

Παράρτημα 1 ενότητας HySkills

Ενότητα: Λειτουργία & συντήρηση ηλεκτρολυτικών πυκνωτών & κυψελών καυσίμου

Περιεχόμενο

Ενότητα: Λειτουργία & συντήρηση ηλεκτρολυτικών πυκνωτών & κυψελών καυσίμου	1
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ 1 - Περιγράψτε τις βασικές αρχές των τεχνολογικών συστημάτων ηλεκτρολυτικών πυκνωτών & κυψελών καυσίμου	3
Ηλεκτρολυτικός πυκνωτής.....	3
Τι είναι ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής.....	3
Πώς λειτουργεί ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής.....	3
Χρήσεις κυψελών καυσίμου	4
Πώς διατίθενται στο εμπόριο οι ηλεκτρολύτες βασισμένοι στην παραγωγή υδρογόνου;	5
Κυψέλη καυσίμου	6
Αρχές της κυψέλης καυσίμου	7
Συστάδα κυψελών καυσίμου.....	8
Χρήση κυψελών καυσίμου	9
Παραγωγή ενέργειας	9
Μεταφορά	10
Ηλεκτρικό όχημα κυψέλης καυσίμου (FCEVs).....	10
Δίαυλοι κυψελών καυσίμου	11
Βαρέα Φορτηγά	11
Μεσαία φορτηγά	11
Χειρισμός υλικών.....	11
Μη επανδρωμένα εναέρια και υποβρύχια οχήματα	12
Σιδηροδρομικές μεταφορές.....	12
Θαλάσσιες μεταφορές.....	12
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ 2 - Περιγράψτε τα βασικά χαρακτηριστικά των κυψελών καυσίμου καθώς και των ηλεκτρολυτών και τη λειτουργία των συστατικών μερών τους.....	13
Τύποι ηλεκτρολυτών.....	13
Αλκαλικός ηλεκτρολύτης	13
Ηλεκτρολύτης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων	13
Κυψέλη ηλεκτρολύσεως στερεού οξειδίου (SOEC).....	14

Σύγκριση και περίληψη των διαφόρων τεχνολογιών ηλεκτρόλυσης του νερού	15
Κυψέλη καυσίμου	16
Κατασκευαστικά στοιχεία των στοιχείων καυσίμου	16
Τύποι κυψελών καυσίμου	18
Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης πολυμερών ηλεκτρολυτών	18
Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου	20
Κυψέλες καυσίμου τηγμένων άνθρακικών αλάτων	21
Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου	22
Σύγκριση και σύνοψη των διαφόρων στοιχείων καυσίμου	23
Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του ηλεκτρολύτη και κυψέλες καυσίμου	24
Ποια είναι τα κύρια πλεονεκτήματα	24
Ποια είναι τα μειονεκτήματα των ηλεκτρολυτών και των κυψελών καυσίμου υδρογόνου; ..	27
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ 3 - Πρότυπα και Κανονισμοί που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό, την εγκατάσταση, τη θέση σε λειτουργία και τη συντήρηση συστημάτων τεχνολογίας ηλεκτρολυτών και στοιχείων καυσίμου.....	29
Αρχές σχεδιασμού της ασφάλειας	29
Έγκαιρη αναγνώριση των προβλημάτων σε θέματα ασφάλειας.....	30
Συμμόρφωση με κανονισμούς, κώδικες και πρότυπα	31
Πιθανοί κίνδυνοι, μηχανισμοί αστοχίας και συμβάντα	32
Σχέδιο ασφάλειας	35
Σχέδια συντήρησης και συντήρησης	38

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ 1 - Περιγράψτε τις βασικές αρχές των τεχνολογικών συστημάτων ηλεκτρολυτικών πυκνωτών & κυψελών καυσίμου

Ηλεκτρολυτικός πυκνωτής

Τι είναι ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής

Ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής είναι μια συσκευή που μπορεί να ξεχωρίσει στα μόρια νερού τα άτομα οξυγόνου και υδρογόνου που τα αποτελούν. Οι δεσμοί μεταξύ των δύο στοιχείων είναι πολύ σταθεροί και απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια για να πραγματοποιηθεί αυτή η διάσπαση σε μια διαδικασία που ονομάζεται ηλεκτρόλυση. Οι αποτελεσματικοί πυκνωτές θα αποτελέσουν το κλειδί για την εισαγωγή του υδρογόνου στις βιομηχανίες και την υιοθέτηση τεχνολογιών κυψελών καυσίμου υδρογόνου.

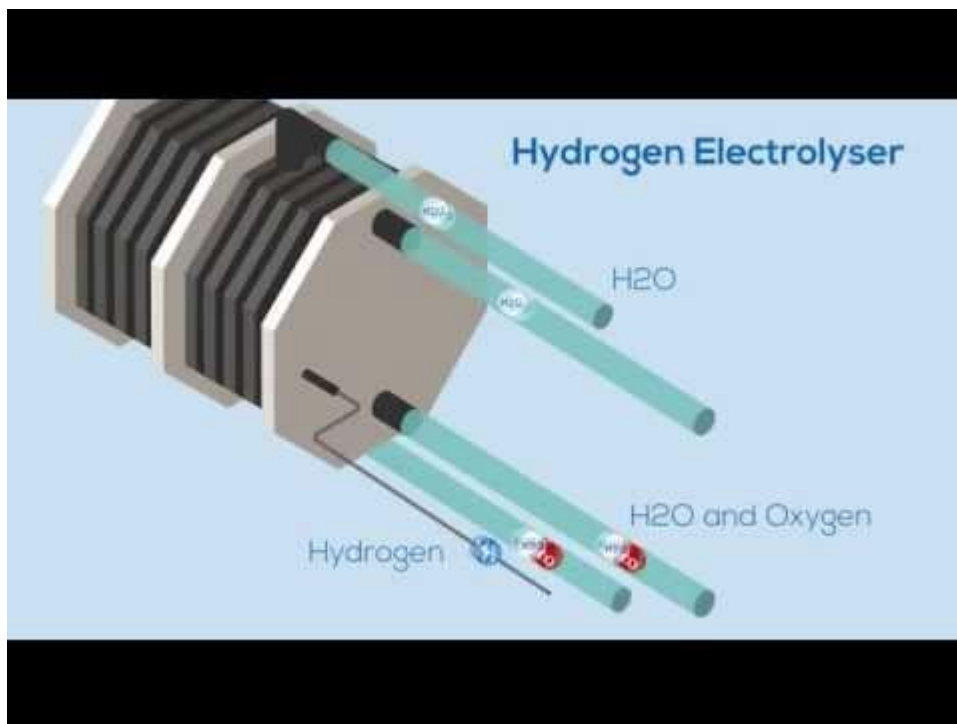
Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου χρησιμοποιούν το υδρογόνο ως καύσιμο σε μια ηλεκτροχημική διεργασία που συνδυάζει υδρογόνο και οξυγόνο για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια και νερό. Η αντίστροφη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης, η οποία παράγει υδρογόνο και οξυγόνο από το νερό, μπορεί να χρησιμοποιήσει π.χ. μια σειρά ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως ο άνεμος, το κύμα ή ο ήλιος, για την παραγωγή υδρογόνου ως καύσιμο για την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας. Υπάρχει επίσης ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την υδρογόνο ως μοναδική καθαρή πηγή ενέργειας που μπορεί να παράγει θερμότητα και της οποίας τα μόνα υποπροϊόντα είναι το νερό.

Ένας από τους μεγαλύτερους ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές του κόσμου βρίσκεται στη Φουκουσίμα της Ιαπωνίας, στον τόπο της γνωστής πυρηνικής καταστροφής, συμβολίζοντας μια αλλαγή παραδείγματος στην παραγωγή ενέργειας, καθώς τροφοδοτείται από ηλιακούς συλλέκτες. Πρόσφατα, τον Ιανουάριο του 2021, ο ιαπωνικός πυκνωτής ξεπεράστηκε κατά πολύ από αυτόν στο Bécancour του Καναδά, ο οποίος αποτελείται από μια συσκευή πολυμερούς μεμβράνης με παραγωγή 8,2 τόνους την ημέρα.

Πώς λειτουργεί ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής

Ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής αποτελείται από μια αγώγιμη συστάδα ηλεκτροδίων που χωρίζεται από μια μεμβράνη στην οποία εφαρμόζεται υψηλή τάση και ρεύμα. Αυτό προκαλεί ηλεκτρικό ρεύμα στο νερό που προκαλεί τη διάσπασή του στα συστατικά του: υδρογόνο και οξυγόνο. Το πλήρες σύστημα περιλαμβάνει επίσης αντλίες, διαχωριστή αερίου και άλλα βοηθητικά στοιχεία, όπως δεξαμενές αποθήκευσης. Η ηλεκτρόλυση ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά το 1800. Μετά την εφεύρεση της ηλεκτρικής μπαταρίας από τον Alessandro Volta το ίδιο έτος, άλλοι χημικοί προσπάθησαν να συνδέσουν τους πόλους τους σε ένα δοχείο με νερό. Ανακάλυψαν ότι το ρεύμα έρεε μέσα από το νερό και ότι το υδρογόνο και το οξυγόνο χωρίζονταν στα ηλεκτρόδια.

Το οξυγόνο που παράγεται απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα ή μπορεί να αποθηκευτεί για μεταγενέστερη χρήση ως ιατρικό ή βιομηχανικό αέριο σε ορισμένες περιπτώσεις. Το υδρογόνο αποθηκεύεται ως πεπιεσμένο αέριο ή υγροποιημένο για χρήση στη βιομηχανία ή σε κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, που μπορούν να τροφοδοτήσουν οχήματα μεταφοράς όπως τρένα, πλοία, ακόμα και αεροσκάφη.



Χρήσεις κυψελών καυσίμου

Το υδρογόνο είναι ένα καθαρό καύσιμο που, όταν καταναλώνεται σε μια κυψέλη καυσίμου, παράγει μόνο νερό, ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα. Το υδρογόνο και οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην εθνική ενεργειακή στρατηγική μιας χώρας, με πολλές δυνατότητες εφαρμογών, σε όλους σχεδόν τους τομείς - μεταφορές, εμπόριο, βιομηχανία, κτίρια. Το υδρογόνο και οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να παρέχουν ενέργεια για χρήση σε διάφορες εφαρμογές: Διανεμημένη ή συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ενέργειας, εφεδρική ενέργεια, συστήματα για την αποθήκευση και την ενεργοποίηση ανανεώσιμης ενέργειας, φορητή ενέργεια, βοηθητική ενέργεια για φορτηγά, αεροσκάφη, σιδηροδρόμους και πλοία, ειδικά οχήματα όπως

περονοφόρα οχήματα και επιβατικά, εμπορικά οχήματα, συμπεριλαμβανομένων αυτοκινήτων, φορτηγών και λεωφορείων.

Λόγω της υψηλής αποδοτικότητας και των μηδενικών ή σχεδόν μηδενικών εκπομπών άνθρακα, το υδρογόνο και οι κυψέλες καυσίμου συνεισφέρουν στην μείωση εκπομπής αερίων σε πολλές εφαρμογές. Έρευνες έχουν δείξει ότι το υδρογόνο και οι κυψέλες καυσίμου έχουν τη δυνατότητα να επιτύχουν τις ακόλουθες μειώσεις των εκπομπών:

- Ελαφρά οχήματα: μείωση των εκπομπών άνω του 50% έως άνω του 90% σε σχέση με τα σημερινά οχήματα βενζίνης.
- Ειδικά οχήματα: περισσότερο από 35% μείωση των εκπομπών στα ντιζελοκίνητα ή μπαταριοκίνητα ανυψωτικά οχήματα.
- Λεωφορεία: απόδοση οικονομίας καυσίμου περίπου 1,5 φορές μεγαλύτερη από ό, τι τα λεωφορεία εσωτερικής καύσης ντίζελ και περίπου 2 φορές υψηλότερη από ό, τι τα λεωφορεία φυσικού αερίου.
- Βοηθητικές μονάδες ισχύος: μείωση εκπομπών άνω 60% σε σύγκριση με την αδράνεια του κινητήρα φορτηγών.
- Συστήματα συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας : 35% επιπλέον στην 50% μείωση των εκπομπών σε σχέση με τις συμβατικές πηγές θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (με πολύ μεγαλύτερες μειώσεις—πάνω από 80%, αν το βιοαέριο ή το υδρογόνο από πηγές χαμηλού ή μηδενικού άνθρακα χρησιμοποιείται στην κυψέλη καυσίμου)

Η μεγαλύτερη πρόκληση για την παραγωγή υδρογόνου, ιδιαίτερα από ανανεώσιμες πηγές, να παρέχεται σε χαμηλότερο κόστος. Για τις κυψέλες καυσίμου μεταφορών, το υδρογόνο πρέπει να είναι ανταγωνιστικό ως προς το κόστος από τα συμβατικά καύσιμα και τεχνολογίες. Για να μειωθεί το συνολικό κόστος του υδρογόνου, έρευνες επικεντρώνονται στη βελτίωση της αποδοτικότητας και της διάρκειας ζωής των τεχνολογιών παραγωγής υδρογόνου, καθώς και στη μείωση του κόστους του κεφαλαιακού εξοπλισμού, των λειτουργιών και της συντήρησης.

Πώς διατίθενται στο εμπόριο οι ηλεκτρολύτες βασισμένοι στην παραγωγή υδρογόνου; Υπάρχουν τέσσερις κύριοι τρόποι που οι ηλεκτρολύτες μπορούν να εμπορευματοποιηθούν:

Στην κινητικότητα: Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε σταθμούς ανεφοδιασμού για ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου όπως λεωφορεία, τρένα και αυτοκίνητα.

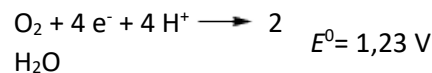
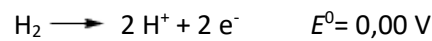
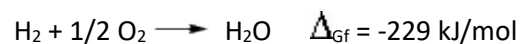
Στα καύσιμα: Χρησιμοποιείται σε διυλιστήρια για την απομάκρυνση θείου από ορυκτά καύσιμα.

Στη βιομηχανία: Μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα ως βιομηχανικό αέριο στη βιομηχανία χάλυβα, ργοστάσια επίπεδου γυαλιού, βιομηχανία ημιαγωγών, κλπ. Μπορεί επίσης να εγχυθεί απευθείας στα πλέγματα φυσικού αερίου για χαμηλότερη θέρμανση άνθρακα και άλλες εφαρμογές φυσικού αερίου.

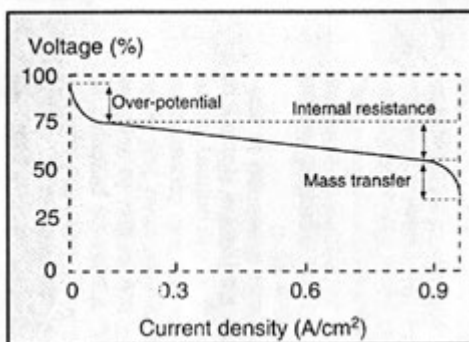
Στο αέριο: Χρησιμοποιείται στην παραγωγή πράσινων χημικών ουσιών όπως μεθανόλη, λιπάσματα (αμμωνία) και κάθε άλλο υγρό καύσιμο, ακόμη και καύσιμο αεριωθουμένων!

Κυψέλη καυσίμου

Μια κυψέλη καυσίμου υδρογόνου είναι ένα ηλεκτροχημικό στοιχείο που χρησιμοποιεί μια αυτόματη αντίδραση οξειδοαναγωγής για να παράγει ρεύμα που μπορεί να λειτουργήσει. Η καθαρή αντίδραση είναι εξώθερμη. Ο συνδυασμός των 2 ημιστοιχείων για την ηλεκτροχημική αντίδραση δίνει ένα θετικό δυναμικό κυττάρων.



Θεωρητικά, η τάση για μια κυψέλη καυσίμου υδρογόνου θα πρέπει να είναι 1,23 V, ωστόσο οι τυπικές δυνατότητες είναι 0,6 έως 0,7 και μειώνεται καθώς το ρεύμα ρέει. Γιατί;



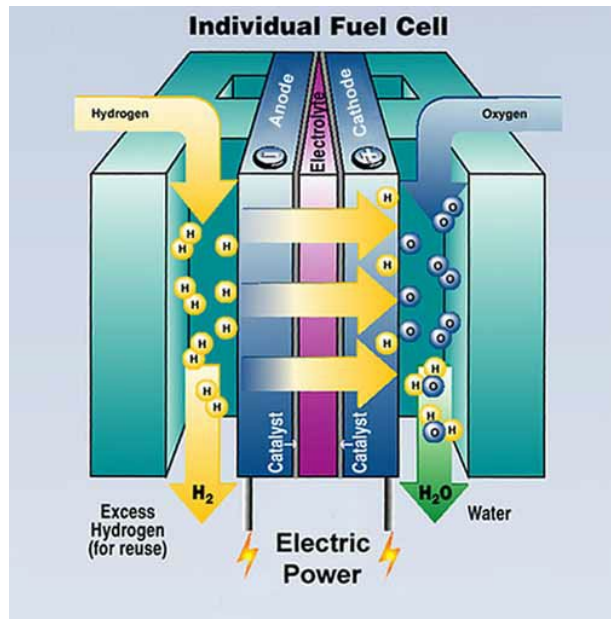
- Απαιτείται επαυξημένη δύναμη για να επιτραπεί η εξέλιξη της καθοδικής αντίδρασης σε αρκετά γρήγορο ρυθμό .
- Οι φορείς φορτίου χάνουν ενέργεια ως θερμότητα (αντίσταση) καθώς ρέουν μέσα από τα μέσα.
- Η μεταφορά μάζας στα ηλεκτρόδια είναι αργή.

Αρχές της κυψέλης καυσίμου

Το υδρογόνο ρέει σε έναν καταλύτη πλατίνας που συνδέεται με την άνοδο. Το μοριακό υδρογόνο διακρίνεται σε ατομικό υδρογόνο στην επιφάνεια του μετάλλου και το ατομικό υδρογόνο οξειδώνεται. Τα πρωτόνια ταξιδεύουν μέσω ενός στερεού ηλεκτρολύτη, της μεμβράνης πολυμερούς ηλεκτροκαταλύτη, και τα ηλεκτρόνια ταξιδεύουν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος. Το μοριακό οξυγόνο μειώνεται στην κάθοδο και ενώνεται με πρωτόνια για να σχηματίσει νερό.

Ένα μεγάλο πρόβλημα με τις κυψέλες καυσίμου

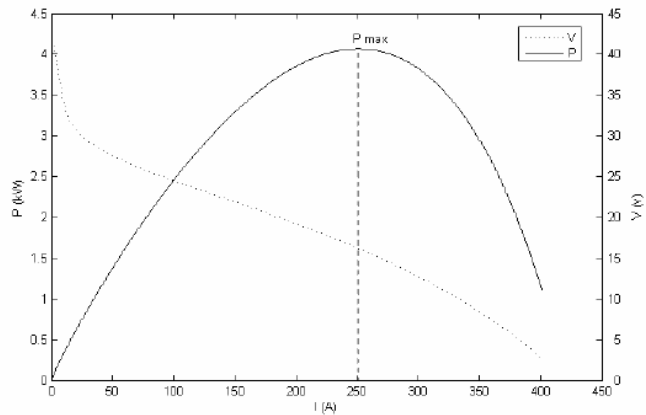
υδρογόνου είναι η πηγή του υδρογόνου. Η ποσότητα του H_2 στην ατμόσφαιρα είναι πολύ χαμηλή, οπότε πρέπει να παραχθεί. Αυτήν τη στιγμή, το μεγαλύτερο μέρος του υδρογόνου είναι κατασκευασμένο από φυσικό αέριο και πετρέλαιο. Μπορεί επίσης να παραχθεί από άνθρακα στο αέριο νερού και αντιδράσεις μετατόπισης υδραερίου. Όλα αυτά χρησιμοποιούν την ενέργεια που αποθηκεύεται στα ορυκτά καύσιμα και παράγουν CO_2 . Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από άλλα μέσα (πυρηνική ενέργεια, υδροηλεκτρική ενέργεια ή ηλιακή ενέργεια) μπορεί να παράγει υδρογόνο μέσω ηλεκτρόλυσης. Αυτό είναι το αντίστροφο της αντίδρασης κυψέλης καυσίμου υδρογόνου. Είναι σαφές ότι το H_2 είναι ένα μέσο μεταφοράς ενέργειας και όχι ένα καύσιμο.



Συστάδα κυψελών καυσίμου

Η επιτυχής τάση μιας κυψέλης καυσίμου μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια της τυπικής δυναμικής. Για την αντίδραση του υδρογόνου με οξυγόνο, αυτό είναι περίπου 1,23 V. Ωστόσο, οι πραγματικές κυψέλες καυσίμου σπάνια επιτυγχάνουν τάση χωρίς φορτίο μεγαλύτερη από 1,0 V.

Αυτό προκαλείται από την εσωτερική αντίσταση ή την ανεπαρκή παροχή υδρογόνου στα ηλεκτρόδια. Η τάση είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος της κυψέλης καυσίμου, καθώς εξαρτάται μόνο από το υδρογόνο που χρησιμοποιείται ως καύσιμο. Ωστόσο, το μέγεθος της κυψέλης καυσίμου είναι καθοριστικό για την ποσότητα του ρεύματος, δηλαδή τον αριθμό των ηλεκτρονίων που μπορούν να παραχθούν ανά μονάδα χρόνου. Αν



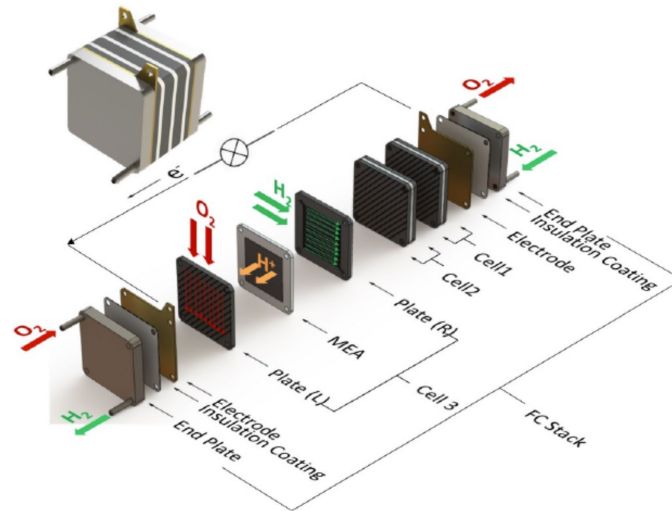
Σχήμα1 Τάση και ισχύς εξόδου στοιβάς κυψελών καυσίμου σε σχέση με τις τρέχουσες καμπύλες - https://www.researchgate.net/figure/Fuel-cell-stack-output-voltage-and-power-vs-its-current-curves_fig1_267262048

απαιτούνται υψηλότερες τάσεις, τότε συνιστάται να συνδεθούν πολλές κυψέλες καυσίμου μαζί.

Με τη συστάδα κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιείται εδώ, παράλληλες και σειριακές συνδέσεις μπορούν να εφαρμοστούν. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες θα καταγράφονται κατά τη διάρκεια της εφαρμογής. Η χαρακτηριστική καμπύλη της τάσης δείχνει την τάση που μπορεί να διατηρήσει η κυψέλη καυσίμου όταν ρέει καθορισμένο ποσό ρεύματος. Το καθορισμένο ρεύμα ρυθμίζεται χρησιμοποιώντας μεταβλητές αντιστάσεις. Αυτά μετατρέπουν το ρεύμα σε θερμότητα. Η χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος εξαρτάται επίσης από το ρεύμα. Εδώ, η ισχύς της κυψέλης καυσίμου, η οποία είναι το γινόμενο της τάσης και του ρεύματος, απεικονίζεται συναρτήσει του ρεύματος.

Μια κυψέλη καυσίμου θα πρέπει να λειτουργεί με τη μέγιστη ισχύ της, αν είναι δυνατόν. Για να επιτευχθεί αυτό, ρυθμίζεται το ρεύμα που απορροφάται. Είναι απαραίτητο να υπάρχει επαρκής ποσότητα υδρογόνου κατά την καταγραφή των χαρακτηριστικών καμπυλών. Πολύ λίγο υδρογόνο καταναλώνεται σε χαμηλά επίπεδα ρεύματος. Όσο υψηλότερο είναι το ρεύμα που απορροφάται, τόσο περισσότερο υδρογόνο απαιτείται. Σε πολύ υψηλά επίπεδα ρεύματος μπορεί να συμβεί να πέσει η τάση λόγω ανεπαρκούς υδρογόνου που φτάνει στα ηλεκτρόδια- η αντίδραση τότε είναι αδύναμη. Αυτό θα αλλοίωνε τα αποτελέσματα των χαρακτηριστικών καμπυλών.

Μια αναξάρτητη κυψέλη καυσίμου παρέχει συνήθως χαμηλές τάσεις και υψηλά ρεύματα. Οι τυπικές τιμές τάσης και ρεύματος κυμαίνονται από 0,4 έως 0,9 V και από 0,5 έως 1 A/cm² αντίστοιχα. Για παράδειγμα, αναφέρεται ότι η κυψέλη καυσίμου παράγει περίπου 0,7 V (μετά τις απώλειες) και 0,6 A/cm². Προκειμένου να επιτευχθεί μια υψηλότερη ισχύς, οι κυψέλες καυσίμου πρέπει να στοιβάζονται μαζί, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ανάλογα με την ισχύ εξόδου και τις εφαρμογές, τα στοιχεία καυσίμου έρχονται σε διάφορα σχήματα και μεγέθη.



Σχήμα2 Σχηματικά διαγράμματα λειτουργίας και μερών/ στοιχείων στοιβάς κυψελών καυσίμου - https://www.researchgate.net/publication/309898224_A_review_on_prognostics_and_health_monitoring_of_proton_exchange_membrane_fuel_cell

Χρήση κυψελών καυσίμου

Οι σταθερές κυψέλες καυσίμου παράγουν ηλεκτρισμό μέσω ηλεκτροχημικής αντίδρασης, χωρίς καύση, παρέχουν καθαρή, αποδοτική και αξιόπιστη ισχύ εκτός δικτύου σε σπίτια, επιχειρήσεις, δίκτυα τηλεπικοινωνιών, επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και άλλα. Οι σταθερές κυψέλες καυσίμου είναι αθόρυβες και έχουν πολύ χαμηλές εκπομπές, έτσι ώστε να μπορούν να εγκατασταθούν σχεδόν οπουδήποτε. Τα συστήματα αυτά παρέχουν ενέργεια επιτόπου απευθείας στους πελάτες, χωρίς τις απώλειες αποδοτικότητας της μεταφοράς δικτύου μεγάλης εμβέλειας.

Παραγωγή ενέργειας

Τα σταθερά συστήματα κυψελών καυσίμου καταλαμβάνουν επίσης πολύ λιγότερο χώρο σε αναλογία με άλλες τεχνολογίες καθαρής ενέργειας. Για παράδειγμα, μια εγκατάσταση κυψελών καυσίμου 10 MW μπορεί να τοποθετηθεί σε μια έκταση περίπου ενός στρώματος γης. Αυτό συγκρίνεται με περίπου 10 στρέμματα που απαιτούνται ανά MW ηλιακής ενέργειας και περίπου 50 στρέμματα ανά MW αιολικής ενέργειας. Οι περισσότερες σταθερές κυψέλες καυσίμου συνδέονται άμεσα με την κρατική υποδομή φυσικού αερίου, δημιουργώντας ανθεκτική ισχύ σε σημαντικές εγκαταστάσεις, ακόμη και όταν η ισχύς του δικτύου δεν είναι διαθέσιμη.

Οι κυψέλες καυσίμου είναι πολύ αποδοτικές, συνήθως φτάνουν το καύσιμο στην ενεργειακή απόδοση του 60 %, σχεδόν διπλάσια από την απόδοση του σημερινού ηλεκτρικού δικτύου. Οι κυψέλες καυσίμου παράγουν επίσης θερμότητα η οποία, αν καταγραφεί, μπορεί να αυξήσει τη συνολική ενεργειακή απόδοση σε περισσότερο από 90 %. Η θερμότητα που παράγεται από τις κυψέλες καυσίμου μπορεί να παράγει πρόσθετη ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας τουρμπίνας, να παρέχει θέρμανση απευθείας στα κοντινά κτίρια ή εγκαταστάσεις, ακόμη και ψύξη με την προσθήκη ενός ψύκτη απορρόφησης.

Σε αντίθεση με την παραγωγή ενέργειας που βασίζεται στην καύση, οι σταθερές κυψέλες καυσίμου παρέχουν σχεδόν μηδενική ισχύ. Οι κυψέλες καυσίμου δεν παράγουν σωματιδιακούς ρύπους, άκαυστους υδρογονάνθρακες ή τα αέρια που παράγουν όξινη βροχή. Εκπέμπουν λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα από ό,τι άλλες, λιγότερο αποδοτικές τεχνολογίες και όταν χρησιμοποιούν καύσιμα που παράγονται από ανανεώσιμες πηγές όπως η βιομάζα, τα στοιχεία καυσίμου είναι εντελώς ουδέτερα σε άνθρακα.

Μεταφορά

Φανταστείτε ένα αυτοκίνητο, ένα SUV, ή ένα φορτηγό που εκτελεί σαν συμβατικό όχημα, μια δεξαμενή καυσίμου που μπορεί να γεμίσει σε τρία - πέντε λεπτά και εκπέμπει μηδενικές εκπομπές, εκτός από υδρατμούς - που είναι το σημερινό ηλεκτρικό όχημα κυψελών καυσίμου (FCEV). Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν υδρογόνο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επί του οχήματος μέσω χημικής διεργασίας, χωρίς καύση.

Ηλεκτρικό όχημα κυψέλης καυσίμου (FCEVs)

Με ικανότητα κίνησης 300-400 μιλίων με μια δεξαμενή υδρογόνου και ανεφοδιασμού διάρκειας τρία-πέντε λεπτά, τα FCEVs προσφέρουν οδήγηση χωρίς εκπομπές ενός ηλεκτρικού οχήματος με τη σειρά και την ευκολία ενός παραδοσιακού κινητήρα εσωτερικής καύσης. Τα FCEVs είναι έως και τρεις φορές πιο αποδοτικά ενεργειακά από τα συμβατικά οχήματα. Τα FCEVs είναι επίσης αθόρυβα και ιδιαίτερα αξιόπιστα.

Τα FCEVs είναι οχήματα μηδενικών εκπομπών - δεν παράγουν άλλη ρύπανση από την εξάτμιση εκτός από τους υδρατμούς. Επιπλέον, σε σύγκριση με τα οχήματα εσωτερικής καύσης, τα FCEVs μειώνουν σημαντικά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, ακόμη και αν συνυπολογιστεί ο πλήρης κύκλος ζωής καυσίμου υδρογόνου. Όταν χρησιμοποιείται υδρογόνο που παράγεται από ηλιακή ή αιολική ηλεκτρόλυση, οι συνολικές εκπομπές CO₂ του κύκλου ζωής εξαλείφονται εντελώς.

Δίαυλοι κυψελών καυσίμου

Αρκετές δεκάδες λεωφορεία κυψελών καυσίμου λειτουργούν στις πόλεις, παρέχοντας καθαρές και αξιόπιστες εναλλακτικές λύσεις μεταφοράς για τους επιβάτες. Χωρίς εκπομπές, τα λεωφορεία κυψελών καυσίμου είναι ελκυστικές επιλογές για τις αστικές περιοχές, λειτουργούν αθόρυβα και μειώνουν το κόστος συντήρησης. Οι διάυλοι κυψελών καυσίμου εμφανίζουν επίσης πλεονεκτήματα που λειτουργούν σε ακραίες θερμοκρασίες, ειδικά σε σχέση με τις εναλλακτικές λύσεις που λειτουργούν με μπαταρία.

Βαρέα Φορτηγά

Παρομοίως, τα βαρέα φορτηγά οχήματα μπορούν να χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου για να μειώνουν τις εκπομπές και να παρέχουν αξιόπιστα οχήματα για διάφορους σκοπούς. Αρκετά πρωτότυπα έχουν αναπτυχθεί σε λιμενικές εγκαταστάσεις στη Νότια Καλιφόρνια, όπου εξυπηρετούν σε μικρής εμβέλειας αποχετευτικές επιχειρήσεις. Οι μελλοντικές εφαρμογές για τα βαρέα φορτηγά οχήματα κυψελών καυσίμου περιλαμβάνουν και τις μακρινές μεταφορές φορτηγών διασχίζοντας την χώρα. Δείτε την ανάρτηση στο blog μας *In Transitions* στο Fuel Cell-Powered Port Vehicles για περισσότερες πληροφορίες.

Μεσαία φορτηγά

Τα οχήματα κυψελών καυσίμων χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερους στόλους οχημάτων διανομής, παρέχοντας καθαρές και αξιόπιστες μεταφορές σε τοπικά δίκτυα. Είτε χρησιμοποιούν αποκλειστικά αυτήν την ενέργεια αποκλειστικά ή συνδυαστικά με μπαταρίες, οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν αξιόπιστα και προσφέρουν περισσότερη αυτονομία συγκριτικά με τα οχήματα που τροφοδοτούνται αποκλειστικά από μπαταρίες.

Χειρισμός υλικών

Αν εργάζεται κάποιος σε μια αποθήκη, μπορεί να οδηγήσει ήδη ένα όχημα κυψελών καυσίμου σήμερα. Τα περνοφόρα ανυψωτικά οχήματα και οι άλλες συσκευές χειρισμού υλικών έχουν αποδειχθεί ότι αποτελούν ιδανική αγορά για τους νέους κατόχους οχημάτων που κινούνται με κυψέλες καυσίμου. Αρκετές μεγάλες εταιρείες διαπιστώνουν ότι οι στόλοι των περνοφόρων οχημάτων με κυψέλες καυσίμου αυξάνουν την παραγωγικότητα και εξοικονομούν χρήματα στις αποθήκες και τα κέντρα διανομής. Δείτε το Φύλλο Δεδομένων Χειρισμού Υλικών για περισσότερες πληροφορίες.

Μη επανδρωμένα εναέρια και υποβρύχια οχήματα

Αρκετά μοντέλα μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAVs), ή "drones", χρησιμοποιούν επί του παρόντος κυψέλες καυσίμου για ηλεκτροδότηση. Αυτά παρέχουν στα drones μεγαλύτερους χρόνους πτήσης και γρήγορο ανεφοδιασμό καυσίμων, σε σύγκριση με τα παραδοσιακά drones που λειτουργούν με μπαταρίες. Ενώ μόνο τα UAVs που τροφοδοτούνται από κυψέλες καυσίμου είναι διαθέσιμα στο εμπόριο, πρόσθετη έρευνα και ανάπτυξη στρέφεται προς την κατεύθυνση των υποβρύχιων drones κυψελών καυσίμου.

Σιδηροδρομικές μεταφορές

Οι συρμοί κυψελών καυσίμου λειτουργούν σήμερα στη Γερμανία, με τους ταξιδιώτες να επωφελούνται από τη μείωση της ηχορύπανσης και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε σύγκριση με τα συμβατικά πετρελαιοκίνητα τρένα. Εκτός της Γερμανίας, έχουν προγραμματιστεί αποστολές συρμών με κυψέλες καυσίμου για την Ιαπωνία και τη Νότια Κορέα στο μέλλον. Μαζί με την ηλεκτροδότηση γραμμής, τα τρένα κυψελών καυσίμου είναι αποδοτικές επιλογές για τη μείωση των εκπομπών από τον τομέα των μεταφορών και την αντιμετώπιση των αυξανόμενων προκλήσεων.

Θαλάσσιες μεταφορές

Πλοία διαφόρων μεγεθών δοκιμάζουν σήμερα κυψέλες καυσίμου με νέους ρόλους στο νερό. Αρκετά πλοία σε όλο τον κόσμο λειτουργούν με υδρογόνο, ενώ τα μεγαλύτερα μοντέλα κυψελών καυσίμου αποτελούν πρωτότυπα και χρησιμοποιούνται για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Πλοία από μεγάλες έως μικρές εταιρείες επιδιώκουν οι κυψέλες καυσίμου να εκπληρώσουν τους στόχους εκπομπών και να συνεχίσουν με επιτυχία την μετακίνηση ανθρώπων και φορτίων.

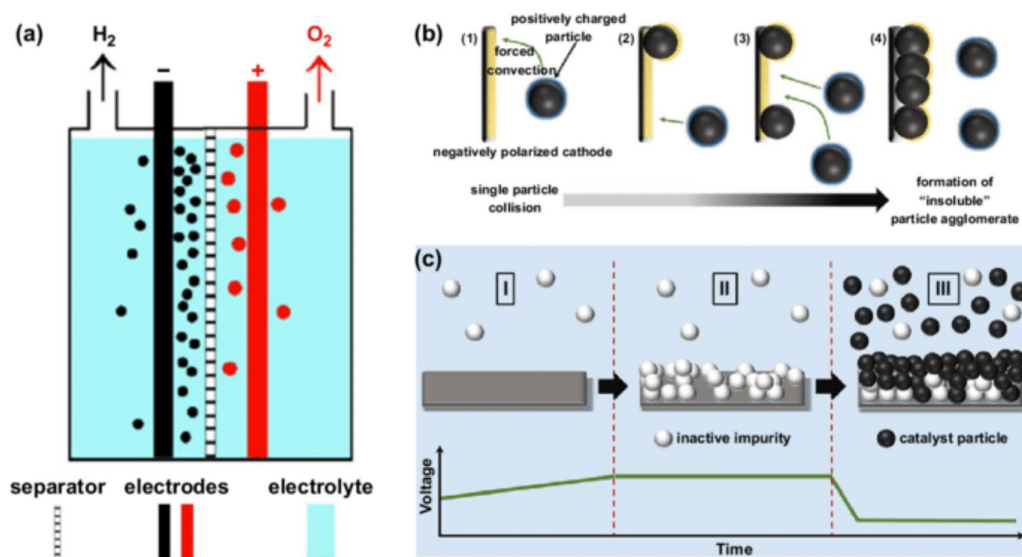
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ 2 - Περιγράψτε τα βασικά χαρακτηριστικά των κυψελών καυσίμου καθώς και των ηλεκτρολυτών και τη λειτουργία των συστατικών μερών τους

Τύποι ηλεκτρολυτών

Σήμερα, υπάρχουν διαφορετικοί τύποι ηλεκτρολυτών ανάλογα με το μέγεθος και τη λειτουργία τους. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι περιγράφονται παρακάτω.

Αλκαλικός ηλεκτρολύτης

Οι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες χρησιμοποιούν υγρό διάλυμα ηλεκτρολυτών, όπως υδροξείδιο του καλίου ή υδροξείδιο του νατρίου και νερό. Το υδρογόνο παράγεται σε μια κυψέλη που αποτελείται από μια άνοδο, μια κάθοδο και μια μεμβράνη. Τα κύτταρα συνήθως συναρμολογούνται σε σειρά για να παράγουν περισσότερο υδρογόνο και οξυγόνο ταυτόχρονα. Όταν ρέει ρεύμα στη στοιβία κυψελών ηλεκτρόλυσης, τα ιόντα υδροξειδίου κινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη από την κάθοδο στην άνοδο κάθε στοιχείου, δημιουργώντας φυσαλίδες αερίου υδρογόνου στην πλευρά της καθόδου του ηλεκτρολύτη και αερίου οξυγόνου στην άνοδο. Χρησιμοποιούνται εδώ και πάνω από 100 χρόνια και δεν απαιτούν ευγενή μέταλλα ως καταλύτη, ωστόσο, είναι ογκώδης εξοπλισμός που αποκτά μεσαίας καθαρότητας υδρογόνο και δεν είναι πολύ ευέλικτος στη λειτουργία.

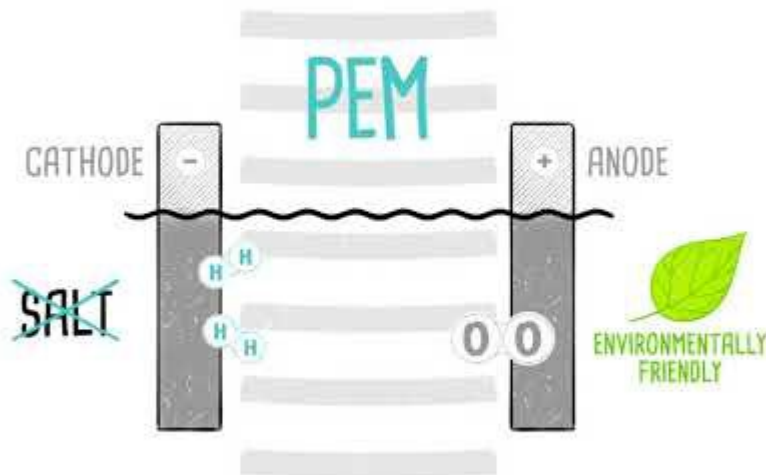


Σχήμα3 Σχηματικό διάγραμμα του συμβατικού αλκαλικού ηλεκτρολύτη - Copyright 2012 Elsevier Inc

Ηλεκτρολύτης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων

Οι ηλεκτρολύτες PEM χρησιμοποιούν μια μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων και έναν ηλεκτρολύτη στερεού πολυμερούς. Όταν το ρεύμα ρέει στην μπαταρία, το νερό χωρίζεται σε υδρογόνο και οξυγόνο και τα πρωτόνια υδρογόνου περνούν μέσα από τη μεμβράνη για να σχηματίσουν αέριο

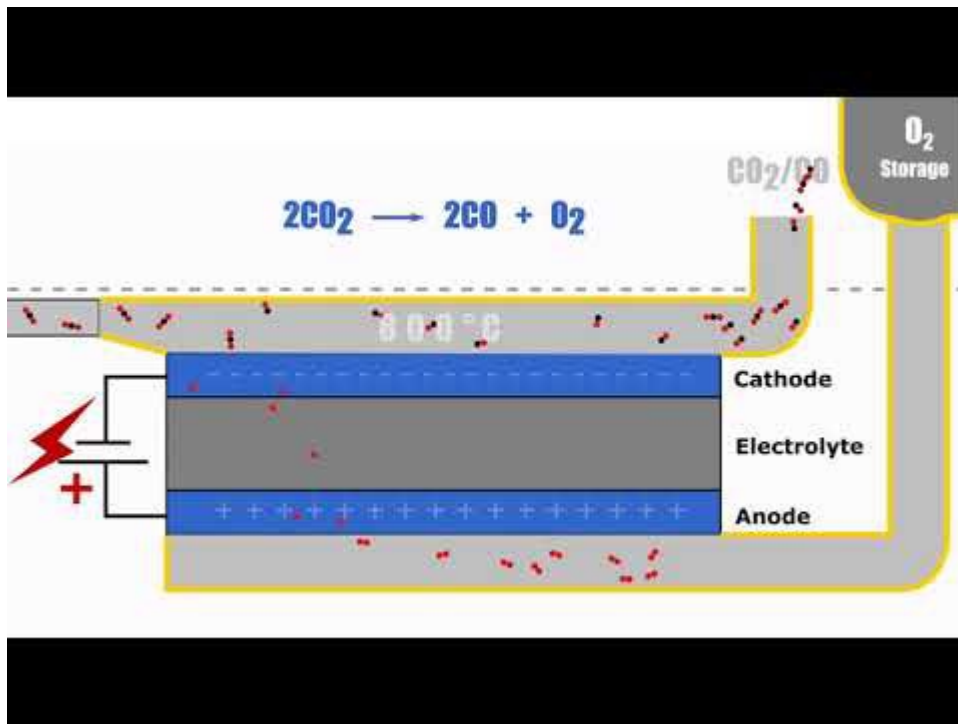
υδρογόνο στην πλευρά της καθόδου. Είναι τα πιο δημοφιλή, επειδή παράγουν υψηλής καθαρότητας υδρογόνο και είναι εύκολο να δροσιστούν. Είναι καταλληλότερα για να ταιριάζουν με τη μεταβλητότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι συμπαγή και παράγουν υψηλής καθαρότητας υδρογόνο. Από την άλλη πλευρά, είναι κάπως πιο ακριβά επειδή χρησιμοποιούν πολύτιμα μέταλλα ως καταλύτες.



Κυψέλη ηλεκτρολύσεως στερεού οξειδίου (SOEC)

Οι SOEC λειτουργούν σε υψηλότερη θερμοκρασία (μεταξύ 500 και 850°C) και έχουν τη δυνατότητα να είναι πολύ πιο αποδοτικές από τις PEM και τους αλκαλικούς ηλεκτρολύτες. Η διαδικασία ονομάζεται ηλεκτρόλυση υψηλής θερμοκρασίας (HTE) ή ηλεκτρόλυση ατμού και χρησιμοποιεί ένα στερεό κεραμικό υλικό ως ηλεκτρολύτη. Τα ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα συνδυάζονται με νερό στην κάθοδο για να σχηματίσουν αέριο υδρογόνο και αρνητικά φορτισμένα ιόντα. Το οξυγόνο στη συνέχεια περνά μέσα από την συρόμενη κεραμική μεμβράνη και αντιδρά στην άνοδο για να σχηματίσει αέριο οξυγόνο και να δημιουργήσει ηλεκτρόνια για το εξωτερικό κύκλωμα.

Υπάρχουν και άλλοι τύποι ηλεκτρολυτών που δεν είναι ακόμη τόσο αποτελεσματικοί ή οικονομικά αποδοτικοί όπως οι παραπάνω, αλλά έχουν μεγαλύτερες δυνατότητες ανάπτυξης. Ένα παράδειγμα είναι η φωτοηλεκτρόλυση, η οποία χρησιμοποιεί μόνο ηλιακό φως για να χωρίσει τα μόρια νερού χωρίς την ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο, αυτή η συσκευή απαιτεί ημιαγωγούς που δεν έχουν ακόμη αναπτυχθεί επαρκώς.



Σύγκριση και περίληψη των διαφόρων τεχνολογιών ηλεκτρόλυσης του νερού

	Alkaline water electrolysis	PEM	SOEC	High temperature electrolysis
Technology status	Commercial	Commercial	R & D	R & D
Temperature [$^\circ\text{C}$]	<120	<80	700–1000	700–900
Pressure [bar]	1–200	1–350	1–5	<10
Electrolyte	20–30 % NaOH or KOH	Perfluoro-sulfonic acid	ZrO ₂ doped with Y ₂ O ₃	ZrO ₂ doped with Y ₂ O ₃
Cell separator	Diaphragm	Electrolyte membrane	Electrolyte membrane	Electrolyte membrane
Capacity [Nm^3h^{-1}]	1–700	1–100	1–10	0.6
Durability [h]	100 000	10 000–50 000	500–2000	No data available
Connectable to dynamic power system	No	Yes	No	No
Costs	~ 1250 EUR kW ⁻¹ h ⁻¹ , ~2 EUR kg ⁻¹ H ₂	2000 EUR kW ⁻¹ h ⁻¹	>2100 EUR kW ⁻¹ h ⁻¹	>4 EUR kg ⁻¹ H ₂

Σχήμα 4 https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-different-water-electrolysis-technologies-79-93-133-134-138_tbl4_337716604

Κυψέλη καυσίμου

Μια κυψέλη καυσίμου χρειάζεται για να μετατρέψει το υδρογόνο (H_2) σε ηλεκτρική ενέργεια, αυστηρά μιλώντας, αυτή είναι μια κυψέλη καυσίμου υδρογόνου-οξυγόνου. Επίσης συχνά αναφέρεται απλά ως «κυψέλη καυσίμου υδρογόνου». Οι "κυψέλες καυσίμου" και "κυψέλες καυσίμου υδρογόνου" χρησιμοποιούνται συνώνυμα. Στις κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, το υδρογόνο χρησιμεύει ως καύσιμο και οξυγόνο (O_2) ως οξειδωτικό μέσο. Μετατρέποντας τη χημική ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα, οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου έχουν σημαντικά υψηλότερες αποδόσεις από τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε συνδυασμό με ένα σύστημα αποθήκευσης καυσίμου και την ανακύκλωση υδρογόνου, τα συστήματα κυψελών καυσίμου επιτρέπουν την παραγωγή ενέργειας χωρίς ρύπανση. Το φάσμα ισχύος των κυψελών καυσίμου υδρογόνου κυμαίνεται από την υποπεριοχή kW μεμονωμένων κυψελών έως την περιοχή MW υπό μορφή εικονικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής.

Πεδία εφαρμογής των κυψελών καυσίμου υδρογόνου μπορεί να είναι από την παροχή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας στα κτίρια έως τις εφαρμογές εκτός δικτύου και την πρόωση οχημάτων, αεροπλάνων και πλοίων. Οι κυψέλες καυσίμου έχουν αρχίσει να συζητούνται όλο και περισσότερο, ειδικά λόγω του ρόλου του υδρογόνου στην ηλεκτρονική κινητικότητα. Το κύτταρο αποτελείται από ένα δίκτυο πολλών κυψελών που χωρίζονται από διαχωριστές και διατάσσονται σε μια στοίβα. Η δομή μιας κυψέλης καυσίμου είναι επίπεδη σε στρώματα ή, στην περίπτωση κυψελών καυσίμου στερεού οξειδίου, σωληνοειδής ως σωληνοειδές σύστημα.

Κατασκευαστικά στοιχεία των στοιχείων καυσίμου

Η ηλεκτρόλυση παίζει καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία των κυψελών καυσίμου: ο πυρήνας μιας μεμονωμένης κυψέλης καυσίμου σχηματίζεται από ένα υγρό ή ένα στερεό ηλεκτρολύτη, ο οποίος περικλείεται και στις δύο πλευρές από διπολικές πλάκες ηλεκτροδίου (άνοδος και κάθοδος).

Αυτές οι πλάκες έχουν ένα πορώδες στρώμα διάχυσης (GDL - στρώμα διάχυσης αερίου), που καθοδηγεί τα αέρια της αντίδρασης πάνω σε μια επιφάνεια καταλύτη με επίστρωση πολύτιμων μετάλλων (εύρος χαμηλής και μεσαίας θερμοκρασίας) ή πάνω σε έναν καταλύτη από νικέλιο, κεραμικό ή χάλυβα (εύρος υψηλής θερμοκρασίας). Αυτός είναι ο τρόπος με τον οποίο, στους περισσότερους τύπους κυψελών καυσίμου, το υδρογόνο διαιρείται στην πλευρά της ανόδου και τα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται στον καταναλωτή ηλεκτρικού ρεύματος. Τα πρωτόνια υδρογόνου μεταναστεύουν μέσω του ηλεκτρολύτη στην πλευρά της καθόδου, όπου συνδυάζονται με το προστιθέμενο οξυγόνο για να σχηματίσουν νερό (H_2O)

Οι κυψέλες καυσίμου ταξινομούνται κυρίως από το είδος του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν. Αυτή η ταξινόμηση καθορίζει το είδος των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στο κύτταρο, το είδος των απαιτούμενων καταλυτών, το εύρος θερμοκρασίας στο οποίο λειτουργεί το κύτταρο, το απαιτούμενο καύσιμο και άλλους παράγοντες. Αυτά τα χαρακτηριστικά, με τη σειρά τους, επηρεάζουν τις εφαρμογές για τις οποίες είναι πιο κατάλληλα αυτά τα κύτταρα. Υπάρχουν αρκετοί τύποι κυψελών καυσίμου που βρίσκονται αυτήν τη στιγμή υπό ανάπτυξη, ο καθένας με τα δικά του πλεονεκτήματα, περιορισμούς και πιθανές εφαρμογές.

Στρώσεις καταλύτη

Ένα στρώμα καταλύτη προστίθεται και στις δύο πλευρές της μεμβράνης—το στρώμα ανόδου στη μία πλευρά και το στρώμα καθόδου στην άλλη. Τα συμβατικά στρώματα του καταλύτη περιλαμβάνουν σωματίδια νανομετρικού μεγέθους από λευκόχρυσο, διεσπαρμένα σε ένα υψηλής επιφάνειας στήριγμα άνθρακα. Αυτός ο υποστηριζόμενος καταλύτης λευκόχρυσου αναμειγνύεται με ένα ιοντοαγωγό πολυμερές (ιονόμετρο) και εγκλωβίζεται μεταξύ της μεμβράνης και των GDLs. Από την πλευρά της ανόδου, ο καταλύτης λευκόχρυσου επιτρέπει στα μόρια υδρογόνου να διασπαστούν σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Από την πλευρά της καθόδου, ο καταλύτης λευκόχρυσου επιτρέπει τη μείωση του οξυγόνου αντιδρώντας με τα πρωτόνια που παράγονται από την άνοδο, παράγοντας νερό. Το ιονόμετρο που αναμειγνύεται στις στρώσεις του καταλύτη επιτρέπει στα πρωτόνια να ταξιδεύουν μέσα από αυτές τις στρώσεις.

Στρώματα διάχυσης αερίου

Τα GDLs εγκαθίστανται έξω από τις στρώσεις του καταλύτη και διευκολύνουν τη μεταφορά των αντιδρώντων στη στρώση του καταλύτη, καθώς και την απομάκρυνση του νερού του προϊόντος. Κάθε GDL συνήθως αποτελείται από ένα φύλλο χαρτιού άνθρακα στο οποίο οι ίνες άνθρακα είναι μερικώς επικαλυμμένες με πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE). Τα αέρια διαχέονται γρήγορα μέσω των πόρων του GDL. Οι πόροι αυτοί παραμένουν ανοικτοί από το υδρόφοβο PTFE, το οποίο αποτρέπει την υπερβολική συσσώρευση νερού. Σε πολλές περιπτώσεις, η εσωτερική επιφάνεια του GDL είναι επικαλυμμένη με ένα λεπτό στρώμα άνθρακα υψηλής επιφάνειας αναμειγμένο με PTFE, που ονομάζεται μικροπορώδες στρώμα. Το μικροπορώδες στρώμα μπορεί να βοηθήσει στη ρύθμιση της ισορροπίας μεταξύ της κατακράτησης νερού (που απαιτείται για τη διατήρηση της αγωγιμότητας της μεμβράνης) και της απελευθέρωσης νερού (που απαιτείται για να κρατήσει τους πόρους ανοικτούς έτσι ώστε το υδρογόνο και το οξυγόνο να μπορούν να διαχυθούν στα ηλεκτρόδια).

Υλικό

Το συγκρότημα ηλεκτροδίων μεμβράνης κυψέλης καυσίμου (MEA) είναι το μέρος της κυψέλης καυσίμου όπου παράγεται η ισχύς, αλλά απαιτούνται εξαρτήματα υλικού για να καταστεί δυνατή η αποτελεσματική λειτουργία του MEA.

Διπολικές Πλάκες

Κάθε MEA παράγει λιγότερο από 1 V κάτω από τυπικές συνθήκες λειτουργίας, αλλά οι περισσότερες εφαρμογές απαιτούν υψηλότερες τάσεις. Ως εκ τούτου, πολλαπλά MEAs είναι συνήθως συνδεδεμένα σε σειρά με στοιβάζονται τους πάνω από το άλλο για να παρέχει μια χρήσιμη τάση εξόδου. Κάθε κύτταρο στη στοιβία χωρίζεται μεταξύ δύο διπολικών πλακών για να το διαχωρίσει από τα γειτονικά κύτταρα. Αυτές οι πλάκες, οι οποίες μπορεί να είναι κατασκευασμένες από μέταλλο, άνθρακα ή σύνθετα υλικά, παρέχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα μεταξύ των κυττάρων, καθώς και την παροχή φυσικής αντοχής στη στοιβία. Οι επιφάνειες των πλακών συνήθως περιέχουν ένα «πεδίο ροής», το οποίο είναι ένα σύνολο καναλιών μηχανικά επεξεργασμένων ή σφραγισμένων στην πλάκα για να επιτρέπουν στα αέρια να ρέουν πάνω από το MEA. Για την κυκλοφορία υγρού ψυκτικού μέσου μπορούν να χρησιμοποιηθούν πρόσθετοι δίαυλοι μέσα σε κάθε πλάκα.

Παρεμβύσματα/ Τσιμούχες

Κάθε MEA σε μια στοιβία κυψελών καυσίμου είναι τοποθετημένο μεταξύ δύο διπολικών πλακών, αλλά παρεμβύσματα πρέπει να προστεθούν γύρω από τις άκρες του MEA για να γίνει μια αεροστεγής σφράγιση. Αυτές οι φλάντζες είναι συνήθως κατασκευασμένες από ελαστικό πολυμερές.

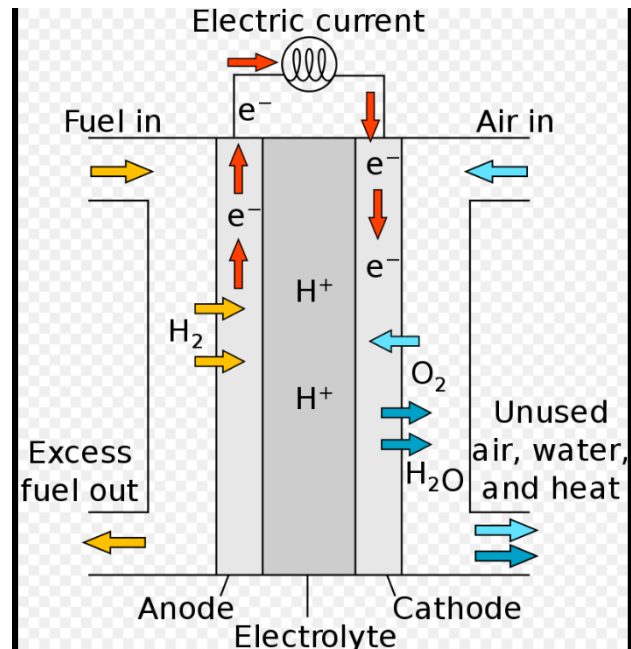
Τύποι κυψελών καυσίμου

Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης πολυμερών ηλεκτρολυτών

Οι κυψέλες καυσίμου πολυμερούς ηλεκτρολυτικής μεμβράνης (PEM) - που ονομάζονται επίσης κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων - παρέχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος και προσφέρουν τα πλεονεκτήματα χαμηλού βάρους και όγκου σε σύγκριση με άλλες κυψέλες καυσίμου. Οι κυψέλες καυσίμου PEM χρησιμοποιούν ένα στερεό πολυμερές ως ηλεκτρολύτη και πορώδη ηλεκτρόδια άνθρακα που περιέχουν καταλύτη από κράμα πλατίνας. Χρειάζονται μόνο υδρογόνο, οξυγόνο από τον αέρα και νερό για να λειτουργήσουν. Συνήθως τροφοδοτούνται με καθαρό υδρογόνο που παρέχεται από δεξαμενές αποθήκευσης ή αναμορφωτές.

Οι κυψέλες καυσίμου PEM λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, γύρω στους 80°C (176°F). Η λειτουργία σε χαμηλή θερμοκρασία τους επιτρέπει να ξεκινήσουν γρήγορα (λιγότερο χρόνο προθέρμανσης) και έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη φθορά στα εξαρτήματα του συστήματος, με αποτέλεσμα καλύτερη αντοχή. Ωστόσο,

απαιτεί ότι ένας καταλύτης ευγενούς μετάλλου (συνήθως λευκόχρυσος) θα χρησιμοποιηθεί για να διαχωρίσει τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια του υδρογόνου, προσθέτοντας στο κόστος του συστήματος. Ο καταλύτης λευκόχρυσου είναι επίσης εξαιρετικά ευαίσθητος σε δηλητηρίαση από μονοξείδιο του άνθρακα, καθιστώντας απαραίτητη την χρήση ενός πρόσθετου αντιδραστήρα για τη μείωση του μονοξειδίου του άνθρακα στο αέριο καύσιμο, αν το υδρογόνο προέρχεται από καύσιμο



υδρογονάνθρακα. Και αυτός ο αντιδραστήρας αυξάνει το κόστος. Οι κυψέλες καυσίμου PEM χρησιμοποιούνται κυρίως για εφαρμογές μεταφοράς και ορισμένες σταθερές εφαρμογές. Οι κυψέλες καυσίμου PEM είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για χρήση σε εφαρμογές οχημάτων, όπως αυτοκίνητα, λεωφορεία και βαρέα φορτηγά.

Κυψέλη Καυσίμου Άμεσης Μεθανόλης (ΚΚΑΜ)

Οι περισσότερες κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν υδρογόνο, το οποίο μπορεί να τροφοδοτεί απευθείας το σύστημα κυψελών καυσίμου ή μπορεί να παραχθεί εντός του συστήματος κυψελών καυσίμου αναμορφώνοντας πλούσια σε υδρογόνο καύσιμα, όπως η μεθανόλη, η αιθανόλη και τα καύσιμα υδρογονανθράκων. Οι κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης, ωστόσο, τροφοδοτούνται από καθαρή μεθανόλη, η οποία συνήθως αναμειγνύεται με νερό και τροφοδοτείται απευθείας στην άνοδο κυψέλης καυσίμου.

Οι κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης δεν έχουν πολλά από τα προβλήματα αποθήκευσης καυσίμου που είναι τυπικά σε ορισμένα συστήματα κυψελών καυσίμου επειδή η μεθανόλη έχει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από το υδρογόνο - αν και μικρότερη από τη βενζίνη ή το καύσιμο

ντίζελ. Η μεθανόλη είναι επίσης πιο εύκολο να μεταφερθεί και να εφοδιαστεί το κοινό χρησιμοποιώντας την τρέχουσα υποδομή μας, επειδή είναι ένα υγρό, όπως η βενζίνη. Οι ΚΚΑΜ χρησιμοποιούνται συχνά για να παρέχουν ισχύ για φορητές εφαρμογές κυψελών καυσίμου όπως κινητά τηλέφωνα ή φορητούς υπολογιστές.

Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου

Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (Alkaline Fuel Cells, AFC) ήταν μία από τις πρώτες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου που αναπτύχθηκαν και ήταν ο πρώτος τύπος που χρησιμοποιήθηκε ευρέως στο πρόγραμμα διαστημικής τεχνολογίας των Η.Π.Α. για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και νερού στα διαστημικά σκάφη. Αυτές οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν μια διάλυση υδροξειδίου του καλίου σε νερό ως ηλεκτρολύτη και μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια ποικιλία από μη πολύτιμα μέταλλα ως καταλύτη στον ανόδο και τον καθόδο

Τα τελευταία χρόνια, αναπτύχθηκαν νέα AFCs που χρησιμοποιούν μια πολυμερή μεμβράνη ως ηλεκτρολύτη. Αυτές οι κυψέλες καυσίμου είναι στενά συνδεδεμένες με τις συμβατικές κυψέλες καυσίμου PEM, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιούν μια αλκαλική μεμβράνη αντί για μια όξινη μεμβράνη. Η υψηλή απόδοση των AFCs οφείλεται στο ρυθμό με τον οποίο οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα στην κυψέλη. Έχουν επίσης δείξει απόδοση πάνω από 60% στις εφαρμογές διαστήματος.

Ένα από τα κύρια προβλήματα για αυτόν τον τύπο κυψέλης καυσίμου είναι ότι είναι ευάλωτος στη δηλητηρίαση από διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Ακόμα και η μικρή ποσότητα CO₂ στον αέρα μπορεί να επηρεάσει δραματικά την απόδοση και τη διάρκεια ζωής της κυψέλης λόγω της δημιουργίας ανθρακικών ενώσεων. Οι αλκαλικές κυψέλες με υγρούς ηλεκτρολύτες έχουν τέτοιο τρόπο κυκλοφορίας που επιτρέπει την αναγέννηση ηλεκτρολυτών για να βοηθήσει στη μείωση των επιπτώσεων του σχηματισμού ανθρακικών ενώσεων στον ηλεκτρολύτη. Ωστόσο, η λειτουργία ανακύκλωσης παρουσιάζει προβλήματα με τις απολίσεις των ρευμάτων. Τα συστήματα με υγρούς ηλεκτρολύτες έχουν επιστροφικά προβλήματα, συμπεριλαμβανομένης της υγρασίας, της αυξημένης διάβρωσης και των δυσκολιών διαχείρισης των διαφορικών πιέσεων.

Οι αλκαλικές κυψέλες με μεμβράνη αντιμετωπίζουν αυτά τα προβλήματα και έχουν μικρότερη ευαισθησία στη δηλητηρίαση από το CO₂ σε σύγκριση με τις υγρούς ηλεκτρολύτους AFCs. Ωστόσο, το CO₂ εξακολουθεί να επηρεάζει την απόδοση, και η απόδοση και ανθεκτικότητα των AMFCs παραμένουν πίσω από αυτές των PEMFCs. Οι AMFCs εξετάζονται για εφαρμογές στην κλίμακα των W έως kW. Τα προβλήματα για τις AMFCs περιλαμβάνουν την ανοχή στο διοξείδιο του άνθρακα, την αγωγιμότητα και ανθεκτικότητα της μεμβράνης, τη λειτουργία σε υψηλότερες θερμοκρασίες, τη διαχείριση του νερού, την πυκνότητα ισχύος και την ηλεκτροκατάλυση του ανόδου.

Κυψέλες Καυσίμου με Φωσφορικό Οξύ (ΚΚΦΟ)

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (ΚΚΦΟ) χρησιμοποιούν υγρό φωσφορικό οξύ ως ηλεκτρολύτη - το οξύ περιέχεται σε μια μήτρα από τετραφθοροαιθυλένιο συνδεδεμένο με καρβίδιο πυριτίου- και πόρους άνθρακα με ηλεκτρόδια που περιέχουν καταλύτη από πλατίνα. Οι ΚΚΦΟ θεωρούνται η «πρώτη γενιά» των σύγχρονων κυψελών καυσίμου. Είναι ένας από τους πιο ώριμους τύπους κυψελών καυσίμου και ο πρώτος που χρησιμοποιήθηκε εμπορικά. Αυτός ο τύπος κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιείται συνήθως για παραγωγή ενέργειας σε σταθμούς, αλλά μερικά ΚΚΦΟ έχουν χρησιμοποιηθεί σε μεγάλα οχήματα όπως αστικά λεωφορεία.

Οι ΚΚΦΟ είναι πιο ανεκτικές σε προσμείξεις ορυκτών καυσίμων που έχουν μεταρρυθμιστεί σε υδρογόνο από ότι οι κυψέλες PEM, οι οποίες εύκολα "δηλητηριάζονται" από το μονοξείδιο του άνθρακα επειδή το μονοξείδιο του άνθρακα δεσμεύεται στον καταλύτη πλατίνας στην άνοδο, μειώνοντας την αποτελεσματικότητα της κυψέλης καυσίμου. Οι ΚΚΦΟ είναι περισσότερο από 85% αποδοτικές όταν χρησιμοποιούνται για την συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, αλλά είναι λιγότερο αποδοτικές στην παραγωγή ηλεκτρισμού και μόνο (37%-42%). Η απόδοση της ΚΚΦΟ είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από αυτή των μονάδων παραγωγής ενέργειας που λειτουργούν με καύση, οι οποίες συνήθως λειτουργούν με απόδοση περίπου 33%. Οι ΚΚΦΟ είναι επίσης λιγότερο ισχυρά από άλλα στοιχεία καυσίμου, δεδομένου του ίδιου βάρους και όγκου. Ως αποτέλεσμα, αυτές οι κυψέλες καυσίμου είναι συνήθως μεγάλες και βαριές. Οι ΚΚΦΟ είναι επίσης ακριβά. Απαιτούν πολύ υψηλότερες φορτίσεις, πιο ακριβό καταλύτη πλατίνας από άλλους τύπους κυψελών καυσίμου, γεγονός που αυξάνει το κόστος.

Κυψέλες καυσίμου τηγμένων άνθρακικών αλάτων

Οι κυψέλες καυσίμου τηγμένων άνθρακικών αλάτων (MCFCs) κατασκευάζονται για το φυσικό αέριο και τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τον άνθρακα για βιομηχανικές και στρατιωτικές εφαρμογές. Τα MCFCs είναι κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας που χρησιμοποιούν ηλεκτρολύτη αποτελούμενο από μείγμα τηγμένου άνθρακα που αιωρείται σε πορώδη, χημικά αδρανή κεραμικό πένακα από οξείδιο αργιλίου λιθίου. Επειδή λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες 650°C (περίπου 1.200°F), τα μη πολύτιμα μέταλλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καταλύτες στην άνοδο και την κάθοδο, μειώνοντας το κόστος.

Η υψηλή απόδοση είναι ένας άλλος λόγος που τα MCFCs προσφέρουν σημαντικές μειώσεις κόστους σε σχέση με κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος. MCFCs, όταν συνδυάζονται με μια τουρμπίνα, μπορούν να φτάσουν σε αποδόσεις που προσεγγίζουν το 65%, σημαντικά υψηλότερες από τις

αποδόσεις 37%-42% μιας μονάδας κυψελών καυσίμου φωσφορικού οξέος. Όταν η απορριπτόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται, η συνολική απόδοση καυσίμου μπορεί να είναι άνω του 85%.

Σε αντίθεση με τις αλκαλικές κυψέλες καυσίμου, φωσφορικού οξέος και PEM, οι MCFCs δεν απαιτούν εξωτερικό μεταρρυθμιστή για τη μετατροπή καυσίμων όπως φυσικό αέριο και βιοαέριο σε υδρογόνο. Στις υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες λειτουργούν οι MCFCs, το μεθάνιο και άλλοι ελαφρείς υδρογονάνθρακες σε αυτά τα καύσιμα μετατρέπονται σε υδρογόνο μέσα στην ίδια την κυψέλη καυσίμου μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται εσωτερική αναμόρφωση, η οποία επίσης μειώνει το κόστος.

Το κύριο μειονέκτημα της τρέχουσας τεχνολογίας MCFC είναι η ανθεκτικότητα. Οι υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες λειτουργούν αυτές οι κυψέλες και ο διαβρωτικός ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται επιταχύνουν τη διάσπαση και τη διάβρωση των εξαρτημάτων, μειώνοντας τη ζωή των κυττάρων. Οι επιστήμονες σήμερα εξερευνούν υλικά για εξαρτήματα ανθεκτικά στη διάβρωση, καθώς και σχέδια κυψελών καυσίμου που διπλασιάζουν τη ζωή των κυττάρων από τις τρέχουσες 40.000 ώρες (~5 χρόνια) χωρίς μείωση των επιδόσεων.

Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου

Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFCs) χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη μια σκληρή, μη πορώδη κεραμική ένωση. Οι SOFCs είναι περίπου 60% αποδοτικοί στη μετατροπή καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε εφαρμογές που έχουν σχεδιαστεί να δεσμεύουν και αξιοποιούν την απορριπτόμενη θερμότητα του συστήματος (συμπαραγωγή), η συνολική αποδοτικότητα χρήσης καυσίμου θα μπορούσε να ανέλθει σε 85%.

Οι SOFC λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες—τόσο υψηλές όσο 1.000°C (1.830°F). Η λειτουργία σε υψηλή θερμοκρασία αναστέλει την ανάγκη για καταλύτη πολύτιμων μετάλλων, μειώνοντας έτσι το κόστος. Επιτρέπει επίσης στις SOFC να αναμορφώσουν τα καύσιμα στο εσωτερικό, πράγμα που επιτρέπει τη χρήση διαφόρων καυσίμων και μειώνει το κόστος που συνδέεται με την προσθήκη ενός μεταρρυθμιστή στο σύστημα.

Οι SOFCs είναι επίσης πιο ανθεκτικές στο θείο, μπορούν να ανεχθούν περισσότερο θείο από ότι άλλοι τύποι στοιχείων μπορούν. Επιπλέον, δεν δηλητηριάζονται από μονοξείδιο του άνθρακα, το οποίο μπορεί ακόμη και να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο. Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει στις SOFCs να χρησιμοποιούν φυσικό αέριο, βιοαέριο και αέρια που παράγονται από άνθρακα. Η λειτουργία σε υψηλή θερμοκρασία έχει μειονεκτήματα. Έχει ως αποτέλεσμα αργή εκκίνηση και απαιτεί σημαντική θερμική θωράκιση για να διατηρήσει τη θερμότητα και να προστατεύσει το προσωπικό, η οποία μπορεί να είναι αποδεκτή για τις εφαρμογές κοινής ωφέλειας αλλά όχι για τις μεταφορές. Οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας επίσης θέτουν αυστηρές απαιτήσεις αντοχής στα υλικά. Η ανάπτυξη

υλικών χαμηλού κόστους με υψηλή ανθεκτικότητα σε θερμοκρασίες λειτουργίας κυψελών είναι η βασική τεχνική πρόκληση που αντιμετωπίζει αυτή η τεχνολογία.

Οι επιστήμονες εξετάζουν αυτήν τη στιγμή τη δυνατότητα ανάπτυξης SOFC χαμηλότερης θερμοκρασίας που λειτουργούν στους 700°C ή χαμηλότερα και έχουν λιγότερα προβλήματα ανθεκτικότητας και μικρότερο κόστος. Οι SOFC χαμηλότερης θερμοκρασίας δεν έχουν ακόμα ταίριαξει με την απόδοση των συστημάτων υψηλότερης θερμοκρασίας, ωστόσο, και τα υλικά στοιχεία που θα λειτουργήσουν σε αυτό το χαμηλότερο εύρος θερμοκρασίας είναι ακόμα υπό ανάπτυξη.

Κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας

Οι κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από το υδρογόνο και το οξυγόνο και παράγουν θερμότητα και νερό ως υποπροϊόντα, ακριβώς όπως και άλλες κυψέλες καυσίμου. Ωστόσο, τα αντιστρέψιμα συστήματα κυψελών καυσίμου μπορούν επίσης να χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια από την ηλιακή ενέργεια, την αιολική ενέργεια ή άλλες πηγές για να διαιρέσουν το νερό σε οξυγόνο και καύσιμο υδρογόνου μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται ηλεκτρόλυση. Οι αντιστρέψιμες κυψέλες καυσίμου μπορούν να παρέχουν ενέργεια όταν χρειάζεται, αλλά σε περιόδους υψηλής παραγωγής ενέργειας από άλλες τεχνολογίες (όπως όταν οι ισχυροί άνεμοι οδηγούν σε περίσσεια της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας), οι αντιστρέψιμες κυψέλες καυσίμου μπορούν να αποθηκεύσουν την περίσσεια ενέργειας με τη μορφή υδρογόνου. Αυτή η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας θα μπορούσε να αποτελέσει βασικό παράγοντα για διαλείπουσες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Σύγκριση και σύνοψη των διαφόρων στοιχείων καυσίμου

Fuel Cell Type	Common Electrolyte	Operating Temperature	Typical Stack Size	Electrical Efficiency (LHV)	Applications	Advantages	Challenges
Polymer Electrolyte Membrane (PEM)	Perfluorosulfonic acid	<120°C	<1 kW - 100 kW	60% direct H ₂ , ⁱ 40% reformed fuel ⁱⁱ	<ul style="list-style-type: none"> Backup power Portable power Distributed generation Transportation Specialty vehicles 	<ul style="list-style-type: none"> Solid electrolyte reduces corrosion & electrolyte management problems Low temperature Quick start-up and load following 	<ul style="list-style-type: none"> Expensive catalysts Sensitive to fuel impurities
Alkaline (AFC)	Aqueous potassium hydroxide soaked in a porous matrix, or alkaline polymer membrane	<100°C	1 - 100 kW	60% ⁱⁱⁱ	<ul style="list-style-type: none"> Military Space Backup power Transportation 	<ul style="list-style-type: none"> Wider range of stable materials allows lower cost components Low temperature Quick start-up 	<ul style="list-style-type: none"> Sensitive to CO₂ in fuel and air Electrolyte management (aqueous) Electrolyte conductivity (polymer)
Phosphoric Acid (PAFC)	Phosphoric acid soaked in a porous matrix or imbedded in a polymer membrane	150 - 200°C	5 - 400 kW, 100 kW module (liquid PAFC); <10 kW (polymer membrane)	40% ^{iv}	<ul style="list-style-type: none"> Distributed generation 	<ul style="list-style-type: none"> Suitable for CHP Increased tolerance to fuel impurities 	<ul style="list-style-type: none"> Expensive catalysts Long start-up time Sulfur sensitivity
Molten Carbonate (MCFC)	Molten lithium, sodium, and/or potassium carbonates, soaked in a porous matrix	600 - 700°C	300 kW - 3 MW, 300 kW module	50% ^v	<ul style="list-style-type: none"> Electric utility Distributed generation 	<ul style="list-style-type: none"> High efficiency Fuel flexibility Suitable for CHP Hybrid/gas turbine cycle 	<ul style="list-style-type: none"> High temperature corrosion and breakdown of cell components Long start-up time Low power density
Solid Oxide (SOFC)	Yttria stabilized zirconia	500 - 1000°C	1 kW - 2 MW	60% ^{vi}	<ul style="list-style-type: none"> Auxiliary power Electric utility Distributed generation 	<ul style="list-style-type: none"> High efficiency Fuel flexibility Solid electrolyte Suitable for CHP Hybrid/gas turbine cycle 	<ul style="list-style-type: none"> High temperature corrosion and breakdown of cell components Long start-up time Limited number of shutdowns

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του ηλεκτρολύτη και κυψέλες καυσίμου

Το πράσινο υδρογόνο που παράγεται από ηλεκτρόλυση (μια διαδικασία υψηλής ενέργειας) και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι μια επιλογή υψηλού κόστους, η οποία αντιπροσωπεύει μόνο περίπου το 5% της συνολικής παραγωγής H₂. Επί του παρόντος, η συντριπτική πλειοψηφία της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου προέρχεται από πηγές ορυκτών καυσίμων (μετασχηματισμός αερίου μεθανίου) και θα συνεχίσει να το κάνει για αρκετές δεκαετίες. Ωστόσο, καθώς αυξάνεται η παραγωγική ικανότητα για πιο αποδοτικούς και οικονομικά αποδοτικούς ηλεκτρολύτες, αναμένεται ότι το κόστος παραγωγής θα μειωθεί σημαντικά παράλληλα με την ανάπτυξη των τεχνολογιών και της παραγωγικής ικανότητας που ωριμάζουν.

Για την παραγωγή ασφαλούς, ανθεκτικού και απαλλαγμένου από άνθρακα εκπομπές συστήματος ενέργειας, η παραγωγή και η μαζική αποθήκευση υδρογόνου θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην εξισορρόπηση της διαλείπουσας παροχής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με τις απαιτήσεις των τελικών χρηστών (δηλαδή, για ηλεκτρική ενέργεια δικτύου, οικιακή και βιομηχανική θέρμανση και καύσιμα για μεταφορές).

Συνεχίζονται οι συζητήσεις σχετικά με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου υδρογόνου, αλλά παρά τους τρέχοντες περιορισμούς, το υδρογόνο εξακολουθεί να είναι μια φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση στα ορυκτά καύσιμα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρέχει ευέλικτη και υψηλής πυκνότητας ισχύ και πρόωση για ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών εγκαταστάσεων και τρόπων μεταφοράς χρησιμοποιώντας τεχνολογία κυψελών καυσίμου υδρογόνου.

Ποια είναι τα κύρια πλεονεκτήματα

Η τεχνολογία κυψελών καυσίμου υδρογόνου και ηλεκτρολυτών παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα έναντι άλλων πηγών ισχύος, όπως:

1. Ανανεώσιμη και άμεσα διαθέσιμη

Το υδρογόνο είναι το πιο άφθονο στοιχείο του σύμπαντος και παρά τις προκλήσεις που σχετίζονται με την εξόρυξή του από το νερό, είναι μια μοναδικά άφθονη και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, ιδανική για τις μελλοντικές μας ανάγκες ενέργειας μηδενικού άνθρακα.

2. Το υδρογόνο είναι μια καθαρή και ευέλικτη ενέργεια για την υποστήριξη των στρατηγικών ενέργειας μηδενικού άνθρακα

Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου παρέχουν μια εγγενώς καθαρή πηγή ενέργειας, χωρίς δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τη λειτουργία, καθώς τα υποπροϊόντα είναι απλά θερμότητα και νερό. Σε αντίθεση με τα βιοκαύσιμα και την υδροηλεκτρική ενέργεια, το υδρογόνο δεν απαιτεί

μεγάλες εκτάσεις γης για να παραχθεί. Στην πραγματικότητα, η NASA επεξεργάζεται τη χρήση του υδρογόνου ως μια πηγή με το νερό που παράγει ως ένα υποπροϊόν που χρησιμοποιείται ως πόσιμο νερό για αστροναύτες. Αυτό δείχνει ότι οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου είναι μια μη τοξική πηγή καυσίμου και ως εκ τούτου ανώτερη με αυτόν τον τρόπο από τον άνθρακα, το φυσικό αέριο και την πυρηνική ενέργεια που είναι όλα είτε δυνητικά επικίνδυνα ή δύσκολο να ληφθούν. Η παραγωγή, αποθήκευση και χρήση υδρογόνου θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην προώθηση της περαιτέρω ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, εξισορροπώντας τους μεταβλητούς τρόπους παροχής με τις απαιτητικές απαιτήσεις των τελικών χρηστών, αποφεύγοντας την ανάγκη για σημαντικές πρόωρες επενδύσεις στην αναβάθμιση των υποδομών του δικτύου.

3. Ισχυρότερη και ενεργειακά αποδοτικότερο από τα ορυκτά καύσιμα

Η τεχνολογία κυψελών καυσίμου υδρογόνου παρέχει μια πηγή ενέργειας υψηλής πυκνότητας με καλή ενεργειακή απόδοση. Το υδρογόνο έχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο από οποιοδήποτε κοινό καύσιμο κατά βάρος. Το αέριο και υγρό υδρογόνο υψηλής πίεσης έχουν περίπου τρεις φορές τη βαρυμετρική ενεργειακή πυκνότητα (περίπου 120MJ/kg) του ντίζελ και του LNG και παρόμοια ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα με το φυσικό αέριο.

4. Ιδιαίτερα αποδοτικό συγκριτικά με άλλες πηγές ενέργειας

Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου είναι πιο αποδοτικά από πολλές άλλες πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων πολλών λύσεων πράσινης ενέργειας. Αυτή η απόδοση καυσίμου επιτρέπει την παραγωγή περισσότερης ενέργειας ανά λίβρα καυσίμου. Για παράδειγμα, μια μονάδα συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας με καύση παράγει ηλεκτρική ενέργεια με απόδοση 33-35% σε σύγκριση με το 65% για κυψέλες καυσίμου υδρογόνου. Το ίδιο ισχύει και για τα οχήματα, όπου οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου χρησιμοποιούν το 40-60% της ενέργειας του καυσίμου, ενώ παράλληλα προσφέρουν μείωση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 50%.

5. Σχεδόν μηδενικές εκπομπές

Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου δεν παράγουν εκπομπές αερίων θερμοκηπίου όπως οι πηγές ορυκτών καυσίμων, μειώνοντας έτσι τη ρύπανση και βελτιώνοντας ως αποτέλεσμα την ποιότητα του αέρα.

6. Μειώνει Τα Αποτυπώματα Άνθρακα

Με σχεδόν καθόλου εκπομπές, οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου δεν απελευθερώνουν αέρια του θερμοκηπίου, που σημαίνει ότι δεν έχουν αποτύπωμα άνθρακα ενώ είναι σε χρήση.

7. Γρήγοροι χρόνοι φόρτισης

Ο χρόνος φόρτισης για μονάδες ισχύος κυψελών καυσίμου υδρογόνου είναι εξαιρετικά γρήγορος, παρόμοιος με αυτόν για τα συμβατικά οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICE) και σημαντικά ταχύτερος σε σύγκριση με τα ηλεκτρικά οχήματα που λειτουργούν με μπαταρία. Όταν τα ηλεκτρικά οχήματα χρειάζονται από 30 λεπτά έως αρκετές ώρες φόρτισης, οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου μπορούν να επαναφορτιστεί σε λιγότερο από πέντε λεπτά. Αυτός ο χρόνος ταχείας φόρτισης σημαίνει ότι τα υδρογονοκίνητα οχήματα παρέχουν την ίδια ευελιξία με τα συμβατικά αυτοκίνητα.

8. Χωρίς ηχορύπανση

Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου δεν παράγουν ηχορύπανση όπως άλλες πηγές ανανεώσιμης ενέργειας, όπως αιολική ενέργεια. Αυτό σημαίνει επίσης ότι, όπως και τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, τα υδρογονοκίνητα οχήματα είναι πολύ πιο αθόρυβα από εκείνα που χρησιμοποιούν συμβατικούς κινητήρες εσωτερικής καύσης.

9. Καμία οπτική ρύπανση

Ορισμένες πηγές ενέργειας χαμηλών εκπομπών άνθρακα, συμπεριλαμβανομένης της αιολικής ενέργειας και των σταθμών παραγωγής ενέργειας βιοκαυσίμων μπορεί να είναι ένα "αγκάθι", ωστόσο, οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου δεν έχουν τις ίδιες απαιτήσεις χώρου, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει λιγότερη οπτική ρύπανση επίσης.

10. Μεγάλοι χρόνοι χρήσης

Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου προσφέρουν μεγαλύτερη απόδοση όσον αφορά τους χρόνους χρήσης. Ένα όχημα υδρογόνου έχει την ίδια αυτονομία με εκείνα που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα (περίπου 300 μίλια). Αυτό είναι ανώτερο από την τρέχουσα αυτονομία που προσφέρουν σήμερα τα ηλεκτρικά οχήματα (EV), τα οποία κατασκευάζονται όλο και περισσότερο με μονάδες κυψελών καυσίμου ως «επέκταση αυτονομίας». Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου επίσης δεν επηρεάζονται σημαντικά από την εξωτερική θερμοκρασία και δεν επιδεινώνονται σε κρύο καιρό, σε αντίθεση με τα EV. Το πλεονέκτημα αυτό αυξάνεται περαιτέρω όταν συνδυάζεται με τους σύντομους χρόνους φόρτισης.

11. Ιδανικό για χρήση σε απομακρυσμένες περιοχές

Εκεί όπου οι τοπικές συνθήκες το επιτρέπουν, η διαθεσιμότητα υδρογόνου μέσω τοπικής παραγωγής και αποθήκευσης θα μπορούσε να αποτελέσει μια εναλλακτική λύση για την ηλεκτρική ενέργεια και τη θέρμανση που βασίζονται σε ντίζελ σε απομακρυσμένες περιοχές. Αυτό δεν θα μειώσει μόνο την ανάγκη να μεταφέρονται καύσιμα, αλλά θα βελτιώσει επίσης τη ζωή όσων ζουν σε απομακρυσμένες περιοχές προσφέροντας ένα μη ρυπογόνο καύσιμο που προέρχεται από ένα εύκολα διαθέσιμο φυσικό πόρο.

12. Ευελιξία χρήσης

Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου θα είναι σε θέση να παρέχουν ενέργεια για μια σειρά στατικών και κινητών εφαρμογών. Τα υδρογονοκίνητα οχήματα είναι μόνο ένα παράδειγμα, αλλά θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε μικρότερες εφαρμογές, όπως τα οικιακά προϊόντα, καθώς και σε συστήματα θέρμανσης μεγαλύτερης κλίμακας. Όπως και στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας που λειτουργούν με εσωτερική καύση (ICE), οι λειτουργίες της χωρητικότητας αποθήκευσης ενέργειας (δηλαδή, του δοχείου καυσίμου) και του μεγέθους του κινητήρα είναι ανεξάρτητες, αντίθετα από την ισχύ που βασίζεται σε μπαταρίες (δηλαδή, όπου η ισχύς κλιμακώνεται γραμμικά με τη μάζα), προσφέροντας έτσι μεγάλη ευελιξία στον σχεδιασμό.

13. Εκδημοκρατισμός της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας

Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν την εξάρτηση ενός έθνους από τα ορυκτά καύσιμα, πράγμα που θα βοηθήσει στον εκδημοκρατισμό της ενέργειας και των ενεργειακών αποθεμάτων σε όλο τον κόσμο. Αυτή η αυξημένη ανεξαρτησία θα αποδειχθεί ωφέλιμη για πολλές χώρες οι οποίες εξαρτώνται επί του παρόντος από την παροχή ορυκτών καυσίμων. Φυσικά, με τον τρόπο αυτό θα αποφευχθεί και το πρόβλημα της αύξησης των τιμών των ορυκτών καυσίμων, καθώς μειώνονται τα αποθέματα.

[Ποια είναι τα μειονεκτήματα των ηλεκτρολυτών και των κυψελών καυσίμου υδρογόνου;](#)

Για όλα τα πολλά πλεονεκτήματα, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα και προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν:

1. Εκχύλιση υδρογόνου

Παρά το γεγονός ότι είναι το πιο άφθονο στοιχείο στο Σύμπαν, το υδρογόνο δεν υπάρχει από μόνο του, έτσι πρέπει να εξαχθεί από το νερό μέσω ηλεκτρόλυσης ή να διαχωρίζεται από ορυκτά καύσιμα άνθρακα. Και οι δύο αυτές διαδικασίες απαιτούν σημαντική ποσότητα ενέργειας για να επιτευχθούν. Αυτή η ενέργεια μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτή που παράγεται από το ίδιο το υδρογόνο, καθώς και να είναι ακριβή. Επιπλέον, αυτή η εξόρυξη απαιτεί συνήθως τη χρήση ορυκτών καυσίμων, η οποία ελλείπει CCS υπονομεύει τα πράσινα διαπιστευτήρια του υδρογόνου.

2. Απαιτείται επένδυση

Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου χρειάζονται επενδύσεις για να αναπτυχθούν σε σημείο που να καταστούν πραγματικά βιώσιμη πηγή ενέργειας. Αυτό θα απαιτήσει επίσης την πολιτική βούληση να επενδύσει τον χρόνο και τα χρήματα στην ανάπτυξη προκειμένου να βελτιωθεί και να ωριμάσει η τεχνολογία. Με απλά λόγια, η παγκόσμια πρόκληση για την ανάπτυξη εκτεταμένης και βιώσιμης ενέργειας από υδρογόνο είναι ο καλύτερος τρόπος για να οικοδομήσουμε σταδιακά την αλυσίδα «προσφοράς και ζήτησης» με τον πιο αποδοτικό τρόπο.

3. Κόστος των πρώτων υλών

Τα πολύτιμα μέταλλα όπως ο λευκόχρυσος και το ιρίδιο απαιτούνται συνήθως ως καταλύτες στις κυψέλες καυσίμου και σε ορισμένους τύπους ηλεκτρολυτών νερού, πράγμα που σημαίνει ότι το αρχικό κόστος των κυψελών καυσίμου (και των ηλεκτρολυτών) μπορεί να είναι υψηλό. Αυτό το υψηλό κόστος έχει αποθαρρύνει ορισμένους από την επένδυση στην τεχνολογία κυψελών καυσίμου υδρογόνου. Το κόστος αυτό πρέπει να μειωθεί προκειμένου να καταστούν οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου εφικτή πηγή καυσίμου για όλους.

4. Ρυθμιστικά θέματα

Υπάρχουν επίσης εμπόδια όσον αφορά ρυθμιστικά ζητήματα σχετικά με το πλαίσιο που καθορίζει τα εμπορικά μοντέλα εγκατάστασης. Χωρίς σαφή ρυθμιστικά πλαίσια που να επιτρέπουν στα εμπορικά έργα να κατανοήσουν τη βάση κόστους και εσόδων τους, τα εμπορικά έργα μπορούν να αγωνιστούν για να καταλήξουν σε μια απόφαση οικονομικής επένδυσης (FID).

5. Συνολικό κόστος

Το κόστος για μια μονάδα ισχύος από κυψέλες καυσίμου υδρογόνου είναι επί του παρόντος μεγαλύτερο από άλλες πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των ηλιακών συλλεκτών. Αυτό μπορεί να αλλάξει καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, αλλά επί του παρόντος αυτό το κόστος αποτελεί εμπόδιο στην ευρεία χρήση του υδρογόνου, αν και είναι πιο αποτελεσματικό από τη στιγμή που παράγεται. Αυτή η δαπάνη επηρεάζει επίσης το κόστος περαιτέρω στη γραμμή, όπως με την τιμή των οχημάτων που λειτουργούν με υδρογόνο, καθιστώντας την ευρεία υιοθέτηση απίθανη αυτήν τη στιγμή.

6. Αποθήκευση υδρογόνου

Η αποθήκευση και μεταφορά υδρογόνου είναι πιο σύνθετη από αυτή που απαιτείται για τα ορυκτά καύσιμα. Αυτό συνεπάγεται πρόσθετο κόστος προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου ως πηγή ενέργειας.

7. Υποδομές

Επειδή τα ορυκτά καύσιμα χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες, η υποδομή για αυτήν την παροχή ενέργειας υπάρχει ήδη. Η ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου υδρογόνου για τις αυτοκινητιστικές εφαρμογές θα απαιτήσει νέες υποδομές ανεφοδιασμού για να την υποστηρίξει, αν και για τις εφαρμογές μεγάλης εμβέλειας όπως εκείνες για τα βαρέα φορτηγά οχήματα και τα φορτηγά διανομής είναι πιθανό ότι θα χρησιμοποιηθεί ο αρχικός-τερματικός ανεφοδιασμός.

8. Πολύ εύφλεκτο


Το υδρογόνο είναι μια πολύ εύφλεκτη πηγή καυσίμου, γεγονός που προκαλεί κατανοητές ανησυχίες για την ασφάλεια. Αέριο υδρογόνο καίγεται στον αέρα σε συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 4 έως 75%.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ 3 - Πρότυπα και Κανονισμοί που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό, την εγκατάσταση, τη θέση σε λειτουργία και τη συντήρηση συστημάτων τεχνολογίας ηλεκτρολυτών και στοιχείων καυσίμου

Αρχές σχεδιασμού της ασφάλειας

Καθώς το υδρογόνο και οι τεχνολογίες κυψελών καυσίμου αποκτούν μεγαλύτερη εμπορική σημασία, οι ασφαλείς πρακτικές στην παραγωγή, αποθήκευση, διανομή και χρήση του υδρογόνου είναι απαραίτητες για ασφαλείς πρακτικές, θετική αντίληψη και ευρεία αποδοχή και εμπιστοσύνη από τον κόσμο. Μια διεξοδική και ολοκληρωμένη προσέγγιση στο σχεδιασμό ασφάλειας, στην παρακολούθηση και στην αναφορά αναγκών πρέπει να καλύπτει τα τεχνικά και οργανωτικά επίπεδα και πρέπει να περιλαμβάνει όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη μέσω της κατάλληλης επικοινωνίας και των κατάλληλων δράσεων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση εγκατάστασης συστήματος, τα εμπλεκόμενα μέρη θα περιλαμβάνουν προμηθευτές υδρογόνου/κυψελών καυσίμου/εξοπλισμού, χειριστές εγκαταστάσεων, παρόχους συντήρησης/επισκευής, αρχές, δυνητικούς πελάτες, μηχανικούς ασφάλειας και πρώτους ανταποκριτές. Τα ακόλουθα κρίσιμα στοιχεία συμβάλλουν στην ενσωμάτωση της ασφάλειας στα ετήσια και πολυετή προγράμματα, έργα, επιδείξεις συστημάτων και άλλες δραστηριότητες.

Reactions of an Acid CLOSE



Moist blue litmus

Detection of hydrogen [H₂]

Observation	Inference
1. Colourless gas	Cl ₂ and NO ₂ are not present
2. Odourless gas	Can be O ₂ , H ₂ , CO ₂ or water vapours
3. Neutral towards litmus	Can be O ₂ , H ₂ or water vapours
4. The burning wooden splint goes off and gas burns with pale blue flame producing pop sound	It is a combustible gas it burns explosively in air. Gas is hydrogen

* Click on each observation to know more

TutorVista.com™

Έγκαιρη αναγνώριση των προβλημάτων σε θέματα ασφάλειας

Σε πολλές περιπτώσεις, μπορεί να είναι διαθέσιμη η πολύτιμη ειδική εμπειρία σε θέματα ασφάλειας και, ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να αναγνωριστεί και να χρησιμοποιηθεί αυτή η εμπειρογνωμοσύνη άμεσα στο σχεδιασμό της ασφάλειας. Θα πρέπει να ζητείται η γνώμη της εμπειρογνωμώνων στον τομέα της ασφάλειας στο αρχικό στάδιο ενός προγράμματος ή στη διάρκεια ζωής ενός έργου, ώστε να διασφαλίζεται ότι τα χαρακτηριστικά, οι πρακτικές και οι διαδικασίες σχεδιασμού της ασφάλειας εφαρμόζονται με συνέπεια στο πλαίσιο της υλοποίησης του έργου. Το πεδίο εφαρμογής της εργασίας θα μπορούσε να περιλαμβάνει, ενδεικτικά, τα εξής:

- Αναθεώρηση των εγγράφων σχεδιασμού που διασφαλίζουν ότι τα θέματα ασφάλειας αντιμετωπίζονται και συμπεριλαμβάνονται στον προϋπολογισμό για την κάλυψη των σημαντικότερων κενών γνώσης και των τεχνολογικών φραγμών στα αντίστοιχα έργα, στο προσεχές ετήσιο πρόγραμμα εργασίας (ETE) και σε επικαιροποίηση του πολυετούς προγράμματος εργασίας (ΠΠΠ).
- Αναθεώρηση σχεδίων με σκοπό την έγκριση ή/και τη βοήθεια στην έγκριση ενός σχεδίου.
- Επιθεώρηση και διενέργεια τακτικών ελέγχων της εγκατάστασης για την ασφαλή εκτέλεση εργασιών.
- Αναλύοντας τα μαθήματα που έχουν παρθεί και καταγράφοντας ατυχήματα, περιστατικά και αποτυχίες εφαρμόζοντας τις γνώσεις που κατακτήθηκαν από τα ενημερωμένα σχέδια ασφαλείας.

- Ανάπτυξη περαιτέρω θεμάτων διαχείρισης που σχετίζονται με την ασφάλεια.
- Καταγράφοντας κενά γνώσης και τεχνολογικούς φραγμούς που έχουν εντοπιστεί μέσα στο πλαίσιο εργασιών, προκειμένου να αντιμετωπιστούν σε παρόμοια έργα στο μέλλον. Η Ευρωπαϊκή Συνεργασία για την Υδρογόνο και τις Κυψέλες Καυσίμου (EHSP) δεσμεύεται να βοηθήσει σε αυτόν τον τομέα και θα παρέχει την εμπειρογνωμοσύνη της σε περίπτωση που το σύνολο του έργου δεν διαθέτει δική του γνώση ασφάλειας ή επιθυμεί μια ανεξάρτητη άποψη για τα παραπάνω σημεία.

Συμμόρφωση με κανονισμούς, κώδικες και πρότυπα

Ο σχεδιασμός ασφαλείας πρέπει να λαμβάνει υπόψη τους σχετικούς κανονισμούς, κώδικες και πρότυπα (RCS), συμπεριλαμβανομένων των διεθνών, εθνικών και περιφερειακών. Οι κανονισμοί θεσπίζουν ελάχιστες απαιτήσεις ασφαλείας και απαιτούν, τουλάχιστον σιωπηρά, συμμόρφωση με την τελευταία λέξη της τεχνολογίας, η οποία ορίζεται όχι μόνο μέσω προτύπων, αλλά αναφέρεται σε κατευθυντήριες οδηγίες βέλτιστης πρακτικής, σε κώδικες του κλάδου, σε επιστημονικές δημοσιεύσεις κ.λπ. Έτσι, η χρήση του RCS εξακολουθεί να απαιτεί από τους εμπλεκόμενους και άλλους ενδιαφερόμενους φορείς να χρησιμοποιούν νέες γνώσεις που δεν περιλαμβάνονται ακόμη στο RCS, αλλά δημοσιεύονται αλλού. Για παράδειγμα, οι βέλτιστες πρακτικές ασφαλείας και τα διδάγματα που αντλήθηκαν, οι οποίες ενσωματώνουν πληθώρα εμπειριών με τις νέες γνώσεις και γνώσεις που αποκτήθηκαν, αποτελούν σημαντικές πτυχές της συνεχούς προσοχής και της προτεραιότητας που δίνεται στην ασφάλεια.

Η συμμόρφωση με τους ισχύοντες κανονισμούς και τα αναφερόμενα πρότυπα είναι ουσιαστικής σημασίας για τη διασφάλιση της εμπιστοσύνης του κοινού στα έργα υδρογόνου, ιδίως για τα έργα επίδειξης ή ανάπτυξης νέων τεχνολογιών. Όταν δεν μπορεί να επιτευχθεί αυστηρή συμμόρφωση για συγκεκριμένο σχεδιασμό, εγκατάσταση ή/και λειτουργία και προτείνονται εναλλακτικές λύσεις, θα πρέπει να συμφωνηθεί επισήμως μια άρτια τεχνική βάση από όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη, συμπεριλαμβανομένων των ενδιαφερόμενων μερών και των αρχών.

Οι ομάδες έργου πρέπει να συμβουλευτούν τις τοπικές αρχές στην αρχή του έργου. Η έγκαιρη συνεργασία θα διευκολύνει να κατανηθούν καλύτερα οι ανάγκες του τόπου, οι οποίες σε ορισμένες περιπτώσεις θα μπορούσαν να είναι περισσότερο περιοριστικές από τις ευρωπαϊκές ή τις εθνικές ρυθμίσεις. Από την άλλη πλευρά, η έγκαιρη επικοινωνία βοηθά επίσης στην ενημέρωση των αρχών σχετικά με τις νέες τεχνολογίες και τους παρέχει αρκετό χρόνο για την απόκτηση περαιτέρω ανεξάρτητων πληροφοριών.

Πιθανοί κίνδυνοι, μηχανισμοί αποτυχίας και συμβάντα

Οι πιθανοί κίνδυνοι, οι μηχανισμοί αποτυχίας και τα σχετικά συμβάντα που σχετίζονται με οποιαδήποτε εκτέλεση εργασίας ή σύστημα πρέπει πάντοτε να καταγράφονται, να αναλύονται, να αναφέρονται (καταγράφονται σε σχετικές βάσεις δεδομένων γνώσης, π.χ. εγχειρίδια, έγγραφα κ.λπ.) και να μειώνονται ή να μετριαζονται στο πλαίσιο του ορθού σχεδιασμού ασφάλειας και της ολοκληρωμένης μηχανικής ασφάλειας υδρογόνου, η οποία εκτείνεται πέραν των συστάσεων του παρόντος εγγράφου. Θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλα εκείνα που μπορεί να επηρεαστούν δυσμενώς από μια βλάβη, συμπεριλαμβανομένων των συμβάντων με χαμηλές συχνότητες και υψηλές συνέπειες.

Έτσι, ο γενικός στόχος προστασίας είναι να αποκλειστούν ή τουλάχιστον να ελαχιστοποιηθούν οι δυνητικοί κίνδυνοι και οι σχετικοί κίνδυνοι για την πρόληψη επιπτώσεων στα ακόλουθα:

- Πρόσωπα

Οι κίνδυνοι που ενέχουν τραυματισμό ή απώλειας ζωής για τους ανθρώπους πρέπει να εντοπίζονται και να εξαλείφονται ή/ και να ελέγχονται. Μια πλήρης αξιολόγηση δεν αφορά μόνο το προσωπικό που εμπλέκεται άμεσα στην εργασία, αλλά και άλλους που κινδυνεύουν εξ αιτίας των ίδιων αιτιών.

- Ιδιοκτησία.

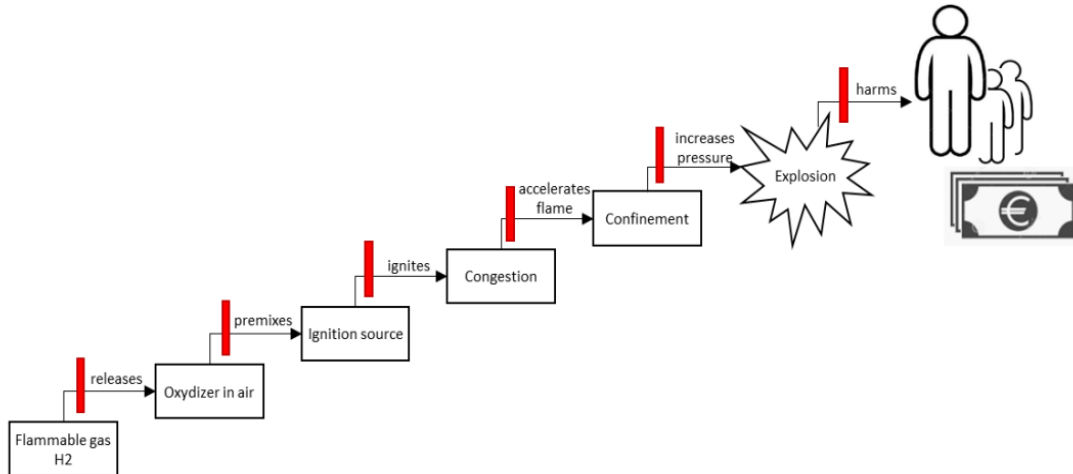
Η φθορά ή η απώλεια εξοπλισμού ή εγκαταστάσεων πρέπει να προλαμβάνεται ή να ελαχιστοποιείται. Η βλάβη στον εξοπλισμό μπορεί να είναι τόσο η αιτία των συμβάντων όσο και το αποτέλεσμα των συμβάντων. Μια βλάβη εξοπλισμού μπορεί να οδηγήσει σε παράπλευρες ζημιές σε κοντινό εξοπλισμό και ιδιοκτησία, η οποία μπορεί στη συνέχεια να προκαλέσει επιπλέον ζημιές στον εξοπλισμό ή ακόμη και να οδηγήσει σε πρόσθετους κινδύνους, π.χ., μέσω του φαινομένου ντόμινο. Ο αποτελεσματικός προγραμματισμός, η παρακολούθηση και η υποβολή αναφορών σχετικά με την ασφάλεια ελέγχει και ελαχιστοποιεί τους σοβαρούς κινδύνους βλάβης του εξοπλισμού και των ακινήτων.

- Περιβάλλον

Πρέπει να προλαμβάνονται οι βλάβες στο περιβάλλον. Οποιαδήποτε μέρος ενός φυσικού ή δομημένου περιβάλλοντος, η οποία μπορεί να υποστεί ζημιά λόγω βλάβης του συστήματος υδρογόνου ή της υποδομής, θα πρέπει να εντοπίζεται και να αναλύεται.

Οι βέλτιστες πρακτικές ασφάλειας προσπαθούν είτε να εξαλείψουν ή τουλάχιστον να περιορίσουν τα ουσιώδη στοιχεία σε αυτήν την αλυσίδα γεγονότων είτε να εισαγάγουν εμπόδια κατά τη

μεταβατική περίοδο. Η δράση σε ένα μόνο μέρος μπορεί να μειώσει τους κινδύνους, να περιορίσει τις συνέπειες ή ακόμα και να αποτρέψει ένα ατύχημα. Ωστόσο, όσο νωρίτερα διακοπεί η πορεία κλιμάκωσης, τόσο πιο αξιόπιστα και οικονομικά αποδοτικά είναι τα μέτρα ελέγχου ή πρόληψης.



Πρέπει να σημειωθεί ότι, ακόμη και αν η κλιμάκωση μπορεί να σταματήσει επιτυχώς σε αρχικό στάδιο, ορισμένοι κίνδυνοι εξακολουθούν να υπάρχουν. Μια μικρή ανεξέλεκτη εκπομπή ή μια φλόγα, για παράδειγμα, δεν θα παράγει εκρηξιακά φορτία, αλλά θα συνεπάγεται σημαντικούς κινδύνους ή θερμικά φορτία. Η έκρηξη ενός σωλήνα ή δοχείου υπό πίεση θα οδηγήσει σε σοβαρά φορτία έκρηξης, ακόμη και χωρίς χημική αντίδραση. Εν ολίγοις, οι παράγωγες αρχές ασφάλειας ορίζουν απλούς στόχους, όντας ευρέως κατανοητοί και ενεργώντας ως προληπτικά εμπόδια ή τουλάχιστον ως μέτρα περιορισμού του κινδύνου για τα διάφορα στοιχεία της αλυσίδας των γεγονότων.



Number	Safety Principle	Explosion Protection Tier
1	Limit hydrogen inventories, especially indoors, to what is strictly necessary.	1 st Tier
2	Avoid or limit formation of flammable mixture, by applying appropriate ventilation systems, for instance.	
3	Carry out ATEX zoning analysis.	
4	Combine hydrogen leak or fire detection and countermeasures.	2 nd Tier
5	Avoid ignition sources using proper materials or installations in the different ATEX zones, remove electrical systems or provide electrical grounding, etc.	
6	Avoid congestion, reduce turbulence promoting flow obstacles (volumetric blockage ratio) in respective ATEX zones.	3 rd Tier
7	Avoid confinement. Place storage in the free, or use large openings which are also supporting natural ventilation.	
8	Provide efficient passive barriers in case of active barriers deactivation by whatever reason.	
9	Train and educate staff in hydrogen safety.	Organisational Safety Principles
10	Report near misses, incidents and accidents to suitable databases and include lessons learned in your safety plan	

Αυτές οι αρχές ασφάλειας πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στο σχέδιο ασφάλειας, σε κάθε διαδικασία εντοπισμού τρωτών σημείων ή κινδύνων ασφάλειας και σε κάθε διαδικασία εκτίμησης επικινδυνότητας. Οι εν λόγω αρχές πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από κάθε εμπειρογνώμονα υπεύθυνο για την επιθεώρηση της ασφάλειας. Ωστόσο, δεν αντικαθιστούν ούτε τις νομικές απαιτήσεις, ούτε την ολοκληρωμένη μηχανική ασφάλειας υδρογόνου, ούτε τη λεπτομερή αξιολόγηση κινδύνου που τελικά απαιτείται από το RCS. Επιτρέπουν στα ενδιαφερόμενα μέρη να λαμβάνουν υπόψη την ασφάλεια σε διάφορα στάδια του σχεδιασμού, της εφαρμογής και της λειτουργίας μιας διαδικασίας που χρησιμοποιεί υδρογόνο με πολύ βασικό τρόπο.

Σχέδιο ασφάλειας

Ένα σχέδιο ασφάλειας εξετάζει τις δυνητικές απειλές και επιπτώσεις στους ανθρώπους, στην ιδιοκτησία και στο φυσικό και δομημένο περιβάλλον, καθώς και τα αντίστοιχα μέτρα πρόληψης, ελέγχου και προστασίας. Ως αναπόσπαστο μέρος κάθε έργου, εγκατάστασης υδρογόνου και

συστήματος κυψελών καυσίμου, ένα σχέδιο ασφάλειας πρέπει να αντικατοπτρίζει την ορθή και προσεκτική εξέταση για τον εντοπισμό και την ανάλυση των τρωτών σημείων ασφάλειας, την εξάλειψη ή τον έλεγχο των κινδύνων, καθώς και μέτρα ελέγχου για τη διατήρηση της επικινδυνότητας σε αποδεκτό επίπεδο. Η κατάλληλη επικοινωνία είναι εξίσου σημαντική και θα πρέπει να περιγράφεται στο σχέδιο ασφάλειας, συμπεριλαμβανομένου του τρόπου παρακολούθησης του σχεδίου και αναφοράς των αποτελεσμάτων των δραστηριοτήτων, όπως απαιτείται. Τα σχέδια ασφαλείας θα πρέπει να ορίζουν τον τύπο της εργασίας, τους παράγοντες του ανθρώπινου σφάλματος, τη φύση της ζωής του εξοπλισμού, και να εξετάσει πιθανές μη αναστρέψιμες αλλαγές που συμβαίνουν κατά την ανάπτυξη και την εκτέλεση του έργου. Το σχέδιο ασφάλειας πρέπει να καταρτίζεται με διαβαθμισμένη προσέγγιση με βάση το επίπεδο των κινδύνων, τους συναφείς κινδύνους και την πολυπλοκότητα.

Το σχέδιο θα πρέπει να καλύπτει όλες τις εργασίες που διεξάγονται, συμπεριλαμβανομένων των πειραματικών/επιχειρησιακών δραστηριοτήτων, με έμφαση στις πτυχές που αφορούν τις γνώσεις για την ασφάλεια του υδρογόνου, τα επικίνδυνα υλικά, τον εξοπλισμό υπό πίεση, τις ιδιαιτερότητες του συστήματος υδρογόνου κ.λπ. Ενδέχεται να υπάρξουν περιπτώσεις όπου ένα προκαταρκτικό σχέδιο ασφάλειας αναπτύσσεται κατά τη φάση εφαρμογής του έργου, όπως ζητείται από μια πρόσκληση. Στις περιπτώσεις αυτές, θα πρέπει να καλύπτονται γενικότερα στοιχεία όπως οι κίνδυνοι και οι συναφείς τεχνικές ανάλυσης κινδύνου, πρόληψης και μετριάσμού, με έμφαση στους κινδύνους και στις δραστηριότητες ανάλυσης κινδύνου που θα ολοκληρωθούν κατά την αρχική φάση σχεδιασμού μετά την ανάθεση του έργου. Τα στοιχεία ενός καλού σχεδίου ασφάλειας συνοψίζονται ως εξής, αν και ο κατάλογος αυτός δεν πρέπει να θεωρείται εξαντλητικός και υποχρεωτικός για όλα τα έργα.

Υποχρεωτικός κατάλογος θεμάτων ασφάλειας για όλα τα έργα:

- Περιγραφή της εργασίας
- Σχεδιασμός ασφάλειας έργου
 - Πολιτικές και διαθέσιμη εμπειρία
 - Ανασκοπήσεις ασφάλειας
 - Σχέδιο αντιμετώπισης
 - Διαδικασίες
 - Επιχειρησιακά στάδια
 - Χειρισμός και μεταφορά δειγμάτων
 - Εξοπλισμός και μηχανική ακεραιότητα
 - Τεκμηρίωση ασφάλειας του έργου

- Διοίκηση λειτουργιών
 - Εκπαίδευση προσωπικού
 - Διαδικασίες επανεξέτασης της ασφάλειας
 - Συμβάντα ασφάλειας και διδάγματα που αντλήθηκαν
 - Αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης
 - Αυτοέλεγχοι
 - Διαχείριση των διαδικασιών αλλαγής
- Πρόσθετη τεκμηρίωση και αναφορά
 - Διάγραμμα ροής που απεικονίζει τον εξοπλισμό (π.χ., PID), συμπεριλαμβανομένης της λειτουργικής περιγραφής κάθε στοιχείου
 - Προκαταρκτική διάταξη
 - Εκτενής συζήτηση του RCS και σε περίπτωση λεπτομερούς ανάλυσης επιδόσεων για να αντιμετωπιστεί το ζήτημα, αν οι κανονισμοί ή τα πρότυπα επιτρέπουν εναλλακτικές λύσεις για απλοποιημένες συσχετίσεις ή απαιτήσεις, όπως κανόνες απόστασης σε μορφή πίνακα κ.λπ. Άλλες παρατηρήσεις ή ανησυχίες
 - Λεπτομέρειες σχεδιασμού ασφάλειας, παρακολούθησης και επικαιροποίησής του

Κατάλογοι ελέγχου εγκατάστασης και ενεργοποίησης

Η ενεργοποίηση έργου είναι η διαδικασία εξασφάλισης ότι όλα τα συστήματα και τα εξαρτήματα ενός κτηρίου ή μιας βιομηχανικής μονάδας σχεδιάζονται, εγκαθίστανται, δοκιμάζονται, λειτουργούν και διατηρούνται σύμφωνα με τις λειτουργικές απαιτήσεις του ιδιοκτήτη ή του τελικού πελάτη. Η διαδικασία ενεργοποίησης μπορεί να εφαρμοστεί όχι μόνο σε νέα έργα, αλλά και σε υφιστάμενες μονάδες και συστήματα που υπόκεινται σε διεύρυνση, ανακαίνιση ή αναβάθμιση.

Στην πράξη, η διαδικασία ενεργοποίησης αποτελεί την ολοκληρωμένη εφαρμογή ενός συνόλου μηχανολογικών τεχνικών και διαδικασιών για να ελεγχθούν, να επιθεωρηθούν και να δοκιμαστούν κάθε λειτουργικό στοιχείο του έργου: από μεμονωμένες λειτουργίες (όπως μέσα μέτρησης και εξοπλισμός) μέχρι πολύπλοκες συνθέσεις (όπως μονάδες, υποσυστήματα και συστήματα).

Σχέδια συντήρησης και συντήρησης

	Approach	Examples of Actions
Plan the Work	Recognize hazards and define mitigation measures	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Identify risks such as flammability, toxicity, asphyxiates, reactive materials, etc. <input type="checkbox"/> Identify potential hazards from adjacent facilities and nearby activities <input type="checkbox"/> Address common failures of components such as fitting leaks, valve failure positions (open, closed, or last), valve leakage (through seat or external), instrumentation drifts or failures, control hardware and software failures, and power outages <input type="checkbox"/> Consider uncommon failures such as a check valve that does not check, relief valve stuck open, block valve stuck open or closed, and piping or equipment rupture <input type="checkbox"/> Consider excess flow valves/chokes to limit the size of hydrogen leaks <input type="checkbox"/> Define countermeasures to protect people and property <input type="checkbox"/> Follow applicable codes and standards
	Isolate hazards	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Store hydrogen outdoors as the preferred approach; store only small quantities indoors in well ventilated areas <input type="checkbox"/> Provide horizontal separation to prevent spreading hazards to/from other systems (especially safety systems that may be disabled), structures, and combustible materials <input type="checkbox"/> Avoid hazards caused by overhead trees, piping, power and control wiring, etc.
	Provide adequate access and lighting	Provide adequate access for activities including: <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Operation, including deliveries <input type="checkbox"/> Maintenance <input type="checkbox"/> Emergency exit and response
	Approach	Examples of Actions
Keep the Hydrogen in the System	Design systems to withstand worst-case conditions	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Determine maximum allowable pressure considering abnormal operation, mistakes made by operators, etc., then design the system to contain or relieve the pressure <input type="checkbox"/> Contain: Design or select equipment, piping, and instrumentation that are capable of withstanding the maximum credible pressure using materials compatible with hydrogen service <input type="checkbox"/> Relieve: Provide relief devices that safely vent the hydrogen to prevent damaging overpressure conditions <input type="checkbox"/> Perform system pressure tests to verify integrity after initial construction, after maintenance, after bottle replacements, and before deliveries through transfer connections
	Protect systems	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Design systems to safely contain maximum allowable pressure or provide pressure relief devices to protect against burst <input type="checkbox"/> Mount vessels and bottled gas cylinders securely <input type="checkbox"/> Consider that systems must operate and be maintained in severe weather and may experience earthquakes and flood water exposures <input type="checkbox"/> De-mobilize vehicles and carts before delivery transfers or operation <input type="checkbox"/> Protect against vehicle or accidental impact and vandalism <input type="checkbox"/> Post warning signs
	Size the storage appropriately for the service	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Avoid excess number of deliveries/change-outs if too small <input type="checkbox"/> Avoid unnecessary risk of a large release from an oversized system

	Approach	Examples of Actions
	Provide hydrogen shutoff(s) for isolation	<input type="checkbox"/> Locate automatic fail-closed shutoff valves at critical points in the system (such as storage exit, entry to buildings, inlets to test cells, etc.) to put the system in a safe state when a failure occurs <input type="checkbox"/> Consider redundant or backup controls <input type="checkbox"/> Install manual valves for maintenance and emergencies
	Prevent cross-contamination	<input type="checkbox"/> Prevent back-flow to other gas systems with check valves, pressure differential, etc.
	Approach	Examples of Actions
Manage Discharges	Safely discharge all process exhausts, relief valves, purges, and vents	<input type="checkbox"/> Discharge hydrogen outdoors through a vent stack or into a laboratory ventilation system that assures proper dilution <input type="checkbox"/> Direct discharges away from personnel and other hazards <input type="checkbox"/> Secure/restrain discharge piping
	Prevent build-up of combustible mixtures in enclosed spaces	<input type="checkbox"/> Do not locate equipment or piping joints/fittings in poorly ventilated rooms or enclosed spaces. Use only solid or welded tubing or piping in such areas <input type="checkbox"/> Provide sufficient ventilation and/or space for dilution <input type="checkbox"/> Avoid build-up of hydrogen under ceilings/roofs and other partly enclosed spaces
	Remove potential ignition sources from flammable spaces/zones	<input type="checkbox"/> Proper bonding and grounding of equipment <input type="checkbox"/> No open flames <input type="checkbox"/> No arcing/sparking devices, e.g., properly classified electrical equipment
	Approach	Examples of Actions
Detect and Mitigate	Leak detection and mitigation	<input type="checkbox"/> Provide detection and automatic shutdown/isolation if flammable mixtures are present, particularly in enclosed spaces <input type="checkbox"/> Consider methods for manual or automatic in-process leak detection such as the ability for isolated systems to hold pressure <input type="checkbox"/> Periodically check for leaks in the operating system
	Loss of forced ventilation indoors	<input type="checkbox"/> Automatically shut off the supply of hydrogen when ventilation is not working
	Monitor the process and protect against faults	<input type="checkbox"/> Provide alarms for actions required by people, e.g., evacuation <input type="checkbox"/> Provide the capability to automatically detect and mitigate safety-critical situations <input type="checkbox"/> Consider redundancy to detect and mitigate sensor or process control faults <input type="checkbox"/> Provide the ability for the system to advance to a "safe state" if power failures or controller faults are experienced
	Fire detection and mitigation	<input type="checkbox"/> Appropriate fire protection (extinguishers, sprinklers, etc.) <input type="checkbox"/> Listed hydrogen specific flame detection <input type="checkbox"/> Automatic shutdown and isolation if fire is detected
Manage Operations	Establish and document procedures	<input type="checkbox"/> Responsibilities for each of the parties involved <input type="checkbox"/> Operating procedures <input type="checkbox"/> Emergency procedures <input type="checkbox"/> Preventive maintenance schedules for equipment services, sensor calibrations, leak checks, etc. <input type="checkbox"/> Safe work practices for maintenance such as lock-out/tag-out, hot work permits, and hydrogen line purging <input type="checkbox"/> Review and approval of design and procedural changes
	Approach	Examples of Actions
	Train personnel	<input type="checkbox"/> MSDS awareness for hydrogen and other hazardous materials <input type="checkbox"/> Applicable procedures and work instructions for bottle change-out, deliveries, operation, maintenance, emergencies, and safety work practices
	Monitor	<input type="checkbox"/> Track incidents and near-misses, and establish corrective actions <input type="checkbox"/> Monitor compliance to all procedures and work instructions