

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχεδιασμός Συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου
με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου από κυψέλες καυσίμου



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

“Σχεδιασμός Συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας
πλοίου με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου
από κυψέλες καυσίμου”

Διπλωματική Εργασία του προπτυχιακού φοιτητή
Θεοδοσίου Λεάνδρου με
Α.Μ. 08116902

Επιβλέποντες Καθηγητές
Προυσαλίδης Ιωάννης

ΑΘΗΝΑ
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2021

Contents

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
2	ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΕΝΤΟΣ ΜΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	5
2.1	Αρχή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κυψέλες καυσίμου.....	5
3	ΕΙΔΗ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΟΥ ΚΑΤΑΛΥΤΗ.....	8
3.1	Γενικά.....	8
3.2	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC).....	8
3.3	Direct Methanol Fuel Cells (DMFC).....	10
3.4	Alkaline Fuel Cells (AFC).....	11
3.5	Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC).....	12
3.6	Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC).....	13
3.7	Solid Oxide Fuel Cells (SOFC).....	15
3.8	Reversible Fuel Cells.....	16
3.9	Βοηθητικός εξοπλισμός - Balance of Plant (BoP).....	17
4	ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΟ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΙΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	19
4.1	Μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου.....	19
4.1.1	Αποθήκευση με υγροποίηση.....	19
4.1.2	Αποθήκευση σε προηγμένα υλικά.....	20
4.1.3	Αποθήκευση με συμπίεση.....	21
5	ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΕ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	23
5.1	Εφαρμοσμένες Τεχνολογίες Κυψελών Καυσίμου στην Ναυτιλία.....	23
5.2	Ναυτιλιακά Project εγκατάστασης κυψελών καυσίμου.....	25
5.2.1	MF Hydra Passenger Ferry.....	25
5.2.2	The WEVA Project.....	26
5.2.3	Zero Emission Fast Ferry.....	27
5.2.4	Πρόγραμμα ‘NEMO H2’.....	28
5.2.5	Project Flagships.....	29
6	Μελέτη εγκατάστασης συστήματος κυψελών καυσίμου σε ε/ο πλοίο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	30
6.1	Γενικά χαρακτηριστικά.....	30
6.2	Υπολογισμοί Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	35
6.3	Επιλογή Συστήματος Κυψέλης Καυσίμου.....	40
6.4	Επιλογή Συστήματος Αποθήκευσης Υδρογόνου.....	45
6.5	Συμπεράσματα.....	47
7	Βιβλιογραφία.....	48

Πίνακας Εικόνων και Διαγραμμάτων

Εικόνα 1: Διάγραμμα Αρχής Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου.....	6
Εικόνα 2: Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC).....	9
Εικόνα 3: Direct Methanol Fuel Cells (DMFC)	10
Εικόνα 4: Alkaline Fuel Cells (AFC)	12
Εικόνα 5: Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC)	13
Εικόνα 6: Molten Carbonate Fuel Cell	14
Εικόνα 7: Solid Oxide Fuel Cell	16
Εικόνα 8: Reversible Fuel Cells.....	17
Εικόνα 9: Liquid Hydrogen Tank	20
Εικόνα 10: Διαδικασία αποθήκευσης υδρογόνου σε μεταλλικό υδρίτη	21
Εικόνα 11: Compressed Hydrogen Storage System	22
Εικόνα 12 : Συγκεντρωτικός Πίνακας Τύπων Κυψελών Καυσίμου και Ιδιοτήτων τους	24
Εικόνα 13 : MF Hydra RoRo ferry	25
Εικόνα 14 : Overview of Hydrogen Electric Cargo Ship Antonie	26
Εικόνα 15 : ZEFF Project	27
Εικόνα 16 : NEMO H2 Passenger ferry	28
Εικόνα 17 : Συγκεντρωτικός Πίνακας Γενικών Χαρακτηριστικών Fuel Cell Ferry	31
Εικόνα 18 : Γενική Διάταξη Fuel Cell Ferry	32
Εικόνα 19 : Χώρος Δεξαμενής Συμπιεσμένου Υδρογόνου.....	33
Εικόνα 20 : Shore Connection	33
Εικόνα 21 : Πλήρωμα Fuel Cell Ferry.....	34
Εικόνα 22 : Πίνακας Κατανάλωσης 1	36
Εικόνα 23 : Πίνακας Κατανάλωσης 2	36
Εικόνα 24 : Πίνακας Κατανάλωσης 3	37
Εικόνα 25 : Πίνακας Κατανάλωσης 4	38
Εικόνα 26 : Συνολικός Πίνακας Κατανάλωσης.....	39
Εικόνα 27 : PowerCellution System.....	41
Εικόνα 28 : PowerCellution System.....	42
Εικόνα 29 : Ballard System	43
Εικόνα 30 : One Line Diagram	44
Εικόνα 31 : NPROXX System.....	45
Εικόνα 32 : Hydrogen Density - Pressure Diagram	46

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη εγκατάστασης κυψέλης καυσίμου ως μέσω παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε επιβατικό/οχηματαγωγό πλοίο. Αρχικά, θα γίνει μία περιγραφή των ηλεκτροχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα εντός των κυψελών καυσίμου έτσι ώστε να παραχθεί ηλεκτρικό φορτίο. Εν τη συνέχεια, θα αναφέρουμε τα κυριότερα είδη κυψελών καυσίμου που υπάρχουν στην αγορά, καθώς και των εφοδιαστικών τους καυσίμων. Έπειτα, θα γίνει συνοπτική παρουσίαση των διαθέσιμων τρόπων αποθήκευσης των καυσίμων αυτών εν πλω. Κατόπιν, θα γίνει αναφορά στα ναυτιλιακά project ανά τον κόσμο, όπου χρησιμοποιούνται κυψέλες καυσίμου και τέλος θα παρουσιασθεί μία μελέτη για εγκατάσταση κυψελών καυσίμου ως μέσω παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε επιβατικό/οχηματαγωγό πλοίο, καθορισμένων διαστάσεων, όπου χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα τόσο του σκάφους αλλά και των χαρακτηριστικών των συστημάτων από συγκεκριμένους κατασκευαστές.

2 ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΕΝΤΟΣ ΜΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

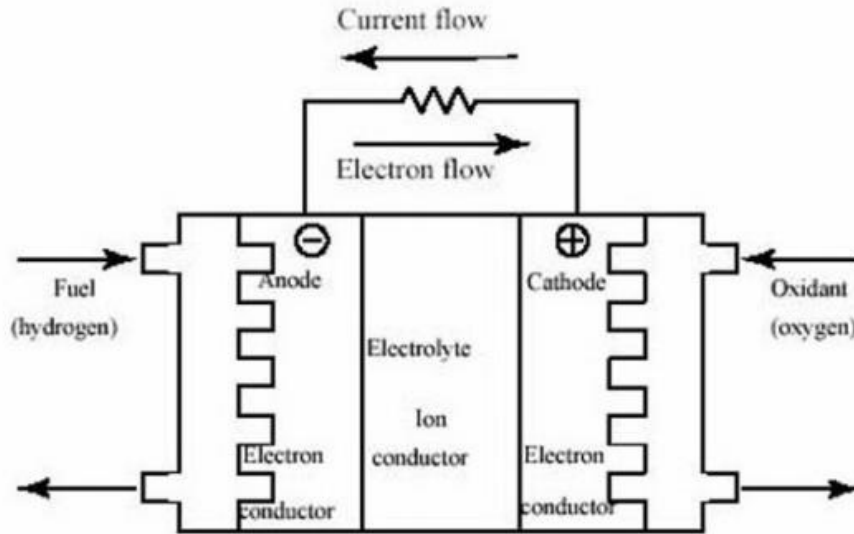
2.1 Αρχή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κυψέλες καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου αποτελεί ένα σύστημα παραγωγής ενέργειας μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Παράγει ηλεκτρικό ρεύμα μέσω ηλεκτροχημικής αντίδρασης οξείδωσης του υδρογόνου, και μέσω μίας αντίδρασης μείωσης του οξυγόνου στην ατμόσφαιρα, κάθε μια από τις οποίες προκύπτει σε διαφορετικά ηλεκτρόδια συνδεδεμένα σε εξωτερικό κύκλωμα. Αυτή η αρχή λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου συχνά περιγράφεται ως η αντίστροφη της ηλεκτρόλυσης του νερού.

Αυτή η αρχή λειτουργίας δεν διαφέρει πολύ με την αρχή λειτουργίας των κοινών μπαταριών, με την διαφορά όμως ότι στις μπαταρίες τα αντιδρώντα στοιχεία είναι αποθηκευμένα εντός των μπαταριών, και η παραγωγή ενέργειας διακόπτεται όταν τα αντιδρώντα αυτά καταναλωθούν. Σε αντίθεση, στις κυψέλες καυσίμου τα αντιδρώντα διοχετεύονται από εξωτερικά κυκλώματα, ενώ τα παράγωγα αυτών απομακρύνονται αντίστοιχα από τις κυψέλες από ξεχωριστά κυκλώματα.

Μία κυψέλη καυσίμου αποτελείται από δύο τύπους ηλεκτροδίων που αντιδρούν με ηλεκτρόδια, την άνοδο και την κάθοδο, και ένα ηλεκτρολύτη ιόντων.

Σχεδιασμός Συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου
με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου από κυψέλες καυσίμου



Εικόνα 1: Διάγραμμα Αρχής Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου

Στην διεπιφάνεια μεταξύ ηλεκτροδίων και ηλεκτρολύτη, ηλεκτροχημικές αντιδράσεις δημιουργούν φορείς ρεύματος, όπως ηλεκτρόνια και νετρόνια. Στην άνοδο, προκύπτει οξείδωση που παράγει ηλεκτρόνια, ενώ στην κάθοδο, συμβαίνει μια αντίδραση δέσμευσης ηλεκτρονίων. Η Εικόνα 1 δείχνει παραστατικά την αρχή λειτουργίας μίας κυψέλης καυσίμου. Γενικά, σε κατάσταση ισοζυγίου όπου δεν υπάρχει ροή φορτίου στην διεπιφάνεια μεταξύ ηλεκτρολύτη και ηλεκτροδίου, η οξειδωτική αντίδραση (oxidation-reduction - redox) που προκύπτει στα ηλεκτρόδια είναι η εξής :



όπου e είναι ηλεκτρόνιο, και A και B αφορούν χημικές ουσίες που σχετίζονται με την αντίδραση, με a b και n να αποτελούν σταθερές.

Επίσης, μέσω της εξίσωσης του Nerst δίνεται το ισοζύγιο του δυναμικού του ηλεκτροδίου (equilibrium electrode potential) E :

$$E = E^\circ - (RT/nF)\ln(a_B b / a_A a)$$

Σχεδιασμός Συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου
με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου από κυψέλες καυσίμου

Όπου R είναι η σταθερά αερίων, T η απόλυτη θερμοκρασία, F η σταθερά Faraday, a_B η δραστικότητα του A , a_B η δραστικότητα του B , και E° η τιμή του δυναμικού του ηλεκτροδίου όταν η δραστικότητα ισούται με την μονάδα. Το E° αντιπροσωπεύει ένα δυναμικό εγγενή με την οξειδωτική αντίδραση, μέτρο που καθορίζει πόσο εύκολα ή δύσκολα ιονίζεται ένα μέταλλο, και τής οξείδωσης μίας αντίδρασης.

3 ΕΙΔΗ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΟΥ ΚΑΤΑΛΥΤΗ

3.1 Γενικά

Οι Κυψέλες Καυσίμου ταξινομούνται κυρίως με βάση το είδος του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν. Αυτή η ταξινόμηση προσδιορίζει το είδος των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην Κυψέλη Καυσίμου, το είδος των απαιτούμενων καταλυτών, το εύρος θερμοκρασίας στο οποίο λειτουργεί η Κυψέλη Καυσίμου, το απαιτούμενο καύσιμο καθώς και άλλους παράγοντες.

Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά, με τη σειρά τους, επηρεάζουν τις εφαρμογές για τις οποίες οι Κυψέλες Καυσίμου είναι οι πλέον κατάλληλες. Υπάρχουν πολλοί τύποι Κυψελών Καυσίμου που βρίσκονται υπό τεχνολογική εξέλιξη, καθένας με διαφορετικά πλεονεκτήματα, περιορισμούς και πιθανές εφαρμογές.

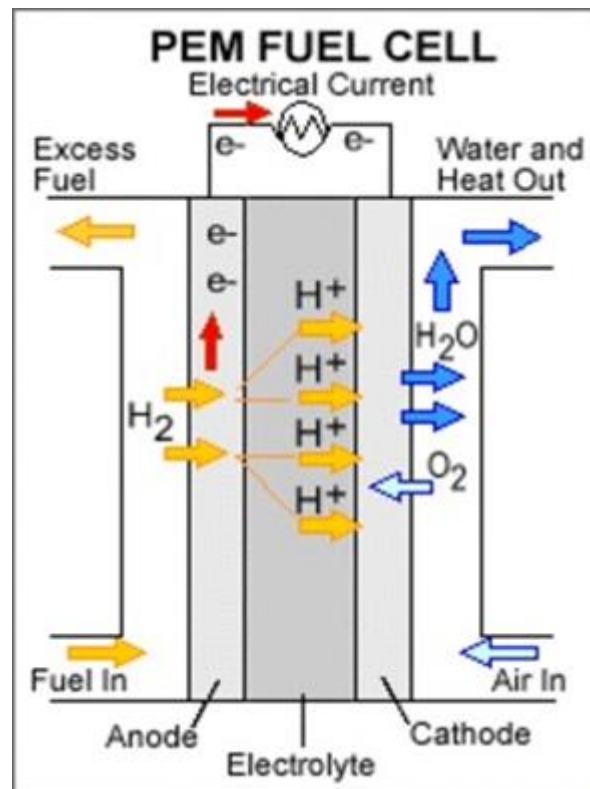
3.2 Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)

Οι Κυψέλες Καυσίμου Μεμβράνης Πολυμερούς Ηλεκτρολύτη (PEM), που ονομάζονται, επίσης, Κυψέλες Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων, παρέχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος και προσφέρουν τα πλεονεκτήματα του χαμηλού βάρους και όγκου σε σύγκριση με άλλου τύπου Κυψελών Καυσίμου. Τα PEMFC, όπως ήδη έχει αναφερθεί, χρησιμοποιούν ένα στερεό πολυμερές ως ηλεκτρολύτη και ηλεκτρόδια πορώδους άνθρακα που περιέχουν καταλύτη λευκόχρυσου. Χρειάζονται μόνο υδρογόνο, οξυγόνο από τον αέρα και νερό για λειτουργία. Συνήθως τροφοδοτούνται με καθαρό υδρογόνο που μεταφέρεται από δεξαμενές αποθήκευσης.

Οι Κυψέλες Καυσίμου PEM λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, περίπου στους 80 °C. Η λειτουργία σε χαμηλή θερμοκρασία τους επιτρέπει να ξεκινούν γρήγορα (λιγότερος χρόνος προθέρμανσης) και οδηγούν σε λιγότερη φθορά στα εξαρτήματα του συστήματος, με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη αντοχή. Ωστόσο, απαιτείται να χρησιμοποιηθεί καταλύτης ευγενούς μετάλλου (συνήθως λευκόχρυσος) για να διαχωρίσει τα ηλεκτρόνια

και πρωτόνια του υδρογόνου, αυξάνοντας το κόστος του συστήματος. Ο καταλύτης λευκόχρυσου είναι επίσης εξαιρετικά ευαίσθητος σε νόθευση με μονοξείδιο του άνθρακα, καθιστώντας απαραίτητη τη χρήση πρόσθετου αντιδραστήρα για τη μείωση της πρόσμιξης του μονοξειδίου του άνθρακα στο καύσιμο αέριο, εάν το υδρογόνο προέρχεται από καύσιμο υδρογονάνθρακα. Αυτός ο αντιδραστήρας προσθέτει επίσης κόστος.

Τα PEMFC χρησιμοποιούνται κυρίως στις εφαρμογές κίνησης οχημάτων (δηλ. στις μεταφορές) και σε άλλες διατάξεις ηλεκτρονικών συσκευών και ηλεκτρικών εγκαταστάσεων (π.χ. εργοστασίων κ.λπ.). Λόγω του χρόνου γρήγορης εκκίνησης και της ευνοϊκής αναλογίας ισχύος προς βάρος, οι Κυψέλες Καυσίμου PEM είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για χρήση σε επιβατικά οχήματα, όπως αυτοκίνητα και λεωφορεία.

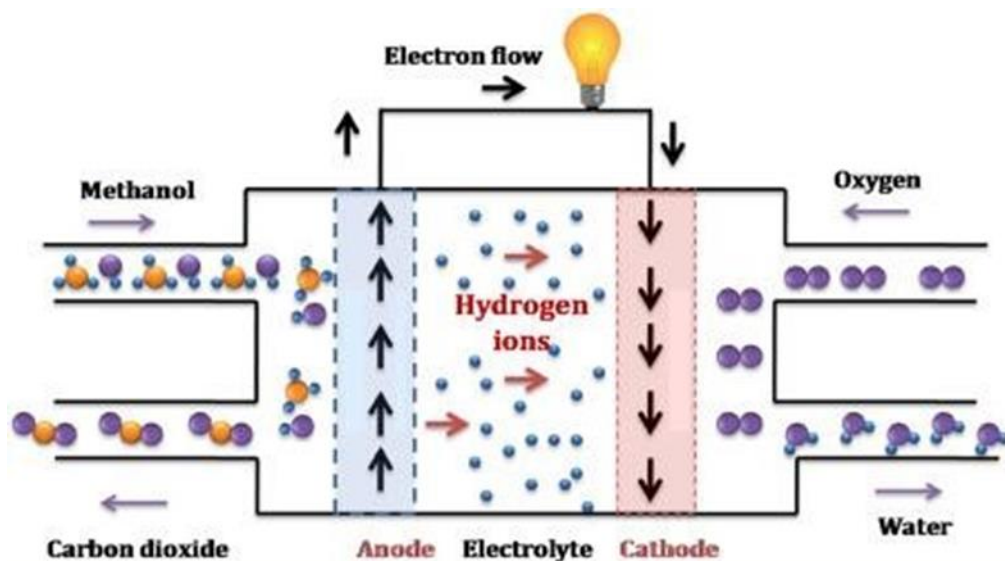


Εικόνα 2: Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)

3.3 Direct Methanol Fuel Cells (DMFC)

Οι Κυψέλες Καυσίμου τύπου DMFC τροφοδοτούνται από καθαρή μεθανόλη, η οποία συνήθως αναμιγνύεται με νερό και τροφοδοτείται απευθείας στην άνοδο των Κυψελών Καυσίμου.

Τα DMFC δεν έχουν πολλά από τα προβλήματα αποθήκευσης καυσίμων που είναι συνήθη για ορισμένα συστήματα Κυψελών Καυσίμου, επειδή η μεθανόλη έχει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από το υδρογόνο (αν και λιγότερη από τη βενζίνη ή το ντίζελ). Είναι, επίσης, ευκολότερη στη μεταφορά και τον εφοδιασμό, δεδομένου ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τρέχουσα υποδομή, επειδή είναι υγρό, όπως π.χ. η βενζίνη. Τα DMFC χρησιμοποιούνται συχνά για την παροχή ενέργειας σε φορητές εφαρμογές Κυψελών Καυσίμου.



7. Direct Methanol Fuel Cells (DMFC) ^[22]

Εικόνα 3: Direct Methanol Fuel Cells (DMFC)

3.4 Alkaline Fuel Cells (AFC)

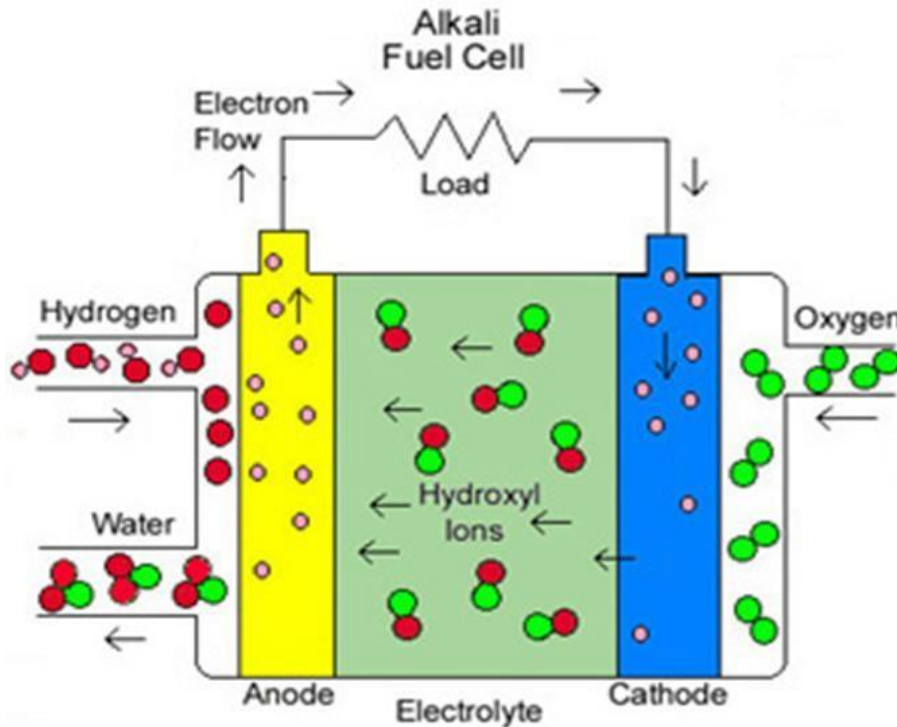
Οι Αλκαλικές Κυψέλες Καυσίμων (AFC) ήταν μια από τις πρώτες τεχνολογίες Κυψελών Καυσίμου που αναπτύχθηκαν και ο πρώτος τύπος που χρησιμοποιήθηκε ευρέως στο διαστημικό πρόγραμμα των Η.Π.Α. για την παραγωγή διαστημικού οχήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι Κυψέλες αυτές χρησιμοποιούν διάλυμα υδροξειδίου του καλίου σε νερό, ως ηλεκτρολύτη, και μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια ποικιλία μη πολύτιμων μετάλλων ως καταλύτη στην άνοδο και στην κάθοδο. Τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί νέα AFC που χρησιμοποιούν πολυμερή μεμβράνη ως ηλεκτρολύτη. Οι Κυψέλες αυτές είναι στενά συνδεδεμένα με τα συμβατικά PEMFC, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιούν αλκαλική μεμβράνη αντί για όξινη μεμβράνη. Η υψηλή απόδοση των AFC οφείλεται στον ρυθμό με τον οποίο πραγματοποιούνται ηλεκτροχημικές αντιδράσεις στο κύτταρο. Έχουν επίσης επιδείξει αποτελεσματικότητα άνω του 60% σε διαστημικές εφαρμογές.

Αξίζει, ωστόσο, να σημειωθεί ότι αυτός ο τύπος Κυψελών Καυσίμου είναι ευαίσθητος σε «νόθευση» από διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Στην πράξη, ακόμη και μια μικρή ποσότητα CO₂ στον αέρα μπορεί να επηρεάσει δραματικά την απόδοση και την αντοχή της Κυψέλης, λόγω του σχηματισμού ανθρακικών αλάτων.

Τα AMFC χρησιμοποιούνται περισσότερο για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας ισχύος (της τάξης Watt και kWatt).

Σχεδιασμός Συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου
με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου από κυψέλες καυσίμου



Εικόνα 4: Alkaline Fuel Cells (AFC)

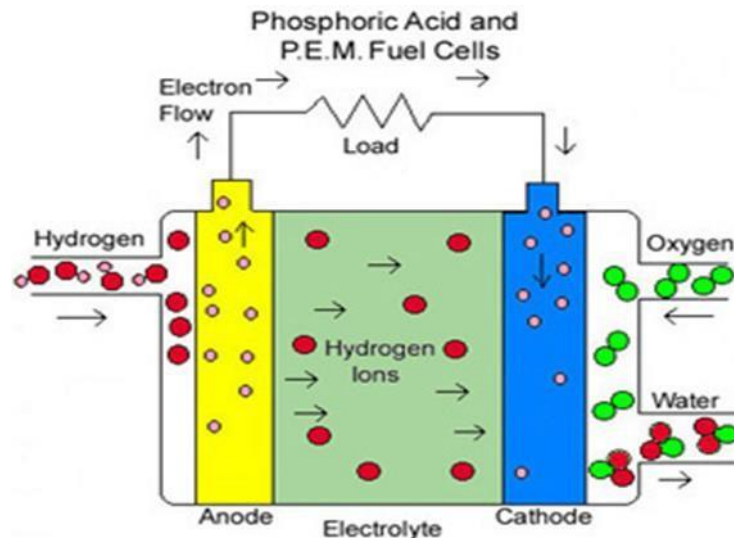
3.5 Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC)

Οι Κυψέλες Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (PAFC) χρησιμοποιούν υγρό φωσφορικό οξύ ως ηλεκτρολύτη. Το οξύ περιέχεται σε ένα πλέγμα από τεφλόν καρβιδίου του πυριτίου και ηλεκτροδίων πορώδους άνθρακα που περιέχουν καταλύτη λευκόχρυσου.

Το PAFC θεωρείται η "πρώτη γενιά" των σύγχρονων Κυψελών Καυσίμου. Είναι ο πρώτος τύπος Κυψέλης που χρησιμοποιήθηκε εμπορικά.

Χρησιμοποιείται συνήθως για τη «στατική» παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αν και ορισμένα PAFC δοκιμάστηκαν στην κίνηση μεγάλων οχημάτων, όπως λεωφορεία πόλης. Τα PAFC είναι πιο ανεκτικά στις προσμίξεις των καυσίμων σε σχέση με τα PEMFC, τα οποία είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στο μονοξείδιο του άνθρακα. Τα PAFC έχουν απόδοση πάνω από 85%, όταν χρησιμοποιούνται για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, αλλά είναι λιγότερο αποδοτικά στην αποκλειστική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (37% - 42%). Η αποδοτικότητα του PAFC είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με βάση την καύση, οι οποίοι συνήθως λειτουργούν με απόδοση περίπου 33%. Τα PAFC είναι

επίσης λιγότερο ισχυρά από άλλα Fuel Cells, δεδομένου του ίδιου βάρους και όγκου. Τέλος οι Κυψέλες Καυσίμου φωσφορικού οξέος είναι αρκετά δαπανηρές καθώς απαιτούν πολύ υψηλότερες ποσότητες ακριβού καταλύτη πλατίνας από ό,τι άλλοι τύποι Κυψελών Καυσίμου.



Εικόνα 5: Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC)

3.6 Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC)

Οι Κυψέλες Καυσίμου MCFC αναπτύσσονται, επί του παρόντος, για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που λειτουργούν με φυσικό αέριο και άνθρακα, καθώς και για βιομηχανικές και στρατιωτικές εφαρμογές. Τα MCFC είναι Κυψέλες Καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας που χρησιμοποιούν ηλεκτρολύτη, αποτελούμενο από μίγμα τετηγμένου ανθρακικού άλατος που αιωρείται σε πορώδες, χημικά αδρανές, κεραμικό πλέγμα οξειδίου λιθίου-αργιλίου. Επειδή λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, περί τους 650 °C, δύναται να χρησιμοποιηθούν, ως καταλύτες στην άνοδο και στην κάθοδο, μη πολύτιμα μέταλλα, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του κόστους.

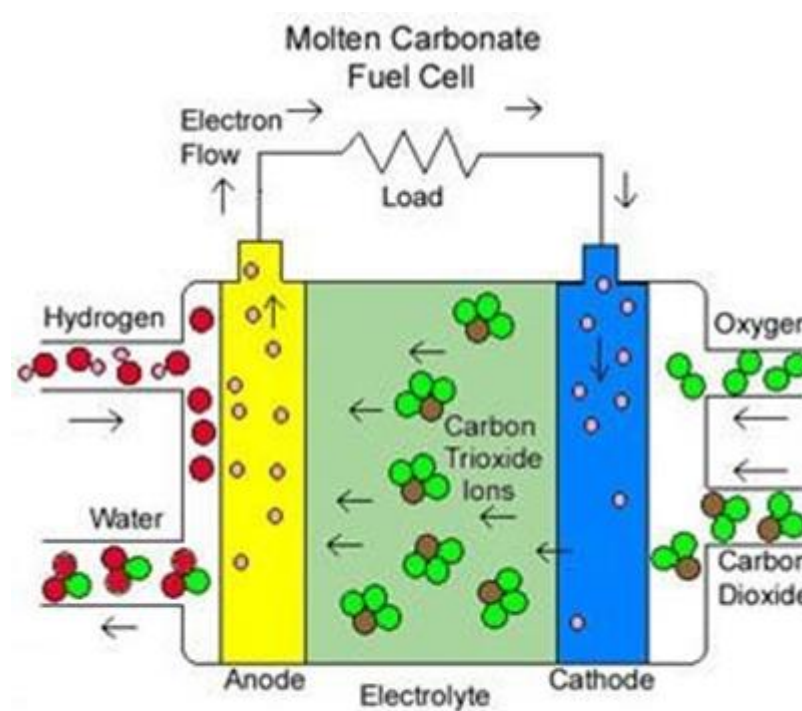
Η αυξημένη απόδοση είναι ένας άλλος λόγος που τα MCFC προσφέρουν σημαντική μείωση κόστους έναντι των Κυψελών Καυσίμου φωσφορικού οξέος PAFC. Οι Κυψέλες αυτές, σε συνδυασμό με στρόβιλο, μπορούν να φθάσουν απόδοση που προσεγγίζει το 65%, σημαντικά υψηλότερη από την απόδοση 37% - 42% των PAFC. Εάν δε, η θερμότητα που εκλύεται

χρησιμοποιηθεί, η συνολική απόδοση του καυσίμου μπορεί να φτάσει και πάνω από 85%.

Σε αντίθεση με τις αλκαλικές, φωσφορικές και τύπου PEM Κυψέλες, τα MCFC δεν απαιτούν «εξωτερικό αναμορφωτή» για τη μετατροπή καυσίμων, όπως το φυσικό αέριο και το βιοαέριο, σε υδρογόνο. Στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας των MCFC, το μεθάνιο και οι άλλοι ελαφροί υδρογονάνθρακες, μετατρέπονται σε υδρογόνο εντός της ίδιας της Κυψέλης Καυσίμου με τη διαδικασία που ονομάζεται «εσωτερική αναμόρφωση», η οποία, επίσης, συντελεί στη μείωση του κόστους.

Το κύριο μειονέκτημα της τρέχουσας τεχνολογίας MCFC είναι ο, συγκριτικά, μικρός χρόνος ζωής. Οι υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες λειτουργούν οι Κυψέλες αυτές σε συνδυασμό με τον χρησιμοποιούμενο διαβρωτικό ηλεκτρολύτη, επιταχύνουν τη διάσπαση και τη διάβρωση των υλικών κατασκευής, μειώνοντας τη ζωή της Κυψέλης.

Αντικείμενο τρέχουσας έρευνας αποτελεί η διερεύνηση ανθεκτικών υλικών στη διάβρωση, καθώς και ειδικός σχεδιασμός των Κυψελών Καυσίμου, ώστε να διπλασιαστεί ο τρέχον χρόνος ζωής τους από τις 40.000 ώρες (5 περίπου χρόνια), χωρίς να μειωθούν οι επιδόσεις τους.



Εικόνα 6: Molten Carbonate Fuel Cell

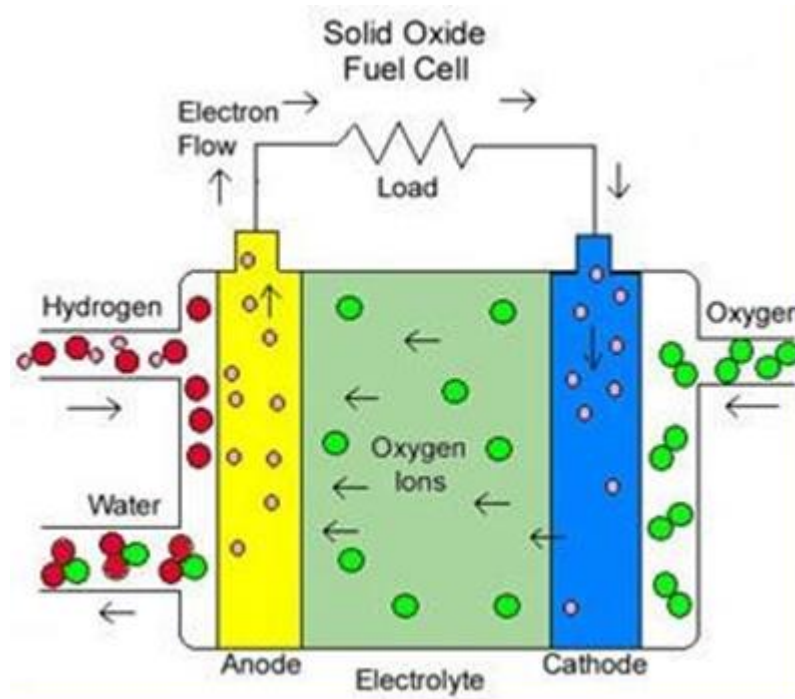
3.7 Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)

Οι Κυψέλες Καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρολύτη μια σκληρή, μη πορώδη, κεραμική ένωση. Τα SOFC έχουν περίπου 60% απόδοση για τη μετατροπή καυσίμων σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε εφαρμογές που συλλέγουν και αξιοποιούν την εκλυόμενη θερμότητα του συστήματος, η συνολική απόδοση χρήσης του καυσίμου μπορεί να φτάσει το 85%.

Τα SOFC λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες έως και 1.000 °C. Η λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες καταργεί την ανάγκη για καταλύτη από πολύτιμα μέταλλα, μειώνοντας έτσι το κόστος. Επιτρέπει, επίσης, στα SOFC να «αναμορφώσουν» εσωτερικά τα καύσιμα, γεγονός που καθιστά δυνατή τη χρήση ποικίλων καυσίμων και μειώνει το κόστος που προκαλεί η ανάγκη προσθήκης ξεχωριστού αναμορφωτή. Τα SOFC εμφανίζουν τη μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στις προσμίξεις θείου (S). Μπορούν να ανεχθούν πολύ μεγαλύτερες ποσότητες θείου από ότι οι άλλοι τύποι Κυψελών Καυσίμου, καθώς επίσης δεν επηρεάζονται εύκολα από το μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Η ιδιότητες αυτές επιτρέπουν στα SOFC να χρησιμοποιούν φυσικό αέριο, βιοαέριο και άλλους υδρογονάνθρακες. Όμως, η λειτουργία τους σε υψηλή θερμοκρασία έχει και αρκετά μειονεκτήματα. Αρχικά προκαλείται αργή εκκίνηση του συστήματος και απαιτείται σημαντική θερμική θωράκιση για τη συγκράτηση της θερμότητας και την προστασία των εργαζομένων (χειριστών, συντηρητών). Τα παραπάνω καθιστούν την τεχνολογία αποδεκτή για εφαρμογές κοινής ωφέλειας αλλά όχι τόσο για τις μεταφορές. Οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας θέτουν επίσης αυστηρές απαιτήσεις ανθεκτικότητας στα υλικά. Η ανάπτυξη υλικών χαμηλού κόστους με υψηλή αντοχή στις θερμοκρασίες λειτουργίας των Κυψελών Καυσίμου είναι η βασική τεχνική πρόκληση που αντιμετωπίζει αυτή η τεχνολογία.

Η τρέχουσα έρευνα αφορά στις δυνατότητες ανάπτυξης Κυψέλες SOFC χαμηλής θερμοκρασίας, που να λειτουργούν στους 700 °C ή χαμηλότερα, οι οποίες να έχουν λιγότερα προβλήματα ανθεκτικότητας και χαμηλότερο κόστος. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα υλικά που θα

λειτουργήσουν σε αυτό το χαμηλότερο εύρος θερμοκρασιών βρίσκονται ακόμα υπό ανάπτυξη.



Εικόνα 7: Solid Oxide Fuel Cell

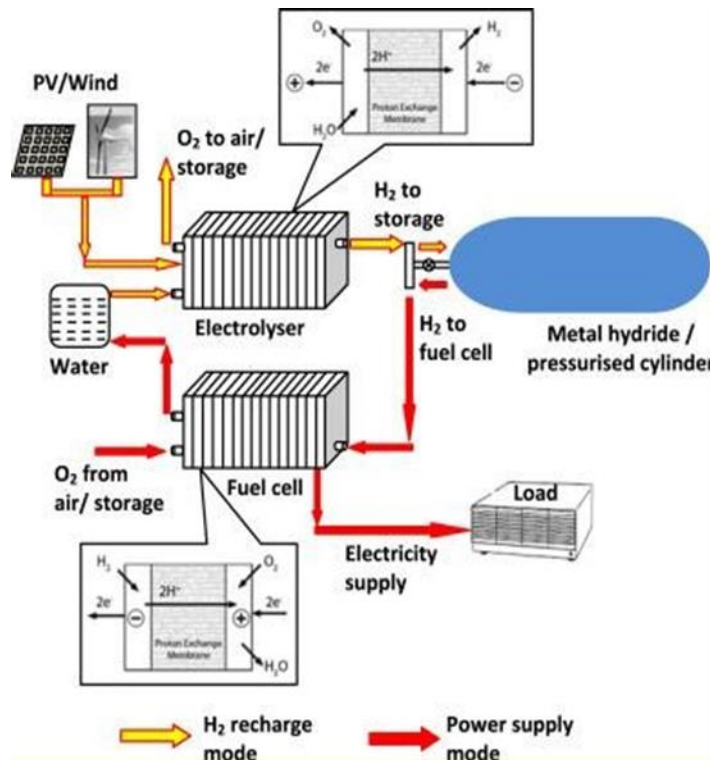
3.8 Reversible Fuel Cells

Οι Αναστρέψιμες Κυψέλες Καυσίμου (Reversible Fuel Cells) παράγουν ηλεκτρισμό από υδρογόνο και οξυγόνο και παράγουν θερμότητα και νερό ως υποπροϊόντα.

Εντούτοις, τα συστήματα Αναστρέψιμων Κυψελών Καυσίμου μπορούν επίσης να χρησιμοποιούν τον ηλεκτρισμό που παράγεται από την ηλιακή, την αιολική ή άλλες πηγές ενέργειας, για τη διάσπαση του νερού σε οξυγόνο και καύσιμο υδρογόνο μέσω της διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης.

Οι αναστρέψιμες Κυψέλες Καυσίμου μπορούν να παράσχουν ενέργεια όταν χρειάζεται, αλλά σε περιόδους υψηλής παραγωγής ενέργειας από άλλες τεχνολογίες (όπως υπερβολικά διαθέσιμη αιολική ενέργεια λόγω ισχυρών ανέμων), αναστρέψιμες Κυψέλες Καυσίμου μπορούν να αποθηκεύσουν την περίσσεια ενέργειας με τη μορφή υδρογόνου.

Σχεδιασμός Συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου από κυψέλες καυσίμου



Εικόνα 8: Reversible Fuel Cells

3.9 Βοηθητικός εξοπλισμός - Balance of Plant (BoP)

Βοηθητικά εξαρτήματα απαιτούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με μια κυψέλη καυσίμου. Αυτά τα εξαρτήματα συνήθως αναφέρονται ως στοιχεία ισορροπίας της εγκατάστασης (Balance of Plant - BoP), και αποτελούν ένα μεγάλο μέρος του συνολικού συστήματος. Μπορούμε να κάνουμε διάκριση μεταξύ θερμών και ψυχρών εξαρτημάτων BoP στα συστήματα κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας και εξοπλισμού επεξεργασίας καυσίμων. Τα θερμά εξαρτήματα BoP περιλαμβάνουν για παράδειγμα, εναλλάκτες θερμότητας και επεξεργαστές καυσίμων, ενώ η διαχείριση ενέργειας και τα συστήματα ελέγχου ταξινομούνται ως ψυχρά εξαρτήματα. Πολλά στοιχεία BoP καταναλώνουν παρασιτική ισχύ και πρόσθετο καύσιμο. Μια κατηγορία εξαρτημάτων BoP χρησιμοποιείται για την παροχή καυσίμου και οξειδωτικού στην κυψέλη και περιλαμβάνει αντλίες, φυσητήρες και συμπιεστές. Ανάλογα με τον τύπο της κυψέλης καυσίμου,

ενδέχεται να υπάρχουν εναλλάκτες θερμότητας για να φτάσουν οι ροές αερίου στη σωστή θερμοκρασία και εξατμιστές όταν χρησιμοποιούνται υγρά καύσιμα. Οι ροές αερίων χρειάζονται συχνά φιλτράρισμα και ύγρανση, και τα καυσαέρια

ενδέχεται να περιέχουν σημαντική ποσότητα καυσίμων συστατικών, τα οποία συνήθως καίγονται σε καταλυτικό καυστήρα. Όλες οι ροές αερίου ρυθμίζονται

με συστήματα ελέγχου και ενεργοποιητές, όπως ελεγκτές ταχύτητας φυσητήρων, βαλβίδες και ρυθμιστές πίεσης.

Τα υψηλής θερμοκρασίας συστήματα κυψελών καυσίμου είναι συχνά εξοπλισμένα με καυστήρες για να θερμαίνουν το σύστημα κατά την εκκίνηση. Παρόλο που οι υψηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου συνήθως ψύχονται με καθόδους αέρα, οι διαβαθμίσεις της θερμοκρασίας σε κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας είναι πολύ μικρές για να επιτευχθεί επαρκής ψύξη με αυτόν τον τρόπο. Επομένως, αυτά τα συστήματα θα έχουν συνήθως ένα ξεχωριστό σύστημα ψύξης.

Δεδομένου ότι οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ηλεκτρική ενέργεια DC με μεταβλητή τάση και ρεύμα, εξοπλισμός διαχείρισης ενέργειας, όπως μετατροπείς DC σε AC ή DC σε DC, χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε τάση και συχνότητα του δικτύου. Ο εξοπλισμός επεξεργασίας καυσίμου είναι ένα άλλο σημαντικό μέρος του BoP με σημαντική επίδραση στη συνολική αποδοτικότητα .

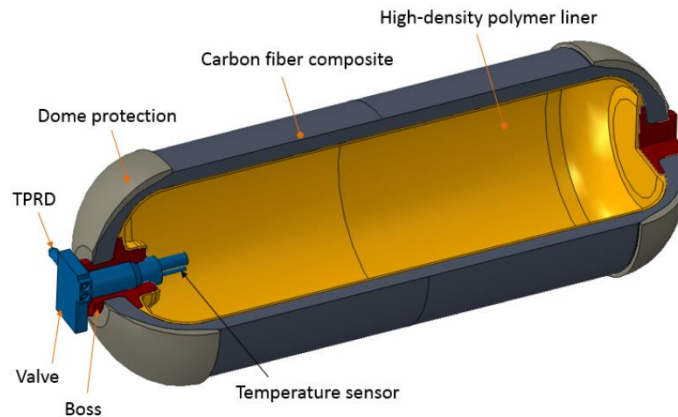
4 ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΟ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΙΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

4.1 Μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου

4.1.1 Αποθήκευση με υγροποίηση

Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί κρυογονικά, αναφέρεται ως κρυοσυμπυκνωμένο υδρογόνο (LH₂) και είναι σήμερα η πιο ενεργειακά πυκνή φυσική μέθοδος αποθήκευσης. Το υγρό υδρογόνο αποθηκεύεται σε ατμοσφαιρική πίεση σε κρυογονικές δεξαμενές σε θερμοκρασία -253 °C με πυκνότητα 70,8 g/lit, η οποία είναι σχεδόν διπλάσια της πυκνότητας του συμπιεσμένου υδρογόνου στα 700 bar (περίπου 40g/lit). Μία κρυογενική δεξαμενή 68 lt μπορεί να περιέχει περίπου 5 kg LH₂, το οποίο είναι επαρκές για να κινήσει ένα επιβατικό αυτοκίνητο για απόσταση 500 km. Δεξαμενές LH₂ μπορούν να πληρωθούν σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα και είναι πολύ πιο ασφαλείς σε κρυογενικές θερμοκρασίες από ότι οι υψηλής πίεσης δεξαμενές υδρογόνου. Το κύριο μειονέκτημα της αποθήκευσης υγροποιημένου υδρογόνου είναι η υψηλή κατανάλωση ενέργειας που σχετίζεται με τις διαδικασίες ρευστοποίησης και τη συνεχή «εξάτμιση» κατά την αποθήκευση.

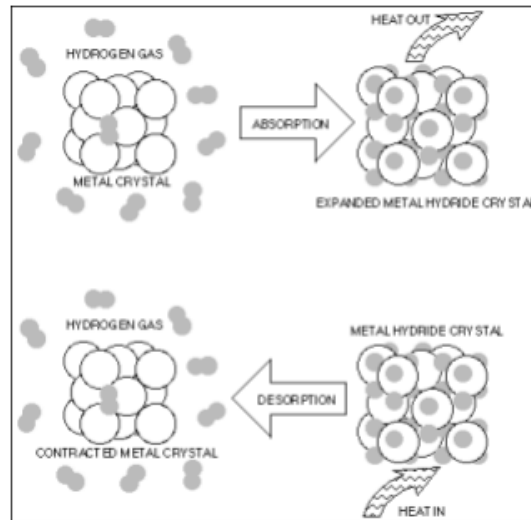
Η απαιτούμενη ενέργεια για να υγροποιηθεί το υδρογόνο είναι περίπου το 30-40% του ενεργειακού περιεχομένου του αερίου και για το λόγο αυτό μειώνει σημαντικά τη συνολική απόδοση του συστήματος. Οι χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας συγκρινόμενες με τις περιβαλλοντικές συνθήκες θερμοκρασίας 27 °C, οδηγούν σε αναπόφευκτη ροή θερμότητας προς το περιβάλλον εξαιτίας των τριών βασικών μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας: αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία, από τους οποίους ο πρώτος και ο τρίτος είναι οι κυρίαρχοι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας προς το περιβάλλον.



Εικόνα 9: Liquid Hydrogen Tank

4.1.2 Αποθήκευση σε προηγμένα υλικά

Μια εναλλακτική λύση στις παραδοσιακές μεθόδους αποθήκευσης υδρογόνου αποτελεί η αποθήκευση υδρογόνου σε προηγμένα στερεά υλικά τα οποία λειτουργούν ως μικρο-δεξαμενές αποθήκευσης του υδρογόνου σε ατομική ή μοριακή μορφή. Η παραπάνω μέθοδος αποθήκευσης αναφέρεται συχνά ως μέθοδος αποθήκευσης «στερεού» υδρογόνου διότι το υδρογόνο αποτελεί μέρος του στερεού υλικού μέσω φυσικοχημικών δεσμών. Στην παρούσα φάση υπάρχουν δύο θεμελιώδεις μηχανισμοί αποθήκευσης στερεού υδρογόνου με αντιστρεπτό τρόπο: η απορρόφηση και η προσρόφηση. Κατά την απορρόφηση το υδρογόνο απορροφάται από τον κύριο όγκο του υλικού που δρα ως σπόγγος. Σε απλά κρυσταλλικά μεταλλικά υδρίδια η απορρόφηση λαμβάνει χώρα με την ενσωμάτωση του υδρογόνου σε ατομική μορφή στις ενδόθετες θέσεις του κρυσταλλικού πλέγματος μέσα από μια σειρά σταδίων. Η προσρόφηση από την άλλη μεριά λαμβάνει χώρα μέσα από την αλληλεπίδραση των μορίων του υδρογόνου με τα τοιχώματα των πόρων του προσροφητικού υλικού και διακρίνεται σε φυσική και χημική ρόφηση ανάλογα με τις δυνάμεις προσρόφησης που λαμβάνουν χώρα σε κάθε περίπτωση. Ένας τρίτος μηχανισμός αποθήκευσης «στερεού» υδρογόνου λαμβάνει χώρα μέσω χημικών αντιδράσεων

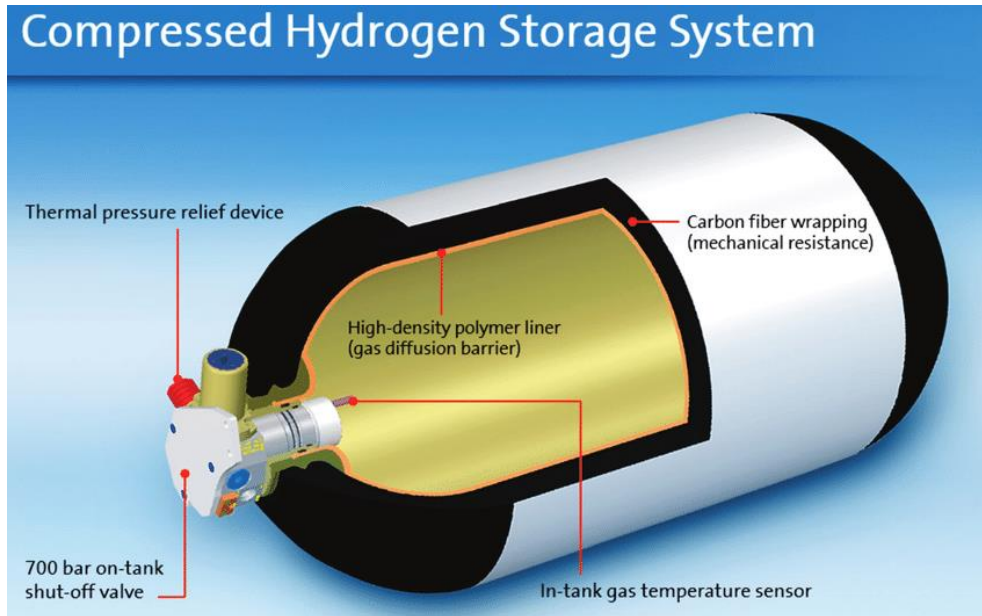


Εικόνα 10: Διαδικασία αποθήκευσης υδρογόνου σε μεταλλικό υδρίτη

4.1.3 Αποθήκευση με συμπίεση

Η πυκνότητα του υδρογόνου είναι περίπου 0,08988 g/L στην αέρια κατάσταση σε 1atm. Ωστόσο συμπιεσμένο υδρογόνο θα επιτύχει πυκνότητα 31.04g/L στα 350bar. Το υδρογόνο αποθηκεύεται συχνά σε φιάλες υπό πίεση 350 bar , στοχεύοντας τα 700 bar (Compressed Gas Hydrogen - CGH2) και αποτελεί εμπορικά πολύ ώριμη τεχνολογία αποθήκευσης. Με δεδομένο ότι το υδρογόνο έχει χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα όγκου, πρέπει να συμπίεστεί σε πολύ υψηλές πιέσεις ώστε να αποθηκευτεί επαρκής ποσότητα υδρογόνου σε περιορισμένο όγκο, Ένα πρόβλημα που συναντάται ιδιαίτερα σε κινητές εφαρμογές. Βιομηχανικά πρότυπα για αποθήκευση συμπιεσμένου υδρογόνου είναι στα 350 bar, με έναν απώτερο στόχο τα 700 bar.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της αποθήκευσης συμπιεσμένου υδρογόνου (CGH2) είναι ότι αποτελεί μία σχετικά απλή και ταχεία διαδικασία. Τα κύρια μειονεκτήματα σχετίζονται με τις σχετικά χαμηλές ογκομετρικές και σταθμικές πυκνότητες, συγκρινόμενες με διαφορετικές μεθόδους αποθήκευσης. Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα για τη διαδεδομένη χρήση της μεθόδου είναι η φοβία του κοινού για τα θέματα ασφαλείας που σχετίζεται με τις εξαιρετικά υψηλές πιέσεις των δοχείων υδρογόνου κατά τη λειτουργία ενός κοινού επιβατικού αυτοκινήτου.



Εικόνα 11: Compressed Hydrogen Storage System

5 ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΕ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

5.1 Εφαρμοσμένες Τεχνολογίες Κυψελών Καυσίμου στην Ναυτιλία

Λόγω των ειδικών συνθηκών που διέπουν την εγκατάσταση και λειτουργία των κυψελών καυσίμου στο θαλάσσιο περιβάλλον, είναι σημαντικό να επιλεγεί το κατάλληλο σύστημα κυψέλης καυσίμου έτσι ώστε να έχουμε την καλύτερη σύευξη συστήματος και πλοίου. Κάποιες από τις πιο σημαντικές συνθήκες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι οι εξής :

1. Μεγάλα ποσοστά υγρασίας (της τάξεως του 60%)
2. Λειτουργία πλοίου σε έντονους κυματισμούς
3. Σημαντικοί κραδασμοί και πρόβλημα συντονισμού
4. Ο ατμοσφαιρικός αέρας στη θάλασσα διαθέτει μεγάλη περιεκτικότητα σε αλάτι

Σύμφωνα λοιπόν με τα πιο πάνω κριτήρια θα πρέπει να επιλεγεί το κατάλληλο σύστημα που θα ικανοποιεί αν όχι όλα, αρκετά από αυτά.

Ως πιο διαδεδομένο σύστημα κυψέλης καυσίμου σε ναυτιλιακές εφαρμογές έχει αναδειχθεί ο τύπος κυψέλης PEMFC. Οι κυψέλες PEMFC, ένα τεχνολογικά ώριμο σύστημα παραγωγής ενέργειας, έχει χρησιμοποιηθεί ευρεία σε θαλάσσιες και άλλες εφαρμογές. Λόγω της μεγάλης εμπειρίας των κατασκευαστών με το εν λόγω σύστημα, επήλθε και μείωση του κόστους εγκατάστασης. Ως κύριο καύσιμο λειτουργίας της, η κυψέλη χρησιμοποιεί καθαρό υδρογόνο και έχει σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας (80° C). Εφαρμογές του εν λόγω τύπου κυψέλης καυσίμου θα παρουσιαστούν στην συνέχεια.

Ένας ακόμα τύπος κυψέλης που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί είναι ο HT-PEMFC. Αν και τεχνολογικά λιγότερο ώριμη από την συμβατική PEM, έχει καλύτερη συμπεριφορά σε προβλήματα που αφορούν την

Σχεδιασμός Συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου
με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου από κυψέλες καυσίμου

χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας. Λόγω της λειτουργίας της κυψέλης αυτής σε υψηλή θερμοκρασία μειώνει την ευαισθησία του συστήματος ως προς τις προσμείξεις του υδρογόνου. Η αποδοτικότητα της βρίσκεται στα ίδια επίπεδα με αυτά της PEM, όμως λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, παράγεται σημαντική ποσότητα θερμότητας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σκοπούς θέρμανσης του πλοίου.

Comparison of Fuel Cell Technologies

Fuel Cell Type	Common Electrolyte	Operating Temperature	Typical Stack Size	Efficiency	Applications	Advantages	Disadvantages
Polymer Electrolyte Membrane (PEM)	Perfluoro sulfonic acid	50-100°C 122-212° typically 80°C	< 1kW-100kW	60% transportation 35% stationary	<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 	<ul style="list-style-type: none"> Expensive catalysts Sensitive to fuel impurities Low temperature waste heat
Alkaline (AFC)	Aqueous solution of potassium hydroxide soaked in a matrix	90-100°C 194-212°F	10-100 kW	60%	<ul style="list-style-type: none"> Military Space 	<ul style="list-style-type: none"> Cathode reaction faster in alkaline electrolyte, leads to high performance Low cost components 	<ul style="list-style-type: none"> Sensitive to CO₂ in fuel and air Electrolyte management
Phosphoric Acid (PAFC)	Phosphoric acid soaked in a matrix	150-200°C 302-392°F	400 kW 100 kW module	40%	<ul style="list-style-type: none"> Distributed generation 	<ul style="list-style-type: none"> Higher temperature enables CHP Increased tolerance to fuel impurities 	<ul style="list-style-type: none"> Pt catalyst Long start up time Low current and power
Molten Carbonate (MCFC)	Solution of lithium, sodium, and/or potassium carbonates, soaked in a matrix	600-700°C 1112-1292°F	300 kW-3 MW 300 kW module	45-50%	<ul style="list-style-type: none"> Electric utility Distributed generation 	<ul style="list-style-type: none"> High efficiency Fuel flexibility Can use a variety of catalysts Suitable for CHP 	<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	700-1000°C 1202-1832°F	1 kW-2 MW	60%	<ul style="list-style-type: none"> Auxiliary power Electric utility Distributed generation 	<ul style="list-style-type: none"> High efficiency Fuel flexibility Can use a variety of catalysts Solid electrolyte Suitable for CHP & CHHP Hybrid/GT cycle 	<ul style="list-style-type: none"> High temperature corrosion and breakdown of cell components High temperature operation requires long start up time and limits

Εικόνα 12 : Συγκεντρικός Πίνακας Τύπων Κυψελών Καυσίμου και Ιδιοτήτων τους

5.2 Ναυτιλιακά Project εγκατάστασης κυψελών καυσίμου

5.2.1 MF Hydra Passenger Ferry

Το 2021 η εταιρεία Linde ανακοίνωσε την συνεργασία της με την Norled για την κατασκευή και εγκατάσταση μια κυψέλης καυσίμων με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων. Η ηλεκτρόλυση θα λαμβάνει χώρα στο συγκρότημα Leuna της Γερμανίας, η οποία και θα χρησιμοποιεί ανανεώσιμες πηγές για να παράγει πράσινο υδρογόνο. Το project περιλαμβάνει την εγκατάσταση 2 κυψελών καυσίμου της τάξεως των 200 kW από την LMG MARIN, και την κατασκευή του συστήματος αποθήκευσης του υδρογόνου τόσο εντός του επιβατηγού αλλά και onshore από την Linde, με ένα δοχείο 80 κβ.μ. Το πλοίο θα διατεθεί στην Norled, όπου θα μεταφέρει οχήματα και επιβάτες στο τρίγωνο Hjelmeland-Skipavik-Nesvik Νορβηγία. Αναμένεται ότι το σκάφος μετά την εγκατάσταση των κυψελών καυσίμου θα μειώσει τις εκπομπές άνθρακα έως 95%.



Εικόνα 13 : MF Hydra RoRo ferry

5.2.2 The WEVA Project

Το Ολλανδικό ναυπηγείο Concordia Damen πρόσφατα υπέγραψε συμβόλαιο για την κατασκευή μίας φορηγίδας όπου θα λειτουργεί στην ενδοχώρα για την μεταφορά αλατιού κάτω από την διαχείριση της Lenten Scheervaart. Όπως ανακοινώθηκε η φορηγίδα θα εκτείνεται στα 135 μέτρα, με 3700 τόνους βάρος και την πρόωση της θα αναλάβει αποκλειστικά σύστημα κυψελών καυσίμου. Το project αναμένεται να ολοκληρωθεί το 2023. Την κατασκευή του συστήματος πρόωσης θα αναλάβει η Nedstack. Η φορηγίδα θα φέρει το όνομα Antonie.



Εικόνα 14 : Overview of Hydrogen Electric Cargo Ship Antonie

5.2.3 Zero Emission Fast Ferry

Στο προτζεκτ αυτό ηγέτης είναι η Selfa Arctic ενώ θα εργαστούν επιπλέον οι εταιρείες Hyon AS, Norled AS, Servogear και LMG Marin. Η Norled AS είναι ένας από τους μεγαλύτερους διαχειριστές φορτηγών και πλοίων της Νορβηγίας, ο δεύτερος μεγαλύτερος φορέας εκμετάλλευσης πορθμείων στη Νορβηγία και ο ηγέτης της εθνικής αγοράς σε ταχύπλοα σκάφη.

Κατατάσσεται επίσης στην 4η θέση σε ταχύπλοα πορθμεία παγκοσμίως. Έχει επενδύσει σημαντικά σε νέους τύπους σκαφών και φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογία και έχει αναπτύξει λύσεις που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά από την εταιρεία.

Με το προτζεκτ ZEFF σκοπεύει να εισαγάγει γρήγορα επιγατηγά πλοία τροφοδοτούμενα από υδρογόνο. Το ZEFF θα έχει 2 κινητήρες πρόωσης, ισχύος 1000kW έκαστος, κυψέλες καυσίμου ισχύος 2200kW και μπαταρία χωρητικότητας 50kWh. Θα έχει δυνατότητα μεταφοράς 275 επιβατών στη διαδρομή Trondheim-Kristiansund, με ταχύτητα 25-45 κόμβων και θα φέρει πτερύγια που το αναψώνουν για μείωση της αντίστασης του. Υπολογίζεται ότι το σκάφος θα είναι έτοιμο για αγορά το 2020 και εκτιμάται ότι θα απαιτεί 45% λιγότερη ισχύ.



Εικόνα 15 : ZEFF Project

5.2.4 Πρόγραμμα ‘NEMO H2’

Στις αρχές του 2006, οι εταιρείες Alewijnse Marine Systems, Lovers, Linde Gas, Marine Service North και Integral, συνεργάστηκαν, με στόχο την ανάπτυξη, κατασκευή και εκμετάλλευση ενός σκάφους υδρογόνου, το «Nemo H2». Το σκάφος υδρογόνου προοριζόταν για τη μεταφορά επιβατών στο κέντρο της πόλης του Άμστερνταμ.

Το σύστημα Κυψέλης Καυσίμου για το εν λόγω επιβατηγό σκάφος, σχεδιάστηκε για τη μεταφορά 100 ατόμων. Η Κυψέλη Καυσίμου ήταν τύπου PEM 65 kW με καύσιμο υδρογόνο, σε συνδυασμό με σύστημα μπαταριών 30 έως 50 kW και αποθήκευση υδρογόνου 40 kg σε 8 κυλίνδρους στα 350 bar.

Η εγκατάσταση του συστήματος Κυψελών Καυσίμου, των μπαταριών και του συστήματος αποθήκευσης υδρογόνου, έγιναν με απόλυτη επιτυχία, ενώ προσαρμόστηκαν πολύ εύκολα στο πλοίο. Η αξιολόγηση κινδύνου και οι δοκιμές, έδειξαν ότι είναι δυνατή η ασφαλής λειτουργία του σκάφους.

Το NEMO H2 λειτουργεί από το 2012 έως σήμερα.



Εικόνα 16 : NEMO H2 Passenger ferry

5.2.5 Project Flagships

Η Ballard Power Systems ανακοίνωσε ότι στα πλαίσια της συνεργασίας της με την ABB και άλλους συνεργάτες του FCH JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking) την ανάπτυξη ενός ρυμουλκού τροφοδοτούμενο με σύστημα κυψελών καυσίμου.

Το εν λόγω ρυμουλκό θα τεθεί σε χρήση στην Γαλλία από το 2021 κάτω από την αιγίδα της πλοιοκτήτριας εταιρείας Compagnie Fluviale de Transport και θα λειτουργεί στη περιοχή της Rhone. Το project θα επιχειρήσει να θέσει τα συστήματα πρόωσης fuel cells ως κερδοφόρα και ιδανικά για μεσαίου μεγέθους σκάφη.

Η Ballard θα διαθέσει 2 νέας γενιάς 200 kW συστοιχίες κυψελών καυσίμου που θα αποτελούν την πηγή πρόωσης του ρυμουλκού.

6 Μελέτη εγκατάστασης συστήματος κυψελών καυσίμου σε ε/ο πλοίο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

6.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Σαν case study στην παρούσα εργασία θα μελετήσουμε την εγκατάσταση συστήματος παραγωγής ενέργειας από κυψέλες καυσίμου σε ένα επιβατηγό οχηματαγωγό, καθώς και το κόστος κατασκευής του.

Η βασική ιδέα της μελέτης είναι ότι το πλοίο, το οποίο θα κινείται με μπαταρίες οι οποίες θα φορτίζονται από την ακτή (shore connection), και θα μπορεί να τροφοδοτείται από τις κυψέλες καυσίμου όταν η κατανάλωση βρίσκεται σε χαμηλά φορτία. Οι υπολογισμοί θα γίνουν για μια τυχαία διαδρομή τακτικής γραμμής στο Αιγαίο, και συγκεκριμένα από Αίγινα προς Πόρο, στον Αργοσαρωνικό.

Τα δεδομένα έχουν συλλεχθεί από επικοινωνία με διάφορους κατασκευαστές κυψελών καυσίμου, και σύμφωνα με τις τρέχουσες τεχνολογίες.

Από δώ και στο εξής το πλοίο θα αναφέρεται ως Fuel Cell Ferry.

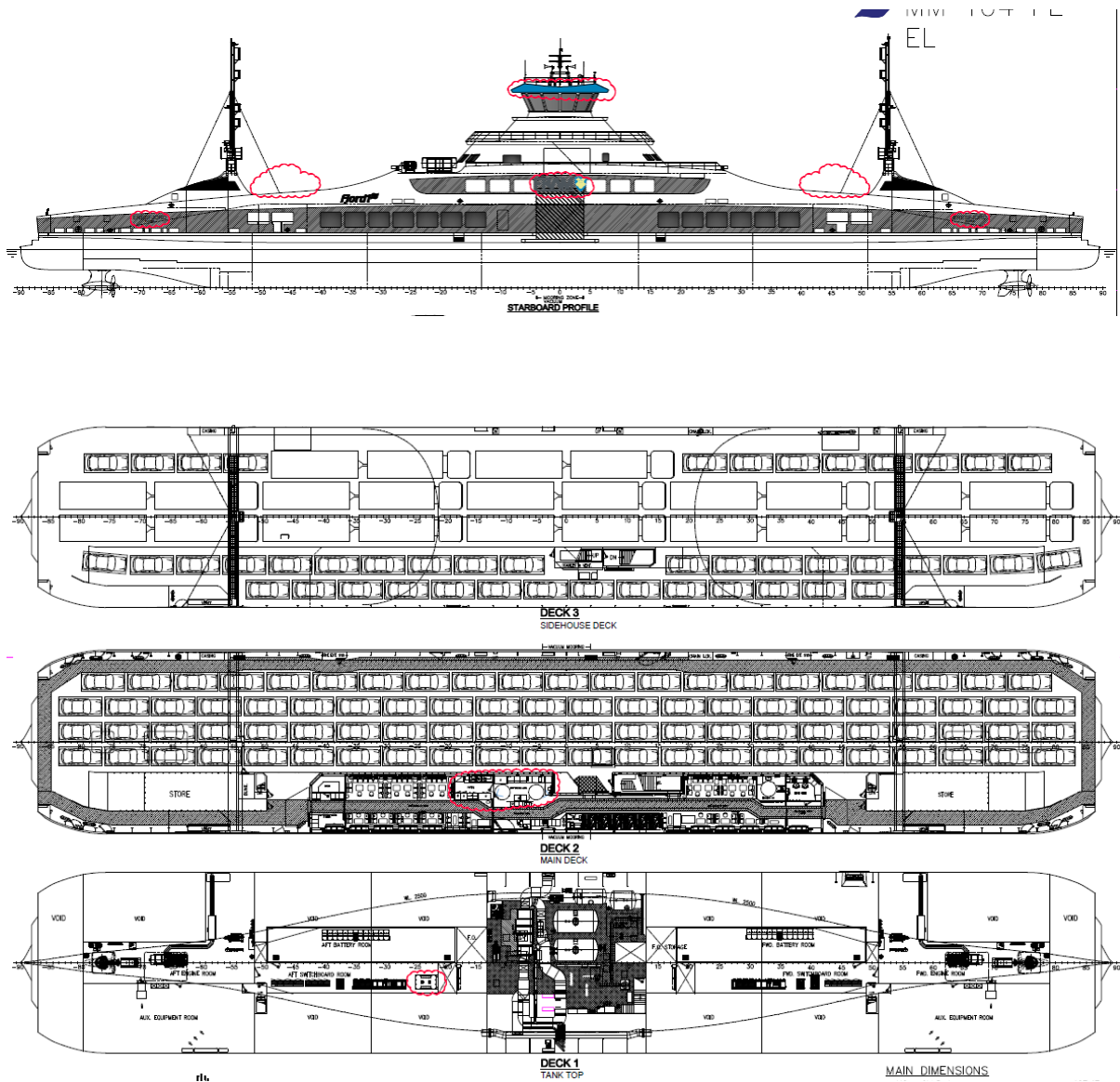
Τα βασικά χαρακτηριστικά του επιβατηγού έχουν επιλεγθεί ως παρακάτω :

Fuel Cell Ferry	
LENGTH O.A.	102.2 m
LENGTH AT CAR DECK	98 m
BREADTH (MLD)	17.7 m
DEPTH (UP TO FREEBOARD DECK)	4.1 m
DRAUGHT	2.6 m
DESIGN SPEED	11 kn
PASSENGERS (SUMMER)	324
PASSENGERS (WINTER)	140
CARS	127

Εικόνα 17 : Συγκεντρωτικός Πίνακας Γενικών Χαρακτηριστικών Fuel Cell Ferry

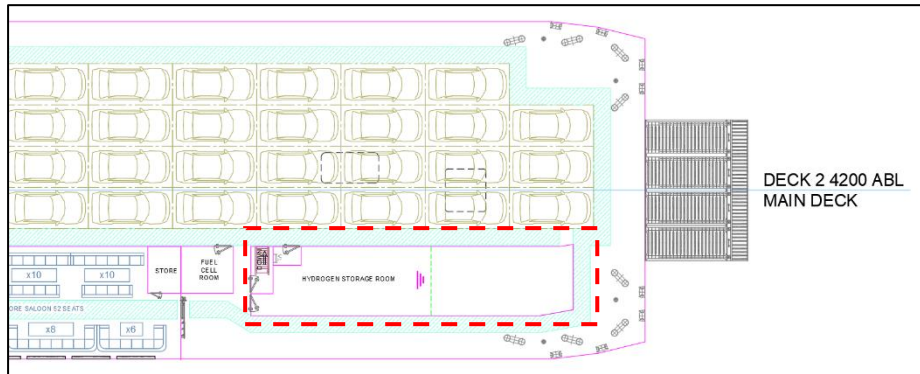
Μέσα από έρευνα παρόμοιων τύπων πλοίου, παρακάτω παρουσιάζεται η γενική διάταξη του Fuel Cell Ferry. Μια προκαταρκτική σχεδίαση που ακολούθησε προηγούμενα σχεδιαστικά έργα ηλεκτροκίνητων επιβατηγών, με την μόνη διαφορά ότι προσθέσαμε το χώρο για τις κυψέλες καυσίμου στα μπαταριοστάσια, αλλά και για την αποθήκευση του υδρογόνου στο κύριο κατάστρωμα. Ως καύσιμο θα επιλεγεί το συμπιεσμένο υδρογόνο, λόγω της απλότητας της εγκατάστασης.

Σχεδιασμός Συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου
με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου από κυψέλες καυσίμου



Εικόνα 18 : Γενική Διάταξη Fuel Cell Ferry

Πιο κάτω φαίνεται ο χώρος όπου θα εγκατασταθεί η δεξαμενή για το συμπιεσμένο υδρογόνο στα αριστερά, ενώ στα δεξιά θα βρίσκονται οι κυψέλες καυσίμου.



Εικόνα 19 : Χώρος Δεξαμενής Συμπιεσμένου Υδρογόνου

Επίσης η ανάγκη για shore connection, μας επιβάλλει την εγκατάσταση στα λιμάνια που θα εξυπηρετεί κατάλληλων υποδομών παροχής ηλεκτρικού αλλά και φορτιστή πάνω στο επιβατηγό οχηματαγωγό.



Εικόνα 20 : Shore Connection

Στη συνέχεια, ως πλήρωμα θα καθοριστούν οι κάτωθι, λαμβάνοντας υπόψη ιδίου μεγέθους και τύπου πλοία που εκτελούν καθημερινές γραμμές.

Πλήρωμα	
Πλοίαρχος Γ	1
Ναύκληρος	1
Ναύτης	2
Ναυτόπαις	2
Μηχανικός Γ	2
Μηχανοδηγός Β	1
Επίκουρος	1
Σύνολο	10

Εικόνα 21 : Πλήρωμα Fuel Cell Ferry

6.2 Υπολογισμοί Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Για να μπορέσουμε να καταλήξουμε σε ποιο σύστημα θα εγκατασταθεί στο Fuel Cell Ferry, εννοώντας το μέγεθος του σε ισχύ, θα πρέπει πρώτα να υπολογίσουμε την συνολική κατανάλωση του συστήματος. Για να γίνει αυτό έχουν συλλεχθεί στοιχεία πάλι από παρόμοιου είδους πλοία, όσο αφορά τις καταναλώσεις τους, έχουν προσαρμοσθεί στα δικά μας δεδομένα και εξάχθηκε πλέον η συνολική κατανάλωση του συστήματος.

Η λειτουργία των κυψελών θα αφορά μόνο τα χαμηλά φορτία, δηλαδή τα χρονικά διαστήματα τα οποία το πλοίο θα βρίσκεται στο λιμάνι και θα αποβιβάζει/επιβιβάζει κόσμο και οχήματα. Στα συγκεκριμένα διαστήματα, η κατανάλωση του πλοίου είναι στα πιο χαμηλά επίπεδα, αφού πολλά από τα διάφορα βοηθητικά μηχανήματα δεν βρίσκονται σε λειτουργία (αντλίες, κλιματιστικά κ.α.)

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας κατανάλωσης για το Fuel Cell Ferry, σε όλες του τις καταστάσεις, δηλαδή εν πλω, σε λιμάνι, σε κατάσταση shore connection αλλά και σε emergency.

Σχεδιασμός Συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου
με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου από κυψέλες καυσίμου

APPARATUS GROUP	K/W	UNITS		K/W	STANDBY				AT PORT				AT SEA				SHORE CONNECTION				EMERGENCY			
MACHINERY AFT		TOTAL		TOTAL	USE	K/W	fs	TOTAL	USE	K/W	fs	TOTAL	USE	K/W	fs	TOTAL	USE	K/W	fs	TOTAL	USE	K/W	fs	TOTAL
Sewage pump 1&2	5.50	2	1	11.00	0	0.00	0	0	1	5.50	0.3	1.65	0	0.00	0	0	1	5.50	0.3	1.65	0	0.00	0	0
Vacuum plant	9.60	1	1	9.60	1	9.60	0.7	6.72	1	9.60	0.5	4.8	1	9.60	0.5	4.6	1	9.60	0.5	4.6	0	0.00	0	0
General Service pump	12.00	2	1	24.00	1	12.00	0.3	3.6	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0
Sludge (Marpol) pump	2.20	1	1	2.20	0	0.00	0	0	1	2.20	0.5	1.1	0	0.00	0	0	1	2.20	0.5	1.1	0	0.00	0	0
bilge pump	3.00	1	1	3.00	1	3.00	0	0	1	3.00	0	0	0	0.00	0	0	1	3.00	0.3	0.9	0	0.00	0	0
Trailer sockets	15.00	6	3	90.00	3	45.00	0.50	22.5	0	0.00	0.00	0	3	45.00	0.40	16	0	0.00	0	0	0	0.00	0.00	0
GROUP 1 TOTAL KW				144.2				33.92				7.55				20.6				9.11				0

Εικόνα 22 : Πίνακας Κατανάλωσης 1

APPARATUS GROUP	K/W	UNITS		K/W	STAND BY				AT PORT				AT SEA				SHORE CONNECTION				EMERGENCY			
MACHINERY FORE.		TOTAL	USE	TOTAL	USE	K/W	fs	TOTAL	USE	K/W	USE	TOTAL	USE	K/W	fs	TOTAL	USE	K/W	fs	TOTAL	USE	K/W	fs	TOTAL
Drencher Plant	40.00	1	1	40.00	1	40.00	0.5	20	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0
General Service aft.	12.00	2	1	24.00	1	12.00	0.3	3.6	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	1	12.00	1	12
Sludge Marpol Pump	2.20	1	1	2.2	0	0	0	0	1	2.20	0.5	1.1	0	0.00	0	0	1	2.20	0.5	1.1	0	0.00	0	0
Bilge Pump	3.00	1	1	3.30	1	3.00	0.3	0.9	1	3.00	0.3	0.9	0	0.00	0	0	1	3.00	0.3	0.9	0	0.00	0	0
Hot water heater	8.00	1	1	8.00	1	8.00	0.70	5.6	1	8.00	0.30	2.4	1	8.00	0.50	4	1	8.00	0.30	2.4	0	0.00	0	0
F.W. Hydrofore	5.50	1	1	5.50	1	5.50	0.3	1.65	1	5.50	0.3	1.65	1	5.50	0.3	1.65	1	5.50	0.5	2.75	0	0.00	0	0
Air compressor	3.00	1	1	3.00	1	3.00	0.3	0.9	1	3.00	0.3	0.9	1	3.00	0.3	0.9	1	3.00	0.3	0.9	0	0.00	0	0
Group 2 Total KW				86				32.65				6.95				6.55				8.05				12

Εικόνα 23 : Πίνακας Κατανάλωσης 2

Σχεδιασμός Συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου
με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου από κυψέλες καυσίμου

APPARATUS GROUP	K/W	UNITS		K/W		STAND BY			ATPORT				ATSEA				SHORE CONNECTION				EMERGENCY				
		TOTAL	USE	TOTAL	USE	K/W	fs	TOTAL	USE	K/W	fs	TOTAL	USE	K/W	fs	TOTAL	USE	K/W	fs	TOTAL	USE	K/W	fs	TOTAL	
VENTILATION & A/C UNITS																									
SALOON A/C No 1	10.00	1	1	10.00	1	10.00	1	10	1	10.00	0.5	5	1	10.00	0.7	7	1	10.00	0	0	0	0.00	0	0	
SALOON A/C No 2	10.00	1	1	10.00	1	10.00	1	10	1	10.00	0.5	5	1	10.00	0.7	7	1	10.00	0	0	0	0.00	0	0	
SALOON A/C No 3	10.00	1	1	10.00	1	10.00	1	10	1	10.00	0.5	5	1	10.00	0.7	7	1	10.00	0	0	0	0.00	0	0	
SALOON A/C No 4	10.00	1	1	10.00	1	10.00	1	10	1	10.00	0.5	5	1	10.00	0.7	7	1	10.00	0	0	0	0.00	0	0	
CREW AJC No 5	15.00	1	1	15.00	1	15.00	1	15	1	15.00	0.5	7.5	1	15.00	0.7	10.5	1	15.00	0.7	10.5	0	0.00	0	0	
BRIDGE A/C No 6	10.00	1	1	10.00	1	10.00	1	10	1	10.00	0.5	5	1	10.00	0.7	7	1	10.00	0.3	3	0	0.00	0	0	
Chill&d water pump 1&2	7.50	2	1	15.00	1	7.50	1	7.5	1	7.50	0.8	6	1	7.50	0.8	6	1	7.50	0.4	3	0	0.00	0	0	
Se'a water pump 1&2	7.5	2	1	15.00	1	7.50	1	7.5	1	7.50	0.8	6	1	7.50	0.8	6	1	7.50	0.4	3	0	0.00	0	0	
Fan unit crew mess	7.50	1	1	7.50	1	7.50	1	7.5	1	7.50	0.8	6	1	7.50	0.8	6	1	7.50	0.8	6	0	0.00	0	0	
Fan unit saloon	4.00	1	1	4.00	1	4.00	1	4	1	4.00	0.8	3.2	1	4.00	0.8	3.2	1	4.00	0.5	2	0	0.00	0	0	
Ex-01 Crew Deck WC	1.50	1	1	1.50	1	1.50	1	1.5	1	1.50	0.8	1.2	1	1.50	0.8	1.2	1	1.50	0.8	1.2	0	0.00	0	0	
Ex-02 Galley	1.50	1	1	1.50	1	1.50	1	1.5	1	1.50	0.8	1.2	1	1.50	0.8	1.2	1	1.50	0.8	1.2	0	0.00	0	0	
Ex-04 Saloon WC	2.20	1	1	2.20	1	2.20	1	2.2	1	2.20	0.8	1.76	1	2.20	0.8	1.76	1	2.20	0	0	0	0.00	0	0	
VE-07 Sprinkler room	1.50	1	1	1.50	1	1.50	1.00	1.5	1	1.50	0.8	1.2	1	1.50	0.8	1.2	1	1.50	0.80	1.2	1	1.50	0.8	1.2	
VS-08 Hydraulic pack fore	0.55	1	1	0.55	1	0.55	1.00	0.55	1	0.55	0.8	0.44	1	0.55	0.8	0.44	1	0.55	0.80	0.44	0	0.00	0	0	
V S-09 Hydraulic pack aft	0.55	1	1	0.55	1	0.55	1.00	0.55	1	0.55	0.8	0.44	1	0.55	0.8	0.44	1	0.55	0.80	0.44	0	0.00	0	0	
IOwer garage fan fore/aft	7.50	2	2	15.00	2	15.00	1.00	15	4	30.00	0.8	24	1	7.50	0.8	6	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	
Fore E/R fans 1-2& aft 3-4	5.00	4	4	20.00	4	20.00	1.00	20	2	10.00	0.8	8	4	20.00	0.8	16	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	
GROUP PAGE 4 TOTAL KW				94.30				79.30				64.44				56					21.48			1.20	

Εικόνα 24 : Πίνακας Κατανάλωσης 3

Σχεδιασμός Συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου
με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου από κυψέλες καυσίμου

APPARATUS GROUP	K/W	UNITS		K/W	STAND BY				AT PORT				AT SEA				SHORE CONNECTION				EMERGENCY			
MISCELLANEOUS		TOTAL	USE	TOTAL	USE	K/W	fs	TOTAL	USE	K/W	fs	TOTAL	USE	K/W	fs	TOTAL	USE	K/W	fs	TOTAL	USE	K/W	fs	TOTAL
Rescue boat	5	1	1	5.00	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	1	5.00	0.5	2.5
Sprinkler pumpfor Acc.	30.00	1	1	30.00	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	1	30.00	0.8	24
Elevator	15	1	1	15.00	1	15.00	0.7	10.5	1	15.00	0.3	4.5	0	0.00	0	0	1	15.00	0.3	4.5	0	0.00	0	0
16mps Hydraulic pack fore""ft	30.00	2	1	60.00	2	60.00	0.5	30	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	1	30.00	0	0
General Service battery charger	5	1	1	5.00	1	5.00	1.00	5	1	5.00	1.00	5	1	5.00	1.00	5	1	5.00	1.00	5	0	0.00	0	0
Em' /cy lights trans.40KVA'0,8	32.00	1	1	32.00	1	32.00	0.00	0	1	32.00	0.00	0	1	32.00	0.00	0	1	32.00	0.00	0	1	32.00	0.8	25.6
Main Transformer 60 KVA'0,8	48	2	1	96.00	1	48.00	1.00	48	1	48.00	0.50	24	1	48.00	0.60	28.8	1	48.00	0.5	24	0	0.00	0.00	0
Windlass	30	1	1	60.00	2	60.00	0.5	30	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	1	30.00	0	0
GROUP 4 TOTAL								78				33.5				33.5				33.5				52.1

Εικόνα 25 : Πίνακας Κατανάλωσης 4

GROUP	APPARATUS	STAND BY	AT PORT	AT SEA	SHORE CONNECTION	EMERGENCY
1	MACHINERY AFT.	33.92	7.55	20.60	9.11	0.00
2	MACHINERY FORE	32.65	6.95	6.55	8.05	12.00
3	VENTILATION-A/C UNITS	79.30	64.44	56.44	21.48	1.20
4	MISCELLANEOUS	78.00	33.50	56.00	33.50	52.10
	TOTAL (KW)	223.87	112.44	139.59	72.14	65.30
	LOAD POWER FACTOR (0,8)	179.10	89.95	111.67	57.71	52.24
FINAL TOTAL (KW)		179.10	89.95	111.67	57.71	52.24

Εικόνα 26 : Συνολικός Πίνακας Κατανάλωσης

Μέσα από τους υπολογισμούς βλέπουμε ότι για την κατάσταση για την οποία ενδιαφερόμαστε, δηλαδή για το shore connection, έχουμε συνολικό φορτίο 57,71 KW.

Καταλήγουμε λοιπόν ότι το σύστημα το οποίο θα πρέπει να εγκαταστήσουμε που θα αποτελείται από κυψέλες καυσίμου, θα έχει την δυνατότητα να παράγει ισχύ μεγαλύτερη από την απαιτούμενη.

6.3 Επιλογή Συστήματος Κυψέλης Καυσίμου

Για την επιλογή κατάλληλου συστήματος κυψελών καυσίμου, έγινε έρευνα μεταξύ των μεγαλύτερων κατασκευαστών κυψελών καυσίμου στο κόσμο, και επικοινωνήσαμε και με ορισμένους, έτσι ώστε να βρεθεί το κατάλληλο σύστημα.

Τελικά, επιλέχθηκε η εγκατάσταση 2 κυψελών καυσίμου της PowerCellution, η κάθε μια από τις οποίες έχει την δυνατότητα να παράγει 30 KW ισχύ.

Το σύστημα αυτό απαιτεί για την λειτουργία του καθαρό υδρογόνο, με μία πίεση παροχής στα 8-12 bar και διαθέτει operational lifetime 10000 ώρες.

Με συντελεστή απόδοσης το 57%, θα έχει την δυνατότητα να παράγει ηλεκτρισμό στα 160V / 200 A, ενώ έχει την δυνατότητα να λειτουργία σε δίκτυα μεταξύ 120 – 225 V τάση.

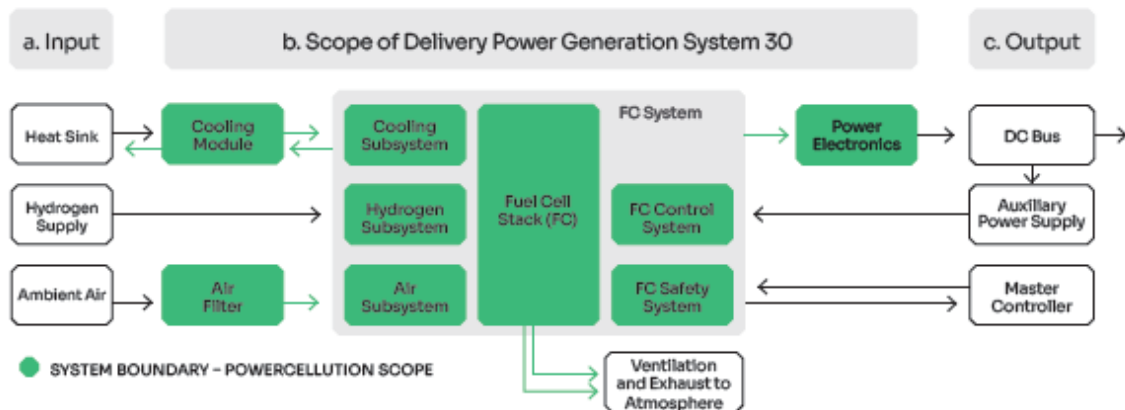
Επιλέχθηκε αυτό το σύστημα λόγω του πλεονεκτήματος του σε θέμα διαστάσεων και βάρους έναντι άλλων κατασκευαστών, αλλά και λόγω της ευελιξίας του στη λειτουργία σε ότι αφορά τις τάσεις των δικτύων λειτουργίας. Οι διαστάσεις τις κάθε μίας με 665 x 462 x 696 mm , δίνουν ευελιξία στη κατανομή τους στο χώρο του μπαταριοστασίου με μόλις 150kg βάρους έκαστος.

Stationary

PowerCellution Power Generation System 30

PowerCellution products and services creates electric power based on fuel cells using hydrogen. All solutions based on this system will have minimal environmental impact through a zero emission hydrogen electric system.

Power generation system 30 is a versatile, robust and powerful system. As a midrange generator, it is suitable for integration into both movable and temporary electrical solutions as well as combined heat and power units or back-up generators. The system is based on the PowerCellution V Stack, which is proven to have long durability and stable performance from various successful customer cases.



Scope of supply for standard configuration

Fuel Cell System

Fuel Cell Stack	Converts hydrogen into electrical energy in a clean and efficient way
Hydrogen Subsystem	Regulates incoming hydrogen to the fuel cell stack and recirculating to increase the fuel efficiency
Cooling Subsystem	Manages cooling and produces heat that can be utilized for external uses
Air Subsystem	Regulates incoming air to a specific humidity, flow rate, pressure and temperature
FC Safety System	Passive and active protections based around continuous monitoring and control of the system
FC Control System	Process monitoring and control within the fuel cell system
Cooling Module	Rejects the produced heat through a heat-exchanger to an external system or by a radiator to ambient air
Electronics Module	Converts and stabilizes voltage output from the fuel cell stack
Air Filter	Provides chemical filtration of air feed to match the requirements of the fuel cell stack



HYDROGEN FUEL CELL SOLUTIONS FROM POWERCELL SWEDEN AB

Physical data

Configurations/specification

Max net power	30 kW
Dimensions	665 x 462 x 696 mm
Volume	210 l
Weight	< 150 kg

Performance

Gross output (rated power)	160 V / 200 A
Voltage output	Normal operation 120–225 V, max 330 V
Current output	20–235 A
System heat output (max)	Up to 50 kW + 5 kW ¹
Coolant outlet temperature	80°C
Fuel quality	Pure Hydrogen ¹
Fuel inlet pressure	8–12 bar(g) ²¹
Communication and control	CAN bus
System efficiency (peak, BOL)	57%
System efficiency (rated power, BOL)	37%
Operational lifetime	10 000 h ²²

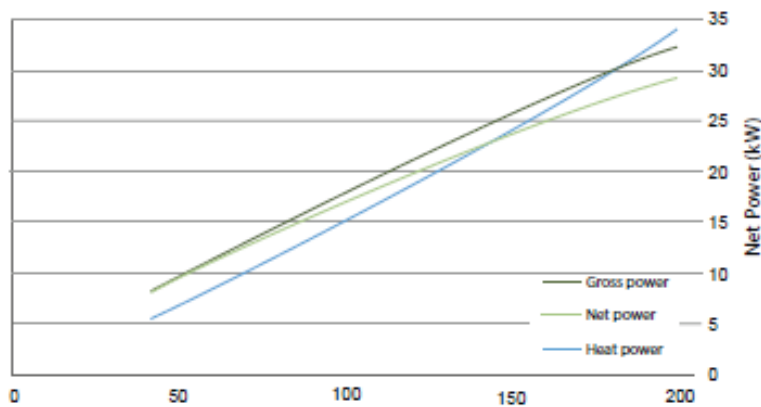


Figure: Performance measured at reference conditions

Environment

Ambient temperature	-30–45 °C ^v
Humidity	5–95% relative humidity; non-condensing
Regulation and standards	E/ECE/324/Rev.2, /Add.99/Rev.2, FMVSS 305-01, ISO 23273:2013, SAE J1766:201401, SAE J2578:201408 ²⁴
IP classification	IP54

Εικόνα 28 : PowerCellution System

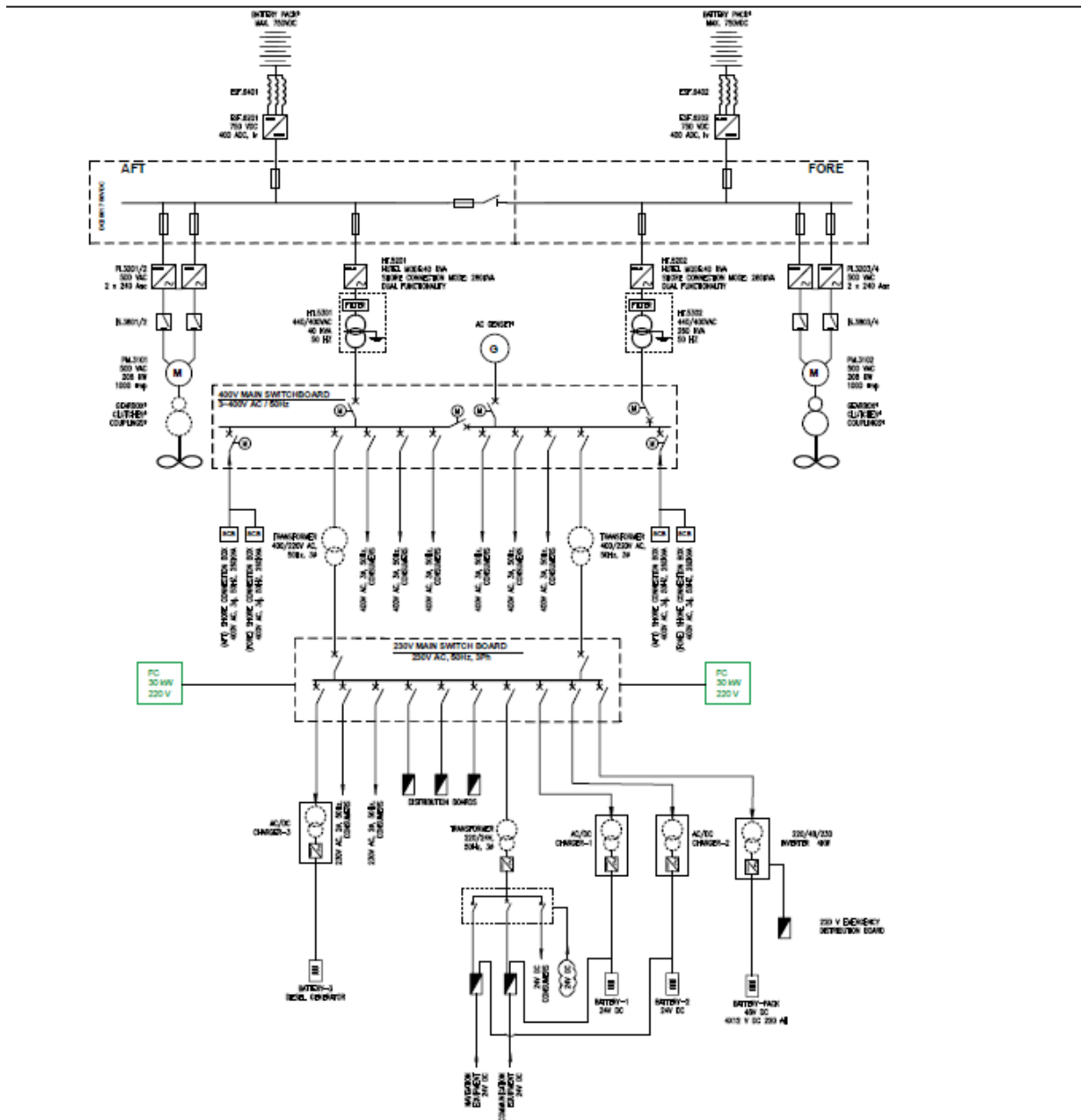
Για λόγους πληρότητας, παρακάτω θα δούμε και ένα σύστημα που προσφέρει ο μεγάλος κατασκευαστής κυψελών καυσίμου Ballard, το οποίο δεν επιλέχθηκε λόγω μεγάλου όγκου εγκατάστασης, αλλά και μεγαλύτερης πολυπλοκότητας του βοηθητικού εξοπλισμού.

PRODUCT DATA SHEET	
FCwave™	
Power to change the world®	
BALLARD	
PRODUCT SPECIFICATIONS	
	FCwave™
Performance	
Rated power	200 kW
Minimum power	30 kW
Peak fuel Efficiency	56 %
Operating voltage	350 - 720 V DC
Rated current ¹	2 x 300 A 1 x 550
System cooling output	Max 65° C
Stack technology	
Heat management	Liquid cooled
H2 Pressure	3,5 - 5 Barg
Physical	
Dimensions (l x w x h) ²	1220 mm x 738 mm x 2200 mm
Weight (estimate) ³	875 kg
Environmental protection	IP44
Engine room (DNV GL CG-0339)	+0 °C - +45 °C
Minimum start-up temperature	0 °C
Short-term storage temp	-40 °C - +80 °C
Reactants and Coolant	
Type	Gaseous hydrogen
Composition	As per SAE spec. J2719
Oxidant	Air
Composition	Particulate, Chemical and Salt filtered
Coolant ⁴	Water or 50/50 glycol
Safety Compliance	
Certifications	DNV-GL compliant
Enclosure	Hydrogen safe enclosure
Monitoring	
Control interface	Ethernet, Can
Emissions	
Exhaust	Zero-emission
<small>¹ System output is 2 x 300 A (1 x 550A output still under development). ² Target size. ³ Includes: framed skid base, fuel cell stacks, plumbing and wiring, H2 enclosure, cooling system, air system, electrical panel, and miscellaneous (sensors, cable tray, etc.). ⁴ Customer coolant type.</small>	

Εικόνα 29 : Ballard System

Παρακάτω βρίσκεται το one line diagram του ηλεκτρικού συστήματος του Fuel Cell Ferry, το οποίο σχεδιάστηκε με την βοήθεια του προγράμματος σχεδίασης Autocad.

Η διάταξη τόσο των μπαταριών, των μετασχηματιστών, αλλά και των υπολοίπων καταναλωτών είναι μία τυπική διάταξη ηλεκτροκίνητου σκάφους με διαφορά όμως την προσθήκη των fuel cells ως συμπληρωματικό μέσω παραγωγής ενέργειας.



Εικόνα 30 : One Line Diagram

6.4 Επιλογή Συστήματος Αποθήκευσης Υδρογόνου

Για την επιλογή κατάλληλου συστήματος αποθήκευσης του καυσίμου, δηλαδή του υδρογόνου, και συνεπώς ενός κατασκευαστή δεξαμενών συμπιεσμένου υδρογόνου, διεξάχθηκε επικοινωνία με διάφορους ανά τον κόσμο κατασκευαστές.

Τελικά επιλέχθηκε η NPROXX , με ένα σύστημα 3 κυλίνδρων, που έχει μέγιστη χωρητικότητα τα 43kg υδρογόνου με εύρος λειτουργίας πίεσης από 10 – 500 bar.



NPROXX

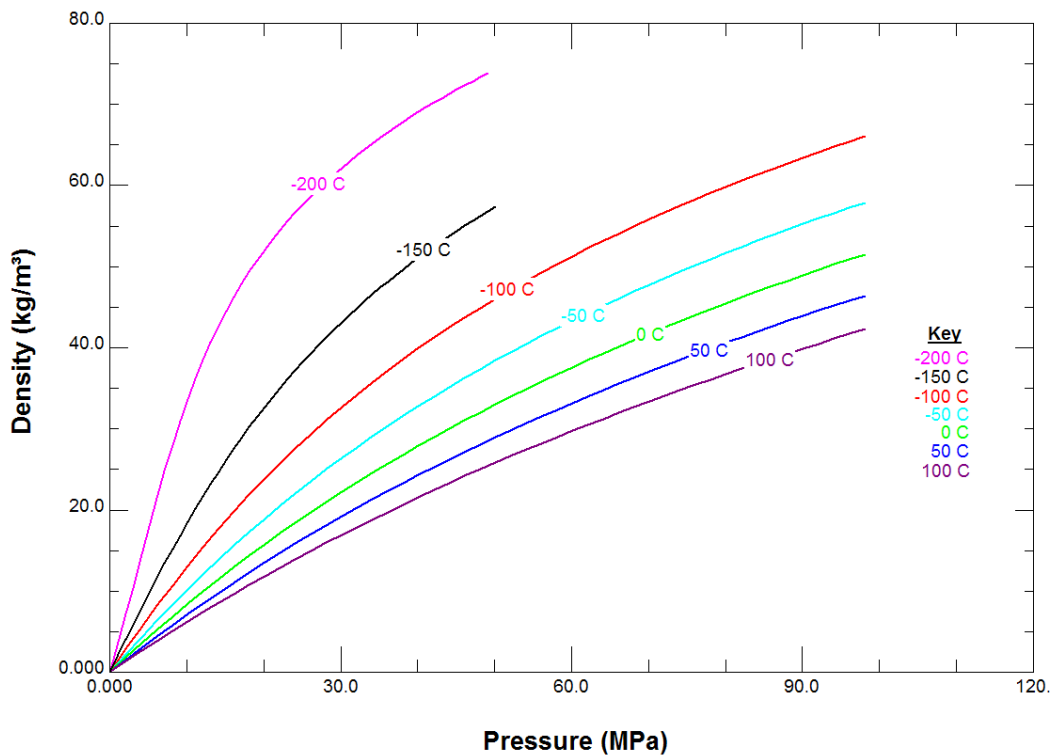
NPROXX B.V.
Business Trade Center Heerlen
Vogt 21
6422 RK Heerlen
Nederland

+31 (0)45 78 20 564
contact@nproxx.com
www.nproxx.com

Factsheet Bundle, 500 bar, TPED

Specification:		
Dimension (L x W x H)	mm	1200 x 1200 x 2700
Certification Storage system		TPED / EN12245
Usable Storage Capacity (maximum pressure 10 - 500 bar, 15°C)	Kg H2	43
Volume	Liter	1400
Weight (empty)	Kg	Appr. 1700
No of pressure cylinders		4
Sections	Pcs	1
No safety Valves	Pcs	No safety valve
No hand valves per section /total	Pcs	1 / 1
Certification hand valves		TPED
Material Pipework		Stainless steel 1.4571
Material Container		Galvanized steel
Housing Sides		Laminated aluminium plates
Top Cover		Open
Bottom Cover		Galvanized steel support plates for mounting pressure cylinders
Mounting position PC		Vertical
Delivery condition		6 bar nitrogen filling
Specification pressure cylinder:		TH540-50
Dimensions		
Diameter x Length	mm x mm	540 x 2398 mm
Pressure cylinder	Composite	Type 4
Certification		PED / 2014/68/EU
Water content at 0 bar per cylinder	Liter	350
Usable capacity H2 (1000 bar - 10 bar) per cylinder	Kg	10,8
Min. working pressure	Bar	10
Max. working pressure	Bar	500
Approved temperature range	°C	-20 - + 85
Lifetime		unlimited

Η πίεση η οποία τελικά θα επιλεγθεί θα πρέπει να καθοριστεί αναλόγως με τις ανάγκες του συστήματος, με τον βοηθητικό εξοπλισμό (σύστημα πτώσης πίεσης στη πίεση λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου) αλλά και την κατανάλωση του συστήματος ανά μονάδα ισχύς. Σύμφωνα με το HydroEpiGen Analysis Resource Center, παρακάτω βλέπουμε την μεταβολή της πυκνότητας του υδρογόνου σε σχέση με την πίεση, για διάφορες θερμοκρασίες αποθήκευσης.



Εικόνα 32 : Hydrogen Density - Pressure Diagram

6.5 Συμπεράσματα

Οι κυψέλες καυσίμου αν και ένα αρκετά υποσχόμενο σύστημα παραγωγής ενέργειας, έχει ακόμη αρκετό δρόμο ούτως ώστε να μπορέσει να διευρυνθεί η χρήση της.

Η έλλειψη υποδομών για ανεφοδιασμό υδρογόνου, είναι ένα από τα θέματα τα οποία θα πρέπει να αντιμετωπιστεί για να μπορέσει να υποστηριχτεί αυτή η τεχνολογία.

Επίσης, η αδυναμία των κυψελών καυσίμου για γρήγορη απόκριση στην μεταβολή των φορτίων, περιορίζουν την χρήση τους σε εφαρμογές με μεταβαλλόμενα φορτία όπως η ηλεκτροπρόωση, ενώ τις καθιστά απολύτως εξαρτώμενες από υπερπυκνωτές ή μπαταρίες δυναμικές καταστάσεις όπου χρειάζονται γρήγορες εναλλαγές στην απαιτούμενη ισχύ.

7 Βιβλιογραφία

1. ‘Electrochemical reactions inside fuel cells’, EOLSS
2. M. Kickulies, Fuel cell power for maritime applications, Fuel Cells Bull. 9 (2005)
3. Fuel Cell Power Systems for marine and offshore applications, November 2019 abs
4. ‘Study on electrical energy storage for ships’ EMSA May 2020
5. ‘Analysing the possibilities of using fuel cells in ships’, Elsevier 20216
6. Ballard Power – Fuel Cell Applications for Marine Vessels
7. PowerCellution – Hydrogen Fuel Cell Technology
8. ‘Fuel Cell Basics’, FCHEA
9. ‘Realising the hydrogen economy’, Power Technology
10. ‘Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells – Sigma-Aldrich