



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

Ειδικά Κεφάλαια Παραγωγής Ενέργειας

Ενότητα 5(α): Παραγωγή Υδρογόνου

Αναπλ. Καθηγητής: Γεώργιος Μαρνέλλος

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ψηφιακά Μαθήματα του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Περιεχόμενα

1. Τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου	4
1.1 Εισαγωγή.....	4
1.2 Οι βασικές τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου περιλαμβάνουν	6
1.3 Υδρογόνο από ορυκτά καύσιμα.....	7
1.3.1 Παραγωγή από το φυσικό αέριο.....	7
1.3.1.1 Αναμόρφωση με ατμό	7
1.3.1.2 Μερική οξείδωση.....	10
1.3.1.3 Αυτόθερμη αναμόρφωση	11
1.3.2 Παραγωγή από τον άνθρακα/λιγνίτη	12
1.3.2.1 Αεριοποίηση άνθρακα/λιγνίτη.....	12
1.3.2.2 Πυρόλυση	13
1.3.3 Δέσμευση και αποθήκευση του CO ₂	13
1.4 Υδρογόνο από την διάσπαση του νερού	14
1.4.1 Ηλεκτρόλυση του νερού	14
1.4.2 Αλκαλική ηλεκτρόλυση	15
1.4.3 Ηλεκτρόλυση σε πολυμερικής μεμβράνης ηλεκτρολύτες (PEM)	16
1.4.4 Ηλεκτρόλυση σε υψηλές θερμοκρασίες.....	17
1.4.5 Άλλοι μέθοδοι διάσπασης του νερού για την παραγωγή υδρογόνου ..	18
1.4.5.1 Φωτο-ηλεκτρόλυση (φωτόλυση).....	18
1.4.5.2 Φωτο-Βιολογική παραγωγή.....	19
1.4.5.3 Θερμο –χημική διάσπαση του νερού.....	19
1.5 Υδρογόνο από τη βιομάζα.....	20
1.5.1 Ζύμωση βιομάζας	21
1.5.2 Αεριοποίηση και πυρόλυση βιομάζας.....	22
1.6 Σημερινή κατάσταση, προοπτικές και εμπόδια για την παραγωγή υδρογόνου.....	23
1.6.1 Κεντροποιημένη παραγωγή υδρογόνου	23
1.6.2 Κατανεμημένη παραγωγή υδρογόνου	24
1.6.3 Δυνατότητες και εμπόδια.....	24

1. Τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου

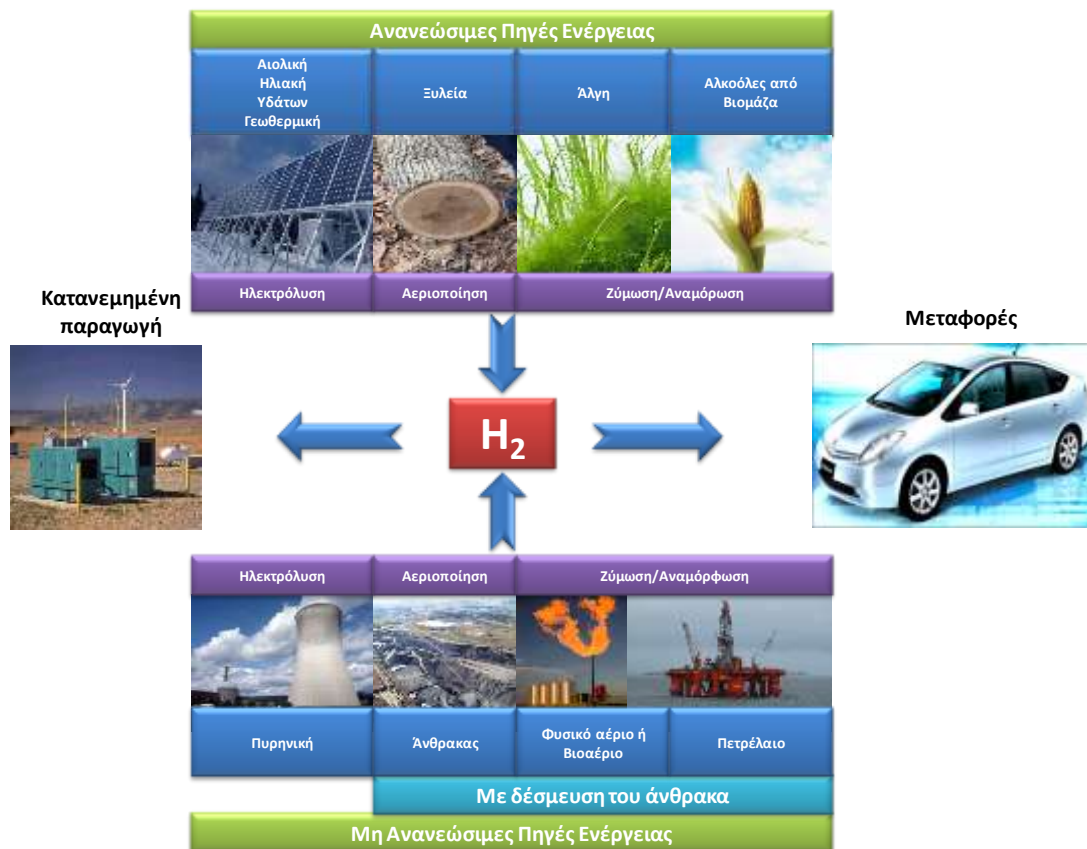
1.1 Εισαγωγή

Το υδρογόνο (H_2) υπάρχει σχεδόν παντού, αλλά δυστυχώς είναι δύσκολο να βρεθεί στη φύση ως ξεχωριστό στοιχείο, αντ' αυτού συνδέεται με χημικό δεσμό με το οξυγόνο στο νερό και με τον άνθρακα σε υδρογονάνθρακες. Το υδρογόνο που υφίσταται δεσμευμένο στο νερό και σε οργανικές ενώσεις αποτελεί περισσότερο από το 70% της γήινης επιφάνειας (Dunn, 2002). Αυτό το άχρωμο, άοσμο, και άγευστο χημικό στοιχείο αποτελεί μία χρήσιμη "πρώτη ύλη" για ποικίλες βιομηχανικές δραστηριότητες και ένα σημαντικότερο καύσιμο που επαρκεί να τροφοδοτήσει το σύνολο των δραστηριοτήτων της κοινωνίας, από τις ανάγκες για ηλεκτρικό στα σπίτια, στις επιχειρήσεις, στη βιομηχανία ακόμα και ως καύσιμο στις μεταφορές.

Σύμφωνα με το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ, η παγκόσμια ετήσια παραγωγική ικανότητα του H_2 προσεγγίζει σήμερα τα 400 δισεκατομμύρια m^3 . Αυτή η ποσότητα ισοδυναμεί με 360 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου, ή με το 10% της παγκόσμιας παραγωγής πετρελαίου το 1999. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ποσότητας υδρογόνου παράγεται στις πετροχημικές βιομηχανίες, χρησιμοποιώντας κυρίως υδρατμούς για την αναμόρφωση του φυσικού αερίου. Το υδρογόνο καταναλώνεται συνήθως επιτόπου και δεν πωλείται στην αγορά. Χρησιμοποιείται κυρίως ως πρώτη ύλη για τον εξευγενισμό του πετρελαίου (π.χ. υδρογονοαποθείωση) και για την παρασκευή λιπασμάτων, πλαστικών, διαλυτών, και άλλων βιομηχανικών προϊόντων. Μόνο το 5% του υδρογόνου μπορεί να χαρακτηριστεί ως "εμπορικό προϊόν" και να μεταφερθεί αλλού σε υγρή ή σε αέρια μορφή (Dunn, 2002).

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

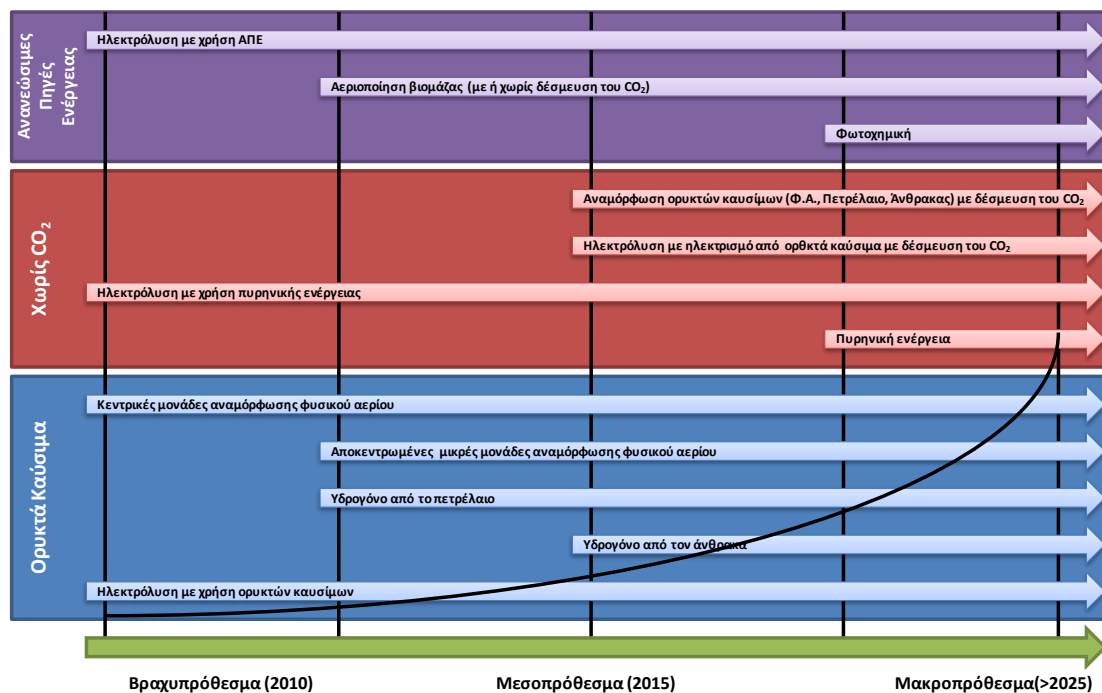
- ✓ ορυκτά καύσιμα (αναμόρφωση του φυσικού αερίου, αεριοποίηση άνθρακα),
- ✓ ανανεώσιμη και πυρηνική ενέργεια (διεργασίες αξιοποίησης της βιομάζας, φωτο-ηλεκτρόλυση, βιολογική παραγωγή, διάσπαση του νερού σε υψηλή θερμοκρασία), και
- ✓ ηλεκτρική ενέργεια (ηλεκτρόλυση του νερού) (Momirlan *et al*, 2002).



Σχήμα 1: Πρώτες ύλες και εναλλακτικές διεργασίες για παραγωγή του H₂.

Κάθε μία από τις παραπάνω τεχνολογίες βρίσκεται σε ένα διαφορετικό στάδιο ανάπτυξης και κάθε μία διακρίνεται από τις διαφορετικές τεχνικοοικονομικές προκλήσεις. Η διαθεσιμότητα των πρώτων υλών, η ωριμότητα της τεχνολογίας, οι εφαρμογές και η ζήτηση της αγοράς, ο τρόπος διαχείρισης και το κόστος δύναται να επηρεάσουν την απόφαση για την βέλτιστη επιλογή τεχνολογίας για παραγωγή υδρογόνου. Μια επισκόπηση των διαφόρων πρώτων υλών και των τεχνολογιών που σχετίζονται με την παραγωγή υδρογόνου παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.

Στην αγορά είναι ήδη διαθέσιμες διάφορες τεχνολογίες για τη βιομηχανική παραγωγή του υδρογόνου. Η πρώτη εμπορική τεχνολογία, που χρονολογείται από τις αρχές της δεκαετίας του '20, είναι η ηλεκτρόλυση του νερού (Marban *et al*, 2007). Εντούτοις, στη δεκαετία του '60, η βιομηχανική παραγωγή του υδρογόνου άρχισε να μετατοπίζεται προς την χρήση του φυσικού αερίου, το οποίο αποτελεί σήμερα την κυριότερη πρώτη ύλη για την παραγωγή υδρογόνου. Γενικά, όλες οι πιθανές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου μπορούν να ταξινομηθούν σε βραχυ- (2010), μέσο- (2010–2020) και μακρο-πρόθεσμες (2020–2030) τεχνολογίες.



Σχήμα 2: Βραχυ-, Μέσο-, και Μακροπρόθεσμες τεχνολογίες παραγωγής H₂

Ανάλογα με την κλίμακα της εφαρμογής, οι διεργασίες παραγωγής υδρογόνου χαρακτηρίζονται ως κατανεμημένες (π.χ. μικρές εγκαταστάσεις σε σταθμούς ανεφοδιασμού, η παραγωγική ικανότητα των οποίων κυμαίνεται από 100 έως 1500 kg H₂ ανά ημέρα) και κεντροποιημένες (μεγάλες εγκαταστάσεις όπου η δυναμικότητα προσεγγίζει τα 50000 kg H₂ ανά ημέρα). Οι βιομηχανικές μέθοδοι παραγωγής του υδρογόνου σήμερα περιλαμβάνουν την αναμόρφωση του φυσικού αερίου (μεθάνιο) με ατμό και την ηλεκτρόλυση του (αξιοποιώντας ταυτόχρονα και το ηλεκτρικό δίκτυο). Επίσης, η αναμόρφωση της αιθανόλης και της μεθανόλης σε μικρή κλίμακα αποτελούν μεθόδους προς αξιολόγηση.

1.2 Οι βασικές τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου περιλαμβάνουν

- Την αεριοποίηση του άνθρακα (με προαιρετικές την συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την δέσμευση του άνθρακα).
- Την αναμόρφωση του φυσικού αερίου με ατμό (με προαιρετική τη δέσμευση και αποθήκευση του άνθρακα).
- Την αεριοποίηση της βιομάζας.
- Τις πυρηνικές διεργασίες (θερμοχημική διεργασία Θείου-Ιωδίου υψηλών θερμοκρασιών, συμβατική ηλεκτρόλυση του νερού και ηλεκτρόλυση σε υψηλές θερμοκρασίες).
- Ηλεκτρόλυση με τη χρήση αιολικής ενέργειας (με προαιρετική την συμπαραγωγή).

Εάν το H₂ παράγεται από ανανεώσιμη και πυρηνική ενέργεια ή από το φυσικό αέριο και τον άνθρακα με δέσμευση και αποθήκευση του CO₂ (CCS), τότε δύναται σε μεγάλο ποσοστό το ανθρακικό αποτύπωμα να είναι ουδέτερο. Εάν το H₂ παράγεται από την ηλεκτρόλυση του νερού, δημιουργούνται εκπομπές από τις αντίστοιχες διεργασίες παραγωγής της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή τη στιγμή, το H₂ παράγεται κατά ένα μεγάλο μέρος από τα ορυκτά καύσιμα χωρίς CCS (48% από το φυσικό αέριο, 30% από τα απαέρια πετροχημικών/χημικών διεργασιών, 18% από τον άνθρακα και το υπόλοιπο από την ηλεκτρόλυση). Εντούτοις, η χρήση του H₂ για ενεργειακές εφαρμογές απαιτεί αποδοτικότερες χαμηλού κόστους διεργασίες, με ουσιαστικά μηδενικές εκπομπές CO₂. Η αποκεντρωμένη παραγωγή είναι η καλύτερη επιλογή για την ενίσχυση της αγοράς δεδομένου ότι ελαχιστοποιεί τις ανάγκες για την εγκατάσταση υποδομών διανομής, αφού τόσο η μεταφορά όσο και η αποθήκευση του υδρογόνου με τα σημερινά δεδομένα θεωρείται οικονομικά ασύμφορη. Όμως είναι λιγότερο αποδοτική από τη μεγάλης κλίμακας κεντροποιημένη παραγωγή και καθιστά τις τεχνικές CCS μη εφαρμόσιμες στην πράξη.

1.3 Υδρογόνο από ορυκτά καύσιμα

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από τα περισσότερα ορυκτά καύσιμα (π.χ. κάρβουνο, φυσικό αέριο, πετρέλαιο, κ.λπ.). Η πολυπλοκότητα των διεργασιών ποικίλλει. Δεδομένου ότι το διοξείδιο του άνθρακα παράγεται ως παραπροϊόν, το CO₂ πρέπει να συλλέγεται και να αποθηκεύεται προκειμένου να εξασφαλιστεί μια βιώσιμη (με μηδενικές εκπομπές) διεργασία. Η βιωσιμότητα της διεργασίας θα διαφέρει ανάλογα με το μέγεθος της κλίμακας, δηλαδή κεντροποιημένες ή κατακευματισμένες εγκαταστάσεις παραγωγής υδρογόνου.

1.3.1 Παραγωγή από το φυσικό αέριο

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

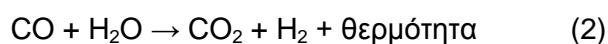
- Αναμόρφωση με ατμό (αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό, SMR)
- Μερική οξειδωση (POX)
- Αυτόθερμη αναμόρφωση (ATR).

Αν και έχουν αναπτυχθεί διάφορες εναλλακτικές τεχνικές παραγωγής, καμία από αυτές με τα σημερινά δεδομένα δεν θεωρείται εμπορική.

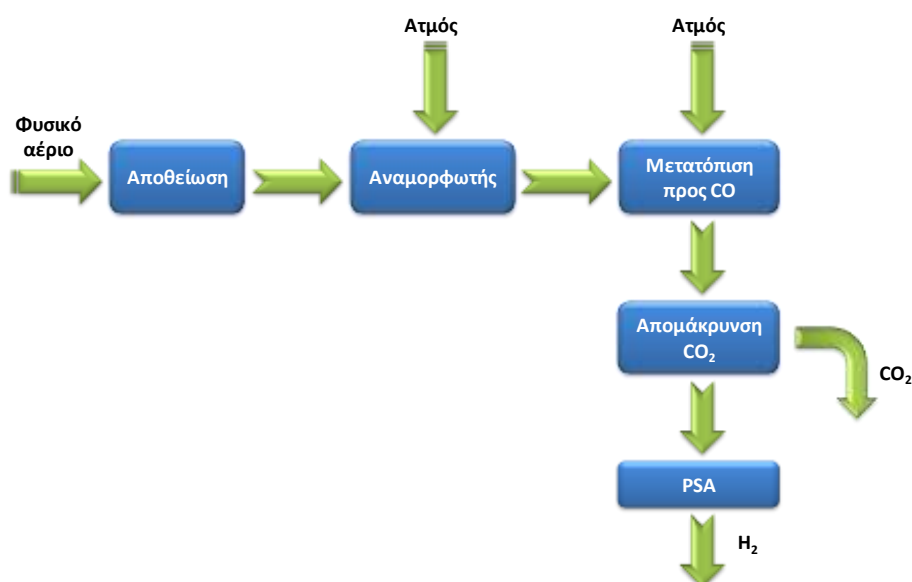
1.3.1.1 Αναμόρφωση με ατμό

Η αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιημένη και λιγότερο δαπανηρή μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου. Είναι μία από τις

κυριότερες διεργασίες που χρησιμοποιούνται στις πετροχημικές και χημικές βιομηχανίες για παραγωγή H₂ σε μεγάλη κλίμακα. Διάφορες εταιρείες αναπτύσσουν μικρής κλίμακας συσκευές αναμόρφωσης του μεθανίου με ατμούς σε αποκεντρωμένους σταθμούς καυσίμων, οι οποίοι μπορούν να αποδειχθούν η πλέον βιώσιμη, βραχυπρόθεσμα, επιλογή παραγωγής υδρογόνου (Hummel, 2001). Η SMR περιλαμβάνει την ενδόθερμη αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό προς παραγωγή αερίου σύνθεσης (μίγμα υδρογόνου και μονοξειδίου άνθρακα, Εξίσωση 1). Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι το μεθάνιο αποτελεί το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου. Η θερμότητα παρέχεται συχνά από την καύση ενός ποσοστού της τροφοδοσίας. Η διεργασία πραγματοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες από 700 έως 850 °C και σε πιέσεις από 3 έως 25 bar. Το προϊόν της αντίδρασης (αέριο σύνθεσης) περιέχει περίπου 12% CO, που μπορεί να μετατραπεί περαιτέρω σε CO₂ και περίσσεια H₂ μέσω της αντίδρασης μετατόπισης του υδραερίου, με περίσσεια ατμού (Εξίσωση 2).



Η αναμόρφωση με ατμό των περισσότερων υδρογονανθράκων και φυσικά του μεθανίου πραγματοποιείται μόνο με τους κατάλληλους καταλύτες. Οι καταλύτες για τη αναμόρφωση με ατμό είναι συνήθως μέταλλα της VIII ομάδας (Carette *et al*, 2001), με το Ni να φαίνεται να είναι το πιο αποτελεσματικό. Ανάλογα με την εκλεκτικότητα του καταλύτη και το ποσοστό κορεσμού των χρησιμοποιούμενων υδρογονανθράκων, η διάσπαση του υδρογονάνθρακα μπορεί να ευνοηθεί κατά τη διάρκεια της αντίδρασης με τον ατμό. Προκειμένου να ληφθεί καθαρό υδρογόνο, το αέριο τελικά καθαρίζεται σε μια μονάδα ρόφησης με εναλλαγή πίεσης (PSA) (Σχήμα 3).



Σχήμα 3: Σχηματική απεικόνιση της διεργασίας αναμόρφωσης του μεθανίου με ατμό

Μια νέα τεχνική που ονομάζεται "sorption enhanced reaction process" προσφέρει την δυνατότητα της ταυτόχρονης διεξαγωγής της αντίδρασης και του

διαχωρισμού σε ένα στάδιο. Ο ατμός και το μεθάνιο εισάγονται στους 440–550 °C σε έναν αντιδραστήρα που περιέχει έναν καταλύτη αναμόρφωσης και ένα προσροφητικό υλικό για την απομάκρυνση του CO₂ (Reijers *et al*, 2003 και Hufton *et al*, 2000). Το όφελος αυτής της διεργασίας αφορά στην παραγωγή καθαρού H₂ (90%), μειώνοντας ταυτόχρονα τα επακόλουθα στάδια καθαρισμού του υδρογόνου. Οι Moller *et al* (2004) πρότειναν ότι μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση καυσίμου μέχρι 40% με τη χρήση μιας διαδικασίας αναμόρφωσης με ηλιακή ενέργεια. Σε αυτή την μέθοδο χρησιμοποιείται ένα σύστημα ηλιακών συλλεκτών για την συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας, έτσι ώστε να παρασχεθεί η απαιτούμενη ποσότητα θερμότητας.

Η αναμόρφωση του φυσικού αερίου προσφέρει αποδόσεις μετατροπής ενέργειας μεταξύ 65–75% (H₂ LHV) για τις μικρές αποκεντρωμένες μονάδες και έως 85% για τα μεγάλα κεντροποιημένα συστήματα παραγωγής υδρογόνου. Εάν ο ατμός σε περίσσεια επαναχρησιμοποιείται, η συνολική απόδοση μπορεί να είναι υψηλότερη. Προσφάτως έχει βελτιωθεί σημαντικά η συνεκτικότητα των μικρής κλίμακας αναμορφωτών (10 x 3 x 3 m) και η επιτευχθείσα δυναμικότητά τους (5.5-7.5 GJ/h), αλλά απαιτείται περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη για να μειωθεί το κόστος και να αυξηθεί η απόδοση. Η συμπίεση του H₂ και η CCS (στις μεγάλες μονάδες) μπορούν η κάθε μία να μειώσουν την καθαρή απόδοση κατά 5-10%. Η CCS στις μικρές εγκαταστάσεις δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα με τα σημερινά δεδομένα.

		Μικρής κλίμακας SMR	Μεγάλης κλίμακας SMR	Ηλιακός αναμορφωτής		
		Τεχνολογία αιχμής	Μακροπρόθεσμος στόχος	Τεχνολογία αιχμής	Μακροπρόθεσμος στόχος	Μακροπρόθεσμος στόχος
-	-	-	Τεχνικά στοιχεία	-	-	-
Δυναμικότητα φυσικού αερίου	kW	4500	4275	405000	385000	125000
Ηλιακή θερμότητα	kW	-	--	--	--	47700
Παραγωγή H ₂	Nm ³ /h	1000	1000	100.000	100.000	50.000
Πίεση	Bar	16	16	30	30	--
Απόδοση (H ₂ LHV)	%	67	70	74	78	87
Διάρκεια ζωής	Yr	25	25	25	25	20
Χρόνος εκμετάλλευσής	hr/yr	8000	8000	8000	8000	2000
--	--	--	Οικονομικά στοιχεία	--	--	--
Κόστος επένδυσης	€ ₂₀₀₀ /kW _{H2}	690	655	335	320	370

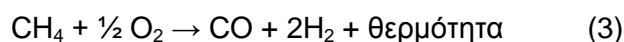
		Μικρής κλίμακας SMR	Μεγάλης κλίμακας SMR	Ηλιακός αναμορφωτής		
Σταθερό κόστος	%Invest./yr	5	5	2	2	5,5
Λειτουργικό κόστος	€ ₂₀₀₀ /Nm ³	0.003	0.003	0.003	0.003	0.013

Πίνακας 1: Τεχνικά και οικονομικά στοιχεία για τις διαφορετικές τεχνολογίες SMR (Stoukides, 2000 και Dreier *et al*, 2000)

Σε τρέχουσες τιμές του φυσικού αερίου (4–6 €/GJ), το κόστος του H₂ που παράγεται από την αναμόρφωση του κυμαίνεται μεταξύ 7–10 €/GJ H₂ (για παραγωγή μεγάλης κλίμακας) έως περισσότερο από 20 €/GJ. Η τελική βέβαια τιμή θα επηρεάζεται από τις τρέχουσες τιμές του φυσικού αερίου, τις εμπλεκόμενες διεργασίες και τις οικονομίες κλίμακας. Η μικρής κλίμακας αποκεντρωμένη παραγωγή υδρογόνου μπορεί να υπερβεί τα 33 €/GJ. Το συμπιεσμένο H₂ σε φιάλες μπορεί να κοστίσει 60–70 €/GJ (περιλαμβανομένου της παράδοσης). Υποθέτοντας ότι το φυσικό αέριο κοστίζει 2.5 €/GJ, η τελική τιμή μπορεί να κυμαίνεται από 4 € στις μεγαλύτερες εγκαταστάσεις έως 7–8 €/GJ H₂ στις μικρές εγκαταστάσεις. Το κόστος για CCS αναμένεται να προσθέσει επιπλέον περίπου 2 €/GJ, ανάλογα με τη διεργασία CCS που θα χρησιμοποιηθεί και το επίπεδο της κλίμακας. Ο Πίνακας 1 συνοψίζει τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά για μικρής κλίμακας SMR, μεγάλης κλίμακας SMR και για έναν ηλιακό αναμορφωτή.

1.3.1.2 Μερική οξείδωση

Η διεργασία της μερικής οξείδωσης χρησιμοποιείται στα διυλιστήρια για τη μετατροπή των υδρογονανθρακικών παραπροϊόντων σε υδρογόνο, CO, CO₂ και νερό. Το μεθάνιο μπορεί να μετατραπεί σε υδρογόνο μέσω της μερικής οξείδωσης, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί καταλυτικά ή μη καταλυτικά ή με συνδυασμό και των δύο (Damen *et al*, 2006). Η μερική οξείδωση είναι μια διεργασία αναμόρφωσης στην οποία τα καύσιμα καίγονται μερικώς (το οξυγόνο που τροφοδοτείται στο σύστημα είναι υπό-στοιχειομετρικό) σε μια εξώθερμη αντίδραση που παρέχει την απαιτούμενη θερμότητα για άλλες αντιδράσεις στο σύστημα αναμόρφωσης ώστε να παραχθεί μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο (εξίσωση 3.3). Σε αυτήν την διεργασία παράγεται θερμότητα και ως εκ τούτου είναι δυνατός ένας πιο συνεκτικός σχεδιασμός δεδομένου ότι δεν υπάρχει περαιτέρω ανάγκη για την θέρμανση του αντιδραστήρα. Τέλος, το CO που παράγεται μετατρέπεται σε H₂, όπως περιγράφεται στην εξίσωση 3.



Επιπλέον, το υδρογόνο μπορεί επίσης να παραχθεί από το πετρέλαιο, τη βενζίνη, και τη μεθανόλη μέσω της αναμόρφωσης τους. Αυτή όμως η διεργασία

μερική οξείδωσης απαιτεί επίσης τη χρήση καθαρού οξυγόνου, και όπως με την περίπτωση αεριοποίησης του άνθρακα, είναι λιγότερο αποδοτική και εκπέμπει περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα σε σχέση με την αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει τις πετροχημικές βιομηχανίες να εστιάσουν και αυτές το ενδιαφέρον τους στην ανάπτυξη τεχνολογιών απομάκρυνσης και δέσμευσης του άνθρακα (Dunn, 2002). Αυτή η μη-καταλυτική διεργασία λαμβάνει χώρα στους 1300-1500 °C και σε πιέσεις 30-100 bar. Η μερική οξείδωση ακολουθείται από μια διεργασία αποθείωσης, μετατόπισης προς CO και τέλος απομάκρυνσης του CO₂. Η μέθοδος της μερικής οξείδωσης των βαρέων υδρογονανθράκων αφορά μόνο στην παραγωγή υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα.

1.3.1.3 Αυτόθερμη αναμόρφωση

Η αυτόθερμη μετατροπή του μεθανίου σε H₂ πραγματοποιείται στους 850 °C, όπου συνδυάζονται οι διεργασίες της μερικής οξείδωσης και της καταλυτικής αναμόρφωσης (Damen *et al*, 2006). Με χρήση της μεθόδου αυτής είναι δυνατό να επιτευχθεί μετατροπή μεθανίου 60-65% με εκλεκτικότητα 80% προς παραγωγή υδρογόνου. Σύμφωνα με το μηχανισμό της διαδοχικής καύσης/αναμόρφωσης του μεθανίου, το CH₄ αρχικά οξειδώνεται προς CO₂ και H₂O, ενώ παράγεται αέριο σύνθεσης από την περαιτέρω διεργασία αναμόρφωσης του υδρογονάνθρακα. Ο δεύτερος μηχανισμός βασίζεται στην άμεση μερική οξείδωση του CH₄, όπου το CO₂ και το H₂O παράγονται μέσω των παράλληλων αντιδράσεων καύσης ή από την περαιτέρω οξείδωση του CO και του H₂. Καθεμία από τις παραπάνω διεργασίες έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα αλλά και προκλήσεις, τα οποία συνοψίζονται στον πίνακα 2.

Η καταναεμημένη (μη-αποκεντρωμένη) παραγωγή χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη το φυσικό αέριο θα μπορούσε να είναι η χαμηλότερου κόστους επιλογή κατά τη διάρκεια μετάβασης στην εποχή της οικονομίας υδρογόνου. Η κύρια πρόκληση είναι να αναπτυχθεί μια συσκευή παραγωγής υδρογόνου με αποδεδειγμένη ικανότητα να μπορεί να παρασκευαστεί μαζικά και να λειτουργεί αξιόπιστα και ακίνδυνα με όσο το δυνατό μικρότερη περιοδική συντήρηση. Ειδικότερα και όσον αφορά στην ικανότητα για μαζική παραγωγή, αυτή απαιτείται προκειμένου να ικανοποιηθεί η ζήτηση κατά τη διάρκεια της μετάβασης στην οικονομία του υδρογόνου και να ελαχιστοποιηθεί το κόστος παραγωγής (οικονομία κλίμακας).

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

Τεχνολογία	SMR	ATR ή POX
		Εκπομπές

Πίνακας 2: Σύγκριση των τεχνολογιών παραγωγής H₂ από φυσικό αέριο

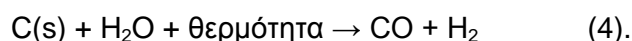
Αυτές οι μονάδες θα πρέπει αρχικά να διακρίνονται από την υψηλή απόδοση που θα πρέπει να επιτυγχάνουν και να συμπεριλαμβάνουν όλα εκείνα τα απαραίτητα βοηθητικά υποσυστήματα προκειμένου να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις για υψηλής καθαρότητας υδρογόνου που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε κυψέλες καυσίμου. Η τεχνολογία για τη διεργασία της ατμοαναμόρφωσης είναι διαθέσιμη για αυτήν την εφαρμογή. Εάν θα είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί η μερική οξειδωση ή η αυτόθερμη αναμόρφωση για τη καταναμετημένη παραγωγή του υδρογόνου φαίνεται να εξαρτάται από την ανάπτυξη νέων μεθόδων για την ανάκτηση του ατμοσφαιρικού οξυγόνου ή το διαχωρισμό του παραγόμενου υδρογόνου από το άζωτο.

1.3.2 Παραγωγή από τον άνθρακα/λιγνίτη

1.3.2.1 Αεριοποίηση άνθρακα/λιγνίτη

Ο άνθρακας μπορεί επίσης να αναμορφωθεί για να παραχθεί υδρογόνο, μέσω ποικίλων διεργασιών αεριοποίησης (π.χ. σταθερής κλίνης, ρευστοστερεάς κλίνης κ.α.) (Shoko *et al*, 2006). Η συγκεκριμένη διεργασία εφαρμόζεται εμπορικά αλλά μπορεί να θεωρηθεί ανταγωνιστικότερη της αναμόρφωσης του μεθανίου μόνο σε περιπτώσεις όπου το φυσικό αέριο είναι ακριβό. Το μέγεθος των παγκόσμιων αποθεμάτων άνθρακα έχει προτρέψει τους επιστήμονες να προτείνουν ότι ο άνθρακας μπορεί να θεωρηθεί ως κύρια πρώτη ύλη για την παραγωγή υδρογόνου, το οποίο θα μπορούσε να επιτρέψει σε χώρες όπως η Κίνα ή η Ινδία να στραφούν προς την οικονομία υδρογόνου. Εντούτοις, αυτό θα απαιτούσε την δέσμευση του άνθρακα που απελευθερώνεται από την αεριοποίηση. Αυτό ίσως διαδραματίσει έναν συμπληρωματικό ρόλο προκειμένου να απαλλαχθεί το ενεργειακό μίγμα από τον άνθρακα και να βελτιωθεί η απόδοση τόσο στην παροχή όσο και στη ζήτηση (Yamashita *et al*, 2003).

Η αεριοποίηση του άνθρακα είναι μια διεργασία που μετατρέπει το στερεό άνθρακα σε ένα αέριο μίγμα που αποτελείται κυρίως από H₂, CO, CO₂ και CH₄. Μια χαρακτηριστική αντίδραση που περιγράφει την παραπάνω διεργασία παρουσιάζεται στην Εξίσωση 4, στην οποία ο άνθρακας μετατρέπεται σε αέριο σύνθεσης:

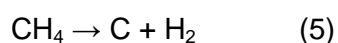


Ο άνθρακας μπορεί να αεριοποιηθεί με πολλούς τρόπους διαφοροποιώντας το μίγμα άνθρακα, οξυγόνου και ατμού μέσα στον αεριοποιητή (Shoko *et al*, 2006). Δεδομένου ότι αυτή η αντίδραση είναι ενδόθερμη, απαιτείται επιπλέον θερμότητα, όπως και με την αναμόρφωση του μεθανίου. Το CO που παράγεται μετατρέπεται περαιτέρω σε CO₂ και H₂ μέσω της αντίδρασης μετατόπισης του υδραερίου (Εξίσωση

2). Σε αντίθεση με το H₂, το τελικό προϊόν αποτελείται από σχετικά καθαρό CO₂, έτοιμο να συμπιεστεί και να αποθηκευθεί (CCS). Η παραγωγή υδρογόνου από τον άνθρακα είναι εμπορικά ώριμη, αλλά είναι περισσότερο πολύπλοκη σε σχέση με την παραγωγή υδρογόνου με τη μέθοδο SMR. Για τις περισσότερες εφαρμογές απαιτείται ο τελικός καθαρισμός του H₂. Το κόστος του παραγόμενου υδρογόνου είναι επίσης υψηλότερο εξαιτίας του αεριοποιητή και της απαίτησης για O₂.

1.3.2.2 Πυρόλυση

Οι υδρογονάνθρακες μπορούν να μετατραπούν σε υδρογόνο χωρίς να παράγεται CO₂, εάν διασπώνται σε μια αρκετά υψηλή θερμοκρασία (που παρέχεται από έναν καυστήρα πλάσματος) απουσία οξυγόνου (Kandiyoti *et al*, 2006). Το μεθάνιο παρουσία ενός καταλύτη μπορεί να διασπαστεί και να παραγάγει υδρογόνο και άνθρακα.



Ο άνθρακας μπορεί είτε να απομονωθεί είτε να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω από διάφορες βιομηχανίες, π.χ. στη μεταλλουργική βιομηχανία είτε στην κατασκευή ελαστικών αυτοκινήτου. Αυτή η διαδικασία έχει αναπτυχθεί εμπορικά από τη Νορβηγική εταιρεία KVAERNER ENGINEERING S.A.

1.3.3 Δέσμευση και αποθήκευση του CO₂

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι ένα κύριο παραπροϊόν σε όλες τις τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου που βασίζονται στα ορυκτά καύσιμα. Η ποσότητα του CO₂ ποικίλει ανάλογα με την αναλογία υδρογόνου/άνθρακα στο χρησιμοποιούμενο καύσιμο. Συνεπώς, για να αναπτυχθεί μια βιώσιμη (με μηδενικές εκπομπές) τεχνολογία για την παραγωγή του υδρογόνου, το CO₂ πρέπει να συλλέγεται και να αποθηκεύεται (Damen *et al*, 2007). Η δέσμευση του άνθρακα από την παραγωγή του υδρογόνου περιλαμβάνει την απομάκρυνση των ανθρακούχων προϊόντων από τα απαέρια του αεριοποιητή ή του ατμοαναμορφωτή του μεθανίου και την αποθήκευσή τους σε υπόγεια μη πληρωμένα πεδία εξόρυξης πετρελαίου ή αερίου, βαθιά κοιτάσματα άνθρακα ή σε βαθύ ωκεανό. Διάφορες εταιρείες παραγωγής ενέργειας και ηλεκτρικής ισχύος επιδιώκουν την δέσμευση του άνθρακα, αν και οι τεχνολογίες αυτές αναμένεται να καταστούν εμπορικά βιώσιμες την επόμενη δεκαετία (Dunn, 2002).

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι να δεσμευθεί το CO₂ σε μια διεργασία καύσης:

- Μετάκαυση. Το CO₂ μπορεί να απομακρυνθεί από τα απαέρια της διεργασίας καύσης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της διεργασίας των "αμιμών". Τα απαέρια περιέχουν μεγάλες ποσότητες αζώτου και κάποιες μικρότερες ποσότητες οξειδίων του αζώτου καθώς επίσης και υδρατμούς, CO₂ και CO.

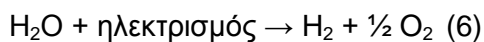
- Πρόκαυση. Το CO₂ δεσμεύεται κατά την παραγωγή του υδρογόνου μέσω οποιονδήποτε από τις διεργασίες που αναφέρθηκαν παραπάνω.
- Καύση οξυγόνου-καυσίμου (Oxyfuel-combustion). Το καύσιμο μετατρέπεται σε θερμότητα μέσω μιας διεργασίας καύσης. Αυτό επιτυγχάνεται με καθαρό οξυγόνο ως οξειδωτικό. Το CO₂ και ο υδρατμός που παράγονται στα απαέρια, είναι δυνατό εύκολα να διαχωριστούν με τη συμπύκνωση των υδρατμών.

1.4 Υδρογόνο από την διάσπαση του νερού

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από την διάσπαση του νερού μέσω διάφορων διεργασιών που εκτείνονται από την ηλεκτρόλυση του νερού, φωτο(ηλιακή)-ηλεκτρόλυση, φωτο-βιολογική παραγωγή έως την διάσπαση του νερού σε υψηλή θερμοκρασία.

1.4.1 Ηλεκτρόλυση του νερού

Μια ελπιδοφόρος και ιστορική μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου είναι η ηλεκτρόλυση του νερού, μια ηλεκτροχημική διεργασία, η οποία περιλαμβάνει τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για τον διαχωρισμό του νερού στα συστατικά του, π.χ. σε υδρογόνο και οξυγόνο, όπως απεικονίζεται στην Εξίσωση 6. Σήμερα, περίπου 4% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου παράγεται από την ηλεκτρόλυση του νερού (Berry, 2004). Αυτή η διεργασία είναι ήδη οικονομικά αποδοτική για την παραγωγή υπερ-καθαρού υδρογόνου σε μικρές ποσότητες, εντούτοις, εξακολουθεί να παραμένει ακριβή για εφαρμογές μεγαλύτερης κλίμακας, λόγω κυρίως της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία κοστίζει αυτήν την περίοδο τρεις έως πέντε φορές περισσότερο έναντι των αντίστοιχων πρώτων υλών ορυκτών καυσίμων.

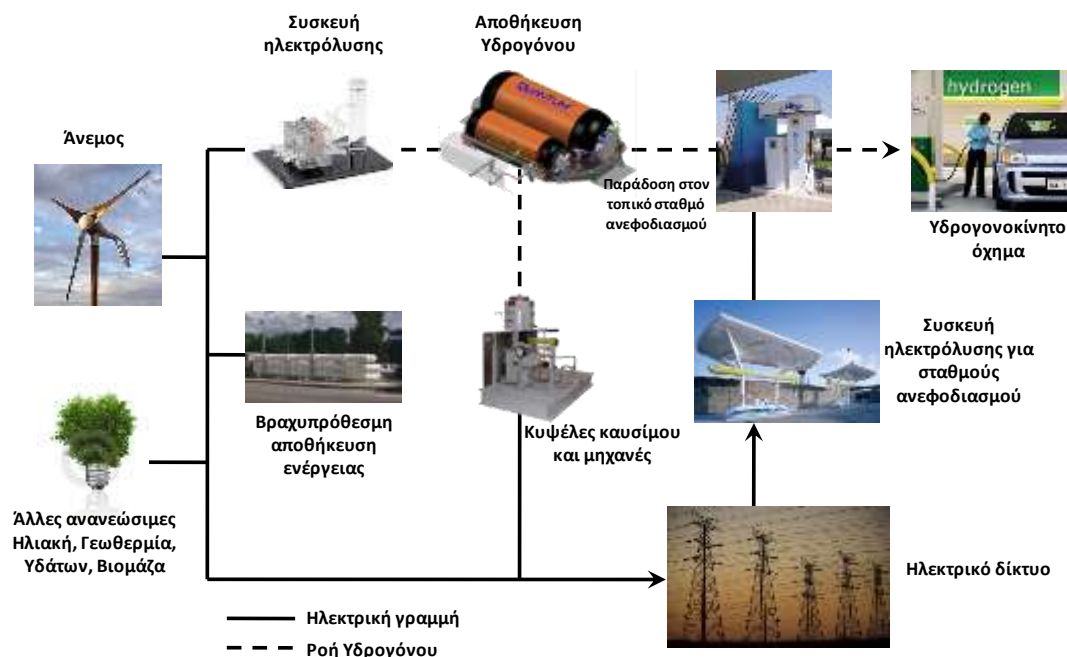


Η συνολική ενέργεια που απαιτείται για την ηλεκτρόλυση του νερού αυξάνεται ελάχιστα με τη θερμοκρασία, ενώ η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια μειώνεται. Μια διεργασία ηλεκτρόλυσης σε υψηλές θερμοκρασίες πιθανόν να είναι προτιμητέα όταν υπάρχει διαθέσιμη θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας.

Ενώ η ηλεκτρόλυση του νερού είναι η ακριβότερη διεργασία παραγωγής υδρογόνου σήμερα, κυρίως λόγω της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας, το συνολικό κόστος αναμένεται να μειωθεί λαμβάνοντας υπόψη την υψηλή απόδοση των νέων συστημάτων και την ένταξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες είναι δυνατό να συνδυαστούν με την ηλεκτρόλυση του νερού (Zoulias *et al*, 2006). Το κόστος της ηλεκτρόλυσης που βασίζεται στην ηλιακή και αιολική ενέργεια είναι ακόμα υψηλό, αλλά αναμένεται να μειωθεί στο μισό κατά τη διάρκεια της επόμενης δεκαετίας. Επιπλέον, επειδή το υδρογόνο παράγεται επιτόπου και κατά παραγγελία, δεν απαιτείται ούτε η μεταφορά του ούτε και η αποθήκευσή του, καθιστώντας το υδρογόνο που παράγεται από την ηλεκτρόλυση οικονομικά βιώσιμο και ανταγωνιστικό. Τα οικονομικά μεγέθη είναι δυνατό να βελτιωθούν επίσης με την αναμενόμενη μελλοντική μαζική παραγωγή (οικονομίες κλίμακας) των μικρών συσκευών ηλεκτρόλυσης, οι οποίες θα δύνανται να κλιμακώνονται από μικρές σε

μεγάλες μονάδες με σχετικά απλό τρόπο, θα χρησιμοποιούν λιγότερο ακριβή ενέργεια (και υδροηλεκτρική) τις ώρες αιχμής, και θα επιτυγχάνουν αποδόσεις της τάξης του 70–85%.

Η ηλεκτρόλυση από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι δυνατό να οδηγήσει σε έναν καθαρό κύκλο υδρογόνου (Σχήμα 4). Υδρογόνο από την ηλιακή και την αιολική ενέργεια θα μπορούσε να καλύψει μελλοντικές ενεργειακές απαιτήσεις, αν και το κόστος παράδοσης της ενέργειας μπορεί να είναι υψηλότερο σε σχέση με την περίπτωση παραγωγής υδρογόνου με την μέθοδο SMR.



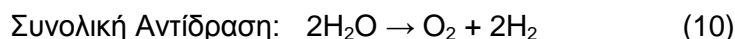
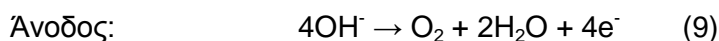
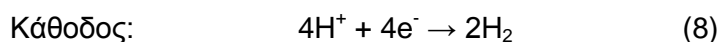
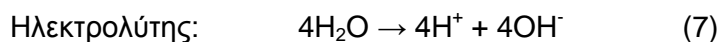
Σχήμα 4: Ηλεκτρόλυση που τροφοδοτείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Σε βάθος χρόνου, το υδρογόνο θα παρέχει επίσης ένα ιδεατό μέσο αποθήκευσης για ανανεώσιμη ενέργεια. Το υδρογόνο αναμένεται να επιτρέψει την ένταξη στο ενεργειακό σύστημα, ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με μη-μόνιμη παροχή (ήλιος, άνεμος) (Zoulias *et al*, 2006). Κατά συνέπεια, μπορούμε να οραματιστούμε ένα φωτοβολταϊκό ηλιακό πάνελ (ή έναν ανεμόμυλο) συνδεδεμένο με μία αντιστρεπτής λειτουργίας κυψέλη καυσίμου/κυψέλη ηλεκτρόλυσης, που χρησιμοποιεί ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας για να παραγάγει H_2 κατά τη διάρκεια της ημέρας (ή σε ανέμους με υψηλή ταχύτητα), και να καταναλώνει το υδρογόνο κατά τη διάρκεια της νύχτας (ή απουσία αέρα) για να παραγάγει ηλεκτρική ενέργεια. Παρά την αναμφισβήτητη μειωμένη απόδοση αυτού του συστήματος, είναι σαφές ότι θα αποτελούσε μία αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

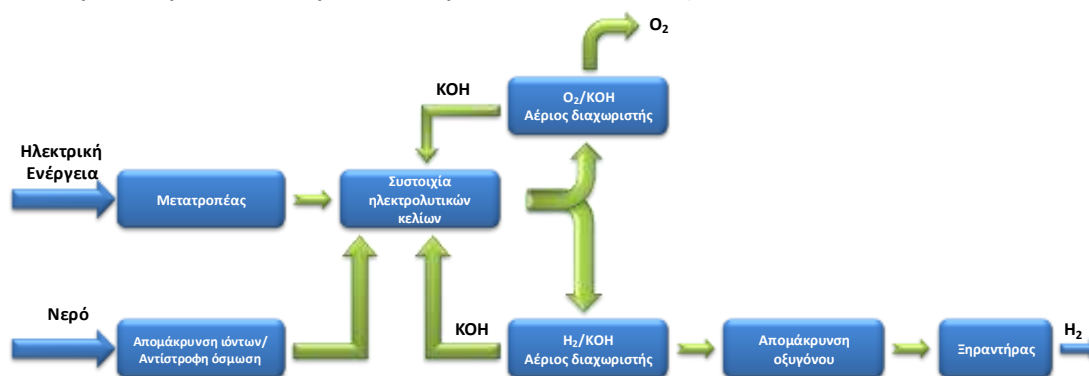
1.4.2 Αλκαλική ηλεκτρόλυση

Οι αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης χρησιμοποιούν ένα υδατικό διάλυμα KOH ως ηλεκτρολύτη (Floch *et al*, 2007). Η αλκαλική ηλεκτρόλυση είναι η καταλληλότερη για σταθερές εφαρμογές που διεξάγονται σε πιέσεις μέχρι 25 bar. Οι

αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης έχουν εμπορευματοποιηθεί εδώ και πολύ καιρό. Οι ακόλουθες ηλεκτροχημικές αντιδράσεις πραγματοποιούνται μέσα στην κυψέλη αλκαλικής ηλεκτρόλυσης:



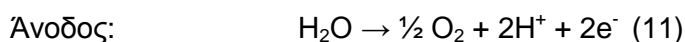
Συνήθως, οι εμπορικές διατάξεις ηλεκτρόλυσης αποτελούνται από ένα πλήθος ηλεκτρολυτικών κυψελών σε μορφή συστοιχίας. Οι αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης περιέχουν τα κύρια συστατικά που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5. Οι σημαντικότερες προκλήσεις για το μέλλον είναι να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης με το χαμηλότερο κόστος αλλά με υψηλότερη ενεργειακή απόδοση (Floch *et al*, 2007).



Σχήμα 5: Διάγραμμα ροής μίας αλκαλικής συσκευής ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή H₂.

1.4.3 Ηλεκτρόλυση σε πολυμερικής μεμβράνης ηλεκτρολύτες (PEM)

Η αρχή της ηλεκτρόλυσης που βασίζεται στις κυψέλες τύπου PEM περιγράφεται στις Εξισώσεις 11 και 12. Ο ηλεκτρολύτης είναι μια οργανική πολυμερική μεμβράνη, στην οποία τα πρωτόνια που παράγονται στην άνοδο μεταφέρονται στην κάθοδο. Οι PEM συσκευές ηλεκτρόλυσης μπορούν να σχεδιαστούν για να λειτουργούν σε πιέσεις μέχρι αρκετές εκατοντάδες bar, και είναι κατάλληλες τόσο για σταθερές όσο και για κινητές εφαρμογές (Grigoriev *et al*, 2006). Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των PEM σε σχέση με τις αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης είναι ευελιξία τους όσον αφορά την λειτουργία τους σε ένα μεγάλο εύρος δυναμικότητας, η ασφάλεια τους λόγω της απουσίας του ηλεκτρολύτη ΚΟΗ, η συνεκτικότερη κατασκευή λόγω των υψηλότερων πυκνοτήτων ισχύος που είναι δυνατό να επιτευχθούν και οι υψηλότερες πιέσεις λειτουργίας (καμία ανάγκη για περαιτέρω συμπίεση).





Λόγω όμως του σχετικά υψηλού κόστους, της χαμηλής δυναμικότητας, της μικρής απόδοσης και της σύντομης διάρκεια ζωής, οι συσκευές ηλεκτρόλυσης τύπου PEM, οι οποίες είναι διαθέσιμες σήμερα, δεν είναι τόσο ώριμες εμπορικά όσο οι αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης. Αναμένεται ότι η απόδοση των συσκευών ηλεκτρόλυσης PEM μπορεί να αυξηθεί σημαντικά εάν βελτιστοποιηθούν οι διεργασίες παρασκευής των υλικών από τα οποία αποτελείται και ο σχεδιασμός των συστοιχιών (Grigoriev *et al*, 2006).

1.4.4 Ηλεκτρόλυση σε υψηλές θερμοκρασίες

Η υψηλής θερμοκρασίας ηλεκτρόλυση του ατμού βασίζεται στην αντίστροφη λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας (Herring *et al*, 2007). Η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για να διαχωριστεί το νερό στους 1000 °C είναι αρκετά χαμηλότερη από την ηλεκτρόλυση στους 100 °C. Αυτό σημαίνει ότι μια υψηλής θερμοκρασίας συσκευή ηλεκτρόλυσης μπορεί να λειτουργήσει σε σημαντικά υψηλότερες αποδόσεις από μια διάταξη ηλεκτρόλυσης που λειτουργεί σε χαμηλές θερμοκρασίες. Μια χαρακτηριστική τεχνολογία αυτής της κατηγορίας είναι η κυψέλη ηλεκτρόλυσης στερεού ηλεκτρολύτη (SOEC).

Γενικά, η ηλεκτρόλυση είναι δυνατό να κλιμακωθεί από λίγα Nm³/h σε αρκετές δεκάδες χιλιάδες Nm³/h, έτσι ώστε να δύναται να χρησιμοποιηθεί σε αποκεντρωμένες εφαρμογές παραγωγής υδρογόνου καθώς επίσης και για μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις παραγωγής υδρογόνου. Σήμερα, η απόδοση των συμβατικών συσκευών ηλεκτρόλυσης είναι περίπου 40–50% (Schuckert, 2005). Άλλες βιβλιογραφικές πηγές αναφέρουν υψηλότερης τιμές απόδοσης, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν στις διαφορές μεταξύ των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας και των εργαστηριακών συνθηκών. Η απόδοση είναι μια βασική παράμετρος για την ηλεκτρόλυση, καθώς το κόστος καθορίζεται κατά ένα μεγάλο μέρος από το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Η βέλτιστη στην πράξη απόδοση θα μπορούσε να είναι υψηλότερη από 85%, αλλά οι εμπορικές συσκευές επιτυγχάνουν αποδόσεις μεταξύ 55–75%. Οι αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης είναι οι πιο κοινές συσκευές για την ηλεκτρόλυση του νερού, εντούτοις, νέες συσκευές ηλεκτρόλυσης, οι οποίες βασίζονται στην αντίστροφη λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου εισέρχονται αυτήν την περίοδο στην αγορά. Το τρέχον κόστος ηλεκτρόλυσης υπερβαίνει τα 20 €/GJ, αλλά το κόστος θα ήταν δυνατό να μειωθεί περαιτέρω, κάτω από 13 €/GJ (συμπεριλαμβανομένου και του κόστους συμπίεσης) κατά τη διάρκεια των επόμενων δεκαετιών, υποθέτοντας ένα κόστος ηλεκτρικής ενέργειας στα 23 €/MWh και 80% απόδοση της διεργασίας. Η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας σε ώρες εκτός αιχμής και σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας μπορεί να μειώσει περαιτέρω τις δαπάνες, αν και το κόστος CCS αναμένεται να αυξήσει το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, το οξυγόνο ως παραπροϊόν της ηλεκτρόλυσης του νερού μπορεί να επηρεάσει τα οικονομικά της διεργασίας εάν υπάρχει μια επαρκής ζήτηση οξυγόνου σε κοντινές βιομηχανίες.

		Υψηλής πίεσης αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης		Συσκευές ηλεκτρόλυσης τύπου PEM		SOEC	
		Τεχνολογία αιχμής	Μακροπρόθεσμος στόχος	Τεχνολογία αιχμής	Μακροπρόθεσμος στόχος	Μακροπρόθεσμος στόχος	
Τεχνικά χαρακτηριστικά							
Παραγωγή Υδρογόνου	Nm ³ /h	5-50000	5-50000	10	30		>10000
Απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια	kW/kW _{H2}	1.43	1.3	2			1.07
Απαιτήσεις σε ατμό	kW/kW _{H2}						0.2
Πίεση	Bar	30	100	1.4	400		
Απόδοση (H ₂ LHV)	%	70	80	50			79
Διάρκεια ζωής	yr	20	20				20
Διάρκεια ζωής συστοιχίας	yr			3-4	5		9
Οικονομικά στοιχεία							
		<5MW _{el}		>55MW _{el}			
		SotA	LTT	SotA	LTT		
Κόστος Επένδυσης							
Συσκευή ηλεκτρόλυσης	€ ₂₀₀₀ /kW _{H2}	525	450	420	360		
Πλήρες σύστημα	€ ₂₀₀₀ /kW _{H2}	600	510	480	410	1565	1000
Κόστος Επένδυσης							
Συσκευή ηλεκτρόλυσης	€ ₂₀₀₀ /kW _{H2}	750	560	600	450		
Πλήρες σύστημα	€ ₂₀₀₀ /kW _{H2}	860	640	690	510	3130	1270
Σταθερό κόστος	% Invest./yr	2	2	2	2	2	

Πίνακας 3: Τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων συσκευών ηλεκτρόλυσης

SotA: Τεχνολογία αιχμής.

LTT: Μακροπρόθεσμος στόχος.

1.4.5 Άλλοι μέθοδοι διάσπασης του νερού για την παραγωγή υδρογόνου

Υπάρχουν επίσης και ορισμένες άλλες επιλογές για παραγωγή υδρογόνου μέσω της διάσπασης του νερού, εντούτοις, οι τεχνικές αυτές απαιτούν περαιτέρω έρευνα & ανάπτυξη προκειμένου να εφαρμοστούν σε μεγάλα ή μικρής κλίμακας συστήματα παραγωγής υδρογόνου.

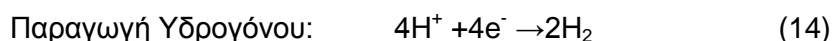
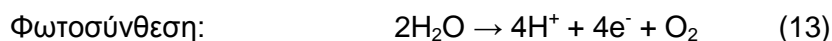
1.4.5.1 Φωτο-ηλεκτρόλυση (φωτόλυση)

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

(Nowotny *et al*, 2005). Η άμεση φωτο-ηλεκτρόλυση αντιπροσωπεύει μια προηγμένη εναλλακτική λύση σε ένα σύστημα PV-ηλεκτρόλυσης με το συνδυασμό και των δύο διεργασιών σε μια ενιαία συσκευή. Η φωτο-ηλεκτρόλυση του νερού είναι η διεργασία με την οποία το φως του ήλιου χρησιμοποιείται για να διεγείρει τους ημιαγωγούς που βρίσκονται σε υγρή φάση σε μία συσκευή που μετατρέπει το φως σε χημική ενέργεια προκειμένου να διασπάσει το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο. Το κόστος τέτοιων παρόμοιων συστημάτων μπορεί να είναι μικρότερο σε σχέση με τα συνδυασμένα συστήματα φωτοβολταϊκών-ηλεκτρόλυσης (τεχνολογία δύο βημάτων). Η άμεση παραγωγή του υδρογόνου μέσω της διάσπασης του νερού από το φως του ήλιου απαιτεί μια διάταξη συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (συστοιχία ηλιακών κατόπτρων) και ειδικών καταλυτικών συστημάτων αποδοτικών για την διάσπαση του νερού. Γίνονται πολλές προσπάθειες παγκοσμίως που αφορούν στις φωτο-ηλεκτροχημικές κυψέλες (PEC), οι οποίες κυρίως εστιάζονται στα πεδία της επιστήμης και μηχανικής των υλικών (Varner *et al*, 2002 και Turner, 2003). Οι στόχοι προκειμένου να εισχωρήσουν στην αγορά συστήματα PEC είναι να επιτευχθεί 10% απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε υδρογόνο, να έχουν μία μέση διάρκεια ζωής περίπου 10 ετών και το κόστος παραγωγής του υδρογόνου να ανέρχεται σε 2 €/kg (Turner, 2003).

1.4.5.2 Φωτο-Βιολογική παραγωγή

Η φωτο-βιολογική παραγωγή του υδρογόνου είναι βασισμένη σε δύο βήματα: τη φωτοσύνθεση (Εξίσωση 13) και την παραγωγή του υδρογόνου που καταλύεται από υδρογενάσες (Εξίσωση 14), π.χ., πράσινη άλγη και κυανοβακτήρια (Melis, 2002).



Σε αναερόβιες συνθήκες, η πράσινη άλγη παράγει ένα ένζυμο την υδρογενάση. Η υδρογενάση μέσω της βιο-φωτόλυσης παράγει υδρογόνο από το νερό. Οι συνθήκες πρέπει να είναι απόλυτα ελεγχόμενες, δεδομένου ότι το συγκεκριμένο ένζυμο δραστηριοποιείται απουσία φωτός και είναι πολύ ευαίσθητο στην παρουσία οξυγόνου που παράγεται από τη φωτοσύνθεση. Για να αναπτυχθεί η συγκεκριμένη μέθοδος, απαιτείται μακροχρόνια προσπάθεια τόσο σε βασική όσο και σε εφαρμοσμένη έρευνα, όμως στην περίπτωση που προκύψουν ενθαρρυντικά αποτελέσματα, μπορεί να αποτελέσει μία βιώσιμη λύση για την ανανεώσιμη παραγωγή υδρογόνου (Levin *et al*, 2004).

1.4.5.3 Θερμο-χημική διάσπαση του νερού

Η διάσπαση του νερού σε υψηλή θερμοκρασία πραγματοποιείται περίπου στους 3000 °C. Σε αυτήν την θερμοκρασία, διασπάται το 10% του νερού και το υπόλοιπο 90% μπορεί να ανακυκλωθεί. Για να μειωθεί η θερμοκρασία, έχουν προταθεί άλλες διεργασίες για το διαχωρισμό του νερού σε υψηλή θερμοκρασία, όπως (Marban *et al*, 2007):

- 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 CO₂ δύο σταδίων.

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

Η θερμο-χημική διάσπαση του νερού αφορά στην μετατροπή του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο μέσω μίας σειράς θερμικών χημικών αντιδράσεων. Οι κύκλοι θερμο-χημικής διάσπασης είναι γνωστοί εδώ και 35 χρόνια. Η θερμική διάσπαση του νερού πραγματοποιείται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τους 2500 °C, αλλά οι θερμο-χημικές διεργασίες όπως οι κύκλοι ιωδίου/θείου (Vitart *et al*, 2006) ή του βρωμίου/ασβεστίου μπορούν να μειώσουν τη θερμοκρασία κάτω από τους 1000 °C. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι οι θερμο-χημικοί κύκλοι υπόκεινται στους περιορισμούς του κύκλου Carnot, και για μια ανώτερη θερμοκρασία 1000 K και μια χαμηλότερη θερμοκρασία 300 K, η μέγιστη θεωρητική απόδοση που μπορεί να επιτευχθεί είναι ίση με 88%. Ενώ δεν γεννάται θέμα για την τεχνική δυνατότητα πραγματοποίησης και τη δυνατότητα για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων, απομένουν πολλά ακόμα βήματα για την είσοδο αυτών των διατάξεων στην αγορά. Οι συγκεκριμένες διεργασίες απαιτούν υψηλές ποσότητες θερμότητας σε χαμηλό κόστος από πυρηνική ή ηλιακή ενέργεια, καθώς επίσης και υλικά ανθεκτικά στη διάβρωση.

1.5 Υδρογόνο από τη βιομάζα

Η βιομάζα είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που θα μπορούσε να διαδραματίσει έναν ουσιαστικό και σημαντικό ρόλο σε ένα διαφοροποιημένο και βιώσιμο ενεργειακό μίγμα. Η βιομάζα μπορεί να οριστεί ως οποιαδήποτε ανανεώσιμη πηγή άνθρακα, όπως τα ξύλα, τα υπολείμματα από το ξύλο, οι γεωργικοί καρποί και τα υπολείμματά τους. Τα βιομηχανικά και αστικά απόβλητα θεωρούνται επίσης συχνά ως βιομάζα λόγω των υψηλών ποσοστών τους σε οργανικά απόβλητα (Ni *et al*, 2006). Σήμερα αποτελεί το 14% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας. Οι πρώτες ύλες της βιομάζας μπορούν να μετατραπούν σε προηγμένα βιο-καύσιμα με τη χρήση θερμο-χημικών και βιολογικών διεργασιών. Η καύση, η πυρόλυση, η ταχεία πυρόλυση (flash pyrolysis ή liquefaction) και η αεριοποίηση είναι οι τέσσερις θερμο-χημικές διεργασίες. Η άμεση βιο-φωτόλυση, η έμμεση βιο-φωτόλυση, η βιολογική αντίδραση μετατόπισης του υδραερίου, η φωτο-ζύμωση και η ζύμωση απουσία φωτός ανήκουν στις βιολογικές διεργασίες.

Η βιομάζα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να παραχθεί υδρογόνο χωρίς να απαιτούνται σημαντικές τεχνολογικές προκλήσεις και μεταβολές. Η βιομάζα δύναται λοιπόν να αποτελέσει την πλέον πρακτική και βιώσιμη (χωρίς παραγωγή άνθρακα) επιλογή για την παραγωγή υδρογόνου. Δεδομένου ότι η βιομάζα είναι ανανεώσιμη και καταναλώνει το ατμοσφαιρικό CO₂ κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης της, η συνεισφορά της σε εκπομπές CO₂ είναι πάρα πολύ μικρή σε σχέση με τη χρήση ορυκτών καυσίμων. Οι διεργασίες για την παραγωγή του υδρογόνου από βιομάζα μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες (Ni *et al*, 2006):

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

Η καύση αφορά στην άμεση οξείδωση της βιομάζας με αέρα για να μετατρέψει τη χημική ενέργεια της βιομάζας σε θερμότητα, μηχανική ή ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας εξοπλισμό όπως οι σόμπες, οι φούρνοι, οι λέβητες ή οι αεριο-στρόβιλοι. Δεδομένου ότι η ενεργειακή απόδοση είναι χαμηλή (10–30%) και τα προϊόντα της διεργασίας αποτελούν αέριους ρύπους, η καύση δεν μπορεί να θεωρηθεί ως η καταλληλότερη διεργασία για την βιώσιμη παραγωγή υδρογόνου. Κατά την ταχεία πυρόλυση της βιομάζας, αυτή θερμαίνεται στους 525-600 K σε πίεση 50-200 bar απουσία αέρα. Ένας διαλύτης ή ένας καταλύτης μπορεί να προστεθεί στη διεργασία. Τα μειονεκτήματα της διεργασίας της ταχείας πυρόλυσης της βιομάζας αφορούν στις δυσκολίες που πρέπει να αντιμετωπιστούν προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές συνθήκες λειτουργίας και στην αναμενόμενη χαμηλή παραγωγή υδρογόνου. Επομένως, η διεργασία της ταχείας πυρόλυσης της βιομάζας δεν ευνοεί την παραγωγή υδρογόνου. Άλλες θερμο-χημικές (πυρόλυση και αεριοποίηση) και βιολογικές (βιο-φωτόλυση, βιολογική αντίδραση μετατόπισης του υδραερίου ζύμωση) διεργασίες είναι εφικτές και έχουν συγκεντρώσει την προσοχή και το ενδιαφέρον πολλών για την παραγωγή υδρογόνου (Ni *et al*, 2006).

1.5.1 Ζύμωση βιομάζας

Η ζύμωση είναι μια αναερόβια διεργασία απουσία φωτός, όμοια με την αναερόβια χώνευση, για την παραγωγή H₂. Τα βακτήρια που παράγουν το H₂ στο σκοτάδι μπορούν να καλλιεργηθούν σε καθαρές καλλιέργειες ή να εμφανιστούν σε μικτές καλλιέργειες, όπως η αναερόβια χώνευση της λυματολάσπης ενός βιολογικού καθαρισμού. Το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής του H₂ με αυτή την διαδικασία προέρχεται από τον αναερόβιο μεταβολισμό ενζύμων που προκύπτουν κατά τη διάρκεια του καταβολισμού των διάφορων υποστρωμάτων. Αντίθετα από τη βιο-φωτόλυση που παράγει μόνο H₂, τα προϊόντα της ζύμωσης απουσίας φωτός είναι συνήθως H₂ και CO₂ που συνδυάζονται με άλλα αέρια, όπως το CH₄ ή το H₂S, ανάλογα με την αντίδραση και το χρησιμοποιούμενο υπόστρωμα. Η ποσότητα του

παραγόμενου υδρογόνου από τη ζύμωση απουσία φωτός εξαρτάται από το pH, τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT) και τη μερική πίεση του αερίου. Για τη βέλτιστη παραγωγή υδρογόνου, το pH πρέπει να διατηρείται μεταξύ 5 και 6 (Fang *et al*, 2002). Η μερική πίεση του H₂ είναι μια ακόμα σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την παραγωγή υδρογόνου. Όταν η συγκέντρωση του υδρογόνου αυξάνεται, η αντίδραση μετατοπίζεται προκειμένου να παραγάγει περισσότερα οξειδωμένα υποστρώματα, όπως λακτόζη, αιθανόλη, ακετόνη, βουτανόλη ή αλανίνη, τα οποία, στη συνέχεια, μειώνουν την αναμενόμενη παραγωγή υδρογόνου (Niel *et al*, 2003).

1.5.2 Αεριοποίηση και πυρόλυση βιομάζας

Η θερμο-χημική μέθοδος της αεριοποίησης αφορά στην μετατροπή μίας ανθρακούχας τροφοδοσίας σε ένα χαμηλού ή μέσου ενεργειακού περιεχομένου αέριο μίγμα μέσω της μερικής οξείδωσης σε υψηλές θερμοκρασίες (Saxena *et al*, 2007). Η αεριοποίηση του άνθρακα είναι μία καθιερωμένη τεχνολογία και κατά συνέπεια και η τεχνολογία της αεριοποίησης της βιομάζας έχει ωφεληθεί σημαντικά από την υφιστάμενη τεχνολογία. Εντούτοις, οι δύο τεχνολογίες δεν είναι δυνατό να συγκριθούν άμεσα λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων στην πρώτη ύλη (π.χ. ενεργότητα του απανθρακώματος, γενική σύσταση τροφοδοσίας, σύσταση τέφρας, περιεκτικότητα σε υγρασία, πυκνότητα).

Η πυρόλυση αφορά στην θερμική διάσπαση που πραγματοποιείται απουσία οξυγόνου. Αποτελεί πάντα το πρώτο βήμα σε διεργασίες καύσης και αεριοποίησης, όπου ακολουθείται από τη συνολική ή μερική οξείδωση των αρχικών προϊόντων. Η χαμηλότερη απαιτούμενη θερμοκρασία για τη διεργασία και οι μεγαλύτεροι χρόνοι παραμονής ευνοούν την παραγωγή ενεργοποιημένου άνθρακα. Η υψηλή θερμοκρασία και οι μεγαλύτεροι χρόνοι παραμονής αυξάνουν τη μετατροπή της βιομάζας σε βιο-αέριο ενώ μία μέση θερμοκρασία και μικρότεροι χρόνοι παραμονής ευνοούν την παραγωγή υγρών προϊόντων (π.χ. βιο-έλαιο).

Γενικά, τα κυριότερα αέρια προϊόντα που παράγονται από την πυρόλυση της βιομάζας είναι το H₂, το CO₂, το CO και διάφοροι αέριοι υδρογονάνθρακες, ενώ στην περίπτωση της αεριοποίησης της βιομάζας είναι το H₂, το CO₂, το CO και το N₂. Είναι πλέον γνωστό ότι η χρήση συστημάτων αεριοποίησης + πυρόλυσης επιτρέπει την αντιμετώπιση πλήθους τεχνικών και μη εμποδίων, υποδεικνύοντας ουσιαστικά την ταυτόχρονη χρήση και των δύο τεχνολογιών.

Αντί της άμεσης αεριοποίησης της βιομάζας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ταχεία πυρόλυση για να παραχθεί ένα υγρό ενδιάμεσο προϊόν που ονομάζεται βιο-έλαιο, από το οποίο μπορεί να παραχθεί υδρογόνο μέσω της διεργασίας αναμόρφωσης με ατμό (Yaman, 2004). Η βιομάζα αρχικά ξηραίνεται και στην συνέχεια μετατρέπεται σε ένα έλαιο μέσω της ταχείας έκθεσης της σε υψηλή θερμότητα σε έναν αντιδραστήρα ρευστοστερεάς κλίσης. Το απανθράκωμα και τα αέρια που παράγονται καίγονται περαιτέρω για να παρέχουν την απαιτούμενη θερμότητα στον αντιδραστήρα, ενώ τα υγρά προϊόντα ψύχονται, συμπυκνώνονται και ανακτούνται. Η καταλυτική ατμοαναμόρφωση του βιο-ελαίου πραγματοποιείται στους 750-850 °C με χρήση καταλυτών Ni. Η ιδέα της ταχείας πυρόλυσης που συνδυάζεται με την διεργασία της ατμοαναμόρφωσης αναμένεται να έχει περισσότερα πλεονεκτήματα έναντι της παραδοσιακής τεχνολογίας αεριοποίησης/αντίδρασης

μετατόπισης του υδραερίου. Το βιο-έλαιο είναι πολύ ευκολότερο να μεταφερθεί σε σχέση με τη στερεή βιομάζα, προσφέροντας τη δυνατότητα παραγωγής του βιο-ελαίου σε μικρότερες εγκαταστάσεις που θα γειτνιάζουν με την πηγή της βιομάζας, μειώνοντας το κόστος της πρώτης ύλης. Ένα δεύτερο πλεονέκτημα αφορά στην δυνητική παραγωγή και ανάκτηση από το βιο-έλαιο χημικών προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας, όπως οι φαινόλες, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτες ύλες για την παρασκευή ρητινών (Yaman, 2004).

Ενώ η έρευνα & ανάπτυξη εστιάζει στην αεριοποίηση, συνέργειες με άλλες διεργασίες παραγωγής καυσίμων (βιο-καύσιμα) θα μπορούσαν να ανοίξουν το δρόμο σε άλλες επιλογές και να επιταχύνουν την ανάπτυξη της συγκεκριμένης αγοράς. Γενικά, δεδομένου ότι η διαθεσιμότητα της βασικής πρώτης ύλης είναι περιορισμένη, η παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα δεν αναμένεται να ωφεληθεί από τις οικονομίες μεγάλης κλίμακας. Το κόστος αναμένεται να είναι υψηλότερο έναντι της αεριοποίησης του άνθρακα ή της αναμόρφωσης του φυσικού αερίου.

1.6 Σημερινή κατάσταση, προοπτικές και εμπόδια για την παραγωγή υδρογόνου

1.6.1 Κεντροποιημένη παραγωγή υδρογόνου

Η βιομηχανική (μεγάλης κλίμακας) παραγωγή υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα μπορεί να θεωρηθεί εμπορική τεχνολογία. Η παραγωγή υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα διακρίνεται από το σχετικά χαμηλό κόστος της μονάδας, αν και το κόστος παραγωγής του υδρογόνου από το φυσικό αέριο στις μεσαίου μεγέθους εγκαταστάσεις μπορεί να μειωθεί έως το αντίστοιχο κόστος που επιτυγχάνεται στις μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις. Μια σημαντική πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η διεργασία παραγωγής του υδρογόνου να έχει ουδέτερο ανθρακικό αποτύπωμα. Οι διάφορες επιλογές που υφίστανται για CCS δεν είναι δυνατό να θεωρηθούν σήμερα πλήρως τεχνικά και οικονομικά εφαρμόσιμες. Απαιτούν περαιτέρω έρευνα & ανάπτυξη στις διεργασίες απορρόφησης ή διαχωρισμού, επεξεργασίας, καθώς επίσης και στην αποδοχή που θα πρέπει να υπάρχει για την αποθήκευση του CO₂. Είναι επίσης σημαντικό να αυξηθεί η απόδοση των εγκαταστάσεων, να μειωθεί το αρχικό κόστος και να ενισχυθεί η αξιοπιστία και η ευελιξία στην λειτουργία.

Περαιτέρω έρευνα & ανάπτυξη απαιτείται ιδιαίτερα στον καθαρισμό και διαχωρισμό (του υδρογόνου ή του CO₂ από το παραγόμενο αέριο μίγμα) του υδρογόνου. Αυτό περιλαμβάνει την ανάπτυξη καταλυτών, υλικών προσρόφησης και μεμβρανών διαχωρισμού αερίων για την παραγωγή και τον καθαρισμό του υδρογόνου. Αν χρησιμοποιηθούν διεργασίες συνδυασμένου κύκλου με αεριοποίηση (IGCC) είναι δυνατό να επιτευχθεί η συμπαραγωγή υδρογόνου και θερμικής/ηλεκτρικής ισχύος. Οι διεργασίες IGCC αποτελούν την πλέον προηγμένη και αποδοτική λύση, στην οποία ο άνθρακας που περιέχεται στα καύσιμα αφαιρείται και το υδρογόνο παράγεται σε μια διεργασία προ-καύσης. Όμως, η οικονομικά βέλτιστη παραγωγή υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα απαιτεί και μεγάλη ζήτηση στην

αγορά, καθώς επίσης και την κατασκευή μιας νέας υποδομής γραμμών μεταφοράς και διανομής του υδρογόνου και αντίστοιχων υποδομών για την αποθήκευση του CO₂. Στο μέλλον, η κεντροποιημένη παραγωγή υδρογόνου από υψηλής θερμοκρασίας διεργασίες που θα βασίζονται στην ανανεώσιμη ενέργεια και στην απορριπτόμενη θερμότητα (π.χ. πυρηνικοί σταθμοί) θα μπορεί επίσης να αποτελέσει μια επιλογή για αειφόρο ανάπτυξη χωρίς να απαιτείται επιπρόσθετα η δέσμευση και αποθήκευση του CO₂.

1.6.2 Κατανεμημένη παραγωγή υδρογόνου

Η κατανεμημένη παραγωγή υδρογόνου μπορεί να βασιστεί τόσο στην ηλεκτρόλυση του νερού όσο και στις διεργασίες του φυσικού αερίου που αναφέρθηκαν παραπάνω. Το όφελος αφορά στις μειωμένες απαιτήσεις για τη μεταφορά του καυσίμου υδρογόνου, και ως εκ τούτου στην μείωση των αναγκών για την κατασκευή νέων υποδομών μεταφοράς υδρογόνου. Η κατανεμημένη παραγωγή θα χρησιμοποιούσε επίσης την υπάρχουσα υποδομή, όπως αυτή του φυσικού αερίου ή του νερού και της ηλεκτρικής ενέργειας. Εντούτοις, το κόστος παραγωγής είναι υψηλότερο στις μικρότερες εγκαταστάσεις παραγωγής, και οι αποδόσεις θα είναι πιθανά μικρότερες σε σύγκριση με την κεντροποιημένη παραγωγή σε μεγάλη κλίμακα. Επίσης, είναι πολύ δύσκολο στις μικρής κλίμακας μονάδες παραγωγής υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα να αναπτυχθούν συστήματα δέσμευσης και αποθήκευσης του παραγόμενου CO₂. Οι μικρής κλίμακας αναμορφωτές θα επιτρέψουν τη χρήση των υπαρχουσών υποδομών του φυσικού αερίου για την παραγωγή του υδρογόνου επί του τόπου από τον καταναλωτή. Τέτοιοι αναμορφωτές επομένως αποτελούν μια σημαντικότερη τεχνολογία για τη μετάβαση στην εποχή της οικονομίας του υδρογόνου. Η διαθεσιμότητα των αναμορφωτών στην αγορά είναι περιορισμένη και οι περισσότεροι αναμορφωτές βρίσκονται αυτήν την περίοδο στο στάδιο της έρευνας και ανάπτυξης.

Ορισμένες από τις προαναφερόμενες δυσκολίες ενέχουν προκλήσεις και απαιτούν περισσότερη προσπάθεια από τους υπεύθυνους για την ανάπτυξη της τεχνολογίας και τους προμηθευτές. Τα επιτεύγματα της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια είναι αξιόλογα και τα τυχόν χάσματα που υπάρχουν έχουν γεφυρωθεί σημαντικά. Ο όγκος των εμπορικών διατάξεων αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική απαίτηση της αγοράς. Οι προμηθευτές έχουν μειώσει σημαντικά τον συνολικό όγκο. Το βέλτιστο σύστημα για το μέλλον θα ήταν η οποιαδήποτε διάταξη για την παραγωγή υδρογόνου να τοποθετείται υπογείως σε ένα χώρο 10 x 3 x 3 m για δυναμικότητες παραγωγής υδρογόνου της τάξης των 500-700 Nm³/h. Ο στόχος αυτό θεωρείται εφικτός. Εντούτοις, ο χώρος που απαιτείται για την παραγωγή του υδρογόνου αποτελεί ένα σημαντικό μειονέκτημα.

1.6.3 Δυνατότητες και εμπόδια

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

ισχύ αποτελεσματικές πολιτικές για αύξηση της απόδοσης, μείωση των εκπομπών του CO₂ και βελτίωση του ενεργειακού εφοδιασμού και της σχετιζόμενης ασφάλειας. Το κόστος παραγωγής H₂ πρέπει να μειωθεί κατά 3 έως 10 φορές (ανάλογα με την τεχνολογία και την διεργασία). Συγχρόνως τα κίνητρα μείωσης των εκπομπών σε 17–33 €/tCO₂ (ανάλογα με την τιμή των ορυκτών καυσίμων) θα βοηθούσαν να καταστήσουν το καύσιμο H₂ ανταγωνιστικότερο οικονομικά. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η αύξηση των εκπομπών κατά τη διάρκεια των ερχόμενων δεκαετιών θα μπορούσε να μειωθούν σημαντικά ώστε οι αναμενόμενες εκπομπές το 2050 να έχουν ελαττωθεί κατά το ήμισυ.

Το ανανεώσιμο υδρογόνο αναμένεται ότι θα διαδραματίσει έναν σημαντικό ρόλο μακροπρόθεσμα. Ο σχεδιασμός της μετάβασης προς τις τεχνολογίες παραγωγής ανανεώσιμου υδρογόνου θα επηρεαστεί έντονα από την αρχική υποδομή που θα απαιτηθεί για να επιτρέψει σε ένα αρχικό στάδιο την μαζική διείσδυση του στην αγορά. Λόγω της διάρκειας ζωής μιας τυπικής εγκατάστασης (περίπου 20 έτη) για τον βασικό εξοπλισμό όπως οι συσκευές ηλεκτρόλυσης, οι σταθμοί ανεφοδιασμού ή οι μεγάλης κλίμακας αναμορφωτές, οι επιλογές που θα γίνουν τώρα για τα μεγάλης κλίμακας επιδεικτικά έργα και η ακόλουθη φάση εισαγωγής στην αγορά θα φέρουν τα πρώτα αποτελέσματα μετά το 2030. Ως εκ τούτου μια μελλοντική ενεργειακή πολιτική πρέπει να εξετάσει το θέμα της χρήσης των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας θεωρώντας ότι οι (συγκριτικά φτηνοί) ανανεώσιμοι πόροι είναι περιορισμένοι και υπάρχει ήδη ένας ισχυρός ανταγωνισμός μεταξύ των σταθερών χρηστών σε μερικές περιοχές λόγω των υφιστάμενων νόμων και κινήτρων για την παραγωγή "πράσινης" ηλεκτρικής ενέργειας.