάλλοντος είναι και παράγεται μεταλλικό υδρογόνο, όταν βρεθεί σε περιβάλλον με κανονικές συνθήκες θα παραμείνει στην μεταλλική κατάσταση εν μέρει. Το πείραμα διήρκεσε  $1\text{ }\mu\text{s}$  και αποδείχθηκε η ύπαρξη μεταλλικού υδρογόνου, ωστόσο δεν αποδείχθηκε αν η υπόθεση ήταν σωστή.

#### 2.3.4 Χημικές ιδιότητες.

Το υδρογόνο στην ατομική του μορφή ως  $\text{H}$  έχει μια στοιβάδα που αποτελείται από ένα ηλεκτρόνιο. Οι πιθανές αντιδράσεις που θα μπορούσαν να συμβούν είναι τρεις, καθώς η πρώτη στοιβάδα ηλεκτρονίων οποιουδήποτε ατόμου μπορεί να έχει μέχρι δύο ηλεκτρόνια. Στην πρώτη περίπτωση, το υδρογόνο χάνει το μοναδικό ηλεκτρόνιο που έχει στην εξωτερική του στοιβάδα και φορτίζεται θετικά. Στην δεύτερη περίπτωση το άτομο του υδρογόνου προσλαμβάνει ένα ηλεκτρόνιο στην εξωτερική του στοιβάδα και φορτίζεται αρνητικά. Στην τρίτη περίπτωση το άτομο του υδρογόνου σχηματίζει χημικό δεσμό με ένα άλλο άτομο μεταλλικό ή μη (αλογόνο, άνθρακας, υδρογόνο, άζωτο κ.α.).

Όταν ενωθεί με άλλο άτομο υδρογόνου δεν παρουσιάζει πολικότητα, καθώς έχουν ίδιο αριθμό ηλεκτρονίων, όμως όταν ενωθεί με οποιοδήποτε άλλο άτομο αποκτάει. Όταν ενώνεται με αλκαλικά μέταλλα όπως λίθιο  $\text{Li}$ , βάριο  $\text{Ba}$ , κάλλιο  $\text{K}$  ή με μεταλλικές γαίες όπως βηρύλλιο  $\text{Be}$ , μαγνήσιο  $\text{Mg}$ , ασβέστιο  $\text{Ca}$ , τότε προκύπτουν οι χημικές ενώσεις που ονομάζονται άλατα. Το υδρογόνο μπορεί να ενωθεί με ομοιοπολικούς ή με ετεροπολικούς δεσμούς και το μέγεθος της ηλεκτραρνητικότητας του έχει τιμή 2,2 Pauling. Η τιμή αυτή υποδεικνύει το μέγεθος της ελκτικής δύναμης που ασκούν τα πρωτόνια, που βρίσκονται στον πυρήνα του ατόμου του υδρογόνου, στα ηλεκτρόνια τα οποία απαρτίζουν τις στοιβάδες του ή σε ηλεκτρόνια άλλων ατόμων και παίρνει τιμές που ανήκουν στο διάστημα  $[0,7-4]$ , οπότε το υδρογόνο έχει μια μέτρια ελκτική δύναμη.

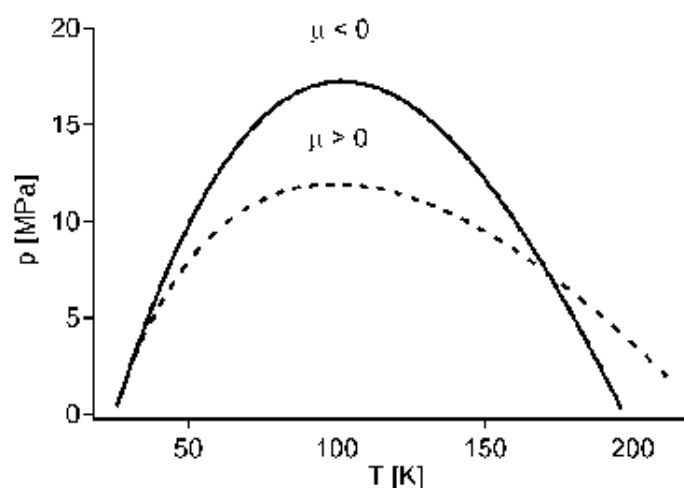
Η πυκνότητα του υδρογόνου είναι πολύ μικρή (περίπου  $0.0899\text{ kg/m}^3$  σε θερμοκρασία  $0\text{ }^\circ\text{C}$  όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6) και πρέπει να φτάσει σε υψηλές πιέσεις για να αυξηθεί η πυκνότητά του π.χ. σε πίεση  $1,00\text{ bar}$  η πυκνότητά του είναι  $10$



$\text{kg/m}^3$  (πίνακας 2.1). Για να έχει μεγάλη πυκνότητα θα πρέπει να βρίσκεται σε αέρια μορφή σε μεγάλες πιέσεις ή σε υγρή μορφή. Είναι πιο εύκολο ενεργειακά και πιο οικονομικό να μετατραπεί το αέριο υδρογόνο σε υγρό παρά να συμπιεστεί το αέριο υδρογόνο ώστε να φτάσει σε μεγάλη πυκνότητα. Στον πίνακα 2.1 αναφέρεται η πυκνότητα του υγρού υδρογόνου στο σημείο βρασμού ότι είναι  $71 \text{ kg/m}^3$  και στον πίνακα 2.1 αναφέρεται η πυκνότητα του πραγματικού αερίου υδρογόνου  $50 \text{ kg/m}^3$ , που είναι η μέγιστη τιμή πραγματικού αερίου ανεξαρτήτως του είδους των μοριακών δεσμών των ατόμων του υδρογόνου. Επίσης στον πίνακα 2,1 αναφέρεται η πυκνότητα του αερίου υδρογόνου στο σημείο βρασμού που είναι  $1,34 \text{ kg/m}^3$ .

Το υδρογόνο έχει τον υψηλότερο συντελεστή και ταχύτητα διάχυσης από όλα τα αέρια και όταν ελευθερωθεί σε περιβάλλον ανεβαίνει προς τα πάνω. Αυτό οφείλεται στην μικρή πυκνότητα του, όταν βρίσκεται σε αέρια μορφή και σε θερμοκρασία δωματίου  $298 \text{ K}$  (πίνακας 2.1) είναι ελαφρύτερο από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Γι' αυτό το λόγο όταν υπάρξει διαρροή σε μέσα αποθήκευσης αερίου υδρογόνου, που βρίσκεται σε κανονικές συνθήκες, τότε το αέριο υδρογόνο διαφεύγει και απελευθερώνεται προς το περιβάλλον. Το ποσοστό και η ταχύτητα διάχυσης εξαρτώνται επίσης και από την διατομή της διαρροής και την πίεση του περιβάλλοντος, αν έχει μεγάλη διαφορά με την πίεση του υδρογόνου τότε αυτό θα διαφύγει πιο γρήγορα. Αν το αποθηκευτικό μέσο αποτελείται από συγκεκριμένα υλικά όπως σίδηρο, πλατίνα κ.α. τότε το υδρογόνο έχει πολύ υψηλή ικανότητα διάχυσης, καθώς τα μέταλλα αυτά είναι πιο εύθραυστα λόγω του υδρογόνου. Όταν το υδρογόνο έχει μεγάλη διαλυτότητα σε μέταλλα όπως το παλλάδιο, τότε το υδρογόνο διαπερνά εύκολα το μέταλλο και απελευθερώνεται.

Παρουσιάζει το αντίστροφο φαινόμενο Joule-Thomson, κατά το οποίο όταν ρευστά εκτονώνονται, μικραίνει η πίεση τους και ψύχονται ενώ όταν συμπιέζονται, θερμαίνονται. Το υδρογόνο κάτω από τους  $100 \text{ K}$  συμπεριφέρεται σαν όλα τα υπόλοιπα αέρια, ενώ πάνω από τους  $100 \text{ K}$  αντιστρέφεται το φαινόμενο και όταν εκτονώνεται, αυξάνεται η θερμοκρασία του (σχήμα 2.7).



**Σχήμα 2.7:** Φαινόμενο Joule Thomson του υδρογόνου.<sup>[30]</sup>

	p-H <sub>2</sub>	n-H <sub>2</sub>
<b>Liquid phase at boiling point</b>		
Density [kg·m <sup>-3</sup> ]	70.78	70.96
Specific heat capacity c <sub>p</sub> [J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	19.70	19.7
Specific heat capacity c <sub>v</sub> [J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	11.60	11.6
Enthalpy DH <sup>0</sup> [J·mol <sup>-1</sup> ]	-516.6	-548.3
Entropy DS <sup>0</sup> [J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	16.08	34.92
Viscosity [mPa·s]	13.2·10 <sup>-3</sup>	13.3·10 <sup>-3</sup>
Velocity of sound [m s <sup>-1</sup> ]	1089	1101
Thermal conductivity [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	98.92·10 <sup>-3</sup>	100·10 <sup>-3</sup>
Compressibility factor	0.01712	0.01698
<b>Vapor phase at boiling point</b>		
Density [kg·m <sup>-3</sup> ]	1.338	1.331
Specific heat capacity c <sub>p</sub> [J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	24.49	24.60
Specific heat capacity c <sub>v</sub> [J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	13.10	13.2
Enthalpy DH <sup>0</sup> [J·mol <sup>-1</sup> ]	381.61	1447.4
Entropy DS <sup>0</sup> [J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	60.41	78.94
Viscosity [mPa·s]	1.13·10 <sup>-3</sup>	1.11·10 <sup>-3</sup>
Velocity of sound [m s <sup>-1</sup> ]	355	357
Thermal conductivity [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	16.94·10 <sup>-3</sup>	16.5·10 <sup>-3</sup>
Compressibility factor	0.906	0.906
<b>Critical point</b>		
Temperature [K]	32.976	33.19
Pressure [MPa]	1.29	1.325
Density [kg·m <sup>-3</sup> ]	31.43	30.12
<b>Properties at STP (T = 273.15 K, p = 101.3 kPa)</b>		
Density [kg·m <sup>-3</sup> ]	0.0899	0.0899
Specific heat capacity c <sub>p</sub> [J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	30.35	28.59
Specific heat capacity c <sub>v</sub> [J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	21.87	20.3
Viscosity [mPa·s]	8.34·10 <sup>-3</sup>	8.34·10 <sup>-3</sup>
Velocity of sound [m s <sup>-1</sup> ]	1246	1246
Thermal conductivity [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	182.6·10 <sup>-3</sup>	173.9·10 <sup>-3</sup>
Dielectric constant	1.00027	1.000271
Compressibility factor	1.0005	1.00042
Prandtl number	0.6873	0.680

Πίνακας 2.1: Φυσικές ιδιότητες παραϋδρογόνου(p-H<sub>2</sub>) και ορθοϋδρογόνου(n-H<sub>2</sub>).<sup>[30]</sup>

### 2.3.5 Κίνδυνοι υδρογόνου.

Όταν το υδρογόνο βρίσκεται σε κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος ( $P=1 \text{ bar}$ ,  $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) είναι σε αέρια κατάσταση και εμφανίζει κάποιες χαρακτηριστικές ιδιότητες:

- Είναι εξαιρετικά εύφλεκτο αν αναμειχθεί με τον ατμοσφαιρικό αέρα .
- Δεν έχει χρώμα και δεν είναι αντιληπτό με γυμνό μάτι.
- Δεν έχει χαρακτηριστική/αντιληπτή οσμή.
- Είναι επικίνδυνο αν το εισπνεύσεις σε μεγάλη συγκέντρωση στον ατμοσφαιρικό αέρα, θα πάθεις ασφυξία.
- Δεν διαβρώνει τις επιφάνειες με τις οποίες έρχεται σε επαφή.
- Ανήκει στην κατηγορία των αμέταλλων, εφόσον είναι κακοί αγωγοί της θερμότητας και του ηλεκτρισμού.
- Αναφλέγεται από μόνο του σε θερμοκρασία  $572 \text{ }^\circ\text{C}$  και η φλόγα του δεν έχει χρώμα.
- Είναι πολύ ελαφρύ σε σχέση με τον ατμοσφαιρικό αέρα, με σχετική πυκνότητα 0.07. Αυτό σημαίνει ότι είναι κατά 93% πιο ελαφρύ από τον αέρα.
- Μπορεί να αναφλεχθεί όταν βρίσκεται σε ποσοστό 4-75% στον ατμοσφαιρικό αέρα σε θερμοκρασία δωματίου (πίνακας 2.2).
- Μπορεί να αναφλεχθεί όταν βρίσκεται σε ποσοστό 4.7-93,9% σε καθαρό οξυγόνο, σε θερμοκρασία δωματίου (πίνακας 2.2).

Το υδρογόνο όταν βρίσκεται σε περιβάλλον με υψηλή θερμοκρασία και με την παρουσία οξειδωτικών μέσων, όπως το οξυγόνο που περιέχεται στον ατμοσφαιρικό αέρα, αναφλέγεται και αν έχει μεγάλη συγκέντρωση στο περιβάλλον αυτό εκρήγνυται. Χρειάζεται να έχει 4-75% συγκέντρωση στον ατμοσφαιρικό αέρα για να συμβεί αυτό. Αν προέρχεται από διαρροή σε κάποιο μέσο αποθήκευσης, τότε μπορεί στο σημείο διαρροής εφόσον έχει μεγάλη συγκέντρωση το υδρογόνο να ενωθεί με το οξυγόνο και να δημιουργηθεί εύφλεκτο μείγμα. Αν υπάρξει αιτία ανάφλεξης του εύφλεκτου μείγματος, τότε θα γίνει έκρηξη στο σημείο διαρροής. Ακόμα και να υπάρξει ανάφλεξη όμως δεν θα γίνει αντιληπτό λόγω της φλόγας του υδρογόνου εφόσον είναι αόρατη. Για να γίνει ανάφλεξη θα πρέπει να υπάρχει το εύφλεκτο υδρογόνο, το οξυγόνο και το αίτιο ανάφλεξης. Αν λείπει κάποιο στοιχείο από τα τρία δεν μπορεί να εκδηλωθεί έκρηξη.

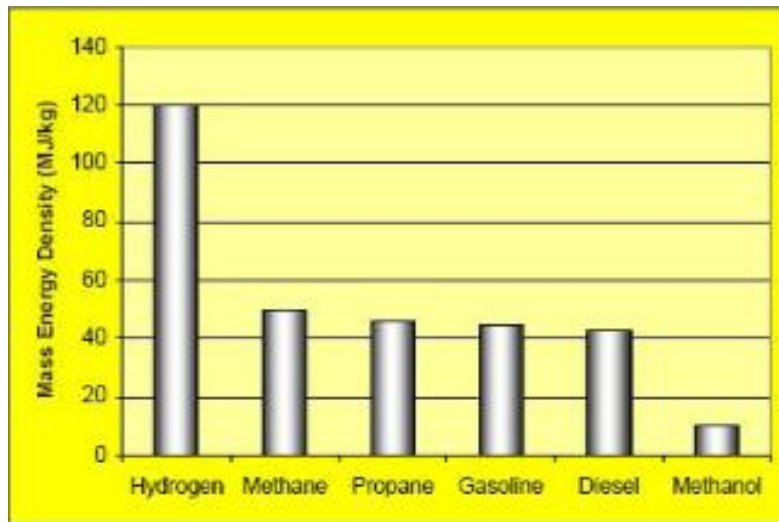
Μια ιδιαιτερότητα του υδρογόνου είναι ότι παρουσιάζει μεγάλο βαθμό και ταχύτητα διάχυσης, όταν απελευθερώνεται στο περιβάλλον κι έτσι αν υπάρχει διαρροή υδρογόνου σε μία δεξαμενή τότε αυτό θα διαφύγει πολύ γρήγορα στο περιβάλλον, θα αναμειχθεί με τον ατμοσφαιρικό αέρα και η δεξαμενή θα αδειάσει ενώ δεν θα το καταλάβει κανείς εφόσον το υδρογόνο είναι άχρωμο και άοσμο. Αν το περιβάλλον στο οποίο θα απελευθερωθεί το υδρογόνο είναι κλειστός χώρος τότε υπάρχει κίνδυνος ασφυξίας αν έχει μεγάλη συγκέντρωση και αραιώσει πολύ τον αέρα. Σε συγκέντρωση 30% κατά όγκο στον αέρα το υδρογόνο οδηγεί σε δυσκολία αναπνοής, μείωση αντιδράσεων και αισθήσεων και μυϊκή αδυναμία. Σε 50% κατά όγκο στον ατμοσφαιρικό αέρα το υδρογόνο προκαλεί απώλεια αισθήσεων, ασφυξία.

	Hydrogen
Density of gas at standard conditions [ $\text{kg/m}^3(\text{STP})$ ]	0.084
Heat of vaporisation [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	445.6
Lower heating value [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	$119.93\cdot 10^3$
Higher heating value [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	$141.8\cdot 10^3$
Thermal conductivity of gas at standard conditions [ $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]	1.897
Diffusion coefficient in air at standard conditions [ $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ]	0.61
Flammability limits in air [vol%]	4.0- 75
Detonability limits in air [vol%]	18.3-59
Limiting oxygen index [vol%]	5
Stoichiometric composition in air [vol%]	29.53
Minimum energy for ignition in air [mJ]	0.02
Autoignition temperature [K]	858
Flame temperature in air [K]	2318
Maximum burning velocity in air at standard conditions [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	3.46
Detonation velocity in air at standard conditions [ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	1.48-2.15
Energy <sup>d</sup> of explosion, mass-related [gTNT/g]	24
Energy <sup>d</sup> of explosion, volume-related [ $\text{gTNT}\cdot\text{m}^3(\text{STP})$ ]	2.02

**Πίνακας 2.2:** Ιδιότητες υδρογόνου σχετικά με την ανάφλεξη του.<sup>[30]</sup>

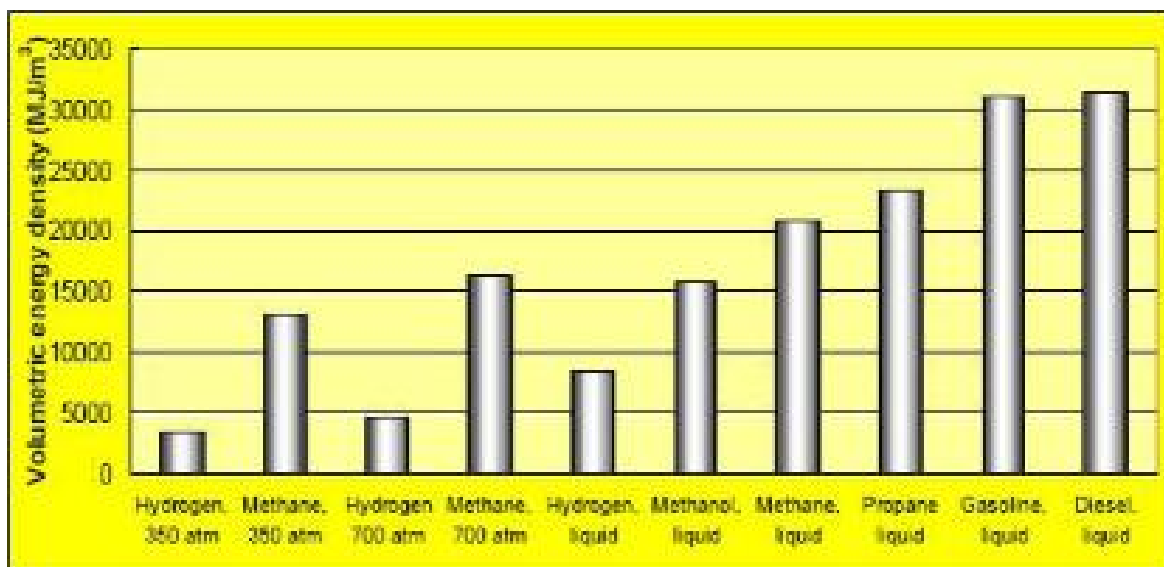
### 2.3.6 Αποθήκευση υδρογόνου.

Ο λόγος που χαρακτηρίζεται ως το καύσιμο του μέλλοντος είναι ότι σε σχέση με άλλα καύσιμα αυτό έχει την μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας ανά κιλό ονομαζόμενη ενεργειακή πυκνότητα (σχήμα 2.8), άλλωστε είναι και η πηγή ενέργειας του ηλίου που αποτελεί το μεγαλύτερο ενεργειακό φορέα του πλανήτη.



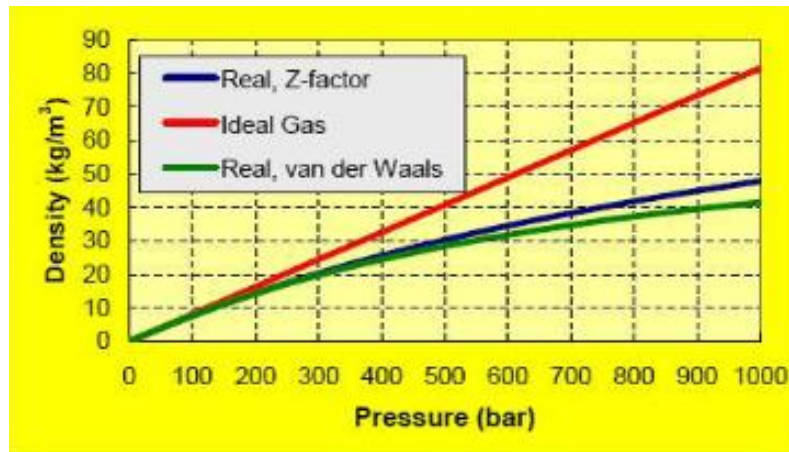
Σχήμα 2.8: Ενεργειακή πυκνότητα του υδρογόνου συγκρινόμενο με άλλα καύσιμα.<sup>[31]</sup>

Είναι πολύ δύσκολο να αποθηκευτεί, καθώς λόγω της πολύ μικρής ογκομετρικής ενεργειακής πυκνότητάς του, ενέργεια ανά μονάδα όγκου (σχήμα 2.9), θα πρέπει αν βρίσκεται σε μορφή αερίου, να υγροποιηθεί ή να συμπιεστεί σε υψηλή πίεση ώστε να αξιοποιηθεί ο αποθηκευτικός χώρος κατά το μέγιστο.



Σχήμα 2.9: Ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα καυσίμων.<sup>[31]</sup>

Επίσης η πυκνότητα του υδρογόνου επηρεάζεται από την πίεση στην οποία βρίσκεται όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10 και επηρεάζεται ανάλογα με την φυσική μορφή που βρίσκεται όπως ιδανικό αέριο (θεωρητική κατάσταση, κόκκινη συνάρτηση), πραγματικό αέριο με απόκλιση από την ιδανική κατάσταση που εκφράζεται από τον συντελεστή Z (μπλε συνάρτηση), πραγματικό αέριο που τα μόρια του συνδέονται με δεσμούς Van der Waals (πράσινη συνάρτηση).



**Σχήμα 2.10:** Πυκνότητα υδρογόνου σε σχέση με την πίεση του και την φυσική μορφή του.<sup>[31]</sup>

Για την αποθήκευση του χρησιμοποιούνται μικρής κλίμακας αποθηκευτικά μέσα, όπως μικρές φιάλες αερίου υδρογόνου υψηλής πίεσης σε πρατήρια ώστε να ανεφοδιάζουν τα οχήματα που λειτουργούν με συμπιεσμένο αέριο ή υγρό υδρογόνο. Τέτοια μέσα είναι:

- Δεξαμενή από συμπαγή μέταλλα για αέριο υδρογόνο.
- Δεξαμενή από μέταλλο μαζί με υλικό GRP/CFK για αέριο υδρογόνο.
- Μεταλλικό δοχείο με εξωτερικό στρώμα υλικού CFK για αέριο υδρογόνο.
- Το εσωτερικό δοχείο φτιαγμένο από συμπαγές πλαστικό και εξωτερικά CFK για αέριο υδρογόνο.
- Κρυογονικές δεξαμενές για υγρό υδρογόνο.
- Προσροφημένο σε στερεά υλικά, σαν υγρό ή αέριο, τα οποία απορροφούν το υδρογόνο σαν σφουγγάρι.
- Δεσμευμένο σαν αέριο από διάφορα μέταλλα στο κρυσταλλικό τους πλέγμα.
- Δεσμευμένο με ιοντικούς ή ομοιοπολικούς δεσμούς από διάφορες χημικές ενώσεις.
- Δεξαμενές αποθήκευσης για στερεό υδρογόνο.

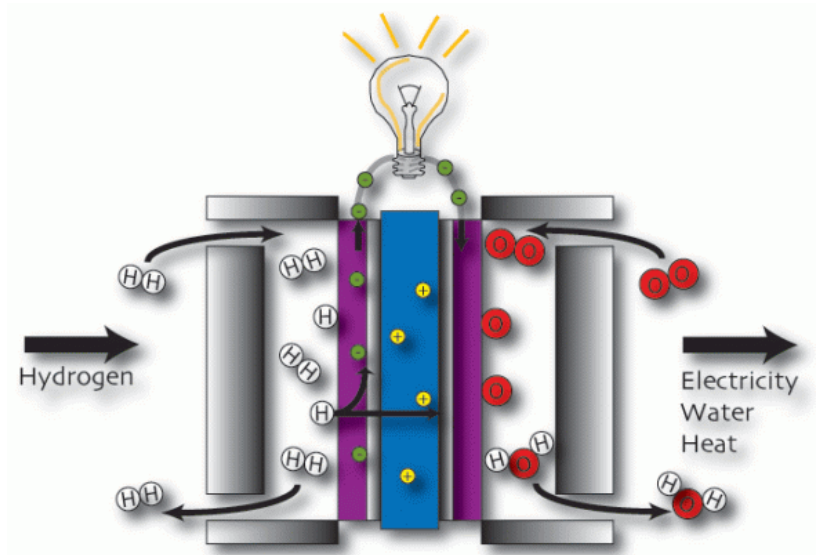
Η μεταφορά μεγάλης ποσότητας υδρογόνου σε μεγάλες αποστάσεις γίνεται στην μορφή αερίου μέσω ειδικών αγωγών, όπως τα δίκτυα υγραερίου και φυσικού αερίου, ως

100% υδρογόνο ή με μικρές ποσότητες άλλων αερίων στην σύστασή του. Στα πρατήρια καυσίμων, μεταφέρεται υδρογόνο σε αέρια ή υγρή μορφή με βυτιοφόρα οχήματα ή τα ίδια τα πρατήρια είναι εξοπλισμένα με αναμορφωτή αερίου ή ηλεκτρολυτική μονάδα και παράγουν επί τόπου αέριο υδρογόνο. Στην δεύτερη περίπτωση βέβαια θα πρέπει να υπάρχουν μέσα συμπίκνωσης και αποθηκευτικά μέσα για το υδρογόνο στα πρατήρια καυσίμων κι έτσι σε βάθος χρόνου υπάρχει κέρδος στην επιχείρηση απ' ότι να αγόραζε υδρογόνο από ιδιώτη.

## 2.4 ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.

### 2.4.1 Εισαγωγή και ιστορική αναδρομή για την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου.

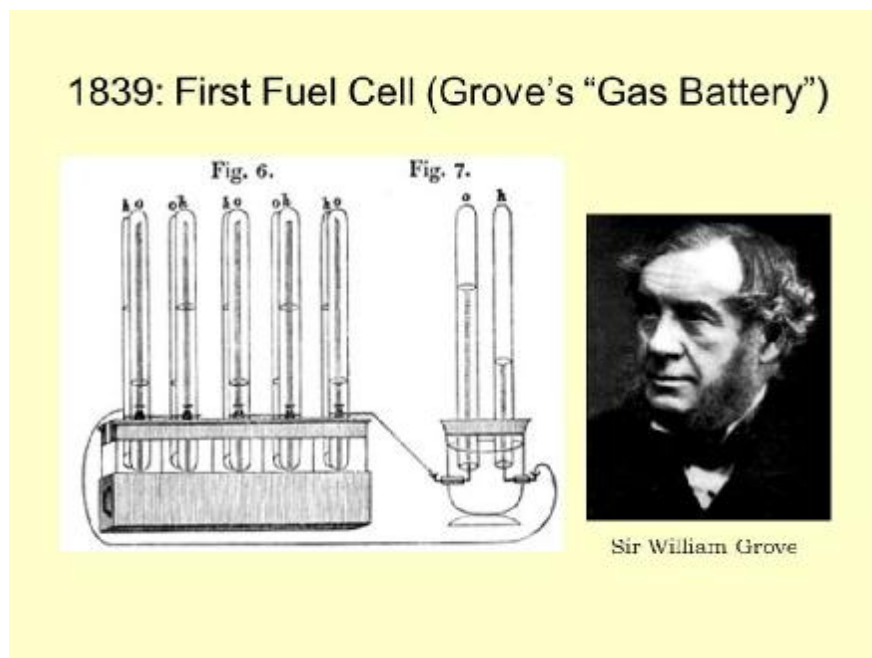
Η κυψέλη καυσίμου είναι ένας ηλεκτροχημικός μετατροπέας που μετατρέπει απευθείας την χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρική παράγοντας συνεχή ηλεκτρική τάση. Τις περισσότερες φορές, η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από καύσιμα πραγματοποιείται σε περισσότερα από ένα στάδια ενεργειακών μετατροπών. Όπως είναι η μετατροπή της χημικής ενέργειας σε θερμότητα μέσω της καύσης παράγοντας έτσι ατμό υψηλής πίεσης, ο οποίος θέτει σε κίνηση έναν στρόβιλο και αυτός με την σειρά του περιστρέφει μια ηλεκτρική γεννήτρια. Δηλαδή γίνεται η μετατροπή της χημικής ενέργειας σε θερμική, μηχανική και τέλος ηλεκτρική. Η κυψέλη καυσίμου παρακάμπτει τα παραπάνω στάδια, αφού παράγει ηλεκτρική ενέργεια απευθείας, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 2.1.



**Εικόνα 2.20:**Απευθείας παραγωγή συνεχούς ηλεκτρικής τάσης από χημική ενέργεια.<sup>[32]</sup>

Η αρχή λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου είναι παρόμοια με αυτή ενός ηλεκτροχημικού συσσωρευτή. Η κυψέλη καυσίμου αποτελείται από τον ηλεκτρολύτη, το θετικό και το αρνητικό ηλεκτρόδιο και παράγει συνεχή ηλεκτρική τάση μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Ωστόσο η μεγάλη διαφορά μεταξύ μιας κυψέλης καυσίμου με έναν ηλεκτροχημικό συσσωρευτή είναι πως το πρώτο απαιτεί συνεχή τροφοδοσία καυσίμου και οξυγόνου. Επίσης στην κυψέλη καυσίμου τα ηλεκτρόδια δεν υπόκεινται σε αλλαγές ως προς την χημική τους σύσταση. Οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που βασίζονται σε αντιδρώντα στοιχεία, τα οποία υπάρχουν ήδη μέσα σε αυτούς. Λόγω αυτού οι συσσωρευτές εκφορτίζονται όταν τα αντιδρώντα εξαντλούνται. Αντιθέτως, μια κυψέλη καυσίμου δεν γίνεται να εκφορτιστεί καθώς το καύσιμο και το οξυγόνο είναι σε συνεχή τροφοδοσία. Συνήθως τα αντιδρώντα στοιχεία για τις κυψέλες καυσίμου είναι το υδρογόνο και το οξυγόνο, τα οποία δεν είναι απαραίτητο να είναι υψηλής καθαρότητας. Το υδρογόνο ως καύσιμο, μπορεί να είναι είτε ως μείγμα με άλλα αέρια (όπως  $\text{CO}_2$  και  $\text{N}_2$ ), είτε υπό την μορφή υδρογονανθράκων όπως το φυσικό αέριο,  $\text{CH}_4$ , είτε σε μορφή υδρογονανθράκων όπως η μεθανόλη,  $\text{CH}_3\text{OH}$ . Η περιεκτικότητα του οξυγόνου στον ατμοσφαιρικό αέρα είναι αρκετά μεγάλη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις κυψέλες καυσίμου. Τέλος, τα προϊόντα που παράγονται από την ηλεκτροχημική αντίδραση, που πραγματοποιείται μέσα στην κυψέλη καυσίμου είναι νερό και θερμότητα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε άλλους τομείς.

Οι κυψέλες καυσίμου είναι ένα πρόσφατο τεχνολογικό επίτευγμα, το 1839 ο Sir William Grove ανακάλυψε την αρχή λειτουργίας τους. Όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα 2.21.



**Εικόνα 2.21:** Η πρώτη κυψέλη καυσίμου από τον Sir William Grove.<sup>[33]</sup>



Στη συνέχεια ο Francis T. Bacon το 1937 ασχολήθηκε περαιτέρω με τις κυψέλες καυσίμου, με σκοπό την απλοποίηση των διατάξεων αυτών, ώστε να αποκτήσουν μια περισσότερο πρακτική εφαρμογή. Ύστερα από αρκετές προσπάθειες, στα τέλη του 1950 ανέπτυξε μια συστοιχία κυψελών καυσίμου η οποία είχε ονομαστική ισχύ 6 kW. Στις αρχές του 1960 αναπτύχθηκαν οι πρώτες κυψέλες μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων από την εταιρεία General Electric όπου χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα Gemini. Ύστερα, ακολούθησε το διαστημικό πρόγραμμα Apollo, όπου κατασκευάστηκαν κυψέλες καυσίμου από τους Pratt και Whitney βασισμένες στην ιδέα του Bacon με σκοπό την κάλυψη των ανθρώπινων και τηλεπικοινωνιακών αναγκών στο δορυφόρο. Στα μέσα της δεκαετίας του 1960 κατασκευάστηκε το πρώτο πειραματικό φορηγό όχημα με κυψέλες καυσίμου. Το 1989 κατασκευάστηκε ένα υποβρύχιο από την συνεργασία των εταιρειών Perry Energy Systems και Ballard, το οποίο τροφοδοτούνταν από μια συστοιχία κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Το 1993 παρουσιάζονται τα πρώτα αστικά λεωφορεία που τροφοδοτούνται από κυψέλες καυσίμου, από την εταιρεία Ballard. Επίσης την ίδια χρονιά η εταιρεία Energy Partners κατασκεύασε το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο τροφοδοτούμενο από κυψέλες καυσίμου.

#### 2.4.2 Κατηγορίες των κυψελών καυσίμου.

Οι κατηγοριοποίηση των κυψελών καυσίμου γίνεται σύμφωνα με τον τύπο του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται και ταξινομούνται στις εξής κατηγορίες:

- Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC).
- Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC).
- Κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC).
- Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC).
- Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC).

Οι **αλκαλικές** κυψέλες καυσίμου (**AFC**) χρησιμοποιούν υδροξείδιο του καλίου (KOH) ως ηλεκτρολύτη σε συγκέντρωση 85 WT% όταν η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης είναι στους 250 °C και σε συγκέντρωση 35-50 WT% για θερμοκρασίες λειτουργίας μικρότερες των 120 °C. Αυτό το είδος κυψελών καυσίμου χρησιμοποιήθηκαν στο διαστημικό πρόγραμμα Apollo.

Οι κυψέλες καυσίμου **φωσφορικού οξέος (PAFC)** χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη φωσφορικό οξύ και οι θερμοκρασία λειτουργίας τους κυμαίνεται από 150 έως 220 °C. Το είδος αυτών των κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούνται κυρίως σε σταθμούς βάσης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ισχύ της τάξεως των 200 kW.

Οι κυψέλες καυσίμου **τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC)** χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη ανθρακικά αλκάλια μέσα σε μία κεραμική μήτρα από  $\text{LiAlO}_2$ , με θερμοκρασίες λειτουργίας 600-700 °C. Ωστόσο λόγω των τόσο υψηλών θερμοκρασιών δεν

απαιτούνται ευγενή μέταλλα ως καταλύτες. Οι κυψέλες αυτές χρησιμοποιούνται σε πειραματικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

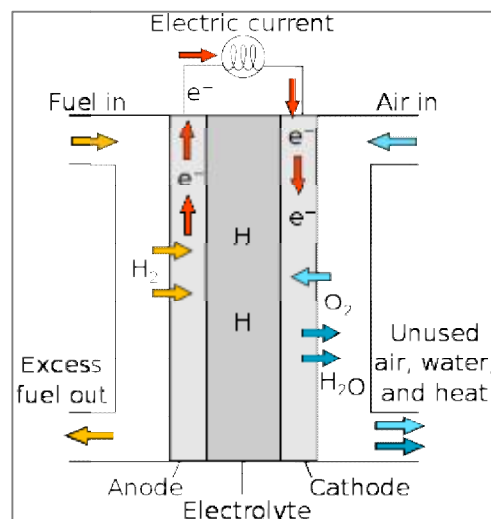
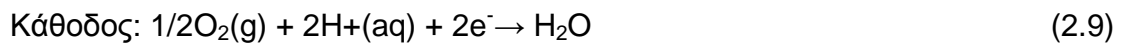
Οι κυψέλες καυσίμου **στερεού οξειδίου (SOFC)** χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη ένα μη πορώδες στερεό οξείδιο και η θερμοκρασία λειτουργίας τους κυμαίνεται από 800 έως 1000 °C. Η εφαρμογή αυτού του τύπου κυψελών γίνεται σε πειραματικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και σε φορητές μονάδες ως βοηθητική πηγή σε οχήματα.

Τέλος οι κυψέλες καυσίμου **μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)** η οποία είναι και αυτή που χρησιμοποιείται στην παρούσα πειραματική διάταξη και είναι και η περισσότερο διαδεδομένη από τις υπόλοιπες.

### 2.4.3 Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC).

#### 2.4.3.1 Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου PEMFC.

Σε όλα τα είδη των κυψελών καυσίμου στα ηλεκτρόδια τους πραγματοποιείται μια οξειδοαναγωγή. Συγκεκριμένα, στην κυψέλη καυσίμου PEM (εικόνα 2.22) γίνεται οξείδωση του υδρογόνου (H<sub>2</sub>) στην άνοδο, από την άλλη μεριά στην κάθοδο ανάγεται το οξυγόνο (O<sub>2</sub>). Οι χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν σε αυτήν την κυψέλη είναι οι εξής:

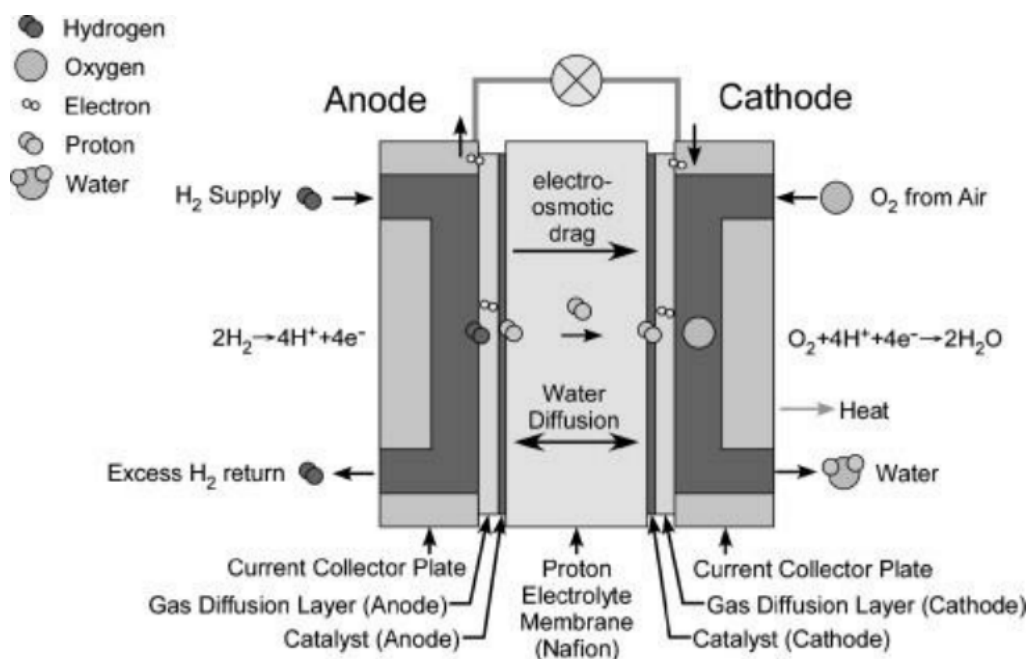


**Εικόνα 2.22:** Διάγραμμα της κυψέλης καυσίμου PEM.<sup>[34]</sup>

Το υδρογόνο που εισέρχεται στην άνοδο αντιδρώντας με τον καταλύτη από λευκόχρυσο (Pt) οξειδώνεται και διασπάται σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Στην κυψέλη καυσίμου PEM το ιόν που μεταφέρεται είναι το κατιόν H<sup>+</sup>, το οποίο διασχίζει τον ηλεκτρολύτη που είναι αγωγίμος μόνο για πρωτόνια και πηγαίνει από την άνοδο στην κάθοδο. Εξαιτίας της οξείδωσης προκύπτουν ηλεκτρόνια τα οποία διασχίζουν το εξωτερικό κύκλωμα και παράγουν ηλεκτρικό έργο καταλήγοντας στην κάθοδο. Όπου εκεί αντιδρούν με το εισερχόμενο οξυγόνο (αναγωγή) και με τα πρωτόνια που προέρχονται από την άνοδο, διασχίζοντας τον ηλεκτρολύτη. Το προϊόν αυτής της χημικής αντίδρασης που πραγματοποιείται στην κάθοδο είναι το νερό, που στην συνέχεια εξαγεται από την κυψέλη ή χρησιμοποιείται ξανά για την ενυδάτωση των αερίων αντιδρώντων.

#### 2.4.3.2 Δομή της κυψέλης καυσίμου.

Η αποδοτικότητα της κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων εξαρτάται από τα δομικά στοιχεία που την αποτελούν. Ένας σημαντικός παράγοντας για την ομαλή λειτουργία της είναι η διαχείριση του νερού. Η κυψέλη πρέπει να τροφοδοτείται συνεχώς με τα αέρια αντιδρώντα και να συλλέγεται το νερό που είναι το προϊόν της αντίδρασης. Πρέπει να δίνεται μεγάλη σημασία στην διαχείριση του νερού εντός της κυψέλης, διότι είναι μία δραστηριότητα που σχετίζεται άμεσα με την αγωγιμότητα της μεμβράνης και με την αντίδραση της αναγωγής στην κάθοδο της κυψέλης. Στο εικόνα 2.23 παρουσιάζεται η εσωτερική δομή της κυψέλης καυσίμου:



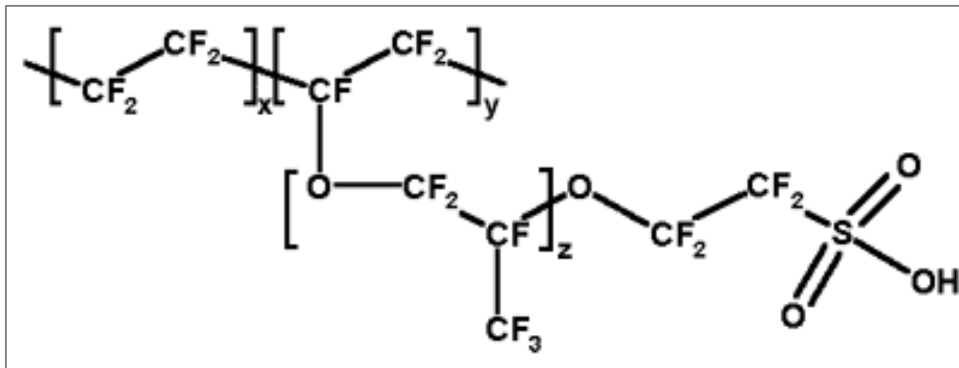
Εικόνα 2.23: Εσωτερική δομή κυψέλης καυσίμου PEM.<sup>[35]</sup>

Τα βασικά δομικά στοιχεία που την αποτελούν είναι:

- Μembrάνη πρωτονίων (Proton Electrolyte Membrane).
- Στρώμα διάχυσης αερίων (Gas Diffusion Layer).
- Ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου.
- Συστοιχία κυψελών καυσίμου.
- Πλάκα ροής αερίων.

#### Ø Μembrάνη.

Η μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων της κυψέλης συνήθως κατασκευάζεται από έναν ηλεκτρολύτη πάχους 25-200μm, ο οποίος είναι καλός αγωγός πρωτονίων. Επίσης, η μεμβράνη πρέπει να είναι αεροστεγής, να είναι καλός μονωτής ηλεκτρονίων και να έχει μεγάλη μηχανική και θερμική αντοχή σε περίπτωση αλλαγής της πίεσης. Οι ηλεκτρολύτες των κυψελών καυσίμου PEMFC αποτελούνται από μία πολυμερή μεμβράνη σε στερεά μορφή. Το πιο διαδεδομένο πολυμερές που χρησιμοποιείται σήμερα για την κατασκευή μεμβρανών είναι το Nafion (εικόνα 2.24) το οποίο έχει ομοιότητες ως προς την δομή του με το Teflon.



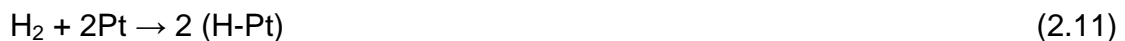
**Εικόνα 2.24:** Δομή του πολυμερούς Nafion ( $C_7H_9F_{13}O_5S$ ).<sup>[36]</sup>

Βλέποντας το σχήμα διακρίνονται τρεις περιοχές. Το πρώτο μέρος είναι ο κορμός των φθοροανθράκων ( $-CF_2-CF-CF_2-$ ), που επαναλαμβάνεται εκατοντάδες φορές εσωτερικά της μεμβράνης. Το δεύτερο μέρος αποτελείται από την πλευρική αλυσίδα ( $O-CF_2-CF-CF_3$ )- $O-CF_2-CF_2-$  και συνδέει τον κορμό με το τρίτο μέρος που αποτελείται από ιόντα θειικού οξέος  $SO_3^-$ . Οπότε, καθώς το μόριο του υδρογόνου διασπάται στην άνοδο, εισέρχονται στη μεμβράνη τα μονατομικά κατιόντα υδρογόνου  $H^+$  και μεταπηδούν από το ένα μόριο  $SO_3$  στο επόμενο. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, η μεμβράνη πρέπει να είναι ενυδατωμένη έτσι ώστε να είναι αγωγίμη για τα  $H^+$ , που σημαίνει ότι η θερμοκρασία λειτουργίας πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Στην πραγματικότητα η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου γίνεται κάτω από τους  $100^\circ C$ , ενώ

σε περίπτωση που λειτουργεί πάνω από τους 100°C, για να μην μετατραπεί το νερό σε αέρια μορφή θα πρέπει να επικρατούν συνθήκες υψηλής πίεσης.

#### Ø Ηλεκτρόδια.

Τα ηλεκτρόδια περιέχουν σωματίδια λευκόχρυσου (Pt) ως καταλύτη και είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από μεγάλη επιφάνεια σύνδεσης με τον ηλεκτρολύτη και καλές ιδιότητες μεταφοράς αερίων και ιόντων. Επίσης, τα ηλεκτρόδια αυτά έχουν πορώδη μορφή, διευκολύνοντας έτσι την πρόσβαση των αερίων αντιδρώντων στην επιφάνεια αντίδρασης, όπου πραγματοποιείται η οξειδωση και η αναγωγή. Ο καταλύτης (λευκόχρυσος) αποδίδει υψηλούς ρυθμούς αναγωγής του οξυγόνου που είναι αναγκαίο, καθώς η αντίδραση στην κάθοδο είναι περίπου εκατό φορές πιο αργή από την αντίδραση οξειδωσης του υδρογόνου. Ωστόσο, η αντίδραση που διεκπεραιώνεται στην κυψέλη καυσίμου δεν είναι τόσο απλή. Καθώς στην άνοδο, αντιδρά το υδρογόνο με το λευκόχρυσο και κατ' επέκταση γίνεται η διάσπαση του σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



Παρ' όλα ταύτα, επειδή το κόστος του λευκόχρυσου είναι πολύ υψηλό, τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται από πορώδη άνθρακα με ομοιόμορφα διασπαρμένα μόρια λευκόχρυσου, τα οποία προσκολλώνται στα άτομα του άνθρακα. Έτσι, με τον τρόπο αυτόν μειώνεται το κόστος παραγωγής των ηλεκτροδίων.

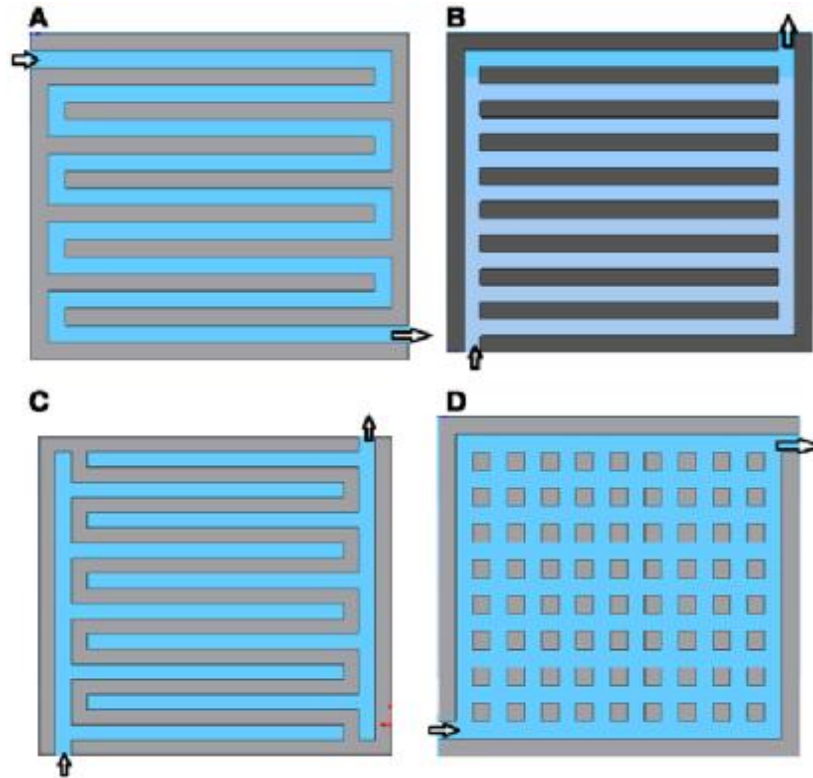
#### Ø Στρώμα διάχυσης αερίων.

Η βασική λειτουργία αυτού του στρώματος είναι η ομοιόμορφη διάχυση των αερίων αντιδρώντων στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Το στρώμα διάχυσης αερίων (Gas Diffusion Layer) είναι κατασκευασμένο από υδροφοβικό χαρτί γραφίτη που επιτρέπει την διέλευση των αερίων και την ηλεκτρική αγωγιμότητα των ηλεκτρονίων. Επιπλέον, το στρώμα διάχυσης αερίων βοηθάει στην σωστή διαχείριση του νερού (προϊόν της αντίδρασης) που συγκεντρώνεται, καθώς πρέπει να εξαχθεί για να μην οδηγήσει την κυψέλη σε πλημμύρισμα, αλλά πρέπει να αφήνεται και μια ισορροπημένη ποσότητα νερού να διαπερνάται για να καταφθάνει στη μεμβράνη και στα ηλεκτρόδια.

#### Ø Πλάκα ροής των αερίων και διπολική πλάκα.

Η πλάκα ροής των αερίων (flow field plate) κατασκευασμένη από γραφίτη χαράσσεται πάνω στην τελική πλάκα της ανόδου και της καθόδου στην περίπτωση μονής κυψέλης. Ωστόσο, σε μία μόνο κυψέλη καυσίμου εμφανίζεται μικρή τάση, όποτε για να αυξηθεί η λειτουργική τάση συνδέονται πολλές κυψέλες σε σειρά. Επίσης, είναι αποτελεσματικότερο οι πλάκες να έχουν χαραγμένα κανάλια και στις δύο πλευρές τους

(διπολικές πλάκες) καθώς γίνεται περισσότερο ομοιόμορφη η κατανομή των αερίων στο στρώμα διάχυσης. Οι διάρθρωση των καναλιών αυτών ποικίλει, ανάλογα με την κατασκευή, (Εικόνα 2.25).



**Εικόνα 2.25:** Παράδειγμα μερικών διαφορετικών τύπων πλακών ροής (A: σερπαντίνη, B: παράλληλο, C: διασυνδεδεμένο, D: πλέγμα).<sup>[37]</sup>

#### 2.4.4 Ιδιότητες και χαρακτηριστικά των κυψελών καυσίμων.

Οι κυψέλες καυσίμου είναι μία ενεργειακή τεχνολογία που έχει να προσφέρει πολλά στο μέλλον όσον αφορά ενεργειακά ζητήματα, καθώς παρουσιάζουν εξαιρετικές ιδιότητες σε σχέση με τις υπάρχουσες συμβατικές τεχνολογίες μετατροπής ενέργειας.

Αναλυτικότερα:

Οι κυψέλες καυσίμου έχουν μεγαλύτερο θερμικό βαθμό απόδοσης συγκριτικά με τις θερμικές μηχανές. Οι θερμικές μηχανές μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε θερμότητα και στη συνέχεια σε μηχανικό έργο, π.χ. μηχανές εσωτερικής καύσης, ατμοστρόβιλοι

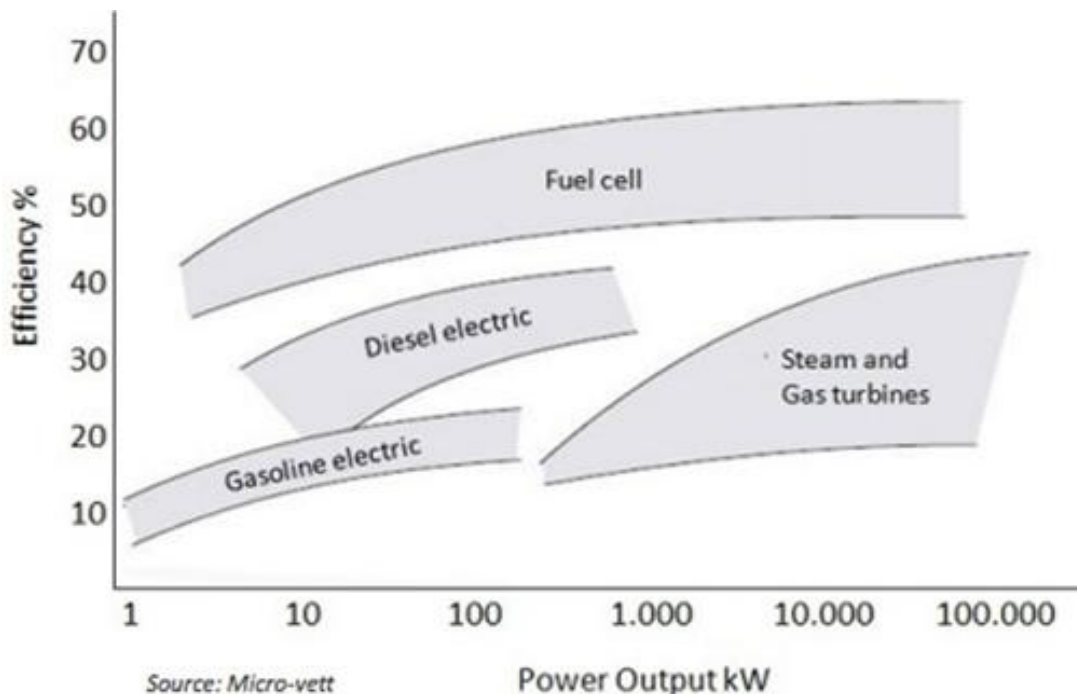
και αεριοστρόβιλοι. Ο βέλτιστος θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης σύμφωνα με τον νόμο του Carnot για μια θερμική μηχανή προκύπτει από τον τύπο:

$$\text{Efficiency}_{\max} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (2.13)$$

Όπου,  $T_1$ =απόλυτη θερμοκρασία εισερχόμενου θερμού αέρα και  $T_2$ =απόλυτη θερμοκρασία εξερχόμενου ψυχρού αέρα.

Από την παραπάνω σχέση συμπεραίνεται ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του εισερχόμενου αερίου και όσο μικραίνει η θερμοκρασία του εξερχόμενου αερίου, ο βαθμός απόδοσης του συστήματος μεγιστοποιείται. Οπότε, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του εισερχόμενου αερίου είναι δυνατόν να επιτευχθεί οποιοσδήποτε βαθμός απόδοσης, λόγω του ότι η θερμοκρασία του εξερχόμενου αερίου δεν γίνεται να είναι χαμηλότερη από εκείνη του περιβάλλοντος. Ωστόσο, πρακτικά στις μηχανές εσωτερικής καύσης η θερμοκρασία εισόδου της μηχανής είναι και η θερμοκρασία λειτουργίας της, που είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία ανάφλεξης. Στις κυψέλες καυσίμου δεν πραγματοποιείται καύση, οπότε η απόδοσή τους δεν εξαρτάται από την μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους. Δεδομένου αυτού, ο βαθμός απόδοσης κατά τη μετατροπή ενέργειας είναι αρκετά μεγαλύτερος στις κυψέλες καυσίμου.

Στο παρακάτω σχήμα 2.11 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες των βαθμών απόδοσης των κυψελών καυσίμου συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



**Σχήμα 2.11:** Σύγκριση βαθμών αποδόσεων διάφορων συστημάτων παραγωγής ενέργειας.<sup>[38]</sup>

Οι κυψέλες καυσίμου που λειτουργούν με υδρογόνο δεν εκπέμπουν ρύπους και τα μόνα «καυσαέρια» που εκλύουν είναι αέρας και νερό. Το γεγονός αυτό τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές σε εσωτερικούς χώρους, στα μέσα μεταφοράς και στα υποβρύχια. Ωστόσο το υδρογόνο είναι ένα στοιχείο που δεν συναντάτε ελεύθερο στη φύση. Οπότε σε κάποιες εφαρμογές είναι απαραίτητο ένα στάδιο προεπεξεργασίας καυσίμου για την παραγωγή υδρογόνου από μεθανόλη. Κατά την επεξεργασία αυτή εκπέμπονται καυσαέρια μεταξύ των οποίων και διοξείδιο του άνθρακα. Αλλά αυτές οι εκπομπές καυσαερίων δεν είναι τόσο επιβλαβές συγκριτικά με αυτές που προέρχονται από τις συμβατικές τεχνολογίες μετατροπής ενέργειας.

Η δομή των κυψελών καυσίμων είναι απλή, αφού δεν έχουν κινούμενα μέρη και αποτελούνται από στρώσεις επαναλαμβανόμενων στοιχείων. Λόγω αυτού είναι εφικτή η μαζική παραγωγή τους με κόστος συγκρίσιμο με αυτό των συμβατικών τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας. Στις μέρες μας, το κόστος κατασκευής των κυψελών καυσίμου είναι υψηλό εξαιτίας των υλικών κατασκευής τους, όπως είναι τα πολυμερή για τις μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων και τα ευγενή μέταλλα που χρησιμοποιούνται ως καταλύτες.

Οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν χωρίς να παράγουν θόρυβο και αυτό τις καθιστά κατάλληλες για χρήση σε στρατιωτικές εφαρμογές και σε εφεδρικά συστήματα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ωστόσο, οι κυψέλες καυσίμων έχουν μερικά μειονεκτήματα, συνοπτικά αυτά είναι:

- Το σχετικό υψηλό κόστος αγοράς και συντήρησης (π.χ. αλλαγή του ηλεκτρολύτη).
- Η μεταρρύθμιση καυσίμων προσθέτει στην πολυπλοκότητα και το κόστος.
- Χρονικοί περιορισμοί ζωής (δεν είναι γνωστός ο πραγματικός χρόνος ζωής).
- Χαμηλή διαθεσιμότητα.
- Λίγοι προμηθευτές αυτής της τεχνολογίας.
- Ελλιπής υποδομή του υδρογόνου.

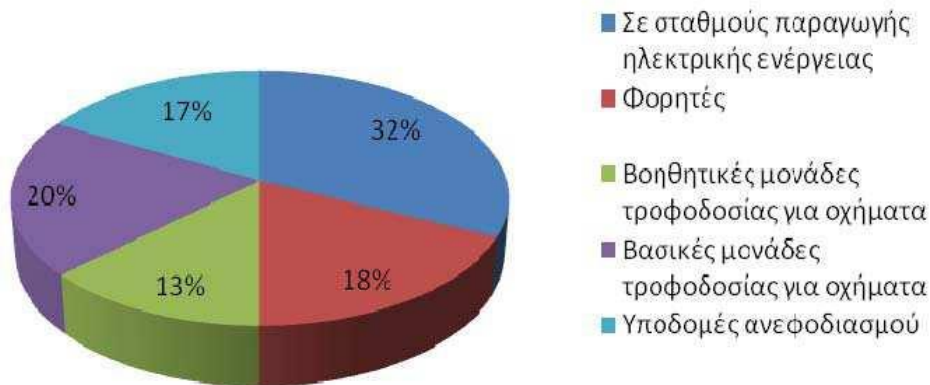
#### **2.4.5 Εφαρμογές κυψελών καυσίμου.**

Ένα χαρακτηριστικό των κυψελών καυσίμου είναι η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα μεγάλο εύρος, από μερικά mW έως αρκετές εκατοντάδες kW, αυτό οφείλεται στη δομή τους και στα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους. Αυτό τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογή σε λεωφορεία, αυτοκίνητα, ποδήλατα κ.α. Επιπλέον, είναι κατάλληλες για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε καταναλισκόμενες μονάδες κτιρίων προσφέροντας έτσι ένα εύρος τροφοδοσίας ισχύος, πόσο μάλλον όταν συνδυάζονται και με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ακόμη χρησιμοποιούνται και ως εφεδρικά



συστήματα τροφοδοσίας μικρής ή μεγάλης κλίμακας, αντικαθιστώντας έτσι τις μπαταρίες σε φορητές συσκευές.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή της παγκόσμιας παραγωγής συστημάτων κυψελών καυσίμου ανά εφαρμογή, σύμφωνα με μία παγκόσμια έρευνα αγοράς που διεξάχθηκε από το «US Fuel Cell Council» (Εικόνα 2.26).



(α)

Εφαρμογές	Η.Π.Α.	Ιαπωνία	Ευρώπη	Καναδάς
Σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	55	17	30	33
Φορητές	42	2	16	20
Βοηθητικές μονάδες τροφοδοσίας για οχήματα	27	5	17	25
Βασικές μονάδες τροφοδοσίας για οχήματα	28	10	15	36
Υποδομές ανεφοδιασμού	33		23	-
Σύνολο	185	35	101	114

(β)

Εικόνα 2.26: Κατανομή της παγκόσμιας παραγωγής συστημάτων κυψελών καυσίμου (α) ανά εφαρμογή και (β) ανά χώρα.<sup>[39]</sup>

Τα αποτελέσματα της έρευνας δείχνουν, πως το μεγαλύτερο ποσοστό (32%) καταλαμβάνεται από τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ακολουθούν οι βασικές μονάδες τροφοδοσίας οχημάτων με 20%.

Επίσης, έρευνα που έγινε από τον ίδιο οργανισμό το 2007 έδειξε πως οι εταιρίες και τα ερευνητικά κέντρα δίνουν έμφαση κυρίως στην ανάπτυξη κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 2.12.



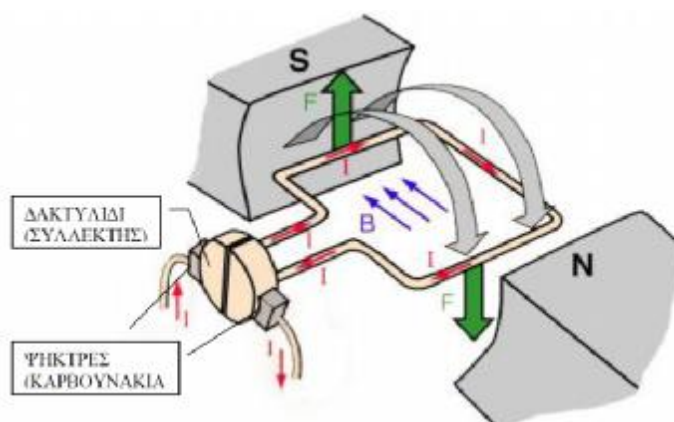
Σχήμα 2.12: Κατανομή παραγόμενων κυψελών καυσίμου ανά είδος το έτος 2007.<sup>[39]</sup>

## 2.5 ΜΟΤΕΡ ΚΙΝΗΣΗΣ – ΦΤΕΡΩΤΗ.

Το τελευταίο μέρος της πειραματικής διάταξης είναι το μοτέρ κίνησης, το οποίο δέχεται το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα από την κυψέλη καυσίμου και τίθεται σε κίνηση.

### 2.5.1 Αρχή λειτουργίας του μοτέρ κίνησης.

Ο απλός κινητήρας DC λειτουργεί μόνο με συνεχές ρεύμα το οποίο διοχετεύεται στο πηνίο και αυτό περιστρέφεται ανάμεσα στους πόλους ενός μόνιμου μαγνήτη (εικόνα 1). Το μαγνητικά πεδία του πηνίου και του μαγνήτη αλληλοεπιδρούν και αναγκάζουν το πηνίο να στραφεί. Ένας εναλλάκτης αντιστρέφει τις συνδέσεις στην μπαταρία σε κάθε μισή στροφή και διατηρεί τη φορά περιστροφής του πηνίου σταθερή.



Εικόνα 2.27: Αρχή λειτουργίας DC κινητήρα.<sup>[40]</sup>

## 2.5.2 Είδη ηλεκτρικών κινητήρων.

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC) και τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Παράλληλης διέγερσης
- Διέγερσης σειράς
- Σύνθετης διέγερσης
- Μόνιμης διέγερσης

Στους DC κινητήρες παράλληλης διέγερσης το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται παράλληλα στο τύλιγμα του κινητήρα, ενώ στους DC κινητήρες διέγερσης σειράς το τύλιγμα συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα του κινητήρα. Στους DC κινητήρες σύνθετης διέγερσης χρησιμοποιούνται δύο τυλίγματα διέγερσης. Το ένα συνδέεται σε σειρά και το άλλο παράλληλα.

Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος κατηγοριοποιούνται στους:

- Σύγχρονους κινητήρες
- Επαγωγικούς ή ασύγχρονους κινητήρες

Στους συγχρόνους κινητήρες το τύλιγμα διέγερσης τοποθετείται στο στάτη και με την εφαρμογή τριφασικού ρεύματος με διαφορά φάσης  $120^\circ$  αποδεικνύεται ότι δημιουργείται ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο κέντρο του ρότορα. Έτσι ο ρότορας περιστρέφεται ώστε να ευθυγραμμιστεί το μαγνητικό του πεδίο με το πεδίο του στάτη. Το αποτέλεσμα είναι να περιστρέφεται με μια σύγχρονη ταχύτητα. Στους επαγωγικούς κινητήρες αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη στους αγωγούς του τυλίγματος από το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τον στάτη. Το αποτέλεσμα αυτού είναι η κίνηση του δρομέα που οφείλεται στις δυνάμεις Laplace των ρευματοφόρων πλέον αγωγών εξαιτίας της επαγόμενης τάσης. Ανάλογα με τον τύπο του δρομέα που χρησιμοποιούν οι επαγωγικοί κινητήρες, ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες στον δακτυλιοφόρο δρομέα και στον βραχυκυκλωμένο κλωβό.



## 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 3.1 ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.

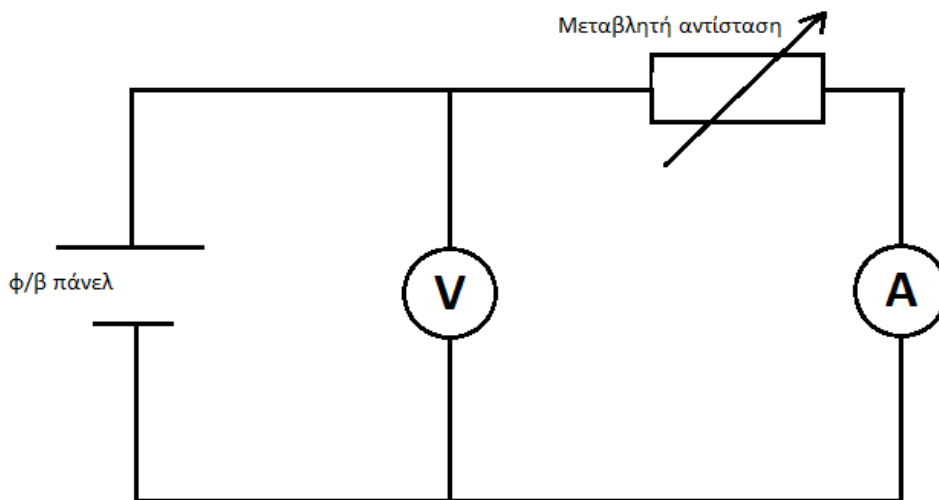
#### 3.1.1 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (I-V) και ισχύος-τάσης (P-V) για το φωτοβολταϊκό πάνελ.

Η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης παρέχει πληροφορίες σχετικά με την απόδοση του φωτοβολταϊκού πάνελ. Το λεγόμενο σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point) μπορεί να προσδιοριστεί από την χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης και την καμπύλη ισχύος. Η απόδοση του φωτοβολταϊκού πάνελ υποδεικνύει το ποσό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

$$\text{απόδοση } \eta = \frac{\text{ηλεκτρική ισχύς}}{\text{προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad (3.1)$$

Πειραματική συσκευή:

- Φωτοβολταϊκό πλαίσιο.  
Λάμπα για την λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου.  
Μεταβλητή αντίσταση.  
Δύο πολύμετρα.
- Πυρανόμετρο για την μέτρηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.
- Εναλλακτικά η άμεση ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να υπολογιστεί από το ρεύμα βραχυκύκλωσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου.



**Σχήμα 3.1:** Κύκλωμα για τον υπολογισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης του φωτοβολταϊκού πάνελ.

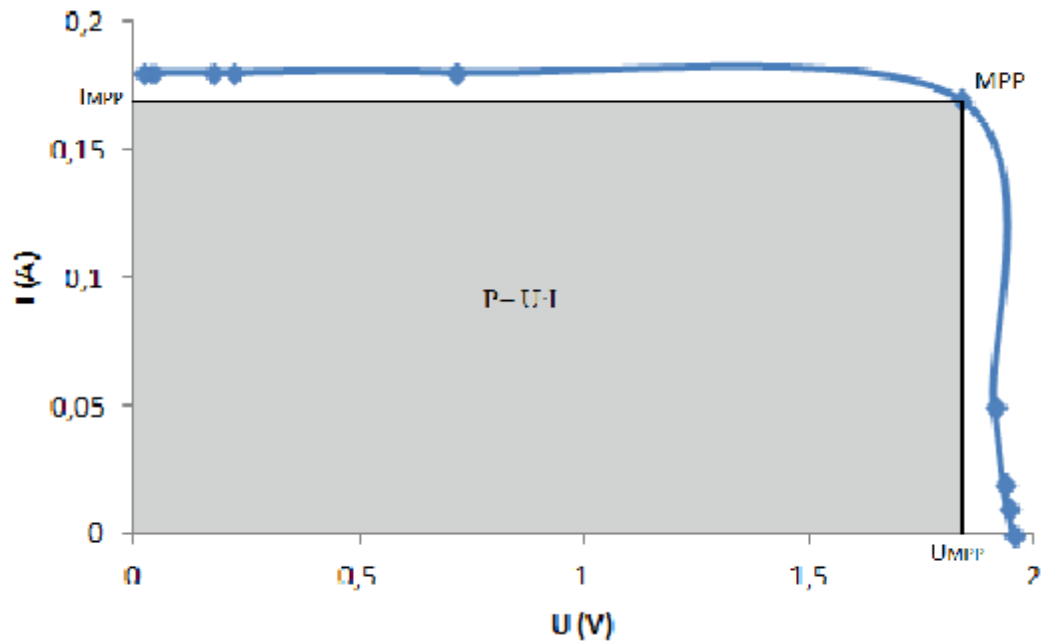
Διαδικασία:

Γίνεται τοποθέτηση της λάμπας έτσι ώστε οι προσπίπτουσα ακτινοβολία να είναι κάθετη στην επιφάνεια του πάνελ. Επίσης, για την αποτροπή σφαλμάτων λόγω θερμοκρασιακών διακυμάνσεων πρέπει οι μετρήσεις να παρθούν ένα λεπτό αργότερα από την στιγμή που θα ανάψει η λάμπα. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας ανοιχτό κύκλωμα τάσης ( $R = \infty$ ), καταγράφεται η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης, καθώς μειώνεται σταδιακά η αντίσταση. Μεταξύ κάθε μέτρησης πρέπει να μεσολαβεί ένα χρονικό διάστημα, έτσι ώστε να σταθεροποιούνται οι τιμές. Παρακάτω (πίνακας 1) παρουσιάζονται οι μετρήσεις.

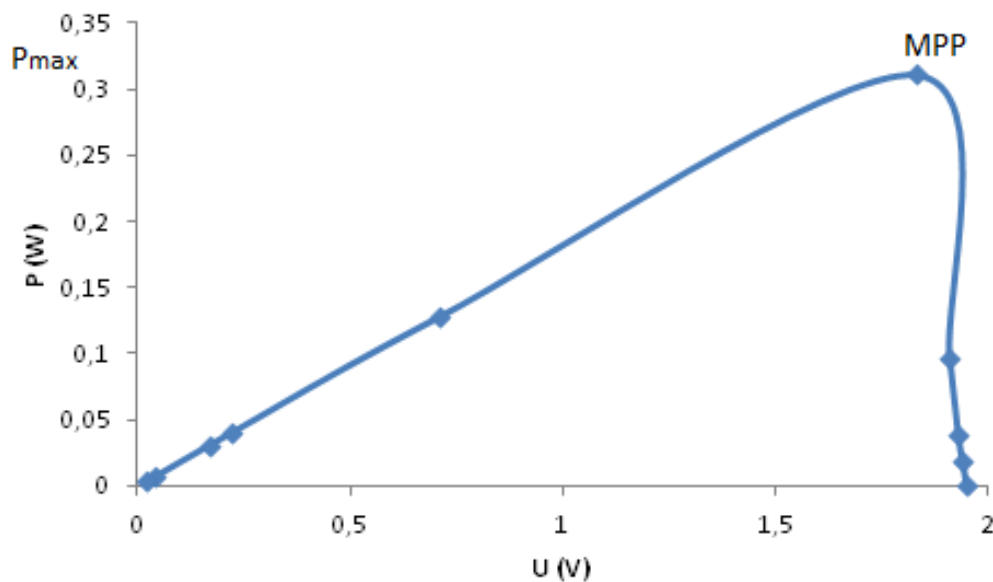
α/α	R (Ω)	U (V)	I (A)	P= U*I (W)
1	$\infty$	1,95	0	0
2	330	1,94	0,01	0,019
3	100	1,93	0,02	0,039
4	33	1,91	0,05	0,096
5	10	1,83	0,17	0,311
6	3,3	0,71	0,18	0,128
7	1	0,22	0,18	0,04
8	0,33	0,17	0,18	0,031
9	0,1	0,04	0,18	0,007
10	0	0,02	0,18	0,004

**Πίνακας 1.** Αποτελέσματα μετρήσεων για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

Ανάλυση μετρήσεων:



Σχήμα 3.2: Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης του φωτοβολταϊκού πάνελ.



Σχήμα 3.3: Καμπύλη ισχύος του φωτοβολταϊκού πάνελ.

Στο διάγραμμα 2 στο σημείο καμπής της καμπύλης ισχύος προκύπτει το σημείο μέγιστης ισχύος. Αυτό συμβαίνει όταν το γινόμενο της τάσης και του ρεύματος είναι στο μέγιστο, δηλαδή  $P_{MPP}=U_{MPP}\cdot I_{MPP}$ . Όπου στην παραπάνω περίπτωση είναι  $P_{MPP}=1,83V\cdot 0,17A=0,311W$  Ωστόσο, το ΣΜΙ μπορεί να βρεθεί και από τη χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (σχήμα 3.2), βρίσκοντας το μέγιστο εμβαδόν που σχηματίζει το ορθογώνιο, το εμβαδόν του οποίου θα ισούται και με την μέγιστη ισχύ. Το ορθογώνιο με το μεγαλύτερο εμβαδό αντιπροσωπεύει την μέγιστη τιμή της ισχύος με τα αντίστοιχα μεγέθη ρεύματος και τάσης.

Απόδοση φωτοβολταϊκού πάνελ:

Η απόδοση ( $\eta$ ) είναι ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος  $P_{out}$  προς την ισχύ του φωτός  $P_{in}$ . Στην περίπτωση του πειράματος βρέθηκε πως η ισχύς στο ΣΜΙ είναι  $0,311W$  οπότε  $P_{out}= 0,311 W$ . Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το πυρανόμετρο βρίσκεται η ακτινοβολία  $E_E$  ( $W/m^2$ ) που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό πάνελ και πολλαπλασιάζεται με το εμβαδόν της επιφάνειας  $A(m^2)$  του πάνελ, για να προκύψει η ισχύς του φωτός  $P_{in}$ . Η ηλιακή ισχύς ορίζεται από τον τύπο (3.2).

$$P_{in}=E_E\cdot A [=] W. \quad (3.2)$$

Η απόδοση του πλαισίου μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο (3.3).

$$\eta= P_{out}/P_{in} [=] - \quad (3.3)$$

Σε περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμο το πυρανόμετρο για την μέτρηση της ακτινοβολίας, μπορεί να υπολογιστεί με την βοήθεια ενός πολύμετρου. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στο ρεύμα βραχυκύκλωσης που είναι ανάλογο με τα φωτόνια που προσπίπτουν στο φωτοβολταϊκό κελί. Οπότε, το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι ανάλογο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η τάση ανοιχτού κυκλώματος εξαρτάται από το υλικό του ημιαγωγού που είναι κατασκευασμένο το φωτοβολταϊκό πάνελ και δεν είναι ανάλογη της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οπότε δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας.

Για τον υπολογισμό της ισχύς του φωτός, η ένδειξη του ρεύματος βραχυκύκλωσης του πολύμετρου πρέπει να πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή  $F$ . Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από την μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης του φωτοβολταϊκού κελιού. Η μέγιστη ακτινοβολία κάτω από ηλιόλουστες κανονικές συνθήκες είναι περίπου  $1000W/m^2$ . Η μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης για αυτή την τιμή ακτινοβολίας καθορίζεται από τον κατασκευαστή, όπως και άλλα χαρακτηριστικά τα οποία είναι βασισμένα σε καθορισμένες συνθήκες (standard test conditions,STC) δηλαδή σε ηλιακή ακτινοβολία  $1000W/m^2$  και θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού  $25^\circ C$ .

Με βάση αυτή την παραδοχή, η μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης είναι  $600 mA$  κάτω από συνθήκες STC. Οπότε, τώρα μπορεί εύκολα να υπολογιστεί ο συντελεστής  $F$ , χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο:



$$F = \frac{P_{\max}}{I_{K\max}} = \frac{1000 \frac{W}{m^2}}{600mA} = 1,67 \frac{W}{m^2 \cdot mA} \quad (3.4)$$

Αν πολλαπλασιαστεί το ρεύμα βραχυκυκλώματος με τον συντελεστή

$$F = 1,67 \frac{W}{m^2 \cdot mA} \quad (3.5)$$

τότε θα προκύψει περίπου η τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας του φωτοβολταϊκού πάνελ. Έτσι, για τον υπολογισμό της ισχύς του φωτός, πρέπει να μετρηθεί το εμβαδόν της αποδοτικής επιφάνειας του πάνελ και να πολλαπλασιαστεί με την προσπίπτουσα ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας.

Υπολογισμός:

Εμβαδόν επιφάνειας πάνελ: τέσσερα κελιά όπου οι διαστάσεις του καθενός είναι 26mm × 77mm, οπότε  $A = 8 \cdot 10^{-3} m^2$

Ρεύμα βραχυκύκλωσης:  $I_K = 180 mA$

$$P_{in} = F \cdot I_K \cdot A = 1,67 \frac{W}{m^2 \cdot mA} \cdot 180 mA \cdot 8 \cdot 10^{-3} m^2 = 2,4 W \quad (3.4)$$

Οπότε η απόδοση ισούται με  $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{0,311}{2,4} = 0,116 = 13\%$

Συζήτηση.

Η μέγιστη απόδοση μπορεί εύκολα να βρεθεί από την καμπύλη ισχύος, στο λεγόμενο σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point, MPP). Στη χαρακτηριστική καμπύλη έντασης-τάσης το σημείο αυτό (MPP) περιγράφεται από το μέγιστο εμβαδόν του τετραγώνου που σχηματίζεται μεταξύ των αξόνων (V και I). Η αντίσταση  $R_{MPP}$ , στο σημείο MPP μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$R_{MPP} = \frac{U_{MPP}}{I_{MPP}} \quad (3.5)$$

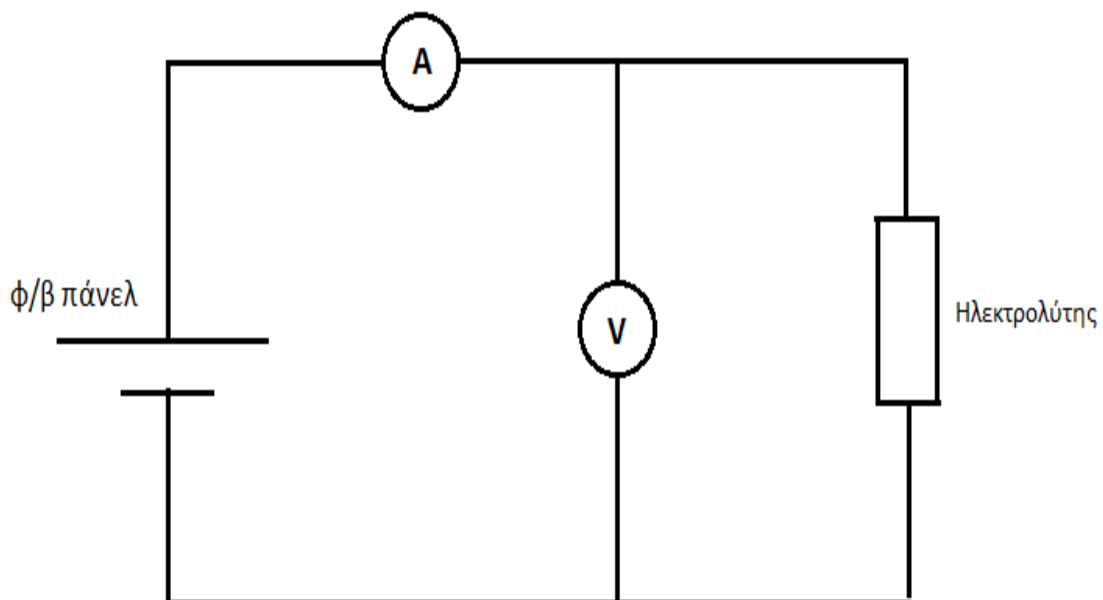
Συνήθως, οι βαθμοί απόδοσης των πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών πάνελ κυμαίνονται από 14% - 16%. Η υπολογισμένη απόδοση για τα πάνελ της πειραματικής διάταξης είναι 13%, δηλαδή λιγότερο από το κατώτατο κανονικό όριο. Αυτό οφείλεται σε μετρητικά και τυχαία σφάλματα κατά την διαδικασία μέτρησης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Επίσης, η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πάνελ είναι μικρότερη από την απόδοση ενός μόνο φωτοβολταϊκού κελιού. Αυτό συμβαίνει διότι, το κάθε φωτοβολταϊκό κελί διαφέρει σε πολύ μικρό βαθμό με το άλλα, δηλαδή δεν έχουν όλα τα κελιά τα ίδια χαρακτηριστικά μεταξύ τους. Επίσης, αν τα φωτοβολταϊκά κελιά που αποτελούν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι συνδεδεμένα σε σειρά, τότε αυτά δεν έχουν το ίδιο σημείο μέγιστης ισχύος.

Η απόδοση του φωτοβολταϊκού κελιού μειώνεται όταν συμβαίνουν κάποια φαινόμενα. Μία περίπτωση είναι όταν κάποια από τα φωτόνια δεν απορροφούνται από το φωτοβολταϊκό κελί, αλλά ανακλώνται μόλις προσπίπτουν στην επιφάνεια του. Επιπλέον, υπάρχουν απώλειες λόγω των σκιών που σχηματίζουν οι μεταλλικές επαφές σε ένα κελί. Από τη στιγμή που η ενέργεια των φωτονίων δεν εκπληρώνουν τα ενεργειακά κενά, η μισή και περισσότερο προσπίπτουσα ενέργεια χάνεται. Επιπρόσθετα, οι φορείς ενέργειας ανασυνδυάζονται (ατομική επανασύνδεση ηλεκτρονίων) έχοντας ως αποτέλεσμα να χάνεται ενέργεια στο εσωτερικό των αντιστάσεων (ωμικές απώλειες σε ημιαγώγιμα υλικά) των φωτοβολταϊκών κελιών όπως και στις μεταλλικές επαφές.

### 3.1.2 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (I-V) για τον PEM ηλεκτρολύτη

Πειραματική συσκευή:

- PEM ηλεκτρολύτης.
- Δύο αποθηκευτικά δοχεία.
- Μετρητικά όργανα για την μέτρηση της έντασης και της τάσης (δύο πολύμετρα).
- Φωτοβολταϊκό πάνελ ή πηγή συνεχούς ρεύματος.



**Σχήμα 3.4:** Κύκλωμα για τον υπολογισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης του PEM ηλεκτρολύτη.

Διαδικασία:

α) Συνδέουμε το φωτοβολταϊκό πλαίσιο με το ηλεκτρολυτικό κελί. Ανάβουμε τη λάμπα και την στρέφουμε προς το φωτοβολταϊκό πλαίσιο και έτσι δημιουργείται μία τάση μεταξύ 1,5 και 2 V.

Παρακάτω στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων:

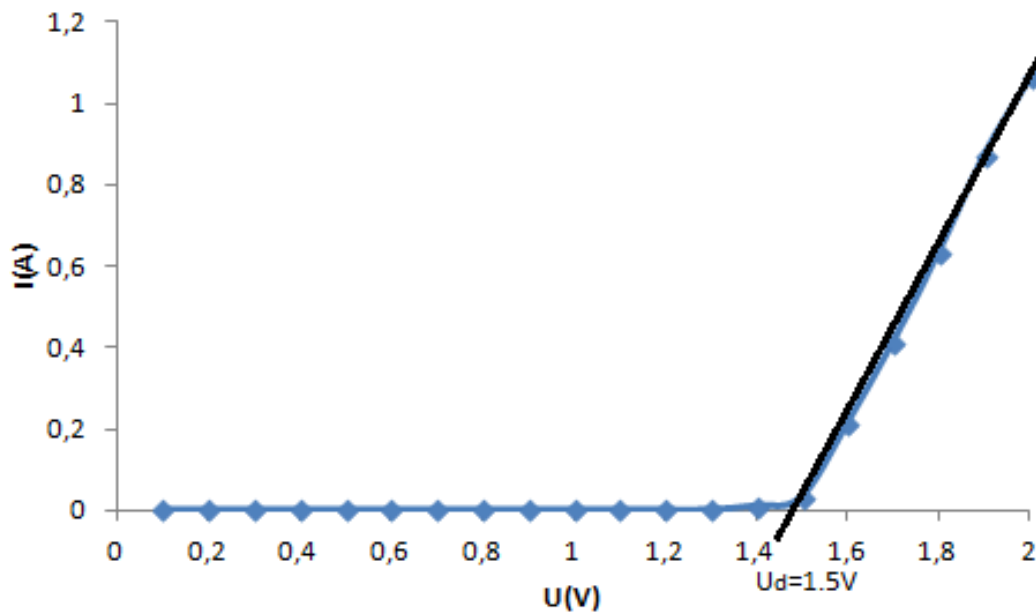
α/α	U (V)	I (A)	α/α	U (V)	I (A)
1	0,1	0	11	1,1	0
2	0,2	0	12	1,2	0
3	0,3	0	13	1,3	0
4	0,4	0	14	1,4	0,01
5	0,5	0	15	1,5	0,03
6	0,6	0	16	1,6	0,21
7	0,7	0	17	1,7	0,41
8	0,8	0	18	1,8	0,63
9	0,9	0	19	1,9	0,87
10	1	0	20	2	1,06

**Πίνακας 2.** Αποτελέσματα μετρήσεων της ηλεκτρολυτικής συσκευής (PEM).

β) Σταδιακά αλλάζει η μεταβαλλόμενη αντίσταση από μικρές τιμές αντίστασης σε μεγαλύτερες και καταγράφεται η σχετική τάση και η αντίστοιχη ένταση. Στους ηλεκτρολύτες ενός κελιού δεν πρέπει να υπερβαίνεται η τάση πάνω από την μέγιστη τιμή 2 V. Για να αποκτηθεί η μέγιστη τιμή κάθε φορά, θα πρέπει να πολλαπλασιάζεται ο αριθμός των κελιών επί 2 V, π.χ. για 2 κελιά, απαιτούνται 4 V, για 3 κελιά 6 V. Μεταξύ κάθε μέτρησης πρέπει να μεσολαβεί ένα χρονικό διάστημα ώστε να σταθεροποιηθούν οι τιμές.

Ανάλυση:

Σχεδιασμός διαγράμματος από τις παραπάνω τιμές. Η χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-ρεύματος του ηλεκτρολύτη που προκύπτει μπορεί να προσεγγιστεί με δύο διασταυρούμενες ευθείες γραμμές (σχήμα 3.5). Παρακάτω σχεδιάζονται δύο ευθείες γραμμές και σημειώνεται το σημείο τομής των γραμμών που αυξάνουν απότομα με τον άξονα X. Το σημείο τομής δηλώνει την τάση αποσύνθεσης  $U_d$ .



**Σχήμα 3.5:** Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης του ηλεκτρολύτη

Συζήτηση:

Η σχέση μεταξύ ρεύματος και εφαρμοσμένης τάσης φαίνεται στο παραπάνω σχήμα 3.5. Η καμπύλη δείχνει ξεκάθαρα πως δεν υπάρχει ρεύμα μέχρι τη στιγμή που η τάση θα αποκτήσει μια συγκεκριμένη τιμή. Επίσης, το νερό δεν ξεκινάει να διασπάτε σε υδρογόνο και οξυγόνο έως ότου το μετρούμενο ρεύμα αρχίσει να μεταβάλλεται. Στην περίπτωση του πειράματος αυτό συμβαίνει στα 1,5 V (σχήμα 3.5). Η τάση αποσύνθεσης στο διάγραμμα βρίσκεται στο σημείο διασταύρωσης της απότομης γραμμής και της τετμημένης. Η θεωρητική τάση αποσύνθεσης του νερού είναι 1,23 V, αλλά το νερό δεν διασπάται σε αυτή την τιμή τάσης. Ωστόσο, πρακτικά η τάση είναι λίγο μεγαλύτερη εξαιτίας των απωλειών στον ηλεκτρολύτη. Η διαφορά μεταξύ της θεωρητικής και πρακτικής τιμής της τάσης εξαρτάται από αρκετές παραμέτρους, π.χ. από τον τύπο σύνθεσης του υλικού του ηλεκτροδίου, από τον ηλεκτρολύτη και την θερμοκρασία.

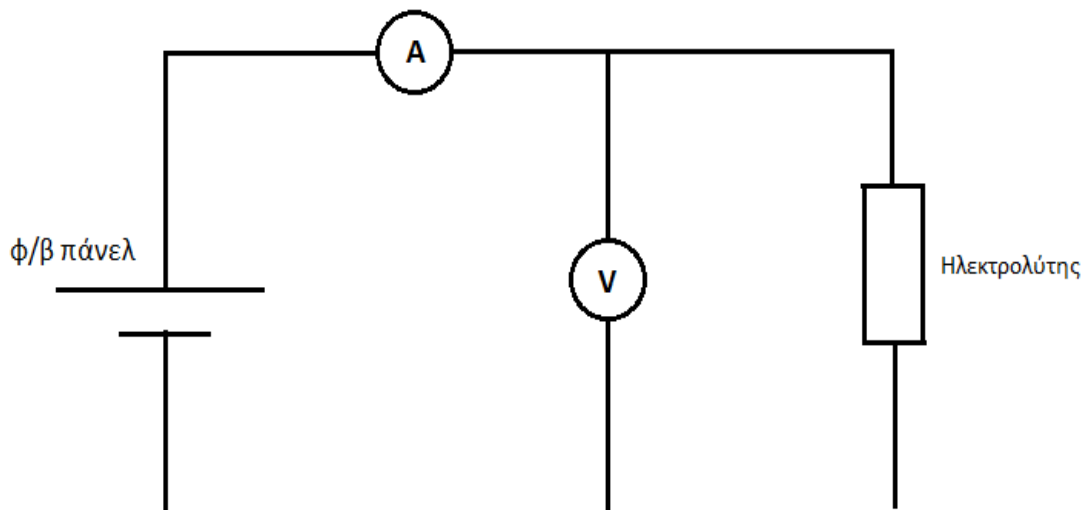
### 3.1.3 Ενεργειακή απόδοση και απόδοση Faraday για τον PEM ηλεκτρολύτη.

Πειραματική συσκευή:

- PEM ηλεκτρολύτης.
- Δύο αποθηκευτικές δεξαμενές.
- Χρονόμετρο.
- Μετρητικά όργανα για την μέτρηση της έντασης και της τάσης (δύο πολύμετρα, μεταβλητή αντίσταση).
- Φωτοβολταϊκό πλαίσιο ή πηγή συνεχούς ρεύματος.

Διαδικασία:

Συνδέουμε το φωτοβολταϊκό πλαίσιο με το ηλεκτρολυτικό κελί. Ανάβουμε τη λάμπα και την στρέφουμε προς το φωτοβολταϊκό πλαίσιο και έτσι δημιουργείται μία τάση μεταξύ 1,5 και 2 V.



**Σχήμα 3.6:** Διάταξη για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης και απόδοσης Faraday για τον PEM ηλεκτρολύτη.

Στη συνέχεια ενεργοποιείται η συσκευή σύμφωνα με τις οδηγίες και τους κανόνες ασφαλείας. Από τη στιγμή που θα αρχίσει η παραγωγή των αερίων πρέπει να μεσολαβήσει ένα χρονικό διάστημα μερικών λεπτών έως ότου γίνει η καταγραφή των δεδομένων. Ύστερα, ανοίγεται η βαλβίδα εξαγωγής στα δοχεία αποθήκευσης για την πλήρη απελευθέρωση των παραγόμενων αερίων. Μόλις αφαιρεθούν τα αέρια, συμπληρώνονται εντελώς τα αποθηκευτικά δοχεία με απιονισμένο νερό. Η στάθμη του νερού πρέπει να συμπίπτει με το σημείο βαθμονόμησης  $0 \text{ cm}^3$ , όταν είναι σε οριζόντια θέση. Τέλος, κλείνονται οι βαλβίδες εξαγωγής στα δοχεία αποθήκευσης. Οι μετρήσεις ξεκινούν την στιγμή που συνδέεται ο ηλεκτρολύτης με το φωτοβολταϊκό πάνελ. Καταγράφονται ο χρόνος, η τάση που εφαρμόζεται στον ηλεκτρολύτη και το ρεύμα που διέρχεται μέσα από αυτόν, επίσης εύκολα μπορούν να διαβαστούν και οι ποσότητες των αερίων που παράγονται. Η τελευταία μέτρηση θα παρθεί όταν το δοχείο του υδρογόνου είναι εντελώς γεμάτο με το αέριο. Στην περίπτωση του πειράματος αυτού θα είναι όταν καταλαμβάνει όγκο  $30 \text{ cm}^3$ .

Στον παρακάτω πίνακα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων:

$\alpha/\alpha$	$V_{H_2} (cm^3)$	$t(s)$	$U(V)$	$I(A)$	$P(W) P=U \cdot I$
1	0	0	1,94	1,02	1,98
2	5	40	1,94	1,01	1,96
3	10	80	1,94	1,01	1,96
4	15	119	1,95	1,01	1,97
5	20	160	1,95	1,01	1,97
6	25	200	1,95	1	1,95
7	30	238	1,94	1,01	1,96

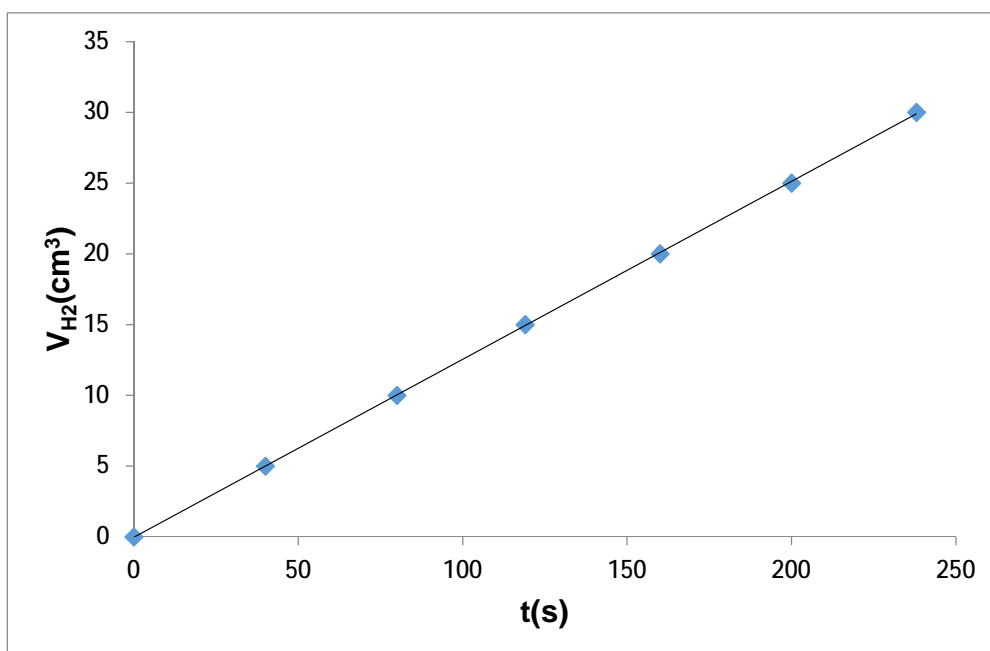
**Πίνακας 3.** Μετρήσεις για τον υπολογισμό απόδοσης του ηλεκτρολύτη.

Ανάλυση μέρος 1<sup>ο</sup>

Η ενεργειακή απόδοση φανερώνει κατά πόσο η ενέργεια εισόδου μετατρέπεται σε χρήσιμη ενέργεια εξόδου, δηλαδή:

$$\eta_{\text{energy}} = \frac{E_{\text{usable}}}{E_{\text{input}}} = \frac{E_{\text{Hydrogen}}}{E_{\text{electric}}} \quad (3.6)$$

Στη συνέχεια παριστάνεται το διάγραμμα του παραγόμενου όγκου υδρογόνου συναρτήσει του χρόνου (σχήμα 3.7).



**Σχήμα 3.7:**  $F(t)=V$ .

## Ανάλυση μέρος 2<sup>ο</sup>

Υπολογισμός της απόδοσης του ηλεκτρολύτη.

$$\eta_{\text{energy}} = \frac{E_{\text{Hydrogen}}}{E_{\text{electric}}} = \frac{V_{\text{H}_2} \cdot H_h}{\bar{U} \cdot \bar{I} \cdot t} \quad (3.7)$$

$$\eta_{\text{energy}} = \frac{3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot 12,745 \cdot 10^6 \cdot \frac{\text{J}}{\text{m}^3}}{1,94 \text{ V} \cdot 1,01 \text{ A} \cdot 238 \text{ s}} = 0,82 = 82 \% \quad (3.8)$$

Όπου:

$H_h$  = θερμογόμος δύναμη του υδρογόνου =  $12,745 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$

$V_{\text{H}_2}$  = παραγόμενη ποσότητα υδρογόνου σε  $\text{m}^3$

$I$  = ένταση σε A

$U$  = τάση σε V

$t$  = χρόνος σε s

Συζήτηση:

Ο πίνακας 3 δείχνει ότι η ηλεκτρική ισχύς που καταναλώνει ο ηλεκτρολύτης είναι συνεχής. Επίσης, η παραγωγή του υδρογόνου είναι και αυτή συνεχής, δεδομένου ότι όγκος του αερίου είναι ευθέως ανάλογος του χρόνου. Σε αυτό το πείραμα, η απόδοση του ηλεκτρολύτη είναι 82 %. Αυτό σημαίνει ότι το 82 % της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε για την λειτουργία του ηλεκτρολύτη είναι αποθηκευμένη στο αέριο υδρογόνο. Απώλειες εμφανίζονται κατά την υπέρταση εξαιτίας συγκεκριμένων ηλεκτροδίων (γενικά υπέρταση ορίζεται ως η απόκλιση της θεωρητικής από την πραγματική πειραματική τιμή της τάσης αποσύνθεσης), στην εσωτερική αντίσταση του ηλεκτρολυτικού κελιού και εντός του κελιού λόγω διάχυσης των αερίων.

### 3.1.4 Απόδοση Faraday του ηλεκτρολύτη

Χρησιμοποιώντας τον δεύτερο νόμο του Faraday για ιδανικά αέρια, μπορεί να οριστεί μία σχέση μεταξύ της ροής ρεύματος και τον θεωρητικό όγκο παραγωγής αερίου από τον ηλεκτρολύτη. Η απόδοση του Faraday για τον ηλεκτρολύτη προέρχεται από την αναλογία του πραγματικού όγκου του αερίου που παράγεται με τον υπολογισμένο θεωρητικό όγκο του αερίου.

Ανάλυση:

2<sup>ος</sup> νόμος του Faraday:

$$Q = I \cdot t = n \cdot z \cdot F \quad (3.9)$$

Νόμος ιδανικών αερίων:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (3.10)$$

Συνδυάζοντας τους παραπάνω δύο τύπους, μπορεί να υπολογιστεί ο όγκος του αερίου:

$$V = \frac{R \cdot I \cdot T \cdot t}{F \cdot p \cdot z} \quad (3.11)$$

Όπου:

V = θεωρητικός όγκος παραγόμενου αερίου σε m<sup>3</sup>.

R = παγκόσμια σταθερά αερίων = 8,314  $\frac{J}{mol \cdot K}$ .

p = ατμοσφαιρική πίεση σε Pa (1 Pa = 1  $\frac{N}{m^2}$ ).

F = σταθερά Faraday = 96485  $\frac{C}{mol}$ .

T = θερμοκρασία περιβάλλοντος σε K.

I = ένταση ρεύματος σε A.

t = χρόνος σε s.

Q = ηλεκτρικό φορτίο σε C.

n = ποσότητα της ουσίας σε mol.

z = αριθμός ηλεκτρονίων για την απελευθέρωση ενός μορίου.

z (H<sub>2</sub>) = 2, δηλαδή απαιτούνται δύο μόρια ηλεκτρονίων για την απελευθέρωση ενός μορίου υδρογόνου.

z (O<sub>2</sub>) = 4.

$$V_{(calculated)} = \frac{R \cdot I \cdot T \cdot t}{F \cdot p \cdot z} = \frac{8,314 \frac{J}{mol \cdot K} \cdot 1,01A \cdot 298K \cdot 238s}{96485 \frac{C}{mol} \cdot 1,013 \cdot 10^5 Pa \cdot 2} \quad (3.12)$$

$$V_{(calculated)} = 3,05 \cdot 10^{-5} m^3 = 30,5 cm^3$$

Η απόδοση Faraday προκύπτει από τον ακόλουθο τύπο:

$$\eta_{Faraday} = \frac{V_{H_2} (produced)}{V_{H_2} (calculated)} \quad (3.13)$$

Ο πραγματικός όγκος υδρογόνου που παράχθηκε στο πείραμα είναι, V<sub>H<sub>2</sub></sub> = 30 cm<sup>3</sup>



Οπότε η απόδοση Faraday είναι:

$$\eta_{\text{Faraday}} = \frac{30 \text{ cm}^3}{30,5 \text{ cm}^3} = 0,98 = 98\% \quad (3.14)$$

Συζήτηση:

Η διαφορά μεταξύ θεωρητικού και πραγματικού όγκου του παραγόμενου αερίου είναι πολύ μικρή. Ουσιαστικά το ηλεκτρικό ρεύμα μετατρέπεται μόνο για την προβλεπόμενη αντίδραση (διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο), δηλαδή δεν εμφανίζεται καμία περιττή αντίδραση. Επίσης, μπορεί να εμφανιστούν πολύ μικρές απώλειες διάχυσης εντός ενός κελιού. Αυτές οι απώλειες είναι αποτέλεσμα πολύ μικρών μερών αερίου που διαχέονται μέσω της μεμβράνης του ηλεκτρολύτη και αντιδρούν με τον καταλύτη, παράγοντας νερό. Επιπλέον, ένα μικρό μέρος του αερίου που παράγεται μετατρέπεται απευθείας χωρίς να έχει την δυνατότητα να ξεφύγει από το κελί.

### 3.1.5 Πείραμα με την PEM κυψέλη καυσίμου.

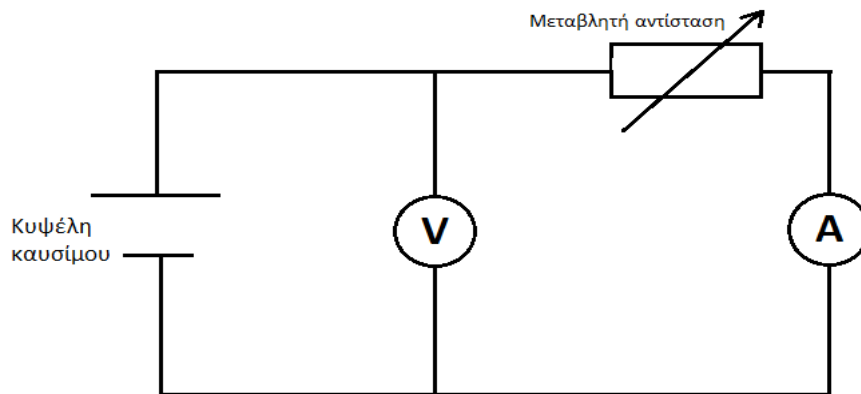
Η κυψέλη καυσίμου πρέπει να υγραίνεται πολύ καλά. Ωστόσο, αν υπάρχουν σταγόνες νερού (υγρασία) στο εσωτερικό της κυψέλης, τότε αυτό μπορεί να παρεμποδίσει τη ροή του αερίου, με αποτέλεσμα η κυψέλη να μην λειτουργήσει όπως θα έπρεπε. Για την αποφυγή των παραπάνω προβλημάτων θα πρέπει:

- Η προσωρινή διακοπή της κυψέλης καυσίμου να γίνεται διακόπτοντας την τροφοδοσία από τον ηλεκτρολύτη ή τις δεξαμενές αποθήκευσης και την αποσύνδεση του φορτίου(μοτέρ).
- Να αφαιρούνται οι αγωγοί τροφοδοσίας που συνδέουν τα αποθηκευτικά δοχεία με την κυψέλη καυσίμου. Πρέπει να ανοιχθούν οι σφικτήρες εξαερισμού και τότε να γίνει μια σύντομη και δυνατή εισαγωγή αέρα φυσώντας μέσα στην κυψέλη, ώστε να απομακρυνθούν τα σταγονίδια.

### 3.1.6 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης και καμπύλη ισχύος για την κυψέλη καυσίμου.

Πειραματική συσκευή:

- PEM κυψέλη καυσίμου.
- Διάφορες αντιστάσεις και μετρητικά όργανα για το ρεύμα και την τάση (μεταβαλλόμενη αντίσταση, δύο πολύμετρα).
- Πηγή υδρογόνου.



**Σχήμα 3.8:** Συνδεσμολογία πειράματος κυψέλης καυσίμου.

Διαδικασία:

Σύνδεση του ηλεκτρολύτη με την πηγή ενέργειας για την παραγωγή υδρογόνου και οξυγόνου. Στη συνέχεια, σύνδεση των υποδοχών εξαγωγής του ηλεκτρολύτη με τις υποδοχές εισαγωγής των αποθηκευτικών δοχείων και τέλος σύνδεση των εξαγωγών των δοχείων στις υποδοχές εισαγωγής της κυψέλης καυσίμου και κλείσιμο των εξαγωγών. Ύστερα, από την παραγωγή περίπου  $5 \text{ cm}^3$  υδρογόνου πρέπει να ανοιχθούν οι εξαγωγές της κυψέλης καυσίμου να καθαριστούν με αέριο και να κλιστούν ξανά. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την αφαίρεση των υπολειμματικών αερίων που θα αλλοίωναν τις μετρήσεις. Για την αποτροπή χρήσης υδρογόνου από την κυψέλη καυσίμου πριν παρθούν οι μετρήσεις θα πρέπει η κυψέλη καυσίμου να αλλάξει σε ανοιχτό κύκλωμα. Στη συνέχεια αρχίζει η καταγραφή της έντασης-τάσης σε έναν πίνακα χρησιμοποιώντας τάση ανοιχτού κυκλώματος ( $R = \infty$ ). Επιπλέον, η μεταβαλλόμενη αντίσταση πρέπει να μειώνεται σταδιακά από μεγαλύτερες σε χαμηλότερες τιμές. Στη συνέχεια στον πίνακα 4 καταγράφονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

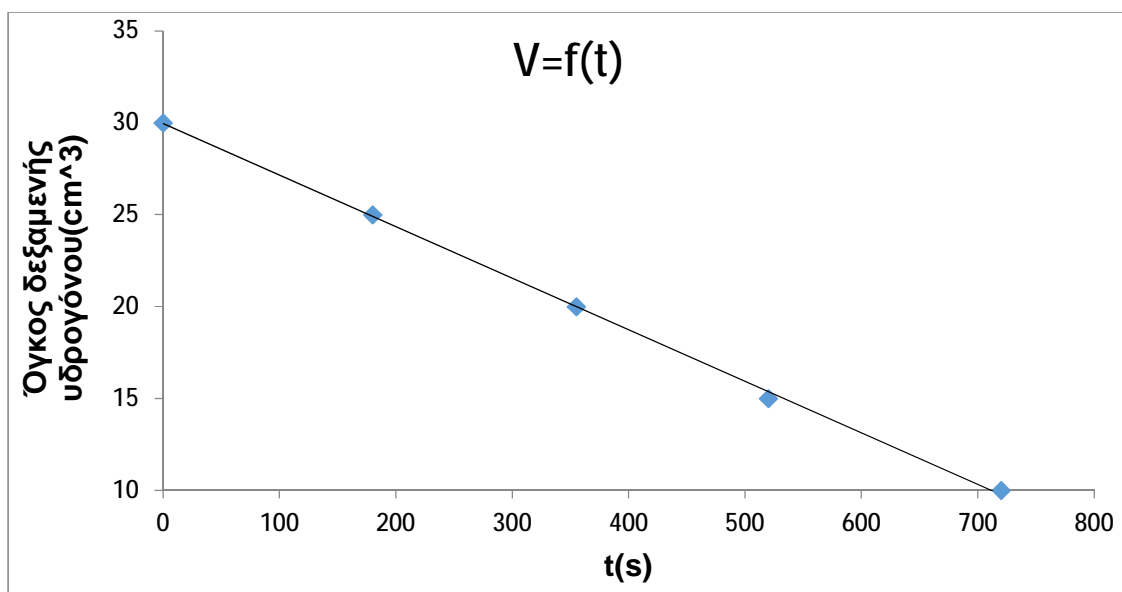
α/α	R( $\Omega$ )	U(V)	I(A)	P(W) $P=U \cdot I$
1	$\infty$	0,99	0	0
2	330	0,97	0,01	0,01
3	100	0,95	0,01	0,01
4	33	0,9	0,03	0,027
5	10	0,84	0,08	0,067
6	3,3	0,76	0,22	0,167
7	1	0,62	0,56	0,347
8	0,33	0,47	1,05	0,494
9	0,1	0,32	1,43	0,458
10	0	0,24	1,61	0,386

**Πίνακας 4:** Αποτελέσματα μετρήσεων της κυψέλης καυσίμου.

Στην συνέχεια μετριέται ο ρυθμός πλήρωσης της δεξαμενής του υδρογόνου και ο ρυθμός κατανάλωσης του υδρογόνου από την κυψέλη καυσίμου σε  $\text{cm}^3/\text{s}$  παριστάνονται στα παρακάτω σχήματα 3.9 και 3.10 αντίστοιχα.

$\alpha/\alpha$	$t(\text{s})$	$v(\text{cm}^3)$
1	0	30
2	180	25
3	355	20
4	520	15
5	720	10

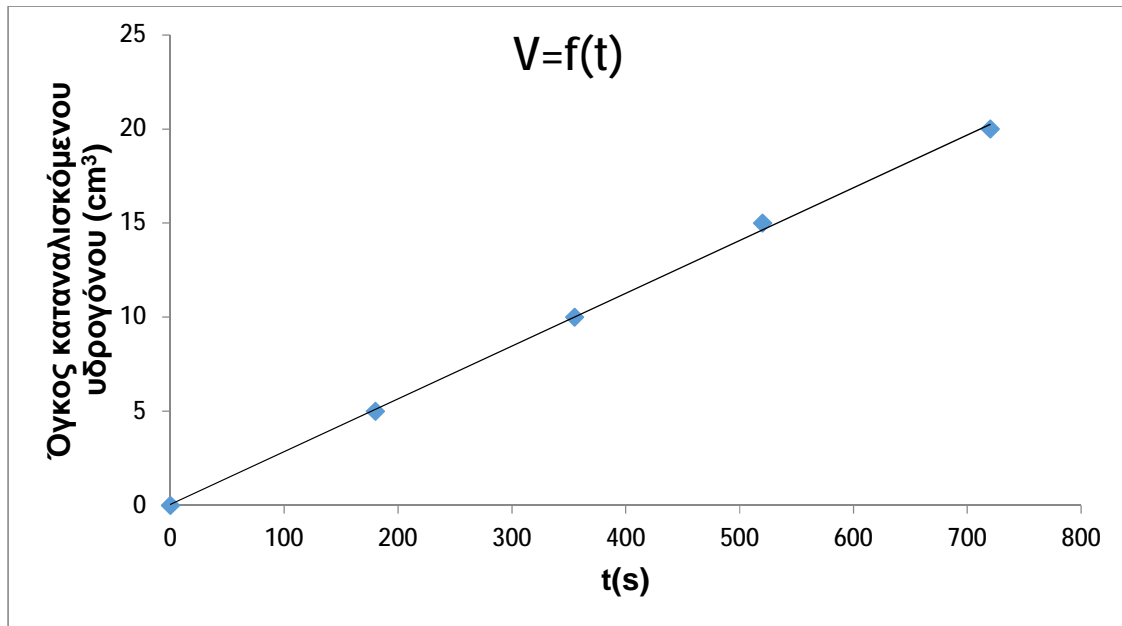
**Πίνακας 5:** Ρυθμός πλήρωσης δεξαμενής υδρογόνου.



**Σχήμα 3.9:** Ρυθμός πλήρωσης δεξαμενής υδρογόνου.

$\alpha/\alpha$	$t(\text{s})$	$V(\text{cm}^3)$
1	0	0
2	180	5
3	355	10
4	520	15
5	720	20

**Πίνακας 6:** Ρυθμός πλήρωσης όγκου δοχείου υδρογόνου.



**Σχήμα 3.10:** Ρυθμός κατανάλωσης υδρογόνου.

Ανάλυση:

Υπολογισμός απόδοσης της κυψέλης καυσίμου:

$$\eta_{\text{energy}} = \frac{E_{\text{electric}}}{E_{\text{Hydrogen}}} = \frac{\bar{U} \cdot I \cdot t}{V_{\text{H}_2} \cdot H_1}$$

$$\eta_{\text{energy}} = \frac{0,72 \text{ V} \cdot 0,21 \text{ A} \cdot 712 \text{ s}}{20 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot 10,8 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^3}} = 0,498 \approx 50 \%$$

Όπου:

$H_1$  = θερμογόνος δύναμη του υδρογόνου =  $10,8 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$

$V_{\text{H}_2}$  = καταναλισκόμενη ποσότητα υδρογόνου σε  $\text{m}^3$

$U$  = τάση σε V

$I$  = ρεύμα σε A

$t$  = χρόνος σε s

Συζήτηση:

Τα σχήματα 3.9 και 3.10 δείχνουν ότι ο όγκος του καταναλισκόμενου αερίου είναι ευθέως ανάλογος με τον χρόνο. Η απόδοση της κυψέλης καυσίμου στο πείραμα υπολογίστηκε ίση με 50%. Αυτό σημαίνει πως το 50% της ενέργειας που αποθηκεύτηκε στο υδρογόνο εξάχθηκε από την κυψέλη καυσίμου ως ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης, η κυψέλη καυσίμου παράγει και θερμική ενέργεια, που στην περίπτωση που δεν χρησιμο-

ποιοηθεί καλείται ως χαμένη ενέργεια. Αυτό περιορίζει την ενεργειακή απόδοση από την αρχή. Για τον υπολογισμό της ιδανικής απόδοσης  $\eta$ , ορίζεται ο λόγος της ελεύθερης αντίδρασης της ενθαλπίας  $\Delta G$  (αποβαλλόμενο έργο κατά την διάρκεια της αντίδρασης) προς την αντίδραση της ενθαλπίας  $\Delta H$  (αποβαλλόμενη ενέργεια κατά την διάρκεια της αντίδρασης).

$$\eta_{id} = \frac{\Delta G}{\Delta H}$$

Η διαφορά μεταξύ της ελεύθερης αντίδρασης της ενθαλπίας  $\Delta G$  με την αντίδραση της ενθαλπίας  $\Delta H$ , είναι η αποβαλλόμενη θερμότητα  $Q$ . Η θερμότητα μπορεί να περιγραφεί ως προϊόν της θερμοκρασίας  $T$  και της αντίδρασης της εντροπίας  $\Delta S$ .

$$Q = T \cdot \Delta S$$

Η αντίδραση της ενθαλπίας μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο:

$$\Delta H = \Delta G + T \cdot \Delta S$$

Η ιδανική απόδοση υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\eta_{id} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{\Delta H - T \cdot \Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{T \cdot \Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{298\text{K} \cdot (-162,985 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}})}{-285840 \frac{\text{J}}{\text{mol}}}$$

$$\eta_{id} = 0,83 = 83 \%$$

Όπου:

$T$  = θερμοκρασία 298 K

$\Delta S$  = η εντροπία σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας =  $-162,985 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

$\Delta H$  = η ενθαλπία σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας =  $-285840 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$

Η ενεργειακή απόδοση από 83 % έχει μειωθεί λόγω των απωλειών τάσης που εκδηλώνονται ως θερμότητα. Ως αποτέλεσμα των υπερτάσεων που οφείλονται σε συγκεκριμένα ηλεκτρόδια, η εσωτερική αντίσταση της κυψέλης καυσίμου και η εξάπλωση των απωλειών μέσα στην κυψέλη καυσίμου, δεν επιτρέπει ποτέ την ιδανική τάση της κυψέλης να φτάσει την τιμή των 1,23 V. Παρόμοια με την κυψέλη καυσίμου, ο ηλεκτρολύτης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το επίπεδο ισχύος. Ωστόσο, η απόδοση της κυψέλης καυσίμου είναι υψηλή, αν το φορτίο έχει μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση, αυτό ισχύει μόνο για λειτουργία σε μερικό φορτίο. Επίσης, η εξαγόμενη ισχύς είναι μικρότερη από αυτήν που μπορεί να παραχθεί.

### 3.1.7 Απόδοση Faraday για την PEM κυψέλη καυσίμου.

Για τον υπολογισμό της απόδοσης Faraday, θα χρησιμοποιηθούν ο 2<sup>ος</sup> νόμος του Faraday και ο νόμος των ιδανικών αερίων. Έτσι, θα οριστεί η σχέση μεταξύ του ρεύματος και του όγκου του αερίου που θα καταναλωθεί από την κυψέλη καυσίμου. Επίσης, η απόδοση Faraday μπορεί να προέρθει από την αναλογία του υπολογισμένου θεωρητικού όγκου αερίου με τον πραγματικό όγκο καταναλισκόμενου αερίου.

Ανάλυση:

2<sup>ος</sup> νόμος του Faraday:

$$Q = I \cdot t = n \cdot z \cdot F$$

Νόμος ιδανικών αερίων:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Συνδυάζοντας τους παραπάνω δύο τύπους, μπορεί να υπολογιστεί ο όγκος του αερίου:

$$V = \frac{R \cdot I \cdot T \cdot t}{F \cdot p \cdot z}$$

Όπου:

V = θεωρητικός όγκος καταναλισκόμενου αερίου

R = παγκόσμια σταθερά αερίων =  $8,314 \frac{J}{mol \cdot K}$

p = ατμοσφαιρική πίεση σε Pa ( $1 Pa = 1 \frac{N}{m^2}$ )

F = σταθερά Faraday =  $96485 \frac{C}{mol}$

T = θερμοκρασία περιβάλλοντος σε K

I = ένταση ρεύματος σε A

t = χρόνος σε s

Q = ηλεκτρικό φορτίο σε C

n = ποσότητα της ουσίας σε mol

z = αριθμός ηλεκτρονίων για την απελευθέρωση ενός μορίου

z (H<sub>2</sub>) = 2, δηλαδή απαιτούνται δύο μόρια ηλεκτρονίων για την απελευθέρωση ενός μορίου υδρογόνου.

z (O<sub>2</sub>) = 4

$$\eta_{Faraday} = \frac{V_{H_2}(\text{calculated})}{V_{H_2}(\text{consumed})}$$

Ο όγκος υδρογόνου που καταναλώθηκε στο πείραμα είναι:

$$V_{H_2}(\text{consumed}) = 20 \text{ cm}^3$$

$$V_{H_2(\text{calculated})} = \frac{R \cdot I \cdot T \cdot t}{F \cdot p \cdot z} = \frac{8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 0,21 \text{ A} \cdot 298 \text{ K} \cdot 712 \text{ s}}{96485 \frac{\text{C}}{\text{mol}} \cdot 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 2}$$

$$V_{H_2(\text{calculated})} = 18,96 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 = 18,96 \text{ cm}^3$$

$$\eta_{\text{Faraday}} = \frac{18,96 \text{ cm}^3}{20 \text{ cm}^3} = 0,948 \approx 95 \%$$

Συζήτηση:

Ο όγκος του πραγματικού καταναλισκόμενου αερίου είναι λίγο μεγαλύτερος από τον υπολογιζόμενο όγκο. Δεδομένου ότι οι απώλειες της κυψέλης καυσίμου είναι παρόμοιες με εκείνες του ηλεκτρολύτη. Ωστόσο, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πειράματος, η απόδοση Faraday της κυψέλης καυσίμου είναι λίγο μικρότερη από αυτή του ηλεκτρολύτη. Αυτό συμβαίνει λόγω της μικρότερης έντασης ρεύματος. Οπότε απαιτείται περισσότερος χρόνος για την ένωση του νερού από ότι για την διάσπαση του. Σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, διαχέεται περισσότερο υδρογόνο δια μέσου της μεμβράνης και στη συνέχεια δεν είναι πλέον διαθέσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

## 3.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ.

### 3.2.1 Λειτουργικοί περιορισμοί ηλεκτρολύτη PEM.

Σε αρκετές περιπτώσεις ο ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται σαν ελεγχόμενο φορτίο, που σημαίνει ότι τροφοδοτείται με την περίσσεια ισχύς που υπάρχει στο σύστημα. Αυτό μπορεί να επιφέρει τη διακοπτόμενη λειτουργία και τη μεγάλη κυμάτωση ισχύος του ηλεκτρολύτη. Επίσης, στην περίπτωση της περίσσειας ισχύος το πρόβλημα που προκύπτει είναι πως ο ρυθμός παραγωγής του υδρογόνου και του οξυγόνου είναι μικρότερος από τον ρυθμό των αερίων που διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ανάμιξη του υδρογόνου με το οξυγόνο, το οποίο μπορεί να κάνει πολύ επικίνδυνες τις συνθήκες στο εσωτερικό του ηλεκτρολύτη.

Το υδρογόνο αναφλέγεται όταν αναμιγνύεται με το οξυγόνο σε συγκέντρωση 4,6% έως 93,9%, ωστόσο για την αποφυγή αυτού η συσκευή απενεργοποιείται αυτόματα σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις. Το υδρογόνο διεισδύει στο Nafion με ρυθμό μικρότερο από  $1,25 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{cm}^2\text{s}$  σε θερμοκρασία 80 °C και ατμοσφαιρική πίεση, που σημαίνει πυκνότητα ρεύματος ίση με  $0,002 \text{ A}/\text{cm}^2$ . Αυτή η τιμή είναι πολύ μικρή σε σχέση με την τυπική πυκνότητα ρεύματος  $1 \text{ A}/\text{cm}^2$  ενός ηλεκτρολύτη PEM. Ωστόσο, ο ρυθμός

διαπερατότητας του υδρογόνου αυξάνεται γραμμικά με την πίεση, δηλαδή σε πίεση 200 bar οι απώλειες του υδρογόνου είναι  $0,4 \text{ A/cm}^2$ .

Επίσης, ένα ακόμη πρόβλημα που έχει να κάνει με την κυμάτωση της ισχύος είναι η θερμική διαχείριση. Ο ηλεκτρολύτης για να φτάσει την επιθυμητή θερμοκρασία λειτουργίας χρειάζεται ένα χρονικό διάστημα, αλλά λόγω της διακοπτόμενης λειτουργίας, λειτουργεί σε θερμοκρασίες μικρότερες της ονομαστικής, έχοντας σαν αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης του. Επιπλέον, όταν οι αλλαγές της ισχύος είναι πιο γρήγορες από το ρυθμό επεξεργασίας των αερίων είναι δύσκολο να ελεγχθεί η πίεση, μειώνοντας έτσι την ασφάλεια του συστήματος. Στην περίπτωση που ο ηλεκτρολύτης παράγει υδρογόνο υψηλής πίεσης, θα πρέπει η πολυμερή μεμβράνη να είναι υψηλής αντοχής και να επιλέγονται κατάλληλα υλικά. Σύμφωνα με την εξίσωση του Nernst κατά την διάρκεια της ηλεκτρόλυσης, η διαδικασία της συμπίεσης αυξάνει ελαφρά την τάση των κελιών.

Όσον αφορά την απόδοση του ηλεκτρολύτη είναι αντιστρόφως ανάλογη της τάσης του κελιού, που αυτή εξαρτάται από την πυκνότητα του ρεύματος, η οποία είναι ανάλογη με το ρυθμό παραγωγής υδρογόνου ανά μονάδα ενεργού επιφάνειας του ηλεκτροδίου. Όταν η τάση είναι υψηλή το αποτέλεσμα είναι να αυξάνεται η παραγωγή του υδρογόνου, αλλά και να μειώνεται η απόδοση. Επίσης, η απόδοση μειώνεται και λόγω των απωλειών διάχυσης του υδρογόνου μέσα από την μεμβράνη. Αυτές οι απώλειες δεν είναι τόσο σημαντικές για χαμηλές πιέσεις, ωστόσο μπορούν να επηρεάσουν την συνολική απόδοση για πιέσεις μεγαλύτερες των 100 bar. Τέλος, εξαιτίας των βοηθητικών συστημάτων (διατάξεις διαχώρισης του νερού, εναλλάκτες θερμότητας, σύστημα παροχής νερού κ.α.) προκύπτουν σημαντικές απώλειες ισχύος.

Επιπλέον, ένας σημαντικός λειτουργικός περιορισμός για τον ηλεκτρολύτη είναι η διάρκεια ζωής και η υποβάθμιση της απόδοσης του με την πάροδο του χρόνου. Από μελέτες έχει παρατηρηθεί πως η τάση του ηλεκτρολύτη αυξάνεται ανάλογα με το χρόνο λειτουργίας του. Τις πρώτες 2,000 ώρες λειτουργίας η τάση αυξάνεται απότομα 20-50  $\mu\text{V/h}$ , αλλά στη συνέχεια μειώνεται και γίνεται μικρότερη από 3  $\mu\text{V/h}$ . Η αύξηση αυτή οφείλεται στην εξισορρόπηση της περιεκτικότητας του νερού στη μεμβράνη και της οξειδωσης του καταλύτη και των άλλων μεταλλικών μερών. Όπως έχει αναφερθεί, η αυξημένη τάση σε μία μονάδα έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης της.

### **3.2.2 Λειτουργικοί περιορισμοί κυψέλης καυσίμου PEM.**

Όπως οι ηλεκτρολύτες PEM έτσι και οι κυψέλες καυσίμου PEM έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής και η απόδοση τους υποβαθμίζεται με την πάροδο του χρόνου. Επίσης, άλλο ένα πρόβλημα είναι η αντοχή τους σε μεταβατικά φορτία τύπου on/off, καθώς έχει αποδειχθεί πως η αυξομείωση του δυναμικού της κυψέλης καταστρέφει τον καταλύτη στα ηλεκτρόδια. Επιπροσθέτως, υπό συνθήκες ανοικτοκύκλωσης όταν η μεμβράνη και το ηλεκτρόδιο εκτίθενται σε μείγμα υδρογόνου και αέρα, προκαλείται χημική υποβάθμιση της μεμβράνης. Επιπλέον, ανάλογα με το ρεύμα φόρτισης η περιεκτικότητα του νερού εμφανίζει κάποιες διακυμάνσεις, συμβάλλοντας έτσι στην μηχανική υποβάθμιση της μεμβράνης.



Για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος μια σημαντική παράμετρος είναι η δυναμική απόκριση της κυψέλης σε μεταβατικά φορτία λόγω των καθυστερήσεων. Η δυναμική απόκριση της κυψέλης καυσίμου PEM εξαρτάται κυρίως από το φαινόμενο ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας, τις μηχανικές καθυστερήσεις ροής του καυσίμου, οξειδωτικού και τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά της κυψέλης. Παρά το ότι είναι αρκετά μεγάλη η χωρητικότητα  $C$ , η σταθερά χρόνου  $\tau = (R_{act} + R_{conc}) \cdot C$  είναι μικρή, διότι είναι αρκετά μικρή η ποσότητα  $(R_{act} + R_{conc})$ , όταν η λειτουργία της κυψέλης είναι στη γραμμική περιοχή. Οπότε, η δυναμική απόκριση επηρεάζεται από την χωρητικότητα  $C$  σε μικρή κλίμακα χρόνου. Αντιθέτως, λόγω των απότομων αλλαγών του φορτίου, η ροή του καυσίμου και του οξειδωτικού δεν μπορεί να ανταποκριθεί ακαριαία, έχοντας ως αποτέλεσμα την δημιουργία μηχανικών καθυστερήσεων που μπορεί να είναι από δεκάδες έως εκατοντάδες δευτερόλεπτα. Ούτε η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης δεν αλλάζει ακαριαία, αλλά χρειάζεται μερικά λεπτά. Οπότε, το φαινόμενο της διπλοστοιβάδας καλύπτεται από τις μηχανικές καθυστερήσεις και τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά της κυψέλης.

Επίσης, είναι σημαντικό για την προστασία της συστοιχίας να περιορίζεται ο συντελεστής χρησιμοποίησης του καυσίμου, ώστε να αποφευχθούν η υποχρησιμοποίηση, υπερχρησιμοποίηση του καυσίμου και η υπόταση. Στην υποχρησιμοποίηση του καυσίμου η τάση της κυψέλης αυξάνεται απότομα, για αυτό το ρεύμα της κυψέλης πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το κατώτερο ρεύμα της συστοιχίας. Στην υπερχρησιμοποίηση του καυσίμου μπορούν να προκληθούν μόνιμες βλάβες και έλλειψη καυσίμου στις κυψέλες, για αυτό το ρεύμα της κυψέλης πρέπει να είναι μικρότερο από το ανώτατο ρεύμα της συστοιχίας. Τέλος, κατά την υπόταση για τάση μικρότερη των 0,5 V, η τάση μειώνεται απότομα όταν αυξάνεται το ρεύμα. Μία ικανοποιητική τιμή για τον συντελεστή χρησιμοποίησης είναι από 0,8 έως 0,9.

Συνοψίζοντας, η λειτουργία της κυψέλης υπό μεταβατικά μειώνει την απόδοση της, επιφέρει καθυστερήσεις στην απόκριση της ισχύος της, μειώνεται ο χρόνος ζωής της και υποβαθμίζονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της. Για την αποφυγή των παραπάνω, η χρήση μιας επιπλέον ενεργειακής πηγής θα μείωνε την διακύμανση τάσης της κυψέλης καυσίμου και αυτό μπορεί να γίνει με την χρήση υπερπυκνωτών.

### 3.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

Η απόδοση της πειραματικής διάταξης είναι αρκετά υψηλή σε σχέση με τις συμβατικές πηγές παραγωγής ενέργειας. Αυτό το γεγονός την καθιστά αρκετά ελκυστική ώστε να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά σε ευρεία κλίμακα στις καθημερινές ενεργειακές ανάγκες. Επίσης, θα μπορούσε να αντικαταστήσει, σε μεγάλο βαθμό, τα συμβατικά καύσιμα για την παραγωγή ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, συμβάλλει στην μείωση των ρύπων και στην γενικότερη εξυγίανση του περιβάλλοντος. Επιπλέον η διάταξη αυτή

μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την άμεση παραγωγή ενέργειας σε περιοχές που δεν έχουν πρόσβαση στο δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. αυτόνομες φάρμες).

Η διάταξη αποτελείται από τέσσερις επιμέρους συσκευές, οι συσκευές αυτές είναι το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, το ηλεκτρολυτικό κελί, η κυψέλη καυσίμου και το φορτίο (ηλεκτρικός κινητήρας). Όπου το φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχει απόδοση 13%, το ηλεκτρολυτικό κελί 82% και η κυψέλη καυσίμου 50%. Όπως φαίνεται το φωτοβολταϊκό πλαίσιο δεν έχει μεγάλη απόδοση. Όσον αφορά την απόδοση του ηλεκτρολυτικού κελιού και της κυψέλης καυσίμου είναι αρκετά υψηλή.

Τα πλεονεκτήματα της πειραματικής διάταξης αυτής είναι:

- Η φορητότητα και η δυνατότητα της να μεταφερθεί σε σημεία που υπάρχει άμεση ανάγκη ενέργειας.
- Είναι φιλική προς το περιβάλλον καθώς το υδρογόνο κάνει καθαρή καύση με το οξυγόνο και παράγεται μικρή ποσότητα υδρατμών.
- Η ενέργεια που παράγεται είναι δωρεάν καθώς προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Το υδρογόνο είναι το κατάλληλο καύσιμο αφού έχει το μεγαλύτερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους.
- Δεν έχει κινούμενα μέρη, οπότε δεν υπάρχουν δονήσεις και φθορές.
- Εύκολη αντικατάσταση των συσκευών που αποτελούν την πειραματική διάταξη, στην περίπτωση βλάβης μίας από αυτές.

Τα μειονεκτήματα της πειραματικής διάταξης είναι:

- Το υψηλό κόστος του ηλεκτρολυτικού κελιού και της κυψέλης καυσίμου.
- Η υψηλή επικινδυνότητα στην περίπτωση διαρροής του υδρογόνου.
- Η μικρή απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου το οποίο είναι και το κύριο μέσο εκμετάλλευσης της κύριας ενέργειας εισόδου (ηλιακή ενέργεια).

Παρόλα αυτά, η απόδοση της πειραματικής συσκευής μπορεί να αυξηθεί βελτιώνοντας τα επιμέρους τμήματα που την αποτελούν. Συγκεκριμένα, αν αντικατασταθεί το φωτοβολταϊκό πάνελ με ένα άλλο μεγαλύτερης απόδοσης. Επιπρόσθετα, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικού τύπου μεμβράνες με σκοπό την μείωση του κόστους και την αύξηση της απόδοσης του ηλεκτρολυτικού κελιού και της κυψέλης καυσίμου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.

1. Γεώργιος Μαρνέλλος Διάλεξη με τίτλο <<Παραγωγή Υδρογόνου>>
2. Ε. ΒΡΕΤΤΟΣ, “ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΕ – ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ – ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2010.
3. Η. ΓΚΟΥΓΚΑΣ, “ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΙΣΟΔΥΝΑΜΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC)”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2009.
4. Καραγιάννη Αναστασία, Πτυχιακή εργασία με τίτλο <<ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ>>
5. Κουτουλιέρης Γεώργιος, Διπλωματική εργασία με τίτλο << Ηλεκτρόλυση και φαινόμενα εκκένωσης αίγλης>>
6. Κυριάκος Νεοκλής Διπλωματική Εργασία με τίτλο «ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ»
7. Λάμπρου Ευάγγελος, Σιακούλης Ορέστης Διπλωματική Εργασία με τίτλο <<ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ>>
8. Νικόλαος Τσολάκης διπλωματική εργασία με τίτλο <<ΜΕΛΕΤΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΑΠΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗ ΛΥΜΑΤΩΝ ΧΟΙΡΩΝ ΣΕ ΔΥΟ ΕΝ ΣΕΙΡΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΥΣ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ>>
9. Τσαρκοβεντσης Τασος, Μελιδονιωτης Στεργιος, διπλωματική εργασία με τίτλο <<ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΗΝ ΣΥΣΚΕΥΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ >>
10. Frano Barbir: “PEM Fuel Cells: Theory and Practice”, Elsevier Academic Press, 2005.
11. Fujishima AK, Honda K 1972, “Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode, Nature (London).
12. Ken Knany, Keith Frasher: “Fuel Cell Electronics Packaging”, Springer, 2007.
13. Kreuter W, and Hofmann H, 1998, “Electrolysis: the important energy transformer in a world of sustainable energy”, Int. J. Hydrogen Energy.
14. Millet P, Andolfatto F and Durand R, 1996, “Design and performance of a solid polymer electrolyte water electrolyser”, Int. J. Hydrogen Energy.
15. Neagu C, Jansen H, Gardeniers H, and Elwenspoek M, 2000, “The electrolysis of water: An actuation principle for MEMS with a big opportunity”, Mechatronics:

- 571-581.
16. O. ULLEBERG, "Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 28,2003.
  17. Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review, NREL/CP-570-30535.
  18. Supsamaniam Srinivasm: "Fuel Cells from Fundamentals to Applications", Springer,
  19. Ryan O' Hayre, Suk-Won Cha, Whitney Colella, Fritz B.Prinz: "Fuel Cell Fundamentals", Wiley, 2006.
  20. Van der Stegen JHG, Van der Veen AJ, Weerdenburg H, Hogendoorn JA, and Versteeg GF, 1999, Application of the Maxwell-Stefan theory to the transport in ion-selective membranes used in the chlor-alkali electrolysis process", Chemical Engineering Science 54.
  21. [http://49lyk-athin.att.sch.gr/AJIOPOIHSH\\_ENERDEIAS.htm](http://49lyk-athin.att.sch.gr/AJIOPOIHSH_ENERDEIAS.htm)
  22. [http://ape.chania.teicrete.gr/gr/files/HPIESI\\_Pres\\_04\\_Solar\\_Collectors.pdf](http://ape.chania.teicrete.gr/gr/files/HPIESI_Pres_04_Solar_Collectors.pdf)
  23. <http://theros.gr/Proionta/Eidiseis-proionton/Mipos-oi--ftinoi--iliakoi-kenou-einai-telika-polu-akriboi/index.php>
  24. <http://www.tmth.gr/home/59-applications/560-photovoltaika>
  25. <http://slideplayer.com/slide/4218419/>
  26. <http://slideplayer.gr/slide/2007780/>
  27. <https://hydropole.ch/en/hydrogen/about2/>
  28. [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF#.CE.91.CF.83.CF.86.CE.AC.CE.BB.CE.B5.CE.B9.CE.B1\\_.CE.BA.CE.B1.CE.B9\\_.CF.80.CF.81.CE.BF.CF.86.CF.85.CE.BB.CE.AC.CE.BE.CE.B5.CE.B9.CF.82](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF#.CE.91.CF.83.CF.86.CE.AC.CE.BB.CE.B5.CE.B9.CE.B1_.CE.BA.CE.B1.CE.B9_.CF.80.CF.81.CE.BF.CF.86.CF.85.CE.BB.CE.AC.CE.BE.CE.B5.CE.B9.CF.82)
  29. [http://www.mcit.gov.cy/mcit/mcit.nsf/All/7FCCCC67119C7A3AC2257586003AC345/\\$file/%CE%97%CE%9B%CE%99%CE%91%CE%9A%CE%91%20%CE%98%CE%95%CE%A1%CE%9C%CE%99%CE%9A%CE%91%20%CE%A3%CE%A5%CE%A3%CE%A4%CE%97%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%91%20%20%CE%A6%CE%A9%CE%A4%CE%9F%CE%92%CE%9F%CE%9B%CE%A4%CE%91%CE%AA%CE%9A%CE%91.pdf](http://www.mcit.gov.cy/mcit/mcit.nsf/All/7FCCCC67119C7A3AC2257586003AC345/$file/%CE%97%CE%9B%CE%99%CE%91%CE%9A%CE%91%20%CE%98%CE%95%CE%A1%CE%9C%CE%99%CE%9A%CE%91%20%CE%A3%CE%A5%CE%A3%CE%A4%CE%97%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%91%20%20%CE%A6%CE%A9%CE%A4%CE%9F%CE%92%CE%9F%CE%9B%CE%A4%CE%91%CE%AA%CE%9A%CE%91.pdf)
  30. <https://sites.google.com/site/wildwaterwall/eliaka-spitia/3-pathetika-eliaka-systemata-thermanses>

## Εικόνες-Σχήματα.

1. <http://slideplayer.com/slide/740737/>
2. <http://www.opengov.gr/minenv/?p=4204>
3. [http://www.4green.gr/data/fotovoltaika/news/preview\\_news/88888.asp](http://www.4green.gr/data/fotovoltaika/news/preview_news/88888.asp)
4. <http://www.michanikosapps.gr/index.php/blog>
5. <http://www.anadrasi.com/aftonoma-fotovoltaika.php>
6. <http://www.noratex.gr/autonomous.ht>
7. <https://www.youtube.com/watch?v=qCxeqgspN1I>
8. [https://en.wikipedia.org/wiki/Henry\\_Cavendish](https://en.wikipedia.org/wiki/Henry_Cavendish)

9. <http://www.seilnacht.com/chemiker/chelav.html>
10. [https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/MECH101/%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%97%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3%5%CE%B1%CE%A0%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE%20%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF%CF%85\\_oc.pdf](https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/MECH101/%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%97%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3%5%CE%B1%CE%A0%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE%20%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF%CF%85_oc.pdf)
11. Ulleberg, 2003. Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach, International Journal of Hydrogen Energy
12. Kreuter W, and Hofmann H, 1998, "Electrolysis: the important energy transformer in a world of sustainable energy", Int. J. Hydrogen Energy
13. <http://asyncbrain.baf.cz/sanatorium/1/h2fuel>
14. <http://www.tmth.gr/home/59-applications/560-photovoltaika>
15. <http://www.lmco.gr/faq-cx4a>
16. [http://gneng.blogspot.dk/p/blog-page\\_19.html](http://gneng.blogspot.dk/p/blog-page_19.html)
17. <http://www.lmco.gr/faq-cx4a>
18. <http://atlaswiki.gr.wikifoundry.com/page/%CF%80%CE%B7%CE%B3%CE%AD%CF%82+%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CF%82+-%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82>
19. <http://slideplayer.gr/slide/2007780/>
20. <http://www.energotechniki.gr/site/xpage.asp?sid=211&page=banner2>
21. [www.solarwatt.de](http://www.solarwatt.de)
22. [http://www.arcmeletitiki.gr/images/uploads/pdf/arc\\_ape11.pdf](http://www.arcmeletitiki.gr/images/uploads/pdf/arc_ape11.pdf)
23. <http://www.lmco.gr/faq-cx4a>
24. <http://www.lmco.gr/faq-cx4a>
25. [https://en.wikipedia.org/wiki/Polymer\\_electrolyte\\_membrane\\_electrolysis](https://en.wikipedia.org/wiki/Polymer_electrolyte_membrane_electrolysis)
26. <https://www.intechopen.com/books/state-of-the-art-in-biosensors-general-aspects/polymers-for-biosensors-construction>
27. <http://www.mvsengg.com/products/hydrogen/lab-hydrogen/how-it-works/>
28. <https://hydrogen.wsu.edu/vortex-tube/>
29. <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/371/1998/20110628>
30. <https://hydropole.ch/en/hydrogen/about2/>
31. Λάμπρου Ευάγγελος, Σιακούλης Ορέστης Διπλωματική Εργασία με τίτλο <<ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ>>
32. <https://physicsgg.me/2011/06/01/%CF%80%CF%89%CF%82-%CE%BB%CE%B5%CE%B9%CF%84%CE%BF%CF%85%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%AF-%CE%BC%CE%B9%CE%B1-%CE%BA%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/>
33. <http://www.askiitians.com/iit-jee-chemistry/physical-chemistry/fuel-cell.aspx>

34. [https://en.wikipedia.org/wiki/Proton\\_exchange\\_membrane\\_fuel\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Proton_exchange_membrane_fuel_cell)
35. [https://www.researchgate.net/figure/263490254\\_fig1\\_Fig-1-A-schematic-of-polymer-electrolyte-membrane-fuel-cell-PEMFC-Chemical-reactions](https://www.researchgate.net/figure/263490254_fig1_Fig-1-A-schematic-of-polymer-electrolyte-membrane-fuel-cell-PEMFC-Chemical-reactions)
36. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nafion\\_structure.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nafion_structure.png)
37. <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fenrg.2014.00002/full>
38. <https://www.automationworld.com/alternative-energy/european-fuel-cell-technology-features-road-diesel>
39. <http://www.usfcc.com>
40. [http://www.eln.teiste.gr/sites/default/files/lesson05\\_0.pdf](http://www.eln.teiste.gr/sites/default/files/lesson05_0.pdf)