

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗ ΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Ζαχμάνογλου Θεόδωρος
Μηχανολόγος – Ηλεκτρολόγος Μηχανικός

Ζαχμάνογλου Άρτεμις
Τεχνολόγος – Ηλεκτρολόγος Μηχανικός

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αν και από το 1839 ο Βρετανός William Grove είχε ανακαλύψει την αρχή λειτουργίας των κυψελών καυσίμου (κ.κ.), πέρασαν 120 χρόνια μέχρι η NASA να χρησιμοποιήσει τις (κ.κ.) για τις ανάγκες των διαστημικών πτήσεων. Έτσι από το 1960 η βιομηχανία άρχισε να αναγνωρίζει την εμπορική εξέλιξη αυτών παρά τα μεγάλα εμπόδια που προέρχονταν από την ανύπαρκτη μέχρι τότε τεχνολογία και το υψηλό προβλεπόμενο κόστος της παραγόμενης ενέργειας σε σχέση με την υπάρχουσα τεχνολογία.

Από το 1984 η Υπηρεσία Τεχνολογίας των μεταφορών του τμήματος ανάπτυξης ενέργειας στις ΗΠΑ έδωσε ώθηση στον Ιδιωτικό και Δημόσιο Τομέα για την ανάπτυξη της έρευνας και της τεχνολογίας για τις (κ.κ.) με αποτέλεσμα εκατοντάδες εταιρειών, σε όλο τον κόσμο, να ξεκινήσουν να εργάζονται για την ανάπτυξη τους.

Σήμερα πολλές και αξιόλογες εταιρείες παγκοσμίως, οδηγούμενες από τεχνικές, οικονομικές και κοινωνικές δυνάμεις προσπαθούν να βελτιώσουν τη τεχνολογία των (κ.κ.) ώστε να επιτευχθούν, αυξημένη απόδοση, μεγάλη διάρκεια ζωής, αξιοπιστία, χαμηλό κόστος και περιβαλλοντολογικά οφέλη, από τη χρήση αυτών.

Οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης εναλλαγής πρωτονίων (PEM) έχουν γίνει οι πλέον δημοφιλείς συσκευές μετατροπής ενέργειας λόγω της μεγάλης τους απόδοσης της απλότητας στη σχεδίασή τους αλλά και στη λειτουργία τους.

Σημαντικές βελτιώσεις και πρόσφατες εξελίξεις στη διαχείριση του παραγόμενου νερού και της παραγόμενης θερμότητας κατά τη λειτουργία τους, καθώς και στη βελτίωση των μεμβρανών και των ηλεκτροδίων, και πιο πρόσφατα στην ολοκληρωμένη σχεδίαση ροής των αερίων και υγρών έχουν αυξήσει ακόμη περισσότερο τη προσέλευση αυτού του είδους κυψελών καυσίμου.

Οποσδήποτε πρέπει να γίνουν επιπλέον βελτιώσεις που αφορούν την απόδοση και το κόστος, ώστε το σύστημα να είναι πιο ανταγωνιστικό.

Τα σοβαρά πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου μεμβράνης εναλλαγής πρωτονίων, ειδικά για χρήση στη κίνηση όλων των τύπων των οχημάτων, είναι ο λόγος για τον οποίο θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με αυτές στη παρούσα εισήγηση.



Σχήμα 1 : Φορητά συστήματα κυμαλών καυσίμου.

2. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ (Κ. Κ.) ΓΙΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

Η (κ.κ.) είναι μία ενεργειακή διάταξη που μετατρέπει απευθείας τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς καμία ενδιάμεση θερμική ή μηχανική διεργασία.

Η ενέργεια απελευθερώνεται όταν το καύσιμο αντιδρά χημικά με το οξυγόνο του αέρα. Η αντίδραση είναι ηλεκτροχημική και η ενέργεια απελευθερώνεται υπό μορφή, ηλεκτρικού συνεχούς ρεύματος χαμηλής τάσης και θερμότητας.

Η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται απευθείας για να καλύψει το φορτίο του οχήματος ενώ η θερμότητα αποβάλλεται στο περιβάλλον.

Βασικό χαρακτηριστικό των (κ.κ.) είναι ότι το φορτίο του ηλεκτρικού ρεύματος προσδιορίζει τη κατανάλωση του H_2 και του O_2 . Κατά τη κίνηση των οχημάτων έχουμε μία μεγάλη ποικιλία ηλεκτρικών φορτίων

Η (κ.κ.) είναι ουσιαστικά ένα γαλβανικό στοιχείο. Κάθε γαλβανικό στοιχείο αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια, την άνοδο και τη κάθοδο και ενδιάμεσα έναν ηλεκτρολύτη. Στην άνοδο δηλαδή στο αρνητικό ηλεκτρόδιο γίνεται οξείδωση, που σημαίνει απελευθέρωση ηλεκτρονίων ενώ στη κάθοδο, στο θετικό ηλεκτρόδιο γίνεται αναγωγή, δηλαδή λήψη ηλεκτρονίων.

Για να μπορούμε να επιτύχουμε ροή ηλεκτρονίων, δηλαδή ηλεκτρικό ρεύμα η άνοδος και η κάθοδος δεν πρέπει να βρίσκονται σε επαφή διότι τότε το ρεύμα θα ρέει εσωτερικά του γαλβανικού στοιχείου.

Για να έχουμε εξωτερική ροή ηλεκτρονίων η άνοδος και η κάθοδος συνδέονται ηλεκτρικά με εξωτερικό αγωγό, ενώ εσωτερικά διαχωρίζονται με τον ηλεκτρολύτη ο οποίος επιτρέπει την κίνηση εντός αυτού φορτισμένων ιόντων δηλαδή φορτισμένων ατόμων ή ριζών ενώ δεν επιτρέπει την κίνηση των ηλεκτρονίων.

Ο ηλεκτρολύτης είναι το κύριο στοιχείο ενός γαλβανικού στοιχείου. Οι διάφοροι τύποι μπαταριών και (κ.κ.) που είναι γαλβανικά στοιχεία εξαρτώνται από το τύπο του ηλεκτρολύτη.

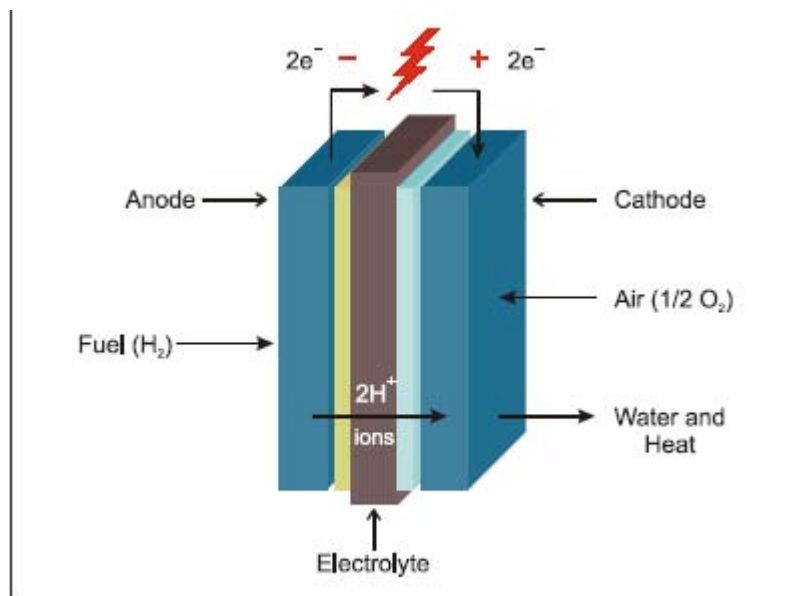
Οι ηλεκτρολύτες μπορεί να είναι σε υγρή ή στερεά φάση, που από χημική σύσταση είναι άλατα, βάσεις ή οξέα. Οι ηλεκτρολύτες πρέπει να έχουν καλή ιοντική αγωγιμότητα, ενώ πρέπει να μην είναι αγωγάμοι στο ηλεκτρικό ρεύμα, να μην αντιδρούν με τα ηλεκτρόδια και οι ιδιότητές τους να μην επηρεάζονται από μεταβολές της θερμοκρασίας.

Στις (κ.κ.) το αέριο καύσιμο H_2 και το οξειδωτικό αέριο O_2 αποτελούν αντίστοιχα την άνοδο και τη κάθοδο της κυψέλης. Η φυσική κατασκευή επομένως μιας (κ.κ.) είναι κανάλια στα οποία κυκλοφορούν στην άνοδο το H_2 και στη κάθοδο το O_2 . Τα κανάλια των δύο αερίων βρίσκονται στις δύο πλευρές του ηλεκτρολύτη.

Ο ηλεκτρολύτης είναι το κύριο χαρακτηριστικό που διακρίνει τους διάφορους τύπους (κ.κ.). Διάφοροι τύποι ηλεκτρολυτών είναι αγωγάμοι σε διάφορα ιόντα.

Οι ηλεκτρολύτες μπορεί να είναι σε υγρά ή στερεά μορφή, και λειτουργούν σε υψηλές ή σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Οι ηλεκτρολύτες που λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες απαιτούν για τη λειτουργία τους την ύπαρξη καταλυτών από ευγενή μέταλλα οι οποίοι επιταχύνουν τις σχετικές χημικές αντιδράσεις.



Σχήμα 2 : Λειτουργία κυψέλης καυσίμου υδρογόνου.

Οι περισσότερες (κ.κ.) που χρησιμοποιούνται για τη κίνηση οχημάτων χρησιμοποιούν στερεούς ηλεκτρολύτες, χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας.

Οι (κ.κ.) που έχουν επικρατήσει, χρησιμοποιούν σαν καύσιμο αέριο H_2 , το οποίο έχει την υψηλότερη ηλεκτροχημική δραστηριότητα σε σχέση με άλλα καύσιμα όπως π.χ. οι υδρογονάνθρακες και οι αλκοόλες.

Εάν χρησιμοποιείται διαφορετικό από το H_2 καύσιμο, σε οχήματα που κινούνται με (κ.κ.), αυτό προηγουμένως θα πρέπει να έχει μετατραπεί ώστε να χρησιμοποιηθεί μόνο το H_2 που περιέχεται σ' αυτό.

Σαν οξειδωτικό μέσο χρησιμοποιείται το O_2 το οποίο βρίσκεται στον ατμοσφαιρικό αέρα το οποίο και αυτό έχει μεγάλη ηλεκτροχημική δραστηριότητα.

3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ (Κ. Κ.) ΜΕ ΤΙΣ ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ

Τόσο οι (κ.κ.) όσο και οι μπαταρίες είναι γαλβανικά στοιχεία και έχουν μεταξύ τους πολλές ομοιότητες.

Και οι (κ.κ.) και οι μπαταρίες αποτελούνται από μία άνοδο και μία κάθοδο σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη. Και οι δύο διατάξεις παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα μετατρέποντας τη χημική ενέργεια των συστατικών τους, που αρχικά βρίσκεται σε υψηλότερη στάθμη, σε χημικές ενώσεις χαμηλότερης στάθμης χημικής ενέργειας. Η διαφορά αυτή της χημικής ενέργειας μεταξύ αρχικής και τελικής κατάστασης μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω της ηλεκτροχημικής αντίδρασης.

Οι αντιδράσεις γίνονται στην άνοδο και τη κάθοδο, ενώ τα παραγόμενα ηλεκτρόνια μεταφέρονται από την άνοδο στη κάθοδο μέσω εξωτερικού κυκλώματος και δημιουργούν το ηλεκτρικό ρεύμα. Η ηλεκτρική τάση μεταξύ άνοδου και καθόδου είναι σχετικά μικρή και στις (κ.κ.) και στις μπαταρίες που αποτελούνται από ένα γαλβανικό στοιχείο. Για να επιτύχουμε την απαιτούμενη ηλεκτρική τάση συνδέουμε πολλά στοιχεία είτε των (κ.κ.) είτε των μπαταριών σε σειρά.

Οι (κ.κ.) διαφέρουν από τις μπαταρίες στην άνοδο και κάθοδο του στοιχείου. Στις μπαταρίες η άνοδος και η κάθοδος είναι μεταλλικές. Συνήθως ο ψευδάργυρος και το λίθιο χρησιμοποιούνται για άνοδο και τα μεταλλικά τους οξείδια για κάθοδο. Στις (κ.κ.) η άνοδος και η κάθοδος είναι ουσιαστικά αέρια, το H_2 για την άνοδο και το O_2 για τη κάθοδο, τα οποία έρχονται σε επαφή με καταλύτη από λευκόχρυσο, για να επιταχυνθούν οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις.

Οι (κ.κ.) διαφέρουν επίσης από τις μπαταρίες σε ότι αφορά την αποθήκευση των αντιδρώντων ουσιών. Στις μπαταρίες η άνοδος και η κάθοδος αποτελούν τα αντιδρώντα υλικά και καταναλώνονται κατά τη διάρκεια της χρήσης τους.

Όταν τα υλικά αυτά καταναλωθούν τότε σταματά η λειτουργία της μπαταρίας και αυτή πρέπει ή να αντικατασταθεί ή να επαναφορτιστεί, ανάλογα με τα υλικά που χρησιμοποιούνται.

Στις (κ.κ.) τα αντιδρώντα υλικά τροφοδοτούνται συνεχώς από μία εξωτερική πηγή, από τη δεξαμενή καυσίμου το H_2 και από τον ατμοσφαιρικό αέρα το O_2 , και επομένως μπορούν να λειτουργούν συνεχώς όσο υπάρχει διαθέσιμο καύσιμο H_2 .

4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ (Κ. Κ.) ΜΕ ΤΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

Υπάρχουν ομοιότητες μεταξύ (κ.κ.) και ΜΕΚ. Και οι δύο διατάξεις χρησιμοποιούν αέρια καύσιμα τα οποία προέρχονται από μία αποθήκη καυσίμου, H_2 για τις (κ.κ.), ατμοί βενζίνης για τις ΜΕΚ.

Και οι δύο διατάξεις χρησιμοποιούν καύσιμα πλούσια σε H_2 . Οι (κ.κ.) καθαρό H_2 ή καύσιμα από το οποίο έχει διαχωριστεί το H_2 , π.χ. μεθανόλη, ενώ η βενζίνη και το πετρέλαιο είναι ορυκτά καύσιμα πλούσια σε H_2 (υδρογονάνθρακες).

Και οι δύο διατάξεις χρησιμοποιούν πεπιεσμένο αέρα σαν οξειδωτικό μέσο. Στις (κ.κ.) ο αέρας συμπιέζεται από εξωτερικό αεροσυμπιεστή, στις ΜΕΚ ο αέρας συμπιέζεται κατά τη κίνηση του εμβόλου.

Επίσης και οι δύο διατάξεις απαιτούν την ύπαρξη συστήματος ψύξης αν και η θερμότητα που πρέπει να διοχετευθεί στο περιβάλλον είναι μεγαλύτερη στις ΜΕΚ.

Υπάρχουν όμως και σοβαρές διαφορές. Στις (κ.κ.) η αντίδραση μεταξύ καυσίμου (H_2) και οξειδωτικού (O_2) είναι ηλεκτροχημική ενώ στις ΜΕΚ η αντίδραση αυτή είναι ταχεία καύση του καυσίμου με ανάπτυξη υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας.

Επίσης οι ΜΕΚ είναι μηχανικά συστήματα που παράγουν από τη χημική ενέργεια του καυσίμου μηχανική ενέργεια, ενώ οι (κ.κ.) είναι σταθερές διατάξεις, χωρίς κινούμενα μέρη που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.

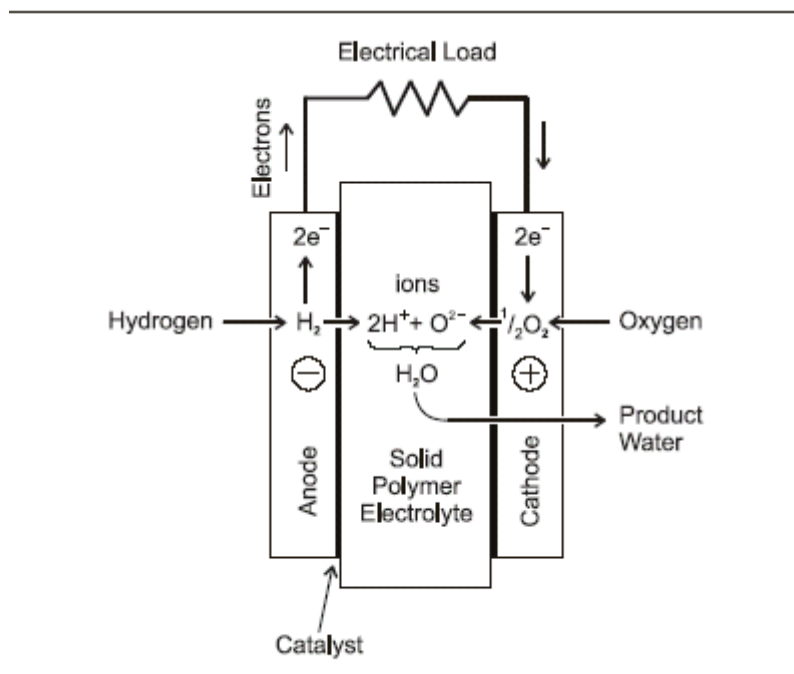
5. (Κ.Κ.) ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΕΝΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEM)

Οι (κ.κ.) Μεμβράνης Εναλλαγής Πρωτονίων (PEM), (Proton Exchange Membrane), ή στερεού πολυμερούς, χρησιμοποιούν έναν ηλεκτρολύτη ο οποίος έχει τη δυνατότητα να άγει ιόντα υδρογόνου (H^+) από την άνοδο στη κάθοδο.

Οι (κ.κ.) PEM έχουν επικρατήσει λόγω των ιδιοτήτων τους, στη χρήση για τη κίνηση οχημάτων, γι' αυτό θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με αυτές.

Ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται είναι ένα στερεό πολυμερές φιλμ το οποίο είναι οξειδωμένο τεφλόν.

Λειτουργούν σε θερμοκρασίες $70\text{ }^\circ\text{C}$ έως $90\text{ }^\circ\text{C}$ και σε πιέσεις 1 έως 2 bar. Κάθε στοιχείο (κ.κ.) PEM μπορεί να παράγει ηλεκτρική τάση 0,7 Volts, συνεχούς ρεύματος (DC).



Σχήμα 3 : Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης εναλλαγής πρωτονίων (PEM)

5.1. Πλεονεκτήματα των (κ. κ.) (PEM)

- Δεν επηρεάζονται από την ύπαρξη χαμηλών συγκεντρώσεων CO₂ με αποτέλεσμα να μπορούν να χρησιμοποιήσουν τον ατμοσφαιρικό αέρα σαν οξειδωτικό μέσο.
- Λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην απαιτούν για τη κατασκευή τους ειδικά υλικά αυξημένης αντοχής σε θερμοκρασία, να μην θέλουν μεγάλους χρόνους προθέρμανσης και να μην απαιτούν για την χρήση τους ειδικές διατάξεις σε ότι αφορά θέματα ασφαλείας.
- Χρησιμοποιούν, στερεό, ξηρό, ηλεκτρολύτη. Αυτό ελαχιστοποιεί την ανάγκη διακίνησης υγρών και την απώλεια και επαναπλήρωση υγρών.
- Χρησιμοποιούν ένα μη διαβρωτικό καταλύτη. Η χρήση καθαρού νερού ελαχιστοποιεί προβλήματα διάβρωσης και βελτιώνει την ασφάλεια λειτουργίας.
- Χαρακτηρίζονται από υψηλή πυκνότητα, τάσης, έντασης και ισχύος.
- Λειτουργούν σε χαμηλή πίεση με αυξημένη επομένως ασφάλεια.
- Έχουν καλή ανοχή σε διαφορετικές πιέσεις αερίων (H₂ και O₂).
- Είναι συμπαγείς και στιβαρές.
- Έχουν σχετικά απλή μηχανολογική σχεδίαση.
- Χρησιμοποιούν στερεά υλικά κατασκευής.

5.2. Μειονεκτήματα των (κ. κ.) (PEM)

- Ανέχονται μέχρι 50 ppm μονοξειδίου του άνθρακα (CO).
- Ανέχονται λίγα ppm ενώσεων του θείου.
- Απαιτούν την ύγρανση των αντιδρώντων αερίων. Η απαίτηση για ύγρανση των αερίων (H₂ και O₂) καταναλώνει ενέργεια και αυξάνει τη πολυπλοκότητα του συστήματος. Η χρήση νερού για την ύγρανση των αερίων δεν επιτρέπει την αύξηση της θερμοκρασίας πέραν του σημείου βρασμού του νερού και επομένως μειώνει τη δυνατότητα χρήσης της παραγόμενης θερμότητας.
- Χρησιμοποιούν ακριβό καταλύτη από λευκόχρυσο και για ηλεκτρολύτη μία ακριβή μεμβράνη μειωμένης μηχανικής αντοχής.

5.3. Οι χημικές αντιδράσεις στις (κ. κ.) (PEM)

Οι (κ.κ.) τύπου PEM βασίζονται στην αντίδραση του H₂ με το O₂.

Οι αντιδράσεις στην άνοδο είναι : $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

Οι αντιδράσεις στην κάθοδο είναι : $\frac{1}{2} O_2 + 2e^- + 2H^+ \rightarrow H_2O$

Τα ιόντα H⁺ μεταφέρονται δια μέσω του ηλεκτρολύτη από την άνοδο στη κάθοδο από την έλξη του H₂ από το O₂, ενώ τα ηλεκτρόνια (e⁻) οδηγούνται στο εξωτερικό κύκλωμα. Εάν συνδυάσουμε τις αντιδράσεις στην άνοδο και τη κάθοδο έχουμε συνολική αντίδραση,

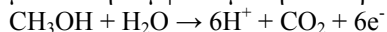
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$, έτσι βλέπουμε ότι παράγεται νερό το οποίο συγκεντρώνεται στη κάθοδο. Η ποσότητα αυτή του νερού πρέπει να απομακρύνεται συνεχώς από τη κάθοδο για να έχουμε συνεχώς τη παραπάνω χημική αντίδραση.

5.4. (Κ. Κ.) PEM με χρήση μεθανόλης

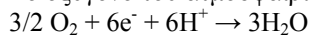
Οι (κ.κ.) PEM μπορούν να χρησιμοποιηθούν με χρήση μεθανόλης απευθείας ως καύσιμο.

Αν και η ενέργεια που παράγεται με χρήση μεθανόλης είναι μικρότερη σε σχέση με χρήση καθαρού H₂, εν τούτοις η μεθανόλη μπορεί να αποθηκευτεί πιο εύκολα από το H₂ και αποφεύγεται η διαδικασία παραγωγής του καθαρού H₂.

Όταν χρησιμοποιείται μεθανόλη για καύσιμο, τότε τροφοδοτείται η άνοδος με υδατικό διάλυμα μεθανόλης ενώ η κάθοδος τροφοδοτείται με ατμοσφαιρικό αέρα. Στους 130 °C ένας καταλύτης ευγενούς μετάλλου αποσυνθέτει τη μεθανόλη σύμφωνα με την αντίδραση :



Το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα ιονίζεται και αντιδρά με το H₂ για να σχηματίσει νερό.



Εάν συνδυάσουμε τις αντιδράσεις στην άνοδο και τη κάθοδο, η συνολική αντίδραση παράγει νερό και CO₂.

Η τεχνολογία χρήσης της μεθανόλης βρίσκεται σε εξέλιξη.

6. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΤΗΛΗΣ (Κ. Κ.) PEM

Οι μεμονωμένες (κ.κ.) έχουν μέγιστη τάση εξόδου περίπου 0,7 Volts συνεχούς ρεύματος. Για την επίτευξη χρήσιμων ηλεκτρικών τάσεων συνδέουμε πολλές (κ.κ.) σε σειρά μεταξύ τους, οπότε έχουμε τη "στήλη" (κ.κ.) PEM.

Υπάρχουν στήλες διαφόρων διαστάσεων αποτελούμενες από πολλές μεμονωμένες, εν σειρά (κ.κ.).

Κάθε (κ.κ.) αποτελείται από ένα σετ μεμβράνης και ηλεκτροδίων που περιέχει την άνοδο, τη κάθοδο, τον ηλεκτρολύτη και το καταλύτη, υπό μορφή σάντουιτς, μεταξύ δύο πλακών γραφίτη με κανάλια στα οποία κυκλοφορεί το καύσιμο στη μία πλάκα και ο αέρας στην άλλη πλάκα.

Χρησιμοποιείται ψυκτικό υγρό για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας. Για τη διευκόλυνση της ψύξης τοποθετούνται πλάκες ψύξης μεταξύ των (κ.κ.). Στα κανάλια των πλακών ψύξης κυκλοφορεί το ψυκτικό υγρό το οποίο παραλαμβάνει τη θερμότητα που δημιουργείται από τις αντιδράσεις και έτσι διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία της στήλης.

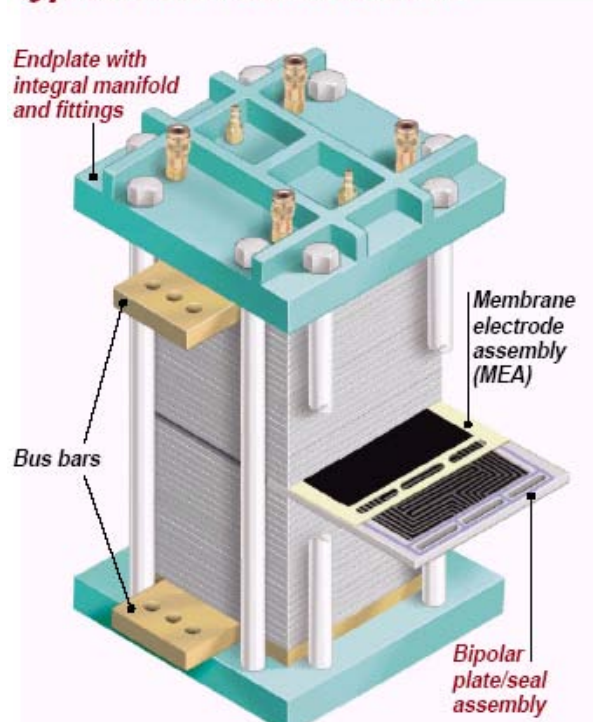
Μονώσεις μεταξύ των πλακών γραφίτη εξασφαλίζουν την μη ανάμειξη του H_2 με τον ατμοσφαιρικό αέρα και το ψυκτικό υγρό.

Στις άκρες των (κ.κ.) τοποθετούνται αγώγιμες πλάκες οι οποίες συνδέονται με τους ακροδέκτες από τους οποίους εξάγεται η ηλεκτρική ενέργεια για κατανάλωση, στο εξωτερικό κύκλωμα. Το σύνολο των πλακών στερεώνεται με ισχυρές βίδες που συγκρατούν τη στήλη σαν ένα ενιαίο τεμάχιο.

Για να έχουμε μία πρακτική στήλη θα πρέπει να εξάγουμε όσο το δυνατό περισσότερη ηλεκτρική ισχύ από μία δεδομένη επιφάνεια μεμβράνης η οποία εξαρτάται από τη χρήση της στήλης. Η στήλη θα πρέπει να είναι το δυνατόν συμπαγής.

Απαιτείται μεγάλη προσοχή στις μονώσεις της στήλης, αλλά και στην ευθυγράμμισή της κατά τη συναρμολόγηση ώστε τελικά η στήλη να είναι πρακτική, να κατασκευάζεται σχετικά εύκολα, να έχει χαμηλό κόστος και μεγάλη διάρκεια ζωής.

Typical PEM Fuel Cell Stack



Σχήμα 4 : Στήλη κυψέλης καυσίμου PEM.



Σχήμα 5 : Συναρμολόγηση στήλης κυψέλης καυσίμου.

6.1. Σετ μεμβράνης και ηλεκτροδίων

Το σετ μεμβράνης και ηλεκτροδίων είναι η καρδιά της (κ.κ.). Αυτό αποτελείται από μία στερεά πολυμερή μεμβράνη ηλεκτρολύτη που βρίσκεται μεταξύ δυο πλακών από πορώδη άνθρακα που αποτελούν τα ηλεκτρόδια του σετ. Μεταξύ των ηλεκτροδίων και της μεμβράνης έχει ενσωματωθεί καταλύτης από λευκόχρυσο. Τα ηλεκτρόδια περιλαμβάνουν και τις σχετικές μονώσεις ώστε να μην εφάπτονται αγωγίμα με τα γειτονικά εξαρτήματα.

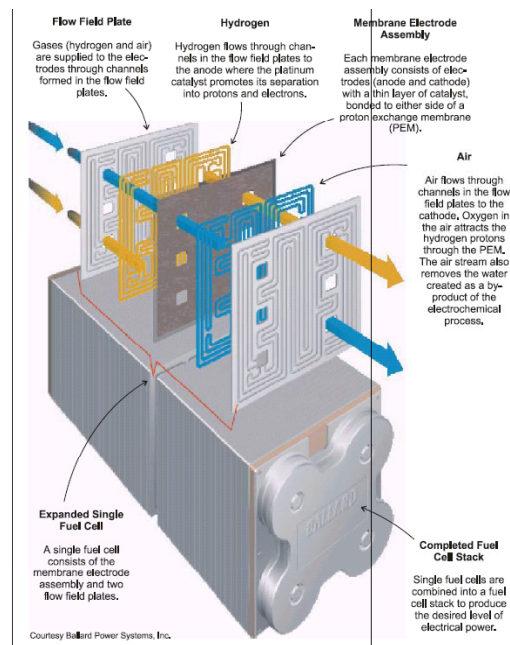


Figure 4-17 Basic PEM Fuel Cell Stack Arrangement

Σχήμα 6 : Ανάλυση στήλης κυψέλης καυσίμου PEM.

6.1.1. Τα ηλεκτρόδια είναι οι ενδιάμεσοι φορείς μεταξύ των αντιδρώντων αερίων και της μεμβράνης. Πρέπει να επιτρέπουν τη διέλευση των διαλυμένων στο νερό αερίων και να διαθέτουν μία επιφάνεια σε επαφή με τη μεμβράνη (ηλεκτρολύτη). Τα ηλεκτρόδια πρέπει να είναι αγωγίμα στα ελεύθερα ηλεκτρόνια τα οποία κινούνται από την άνοδο προς τη κάθοδο, γι' αυτό κατασκευάζονται από ειδικά υλικά. Συνήθως χρησιμοποιείται ινώδης άνθρακας σε μορφή χαρτιού, ο οποίος είναι πορώδης, αγωγίμος, μη διαβρωτικός και δεν επηρεάζεται από την υγρασία.

Το υλικό των ηλεκτροδίων είναι πολύ λεπτού πάχους για να μεγιστοποιηθεί η μεταφορά των αερίων και του νερού. Στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων προς τη μεμβράνη, προστίθεται καταλυτικό υλικό το οποίο επιταχύνει την έναρξη των χημικών αντιδράσεων.

Ο καταλύτης βοηθά στη πραγματοποίηση των αντιδράσεων, χωρίς να συμμετέχει σε αυτές. Συνήθως χρησιμοποιείται λευκόχρυσος, ο οποίος διαθέτει, μεγάλη ηλεκτροκαταλυτική ενέργεια, σταθερότητα και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Ο λευκόχρυσος είναι πολύ ακριβό ευγενές μέταλλο, γι' αυτό η ποσότητα που χρησιμοποιείται είναι βασικός παράγων κόστους. Γίνονται συνεχείς προσπάθειες για τη μείωση της ποσότητας του λευκόχρυσου, διατηρώντας όμως την απόδοση της(κ.κ.) στα επιθυμητά επίπεδα.

6.1.2. Ηλεκτρολύτης. Το βασικότερο χαρακτηριστικό των (κ.κ.) PEM είναι ο στερεός πολυμερής ηλεκτρολύτης της. Ο ηλεκτρολύτης αυτός είναι μία πολύ λεπτή μεμβράνη όπως το πλαστικό φιλμ που χρησιμοποιούμε για περιτύλιξη των τροφίμων στο ψυγείο. Το πάχος της μεμβράνης είναι 50 έως 175 μικρά.

Η μεμβράνη κατασκευάζεται από παραφθοριοθειικά οξέα τα οποία είναι πολυμερή σαν το τεφλόν και έχουν αλυσίδες άνθρακα που καταλήγουν σε συγκροτήματαθειικών ριζών (SO_3^-).

Όλα τα πολυμερή οξέα που χρησιμοποιούνται σαν ηλεκτρολύτες απαιτούν την ύπαρξη μορίων νερού για να υπάρχει αγωγιμότητα ιόντων υδρογόνου (πρωτονίων) διότι τα ιόντα υδρογόνου μετακινούνται μαζί με τα μόρια νερού κατά τη διάρκεια της αντίδρασης διάσπασης του αερίου H_2 σε ιόντα υδρογόνου. Η σχέση νερού προς ιόντα υδρογόνου για αποτελεσματική αγωγιμότητα είναι περίπου 3:1. Για το λόγο αυτό το αέριο H_2 που έρχεται σε επαφή με τη μεμβράνη πρέπει να υγραίνεται με νερό για να λειτουργήσει η (κ.κ.).

Σε επίπεδο μορίων, η πολυμερής μεμβράνη έχει μία σωληνωτή μορφή στην οποία τα συγκροτήματα τουθειικού οξέως βρίσκονται στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα. Αυτά τα συγκροτήματα απαιτούν τη παρουσία του νερού για να γίνουν αγωγοί των ιόντων υδρογόνου.

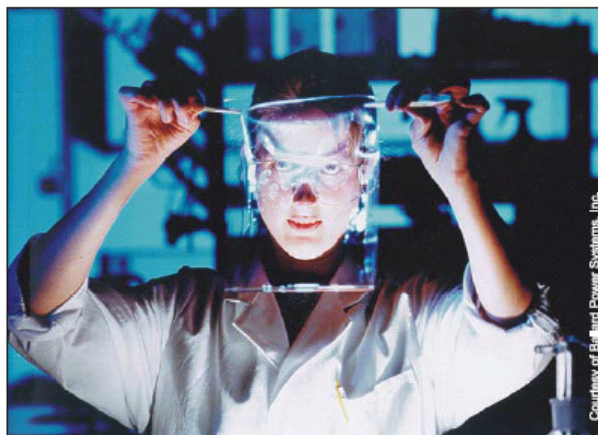
Η εξωτερική επιφάνεια των σωληνωτών μορίων αποτελείται από το φθοριομένο υλικό του πολυμερούς το οποίο δεν επηρεάζεται από την παρουσία του νερού. Δηλαδή η μεταφορά νερού και των περιεχομένων σε αυτό ιόντων υδρογόνου γίνεται εσωτερικά των σωληνωτών μορίων ενώ εξωτερικά η μεμβράνη κρατά τη στερεά μορφή της.

Εάν μειωθεί η υγρασία αυτών των σωληνωτών μορίων της μεμβράνης τότε η αγωγιμότητα των ιόντων υδρογόνου πέφτει απότομα και μπορεί να δημιουργήσει ρωγμές ή οπές στη μεμβράνη.

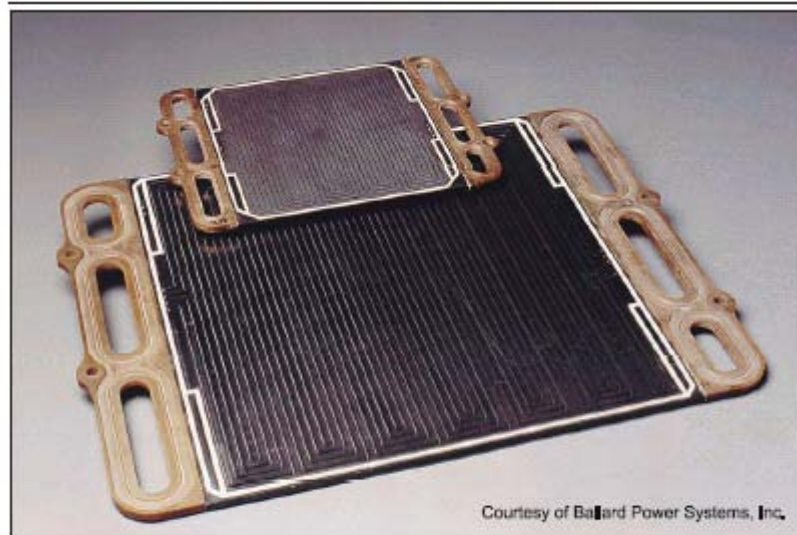
Υπάρχουν διαθέσιμες στο εμπόριο διάφορες μεμβράνες ηλεκτρολύτη όπως η Nafion που παράγεται από την εταιρεία Dupont και άλλες που παράγονται από την εταιρεία χημικών Dow. Εκτός αυτών η εταιρεία κατασκευής κυψελών καυσίμου Ballard έχει αναπτύξει δικές της μεμβράνες.

Όλες οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται σαν ηλεκτρολύτης πρέπει να εξασφαλίζουν αγωγιμότητα ιόντων υδρογόνου και ταυτόχρονα να είναι μονωτές κίνησης ηλεκτρονίων δηλαδή μονωτές ηλεκτρισμού. Επιπλέον, οι κατασκευαστές προσπαθούν να κατασκευάσουν μεμβράνες που να διαθέτουν ικανή μηχανική αντοχή, σταθερότητα στις διαστάσεις, σταθερότητα στο να μη συστρέφονται, χαμηλό βάρος φθοριούχων πολυμερών ενώσεων σε σχέση με τις ενώσεις οξέος που είναι και οι αγωγοί μεταφοράς των ιόντων υδρογόνου και τέλος να είναι εύκολα κατασκευάσιμες.

Η μηχανική αντοχή των μεμβρανών και η σταθερότητα των διαστάσεων επαυξάνουν με τη κατασκευή του σετ μεμβράνης ηλεκτροδίων.



Σχήμα 7 : Μembrάνη κυψέλης καυσίμου PEM.



Σχήμα 8 : Πλάκες ροής κυψέλης καυσίμου PEM.

6.2. ΠΛΑΚΕΣ ΡΟΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΛΥΜΑΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ

Αυτές είναι δύο πλάκες σε κάθε (κ.κ.) που τοποθετούνται στις δύο πλευρές της και περιλαμβάνουν ένα κανάλι σε μορφή σερπαντίνας που καλύπτει όσο το δυνατό μεγαλύτερη επιφάνεια της πλάκας για να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή επαφή με το σετ μεμβράνης ηλεκτροδίων.

Η μορφή των καναλιών και η σχεδίαση της όδυσής τους επί των πλακών είναι κρίσιμος παράγων για την ομοιόμορφη παραγωγή ενέργειας, για σταθερή απόδοση και για καλή διαχείριση του νερού που συμμετέχει στη διαδικασία και παράγεται από τις χημικές αντιδράσεις.

Υπάρχουν διάφορες σχεδιάσεις καναλιών στις πλάκες ανάλογα με τη χρήση της (κ.κ.).

Κάθε πλάκα πρέπει να είναι ηλεκτρικά αγωγίμη, έτσι ώστε το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται κατά τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις να μπορεί να ρέει από τη μία κυψέλη στην επόμενη και τελικά στις εξωτερικές πλάκες από τις οποίες διοχετεύεται στο εξωτερικό κύκλωμα.

Οι πλάκες κατασκευάζονται συνήθως από γραφίτη, στον οποίο τα κανάλια κατασκευάζονται είτε με κατεργασία των πλακών είτε με πίεση. Ο γραφίτης προτιμάται λόγω της εξοχης αγωγιμότητάς του, της χαμηλής διάβρωσής του και του χαμηλού κόστους του.

Οι πλάκες του ψυκτικού υγρού που τοποθετούνται μεταξύ των (κ.κ.) είναι της ίδιας σχεδίασης και κατασκευής με τις πλάκες των αερίων.

Τα κανάλια του ψυκτικού υγρού σε αυτές διαμορφώνονται σε ανάλογη επιφάνεια για την απαγωγή της παραγόμενης θερμότητας.

Οι πλάκες των αερίων και του ψυκτικού υγρού περιλαμβάνουν και τις σχετικές θύρες εισόδου και εξόδου των ρευστών, καυσίμου H_2 , οξειδωτικού ατμοσφαιρικού αέρα και ψυκτικού υγρού, των ρευστών δηλαδή που εισέρχονται και εξέρχονται από τη στήλη.

Μονώσεις μεταξύ των πλακών γραφίτη εξασφαλίζουν ώστε τα παραπάνω ρευστά να μην αναμειγνύονται.

6.3. ΥΓΡΑΝΤΕΣ

Η ύγρανση με νερό των αντιδρώντων αερίων είναι βασικός παράγων της λειτουργίας των (κ.κ.) PEM. Χωρίς ύγρανση είναι αδύνατη η αγωγιμότητα των μεμβρανών και η ελλιπής ύγρανση, έχει αποτέλεσμα, τη καταστροφή της.

Η ποσότητα του νερού που μπορεί να απορροφήσει κάθε αέριο εξαρτάται βασικά από τη θερμοκρασία ύγρανσης. Θερμότερα αέρια μπορούν να συγκρατήσουν περισσότερο νερό σε σχέση με ψυχρότερα αέρια.

Επειδή ο στόχος της ύγρανσης είναι η ανάμιξη των αντιδρώντων αερίων με όσο το δυνατό περισσότερο νερό, τα αέρια πρέπει να υγραίνονται κοντά στη θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης όπως αυτή σταθεροποιείται με τη βοήθεια του συστήματος ψύξης.

Σε ορισμένες στήλες οι υγραντές ενσωματώνονται εντός αυτών, ενώ σε άλλες στήλες είναι εξωτερικοί.

Οι εσωτερικοί υγραντές αποτελούνται από πρόσθετες πλάκες γραφίτη ενσωματωμένες στη στήλη. Με τον τρόπο αυτό η στήλη χωρίζεται σε δύο μέρη στο ενεργό μέρος που περιλαμβάνει τα κύρια στοιχεία και στο ανενεργό μέρος που περιλαμβάνει τις πλάκες των υγραντών αερίων.

Οι πλάκες των υγραντών μοιάζουν με τις πλάκες τροφοδοσίας των αντιδρώντων αερίων και χωρίζονται από αυτές με μία υδρόφιλη μεμβράνη δια μέσον της οποίας το νερό διοχετεύεται προς τις πλάκες των αερίων και αναμιγνύεται με αυτά.

Υπάρχει μία ποικιλία μεμβρανών στο εμπόριο για το παραπάνω σκοπό.

Υπάρχει δυνατότητα χρησιμοποίησης νερού απευθείας από το σύστημα ψύξης για ύγρανση των αερίων. Στη περίπτωση όμως αυτή το ψυκτικό υγρό του συστήματος ψύξης πρέπει να είναι καθαρό νερό και όχι διάλυμα ψυκτικού υγρού. Υπάρχει φόβος όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι χαμηλή να παγώσει το καθαρό νερό και να καταστραφεί η (κ.κ.).

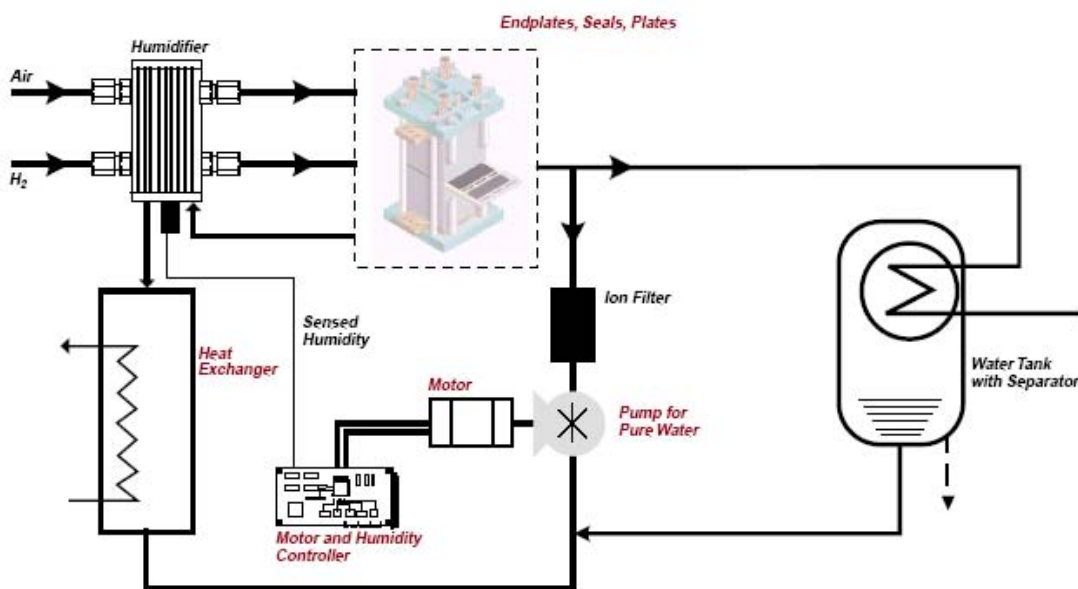
Οι εξωτερικοί υγραντές είναι είτε τύπου μεμβράνης είτε τύπου επαφής.

Οι εξωτερικοί υγραντές μεμβράνης λειτουργούν όπως οι αντίστοιχοι εσωτερικοί αλλά είναι ανεξάρτητες εξωτερικές συσκευές. Οι εξωτερικοί υγραντές επαφής λειτουργούν με ψεκασμό του νερού για ύγρανση, επί θερμής επιφάνειας, ή εντός ενός θαλάμου με μεγάλη επιφάνεια, δια της οποίας ρέει ένα από τα αντιδρώντα αέρια. Με τον τρόπο αυτό το νερό εξατμίζεται κατευθείαν εντός του αερίου το οποίο γίνεται κεκορεσμένο.

Οι εξωτερικοί υγραντές τροφοδοτούν με νερό τα αντιδρώντα αέρια είτε κατευθείαν από το σύστημα ψύξης είτε από ξεχωριστό κύκλωμα νερού ύγρανσης. Υπάρχει βέβαια το ίδιο πρόβλημα παγώματος του νερού σε χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, όταν η τροφοδοσία του γίνεται απευθείας από το σύστημα ψύξης.

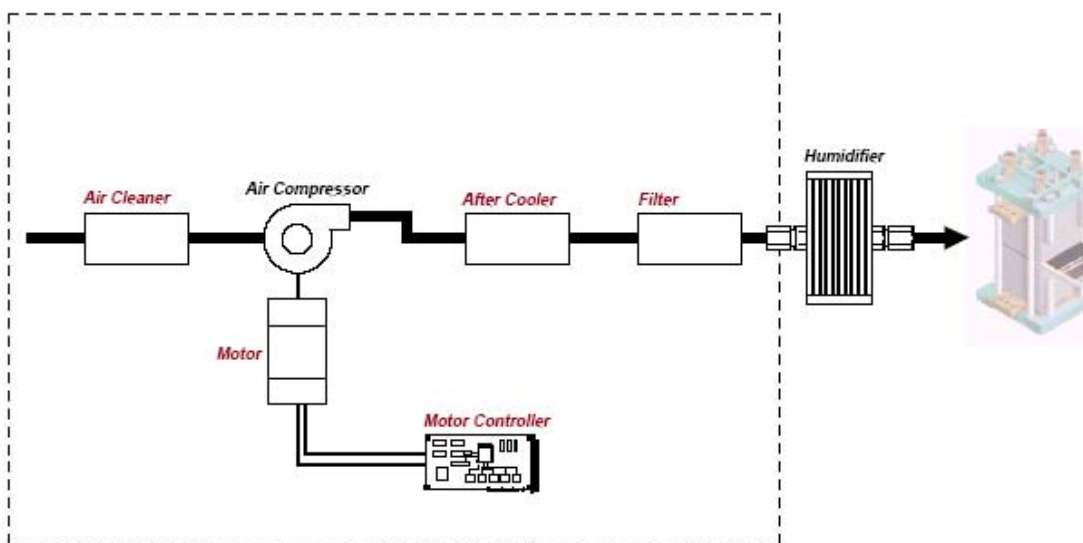
Με τη χρησιμοποίηση ξεχωριστού κυκλώματος νερού ύγρανσης των αερίων θα πρέπει η θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού του συστήματος ψύξης να είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του νερού ύγρανσης, οπότε θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα παρακολούθησης και ρύθμισης αυτών των θερμοκρασιών και το σύστημα γίνεται πιο σύνθετο.

Water and Heat Management



Σχήμα 9 : Διαχείριση συστήματος νερού και απαγωγής θερμότητας κυψέλης καυσίμου PEM.

Air Delivery



Σχήμα 10 : Τροφοδοσία αέρα σε στήλη κυψέλης καυσίμου PEM.

7. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ (Κ. Κ.) ΓΙΑ ΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

Η πλειονότητα των οχημάτων σήμερα χρησιμοποιούν κινητήρες εσωτερικής καύσης. Ένα μικρό ποσοστό οχημάτων κυρίως κινουμένων εντός περιορισμένων χώρων χρησιμοποιούν μπαταρίες και ηλεκτροκινητήρες.

Για να δούμε επομένως τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των οχημάτων που χρησιμοποιούν (κ.κ.) πρέπει να γίνει σύγκριση με αυτές τις κατηγορίες οχημάτων.

Τα οχήματα που χρησιμοποιούν (κ.κ.) λειτουργούν χωρίς εκπομπές βλαβερών ουσιών και επομένως δεν ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα, όταν χρησιμοποιούν καθαρό H_2 . Τα μόνα "υποπροϊόντα" που παράγονται είναι νερό και θερμότητα.

Εάν σαν καύσιμο χρησιμοποιούνται ουσίες πλούσιες σε H_2 (π.χ. μεθανόλη) τότε εκπέμπονται και ορισμένοι ρυπαντές όμως σε πολύ μικρότερες ποσότητες σε σχέση με τη χρήση ορυκτών καυσίμων.

Οι (κ.κ.) λειτουργούν με υψηλότερη θερμοδυναμική απόδοση σε σχέση με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης. Επειδή δεν χρησιμοποιούν καύση για τη παραγωγή ενέργειας, η απόδοσή τους δεν εξαρτάται από τη μέγιστη επιτυγχάνομενη θερμοκρασία όπως στους κινητήρες εσωτερικής καύσης.

Η ηλεκτροχημική απόδοση της αντίδρασης που συμβαίνει με τη χρήση των (κ.κ.) είναι, πολύ υψηλότερη από την απόδοση που επιτυγχάνεται στις μηχανές εσωτερικής καύσης. Εκτός από την υψηλότερη απόδοση στο μέγιστο φορτίο τους σε σχέση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης, έχουν επίσης υψηλότερη απόδοση και όταν λειτουργούν σε μέσα ή χαμηλά φορτία. Οι θερμικές μηχανές λειτουργούν με τη μέγιστη τους απόδοση για ορισμένες στροφές του κινητήρα και η απόδοση αυτή μειώνεται γρήγορα στα ενδιάμεσα φορτία.

Οι (κ.κ.), όπως και οι μπαταρίες εμφανίζουν υψηλότερη απόδοση στα ενδιάμεσα φορτία σε σχέση με το μέγιστο φορτίο τους και η απόδοση αυτή λίγο μεταβάλλεται σε όλη τη περιοχή λειτουργίας τους. Εάν χρησιμοποιούνται και μετατροπείς για χρήση άλλων καυσίμων που περιέχουν H_2 , όπως π.χ. μεθανόλη, τότε οι μετατροπείς αυτοί έχουν μικρότερη απόδοση στα ενδιάμεσα φορτία, και έτσι πέφτει και η όλη απόδοση του συστήματος, μετατροπέα –(κ.κ.) στα ενδιάμεσα φορτία.

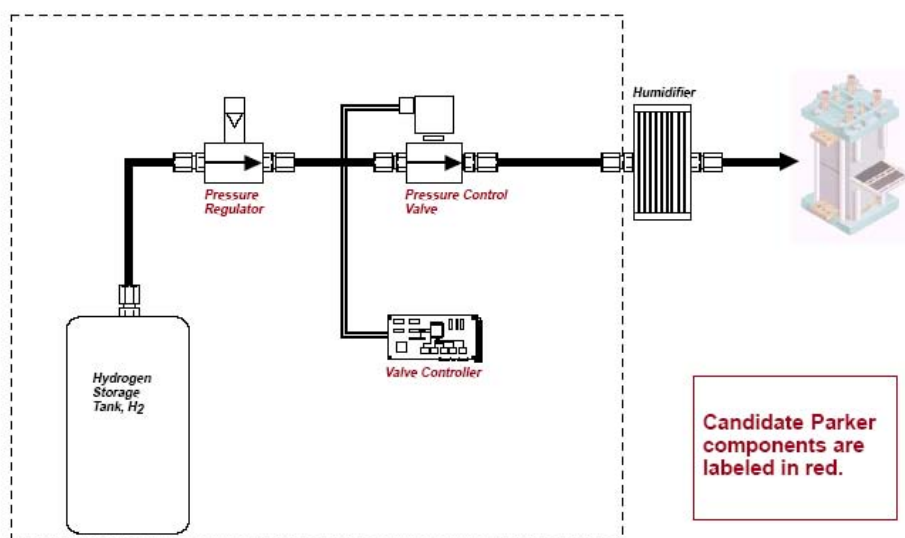
Επίσης, εμφανίζουν μικρό χρόνο απόκρισης σε σχέση με το φορτίο που εφαρμόζεται σ' αυτές κάθε φορά.

Οι (κ.κ.), όπως και οι μπαταρίες, είναι στατικές συσκευές χωρίς περιστρεφόμενα ή κινούμενα μέρη και αντιδρούν άμεσα με το φορτίο. Επειδή όμως συνεργάζονται, στη περίπτωση που χρησιμοποιούνται σε οχήματα, με μηχανικές διατάξεις, οι οποίες έχουν η κάθε μία το δικό της χρόνο απόκρισης η συνολική αντίδραση σε αλλαγές του φορτίου αυξάνει.

Ανεξάρτητα από τα παραπάνω, συστήματα (κ.κ.) που λειτουργούν με καθαρό H_2 έχουν εξαιρετικό χρόνο απόκρισης.

Οι κυψέλες που χρησιμοποιούνται στα οχήματα λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες (χαμηλότερες από $100\text{ }^\circ\text{C}$). Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα καθώς, δεν απαιτείται μεγάλος χρόνος προθέρμανσης, δεν έχουμε ατυχήματα λόγω υψηλών θερμοκρασιών, και η θερμοδυναμική απόδοσή τους λόγω της ηλεκτροχημικής αντίδρασης είναι καλύτερη.

Hydrogen Delivery



Σχήμα 11 : Τροφοδοσία υδρογόνου σε στήλη κυψέλης καυσίμου PEM.

Βέβαια εδώ έχουμε ένα μικρό μειονέκτημα στο ότι η παραγόμενη θερμότητα κατά τη λειτουργία της δεν μπορεί να απαχθεί εύκολα, λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών λειτουργίας, ειδικά στα θερμά κλίματα, με αποτέλεσμα να απαιτείται σύστημα ψύξης μεγάλων διαστάσεων. Χρήση μετατροπέων για καύση εναλλακτικών καυσίμων που περιέχουν H₂, όπως π.χ. μεθανόλης, δημιουργούν υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας και επομένως απαιτούν μεγαλύτερους χρόνους προθέρμανσης.

Ο χρόνος πλήρωσης της δεξαμενής αποθήκευσης στο όχημα είναι πολύ μικρότερος από οποιοδήποτε χρόνο επαναφόρτισης της μπαταρίας και η επιτυγχανόμενη αυτονομία του οχήματος μπορεί να αυξηθεί ανάλογα με το μέγεθος της δεξαμενής αποθήκευσης του H₂ στο όχημα.

8. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ (Κ. Κ.) ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΕ ΟΧΗΜΑΤΑ

Δυστυχώς, ενώ το H₂ έχει τόσα πολλά πλεονεκτήματα κατά τη χρήση του για το περιβάλλον, είναι δύσκολο να παραχθεί και να αποθηκευτεί.

Οι σημερινές διαδικασίες παραγωγής είναι μεγάλου σχετικά κόστους, και μεγάλης κατανάλωσης ενέργειας η οποία συχνά προέρχεται αποκλειστικά από ορυκτά καύσιμα.

Απαιτείται επομένως η ανάπτυξη αποτελεσματικής υποδομής για τη γενική χρήση του H₂.

Τα συστήματα αποθήκευσης αερίου H₂ είναι μεγάλων διαστάσεων και μεγάλου βάρους, λόγω της χαμηλής ογκομετρικής ενέργειας του H₂.

Τα συστήματα αποθήκευσης υγρού H₂ είναι βέβαια μικρότερων διαστάσεων και βάρους αλλά λειτουργούν σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.

Εναλλακτικά εάν το H₂ αποθηκευτεί σαν υδρογονάνθρακας ή σαν αλκοόλη, και απελευθερώνεται με τη βοήθεια μετατροπέα με διαδικασία που γίνεται στο όχημα, διευκολύνεται πολύ η αποθήκευση και γενικά η χρήση του, αλλά χάνονται τα περισσότερα από τα οφέλη που έχουμε από άποψη περιβάλλοντος.

Οι (κ.κ.) για να λειτουργήσουν απαιτούν καθαρό H₂ χωρίς μολυσματικές ουσίες. Αυτές οι ουσίες είναι κυρίως θειούχα και οργανικά μίγματα καθώς και υπολείμματα υγρών καυσίμων τα οποία καταστρέφουν το καταλύτη και δυσχεραίνουν τη λειτουργία τους. Βέβαια οι ουσίες αυτές δεν επηρεάζουν τη καύση του καυσίμου μίγματος σε μία μηχανή εσωτερικής καύσης.

Οι κυψέλες που χρησιμοποιούνται στα οχήματα απαιτούν τη χρήση καταλύτη από λευκόχρυσο για να επιταχύνουν τις χημικές αντιδράσεις. Ο λευκόχρυσος είναι σπάνιο και πολύ ακριβό ευγενές μέταλλο.

Επίσης κατά τη λειτουργία τους παράγουν νερό στο εσωτερικό τους. Επιπλέον πρέπει να υγραίνουν τα αέρια H₂ και O₂ πριν αντιδράσουν ηλεκτροχημικά μεταξύ τους. Εάν η θερμοκρασία κατέβει πολύ και παγώσει το περιεχόμενο σε αυτές νερό, τότε ενδέχεται να προκληθεί ανεπανόρθωτη ζημιά στη κυψέλη. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας παράγεται αρκετή θερμότητα ώστε να διατηρηθεί η θερμοκρασία υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Όταν όμως διακοπεί η λειτουργία και η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι πολύ χαμηλή θα πρέπει να ληφθεί πρόνοια

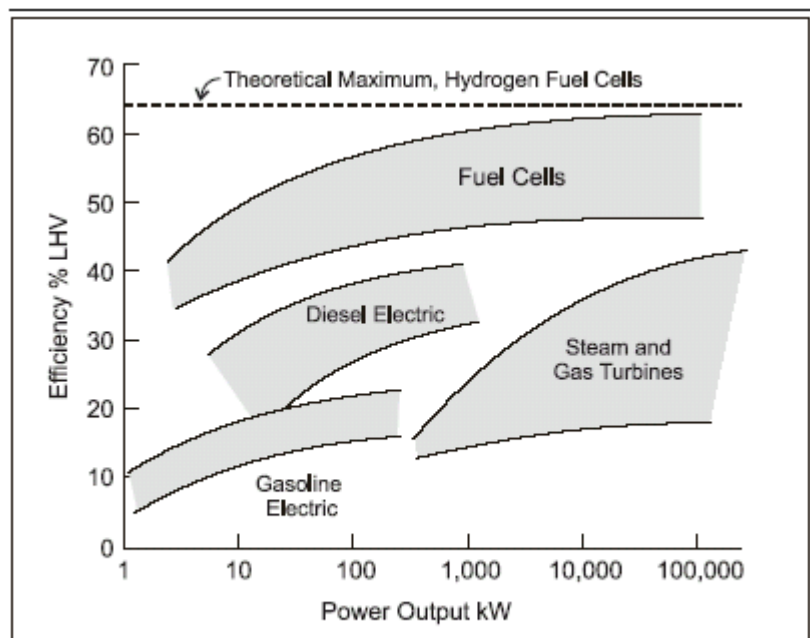
να απομακρυνθεί όλη η ποσότητα νερού πριν αυτό πήξει. Επειδή αυτό είναι δύσκολο, θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε η (κ.κ.) να θερμαίνεται με ηλεκτρική αντίσταση ή με ρεύμα θερμού αέρα.

Οι κυψέλες τύπου P.E.M. δεν πρέπει να ξηραίνονται κατά τη διάρκεια της χρήσης τους και πρέπει να παραμένουν υγρές ακόμη και κατά την αποθήκευσή τους. Προσπάθεια για να ξεκινήσουν τη λειτουργία τους σε ξηρές συνθήκες ενδέχεται να καταστρέψουν τη μεμβράνη.

Απαιτούν σύνθετα συστήματα υποστήριξης και ελέγχου κατά τη λειτουργία τους. Βέβαια οι κυρίως κυψέλες είναι συμπαγείς σταθερές συσκευές αλλά τα συστήματα που τις υποστηρίζουν έχουν σύνθετη λειτουργία. Είναι π.χ. απαραίτητη η παραγωγή πεπιεσμένου αέρα και απαιτείται αεροσυμπιεστής υψηλών στροφών ο οποίος δημιουργεί μεγάλο παρασιτικό φορτίο σε ολόκληρο το σύστημα. Η πολυπλοκότητα των συστημάτων αυξάνει ακόμη περισσότερο όταν θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε π.χ. μεθανόλη σαν αρχικό καύσιμο, οπότε απαιτείται η χρήση μετατροπέα

Απαιτούν την υποστήριξη βαρέων συστημάτων. Οι ίδιες οι κυψέλες δεν είναι βαριές αλλά εάν ληφθεί υπόψη το βάρος των συστημάτων που τις υποστηρίζουν και το βάρος του εξοπλισμού αποθήκευσης H₂ τότε το συνολικό βάρος είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο βάρος μηχανών εσωτερικής καύσης. Συστήματα που περιλαμβάνουν και μετατροπέα H₂ είναι ακόμη βαρύτερα.

Αντίθετα, τα συστήματα (κ.κ.) είναι ελαφρύτερα από συστήματα που χρησιμοποιούν αποκλειστικά μπαταρίες (π.χ. ηλεκτροκίνητα οχήματα). Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας το βάρος συνεχώς θα μειώνεται και τα συστήματα που τις υποστηρίζουν θα γίνονται πιο συμπαγή και μικρότερα σε όγκο.



Σχήμα 12 : Σύγκριση απόδοσης μέσων παραγωγής ισχύος.

9. ΑΠΟΔΟΣΗ (Κ. Κ.)

Η απόδοση θεωρείται ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτών. Αν και αυτό είναι σωστό πρέπει να διαχωρίσουμε την απόδοση μεταξύ της στήλης και την απόδοση ολόκληρου του συστήματος.

9.1. Απόδοση της στήλης κυψέλης καυσίμου

Η απόδοση της στήλης αναφέρεται στην απόδοση της ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Αυτό μπορεί να υπολογιστεί ως εξής: Η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να απελευθερωθεί όταν αντιδρά το H₂ με το O₂ για να παραχθεί νερό είναι η ενθαλπία της αντίδρασης και συμβολίζεται με ΔH°. Η τιμή αυτής μετράται πειραματικά και εξαρτάται εάν το νερό που παράγεται είναι σε υγρή ή αέρια φάση. Το νερό που παράγεται βρίσκεται σε αέρια φάση και η ενθαλπία της αντίδρασης είναι : ΔH° = -242 KJ / mole νερού.

Όπου 1 mole είναι : 6,023 · 10²³ μόρια νερού. Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει απελευθέρωση της ενέργειας κατά την αντίδραση.

Η τιμή της ενθαλπίας αναφέρεται για θερμοκρασία 25 °C και πίεση μία ατμόσφαιρα.

Η επίδραση της θερμοκρασίας στη τιμή της ενθαλπίας είναι μεγαλύτερη από ότι η επίδραση της πίεσης. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο μειώνεται η τιμή της ενθαλπίας.

Δυστυχώς δεν είναι διαθέσιμη ολόκληρη η ενθαλπία της αντίδρασης για μετατροπή της σε ωφέλιμο έργο. Ένα ποσοστό της ενθαλπίας χάνεται υπό μορφή εντροπίας. Το υπόλοιπο, είναι γνωστό σαν "ελεύθερη ενέργεια Gibbs".

Η ελεύθερη ενέργεια Gibbs είναι : $\Delta G^\circ = -229 \text{ KJ / mole νερού}$. Η ηλεκτρική τάση κάθε κυψέλης είναι το πηλίκο της ελεύθερης ενέργειας Gibbs δια του γινομένου n.F όπου n ο αριθμός των απελευθερωμένων ηλεκτρονίων κατά το σχηματισμό ενός mole νερού που είναι 2 ηλεκτρόνια, και F η σταθερά του Faraday που είναι 96500 coulombs / mole.

Επομένως η μέγιστη θεωρητική τάση που μπορεί να παραχθεί από μία μόνο κυψέλη είναι 1,187 Volts στους 25 °C και σε 1 ατμόσφαιρα.

Σε ανοιχτά κυκλώματα η τάση μιας κυψέλης καυσίμου φθάνει το 1,1 Volt όταν όμως έχουμε κλειστό κύκλωμα η πραγματική τάση είναι περίπου 0,7 volts οπότε η απόδοση της κυψέλης καυσίμου είναι $0,7 / 1,187 = 0,59$.

9.2. Απόδοση του συστήματος

Η απόδοση συστήματος (κ.κ.) αναφέρεται σε ολόκληρο το σύστημα στο οποίο η κυψέλη καυσίμου αποτελεί τη πηγή ενέργειας.

Μία στήλη (κ.κ.) μπορεί να λειτουργήσει εφόσον παρέχεται σε αυτή αέρας και υδρογόνο υπό πίεση και τα αέρια αυτά να είναι διαλυμένα σε νερό, ενώ θα πρέπει να κυκλοφορεί και ψυκτικό υγρό για την απαγωγή της παραγόμενης θερμότητας.

Επίσης απαιτείται πρόσθετος εξοπλισμός για τη ρύθμιση των ροών των αερίων και των υγρών, για τη λίπανση μηχανικών μερών, για τη λειτουργία βοηθητικών συσκευών και τη διαχείριση ολόκληρου του συστήματος.

Εάν δεχτούμε απορρόφηση ενέργειας για τα ανωτέρω 20%, απόδοση του αεροσυμπιεστή 85%, απόδοση μετατροπέα ρεύματος 95% και απόδοση του ηλεκτροκινητήρα 97%, τότε φτάνουμε σε συνολική απόδοση του συστήματος 37%.

Για κυψέλη που λειτουργεί με μετατροπέα καυσίμου ο οποίος ανάλογα με τον τύπο του μετατροπέα έχει απόδοση 65% ~ 75% η συνολική απόδοση γίνεται από 24% έως 28%.

10. Η ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ (H₂)

Η βασική ερώτηση για τη χρήση του H₂ ως καυσίμου είναι : Από πού θα το προμηθευτούμε. Αν και το H₂ είναι το πιο κοινό στοιχείο στο σύμπαν εντούτοις δεν υπάρχει ελεύθερο στη γη, διότι αντιδρά άμεσα με τα άλλα στοιχεία.

Για το λόγο αυτό το H₂ βρίσκεται στη γη σε μοριακά μίγματα. Για να πάρουμε καθαρό H₂ πρέπει να το απομονώσουμε από άλλες χημικές ενώσεις. Με κριτήριο την απαιτούμενη ενέργεια είναι σχετικά εύκολο να προμηθευτούμε καθαρό H₂ από τα ορυκτά καύσιμα. Αυτή η διαδικασία απελευθερώνει ενέργεια, μειώνοντας τη ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την προμήθεια καθαρού H₂. Αντίθετα, εάν θέλουμε να προμηθευτούμε H₂ από ενώσεις σταθερές που βρίσκονται σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη, όπως π.χ. το νερό, πρέπει να προσθέσουμε ενέργεια στη διαδικασία παραγωγής.

Η διαδικασία παραγωγής H₂ από τα ορυκτά καύσιμα ονομάζεται μετατροπή. Σήμερα, η διαδικασία αυτή είναι η κύρια και λιγότερο δαπανηρή μέθοδος για τη παραγωγή H₂. Δυστυχώς η μετατροπή έχει σαν αποτέλεσμα την εκπομπή ρύπων.

Η παραγωγή H₂ από το νερό ονομάζεται ηλεκτρόλυση. Βασικά η ηλεκτρόλυση είναι διαδικασία τελείως καθαρή από άποψη παραγωγής ρύπων αλλά απαιτεί μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας.

Ένας τρόπος για να συγκρίνουμε τη περιβαλλοντολογική επιβάρυνση που προέρχεται από "μετατροπή" ή "ηλεκτρόλυση" είναι η σύγκριση της εκπομπής CO₂ με τις δύο μεθόδους.

Αποτελέσματα από αυτή τη σύγκριση μας δίνει μία μελέτη στην οποία χρησιμοποιήθηκε αυτοκίνητο Mercedes – Benz A-Class για μία διαδρομή 1.000 Km.

Η συνολική ποσότητα CO₂ για σύγκριση, προέρχεται από το CO₂ που παρήχθη από την εξάτμιση του οχήματος, την επεξεργασία του καυσίμου, και το σταθμό παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του καυσίμου.

Τα αποτελέσματα ήταν :

- 248 Kg CO₂ για χρήση βενζίνης σε βενζινοκίνητο όχημα.
- 237 Kg CO₂ για όχημα κινούμενο με (κ.κ.) και H₂ που παρήχθη από ηλεκτρόλυση με ηλεκτρική ενέργεια προερχόμενη από σταθμό φυσικού αερίου.
- 193 Kg CO₂ για όχημα κινούμενο με (κ.κ.) και H₂ προερχόμενο κατευθείαν από μετατροπή βενζίνης στο όχημα.
- 162 Kg CO₂ για όχημα κινούμενο με (κ.κ.) και H₂ προερχόμενο κατευθείαν από μετατροπή μεθανόλης στο όχημα.
- 80 Kg CO₂ για όχημα κινούμενο με (κ.κ.) και H₂ προερχόμενο από μικρό μετατροπέα H₂ εκτός οχήματος, από φυσικό αέριο.
- 70 Kg CO₂ για όχημα κινούμενο με (κ.κ.) και H₂ προερχόμενο από μεγάλο μετατροπέα H₂, εκτός οχήματος, από φυσικό αέριο.

Άλλες μέθοδοι παραγωγής H₂ είναι : Η θερμοχημική αποσύνθεση του νερού, διάφορες μέθοδοι φωτομετατροπών, φωτοβιολογικές διαδικασίες, παραγωγή από βιομάζα, και διάφορες βιοχημικές μέθοδοι. Για όλες τις παραπάνω μεθόδους απαιτείται ακόμη πολύ έρευνα και μπορούν να παράγουν σχετικά μικρές ποσότητες H₂.

Το H_2 μπορεί να παραχθεί σε μεγάλους σταθμούς παραγωγής ή και σε μικρούς σταθμούς σε τοπικό επίπεδο. Οι μεγάλοι σταθμοί μπορεί να είναι εγκατεστημένοι κοντά σε πηγές ενέργειας και σε νερό για τη διευκόλυνση της παραγωγής του H_2 σε μεγάλη ποσότητα, αλλά υπάρχει το πρόβλημα της μεταφοράς στα κέντρα κατανάλωσης. Μικροί σταθμοί παραγωγής H_2 , σε τοπικό επίπεδο μειώνουν το πρόβλημα μεταφοράς H_2 , χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια ή ηλιακή ενέργεια ή φυσικό αέριο.

Τέλος H_2 για χρήση σε οχήματα μπορεί να παραχθεί σε πολύ μικρές ποσότητες για την κίνηση αυτών "στο δρόμο" με ειδικούς μετατροπείς μεθανόλης, αιθανόλης ή ορυκτών καυσίμων αλλά το τίμημα είναι η πολυπλοκότητα του συστήματος μετατροπής και το κόστος του.

Σήμερα η μεγαλύτερη παραγωγή H_2 προέρχεται από ορυκτά καύσιμα ή ως παραπροϊόν από χημικές βιομηχανίες και διυλιστήρια.

11. ΠΟΛΩΣΗ (Κ. Κ.)

Η θεωρητική ηλεκτρική τάση των 1,187 Volts που μπορεί να αναπτύξει η κυψέλη κατά τη λειτουργία της μπορεί να διαπιστωθεί μόνο σε ανοικτό κύκλωμα εξωτερικού φορτίου. Όταν εφαρμοστεί εξωτερικό φορτίο τότε η τάση πέφτει.

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται πόλωση και για κάθε τύπο κυψέλης μπορεί να σχεδιαστεί η καμπύλη μεταβολής της ηλεκτρικής τάσης σε σχέση με το ηλεκτρικό ρεύμα που απορροφάται από το εξωτερικό φορτίο. Το φορτίο βέβαια εξαρτάται από τις απαιτήσεις του οχήματος σε ενέργεια κάθε χρονική στιγμή. Από την ίδια καμπύλη μπορούμε να δούμε και την ηλεκτροχημική απόδοση της κυψέλης εφόσον αυτή είναι ο λόγος της πραγματικής ηλεκτρικής τάσης προς τη θεωρητική των 1,187 Volts.

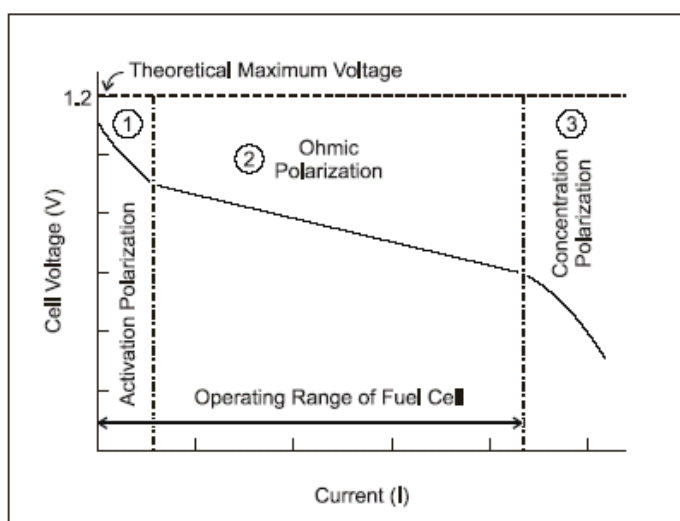
Η πόλωση οφείλεται σε χημικούς και φυσικούς παράγοντες. Αυτοί οι παράγοντες μειώνουν τη πρόοδο των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων όταν κυκλοφορεί ηλεκτρικό ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα. Κατά τη πόλωση των (κ.κ.) εμφανίζονται τρεις βασικές περιοχές στο σχετικό διάγραμμα.

Η περιοχή (1) ενεργοποίηση της πόλωσης, η περιοχή (2) ωμική πόλωση και η περιοχή (3) πόλωση συγκέντρωσης.

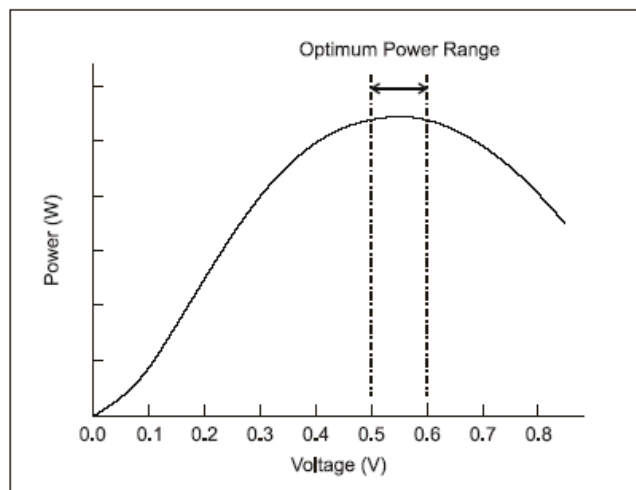
Η ενεργοποίηση της πόλωσης σχετίζεται με το φράγμα ενέργειας που πρέπει να υπερνικηθεί για να ξεκινήσει η ηλεκτροχημική αντίδραση, μεταξύ των αντιδρώντων στοιχείων. Όταν το ηλεκτρικό ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα είναι χαμηλό ένα τμήμα της τάσης του ηλεκτροδίου χάνεται για να αντισταθμιστεί η έλλειψη της ηλεκτροκαταλυτικής δραστηριότητας.

Η ωμική πόλωση οφείλεται σε απώλειες εσωτερικής αντίστασης εντός της(κ.κ.). Οι απώλειες αντίστασης οφείλονται στις συνδέσεις μεταξύ ηλεκτρολύτη και ηλεκτροδίων και στις συνδέσεις των ακροδεκτών εντός της κυψέλης. Επειδή οι πλάκες της στήλης ακολουθούν το νόμο του Ωm ($V = I \cdot R$) η απώλεια της τάσης είναι γραμμική με την αύξηση του ρεύματος, στο τμήμα αυτό της καμπύλης.

Η πόλωση συγκέντρωσης συμβαίνει όταν οι αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια εμποδίζονται από τη μεταφορά μάζας. Στη περιοχή αυτή τα αντιδρώντα στοιχεία αρχίζουν να καταναλώνονται με μεγαλύτερο ρυθμό σε σχέση με το ρυθμό τροφοδοσίας τους, ενώ τα παραγόμενα προϊόντα της αντίδρασης συγκεντρώνονται με μεγαλύτερο ρυθμό απ' ό,τι μπορούν να απομακρυνθούν. Τελικά τα φαινόμενα αυτά ανακόπτουν την αντίδραση και η τάση της κυψέλης καυσίμου πέφτει στο μηδέν.



Σχήμα 13 : Καμπύλη πόλωσης κυψέλης καυσίμου PEM.



Σχήμα 14 : Καμπύλη ισχύος κυψέλης καυσίμου PEM.

12. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

Η ηλεκτρική ισχύς της κυψέλης είναι το γινόμενο της αναπτυσσόμενης τάσης επί το ρεύμα που κυκλοφορεί εξωτερικά. Εφόσον η καμπύλη της πόλωσης μας δείχνει τη σχέση μεταξύ τάσης και ρεύματος σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας της κυψέλης μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη καμπύλη αυτή για να χαράξουμε τη μεταβολή της ισχύος συναρτήσει της ηλεκτρικής τάσης.

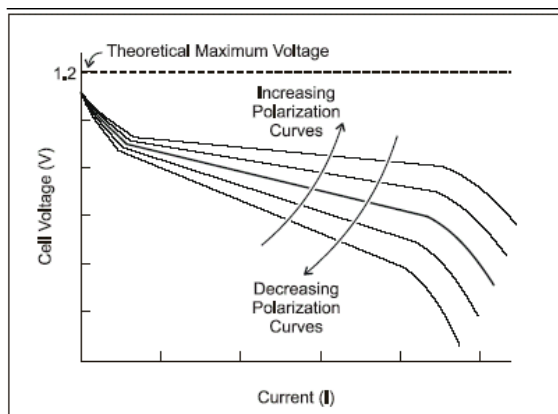
Η μέγιστη ισχύς βρίσκεται στη περιοχή μεταξύ 0,5 και 0,6 Volts η οποία αντιστοιχεί στην υψηλότερη τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος. Στο σημείο της κορυφής της καμπύλης ισχύος η εσωτερική αντίσταση της κυψέλης είναι ίση με την αντίσταση του εξωτερικού κυκλώματος. Επειδή η απόδοση της κυψέλης πέφτει με την αύξηση της τάσης υπάρχει μία αντίθεση μεταξύ των σημείων λειτουργίας υψηλής ισχύος και υψηλής απόδοσης. Οι σχεδιαστές συστημάτων (κ.κ.) πρέπει να επιλέξουν τη περιοχή λειτουργίας της κυψέλης σε σχέση με εάν ενδιαφέρει την εφαρμογή η ισχύς ή η απόδοση της κυψέλης .

Πάντως ποτέ δεν είναι επιθυμητό να λειτουργεί η κυψέλη σε περιοχή μετά τη πτώση της καμπύλης ισχύος.

13. ΕΠΗΡΕΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ (Κ. Κ.) ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΗ ΠΙΕΣΗ

Το σχήμα της καμπύλης πόλωσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη πίεση που επικρατούν κατά τη λειτουργία της κυψέλης.

Γενικά μπορούμε να σχεδιάσουμε μία οικογένεια καμπυλών πόλωσης οι οποίες χαρακτηρίζουν τη λειτουργία της κυψέλης σε όλες τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Κάθε παράμετρος κατά τη λειτουργία της κυψέλης που ανεβάζει πιο ψηλά τη καμπύλη πόλωσης έχει σαν αποτέλεσμα υψηλότερη ισχύ και υψηλότερη ηλεκτροχημική απόδοση. Επίσης ισχύει και το αντίθετο.



Σχήμα 15 : Δέσμη μεταβολής καμπυλών πόλωσης κυψελών καυσίμου PEM.

13.1. Επηρεασμός της (κ. κ.) από τη πίεση λειτουργίας

Η καμπύλη πόλωσης ανεβαίνει με αύξηση της πίεσης λειτουργίας και κατεβαίνει με μείωση αυτής. Ο λόγος είναι ότι ο ρυθμός της χημικής αντίδρασης είναι ανάλογος με τις μερικές πιέσεις του H_2 και του O_2 . Η υψηλή πίεση βοηθά σε καλύτερη επαφή του H_2 και του O_2 με τον ηλεκτρολύτη. Η ευαισθησία αυτή είναι μεγαλύτερη σε υψηλά ρεύματα. Η υψηλή όμως πίεση δημιουργεί άλλα προβλήματα. Οι πλάκες των στήλων λειτουργούν καλύτερα σε χαμηλές πιέσεις διότι εμφανίζονται μικρότερες απώλειες πίεσης. Επίσης οι μονώσεις υφίστανται μεγαλύτερες καταπονήσεις σε υψηλές πιέσεις. Η υψηλή πίεση λειτουργίας του αεροσυμπιεστή απορροφά μεγαλύτερη ισχύ. Ορισμένα εξαρτήματα των κυψελών καυσίμου πρέπει να έχουν μεγαλύτερο μέγεθος και κόστος εφόσον λειτουργούν σε αυξημένη πίεση. Τελικά, αυξάνοντας τη πίεση επιτυγχάνουμε φθίνουσα απόδοση του συστήματος εάν λάβουμε υπόψη μας και την απόδοση της στήλης και τις απαιτήσεις όλου του συστήματος. Για το λόγο αυτό οι (κ.κ.) PEM λειτουργούν σε πιέσεις λίγων ατμοσφαιρών.

13.2. Επηρεασμός της (κ. κ.) από τη θερμοκρασία

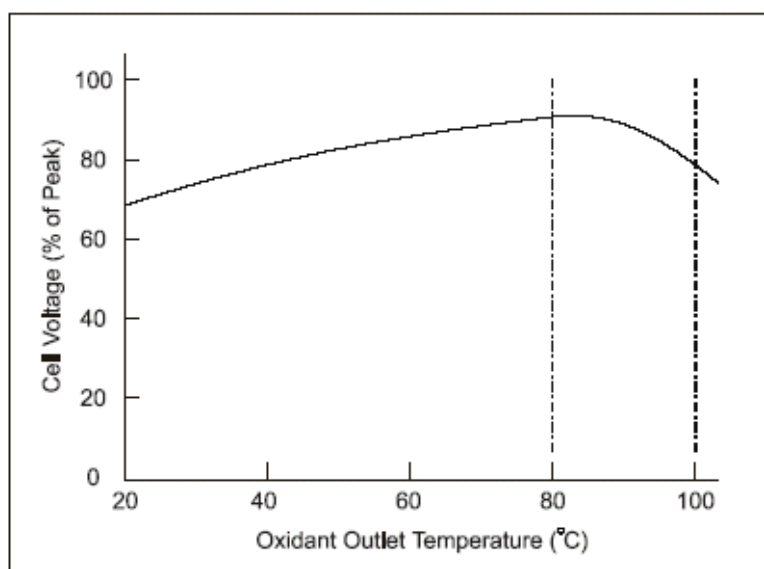
Οι καμπύλες πόλωσης της κυψέλης ανεβαίνουν με αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας και κατεβαίνουν με μείωση αυτής.

Ο λόγος είναι διότι στις υψηλές θερμοκρασίες βελτιώνεται η μεταφορά μάζας εντός της κυψέλης. Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει τη κίνηση των ηλεκτρονίων στα μέταλλα αλλά η κίνηση των ιόντων εντός του ηλεκτρολύτη αυξάνει. Αυτά τα δύο γεγονότα εάν συνδυαστούν βελτιώνουν την ηλεκτροχημική αντίδραση.

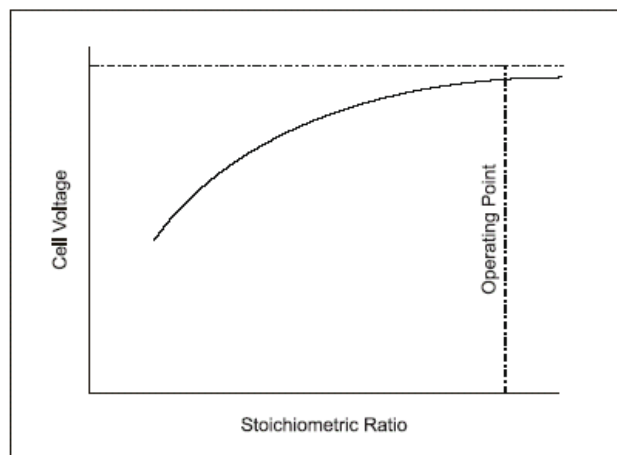
Η συγκέντρωση του νερού που παράγεται δεν επιτρέπει την αύξηση της θερμοκρασίας πέραν των $100\text{ }^\circ\text{C}$, διότι το νερό θα αρχίσει να βράζει και ο παραγόμενος ατμός θα μειώσει δραστικά τη μερική πίεση του οξυγόνου. Το γεγονός αυτό της στέρευσης του O_2 μειώνει τελικά την απόδοση της κυψέλης και ενδέχεται να την καταστρέψει ή να μειώσει τη διάρκεια ζωής της. Βέβαια υψηλότερες θερμοκρασίες μπορούμε να επιτύχουμε σε υψηλότερες πιέσεις λειτουργίας εφόσον σ' αυτές αυξάνεται το σημείο βρασμού του νερού, γεγονός που εφαρμόζουμε στη λειτουργία της (κ.κ.) PEM.

Τελικά η τάση της κυψέλης αυξάνει με τη θερμοκρασία μέχρι αυτή να φτάσει το σημείο βρασμού του νερού πέραν του οποίου η τάση αρχίζει να πέφτει. Η βέλτιστη θερμοκρασία είναι αυτή των $80\text{ }^\circ\text{C}$ όπου ισορροπούν οι δύο παραπάνω αντίθετοι παράγοντες.

Η κανονική θερμοκρασία λειτουργίας των (κ.κ.) PEM είναι από $70\text{ }^\circ\text{C}$ έως $90\text{ }^\circ\text{C}$ και με βάση αυτή πρέπει να υπολογιστούν τα υπόλοιπα στοιχεία του συστήματος.



Σχήμα 16 : Μεταβολή της τάσης κυψέλης καυσίμου PEM συναρτήσει της θερμοκρασίας λειτουργίας.



Σχήμα 17 : Μεταβολή της τάσης κυψέλης καυσίμου PEM συναρτήσει της αναλογίας αέρα / καυσίμου.

13.3. Επηρεασμός από τη στοιχειομετρική αναλογία

Οι καμπύλες πόλωσης της κυψέλης ανεβαίνουν με αύξηση της στοιχειομετρικής αναλογίας των αντιδρώντων αερίων, και κατεβαίνουν με μείωση αυτής.

Στοιχειομετρική αναλογία είναι η σχέση της ποσότητας του αερίου που συμμετέχει στην αντίδραση σε σχέση με την ποσότητα που απαιτείται από τη χημική αντίδραση. Με βάση αυτό τον ορισμό η στοιχειομετρική αναλογία 1 σημαίνει ότι προσδίδονται για τη πραγματοποίηση της χημικής αντίδρασης μόρια αερίου όσα ακριβώς θεωρητικά απαιτούνται από αυτή. Στοιχειομετρικές αναλογίες μεγαλύτερες από 1 σημαίνουν υπερβολική ποσότητα αερίου ενώ στοιχειομετρικές αναλογίες μικρότερες του 1 σημαίνουν ανεπαρκείς ποσότητες αερίου.

Ο λόγος για τον οποίο υπάρχει ανύψωση των καμπυλών πόλωσης με αύξηση της στοιχειομετρικής αναλογίας είναι η επάρκεια μορίων H_2 και O_2 που έρχεται σε επαφή και αντιδρούν με τον ηλεκτρολύτη.

Η αύξηση της στοιχειομετρικής αναλογίας έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης ασυμπτωτικά μέχρι τη μέγιστη τιμή της. Πρακτικά οι στήλες που χρησιμοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, λειτουργούν σε στοιχειομετρική αναλογία 1,4 περίπου για το H_2 και 2,0 για το O_2 . Υψηλότερες στοιχειομετρικές αναλογίες προσφέρουν λίγο κέρδος και χρησιμοποιούνται όταν η διάταξη λειτουργεί με χαμηλή ισχύ.

13.4. Επηρεασμός από την υγρασία

Στις (κ.κ.) τύπου PEM απαιτείται επαρκής ύγρανση διότι τα μόρια του νερού βοηθούν τα ιόντα υδρογόνου να διέλθουν από τον ηλεκτρολύτη.

Ανεπαρκής ύγρανση ξηραίνει τη μεμβράνη κατά τη λειτουργία της με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν ρωγμές και σπές σε αυτή οι οποίες με τη σειρά τους δημιουργούν, χημικά βραχυκυκλώματα, τοπικές αναμίξεις αερίων, θερμά σημεία με κίνδυνο πυρκαγιάς.

Από την άλλη πλευρά, υπερβολική ύγρανση οδηγεί σε πλυμμηρισμό των πλακών που φέρουν τα κανάλια διόδου των αερίων.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το μηδενισμό ή την εμφάνιση αρνητικής ηλεκτρικής τάσης. Εάν εμφανιστεί υψηλή αρνητική τάση τότε η κυψέλη λειτουργεί αντίστροφα ηλεκτρολύοντας το νερό, φαινόμενο το οποίο παράγει υπερβολική θερμότητα και μπορεί να καταστρέψει τη (κ.κ.). Υπάρχουν σε πολλά συστήματα ειδικές διατάξεις που παρακολουθούν την εμφάνιση αρνητικής τάσης και προστατεύουν από πιθανή βλάβη.

Η υγρασία μετράται σαν "σχετική υγρασία" διότι σχετίζεται με τη πίεση και τη θερμοκρασία του αερίου.

Οι (κ.κ.) τυπικά λειτουργούν κοντά σε κεκορεσμένες συνθήκες έτσι ώστε το αέριο να περιέχει την υψηλότερη ποσότητα νερού, χωρίς όμως αυτό να περισσεύει, και να πλημμυρίζει το αέριο.

Όταν το αέριο είναι κεκορεσμένο με νερό η σχετική του υγρασία είναι 100% και εάν η θερμοκρασία του ανέβει κατά 1 °C τότε η σχετική του υγρασία πέφτει και 4% και έτσι μπορεί να απορροφήσει περισσότερο νερό.

Στα συστήματα κυψελών καυσίμου καθοριστικό ρόλο παίζει η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης που καθορίζεται από τη κυκλοφορία του ψυκτικού υγρού.

Τα ακρότατα όρια λειτουργίας των κυψελών τύπου PEM είναι για θερμοκρασίες μεταξύ 0 °C και 100 °C διότι πέραν αυτών των ορίων το νερό πήζει ή βράζει.

Ένα άλλο σημείο που πρέπει να προσεχθεί είναι στο ότι το νερό ύγρανσης πρέπει να παραμένει μη αγωγίμο, διότι διαφορετικά εμφανίζονται βραχυκυκλώματα και ανεπιθύμητα ηλεκτρικά ρεύματα που διαβρώνουν τη κυψέλη. Το νερό γίνεται αγωγίμο όταν απορροφά ιόντα από το περιβάλλον του, για το λόγο αυτό το νερό ύγρανσης θα πρέπει να περνά συνεχώς δια μέσω φίλτρου απιονισμού.

14. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση κυψελών καυσίμου στα οχήματα υπόσχεται αυξημένη οικονομία καυσίμου και μηδενικές εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα.

Αντίθετα με τα ηλεκτρικά οχήματα που λειτουργούν με μπαταρίες η επαναπλήρωση με καύσιμο στα οχήματα κυψελών καυσίμου είναι ταχεία και της ίδιας διάρκειας με την επαναπλήρωση με καύσιμο των σημερινών οχημάτων.

Η χρήση καθαρού υδρογόνου το οποίο θα είναι αποθηκευμένα επί του οχήματος είναι η πλέον πιθανή μέθοδος τροφοδοσίας των κυψελών καυσίμου του οχήματος λόγω της μέγιστης επιτυγχανόμενης απόδοσης και των μηδενικών εκπομπών ρύπων αλλά για τη καθιέρωση αυτής θα πρέπει να επιλυθούν προβλήματα αποθήκευσης του υδρογόνου και ασφαλούς διανομής του.

Οι προτεινόμενοι μετατροπείς υγρών καυσίμων σε υδρογόνο επί του οχήματος έχουν το σοβαρό μειονέκτημα της αυξημένης κατανάλωσης καυσίμου, της εκπομπής μη μηδενικών ρύπων του αυξημένου κόστους και της αυξημένης συνθετότητας του οχήματος.

Τα ηλεκτρικά οχήματα που λειτουργούν με κυψέλες καυσίμου καθαρού υδρογόνου μπορεί να επιτύχουν οικονομία καυσίμου 2 έως 3 φορές καλύτερη σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα καύσης βενζίνης.

Το κόστος των οχημάτων κυψελών καυσίμου είναι ακόμη ένα σοβαρό εμπόδιο για την εξάπλωσή τους αλλά με τη βελτίωση της υπάρχουσας τεχνολογίας και της μαζικής παραγωγής οχημάτων, το κόστος τους θα πλησιάσει αυτό των συμβατικών οχημάτων. Εξάλλου και το κόστος των συμβατικών οχημάτων θα αυξηθεί σε σχέση με τα σημερινά επίπεδα εάν πάμε σε οχήματα μηδενικών ρύπων και χαμηλής κατανάλωσης καυσίμου.

Πιθανώς μέχρι να αναπτυχθεί η υποδομή για την παραγωγή και διανομή του υδρογόνου, να υπάρξει μία περίοδος χρησιμοποίησης οχημάτων με υγρά καύσιμα και μετατροπείς υδρογόνου σε αυτά, πάντως η σύγκριση για τη καθιέρωσή τους θα είναι η απόδοσή τους και οι εκπομπές των ρύπων τους σε σχέση με τα οχήματα που κινούνται με μηχανές εσωτερικής καύσης.

Στις ΗΠΑ πιστεύουν ότι το ποσοστό των οχημάτων με κυψέλες καυσίμου δεν θα ξεπεράσει το 1% μέχρι το 2010 και παγκοσμίως το 10% μέχρι το 2020, διότι θα είναι ταυτόχρονα ραγδαία και η εξέλιξη των κινητήρων εσωτερικής καύσης σε όλους τους τομείς μέχρι τις χρονολογίες αυτές.