



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

«Σχεδιασμός και λειτουργία πιστοποιημένου εργαστηρίου ελέγχου κυψελών καυσίμου»

Όνοματεπώνυμο : Παπαλάμπρου Δανάη ΑΜ:47698

Επιβλέπων καθηγητής : Δρ. Καβαδίας Α. Κοσμάς

Συνεπιβλέπων : Τζελέπης Στέφανος

Αθήνα, Ιούλιος , 2022



UNIVERSITY OF WEST ATTICA

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

«Design and operation of fuel cells testing and certification laboratory»

Author's full name : Papalamprou Danai Registration number: 47698

Supervisor's full name : Kavadias A. Kosmas

Cosupervisor's full name: Tzelepis Stefanos

Athens, July , 2022

Σχεδιασμός και λειτουργία πιστοποιημένου εργαστηρίου ελέγχου κυψελών καυσίμου

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/A	Όνοματεπώνυμο	Βαθμίδα/Ιδιότητα	Υπογραφή
	Κ. Α Καββαδίας	Αναπληρωτής Καθηγητής	
	Α. Κονδύλη	Καθηγήτρια	
	Δ. Ζαφειράκης	Επίκουρος Καθηγητής	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Παπαλάμπρου Δανάη του Αλεξάνδρου, με αριθμό μητρώου 47698 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα

Παπαλάμπρου Δανάη



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας έχει στραφεί προς την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου, ως μία εναλλακτική τεχνολογία παραγωγής ενέργειας, φιλικής προς το περιβάλλον.

Τη σύγχρονη εποχή, οι διαφορετικοί τύποι κυψελών καυσίμου έχουν εφαρμογές στον τομέα μεταφορών (όπως λεωφορεία, τρένα, υποβρύχια), σε φορητές συσκευές Ισχύος (όπως κάμερες, laptop και φορητές συσκευές ήχου), όπως και συστήματα συμπαραγωγής ενέργειας (Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας για ξενοδοχεία, νοσοκομεία και σπίτια)

Αυτό συνεπάγεται ότι οι κυψέλες καυσίμου υποβάλλονται σε μία διαδικασία πιστοποίησης προτού διατεθούν στο ευρύ κοινό. Μέσα από βιβλιογραφική ανασκόπηση, γίνεται παρουσίαση της αγοράς, των υπάρχοντων προτύπων που αφορούν στις διαδικασίες πιστοποίησης και στην ασφάλεια, αλλά και του κύκλου πιστοποίησης μίας κυψέλης καυσίμου. Παράλληλα, περιγράφονται οι διαδικασίες δοκιμών και ελέγχου που λαμβάνουν χώρα, ώστε να πιστοποιηθεί μία κυψέλη καυσίμου. Τέλος, γίνεται αναφορά στον απαιτούμενο εξοπλισμό, που πρέπει να έχει στην κατοχή του ένα πιστοποιημένο εργαστήριο ελέγχου και πιστοποίησης κυψελών καυσίμου και δίνονται μερικά παραδείγματα του διαθέσιμου εξοπλισμού στην αγορά.

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ :

Κυψέλες καυσίμου τύπου PEM, Εργαστήριο δοκιμών και πιστοποίησης κυψελών καυσίμου, Διαδικασίες πιστοποίησης κυψελών καυσίμου, Ασφάλεια κυψελών καυσίμου, Κύκλος πιστοποίησης, Υδρογόνο

ABSTRACT

In recent decades, the scientific community has turned its attention to fuel cell technology as an alternative, environmentally friendly energy production technology.

In modern times, different types of fuel cells have applications in Automotive applications (such as buses, trains, submarines), Portable Power Devices (such as cameras, laptops and portable audio devices) and Cogeneration systems (Electricity and heat generation for hotels, hospitals and homes)

This means that fuel cells are subjected to a certification process before being made available to the general public. Subsequently, the market, the existing standards concerning the certification procedures and safety, but also the certification cycle of a fuel cell are being presented. At the same time, the test procedures that take place in order to certify a fuel cell are described. Finally, reference is made to the required equipment, which must be owned by a certified fuel cell testing and certification laboratory, and some examples of the equipment available on the market are given.

KEY WORDS :

PEM fuel cells, Fuel cell testing and certification laboratory, Fuel cell certification procedures, Fuel cell safety, Certification cycle, Hydrogen

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
Κεφάλαιο 1^ο: Δομή και Αρχή Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου	15
Κεφάλαιο 2^ο : Είδη Κυψελών Καυσίμου και Αγορά	17
2.1. Είδη Κυψελών Καυσίμου - Εφαρμογές	17
2.2. Αγορά	18
2.2.1. Εξαγωγές ανά Ήπειρο	19
2.2.2. Εξαγωγές ανά τομέα εφαρμογής.....	20
2.2.3. Σταθμοί Ανεφορδιασμού Υδρογόνου (HRS –Hydrogen Refuelling Stations)	21
Κεφάλαιο 3^ο : Κύκλος Πιστοποίησης – Κανονισμοί	23
3.1. Απαιτούμενη Τεκμηρίωση (Εγγραφα)	23
3.2. Πρότυπα	23
3.3. Ασφάλεια	24
3.4. Κύκλος πιστοποίησης	25
Κεφάλαιο 4^ο : Διαδικασίες Ελέγχου και Πιστοποίησης	27
4.1. Διαδικασίες Ελέγχου σε Μοναδιαία Κυψέλη Καυσίμου	27
4.1.1. Έλεγχος ευαισθησίας σε διάφορες τιμές σχετικής υγρασίας	27
4.1.2. Καμπύλη πόλωσης μοναδιαίας κυψέλης καυσίμου	33
4.1.3. Δοκιμή επιταχυνόμενης γήρανσης.....	37
4.1.4. Μακροπρόθεσμη δοκιμή αντοχής μοναδιαίας κυψέλης.....	41
4.1.5. Δυναμικοί κύκλοι φόρτισης για δοκιμή γήρανσης της κυψέλης καυσίμου.....	45
4.1.6. Διαδικασία ελέγχου για μοναδιαία κυψέλη στον τομέα μεταφορών	50
4.2. Διαδικασίες Ελέγχου σε Συστοιχία Κυψελών Καυσίμου	65
4.2.1 Καμπύλη πόλωσης συστοιχίας PEMFC.....	65
4.2.2 Διαδικασία ελέγχου για εφαρμογές οικιακών συστημάτων	70
Κεφάλαιο 5^ο : Εξοπλισμός Πιστοποιημένου Εργαστηρίου	74
5.1 Απαραίτητα τεχνικά χαρακτηριστικά εξοπλισμού	74
5.2 Διαθέσιμος εξοπλισμός στην αγορά	76
Κεφάλαιο 6^ο : Συμπεράσματα	81
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	82
Παράρτημα Α: Υπολογισμός Ογκομετρικών Ρυθμών ροής Αντιδρώντων αερίων	83
Παράρτημα Β: Μέθοδος μέτρησης για 3^ο βήμα ελέγχου συστοιχίας	84
Παράρτημα Γ: Πρωτόκολλο Συλλογής Δεδομένων	86

Παράρτημα Δ: Πρότυπο Τεχνικής Έκθεσης.....	88
Παράρτημα Ε : Μέθοδοι εφαρμογής των δυναμικών κύκλων.....	91
Παράρτημα ΣΤ : Διαδικασία αναπαραγωγής Καμπύλης Πόλωσης.....	93

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1 : Σχηματική Απεικόνιση μίας κυψέλης καυσίμου

Σχήμα 4.1 : Σχηματική απεικόνιση εφαρμογής κύκλου ανάλυσης δομής κυψέλης

Σχήμα 4.2 : Νέος Ευρωπαϊκός Κύκλος Οδήγησης

Σχήμα 4.3 : Εφαρμογή του νέου ευρωπαϊκού κύκλου οδήγησης

Σχήμα 4.4 : Τροποποιημένος κύκλος εφαρμογής του ευρωπαϊκού κύκλου οδήγησης

Σχήμα 4.5 : Δείγμα προφίλ φορτίου για Παροδικό ηλεκτρικό έλεγχο της απόδοσης

Σχήμα 5.1 : Περιβάλλον Δοκιμών

Σχήμα 5.2 : Διάταξη ελέγχου κυψελών καυσίμου TSFC PRO-601

Σχήμα 5.3 : LeanCat OBT - Διάταξη Ελέγχου συστοιχίας ανοιχτής καθόδου

Σχήμα 5.4 : LeanCat PBT - Διάταξη ελέγχου μοναδιαίας κυψέλης

Σχήμα 5.5 : LeanCat PTS-10 - Διάταξη ελέγχου για μοναδιαία κυψέλη και μικρές συστοιχίες

Σχήμα 5.6 : LeanCat PTS – 100 – Διάταξη Ελέγχου συστοιχιών

Σχήμα 7.1 : Χρονοδιάγραμμα συλλογής δεδομένων

Σχήμα 7.2 : Ποιοτικό προφίλ τάσης και ρεύματος συστοιχίας

Σχήμα 7.3 : Προφίλ πυκνότητας ρεύματος

Σχήμα 7.4 : Προφίλ πυκνότητας ρεύματος

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1 : Είδη κυψελών καυσίμου

Πίνακας 2.2 : MW ανά περιοχή

Πίνακας 2.3 : MW Εξαγωγών ανά τομέα εφαρμογής σε παγκόσμια κλίμακα

Πίνακας 3.1 : Χαρακτηριστικά του αντικειμένου ελέγχου

Πίνακας 3.2 : Ενεργά Εργαστήρια πιστοποίησης κυψελών καυσίμου

Πίνακας 4.1 : Μεταβλητές τιμές εισόδου ελέγχου ευαισθησίας στην υγρασία

Πίνακας 4.2 : Σταθερές τιμές εισόδου ελέγχου ευαισθησίας στην υγρασία

Πίνακας 4.3 : Τιμές Εξόδου ελέγχου ευαισθησίας στην υγρασία

Πίνακας 4.4 : Αλληλουχία βημάτων

Πίνακας 4.5 : Μεταβλητές τιμές εισόδου με σταθερή τιμή στοιχειομετρίας

Πίνακας 4.6 : Σταθερές τιμές εισόδου με σταθερή τιμή στοιχειομετρίας

Πίνακας 4.7 : Μεταβλητές τιμές εισόδου με σταθερό ρυθμό ροής

Πίνακας 4.8 : Σταθερές τιμές εισόδου με σταθερό ρυθμό ροής

Πίνακας 4.9 : Τιμές Εξόδου ελέγχου καμπύλης πόλωσης

Πίνακας 4.10 : Μεταβλητές τιμές εισόδου δοκιμής επιταχυνόμενης γήρανσης

Πίνακας 4.11 : Σταθερές τιμές εισόδου δοκιμής επιταχυνόμενης γήρανσης

Πίνακας 4.12 : Τιμές εξόδου δοκιμής επιταχυνόμενης γήρανσης

Πίνακας 4.13 : Μεταβλητές τιμές εισόδου μακροπρόθεσμης δοκιμής αντοχής

Πίνακας 4.14 : Σταθερές τιμές εισόδου μακροπρόθεσμης δοκιμής αντοχής

Πίνακας 4.15 : Τιμές εξόδου μακροπρόθεσμης δοκιμής αντοχής

Πίνακας 4.16 : Μεταβλητές τιμές εισόδου δοκιμής γήρανσης

Πίνακας 4.17 : Σταθερές τιμές εισόδου δοκιμής γήρανσης

Πίνακας 4.18 : Τιμές εξόδου δοκιμής γήρανσης

Πίνακας 4.19 : Τιμές εισόδου δοκιμών στον τομέα μεταφορών

Πίνακας 4.20 : Τιμές εισόδου δοκιμής θερμικής καταπόνησης κυψέλης καυσίμου

Πίνακας 4.21 : Συνδυασμοί ρυθμίσεων τιμών υγρασίας

Πίνακας 4.22 : Τιμές εισόδου δοκιμής ευαισθησίας στις διαφορετικές τιμές υγρασίας

Πίνακας 4.23 : Τιμές εισόδου δοκιμής καταπόνησης σε σχέση με τις τιμές πίεσης αντιδρώντων

Πίνακας 4.24 : Τιμές εισόδου δοκιμής καταπόνησης σε σχέση με τις τιμές στοιχειομετρίας

Πίνακας 4.25 : Μεταβλητές τιμές εισόδου δοκιμής καμπύλης πόλωσης συστοιχίας

Πίνακας 4.26 : Σταθερές τιμές εισόδου δοκιμής καμπύλης πόλωσης συστοιχίας

Πίνακας 4.27 : Τιμές Εξόδου δοκιμής καμπύλης πόλωσης συστοιχίας

Πίνακας 5.1 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά απαιτούμενης Διάταξης Ελέγχου

Πίνακας 5.2 : Τεχνικά χαρακτηριστικά διάταξης ελέγχου TSFC PRO-601

Πίνακας 5.3 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά Διάταξης Συστοιχίας ανοιχτής καθόδου

Πίνακας 5.4 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά Διάταξης Ελέγχου μοναδιαίας κυψέλης

Πίνακας 5.5 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά Διάταξης Ελέγχου μοναδιαίας κυψέλης – μικρών συστοιχιών

Πίνακας 7.1 : Ιδιότητες αντιδρώντων αερίων

Πίνακας 7.2 : Εκφράσεις Ογκομετρικού ρυθμού ροής αντιδρώντων αερίων

Πίνακας 7.3 : Τιμές πυκνότητας ρεύματος για έλεγχο συστοιχίας

Πίνακας 7.4 : Κριτήρια επείγουσας ματαίωσης ελέγχου

Πίνακας 7.5 : Εκφράσεις των χρονικών μεταβλητών χρονοδιαγράμματος συλλογής δεδομένων

Πίνακας 7.6 : Γενικές πληροφορίες τεχνικής έκθεσης

Πίνακας 7.7 : Περιγραφή του αντικείμενου ελέγχου

Πίνακας 7.8 : Πρότυπο πίνακα τιμών εισόδου και εξόδου ελέγχου

Πίνακας 7.9 : Προτεινόμενα σημεία καμπύλης πόλωσης

ΛΙΣΤΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

A	Ενεργή επιφάνεια της κυψέλης καυσίμου
F	Η σταθερά του Faraday ($F=96485.3 \text{ C/mol}$)
I	Ηλεκτρικό ρεύμα κυψέλης καυσίμου
I_{max}	Μέγιστη τιμή ηλεκτρικού ρεύματος κυψέλης καυσίμου
M	Μοριακή μάζα
P	Ηλεκτρική ισχύς κυψέλης καυσίμου
P_k	Ηλεκτρική ισχύς που σχετίζεται με το διάστημα k
Q_{cool}	Ρυθμός ροής ψυκτικού υγρού
Q_v	Ογκομετρικός ρυθμός ροής
$Q_{v,\lambda}$	Ογκομετρικός ρυθμός ροής ενός αντιδρώντος αερίου υπό τιμή στοιχειομετρίας λ σε STP συνθήκες
$Q_{v,x}$	Ογκομετρικός ρυθμός ροής υγρού κυψελών καυσίμου x (δηλαδή ξηρό αντιδρόν αέριο, αέριο καυσίμου ή οξειδωτικό μέσο) υπό συνθήκες STP
$Q_{v,x,\lambda}$	Ογκομετρικός ρυθμός ροής του αντιδρώντος αερίου x υπό τιμή στοιχειομετρίας λ σε συνθήκες STP
$Q_{v,x,min}$	Ελάχιστος ογκομετρικός ρυθμός ροής αντιδρώντος x
$RH_{x,y}$	Σχετική υγρασία του αντιδρώντος αερίου x στη θέση y (δηλαδή inlet=είσοδος ή outlet=έξοδος)
T	Θερμοκρασία
$T_{x,y}$	Θερμοκρασία υγρού κυψελών καυσίμου x στη θέση y
T_A	Θερμοκρασία περιβάλλοντος
$T_{dew,x,y}$	Θερμοκρασία σημείου δρόσου του αντιδρώντος αερίου x στη θέση y
T_C	Θερμοκρασία κυψέλης καυσίμου
V	Τάση κυψέλης καυσίμου
XO_2	Περιεκτικότητα οξυγόνου στο οξειδωτικό μέσο
XH_2	Περιεκτικότητα υδρογόνου στο αέριο καύσιμο
i	Πυκνότητα ρεύματος κυψέλης καυσίμου ($i = I / A$)
K	Το διάστημα k που αντιστοιχεί στο σημείο ρύθμισης πυκνότητας ρεύματος k κατά τη διάρκεια της μέτρησης της δοκιμής εξόδους
l	Δείκτης απόκτησης δεδομένων ή αριθμός σημείων δεδομένων που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του t_{acq}
m	Συνολικός αριθμός σημείων καταγραφής δεδομένων ανά διάστημα k
\dot{n}	Μοριακός ρυθμός ροής
P_A	Πίεση περιβάλλοντος
$P_{x,y}$	Πίεση αντιδρώντος αερίου x στη θέση y
t	Διάρκεια, περίοδος ή χρόνος
t_{acq}	Διάρκεια λήψης δεδομένων στο διάστημα k
t_{dwell}	Ελάχιστος χρόνος παραμονής μεταξύ δύο σημείων ρύθμισης πυκνότητας ρεύματος που αντιστοιχούν σε διάστημα k και k+1
t_{eq}	Διάρκεια στην αρχή του διαστήματος k για να επιτραπεί στις εισόδους και εξόδους δοκιμής σταθεροποιημένη κατάσταση λειτουργίας, κατά την αλλαγή του φορτίου
t_k	Ο χρόνος που πέρασε για τη μέτρηση των εξόδων δοκιμής στην αρχή του διαστήματος k
$t_{k,l}$	Ο χρόνος που πέρασε για τη μέτρηση των εξόδων δοκιμής για την καταγραφή l αριθμού σημείων δεδομένων στο διάστημα k
t_{offs}	Διάρκεια μεταξύ του τέλους της καταγραφής δεδομένων στο διάστημα k και της έναρξης της απόκτησης δεδομένων στο διάστημα k+1, ώστε να ληφθούν υπόψη, όταν είναι απαραίτητο, καθυστερήσεις

t_{smp}	Διάρκεια δειγματοληψίας στο διάστημα k
t_{stab}	Διάρκεια για σταθεροποίηση κατάστασης λειτουργίας των εισόδων και εξόδων ελέγχου σύμφωνα με τα καθορισμένα τους κριτήρια πριν από την καταγραφή δεδομένων
z	Αριθμός ηλεκτρονίων που ανταλλάσσονται στην αντίδραση κυψελών καυσίμου για ένα mol αντιδραστηρίου
λ_x	Στοιχειομετρικός λόγος του ρυθμού ροής του αντιδρώντος αερίου x που παρέχεται στην κυψέλη προς αυτόν που θεωρητικά απαιτείται για τη διατήρηση του ηλεκτρικού ρεύματος ή του ηλεκτρικού φορτίου της κυψέλης καυσίμου που εφαρμόζεται
φ_{H_2}	Ογκομετρική περιεκτικότητα σε υδρογόνο του αερίου ξηρού καυσίμου
φ_{O_2}	Ογκομετρική περιεκτικότητα σε οξυγόνο ξηρού οξειδωτικού αερίου
ρ	Πυκνότητα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των κυψελών καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (τύπου PEM) και πιο συγκεκριμένα, η μελέτη των διαδικασιών που διέπουν την πιστοποίηση τους.

Η κυψέλη καυσίμου είναι μια «συσσκευή» που μετατρέπει συνεχώς τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική, μέσω ηλεκτροχημικής αντίδραση. Η λειτουργία της ομοιάζει με αυτή των συσκευών ηλεκτρόλυσης. Δύο από τα πλεονεκτήματα που έχει η κυψέλη καυσίμου είναι η υψηλής απόδοσης ενέργεια που παράγει, καθώς και οι αρκετά χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

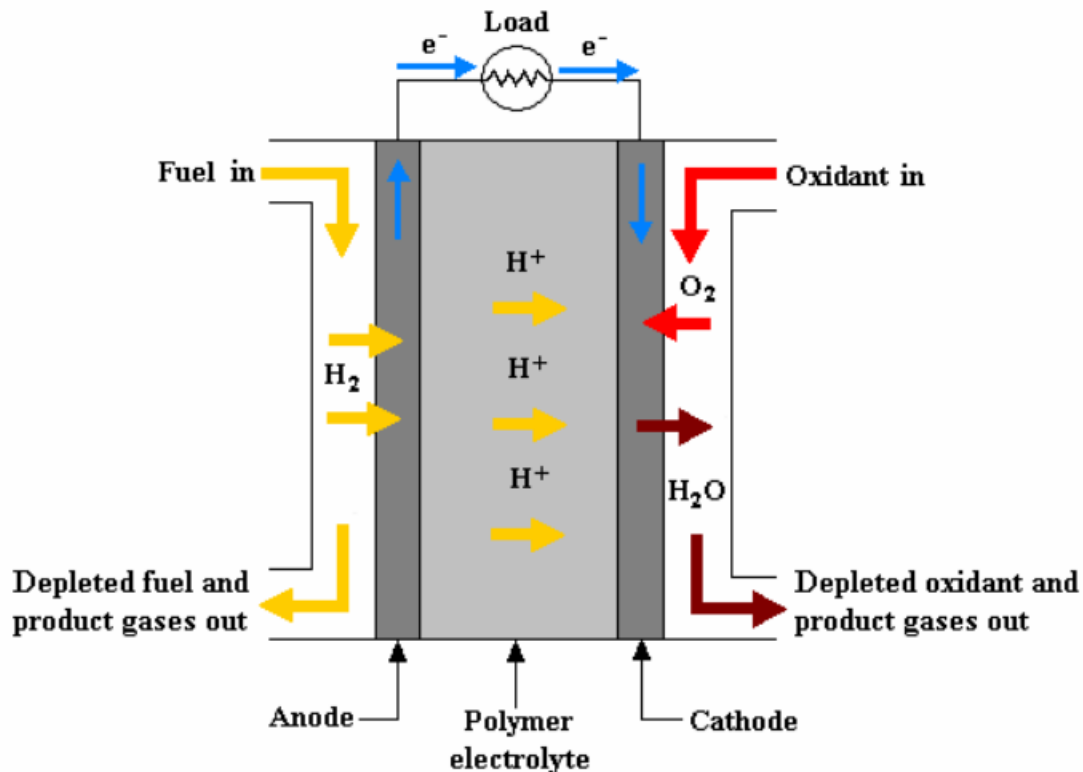
Την τελευταία δεκαετία, οι κυψέλες καυσίμου γνώρισαν σημαντική τεχνολογική ανάπτυξη, αυξάνοντας όλο και περισσότερο το μερίδιό τους στην αγορά. Αυτό τις καθιστά μία πιθανή λύση για τη μείωση της χρήσης συμβατικών καυσίμων, αλλά και απεξάρτησης από αυτά. Έτσι, είναι σημαντικό να ακολουθείται μία διαδικασία πιστοποίησης, ώστε να εξασφαλίζεται η συνολική ποιότητα και η ασφάλεια κατά την χρήση τους. Η διαδικασία πιστοποίησης φέρεται εις πέρας από κοινοποιημένους φορείς, δηλαδή πιστοποιημένα εργαστήρια ελέγχου και πιστοποίησης κυψελών καυσίμου, τα οποία με τη σειρά τους είναι σημαντικό να υφίστανται και να παρουσιάζουν ανάπτυξη.

Η εργασία αποτελείται από 6 κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται η δομή και αρχή λειτουργίας μίας κυψέλης καυσίμου. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα διαφορετικά είδη κυψελών καυσίμου και στις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται, καθώς και αναλύονται κάποια στοιχεία της αγοράς. Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθενται πληροφορίες για τον κύκλο πιστοποίησης μίας κυψέλης καυσίμου και τα απαραίτητα αρχεία-τεκμηρίωση που θα πρέπει να έχει στην κατοχή του ένα πιστοποιημένο εργαστήριο ελέγχου κυψελών καυσίμου. Ακόμη γίνεται αναφορά στα διαθέσιμα πρότυπα που αφορούν στην ασφαλή λειτουργία, αλλά και την πιστοποίησή τους. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των διαδικασιών ελέγχου και πιστοποίησης μοναδιαίας κυψέλης και συστοιχίας κυψελών καυσίμου. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα απαιτούμενα τεχνικά χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχει ο εξοπλισμός του εργαστηρίου, ή αλλιώς διάταξη ελέγχου, και δίνονται μερικά παραδείγματα του διαθέσιμου εξοπλισμού που μπορεί να καλύψει ένα τέτοιο εργαστήριο. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 1^ο : Δομή και Αρχή Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου

Το 1839, ο William Grove ανακάλυψε τη βασική αρχή λειτουργίας των κυψελών καυσίμου αντιστρέφοντας την ηλεκτρόλυση νερού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από υδρογόνο και οξυγόνο.

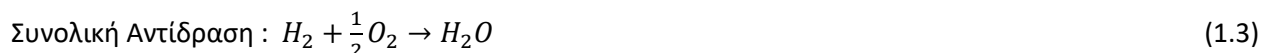
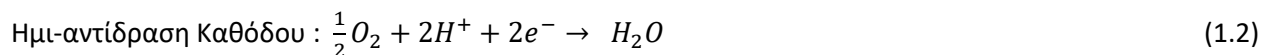
Η κυψέλη καυσίμου είναι μια ηλεκτροχημική «συσκευή» που μετατρέπει συνεχώς τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια, νερό και θερμότητα για όσο διάστημα παρέχεται καύσιμο – ιδανικά υδρογόνο- και οξειδωτικό μέσο. Στις κυψέλες καυσίμου δεν υφίσταται καύση, αλλά μετατροπή ενέργειας μέσω ηλεκτροχημικών εξισώσεων. Οι κυψέλες καυσίμου είναι εξαιρετικά ενεργειακά αποδοτικές (40-60%) και παραγόμενη θερμότητα κατά τη διάρκεια των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση, π.χ. νερού ή χρήση σε κύκλο ψύξης. Οι κυψέλες καυσίμου παρουσιάζουν ομοιότητες τόσο με τις μπαταρίες, με τις οποίες μοιράζονται την ηλεκτροχημική φύση της διαδικασίας παραγωγής ενέργειας, όσο και με τους κινητήρες που -σε αντίθεση με τις μπαταρίες- λειτουργούν συνεχώς καταναλώνοντας καύσιμο. Εν αντιθέσει με τους κινητήρες ή τις μπαταρίες, η κυψέλη καυσίμου δεν χρειάζεται επαναφόρτιση και λειτουργεί αθόρυβα. Σε μια κυψέλη καυσίμου η χημική ενέργεια παρέχεται από το καύσιμο, ενώ παράλληλα παρέχεται οξυγόνο (μέσω αέρα) και μπορεί να λειτουργεί ιδανικά επ' αόριστον.



Σχήμα 1 : Σχηματική Απεικόνιση μίας κυψέλης καυσίμου (πηγή : The electrochemical society, [Electrochemistry Encyclopedia – PEM fuel cells](#))

Ο πυρήνας μιας κυψέλης καυσίμου είναι μία πολυμερής, αγωγίμη μεμβράνη πρωτονίων (ή ηλεκτρολύτης). Όπως γίνεται διακριτό στο Σχήμα 1, σε κάθε πλευρά της μεμβράνης υπάρχει ένα ηλεκτρόδιο, ένα θετικό (κάθοδος) και ένα αρνητικό (άνοδος). Τα αέρια αντιδρώντα (υδρογόνο και οξυγόνο) μεταφέρονται με συναγωγή και διάχυση στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων. Τα ηλεκτρόδια πρέπει να είναι πορώδη, για να διευκολύνεται η διαδικασία μεταφοράς των αντιδρώντων αερίων, προκειμένου να πραγματοποιούνται οι αντιδράσεις, στη διεπαφή μεταξύ των ηλεκτροδίων και της μεμβράνης. Τα ηλεκτρόδια συνήθως αποτελούνται από το στρώμα διάχυσης αερίου και μία λεπτή επικάλυψη καταλύτη. Τα στρώματα καταλύτη μπορεί να είναι ένα μέρος του πορώδους ηλεκτροδίου ή της μεμβράνης, γεγονός που εξαρτάται από τη μέθοδο παραγωγής. Ως καταλύτες χρησιμοποιούνται υλικά που ανήκουν στην οικογένεια των ευγενών μετάλλων. Το πιο σύνηθες υλικό είναι αυτό της πλατίνας, παρουσιάζοντας υψηλή ηλεκτροχημική δραστηριότητα. Μέσω της μεμβράνης τύπου PEM πραγματοποιείται μεταφορά των κατιόντων υδρογόνου από την άνοδο στην κάθοδο ενώ ταυτόχρονα εμποδίζει τα ηλεκτρόνια να διέλθουν μέσα από αυτή.

Παρακάτω παρατίθενται οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα:



Όπως φαίνεται, στην άνοδο πραγματοποιείται η οξείδωση του υδρογόνου, ενώ στην κάθοδο η αναγωγή του οξυγόνου. Τα απελευθερωμένα ηλεκτρόνια μεταφέρονται μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος, ώστε να ανασυνδυαστούν στο άλλο ηλεκτρόδιο με τα εξερχόμενα από τον ηλεκτρολύτη κατιόντα υδρογόνου, δημιουργώντας έτσι ηλεκτρισμό. Οι αλληπάλληλες στρώσεις της μεμβράνης που βρίσκονται ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια ονομάζονται σύστημα μεμβράνης ηλεκτροδίου ή ΜΕΑ (Membrane Electrode Assembly).

Το σύστημα μεμβράνης ηλεκτροδίου, στη συνέχεια, τοποθετείται μεταξύ των συλλεκτών/διαχωριστικών πλακών. Ονομάζονται συλλέκτες, επειδή συλλέγουν και άγουν ηλεκτρικό ρεύμα, και διαχωριστές, επειδή σε συστοιχία κυψελών καυσίμου διαχωρίζουν τα αέρια στις παρακείμενες κυψέλες. Ταυτόχρονα, σε συστοιχία συνδέουν φυσικά/ηλεκτρικά την κάθοδο μιας κυψέλης με την άνοδο της διπλανής και γι' αυτό ονομάζονται και διπολικές πλάκες. Παρέχουν τις οδούς ροής των αντιδρώντων αερίων (τα λεγόμενα κανάλια ροής) και παρέχουν επίσης τη δομική ακαμψία του κελιού.

Κεφάλαιο 2^ο : Είδη Κυψελών Καυσίμου και Αγορά

2.1. Είδη Κυψελών Καυσίμου - Εφαρμογές

Οι κυψέλες καυσίμου διαχωρίζονται, κυρίως, βάσει είδους ηλεκτρολύτη και θερμοκρασίας λειτουργίας. Ωστόσο παρουσιάζουν και άλλες διαφορές όσον αφορά το τυπικό μέγεθος συστοιχίας, βαθμό απόδοσης αλλά και πεδίο εφαρμογής. Στον παρακάτω πίνακα διακρίνονται τα διαφορετικά είδη:

Πίνακας 2.1 : Είδη κυψελών καυσίμου (πηγή: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/comparison-fuel-cell-technologies>)

	Κυψέλη Καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM)	Αλκαλική Κυψέλη Καυσίμου (AFC)	Κυψέλη Καυσίμου φωσφορικού Οξέως (PAFC)	Κυψέλη Καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (MCFC)	Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)
Ηλεκτρολύτης	Στερεά πολυμερής μεμβράνη	Υδατικό διάλυμα υδροξειδίου του καλίου	Σταθεροποιημένο φωσφορικό οξύ	Αλκαλικό-ανθρακικό άλας	Κεραμικό οξείδιο
Θερμοκρασία Λειτουργίας (°C)	50 – 100	70 – 100	150 – 200	600 – 700	700 - 1000
Τυπικό Μέγεθος Συστοιχίας	1 - 100 kW	1 - 100 kW	5 - 400 kW <10 kW (πολυμερής μεμβράνη)	100 kW – 3 MW	1 kW – 2 MW
Βαθμός Απόδοσης	40% - 60%	60%	40%	50%	60%
Εφαρμογές	Εφεδρική Ισχύς, Τομέας μεταφορών, Ειδικά Οχήματα	Στρατιωτικές Εφαρμογές, Εφαρμογές στο Διάστημα, Εφεδρική Ισχύς, Τομέας Μεταφορών	Καταναμημένη παραγωγή ενέργειας	Χρήση σε ηλεκτρικές εφαρμογές, Καταναμημένη παραγωγή ενέργειας	Βοηθητικό σύστημα ισχύος, Χρήση σε ηλεκτρικές εφαρμογές, Καταναμημένη παραγωγή ενέργειας

Για σύνθετα προϊόντα, όπως οι κυψέλες καυσίμου, είναι σημαντικό να ακολουθείται μία διαδικασία πιστοποίησης κατά την κατασκευή και διάθεση τους στο ευρύ κοινό, ώστε να εξασφαλίζεται η συνολική ποιότητα, αλλά και η ασφάλεια κατά την χρήση τους. Στην παρούσα εργασία αναλύεται η διαδικασία πιστοποίησης κυψελών καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM), οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως στον τομέα μεταφορών.

2.2. Αγορά

Τα επόμενα χρόνια, αναμένεται αξιοσημείωτη ανάπτυξη των κυψελών καυσίμου, καθώς και αύξηση των εφαρμογών τους στον τομέα των μεταφορών, όπως σε αυτοκίνητα και λεωφορεία. Αυτό οφείλεται στα ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα της κυψέλης καυσίμου, όπως η βελτιωμένη απόδοση, η φιλικότητα προς το περιβάλλον και η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες. Επιπλέον, η αυξανόμενη ζήτηση για φορητές συσκευές, οι αυστηροί κυβερνητικοί κανονισμοί που στοχεύουν στη μείωση των αυξανόμενων επιπέδων ρύπανσης και η ενισχυμένη απόδοση των κυψελών καυσίμου είναι μερικοί άλλοι κινητήριιοι παράγοντες αυτής της αγοράς. Μερικοί από τους περιορισμούς που σχετίζονται με τη βιομηχανία και την αγορά κυψελών καυσίμου είναι η υψηλή τιμή του καταλύτη, η οποία αυξάνει την τιμή των κυψελών και την έλλειψη υποδομής τους. Όμως, με την πρόοδο της τεχνολογίας, το κόστος μιας κυψέλης καυσίμου αναμένεται να μειωθεί τα επόμενα χρόνια.

Οι αυτοκινητοβιομηχανίες και οι φορητές εφαρμογές ήταν πάντα οι εξέχοντες μοχλοί της κυψέλης καυσίμου στην ευρωπαϊκή αγορά. Ωστόσο, λόγω της αυξανόμενης χρήσης σε βιομηχανικές δραστηριότητες, οι κυψέλες καυσίμου κερδίζουν έδαφος στην αγορά. Η οικονομική επιβράδυνση στην Ευρωζώνη έχει επηρεάσει την υιοθέτηση κυψελών καυσίμου σε σημαντικό βαθμό. Επιπλέον, τα ιατρικά και στρατιωτικά τμήματα, όπως και αποθήκευσης ενέργειας είναι οι κύριες αγορές, οι οποίες αναμένεται να συμβάλουν στην ανάπτυξη.

Βασικοί παράγοντες που θα επηρεάσουν θετικά την ανάπτυξη είναι :

- Αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρικά οχήματα/υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα/υβριδικά οχήματα plug-in (EV/HEV/PHV)
Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση τέτοιων εφαρμογών, σε συνδυασμό με τις αυξημένες εκπομπές άνθρακα έχει στρέψει την προσοχή της παγκόσμιας κοινότητας στη χρήση και την ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών
- Μείωση εξάρτησης από τις συμβατικές πηγές ενέργειας

Στα δεδομένα που παρουσιάζονται παρακάτω, για τα συστήματα κυψελών καυσίμου και το σύνολο αυτών των συστημάτων σε μεγαβάτ, οι αριθμοί εξαγωγών στρογγυλοποιούνται στην πλησιέστερη εκατοντάδα των μονάδων και τα δεδομένα μεγαβάτ στο πλησιέστερο 0,1 MW. Όπου αναφέρονται τιμές ισχύος, αφορούν στην ηλεκτρική ισχύ, εκτός εάν αναφέρεται διαφορετικά.

Το 2020, η βιομηχανία κυψελών καυσίμου και υδρογόνου, παρόμοια με όλες τις βιομηχανίες σε όλο τον κόσμο, ήρθε αντιμέτωπη με προκλήσεις στην εφοδιαστική αλυσίδα ως αποτέλεσμα του COVID-19. Αυτό επιβράδυνε σημαντικά την ανάπτυξη κυψελών καυσίμου υδρογόνου και τις σχετικές εφαρμογές σε σύγκριση με τα αναμενόμενα επίπεδα, ωστόσο παρατηρήθηκε κάποια ανάπτυξη. Η παγκόσμια αγορά σημείωσε αύξηση 10% το 2020, συνολικού ύψους 1,3 GW. Η Ασία συνεχίζει να προηγείται όσον αφορά τον όγκο εξαγωγών, που αντιπροσωπεύουν σχεδόν το 70% των συνολικών MW παγκοσμίως, ενώ η αγορά των ΗΠΑ σημείωσε πτώση. Η Ευρώπη αντιπροσωπεύει το 10% των συνολικών εξαγωγών σε MW, αυξανόμενη από 113 MW το 2019 σε 149 MW το 2020.

Μεταξύ των εφαρμογών κυψελών καυσίμου, ο τομέας των μεταφορών συνεχίζει να προηγείται με αύξηση 25% στον αριθμό των συστημάτων που διανέμονται παγκοσμίως. Αυτό οφείλεται στην ανάπτυξη περισσότερων από 20.000 Ηλεκτρικών Οχημάτων Κυψέλης Καυσίμου (Fuel Cell Electric Vehicles) όλων των τύπων, εκ των οποίων το 50% ήταν στον τομέα της διαχείρισης υλικών για την υποστήριξη της

ζήτησης βασικών βιομηχανιών το 2020. Ομοίως, οι πωλήσεις σταθερών εφαρμογών αυξήθηκαν, παρά την επιβράδυνση ανάπτυξης, κατά 10%, φτάνοντας συνολικά τα 57.800 συστήματα.

Η ανάπτυξη σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου (HRS - Hydrogen Refuelling Stations) στην Ευρώπη επλήγη, επίσης, από την πανδημία το 2020. Οι προκλήσεις της εφοδιαστικής αλυσίδας έχουν προκαλέσει σημαντικές καθυστερήσεις στις κατασκευές, όμως επικράτησε μια μικρή ανάπτυξη, ανεβάζοντας τον συνολικό αριθμό των σταθμών που λειτουργούν - ή είναι υπό κατασκευή- σε 162 στο τέλος του 2020, με πολλούς περισσότερους στο στάδιο σχεδιασμού στο τέλος του έτους. Η Ιαπωνία παραμένει ηγέτης με 133 σταθμούς. Οι νέες καταχωρίσεις επιβατικών αυτοκινήτων κυψελών καυσίμου στην Ευρώπη αυξήθηκαν κατά 41%, φτάνοντας σε συνολικό αριθμό 2.774 οχημάτων το 2020. Η Νότια Κορέα (ξεπέρασε την Καλιφόρνια) και έγινε ο παγκόσμιος ηγέτης στην ανάπτυξη FCEV αφού σημείωσε αύξηση πωλήσεων σε 38%, στην εγχώρια αγορά, το 2020, με πάνω από 10.000 FCEV να κυκλοφορούν στους δρόμους της.

2.2.1. Εξαγωγές ανά Ήπειρο

Όσον αφορά τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ, η ανάπτυξη της Ευρώπης αυξήθηκε κατά 35,6 MW ή 32% το 2020. Αυτό είναι σημαντικά χαμηλότερο από την ανάπτυξη που σημειώθηκε το 2019 στα 71,8 MW, αντανakλώντας την επιβράδυνση της ανάπτυξης και τις προκλήσεις καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Το ίδιο μπορεί να ειπωθεί για την Ασία, όπου η καταγεγραμμένη ανάπτυξη σε Megawatts για το 2020 (168,5 MW), ήταν περίπου η μισή σε σύγκριση με εκείνη του 2019. Η Ασία παραμένει στην κορυφή όσον αφορά την ισχύ καθώς πλησιάζει το ορόσημο του 1 GW.

Στην Ευρώπη, η μέση εγκατεστημένη ισχύς ανά μονάδα συστήματος κυψελών καυσίμου, αυξήθηκε από 5,35 kW/μονάδα το 2018 σε 10,6 kW/μονάδα και 11,7 kW/μονάδα το 2019 και το 2020, αντίστοιχα. Τα συστήματα κυψελών καυσίμου είναι ελαφρώς μεγαλύτερα στην Ασία, όπου η μέση εγκατεστημένη ισχύς αυξήθηκε από 6,64 kW/μονάδα το 2018 σε 13,9 kW/μονάδα και 15,5 kW/μονάδα το 2019 και το 2020, αντίστοιχα. Στη Βόρεια Αμερική, το συνολικό MW ανάπτυξης κυψελών καυσίμου μειώθηκε για δεύτερη συνεχόμενη φορά από το 2019 λόγω της πτώσης των αποστολών Mirai. Ωστόσο, ο συνολικός αριθμός των μονάδων που αναπτύχθηκαν σημείωσε αύξηση 32%, λόγω εφαρμογών μικρότερης ονομαστικής ισχύος, όπως η διαχείριση υλικών, η οποία συνεχίζει να παρουσιάζει επιτυχία στην αγορά των ΗΠΑ.

Πίνακας 2.2 : MW ανά περιοχή (πηγή : Technology and Market report 2021

www.fchobservatory.eu/sites/default/files/reports/Chapter_1_Technology_and_Market_2021.pdf)

MW	2016	2017	2018	2019	2020
Europe	27.4	38.9	41.2	113.0	148.6
N America	213.6	331.8	425.3	339.2	252.7
Asia	273.8	285.8	337.9	743.9	912.4
RoW (rest of the world)	1.7	2.1	1.2	0.2	5.0
Total	516.5	658.6	805.8	1,196.3	1,318.7

2.2.2. Εξαγωγές ανά τομέα εφαρμογής

Το 2020 σημειώθηκε αύξηση 14% στον συνολικό αριθμό των συστημάτων κυψελών καυσίμου που διανέμονται από το 2019, με πάνω από 80.000 μονάδες ή 1,3 GW. Η μέση ισχύς αυξήθηκε, επίσης σταθερά, με την πάροδο των ετών, σε όλες τις εφαρμογές. Το 2020, η μέση ισχύς αντιστοιχεί σε 16 kW/μονάδα, διπλασιάζοντας την ισχύ που παρατηρήθηκε το 2016.

Πίνακας 2.3 : MW Εξαγωγών ανά τομέα εφαρμογής σε παγκόσμια κλίμακα (πηγή : www.fchobservatory.eu/sites/default/files/reports/Chapter_1_Technology_and_Market_2021.pdf)

MW	2016	2017	2018	2019	2020
Portable	0.3	0.6	0.7	0.4	0.4
Stationary	209.0	222.3	220.6	274.8	324.8
Transport	307.2	435.7	584.5	921.1	993.5
Total	516.5	658.6	805.8	1,196.3	1,318.7

Ο COVID-19 είχε ως αποτέλεσμα σημαντικές επιβραδύνσεις στην ανάπτυξη εφαρμογών μεταφοράς. Αυτό μπορεί να φανεί με τη μείωση της ανάπτυξης σε σύγκριση με τα προηγούμενα χρόνια, από 50% το 2019 σε 25%, ως προς τον αριθμό των μονάδων, και από 58% σε 8% ως προς την Ισχύ, αλλά η συνολική ανάπτυξη των σταθερών εφαρμογών κυψελών καυσίμου δεν επηρεάστηκε σε μεγάλο βαθμό. Παρά αυτή τη μείωση της ανάπτυξης, τα οχήματα κυψελών καυσίμου παραμένουν ως η κύρια εφαρμογή όσον αφορά Ισχύ, με διανομές άνω των 20.000 οχημάτων όλων των τύπων, που αποτελούν περίπου το 75% των συνολικών MW των αναμενόμενων διανομών μέχρι το τέλος του έτους. Μεταξύ αυτών, οι εφαρμογές διαχείρισης υλικών αντιπροσωπεύουν το 50% των συνολικών διανομών συστημάτων του τομέα μεταφορών, σχεδόν διπλασιάζοντας τον αριθμό των εγκαταστάσεων από το 2019, καθώς η πρόβλεψη πλησιάζει τα 10.000 συστήματα προς το τέλος του 2020 για να υποστηρίξει τη ζήτηση βασικών βιομηχανιών εν μέσω της πανδημίας. Στην αγορά επιβατικών αυτοκινήτων, η Hyundai και η Toyota παραμένουν κυρίαρχες και αντιπροσωπεύουν τα δύο τρίτα της αγοράς. Άλλοι αξιοσημείωτοι παράγοντες ήταν ο αριθμός των φορτηγών και των λεωφορείων, που χρησιμοποιούν συστήματα κυψελών καυσίμου στην Κίνα, η οποία συνεχίζει να ηγείται της ανάπτυξης σε αυτόν τον τομέα με εκτίμηση 1.400 μονάδων που εξάχθηκαν το 2020, που ισοδυναμεί με ισχύ 87 MW.

Η ανάπτυξη των σταθερών εφαρμογών από το 2019 συνεχίστηκε έως το 2020 αφού παρέμεινε στάσιμη για πολλά χρόνια με συνολική αποστολή άνω των 57.000 μονάδων και ισχύ 320 MW. Το 85% αυτού προέρχεται από συστήματα συμπαραγωγής ενέργειας, και ισχύ άνω των 100 kW, αλλά εξακολουθεί να αντιπροσωπεύει μόνο περίπου 400 συστήματα παγκοσμίως. Το ιαπωνικό πρόγραμμα En-farm και η πρωτοβουλία KfW 433 στη Γερμανία συνεχίζουν να έχουν σημαντικό αντίκτυπο με προβλεπόμενη ανάπτυξη άνω των 47.000 και 5.000 συστημάτων μικρο-συστημάτων συμπαραγωγής ενέργειας (micro – Combined Heat and Power) αντίστοιχα.

2.2.3. Σταθμοί Ανεφορδιασμού Υδρογόνου (HRS –Hydrogen Refuelling Stations)

Στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες η ανάπτυξη σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου διακόπηκε, με εξαίρεση, μικρό αριθμό νέων σταθμών που προστέθηκαν στη Γερμανία, τη Γαλλία και τη Δανία. Το σύνολο των ευρωπαϊκών σταθμών εν λειτουργία ή υπό κατασκευή, στο τέλος του 2020, ανήλθε σε 162 με πολλούς περισσότερους στο στάδιο του σχεδιασμού. Στην Ευρώπη, η Γερμανία συνεχίζει να πρωτοστατεί με 93 σταθμούς εν λειτουργία ή υπό κατασκευή, συμπεριλαμβανομένων 8 νέων σταθμών που τέθηκαν σε λειτουργία το 2020. Οι προκλήσεις της εφοδιαστικής αλυσίδας το 2020 είχαν ως αποτέλεσμα σημαντικές καθυστερήσεις στην ανάπτυξη των σταθμών στη Γαλλία και την Ολλανδία. Παρόμοιες επιπτώσεις σημειώθηκαν στη Γερμανία, καθυστερώντας τον στόχο που είχε τεθεί, για 100 σταθμούς εν λειτουργία, για το 2020

Η Ιαπωνία παραμένει ηγέτης με συνολικά 133 σταθμούς εν λειτουργία στο τέλος του 2020, παρά το γεγονός ότι πρόσθεσε μόνο 3 νέους σταθμούς και υπολείπεται του στόχου της για 160 σταθμούς το 2020, λόγω των καθυστερήσεων στην ανεφοδιαστική αλυσίδα. Με την υποστήριξη των συνεχιζόμενων ρυθμιστικών μεταρρυθμίσεων, η Ιαπωνία στοχεύει να επιταχύνει την ανάπτυξη 320 HRS έως το 2025. Στην Κορέα, περίπου 13 νέοι σταθμοί προστέθηκαν το 2020, ανεβάζοντας το σύνολο σε 43 εν λειτουργία, οι οποίοι είναι πολύ μακριά από τον εθνικό στόχο των 310 σταθμών έως το 2022. Στην Καλιφόρνια, λειτούργησαν συνολικά 42 σταθμοί με 15 επιπλέον σταθμούς υπό ανάπτυξη, με στόχο τους 64 έως το 2020. Ενώ ο ρυθμός ανάπτυξης ήταν αρκετά αργός από το 2018, ο στόχος να υπάρξουν 200 σταθμοί μέχρι το 2025 είναι ακόμα εφικτό και τα επόμενα δύο χρόνια θα είναι κρίσιμα για την εκπλήρωση αυτής της φιλοδοξίας. Στην Κίνα, λειτούργησαν 37 σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου, με την προσθήκη 9 νέων πρατηρίων από το 2019, γεγονός που άφησε πολύ πίσω τον στόχο για 100 HRS έως το 2020. Ωστόσο, πρόσφατες συνεργασίες δείχνουν υποσχόμενα σημάδια μελλοντικής ανάπτυξης στην ανάπτυξη για την υποστήριξη φορτηγών και λεωφορείων που χρησιμοποιούνται για τους Χειμερινούς Ολυμπιακούς Αγώνες του Πεκίνου του 2022.

Παρά τις προκλήσεις του COVID-19, η Ευρώπη σημείωσε ακόμη αύξηση 41% στις νέες ταξινομήσεις επιβατικών αυτοκινήτων με κυψέλες καυσίμου το 2020 σε 2.750 οχήματα, από 1.959. Η Γερμανία, η Γαλλία και η Ολλανδία σημειώνουν τη μεγαλύτερη ανάπτυξη με 274, 211 και 148 οχήματα αντίστοιχα. Η Ολλανδία έχει ξεπεράσει το Ηνωμένο Βασίλειο ως προς τον αριθμό των συνολικών οχημάτων κυψελών καυσίμου και πήρε τη θέση του για την κατοχή του τρίτου μεγαλύτερου στόλου κυψελών καυσίμου στην Ευρώπη.

Εξετάζοντας τις τάσεις στις κατασκευές οχημάτων κυψελών καυσίμου, η Hyundai και η Toyota παραμένουν κυρίαρχες, με τις πωλήσεις του NEXO, που κυκλοφόρησε η Hyundai στα τέλη του 2018, να ξεπερνούν το Mirai. Το νέο μοντέλο 2021 Mirai κυκλοφόρησε στα τέλη του 2020. Οι νέες ευρωπαϊκές ταξινομήσεις του GLC F-Cell της Mercedes (κυψέλη καυσίμου/ηλεκτρικό υβριδικό της Daimler) μειώθηκαν στις 24 και αν και πολύ πίσω από τις δύο πρώτες, η Mercedes αντικατέστησε τη Honda ως την τρίτη μεγαλύτερη FCEV OEM (Original Equipment Manufacturer), ενώ η πώληση της Clarity μειώθηκε στο 0 το 2020. Η BMW επιβεβαίωσε ότι ξεκινώντας το 2022, θα παρουσιάσει μια μικρή σειρά «i Hydrogen Next», που αναπτύχθηκε σε συνεργασία με την Toyota, και αυτό το μοντέλο αναμένεται να είναι διαθέσιμο στους καταναλωτές μετά το 2025.

Τα οχήματα ελαφρού τύπου συνδυάζονται με επιβατικά οχήματα σε αυτήν την ανάλυση με νέα ταξινόμηση που εμφανίζεται τόσο στο Crafter της Mercedes όσο και στο Transporter της Volkswagen.

Η Νότια Κορέα ξεπέρασε την Καλιφόρνια και έγινε ο παγκόσμιος ηγέτης στην ανάπτυξη FCEV αφού παρουσίασε αύξηση 38% στην εγχώρια αγορά το 2020. Αυτό ανεβάζει το σύνολο των Hyundai NEXO στο δρόμο σε 10.000. Στην Ιαπωνία, οι εγχώριες πωλήσεις του Mirai αυξήθηκαν από το 2019, παρά την πτώση στη διεθνή αγορά. Στην Καλιφόρνια, ωστόσο, τα FCEV έχουν πληγεί σκληρά από τον COVID, μειώνοντας σε λιγότερα από 1.000 επιβατικά οχήματα που πωλήθηκαν ή μισθώθηκαν το 2020 - ο χαμηλότερος αριθμός που έχει καταγραφεί από το 2015.

Παρόμοια τάση παρατηρείται όσον αφορά τα λεωφορεία κυψελών καυσίμου στην Ευρώπη και οι χώρες με τις περισσότερες δραστηριότητες το 2020 περιλαμβάνουν τη Γερμανία, το Ηνωμένο Βασίλειο και τη Λετονία. Η Γερμανία πρόσθεσε 38 νέα λεωφορεία τον Δεκέμβριο του 2020, ανεβάζοντας τον συνολικό αριθμό σε 54 λεωφορεία, ενώ 21 νέα λεωφορεία προστέθηκαν στον στόλο του Ηνωμένου Βασιλείου το 2020. Η Λετονία σημείωσε την τρίτη μεγαλύτερη ανάπτυξη στην Ευρώπη με την προσθήκη 10 λεωφορείων κυψελών καυσίμου για πρώτη φορά. Η Νορβηγία διπλασίασε το μέγεθος του στόλου της, προσθέτοντας άλλα 5 νέα λεωφορεία το 2020. Τέλος, το Λουξεμβούργο έκανε επίσης την πρώτη προσθήκη 5 λεωφορείων το 2020. Ο συνολικός αριθμός λεωφορείων κυψελών καυσίμου διπλασιάστηκε στην Ευρώπη από 192 το 2019 σε 390.

Οι στόλοι λεωφορείων κυψελών καυσίμου επεκτείνονται με πολύ βραδύτερο ρυθμό στις ΗΠΑ, με την Καλιφόρνια να ηγείται της ανάπτυξης με 47 οχήματα εν λειτουργία το 2020. Ο συνολικός αριθμός λεωφορείων στη χώρα αυξήθηκε κατά 22 σε συνολικά 64 λεωφορεία.

Στην Ασία, η Κίνα ηγείται με τον μεγαλύτερο στόλο λεωφορείων κυψελών καυσίμου με συνολικά 3.600 νέα οχήματα μέχρι το τέλος του 2020 και αυτό το επίπεδο ανάπτυξης αναμένεται να συνεχιστεί τα επόμενα χρόνια με συνεχή υποστήριξη από την κυβέρνηση. Η Νότια Κορέα επέκτεινε τον στόλο των 5 λεωφορείων με 15 νέα και η Ιαπωνία είχε συνολικά 91 λεωφορεία κυψελών καυσίμου σε υπηρεσία μέχρι το τέλος του 2020.

Τα οχήματα βαρεού τύπου άρχισαν επίσης να αναπτύσσονται με την παράδοση των πρώτων 10 φορτηγών με σύστημα κυψελών καυσίμου Hyundai Xicent στην Ελβετία τον Ιούλιο του 2020. Άλλα 10 βαρέα οχήματα ταξινομήθηκαν μέχρι το τέλος του 2020. Η φιλοδοξία της Hyundai είναι να τοποθετήσει 1.600 φορτηγά υδρογόνου στους ελβετικούς δρόμους μέχρι το 2025. Η Νορβηγία πρόσθεσε επίσης 5 από τα πρώτα βαρέως τύπου φορτηγά κυψελών καυσίμου και η Ολλανδία πρόσθεσε άλλα 2 νέα φορτηγά κυψελών καυσίμου. Γενικά, τα επόμενα χρόνια αναμένεται να σημειωθεί άνοδος στην ανάπτυξη αυτού του τομέα.

Εκτός των οδικών μεταφορών, οι τεχνολογίες κυψελών καυσίμου έχουν σημειώσει πρόοδο και σε άλλα μέσα μεταφοράς στην Ευρώπη, κυρίως ως έργα επίδειξης. Τον Σεπτέμβριο του 2020, στον κλάδο των αερομεταφορών, η ZeroAvia πέταξε ένα εξαθέσιο αεροπλάνο κατηγορίας Piper M, το οποίο τροφοδοτούνταν από μια συστοιχία Powercell 100 kW. Στις υδάτινες εφαρμογές, το Ballard's Marine Center στο Hobro της Δανίας παρουσίασε το πρώτο σύστημα της βιομηχανίας που σχεδιάστηκε για πρωτογενή προωστική ισχύ σε πλοία. Παράλληλα στις εφαρμογές εδάφους, δύο μονάδες τρένων Coradia iLint με τροφοδοσία κυψελών καυσίμου ολοκλήρωσαν τη δοκιμή 18 μηνών εξυπηρέτησης επιβατών, ολοκληρώνοντας 180.000 km υπηρεσίας με 95% αξιοπιστία στη γραμμή Eisenbahnen Verkehrsbetrieb Elbe-Weser στην Κάτω Σαξονία την άνοιξη του 2020. Αυτή τους η επιτυχία άνοιξε τον δρόμο σε 14 μονάδες Coradia iLints που θα ξεκινήσουν εμπορική λειτουργία το 2021/2022. Συνολικά, τουλάχιστον 41 μονάδες τρένων παραγγέλθηκαν να παραχθούν στο Salzgitter της Γερμανίας.

Κεφάλαιο 3^ο : Κύκλος Πιστοποίησης – Κανονισμοί

3.1. Απαιτούμενη Τεκμηρίωση (Έγγραφα)

Ένα πιστοποιημένο εργαστήριο ελέγχου κυψελών καυσίμου είναι απαραίτητο να έχει στην κατοχή του τα παρακάτω:

- Έγγραφα-Τεκμηρίωση (συμπεριλαμβανομένων των οδηγιών εγκατάστασης και ασφάλειας), που παρέχεται από τον κατασκευαστή ενός εξαρτήματος ή κατασκευαστή της διάταξης δοκιμών κυψελών καυσίμου για αυτοσυναρμολογούμενη διάταξη.
- Πιστοποιητικά βαθμονόμησης των οργάνων διάταξης δοκιμών κυψελών καυσίμου. Αυτά τα έγγραφα είναι απαραίτητα για τον προσδιορισμό της πραγματικής αβεβαιότητας των μετρήσεων των τιμών εισόδου και εξόδου δοκιμής και για τον έλεγχο του κατά πόσο πληρούνται οι απαιτήσεις.
- Τεκμηρίωση του αντικειμένου ή εξαρτημάτων δοκιμής που παρέχεται από τους κατασκευαστές, συμπεριλαμβανομένων των διαδικασιών εκκίνησης, προετοιμασίας και τερματισμού λειτουργίας.
- Οδηγίες ασφαλείας για την κυψέλη καυσίμου

3.2. Πρότυπα

Τα υπάρχοντα πρότυπα που αφορούν στην πιστοποίηση κυψελών καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης είναι τα παρακάτω:

IEC/TS 62282-1 Terminology - Ορολογία

Αυτή η έκθεση παρέχει ενιαία ορολογία με τη μορφή διαγραμμάτων και ορισμών που σχετίζονται με τεχνολογίες κυψελών καυσίμου. Προορίζεται ως πηγή για τις Ομάδες Εργασίας και τους χρήστες της σειράς προτύπων κυψελών καυσίμου TC105. Δημοσιεύτηκε αρχικά το 2005. Η 2^η έκδοση, που ανανεώθηκε ως γενικό γλωσσάρι για τις τεχνολογίες κυψελών καυσίμου, δημοσιεύτηκε το 2010. Η 3^η έκδοση, IEC/TS 62282-1 Ed 3.0, δημοσιεύτηκε τον Νοέμβριο του 2013. Οι ορισμοί σε αυτό το έγγραφο βρίσκονται σε διαδικασία ενσωμάτωσης στο IEC 60050-485 Ed.1, IEC International Electrotechnical Vocabulary – Μέρος 485: Τεχνολογίες κυψελών καυσίμου. Δημοσίευση στο FDIS, δημοσίευση που προβλέπεται για τον Δεκέμβριο του 2019.

IEC 62282-2-100 Fuel Cell Modules – Μονάδες Κυψελών Καυσίμου

Διεθνές πρότυπο που παρέχει τις ελάχιστες απαιτήσεις για την ασφάλεια και την απόδοση των κυψελών καυσίμου και για όλες τις εφαρμογές. Η 1^η έκδοση κυκλοφόρησε το 2004, η 2^η το 2012 και η 3^η τον Μάιο του 2020.

IEC 62282-3-200 Test Methods for the Performance of Stationary Fuel Cell Power Systems – Μέθοδοι ελέγχου της απόδοσης Σταθερών Συστημάτων Ισχύος

Περιγράφει τον τρόπο μέτρησης της απόδοσης σταθερών συστημάτων ισχύος κυψελών καυσίμου για οικιακές, εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Η τρέχουσα έκδοση δημοσιεύτηκε το 2015.

IEC 62282-3-201 Small stationary polymer electrolyte fuel cell power system – Performance test method – Μικρό σταθερό σύστημα ισχύος PEM – Μέθοδος ελέγχου απόδοσης

Αυτό το πρότυπο παρέχει μεθόδους προσδιορισμού απόδοσης για μικρές σταθερές εφαρμογές κυψελών καυσίμου που πληρούν τα ακόλουθα κριτήρια:

Πίνακας 3.1 : Χαρακτηριστικά του αντικειμένου ελέγχου (πηγή : <https://www.fuelcellstandards.com/>)

Ονομαστική Ισχύς	Έξοδος AC	Πίεση Λειτουργίας	Καύσιμο	Οξειδωτικό
<10KW	<240V	<0.1 MPa	Αέριο ή υγρό	Αέρας

Δημοσιεύθηκε τον Ιούλιο του 2015, και η 2^η έκδοση, το 2017.

IEC 62282-7-1: Single Cell Test Method for Polymer Electrolyte Fuel Cells – Μέθοδος ελέγχου μοναδιαίας κυψέλης PEFC

Το IEC TS 62282-7-1:2017(E) καλύπτει συστοιχίες κυψελών καυσίμου, ρύθμιση/εγκατάσταση μονάδας ελέγχου, όργανα μέτρησης και μεθόδους μέτρησης, μεθόδους προσδιορισμού απόδοσης και αναφορές δοκιμών για μοναδιαίες κυψέλες PEFC. Αυτό το έγγραφο χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση:

- απόδοση συστήματος μεμβράνης ηλεκτροδίου για μοναδιαία κυψέλη καυσίμου τύπου PEM
- υλικών και δομής μοναδιαίας κυψέλης PEFC ή
- την αξιολόγηση της επίδρασης των ακαθαρσιών (στο καύσιμο/στον αέρα) στην απόδοση της κυψέλης καυσίμου.

Εκδόθηκε τον Απρίλιο του 2010 και η 2^η έκδοση κυκλοφόρησε το 2017.

3.3. Ασφάλεια

Το υδρογόνο είναι ένα άχρωμο, άοσμο, εύφλεκτο αέριο με μεγάλο εύρος αναφλεξιμότητας (4%-75% κατ' όγκον) και σχετικά χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης (0,02 millijoules). Έχει πολύ χαμηλή πυκνότητα και επομένως πρέπει να αποθηκεύεται σε υψηλές πιέσεις (εύρος 10.000–15.000 psi) για να επιτευχθεί αρκετή μάζα για πρακτική χρήση. Η ευκολία ανάφλεξης και η υψηλή πίεση αποθήκευσης υδρογόνου δημιουργούν μεγάλο μέρος του κινδύνου που σχετίζεται με τη χρήση του. Το υδρογόνο μπορεί να αλλοιώσει ορισμένα από τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή δοχείων αποθήκευσής του, σωληνώσεων, βαλβίδων και άλλων εξαρτημάτων.

Αυτή η καταστροφική ικανότητα αναφέρεται μερικές φορές ως ευθραυστότητα υδρογόνου (hydrogen embrittlement). Οι μηχανισμοί ευθραυστότητας του υδρογόνου μπορεί να είναι περίπλοκοι και ποικίλλουν ανάλογα με διάφορες φυσικές παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας και

της πίεσης. Η ικανότητα του υδρογόνου να διαρρέει, μέσω της αλλοίωσης που προκαλεί στα υλικά σε συνδυασμό με το μικρό μέγεθος μορίου συμβάλλει στους κινδύνους που σχετίζονται με τη χρήση του.

Οι κίνδυνοι που σχετίζονται με τη χρήση του υδρογόνου μπορούν να χαρακτηριστούν ως βιολογικοί (κρουσπάγημα, αναπνευστική πάθηση και ασφυξία), φυσικοί (αλλαγές φάσης, αστοχίες εξαρτημάτων και ευθραυστότητα) και χημικοί (ανάφλεξη και κάψιμο). Ένας συνδυασμός κινδύνων εμφανίζεται στις περισσότερες περιπτώσεις. Ο κύριος κίνδυνος που σχετίζεται με οποιαδήποτε μορφή υδρογόνου είναι η ακούσια παραγωγή ενός εύφλεκτου ή εκρηκτικού μείγματος, που οδηγεί σε έκρηξη ή πυρκαγιά.

Για αυτό τον λόγο, ένα πιστοποιημένο εργαστήριο ελέγχου κυψελών καυσίμου θα πρέπει να ακολουθεί την νομοθεσία της εκάστοτε περιοχής, που αφορά στην ασφάλεια πυρκαγιάς. Μία κατευθυντήρια γραμμή για εργαστήρια εντός Ευρώπης είναι το αρχείο “Fire Safety in Laboratories – CFPA Guideline No 28:2012 F” της CFPA – Europe (Confederation of Fire Protection Associations).

3.4. Κύκλος πιστοποίησης

Η πιστοποίηση τόσο της κατασκευής ενός προϊόντος όσο και του ίδιου του προϊόντος είναι κρίσιμης σημασίας σε κάθε κλάδο που επιθυμεί να πουλήσει στους καταναλωτές. Βάσει του κειμένου “Guidelines for Health and Safety, Standardization and Certification” της European Commission, μόλις τα τελευταία πέντε χρόνια ξεκίνησαν οι εμπορικές πωλήσεις κυψελών καυσίμου. Παράλληλα, δεδομένου ότι οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν μία νέα τεχνολογία, διαφορετική από των ανταγωνιστών, η πιστοποίηση τους αποτελεί έναν τομέα πρόκλησης.

Τα προϊόντα που πωλούνται στον Ευρωπαϊκό Οικονομικό Χώρο υποχρεούνται να φέρουν την Σήμανση CE (European Conformity). Αυτή η σήμανση επιβεβαιώνει ότι ένα προϊόν συμμορφώνεται με όλες τις οδηγίες που ισχύουν για αυτό.

Σε ορισμένες περιπτώσεις ένας χρήστης μπορεί να αυτο-πιστοποιηθεί. Σε άλλες, ιδίως όταν ένα προϊόν είναι δυνητικού κινδύνου, ένας κοινοποιημένος φορέας (οργανισμός διαπιστευμένος από κράτος μέλος της ΕΕ για την αξιολόγηση προϊόντων σε σχέση με τις οδηγίες) πρέπει να πιστοποιήσει το προϊόν. Ανάλογα με τη σχετική οδηγία, η πιστοποίηση γίνεται είτε μέσω αυτοδήλωσης (Self-declaration) είτε μέσω εξέτασης και αξιολόγησης από κοινοποιημένο φορέα.

Περιγραφή διαδικασίας πιστοποίησης έχει κοινοποιηθεί από την Alteryg Systems, το 2010, η οποία κατόπιν αξιολόγησης των εργαστηρίων CSA, UL, TUV και ERTL, κατέληξε να συνεργαστεί με την CSA. Η εταιρεία διαθέτει δικό της εργαστήριο με σκοπό την καλύτερη δυνατή προετοιμασία των προϊόντων της, σύμφωνα με τα πρότυπα, πριν την τελική αξιολόγηση από τον εξωτερικό φορέα πιστοποίησης -CSA.

Παρακάτω γίνεται αναφορά σε μερικά από τα ενεργά πιστοποιημένα εργαστήρια που εκτελούν έλεγχο και πιστοποίηση Κυψελών Καυσίμου :

Πίνακας 3.2 : Ενεργά Εργαστήρια πιστοποίησης κυψελών καυσίμου

Εργαστήριο	Υπηρεσίες
<p>TÜV Rheinland (Ιδρύθηκε πριν από σχεδόν 150 χρόνια και είναι ένας από τους κορυφαίους παρόχους υπηρεσιών δοκιμών και ελέγχου στον κόσμο.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Προκαταρκτική διερεύνηση, • Δοκιμές, • Έλεγχος εργοστασίου και • Πιστοποίηση
<p>Kiwa</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Συμβουλευτικές υπηρεσίες για την ασφάλεια και την πιστοποίηση, • Πιστοποίηση CE για σταθερά συστήματα κυψελών καυσίμου και γεννήτριες υδρογόνου, • Πιστοποίηση για την οδηγία “Gas Appliance Regulation and Pressure Equipment Directive”, • Πιστοποίηση προϊόντων για κινητές εφαρμογές κυψελών καυσίμου, • Πιστοποίηση προϊόντων φορητών συστημάτων κυψελών καυσίμου, • Δοκιμή και πιστοποίηση σύμφωνα με το IEC 62282, • Δοκιμή και πιστοποίηση σύμφωνα με το EN 50465
<p>Intertek</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Δοκιμή απόδοσης συστοιχιών κυψελών καυσίμου και συστημάτων κυψελών καυσίμου, • Αξιολογήσεις πρωτοτύπων, • Σύγκριση επωνυμίας και συγκριτική αξιολόγηση απόδοσης, • Διασφάλιση ποιότητας, • Ρυθμιστική/Δοκιμή Ασφάλειας, • Δοκιμές σύμφωνα με διεθνή πρότυπα ή προσαρμοσμένα προγράμματα δοκιμών IEC 62282, • Κανονισμοί Μεταφορών του ΟΗΕ (IATA-DGR, ADR/RID, Κωδικός IMDG), • Δοκιμές NEBS/OSP σε κυψέλες καυσίμου που προορίζονται για τους παρόχους υπηρεσιών Telco, • Δοκιμή EMC

Κεφάλαιο 4^ο : Διαδικασίες Ελέγχου και Πιστοποίησης

4.1. Διαδικασίες Ελέγχου σε Μοναδιαία Κυψέλη Καυσίμου

Παρακάτω γίνεται μία ανάλυση σχετικά με τις εναρμονισμένες διαδικασίες δοκιμών για κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων. Οι διαδικασίες αυτές αναπτύχθηκαν από το δίκτυο έρευνας και κατάρτισης FCTESTNET (Fuel Cells Testing & Standardisation NETwork).

4.1.1. Έλεγχος ευαισθησίας σε διάφορες τιμές σχετικής υγρασίας

Ο στόχος είναι να προσδιοριστεί η απόδοση μίας μοναδιαίας κυψέλης καυσίμου -με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων- υποβληθείσας σε μία αλληλουχία δοκιμών υπό συγκεκριμένες καθορισμένες περιβαλλοντικές συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή λειτουργία με καθαρό υδρογόνο και αέρα, σε διαφορετικές τιμές σχετικής υγρασίας και πυκνότητας ρεύματος. Η δοκιμή αυτή χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της απόδοσης των μερών που αποτελούν μία κυψέλη καυσίμου, όπως το σύστημα μεμβράνης ηλεκτροδίου ή τα εξαρτήματα του μεμονωμένα, όπως είναι η μεμβράνη, η καταλυτική επιφάνεια ή/και το στρώμα διάχυσης αερίου.

Τιμές Εισόδου Ελέγχου

Παρακάτω παρατίθενται όλες οι τιμές εισόδου (συνθήκες λειτουργίας) της δοκιμής. Όσον αφορά την ακρίβεια και αβεβαιότητα των μετρήσεων, οι προτεινόμενες τιμές που δίνονται είναι οι τιμές που μπορούν να επιτευχθούν με τον περισσότερο διαθέσιμο εξοπλισμό στην αγορά. Έτσι, εάν αυτές οι τιμές ρυθμιστούν με κάποια απόκλιση από τις προτεινόμενες, είναι σημαντικό αυτή η απόκλιση να καταγραφεί στην τεχνική έκθεση (βλέπε Παράρτημα Ε-Πρότυπο Τεχνικής Έκθεσης).

Μεταβλητές Τιμές Εισόδου

Από τις παρακάτω τιμές εισόδου, η T_c μεταβάλλεται μόνο κατά τα βήματα εκκίνησης και προετοιμασίας. Τα υπόλοιπα μεγέθη μεταβάλλονται καθ' όλη τη διαδικασία των μετρήσεων.

Πίνακας 4.1 : Μεταβλητές τιμές εισόδου ελέγχου ευαισθησίας στην υγρασία (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Είσοδος	Τιμή/ Εύρος τιμών	Ακρίβεια (%)	Ρυθμός Δειγματοληψίας (Herz)
$i \left(\frac{mA}{cm^2} \right)$	200; 400; 600; 800	$\pm 2\%$ πλήρους κλίμακας για $i < 0.1$ A/cm ² $\pm 1\%$ Πλ.Κλίμακας για $i \geq 0.1$ A/cm ²	≥ 1
T_c (°C)	T_A περίπου ίση με 80	± 2	≥ 1
$Q_{v,fuel}$	Κατ'αντιστοιχία με τη στοιχειομετρία του καυσίμου, βλέπε Παράρτημα	± 1	≥ 1
$Q_{v,ox}$	Κατ'αντιστοιχία με τη στοιχειομετρία του οξειδωτικού, βλέπε Παράρτημα	± 1	≥ 1
RH_{fuel} (%)	0 - 75	± 5	≥ 1
RH_{ox} (%)	25 - 75	± 5	≥ 1

Οι ψηφιακοί μετρητές ροής μάζας που χρησιμοποιούνται συνήθως διατίθενται με ακρίβεια της τάξεως του 1% της πλήρους κλίμακας (μέγιστη ροή) και με ελάχιστη μετρήσιμη ροή (γενικά 10% της μέγιστης ροής). Αυτό σημαίνει ότι η αβεβαιότητα της μέτρησης μειώνεται με το ρυθμό ροής, οπότε μειώνεται με την παράλληλη αύξηση της πυκνότητας ρεύματος, όταν η κυψέλη λειτουργεί με σταθερή τιμή στοιχειομετρίας. Για να επιτευχθεί επαρκής ακρίβεια μέτρησης, ο ψηφιακός μετρητής ροής μάζας πρέπει να επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε η μέγιστη παροχή να μην υπερβαίνει το 100% $Q_{V,\lambda}$ στη μέγιστη επιθυμητή πυκνότητα ρεύματος. Τα $Q_{V,\lambda_{fuel}}$ και $Q_{V,\lambda_{ox}}$ είναι ελεγχόμενες ογκομετρικές παροχές του καυσίμου και οξειδωτικού σε στοιχειομετρία, εκτός εάν αυτές οι τιμές είναι μικρότερες από τους ελάχιστους ρυθμούς ροής: $Q_{V,fuel,min}$ και $Q_{V,ox,min}$. Αυτές οι ελάχιστες τιμές μπορεί να αντιστοιχούν στους στοιχειομετρικούς ρυθμούς ροής για χαμηλή πυκνότητα ρεύματος (μεταξύ 0,05 και 0,2 A/cm²). Επομένως στην τεχνική έκθεση θα πρέπει να καταγράφονται ξεκάθαρα οι τιμές : ελάχιστης πυκνότητας ρεύματος, σχετικός ρυθμός ροής καυσίμου και οξειδωτικού μέσου στοιχειομετρικά. Στην τεχνική έκθεση, πρέπει να καταγράφεται επίσης η μέθοδος που ακολουθείται για να ρυθμιστεί η υγρασία των αντιδρώντων.

Σταθερές Τιμές Εισόδου

Οι ακόλουθες τιμές εισόδου πρέπει να διατηρούνται σταθερές σε μία συγκεκριμένη τιμή - που να εμπεριέχεται στο εύρος τιμών που δίνεται παρακάτω - κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μετρήσεων.

Πίνακας 4.2 : Σταθερές τιμές εισόδου ελέγχου ευαισθησίας στην υγρασία (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Είσοδος	Τιμές / Εύρος Τιμών	Ακρίβεια (%)	Ρυθμός Δειγματοληψίας (Herz)
X_{H_2}	*	$\pm 0.001 H_2$	-
X_{O_2}	Αέρας ή καθαρό οξυγόνο **	$\pm 1 O_2$	-
P_{fuel}^{***}	Περιβάλλον μέχρι 120 kPa	± 2	≥ 1
P_{ox}^{***}	Περιβάλλον μέχρι 120 kPa	± 2	≥ 1
λ_{fuel}	1.2	-	-
λ_{ox}	2	-	-
T_C	$T_A - 80 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	≥ 1

*Καθορίζεται βάσει της σύνθεσης

** Να ορίζεται στην τεχνική έκθεση (εργαστηριακός ή συνθετικός αέρας μαζί με τη σύνθεση του- για παράδειγμα σχετική υγρασία, μέγεθος σωματιδίων, σύνθεση)

*** Να αναφέρεται στην τεχνική έκθεση εάν έχει επιλεγεί η πίεση εισόδου ή η πίεση εξόδου της κυψέλης να είναι ελεγχόμενα σταθερή.

Αποτελέσματα μετρήσεων

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι τιμές εξόδου ελέγχου, δηλαδή οι τιμές που προκύπτουν κατά τη διαδικασία λήψης μετρήσεων :

Πίνακας 4.3 : Τιμές Εξόδου ελέγχου ευαισθησίας στην υγρασία (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Έξοδος	Αβεβαιότητα	Ρυθμός Δειγματοληψίας
P *	Ισχύς – υπολογιζόμενο μέγεθος	Ισχύς – υπολογιζόμενο μέγεθος
V	± 0.5% πλήρους κλίμακας	≥1Hz

Διαδικασία Ελέγχου

Προτού ξεκινήσει η διαδικασία ελέγχου, πρέπει να γίνει μία προετοιμασία της κυψέλης, όπως περιγράφεται παρακάτω. Ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι η σταθεροποίηση της τάσης πριν εφαρμοστεί η διαδικασία λήψης μετρήσεων. Ως κριτήριο σταθεροποίησης κατάστασης λειτουργίας, μπορεί να οριστεί βάσει της απόκλισης της τάσης της κυψέλης μετρώμενη για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα. Γενικά, συνιστάται οι διακυμάνσεις να είναι χαμηλότερες του ±5 mV κατά την τελευταία ώρα του βήματος προετοιμασίας.

Βήμα 1^ο : Προετοιμασία του αντικειμένου ελέγχου

Η εκκίνηση και προετοιμασία της κυψέλης καυσίμου μπορεί να πραγματοποιηθεί ακολουθώντας τις οδηγίες

- του κατασκευαστή της κυψέλης,
- του κατασκευαστή ενός εκ των εξαρτημάτων της,
- μίας κοινής μεθόδου που μπορεί να χρησιμοποιείται σε φορέα που εκτελεί ελέγχους κυψελών ή
- των προτύπων

Η δοκιμή ξεκινά με τη ρύθμιση των τιμών εισόδου– συνθηκών λειτουργίας- στις τιμές που καθορίζονται για την προετοιμασία της κυψέλης. Η προετοιμασία συνίσταται στη διατήρηση σταθερών των προηγούμενων συνθηκών έως ότου η τάση του κελιού φτάσει σε μια σταθερή τιμή. Η σταθεροποίηση των συνθηκών στο βήμα προετοιμασίας της κυψέλης μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά τη διαδικασία εκκίνησης.

Εάν δεν συμβαίνει αυτό, συνιστάται η λειτουργία της κυψέλης σε γαλβανοστατική λειτουργία στην επιλεγμένη θερμοκρασία λειτουργίας και στις συνθήκες αερίου, αυξάνοντας την πυκνότητα ρεύματος κατά βήματα της τάξεως των 0,1 A/cm², διατηρώντας παράλληλα την τάση κυψέλης υψηλότερη από 0,5 V, μέχρι να επιτευχθεί η πυκνότητα ρεύματος που έχει προσδιοριστεί για αυτή τη διαδικασία. Η πυκνότητα ρεύματος για την προετοιμασία της κυψέλης θα αντιστοιχεί είτε στο μέγιστο ρεύμα που μπορεί να επιτευχθεί στα 0,5 V στις επιλεγμένες συνθήκες είτε σε μια πυκνότητα ρεύματος που καθορίζεται από τον στόχο της δοκιμής. Το βήμα προετοιμασίας πρέπει να διαρκέσει τουλάχιστον **24 ώρες** με διακύμανση τάσης κυψέλης μικρότερη από ±5 mV κατά την τελευταία ώρα πριν από την έναρξη των υπόλοιπων βημάτων της δοκιμής.

Βήμα 2° : Ρύθμιση των τιμών Εισόδου (Συνθήκες Λειτουργίας)

Όσον αφορά το υδρογόνο λαμβάνονται υπόψη 4 επίπεδα σχετικής υγρασίας (0 - 75%), ενώ για τον αέρα τρία (25 - 75%). Η σχετική υγρασία του καυσίμου ρυθμίζεται σε συγκεκριμένη τιμή, ξεκινώντας από την μέγιστη του εύρους που απαριθμείται στον πίνακα 4.4 (δηλαδή 75%). Παράλληλα, η σχετική υγρασία του οξειδωτικού ρυθμίζεται στη μικρότερη (25%) και ανά βήμα αυξάνεται. Αντίστοιχα, ανά βήμα των μετρήσεων εφαρμόζονται και τέσσερις διαφορετικές πυκνότητες ρεύματος.

Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με την αλληλουχία των βημάτων για περαιτέρω επεξήγηση

Πίνακας 4.4 : Αλληλουχία βημάτων (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Βήματα	Σχετική Υγρασία Καυσίμου (%)	Σχετική Υγρασία Οξειδωτικού (%)	Πυκνότητα Ρεύματος ($\frac{mA}{cm^2}$)
1.	75	25	800; 600;400;200;
2.	75	50	800; 600;400;200;
3.	75	75	800; 600;400;200;
4.	50	25	800; 600;400;200;
5.	50	50	800; 600;400;200;
6.	50	75	800; 600;400;200;
7.	25	25	800; 600;400;200;
8.	25	50	800; 600;400;200;
9.	25	75	800; 600;400;200;
10.	0	25	800; 600;400;200;
11.	0	50	800; 600;400;200;
12.	0	75	800; 600;400;200;

Το βήμα της προετοιμασίας εφαρμόζεται μόνο μία φορά πριν ρυθμιστούν οι τιμές εισόδου του πρώτου βήματος του πίνακα 4.4 , δηλαδή η πρώτη τιμή πυκνότητας ρεύματος – 800 ($\frac{mA}{cm^2}$)- και οι αντίστοιχες τιμές σχετικής υγρασίας. Κάθε βήμα μετρήσεων **διαρκεί κατ'ελάχιστον δύο ώρες** και μέχρι η τάση να σταθεροποιηθεί και να πληρεί το παρακάτω κριτήριο :

- Οι αποκλίσεις της τάσης πρέπει να είναι μικρότερες της τάξεως του ± 5 mV κατά τα τελευταία 20 λεπτά του βήματος και πριν ξεκινήσει το επόμενο.

Με την αλληλουχία των βημάτων μέτρησης που προτείνεται, θα πρέπει να είναι δυνατόν ο συγκεκριμένος έλεγχος να διεκπεραιωθεί μέσα σε τέσσερις ημέρες μετά την προετοιμασία της κυψέλης. Θα πρέπει να είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις που αντιστοιχούν στα τρία στάδια μεταβολής υγρασίας οξειδωτικού μέσου, με σταθερή την σχετική υγρασία του καυσίμου, ενώ κατά τη διάρκεια της πρώτης νύχτας θα πρέπει να έχουν σταθεροποιηθεί οι συνθήκες που αντιστοιχούν στην επόμενη τιμή σχετικής υγρασίας καυσίμου (δηλαδή μείωση της σχετικής υγρασίας οξειδωτικού μέσου στη μικρότερη τιμή) κοκ.

Βήμα 3^ο : Αποτελέσματα μετρήσεων

Κατά τη διάρκεια του ελέγχου, οι σταθερές τιμές εισόδου που απαριθμήθηκαν στον πίνακα 4.2 (θερμοκρασία, στοιχειομετρία αερίων, σύσταση και πίεση) πρέπει να παραμένουν στις τιμές που έχουν επιλεγεί με την ακρίβεια που έχει προσδιορισθεί. Αντίθετα, όλες οι μεταβλητές τιμές εισόδου και εξόδου μετρώνται συναρτήσει χρόνου. Αυτό συμβαίνει, διότι ο κύριος στόχος της δοκιμής είναι να προσδιοριστεί η τιμή της τάσης κυψέλης υπό διαφορετικά επίπεδα σχετικής υγρασίας καυσίμου και αέρα σε τέσσερις διαφορετικές πυκνότητες ρεύματος.

Κριτήριο λήξης δοκιμής :

Σε οποιοδήποτε βήμα, η δοκιμή θα πρέπει να σταματήσει εάν η τιμή της τάσης κυψέλης πέσει υπό των 0.3 V. Εάν αυτό το κριτήριο επιτευχθεί σε κάποιο από τα βήματα προ του 12^{ου}, οι δοκιμές μπορούν να συνεχισθούν προχωρώντας στο επόμενο βήμα με τις αντίστοιχες τιμές συνθηκών. Εάν το κριτήριο ικανοποιηθεί κατά το δωδέκατο βήμα, το πρόγραμμα θα σταματήσει εντελώς (όσον αφορά φορτίο, θερμοκρασίες, πιέσεις και ροή αερίων).

Βήμα 4^ο : Επεξεργασία δεδομένων

Η κύρια έξοδος αυτού του ελέγχου είναι η μεταβολή της τάσης συναρτήσει χρόνου. Η πυκνότητα ισχύος λαμβάνεται υπ' όψη ως επιπλέον έξοδος και μπορεί να υπολογισθεί για κάθε βήμα μετρήσεων, ως εξής:

$$P = V * i \quad (4.1)$$

Όπου P : πυκνότητα ισχύος ($\frac{W}{cm^2}$)

V : τάση κυψέλης (V)

i : πυκνότητα ρεύματος ($\frac{A}{cm^2}$)

Εν συνεχεία, δεν χρειάζεται κάποια περαιτέρω επεξεργασία, όμως είναι ενδιαφέρον να υπολογισθούν, για κάθε τιμή πυκνότητας ρεύματος, οι απώλειες απόδοσης μεταξύ του καλύτερου(συνήθως κατ'αντιστοιχία με το 12^ο βήμα) και άλλων επιπέδων υγρασίας, ώστε να γίνεται σύγκριση της ευαισθησίας στην υγρασία διαφορετικών κυψελών ή εξαρτημάτων που παρουσιάζουν διαφορετικά επίπεδα επίδοσης.

Η απώλεια απόδοσης υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση ως ποσοστό

$$\eta = \frac{[V(\text{βήμα 12}) - V(\text{βήμα 1 έως 11})]}{V(\text{βήμα 12})} \quad (4.2)$$

Όπου η : απώλεια απόδοσης (%)

V(βήμα i) : τιμή τάσης βήματος i (από 1 έως 12) (V)

Είναι επίσης ενδιαφέρον να υπολογισθεί απώλεια απόδοσης με παρόμοια μέθοδο.

Πιο συγκεκριμένα για να ελεγχθεί η ευαισθησία στην σχετική υγρασία του ενός αερίου για σταθερή τιμή σχετικής υγρασίας του άλλου. Για παράδειγμα, ο τρόπος να υπολογισθεί η απώλεια απόδοσης(%), όταν η σχετική υγρασία του οξειδωτικού μέσου μειώνεται από 50% σε 25% για σταθερή τιμή σχετικής υγρασίας καυσίμου (περί 50%)

$$\eta = \frac{V(\beta\acute{\eta}\mu\alpha\ 5) - V(\beta\acute{\eta}\mu\alpha\ 4)}{V(\beta\acute{\eta}\mu\alpha\ 5)} \quad (4.3)$$

Όπου η : απώλεια απόδοσης (%)

$V(\beta\acute{\eta}\mu\alpha\ i)$: τιμή τάσης βήματος i (από 1 έως 12) (V)

4.1.2. Καμπύλη πόλωσης μοναδιαίας κυψέλης καυσίμου

Στόχος αυτής της δοκιμής είναι ο χαρακτηρισμός της επίδοσης μίας μοναδιαίας κυψέλης καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων σε συνθήκες με διαφορετικές τιμές πυκνότητας ρεύματος. Ουσιαστικά αναπαράγεται μία καμπύλη πόλωσης, δηλαδή μετράται η τιμή της τάσης και της ισχύος συναρτήσει του καταναλισκόμενου ρεύματος. Η επίδοση της κυψέλης μετράται από την τάση ανοιχτοκυκλώσεως έως την υψηλότερη πυκνότητα ρεύματος, που καθορίζεται από τις ιδιότητες/προδιαγραφές του αντικειμένου δοκιμής ή από τη μέθοδο λήψης μετρήσεων.

Τιμές Εισόδου δοκιμής

Για να ελέγχονται οι ρυθμοί ροής του καυσίμου και οξειδωτικού μέσου, η δοκιμή μπορεί να διεξαχθεί είτε με σταθερές στοιχειομετρικές αέρα/καυσίμου, αλλάζοντας τις ροές με την πυκνότητα ρεύματος, είτε με σταθερό ρυθμό ροών αέρα και καυσίμου για όλες τις πυκνότητες ρεύματος.

Έλεγχος με σταθερή τιμή στοιχειομετρίας

Παρακάτω παρατίθενται πίνακες τιμών εισόδου ελέγχου

Μεταβλητές Τιμές Εισόδου ελέγχου

Πίνακας 4.5 : Μεταβλητές τιμές εισόδου με σταθερή τιμή στοιχειομετρίας (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Είσοδος	Τιμή / Εύρος	Ακρίβεια (%)	Ρυθμός Δειγματοληψίας (Herz)
$i \left(\frac{A}{cm^2}\right)$	0 - 2	$\pm 2\%$ για $i < 0.1A/cm^2$ $\pm 1\%$ για $i \geq 0.1A/cm^2$	≥ 1
T_C (°C)	$T_A - 80$	± 2 °C	≥ 1
$Q_{v,fuel}$	Κατ'αντιστοιχία με τη στοιχειομετρία καυσίμου	$\pm 1\%$ πλήρους κλίμακας	≥ 1
$Q_{v,ox}$	Κατ'αντιστοιχία με την στοιχειομετρία οξειδωτικού	$\pm 1\%$ πλήρους κλίμακας	≥ 1

Σταθερές Τιμές Εισόδου

Οι σταθερές τιμές εισόδου εφαρμόζονται κατά τη διεξαγωγή του τρίτου βήματος της διαδικασίας ελέγχου, και παραμένουν σταθερές καθ'όλη τη διάρκεια της δοκιμής ή καθ'όλη τη διάρκεια κάθε βήματος πυκνότητας ρεύματος

Πίνακας 4.6 : Σταθερές τιμές εισόδου με σταθερή τιμή στοιχειομετρίας (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Είσοδος	Τιμή / Εύρος	Ακρίβεια	Ρυθμός Δειγματοληψίας (Herz)
p_A (kPa)	100 (abs)	±1%	
X_{H_2}	Μέχρι 100% H_2	±0.005%	
X_{O_2}	21% O_2 – 79% N_2 ή καθαρό O_2	±1% O_2	
T_C (°C)	$T_A - 80$	±2 °C	≥1
$P_{fuel,ox}$ (kPa)	$P_A - 300$	±2%	≥1
λ_{H_2}	1.1 - 2		≥1
λ_{O_2}	2 - 3		≥1
$Q_{v,fuel/ox,min}$	Κατ'αντιστοιχία με τη στοιχειομετρία καυσίμου/οξειδωτικού	±1% της πλήρους κλίμακας	≥1
$T_{dew,fuel/ox,min}$	0 - 80	±2 °C	≥1
$RH_{fuel/ox}(\%)$	0 - 100	±5%	≥1
T_A (°C)	Θερμοκρασία δωματίου – 50	±2 °C	≥1

Η μέθοδος μεταβολής υγρασίας πρέπει να περιγράφεται μέσα στην τεχνική έκθεση μαζί με τις θερμοκρασίες δρόσου (και σχετική υγρασία) του αντιδρώντος αερίου.

Δοκιμή με σταθερό ρυθμό ροής

Μεταβλητές Τιμές Εισόδου

Πίνακας 4.7 : Μεταβλητές τιμές εισόδου με σταθερό ρυθμό ροής (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Είσοδος	Τιμή/Εύρος	Ακρίβεια	Ρυθμός Δειγματοληψίας (Herz)
i ($\frac{A}{cm^2}$)	0 - 2	±2% για $i < 0.1$ ($\frac{A}{cm^2}$) ±1% για $i \geq 0.1$ ($\frac{A}{cm^2}$)	≥1
T_C (°C)	$T_A - 80$	±2	≥1
λ_{H_2}	>1.1	-	-
λ_{O_2}	>2	-	-

Σταθερές Τιμές Εισόδου

Ανάλογα με την κυψέλη καυσίμου, η φύση ορισμένων από τις τιμές εισόδου μπορεί να αλλάξει. Αυτό σημαίνει ότι, υπό ορισμένες συνθήκες, κάποιες από τις σταθερές τιμές εισόδου μπορεί να μην μπορούν να ρυθμιστούν σε σταθερή τιμή ή ακόμα και να μεταβάλλονται.

Πίνακας 4.8 : Σταθερές τιμές εισόδου με σταθερό ρυθμό ροής (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Είσοδος	Τιμή/Εύρος	Ακρίβεια	Ρυθμός Δειγματοληψίας (Herz)
P_A (kPa)	100	$\pm 1\%$	
X_{H_2}	Μέχρι 100% H_2	$\pm 0.005\%$	-
X_{O_2}	21% O_2 – 79% N_2	$\pm 1\% O_2$	-
$P_{fuel/ox}$ (kPa)	Πίεση περιβάλλοντος – 300	$\pm 2\%$	≥ 1
$T_{dew,fuel/ox,in}$ ($^{\circ}C$)	0 – 80	± 2	≥ 1
$RH_{fuel/ox}$ (%)	0 – 100	$\pm 5\%$	≥ 1
T_C ($^{\circ}C$)	$T_A - 80$	± 2	≥ 1
$Q_{v,fuel}$	$Q_{v,fuel}$ (lmax)	$\pm 5\%$	≥ 1
$Q_{v,ox}$	$Q_{v,ox}$ (lmax)	$\pm 5\%$	≥ 1
T_A	Θερμοκρασία δωματίου – 50 $^{\circ}C$	± 2	

Αποτελέσματα Μετρήσεων

Πίνακας 4.9 : Τιμές Εξόδου ελέγχου καμπύλης πόλωσης (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Έξοδος	Αβεβαιότητα	Ρυθμός Δειγματοληψίας (Herz)
V	$\pm 0.5\%$ της πλήρους κλίμακας	≥ 1
P	Υπολογιζόμενο μέγεθος	-

Διαδικασία Ελέγχου

Βήμα 1^ο : Προετοιμασία αντικειμένου ελέγχου

Όπως έχει περιγραφεί παραπάνω (βλέπε σελίδα 27 Κεφάλαιο 4.1.1.)

Βήμα 2^ο : Ρύθμιση των συνθηκών ελέγχου (τιμές Εισόδου)

Η καμπύλη πόλωσης αναπαράγεται υπό γαλβανοστατικό έλεγχο με σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας, πίεση αερίου και σχετική υγρασία.

Με τον όρο “γαλβανοστατικός έλεγχος” εννοείται η πειραματική τεχνική, κατά την οποία ένα ηλεκτρόδιο διατηρείται σε σταθερό ρεύμα σε έναν ηλεκτρολύτη. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του ρυθμού διάβρωσης και των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων.

Η διαδικασία ξεκινά ρυθμίζοντας τις τιμές εισόδου στις τιμές που καθορίζονται για τη μέτρηση, εάν δεν αντιστοιχούν στο βήμα προετοιμασίας ή σε προηγούμενο βήμα.

Αυτό το βήμα διεξάγεται υπό γαλβανοστατική λειτουργία και η πυκνότητα ρεύματος καθορίζεται από το κύριο αντικείμενο του ελέγχου. Η αρχική τιμή της τάσης της κυψέλης μετράται σε αυτήν την πυκνότητα ρεύματος, όταν οι συνθήκες λειτουργίας έχουν φτάσει σε μια σταθερή τιμή.

Η σύγκριση αυτής της πρώτης τιμής με την τιμή τάσης κυψέλης που λαμβάνεται κατά τη διάρκεια του βήματος λήψης μετρήσεων (καμπύλη πόλωσης) και για ίδια τιμή πυκνότητας ρεύματος, θα πρέπει να χρησιμοποιείται ως ένδειξη της ακρίβειας.

Πριν την έναρξη της καμπύλης πόλωσης, η τάση του στοιχείου φέρεται σε τιμή τάσης ανοιχτοκυκλώσεως (OCV-open circuit voltage) (και, παράλληλα, οι ρυθμοί ροής αερίου στις ελάχιστες τιμές τους, όπως περιγράφονται στον πίνακα μεταβλητών τιμών εισόδου, 4.5) για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που επιτρέπει τη σταθεροποίηση των τιμών εισόδου. Συνιστάται η μέτρηση της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως (OCV) για τουλάχιστον 30 δευτερόλεπτα, αλλά λιγότερο από ένα λεπτό. Αυτό συμβαίνει διότι, η μεγάλη παραμονή στο OCV μπορεί να βλάψει ανεπανόρθωτα το σύστημα μεμβράνης ηλεκτροδίου.

Βήμα 3^ο : Αποτελέσματα Μετρήσεων

Όλες οι τιμές εισόδου και εξόδου ελέγχου θα πρέπει να μετρώνται συναρτήσει της διάρκειας του ελέγχου. Στόχος της καμπύλης πόλωσης είναι να προσδιοριστεί η μεταβολή της τάσης της μοναδιαίας κυψέλης (και κατά συνέπεια της πυκνότητας ισχύος) που δημιουργείται από τη μεταβολή της πυκνότητας ρεύματος. Για δοκιμή μοναδιαίας κυψέλης, είναι προτιμητέο η πυκνότητα ρεύματος να αυξάνεται από 0 (δηλαδή τάση ανοιχτοκυκλώσεως, OCV) μέχρι το μέγιστο φορτίο. Ως εκ τούτου, ο κύριος τεχνικός σκοπός του βήματος 3 είναι ο προσδιορισμός της τάσης (και της ισχύος) της κυψέλης καυσίμου σε κάθε καθορισμένο σημείο ρύθμισης της πυκνότητας ρεύματος.

Η διάρκεια αυτού του βήματος εξαρτάται από τη μέθοδο λήψης μετρήσεων (αριθμός βημάτων, ρυθμός αύξησης/μείωσης ρεύματος) και από το εάν έχει επιτευχθεί ένα κριτήριο λήξης ελέγχου:

- μέγιστη τιμή ρεύματος ή ελάχιστη τιμή τάσης

Όταν έχει διεξαχθεί η διαδικασία αναπαραγωγής καμπύλης πόλωσης, η πυκνότητα ρεύματος πρέπει να ρυθμιστεί στην τιμή που απαιτείται για το επόμενο βήμα των δοκιμών. Στο τελευταίο βήμα των μετρήσεων, δηλαδή όταν το τέλος της καμπύλης πόλωσης αντιστοιχεί στο τέλος όλου του ελέγχου, η πυκνότητα ρεύματος θα πρέπει να σταθεροποιηθεί στο μηδέν πριν απενεργοποιηθεί η διάταξη.

Κριτήριο λήξης δοκιμής : Για όλες τις μεθόδους λήψης μετρήσεων, η δοκιμή πρέπει να τερματίζεται όταν επιτευχθεί η μέγιστη τιμή πυκνότητας ρεύματος ή εάν η τάση του στοιχείου πέσει κάτω από μια προκαθορισμένη ελάχιστη τιμή τάσης. Συνιστάται η χρήση ελάχιστης τιμής τάσης 0,5 V, εάν οι μετρήσεις πρέπει να επαναληφθούν π.χ. κατά τη διάρκεια μιας μακροπρόθεσμης μέτρησης για ερευνητικούς σκοπούς. Για δοκιμή διαδικασιών διάχυσης και μεταφοράς νερού, συνιστάται ελάχιστη τάση 0,3 V για την αποφυγή μη αναστρέψιμης βλάβης των στοιχείων της κυψέλης.

Βήμα 4^ο : Επεξεργασία Δεδομένων

Σε αυτό το σημείο, καθορίζεται η μέση τάση κατά τη διάρκεια των τελευταίων 5 λεπτών κάθε βήματος ρεύματος, καθώς και η τιμή τυπικής απόκλισης της τάσης κατά τη διάρκεια αυτού του χρόνου. Η πυκνότητα ισχύος θα είναι μια υπολογισμένη έξοδος αυτής της δοκιμής βάσει της σχέσης 4.1 .

4.1.3. Δοκιμή επιταχυνόμενης γήρανσης

Ο στόχος είναι προσδιορισμός της μεταβολής τάσης μίας μοναδιαίας κυψέλης καυσίμου και η πιστοποίηση της γενικής απόδοσης της , κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής επιταχυνόμενης γήρανσης, που πραγματοποιείται με την υποβολή της σε επαναλαμβανόμενο φορτίο. Η τιμή πυκνότητας ρεύματος ακολουθεί ένα προφίλ ενεργοποίησης/απενεργοποίησης φορτίου σε σχέση με το χρόνο.

Μεταβλητές Τιμές Εισόδου

Μεταξύ των παρακάτω τιμών εισόδου, η T_C θα πρέπει να είναι μεταβλητή μόνο κατά την εκκίνηση και τα βήματα προετοιμασίας. Οι άλλες τιμές εισόδου μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του βήματος ενεργοποίησης/ απενεργοποίησης φορτίου.

Πίνακας 4.10 : Μεταβλητές τιμές εισόδου δοκιμής επιταχυνόμενης γήρανσης (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Είσοδος	Τιμή/Εύρος	Ακρίβεια	Ρυθμός Δειγματοληψίας
t (h)	0 - 5000	-	-
$I \left(\frac{A}{cm^2} \right)$	0 - 2	±2% μέγιστης κλίμακας για <0.1 ±1% μέγιστης κλίμακας για >0.1	≥1
i	0 (κατά τη διάρκεια της "off" φάσης) 0.8>load>0.5 (κατά τη διάρκεια της "on" φάσης)	±2% μέγιστης κλίμακας για <0.1 ±1% μέγιστης κλίμακας για >0.1	≥1
T_C (°C)	$T_A - 80$	±2°C	≥1
$Q_{v,fuel}$	Κατ'αντιστοιχία με την στοιχειομετρία του καυσίμου	±1% μέγιστης κλίμακας	≥1
$Q_{v,ox}$	Κατ'αντιστοιχία με την στοιχειομετρία του οξειδωτικού μέσου	±1% μέγιστης κλίμακας	≥1

Σταθερές Τιμές Εισόδου

Πίνακας 4.11 : Σταθερές τιμές εισόδου δοκιμής επιταχυνόμενης γήρανσης (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Είσοδος	Εύρος/τιμή	Ακρίβεια	Ρυθμός Δειγματοληψίας
X_{H_2}	H_2		-
X_{O_2}	Αέρας ή καθαρό O_2	±1%	-
P_{ox}	Περιβάλλον μέχρι 300 KPa	±2%	1
P_{fuel}	Περιβάλλον μέχρι 300 KPa	±2%	1
RH_{ox}	0 – 100%	±5% πλήρους κλίμακας	≥1
RH_{fuel}	0 – 100%	±5% πλήρους κλίμακας	≥1
λ_{ox}	2 – 3	-	-
λ_{fuel}	1.1 - 2	-	-
T_C	$T_A - 80$	±2	1

Αποτελέσματα Μετρήσεων

Πίνακας 4.12 : Τιμές εξόδου δοκιμής επιταχυνόμενης γήρανσης (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Έξοδος	Αβεβαιότητα	Ρυθμός Δειγματοληψίας
V	Υπολογίζεται	-
P	±0.5% πλήρους κλίμακας	≥1

Διαδικασία Ελέγχου

Βήμα 1^ο : Προετοιμασία αντικείμενου ελέγχου

Όπως έχει περιγραφεί παραπάνω (βλέπε σελίδα 27, Κεφάλαιο 4.1.1.)

Βήμα 2^ο : Ρύθμιση των Τιμών Εισόδου

Η δοκιμή γίνεται υπό γαλβανοστατικό έλεγχο με υποβολή της κυψέλης καυσίμου σε επαναλαμβανόμενο φορτίο, σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας και συνθήκες αερίων.

Αυτό το βήμα ξεκινά ρυθμίζοντας την πυκνότητα ρεύματος σε i_{load} (που αντιστοιχεί στη φάση “ενεργοποίησης” του κύκλου) και στη συνέχεια τις συνθήκες λειτουργίας στις τιμές που καθορίζονται για τη μέτρηση της τάσης σε σχέση με το χρόνο (επιλεγμένα εντός του καθορισμένου εύρους) -όταν αυτές οι τιμές δεν αντιστοιχούν στο βήμα προετοιμασίας ή στο προηγούμενο βήμα. Μια πρώτη τιμή της τάσης του στοιχείου σε φορτίο i_{load} μετράται όταν οι συνθήκες λειτουργίας έχουν σταθεροποιηθεί. Το συμπέρασμα της συγκεκριμένης δοκιμής βασίζεται εν μέρει σε αυτήν την αρχική τιμή.

Βήμα 3° : Αποτελέσματα μετρήσεων

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, οι σταθερές τιμές εισόδου ελέγχου (θερμοκρασίες, σχετική υγρασία και πιέσεις) πρέπει να διατηρούνται στις τιμές που έχουν επιλεγεί εντός των ορίων και με την ακρίβεια που καθορίζεται στον πίνακα 4.11. Όλες οι λειτουργικές τιμές εισόδου και εξόδου μετρώνται συναρτήσει χρόνου.

Αρχική καμπύλη πόλωσης

Προτού αρχίσει το βήμα λήψης μετρήσεων, μια αρχική καμπύλη πόλωσης θα πρέπει να αναπαραχθεί, όπως περιγράφηκε παραπάνω (βλέπε κεφάλαιο 4.1.2.)

Κριτήρια λήξης: Η αναπαραγωγή καμπύλης πόλωσης θα πρέπει να σταματήσει όταν επιτευχθεί η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος ή εάν η τάση του στοιχείου πέσει κάτω από 0,3 V (προκειμένου να αποφευχθεί η μη αντιστρεπτή βλάβη των στοιχείων της κυψέλης).

Διαδικασία λήψης μετρήσεων

Ο κύριος στόχος είναι να προσδιοριστεί η μεταβολή τόσο της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως όσο και της τάσης υπό φορτίο, συναρτήσει χρόνου, κατά την υποβολή της μοναδιαίας κυψέλης σε ένα συγκεκριμένο προφίλ φορτίου, αποτελούμενο από φάσεις «ενεργοποίησης» και «απενεργοποίησης» των 15 λεπτών (ή αλλιώς “on”/“off” φάσεων, αντίστοιχα).

Μετά την αρχική καμπύλη πόλωσης, η πυκνότητα ρεύματος σταθεροποιείται ξανά στο φορτίο i_{load} για μια πρώτη φάση «ενεργοποίησης» 15 λεπτών.

Στη συνέχεια, ακολουθείται το παρακάτω προφίλ:

- Φάση “off” = 15 λεπτά σε 0 A/cm²
- Φάση “on” = 15 λεπτά σε φορτίο i_{load} A/cm²:

συνιστάται η αύξηση της πυκνότητας ρεύματος βήμα προς βήμα για αποφυγή σημαντικής πτώσης τάσης. Το ρεύμα πρέπει να αυξηθεί από 0 σε φορτίο i_{load} σε τέσσερα βήματα των 10 δευτερολέπτων αυξάνοντας το ρεύμα του φορτίου $i_{load} / 4$ σε κάθε βήμα:

1. $\frac{1}{4} i_{load}$ φορτίο A/cm² κατά τη διάρκεια 10 sec
2. $\frac{1}{2} i_{load}$ φορτίο A/cm² κατά τη διάρκεια 10 sec
3. $\frac{3}{4} i_{load}$ φορτίο A/cm² κατά τη διάρκεια 10 sec
4. i_{load} A/cm² κατά τη διάρκεια 14 min 30 sec

Κατά τη διάρκεια των δύο φάσεων, οι ρυθμοί ροής πρέπει να ρυθμίζονται ως εξής:

- φάση «on»: $Q_{fuel} = Q_{λ,fuel}$ και $Q_{ox} = Q_{λ,ox}$
- φάση «off»: $Q_{fuel} = Q_{fuel,min,OCV}$ και $Q_{ox} = Q_{ox,min,OCV}$

Όπου: $Q_{fuel,min,OCV}$ και $Q_{ox,min,OCV}$ αντιστοιχούν στις μικρότερες ποσότητες αερίου που απαιτούνται για τη διατήρηση των πιέσεων p_{fuel} και p_{ox} , κατά τη διάρκεια των "off" φάσεων. Αυτές οι τιμές θα πρέπει να είναι χαμηλότερες από τα $Q_{fuel,min}$ και $Q_{ox,min}$ που ορίζονται στον πίνακα 4.10 και που αντιστοιχούν στα ελάχιστα, όταν η κυψέλη δεν βρίσκεται σε κατάσταση ανοιχτοκυκλώσεως.

Η διάρκεια αυτού του βήματος εξαρτάται από το αντικείμενο της δοκιμής και από το σχετικό ειδικό κριτήριο λήξης: σταθερή δοκιμή χρόνου ζωής ή σταθερές απώλειες απόδοσης (λαμβάνοντας υπόψη την ισχύ, την τάση στο φορτίο ή την τάση ανοιχτού κυκλώματος).

Εάν η συγκεκριμένη δοκιμή χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της διάρκειας ζωής των εξαρτημάτων, συνιστάται η εφαρμογή της δοκιμής σε πολλά πανομοιότυπα κελιά για διαφορετικές σταθερές χρονικές περιόδους, προκειμένου να αναλυθούν τα εξαρτήματα σε διαφορετικά στάδια γήρανσης.

Κριτήριο λήξης δοκιμής: πέραν των πιθανών διαφορετικών κριτηρίων λήξης που ορίζονται, η δοκιμή πρέπει να διακόπτεται (διακοπή ροής αερίων, θερμοκρασιών και διακοπή φορτίου), εάν η τάση της κυψέλης πέσει κάτω από μια προκαθορισμένη ελάχιστη τιμή. Συνιστάται η χρήση ελάχιστης τιμής τάσης 0,5 V εάν τα εξαρτήματα που εξετάζονται πρέπει να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω δοκιμές. Για ερευνητικούς σκοπούς π.χ. Για τον προσδιορισμό του χρόνου ζωής και την ανάλυση των αιτιών της μειωμένης απόδοσης συνιστάται μια ελάχιστη τάση 0,3 V, για την αποφυγή μη αντιστρεπτής βλάβης των στοιχείων της κυψέλης.

Τελική Καμπύλη Πόλωσης

Μετά τη λήξη του βήματος λήψης μετρήσεων, πρέπει να αναπαραχθεί μια τελική καμπύλη πόλωσης, όπως περιγράφηκε παραπάνω (κεφάλαιο 4.1.2), εκτός εάν η απώλεια απόδοσης των εξαρτημάτων (όπως αστοχία μεμβράνης) δεν το επιτρέπει. Η τελική καμπύλη πρέπει να ξεκινήσει μετά από μια φάση «on» υπό φορτίο i_{load} . Η σύγκριση της τελικής καμπύλης πόλωσης με την αρχική χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί η απώλεια απόδοσης της κυψέλης σε όλο το εύρος της πυκνότητας ρεύματος προκειμένου να αναλυθούν οι αιτίες της απώλειας.

Κριτήρια λήξης: η αναπαραγωγή της καμπύλης πόλωσης θα πρέπει να σταματήσει όταν επιτευχθεί η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος ή εάν η τάση του στοιχείου πέσει κάτω από 0,3 V (προκειμένου να αποφευχθεί η μη αντιστρεπτή βλάβη των στοιχείων της κυψέλης).

Βήμα 4^ο : Επεξεργασία Δεδομένων

Εάν η μονάδα ελέγχου δεν επιτρέπει την διαδικτυακή επεξεργασία δεδομένων, ο όγκος των δεδομένων που έχει καταχωρηθεί με ρυθμό δειγματοληψίας 1 Hz μπορεί να είναι υπερβολικός για μετα-επεξεργασία. Εάν απαιτείται ρυθμός δειγματοληψίας μικρότερος από 1 Hz κατά τις μακροπρόθεσμες μετρήσεις, θα πρέπει να τηρείται τουλάχιστον ο ρυθμός δειγματοληψίας 1 Hz, κατά τη διάρκεια της

καμπύλης πόλωσης. Συνιστάται, επίσης, η χρήση υψηλότερου ρυθμού δειγματοληψίας ακριβώς πριν και μετά τις καμπύλες πόλωσης προκειμένου να προσδιοριστεί με σαφήνεια η επίδρασή τους στην απόδοση. Οι πραγματικοί ρυθμοί δειγματοληψίας δεδομένων πρέπει να αναφέρονται στην τεχνική έκθεση.

Η πυκνότητα ισχύος (σχέση 4.1) θα πρέπει να υπολογιστεί ως περαιτέρω έξοδος και μπορεί να υπολογιστεί για όλα τα βήματα μέτρησης (καμπύλες πόλωσης και φάσεις "on").

Οι αποκλίσεις τάσης ΔV θα πρέπει να υπολογιστούν μεταξύ της πρώτης και τελευταίας φάσης απενεργοποίησης (τάση ανοιχτοκυκλώσεως) και μεταξύ πρώτης και τελευταίας φάσης ενεργοποίησης (υπό φορτίο), καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου προκειμένου να αξιολογηθεί ένας "ρυθμός προόδου απόδοσης" (συνήθως ένας "ρυθμός απώλειας" απόδοσης).

$\Delta V_{OCV}/dt$ και $\Delta V_{i_{load}}/dt$:

$$\Delta V_{OCV} = OCV \text{ της πρώτης "off" φάσης} - OCV \text{ της τελευταίας "off" φάσης} \quad (4.4)$$

$$\Delta V_{i_{load}} = V \text{ σε } i_{load} \text{ της πρώτης "on" φάσης} - V \text{ σε } i_{load} \text{ της τελευταίας "on" φάσης} \quad (4.5)$$

Η απώλεια απόδοσης θα υπολογιστεί σε % στο i_{load} ως εξής:

$$\eta_V = \frac{[V \text{ σε } i_{load} \text{ της πρώτης "on" φάσης} - V \text{ σε } i_{load} \text{ της τελευταίας "on" φάσης}]}{V \text{ σε } i_{load} \text{ της πρώτης "on" φάσης}} \quad (4.6)$$

$$\eta_P = \frac{P \text{ σε } i_{load} \text{ της πρώτης "on" φάσης} - P \text{ σε } i_{load} \text{ της τελευταίας "on" φάσης}}{P \text{ σε } i_{load} \text{ της πρώτης "on" φάσης}} \quad (4.7)$$

Οι απώλειες απόδοσης θα πρέπει να υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο για όλο το εύρος της πυκνότητας ρεύματος χρησιμοποιώντας την τελική και αρχική καμπύλη πόλωσης.

4.1.4. Μακροπρόθεσμη δοκιμή αντοχής μοναδιαίας κυψέλης

Ο στόχος είναι ο προσδιορισμός της μεταβολής τάσης μιας μοναδιαίας κυψέλης με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων, κατά τη διάρκεια μιας μακροπρόθεσμης δοκιμής αντοχής που εκτελείται σε σταθερή λειτουργία με σταθερή τιμή πυκνότητας ρεύματος. Η δοκιμή περιλαμβάνει επαναλαμβανόμενη αναπαραγωγή καμπυλών πόλωσης, για την αξιολόγηση της απόδοσης της κυψέλης σε σταθερά διαστήματα της συνολικής διάρκειας (της δοκιμής).

Τιμές Εισόδου Δοκιμής

Μεταβλητές Τιμές Εισόδου

Από τις παρακάτω τιμές εισόδου, οι T_C , i , $Q_{v,fuel}$ και $Q_{v,ox}$ μεταβάλλονται μόνο κατά τη διαδικασία εκκίνησης και το βήμα προετοιμασίας.

Πίνακας 4.13 : Μεταβλητές τιμές εισόδου μακροπρόθεσμης δοκιμής αντοχής (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Είσοδος	Εύρος/Τιμή	Ακρίβεια	Ρυθμός Δειγματοληψίας
t (h)	0 – 10000 h	-	-
i (A/cm^2)	0 – 2	$\pm 2\%$ πλήρους κλίμακας για $i < 0.1$ $\pm 1\%$ για $i \geq 0.1$	≥ 1
T_C ($^{\circ}C$)	$T_A - 80$	± 2	≥ 1
$Q_{v,fuel}$	Κατ'αντιστοιχία με την στοιχειομετρία του καυσίμου	$\pm 1\%$ πλήρους κλίμακας	≥ 1
$Q_{v,ox}$	Κατ'αντιστοιχία με την στοιχειομετρία του οξειδωτικού μέσου	$\pm 1\%$ πλήρους κλίμακας	≥ 1

Σταθερές Τιμές Εισόδου

Πίνακας 4.14 : Σταθερές τιμές εισόδου μακροπρόθεσμης δοκιμής αντοχής (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Είσοδος	Τιμή/Εύρος	Ακρίβεια	Ρυθμός Δειγματοληψίας
X_{H_2}	H_2	+0/-0.001% H_2	-
X_{O_2}	Αέρας ή καθαρό O_2	± 1	-
p_{ox}	Περιβάλλον έως και 300 kPa	± 2	≥ 1
p_{fuel}	Περιβάλλον έως και 300 kPa	± 2	≥ 1
RH_{ox}	0 – 100%	± 5	≥ 1
RH_{fuel}	0 – 100%	± 5	≥ 1
λ_{ox}	2 - 3	-	-
λ_{fuel}	1.1 - 2	-	-
T_C	$T_A - 80$	± 2	≥ 1

Αποτελέσματα Μετρήσεων

Πίνακας 4.15 : Τιμές εξόδου μακροπρόθεσμης δοκιμής αντοχής (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Έξοδος	Ακρίβεια	Ρυθμός Δειγματοληψίας
P	Υπολογιζόμενο μέγεθος	-
V	±0.5 πλήρους κλίμακας	≥1

Διαδικασία Ελέγχου

Βήμα 1° : Προετοιμασία του αντικειμένου ελέγχου

Όπως έχει περιγραφεί παραπάνω (βλέπε σελίδα 27, Κεφάλαιο 4.1.1.)

Βήμα 2° : Ρύθμιση συνθηκών λειτουργίας

Η δοκιμή διεξάγεται υπό γαλβανοστατικό έλεγχο με σταθερή πυκνότητα ρεύματος, θερμοκρασία λειτουργίας και συνθήκες αερίου για όλες τις σταθερές φάσεις λήψης μετρήσεων. Ακολουθείται ένα προφίλ φορτίου με ποικίλους ρυθμούς ροής, κατά την αναπαραγωγή των καμπυλών πόλωσης. Αυτό το βήμα ξεκινά με τη ρύθμιση της πυκνότητας ρεύματος σε i_{load} (που αντιστοιχεί στη σταθερή πυκνότητα ρεύματος που καθορίζεται) και στη συνέχεια τις συνθήκες λειτουργίας στις τιμές που καθορίζονται για τη μέτρηση τάσης σε σχέση με το χρόνο (επιλεγμένα εντός του αντίστοιχου, για κάθε μεταβλητή, εύρους), όταν οι τιμές δεν αντιστοιχούν ήδη στο βήμα προετοιμασίας ή στο προηγούμενο βήμα. Μια πρώτη τιμή της τάσης κυψέλης σε φορτίο i (V_{init}) μετράται όταν οι συνθήκες λειτουργίας έχουν φθάσει όλες σε μια σταθερή τιμή. Το συμπέρασμα της δοκιμής που αναφέρεται στην πιστοποίηση της μοναδιαίας κυψέλης που ελέγχεται, βασίζεται εν μέρει σε αυτήν την αρχική τιμή.

Βήμα 3° : Αποτελέσματα Μετρήσεων

Η μακροπρόθεσμη μελέτη αντοχής περιλαμβάνει μακροπρόθεσμα σταθερά βήματα και καμπύλες πόλωσης, όπως έχουν περιγραφεί παραπάνω (κεφάλαιο 4.1.2). Οι καμπύλες πόλωσης αναπαράγονται σε σταθερά διαστήματα που αντιστοιχούν σε $t_{max}/10$

όπου t_{max} είναι η μέγιστη διάρκεια της δοκιμής, με $500 < t_{max} < 10000$ ώρες

Οπότε, τα βήματα των μετρήσεων ακολουθούν την παρακάτω σειρά :

- Αρχική καμπύλη πόλωσης που ξεκινά από $t = 0$ μετά τη σταθεροποίηση λειτουργίας σε φορτίο i_{load}
- Μακροπρόθεσμη σταθερή φάση δοκιμής No 1
- Δεύτερη καμπύλη πόλωσης στο $t = t_{max}/10$
- Μακροπρόθεσμη σταθερή φάση δοκιμής No 2
- Τρίτη καμπύλη πόλωσης στο χρόνο $t = 2 \cdot t_{max}/10$...
- Μακροπρόθεσμη σταθερή φάση δοκιμής No (n)
- Καμπύλη πόλωσης No (n+1) στο χρόνο $t = n \cdot t_{max}/10$, με $1 \leq n \leq 10$

Η σύγκριση της τελικής καμπύλης πόλωσης με την αρχική χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της απώλειας απόδοσης της κυψέλης σε όλο το εύρος της πυκνότητας ρεύματος προκειμένου να αναλυθούν οι αιτίες απώλειας απόδοσης, εάν υπάρχουν. Η διάρκεια της μακροπρόθεσμης δοκιμής αντοχής θα είναι t_{max} , εκτός εάν προηγουμένως έχει ικανοποιηθεί άλλο κριτήριο λήξης δοκιμής, που ορίζεται είτε σύμφωνα με τεχνικά θέματα είτε με θέματα ασφαλείας. Άλλα κριτήρια λήξης μπορούν να καθοριστούν για τη δοκιμή ανάλογα με τον στόχο της δοκιμής, όπως αποδεκτές σταθερές απώλειες απόδοσης (λαμβάνοντας υπόψη την ισχύ, την τάση υπό φορτίο ή την τάση ανοιχτοκυκλώσεως). Εάν η δοκιμή χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της διάρκειας ζωής των εξαρτημάτων, συνιστάται η εφαρμογή της σε πολλά πανομοιότυπα κελιά για διαφορετικές σταθερές χρονικές περιόδους, προκειμένου να αναλυθούν τα εξαρτήματα σε διαφορετικά στάδια γήρανσης.

Κριτήριο Λήξης Δοκιμής :

Η δοκιμή πρέπει να διακόπτεται (διακοπή ροής αερίων, θερμοκρασιών και φορτίου) εάν η τάση κυψέλης πέσει κάτω από μια προκαθορισμένη ελάχιστη τάση - ελάχιστης τιμή τάσης 0,5 V - εάν τα εξαρτήματα που εξετάζονται πρέπει να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω δοκιμές. Για ερευνητικούς σκοπούς π.χ. Για τον προσδιορισμό του χρόνου ζωής, συνιστάται μια ελάχιστη τάση 0,3 V για την αποφυγή μη αντιστρεπτής βλάβης των στοιχείων της κυψέλης.

Βήμα 4^ο : Επεξεργασία Δεδομένων

Η κύρια έξοδος της δοκιμής είναι η μεταβολή της τάσης συναρτήσει χρόνου. Η πυκνότητα ισχύος (σχέση 4.1) υπολογίζεται ως περαιτέρω έξοδος και μπορεί να υπολογιστεί για όλα τα βήματα λήψης μετρήσεων (καμπύλες πόλωσης και σταθερές φάσεις).

Η συνολική απόλυτη και σχετική απώλεια απόδοσης για τη μακροπρόθεσμη μέτρηση θα πρέπει να υπολογιστεί από τη σταθεροποιημένη τάση στο i_{load} ακριβώς πριν από την πρώτη καμπύλη πόλωσης $V_{i_{load}}(t=0)$ και την τάση στο i_{load} λίγο πριν την τελευταία καμπύλη πόλωσης $V_{i_{load}}(t = t_{max})$:

$$\Delta V_{i_{load}} = V_{i_{load}}(t = 0) - V_{i_{load}}(t = t_{max}) \quad (4.8)$$

$$\frac{\Delta V_{i_{load}}}{V_o} = \frac{(V_{i_{load}}(t=0) - V_{i_{load}}(t=t_{max}))}{V_{i_{load}}(t=0)} \quad (4.9)$$

$$\frac{\Delta P_{i_{load}}}{P_o} = \frac{(P_{i_{load}}(t=0) - P_{i_{load}}(t=t_{max}))}{P_{i_{load}}(t=0)} \quad (4.10)$$

Η απώλεια απόδοσης μπορεί επίσης να εκτιμηθεί με τον υπολογισμό ενός ρυθμού απώλειας τάσης (σε V/h) σε μια επιλεγμένη χρονική περίοδο ($\Delta t = t_2 - t_1$):

$$\frac{\Delta V_{load}}{\Delta t} = \frac{[\Delta V_{load}(t=t_2) - \Delta V_{load}(t=t_1)]}{t_2 - t_1} \quad (4.11)$$

Ο ρυθμός απώλειας τάσης μπορεί να υπολογιστεί για όλη τη διάρκεια της δοκιμής ή για μικρότερες περιόδους, προκειμένου να μελετηθεί η εξέλιξη της απώλειας απόδοσης. Αντίστοιχα, μπορεί να υπολογιστεί ρυθμός μεταβολής για την πυκνότητα ισχύος:

$$\frac{\Delta P_{load}}{\Delta t} = \frac{[\Delta P_{load}(t=t_2) - \Delta P_{load}(t=t_1)]}{t_2 - t_1} \quad (4.12)$$

Οι απώλειες απόδοσης θα πρέπει να υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο για όλο το εύρος τιμών πυκνότητας ρεύματος χρησιμοποιώντας την τελική και αρχική καμπύλη πόλωσης.

4.1.5. Δυναμικοί κύκλοι φόρτισης για δοκιμή γήρανσης της κυψέλης καυσίμου

Ο στόχος είναι να προσδιοριστεί η μεταβολή της τάσης μιας μοναδιαίας κυψέλης καυσίμου τύπου PEM κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής αντοχής που πραγματοποιείται υπό συνθήκες επαναλαμβανόμενου φορτίου με την πυκνότητα ρεύματος να ακολουθεί ένα δυναμικό προφίλ έναντι του χρόνου. Αυτή η δοκιμή είναι ειδικά προσαρμοσμένη για εφαρμογές μεταφορών, καθώς το προφίλ φορτίου που ορίζεται είναι μια προσαρμογή του τύπου προφίλ ισχύος που ορίζεται για διαφορετικά οχήματα, συμπεριλαμβανομένων διαφορετικών επιπέδων ισχύος με δυναμικές διακυμάνσεις. Ωστόσο, δεδομένου ότι πολλές εφαρμογές ενδιαφέρονται για τη συμπεριφορά γήρανσης των εξαρτημάτων της κυψέλης, η δοκιμή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την πιστοποίηση της γενικής απόδοσης μιας κυψέλης καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης που υποβάλλεται σε αυτήν τη επαναλαμβανόμενη δοκιμή γήρανσης. Μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί ως γενική μέθοδος για τον χαρακτηρισμό εξαρτημάτων της κυψέλης, όπως το σύστημα μεμβράνης ηλεκτροδίου ή υποεξαρτήματα του συστήματος μεμβράνης ηλεκτροδίου, για στόχους έρευνας και ανάπτυξης είτε ως ειδική δοκιμή για τον προσδιορισμό του χρόνου ζωής των εξαρτημάτων για ένα συγκεκριμένο σύστημα μεταφορών με προσαρμοσμένες συνθήκες λειτουργίας.

Τιμές Εισόδου Ελέγχου

Μεταβλητές Τιμές Εισόδου

Πίνακας 4.16 : Μεταβλητές τιμές εισόδου δοκιμής γήρανσης (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Είσοδος	Εύρος/Τιμή	Ακρίβεια	Ρυθμός Δειγματοληψίας (Hz)
t(h)	0 – 5000 h	-	-
i (A/cm^2)	0 – 2 A/cm^2	±2 πλ. κλίμακας για $i < 0.1A/cm^2$ ±1 πλ. κλίμακας για $i \geq 0.1A/cm^2$	≥1
i	0 (κατά τη διάρκεια off φάσης) 0,8>iload>0,5 A/cm^2 (κατά τη διάρκεια on φάσης)	±2 πλ. κλίμακας για $i < 0.1A/cm^2$ ±1 πλ. κλίμακας για $i \geq 0.1A/cm^2$	≥1
T_C	$T_A - 80$	±2	≥1
$Q_{v,fuel}$	Κατ'αντιστοιχία με την στοιχειομετρία καυσίμου	±1 πλήρους κλίμακας	≥1
$Q_{v,ox}$	Κατ'αντιστοιχία με τη στοιχειομετρία οξειδωτικού	±1 πλήρους κλίμακας	≥1

Σταθερές Τιμές Εισόδου

Πίνακας 4.17 : Σταθερές τιμές εισόδου δοκιμής γήρανσης (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Είσοδος	Εύρος/Τιμή	Ακρίβεια	Ρυθμός Δειγματοληψίας (Hz)
X_{H_2}	H_2	+0/-0.001% H_2	-
X_{O_2}	Αέρας ή καθαρό O_2	±1 O_2	-
p_{ox}	Περιβάλλον μέχρι 300 kPa	±2	≥1
p_{fuel}	Περιβάλλον μέχρι 300 kPa	±2	≥1
RH_{ox}	0 – 100%	±5	≥1
RH_{fuel}	0 – 100 %	±5	≥1
λ_{ox}	2 – 3	-	-
λ_{fuel}	1.1 – 2	-	-
T_C	$T_A - 80$	±2	≥1

Αποτελέσματα Μετρήσεων

Πίνακας 4.18 : Τιμές εξόδου δοκιμής γήρανσης (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Έξοδος	Ακρίβεια	Ρυθμός Δειγματοληψίας
P	Υπολογιζόμενο μέγεθος	-
V	±0.5% πλήρους κλίμακας	≥1

Διαδικασία Ελέγχου

Βήμα 1^ο : Προετοιμασία αντικειμένου ελέγχου

Όπως έχει περιγραφεί παραπάνω (βλέπε σελίδα 27, Κεφάλαιο 4.1.1.)

Βήμα 2^ο : Ρύθμιση Συνθηκών Λειτουργίας (Τιμές Εισόδου Δοκιμής)

Ο έλεγχος διεξάγεται υπό γαλβανοστατικό έλεγχο με προφίλ φορτίου με σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας και συνθήκες αερίων. Αυτό το βήμα ξεκινά με τη ρύθμιση της πυκνότητας ρεύματος σε $i_{load,max} = i$ στο 100% P_{max} (το P_{max} αναφέρεται στη μέγιστη ισχύ που μπορεί να επιτευχθεί από την κυψέλη καυσίμου σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και όχι στην ονομαστική) και στη συνέχεια οι συνθήκες λειτουργίας στις τιμές που καθορίζονται για τη μέτρηση της τάσης σε σχέση με το χρόνο (επιλεγμένες εντός των καθορισμένων ορίων).

Το $i_{load,max} = i$ στο 100% P_{max} είναι η μέγιστη τιμή ρεύματος φορτίου, κατά την επαναλαμβανόμενη δοκιμή και ορίζεται ως η πυκνότητα ρεύματος που αντιστοιχεί στο 100% της μέγιστης ισχύος που πρέπει να παρέχεται κατά την κανονική λειτουργία από την κυψέλη καυσίμου. Αυτή η τιμή πυκνότητας ρεύματος, ρυθμίζεται στην αρχική τιμή, που αντιστοιχεί στην αρχική τιμή του P_{max} . Το P_{max} πρέπει να καθοριστεί από προηγούμενο πείραμα σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζονται για την κυψέλη καυσίμου ή για σύστημα, από τους τελικούς χρήστες ή τους κατασκευαστές. Μια πρώτη τιμή της τάσης του στοιχείου στο μέγιστο φορτίο i μετράται όταν οι συνθήκες λειτουργίας έχουν σταθεροποιηθεί σε μία συγκεκριμένη τιμή. Το συμπέρασμα της δοκιμής που αναφέρεται στην πιστοποίηση της μοναδιαίας κυψέλης που δοκιμάστηκε θα βασίζεται εν μέρει σε αυτήν την αρχική τιμή.

Βήμα 3^ο : Αποτελέσματα Μετρήσεων

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, οι τιμές εισόδου δοκιμής σε σταθερές συνθήκες (θερμοκρασίες, σχετική υγρασία και πιέσεις) πρέπει να διατηρούνται στις τιμές που επιλέγονται εντός των ορίων και με την ακρίβεια που καθορίζεται. Όλες οι λειτουργικές τιμές εισόδου/εξόδου μετρώνται συναρτήσει χρόνου.

Βήμα μέτρησης ανά κύκλο φορτίου

Ο κύριος στόχος είναι να προσδιοριστεί η μεταβολή της τάσης σε V/ώρες κατά την υποβολή της μοναδιαίας κυψέλης υπό ένα συγκεκριμένο προφίλ φορτίου, συμπεριλαμβανομένων των φάσεων χαμηλής και υψηλής τιμής ισχύος, που προσδιορίζονται ως $i_{load,min}$ και $i_{load,max}$ αντίστοιχα. Δεδομένου ότι οι καμπύλες πόλωσης θα αναπαραχθούν σε σταθερά διαστήματα, είναι δυνατό να προσδιοριστεί επίσης η μεταβολή της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως και της τάσης σε άλλα επίπεδα ισχύος από αυτά που περιλαμβάνονται στον κύκλο. Πρέπει να αναπαραχθεί μια αρχική καμπύλη πόλωσης (βλέπε κεφάλαιο 4.1.2.) μετά τη σταθεροποίηση στο μέγιστο φορτίο i . Μετά την αρχική καμπύλη πόλωσης, η πυκνότητα

ρεύματος σταθεροποιείται στο $i_{load,max}$ για μια πρώτη φάση διάρκειας 10 λεπτών υψηλής τιμής ισχύος για να σταθεροποιηθούν οι συνθήκες λειτουργίας πριν από την έναρξη της φάσης επαναλαμβανόμενου φορτίου.

Στη συνέχεια, η φάση επαναλαμβανόμενου φορτίου πρέπει να αναπαραχθεί με βάση το ακόλουθο τρέχον προφίλ:

- σταθερή φάση χαμηλής τιμής ισχύος = 40 δευτερόλεπτα στο i στο 20% P_{max} A/cm²
- σταθερή φάση υψηλής τιμής ισχύος = 20 δευτερόλεπτα με αύξηση i από i στο 20% P_{max} σε i στο 100% P_{max} A/cm²

Μέθοδοι για την τεχνική εφαρμογή αυτών των κύκλων, συμπεριλαμβανομένου ιδιαίτερα του τρόπου αύξησης της πυκνότητας ρεύματος από $i_{load,min}$ στο $i_{load,max}$, συνιστώνται στο Παράρτημα Ε. Η δοκιμή γήρανσης περιλαμβάνει αυτές τις φάσεις δυναμικού κύκλου και τις καμπύλες πόλωσης. Οι καμπύλες πόλωσης αναπαράγονται σε σταθερά διαστήματα που αντιστοιχούν σε $t_{max}/10$

όπου t_{max} είναι η μέγιστη διάρκεια της δοκιμής και μπορεί να καθοριστεί μεταξύ 500 και 10000 ωρών ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας και την εφαρμογή που αφορά η δοκιμή. Έτσι, το βήμα λήψης μετρήσεων της δοκιμής θα ακολουθήσει τη σειρά:

- Αρχική καμπύλη πόλωσης που ξεκινά από $t = 0$
- Δυναμικός κύκλος φόρτισης No 1
- Καμπύλη πόλωσης No 2 σε $t = t_{max}/10$
- Δυναμικός κύκλος φόρτισης No 2
- Καμπύλη πόλωσης No 3 σε $t = 2 * t_{max}/10 \dots$
- Δυναμικός κύκλος φόρτισης No (n)
- Καμπύλη πόλωσης No (n+1) σε $t = n * t_{max}/10$, με $1 \leq n \leq 10$

Η σύγκριση της τελικής καμπύλης πόλωσης με την αρχική θα χρησιμοποιηθεί για να προσδιοριστεί η απώλεια απόδοσης της κυψέλης σε όλο το εύρος τιμών πυκνότητας ρεύματος, προκειμένου να αναλυθούν οι αιτίες της απώλειας απόδοσης, εάν υπάρχουν.

Η διάρκεια αυτού του βήματος θα είναι t_{max} , εκτός εάν προηγουμένως επιτευχθεί άλλο κριτήριο λήξης, που ορίζεται είτε σύμφωνα με τεχνικά θέματα είτε με θέμα ασφαλείας. Εκτός από τη σταθερή διάρκεια t_{max} , άλλα κριτήρια λήξης μπορούν να καθοριστούν από τη δοκιμή ανάλογα με τον στόχο της δοκιμής, όπως αποδεκτές σταθερές απώλειες απόδοσης (λαμβάνοντας υπόψη την ισχύ ή την τάση σε χαμηλή ή υψηλή ισχύ ή την τάση ανοιχτοκυκλώσεως).

Κριτήριο Λήξης δοκιμής:

Εκτός από τα κριτήρια λήξης που ορίζονται, η δοκιμή πρέπει να διακόπτεται (διακοπή ροής αερίων, θερμοκρασιών και φορτίου) εάν η τάση του στοιχείου πέσει κάτω από μια προκαθορισμένη ελάχιστη τιμή.

Βήμα 4^ο : Επεξεργασία Δεδομένων

Η μεταβολή της τάσης με την πάροδο του χρόνου είναι η κύρια έξοδος αυτής της δοκιμής. Η πυκνότητα ισχύος (σχέση 4.1) θα πρέπει να υπολογιστεί ως περαιτέρω έξοδος για αυτήν τη δοκιμή και θα υπολογιστεί για όλα τα βήματα λήψης μετρήσεων. Οι αποκλίσεις τάσης, ΔV , μπορούν να υπολογιστούν σε OCV (μετρούμενες στην αρχή των καμπυλών πόλωσης) και υπό φορτίο, καθ' όλη τη διάρκεια του βήματος λήψης μετρήσεων. Αυτές οι αποκλίσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση ενός Ρυθμού απόδοσης ή Ρυθμού προόδου (συνήθως «ρυθμού απώλειας» απόδοσης) $\Delta V_{OCV}/dt$ και $\Delta V_{i_{load}}/dt$. Αυτές οι τιμές θα αντιστοιχούν στην κλίση των καμπυλών δίνοντας τις τιμές τάσεως σε σχέση με το χρόνο. Η απώλεια απόδοσης θα υπολογιστεί σε % στο i_{load} ως εξής:

$$[V_{\alpha\rho\chi\iota\kappa\acute{o}} \text{ με } i \text{ στο } 20\% P_{\max} - V_{\tau\epsilon\lambda\iota\kappa\acute{o}} \text{ με } i \text{ στο } 20\% P_{\max}] / V_{\alpha\rho\chi\iota\kappa\acute{o}} \text{ με } i \text{ στο } 20\% P_{\max} \quad (4.13)$$

$$[V_{\alpha\rho\chi\iota\kappa\acute{o}} \text{ με } i \text{ στο } 100\% P_{\max} - V_{\tau\epsilon\lambda\iota\kappa\acute{o}} \text{ με } i \text{ στο } 100\% P_{\max}] / V_{\alpha\rho\chi\iota\kappa\acute{o}} \text{ με } i \text{ στο } 100\% P_{\max} \quad (4.14)$$

$$[P_{\alpha\rho\chi\iota\kappa\acute{o}} \text{ με } i \text{ στο } 20\% P_{\max} - P_{\tau\epsilon\lambda\iota\kappa\acute{o}} \text{ με } i \text{ στο } 20\% P_{\max}] / P_{\alpha\rho\chi\iota\kappa\acute{o}} \text{ με } i \text{ στο } 20\% P_{\max} \quad (4.15)$$

$$[P_{\alpha\rho\chi\iota\kappa\acute{o}} \text{ με } i \text{ στο } 100\% P_{\max} - P_{\tau\epsilon\lambda\iota\kappa\acute{o}} \text{ με } i \text{ στο } 100\% P_{\max}] / P_{\alpha\rho\chi\iota\kappa\acute{o}} \text{ με } i \text{ στο } 100\% P_{\max} \quad (4.16)$$

4.1.6. Διαδικασία ελέγχου για μοναδιαία κυψέλη στον τομέα μεταφορών

Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία ελέγχου που αφορά σε συστήματα του τομέα μεταφορών. Κάθε δοκιμή θα πρέπει να ξεκινάει με μία κατάλληλη δοκιμή διαρροής, ανάλυση δομής κυψέλης, αλλά και προετοιμασία κυψέλης, όπως περιγράφονται παρακάτω (ή με αντίστοιχες σύμφωνα με την σύσταση του προμηθευτή ή ακολουθώντας το πρότυπο → IEC 62282-7-1)

Δοκιμή Διαρροής

Στόχοι της συγκεκριμένης δοκιμής είναι η μέτρηση του ρυθμού διαρροής βάσει της πτώσης πίεσης ανόδου και καθόδου, αλλά και η εξασφάλιση της στεγανότητας της κυψέλης και της διάταξης ελέγχου.

Διαδικασία που ακολουθείται:

Η δοκιμή ξεκινάει με ροή ξηρού αζώτου στην άνοδο και κάθοδο με ελάχιστη παροχή. Ρυθμίζεται η πίεση της ανόδου στα 320 kPa και της καθόδου στα 300 kPa. Εν συνεχεία, μειώνεται η ροή του αζώτου έως το μηδέν και διατηρείται για δέκα λεπτά τουλάχιστον σε αυτή την κατάσταση η κυψέλη. Αντίστοιχα, για τουλάχιστον δέκα λεπτά, μετράται η πτώση της πίεσης και στα δύο ηλεκτρόδια.

Επεξεργασία Δεδομένων

Σχεδιάζεται το γράφημα πίεσης ανόδου και καθόδου συναρτήσει διάρκειας δοκιμής, για τις παρακάτω περιπτώσεις:

- όταν δεν χρησιμοποιείται η κυψέλη και
- όταν η κυψέλη χρησιμοποιείται

για τον προσδιορισμό της στεγανότητας της διάταξης δοκιμών.

Κριτήριο αποδοχής

Για να ικανοποιείται το κριτήριο αποδοχής, ο ρυθμός διαρροής θα πρέπει να είναι μικρότερος από 0.3 kPa/min.

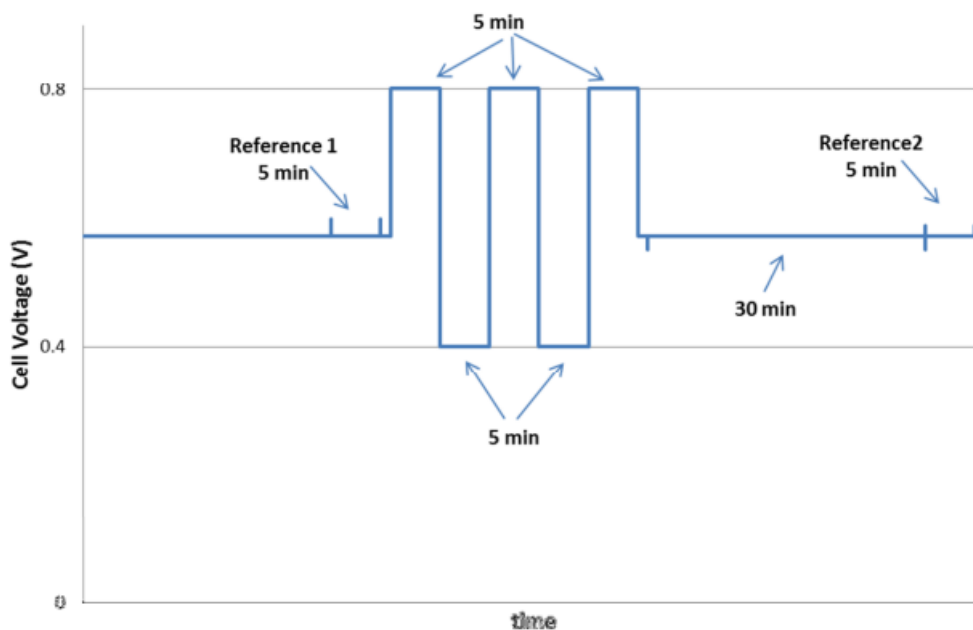
Ανάλυση δομής κυψέλης

Η συγκεκριμένη διαδικασία λαμβάνει χώρα όταν δεν υπάρχουν συγκεκριμένες οδηγίες από τον κατασκευαστή του συστήματος μεμβράνης ηλεκτροδίου.

Αρχικά ρυθμίζεται η θερμοκρασία κυψέλης στους 80 °C, θερμοκρασία εισόδου των αντιδρώντων στους 85 °C, υγρασία στο 100% (κατ'αντιστοιχία με τη θερμοκρασία κυψέλης) και αντίθλιψη στα 150 kPa (abs) στην άνοδο και στα 130 kPa (abs) στην κάθοδο. Στη συνέχεια, αυξάνεται η πυκνότητα ρεύματος σε βήματα των 100 mA/cm^2 έως τα 800 mA/cm^2 , διατηρώντας παράλληλα την τάση κυψέλης >400 mV και αφήνεται να σταθεροποιηθεί για 6 ώρες. Ρυθμίζεται η σχετική υγρασία των αντιδρώντων στο 50% και αυξάνεται το ρεύμα διατηρώντας παράλληλα την τάση κυψέλης > 400 mV έως 1 A/cm^2 . Η κυψέλη πρέπει να διατηρηθεί σε αυτές τις συνθήκες για τουλάχιστον 2 ώρες.

Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται κάποιοι κύκλοι με ανώτατη τιμή τάσης 0.8 V και κατώτατη 0.4 V, υπό συνθήκες στοιχειομετρίας. Για τιμή πυκνότητας ρεύματος $1,0 \text{ A/cm}^2$, αναπαράγεται το σημείο αναφοράς 1 του Σχήματος 4.1, για 5 λεπτά και στη συνέχεια ρυθμίζεται στην τιμή που αντιστοιχεί σε τιμή υψηλού δυναμικού (0,8 V) και κρατάται σε κατάσταση σταθερής λειτουργίας για 5 λεπτά. Στη

συνέχεια ρυθμίζεται ξανά σε τιμή χαμηλού δυναμικού (0,4 V) και κρατάται σε κατάσταση σταθερής λειτουργίας για 5 λεπτά επίσης. Η διαδικασία συνεχίζει με την επανάληψη αυτών των αλμάτων έως ότου πραγματοποιηθούν τρεις μετρήσεις τιμής υψηλού δυναμικού και δύο μετρήσεις τιμής χαμηλού δυναμικού και κρατάται σε κατάσταση σταθερής λειτουργίας για μισή ώρα στο σημείο ρύθμισης 1,0 A/cm² για να καταγραφεί το σημείο αναφοράς 2, για 5 λεπτά. (άρα συνολικά μία ώρα και πέντε λεπτά). Το συνιστώμενο κριτήριο σταθεροποίησης κατάστασης λειτουργίας βασίζεται στη διακύμανση της τάσης της κυψέλης και θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί όταν είναι χαμηλότερο από ±5 mV στο σημείο αναφοράς 2. Επιπλέον, η διακύμανση της τάσης κυψέλης μεταξύ του χρονικού πλαισίου αναφοράς 1 και 2 θα πρέπει να είναι μικρότερη από ±10 mV. Για μεγαλύτερη διακύμανση, ολόκληρη η διαδικασία ή μέρος της πρέπει να επαναληφθούν μέχρι να επιτευχθεί σταθεροποίηση κατάστασης λειτουργίας.



Σχήμα 4.1 : Σχηματική απεικόνιση εφαρμογής κύκλου ανάλυσης δομής κυψέλης (πηγή : <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC99115>)

Προετοιμασία Κυψέλης Καυσίμου

Ο στόχος της διαδικασίας προετοιμασίας είναι να διασφαλιστεί ότι η τάση της κυψέλης θα είναι σταθερή πριν από την έναρξη της δοκιμής. Ένα κριτήριο σταθεροποίησης κατάστασης λειτουργίας ορίζεται με βάση τη διαφορά μεταξύ των τιμών τάσης της κυψέλης που μετρήθηκαν για μια καθορισμένη περίοδο. Συνιστάται οι διακυμάνσεις στην τάση κυψέλης να είναι χαμηλότερες από ±5 mV κατά την τελευταία ώρα του βήματος προετοιμασίας. Η προετοιμασία της κυψέλης ξεκινά με τη ρύθμιση των απαιτούμενων συνθηκών λειτουργίας και τη διατήρηση αυτών των συνθηκών έως ότου η τάση της κυψέλης είναι σταθερή, δηλαδή όταν μεταβάλλεται λιγότερο από ±5 mV κατά την τελευταία ώρα της διαδικασίας προετοιμασίας. Σε περίπτωση που δεν επιτευχθεί σταθεροποιημένη κατάσταση λειτουργίας εντός 6 ωρών από τη λειτουργία, θα μπορούσε να επανεξεταστεί η επανάληψη της ανάλυσης δομής κυψέλης (cell break in) και της προετοιμασίας. Στο παράρτημα ΣΤ, περιγράφεται η διαδικασία αναπαραγωγής καμπύλης πόλωσης.

Συνθήκες καταπόνησης μοναδιαίας κυψέλης

Έχει καθιερωθεί μία μεθοδολογία για την εξέταση της σχετικής επιρροής που ασκούν οι επιμέρους παράμετροι λειτουργίας του συστήματος μεμβράνης ηλεκτροδίου, όταν η κυψέλη υποβληθεί σε κάποιες οριακές συνθήκες που ορίζονται, γνωστές και ως «συνθήκες καταπόνησης». Οι πιο πιθανές συνθήκες καταπόνησης για τον έλεγχο μοναδιαίας κυψέλης είναι οι εξής :

- Εφαρμογή επαναλαμβανόμενου φορτίου

Η εφαρμογή επαναλαμβανόμενου φορτίου για την προσομοίωση ποικίλων απαιτήσεων ισχύος, κατά τη λειτουργία του οχήματος, είναι μια εξωτερική πηγή πίεσης όσον αφορά την απόδοση συστήματος μεμβράνης ηλεκτροδίου. Οι κύκλοι εκκίνησης και διακοπής λειτουργίας είναι ένας επιπλέον παράγοντας καταπόνησης για το σύστημα μεμβράνης ηλεκτροδίου. Ο σκοπός αυτών των κύκλων επαναλαμβανόμενου φορτίου, είναι η αξιολόγηση της μακροπρόθεσμης αντοχής του συστήματος μεμβράνης ηλεκτροδίου σε εφαρμογές αυτοκινήτων.

- Μηχανικές Επιδράσεις

Οι συνθήκες καταπόνησης λόγω μηχανικών επιδράσεων έχουν άμεση συνέπεια στην απόδοση των κυψελών. Η δύναμη συμπίεσης που εφαρμόζεται στην κυψέλη θεωρείται συνήθως ως μηχανικός παράγοντας καταπόνησης και η τιμή αναφοράς πρέπει να αναφέρεται μαζί με τα αποτελέσματα της δοκιμής. Αυτός ο παράγοντας καθορίζεται στην αρχή της δοκιμής και δεν εξετάζεται περαιτέρω σε αυτήν την προσέγγιση. Μηχανικές καταπονήσεις μπορούν να προκύψουν λόγω υγρασίας, πίεσης ή/και θερμοκρασίας, καθώς και λόγω σημαντικών δυνάμεων επιτάχυνσης, επιβράδυνσης και καταπόνησης κατά την εφαρμογή.

- Ακαθαρσίες στο καύσιμο/αέρα

Αν και αυτό είναι ένα σημαντικό ζήτημα, δεν αντιμετωπίζεται στην παρούσα μεθοδολογία.

- Περιβαλλοντικές συνθήκες

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες εφαρμόζονται ως επί το πλείστον σε δοκιμές συστοιχίας συστήματος, όπως δοκιμές κρύας εκκίνησης (cold start) και δοκιμές κατάψυξης/απόψυξης που εκθέτουν την κυψέλη καυσίμου σε θερμοκρασίες υπό του μηδενός. Ωστόσο, για εφαρμογές μοναδιαίων κυψελών, αυτή η συνθήκη καταπόνησης δεν είναι εφαρμόσιμη, καθώς δεν εγγυάται ότι θα ομοιάζει με συμπεριφορά συστοιχίας όταν χρησιμοποιείται σε ένα σύστημα υπό παρόμοιες συνθήκες.

Η επίδραση που έχει κάθε μία από αυτές τις παραμέτρους στην κυψέλη, θα μπορούσε να μελετηθεί ξεχωριστά. Όμως επειδή είναι αλληλένδετες –δηλαδή αλλάζοντας την τιμή της μίας αναπόφευκτα αλλάζει και η τιμή κάποιας άλλης- οι δοκιμές που έχουν επιλεχθεί να γίνονται είναι οι παρακάτω :

- Δοκιμή θερμικής καταπόνησης κυψέλης καυσίμου
- Δοκιμή καταπόνησης κυψέλης καυσίμου σε σχέση με τις τιμές υγρασίας εισόδου των αέριων αντιδρώντων
- Δοκιμή καταπόνησης κυψέλης καυσίμου σε σχέση με τις τιμές πίεσης εισόδου των αέριων αντιδρώντων
- Δοκιμή καταπόνησης της κυψέλης καυσίμου σε σχέση με τις τιμές στοιχειομετρίας του οξειδωτικού μέσου

Ο στόχος των προαναφερθείσων δοκιμών είναι να μελετηθεί η επίδραση που έχει κάθε συνθήκη καταπόνησης στην απόδοση της κυψέλης καυσίμου σε τρεις διαφορετικές πυκνότητες ρεύματος, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβολές που παρουσιάζονται στην καμπύλη πόλωσης και, πιο συγκεκριμένα, στις περιοχές από τις οποίες αποτελείται (περιοχή απωλειών λόγω ενεργοποίησης, ωμικές και συγκέντρωσης).

Συνθήκες λειτουργίας

Παρακάτω απαριθμούνται οι είσοδοι των δοκιμών (συνθήκες λειτουργίας)

Πίνακας 4.19 : Τιμές εισόδου δοκιμών μοναδιαίας κυψέλης στον τομέα μεταφορών

	Τιμή
T_C (°C)	80
$T_{fuel,in}$	85
$T_{ox,in}$	85
RH_{fuel} (%)	50
RH_{ox} (%)	30
$P_{fuel,in}$ (kPa)	250
$P_{ox,in}$ (kPa)	230
λ_{fuel}	1.3
λ_{ox}	1.5

Η τιμή θερμοκρασίας κυψέλης αναφοράς των 80 °C έχει επιλεγεί ως αντιπροσωπευτική θερμοκρασία κυψέλης για εφαρμογές μεταφορών.

Η θερμοκρασία του καυσίμου στην είσοδο διατηρείται 5 K (85 °C) πάνω από τη θερμοκρασία λειτουργίας κυψέλης για να αποτραπεί η συμπύκνωση νερού στην είσοδο.

Προτείνεται να ληφθεί υπόψη στην είσοδο της ανόδου μια ονομαστική τιμή σχετικής υγρασίας (RH) που αντιστοιχεί σε 50% -σε σχέση με τη θερμοκρασία της κυψέλης-, που με τη σειρά του αντιστοιχεί σε σημείο δρόσου 64 °C για θερμοκρασία κυψέλης 80 °C. Δεδομένου ότι η ροή του οξειδωτικού είναι συνήθως αέρας από το περιβάλλον, η σχετική υγρασία του μπορεί να ποικίλλει ευρέως ανάλογα με τις συνθήκες περιβάλλοντος. Η σχετική υγρασία εισόδου οξειδωτικού αερίου στην κάθοδο έχει ρυθμιστεί στο 30% σε σχέση με τη θερμοκρασία κυψέλης, για την προσομοίωση των ξηρών συνθηκών περιβάλλοντος δοκιμής.

Συνήθως οι διατάξεις ελέγχου έχουν βαλβίδες αντίθλιψης τοποθετημένες κοντά στην έξοδο της κυψέλης στο ρεύμα καυσαερίων. Επομένως, η ρύθμιση της πίεσης πραγματοποιείται συνήθως στην έξοδο του στοιχείου. Ωστόσο, έχει συμφωνηθεί να διατηρείται σταθερή η πίεση εισόδου ελέγχοντας τις βαλβίδες αντίθλιψης για την ελαχιστοποίηση των μεταβολών της πίεσης που σχετίζονται με τις διακυμάνσεις που προκαλούνται από τη ροή του αερίου και την πτώση πίεσης. Ως τυπική τιμή σε εφαρμογές μεταφορών, εφαρμόζεται η απόλυτη πίεση των 250 kPa στην είσοδο της ανόδου, ώστε να εξασφαλίζεται υψηλή πυκνότητα ισχύος. Η προσέγγιση ελέγχου πίεσης για το οξειδωτικό μέσο είναι η ίδια όπως και για τον

έλεγχο πίεσης καυσίμου. Η προτεινόμενη τιμή απόλυτης πίεσης των 230 kPa επιλέχθηκε για να διευκολύνει επαρκώς τη μεταφορά μάζας, άρα και την επαρκή διαχείριση του νερού.

Η σύνθεση του καυσίμου θα πρέπει να εξασφαλίζει χαμηλό επίπεδο ακαθαρσιών (μολυσματικών ουσιών), καθώς ο καταλύτης μετάλλου Pt είναι ευαίσθητος και μπορεί να δηλητηριαστεί από τα επίπεδα ρύπων. Για το λόγο αυτό το καύσιμο υδρογόνου που χρησιμοποιείται θα πρέπει να είναι ποιότητας 5.0 ή καλύτερη. Η ποιότητα του καυσίμου δεν έχει μετρήσιμο αντίκτυπο τόσο στην απόδοση όσο και στη διάρκεια ζωής του συστήματος ηλεκτροδίου μεμβράνης. Τα κρίσιμα συστατικά που πρέπει να αποφεύγονται είναι το H_2S (ή άλλες θειούχες ενώσεις), το CO , το CO_2 και το NH_3 .

Η σύνθεση του οξειδωτικού μέσου πρέπει να εξασφαλίζει, επίσης, χαμηλό επίπεδο ακαθαρσιών. Για σκοπούς δοκιμής, το οξειδωτικό (αέρας) θα πρέπει να είναι απαλλαγμένο από λάδια και να φιλτράρεται για σωματίδια σκόνης σύμφωνα με το ISO 8573-1:2010 με την ποιότητα του αέρα να μην έχει μετρήσιμο αντίκτυπο τόσο στην απόδοση όσο και στη διάρκεια ζωής του ΜΕΑ. Εφόσον χρησιμοποιείται συμπιεσμένος αέρας περιβάλλοντος χωρίς λάδι (αντί για εμφιαλωμένο αέρα υψηλής ποιότητας), τα κρίσιμα συστατικά που πρέπει να αποφεύγονται είναι τα SO_x , NO_x και NH_3 .

Ο ρυθμός ροής εισόδου καυσίμου αντιστοιχεί σε στοιχειομετρική αντίδραση ηλεκτροχημικών κυψελών καυσίμου με $\lambda=1,3$. Σε περίπτωση πυκνοτήτων ρεύματος κάτω των $0,2 A/cm^2$ η ελάχιστη παροχή διατηρείται σταθερή στην τιμή που αντιστοιχεί σε $0,2 A/cm^2$ για στοιχειομετρία $\lambda=1,3$. Αυτή η στοιχειομετρία απαιτεί τη χρήση διπολικών πλακών με σχετικά υψηλή τιμή πτώσης πίεσης, τουλάχιστον μεγαλύτερη από $1 kPa/m$ στα $0,8 A/cm^2$, για να ευνοηθεί η μεταφορά των σταγονιδίων νερού κατά μήκος των καναλιών.

Η παροχή εισόδου καθόδου αντιστοιχεί σε στοιχειομετρική αντίδραση ηλεκτροχημικών κυψελών καυσίμου με $\lambda=1,5$. Σε περίπτωση πυκνοτήτων ρεύματος κάτω των $0,2 A/cm^2$ η ελάχιστη παροχή διατηρείται σταθερή στην τιμή που αντιστοιχεί σε $0,2 A/cm^2$ για στοιχειομετρία $\lambda=1,5$. Η στοιχειομετρική τιμή $\lambda=1,5$ συμφωνήθηκε για τη διατήρηση των απαιτήσεων ισχύος για τον αεροσυμπιεστή στο ελάχιστο. Τα σχόλια στοιχειομετρίας καυσίμου σχετικά με τη σχεδίαση της διπολικής πλάκας καναλιού αερίου ισχύουν επίσης για την πλευρά του οξειδωτικού, πλάκες με τιμή πτώσης πίεσης, τουλάχιστον μεγαλύτερη από $10 kPa/m$ στα $0,8 A/cm^2$, για να ευνοηθεί η μεταφορά σταγονίδια νερού κατά μήκος των καναλιών.

Δοκιμή θερμικής καταπόνησης της κυψέλης καυσίμου

Η θερμοκρασία κυψέλης είναι μια σημαντική φυσική παράμετρος που επηρεάζει τόσο την απόδοση όσο και την αντοχή της μοναδιαίας κυψέλης. Ο σκοπός αυτής της δοκιμής είναι να καθοριστεί η μεταβολή της απόδοσης κυψέλης όταν λειτουργεί σε δύο διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας και συγκεκριμένα: σε τιμή χαμηλότερη και σε τιμή υψηλότερη από τη ρύθμιση αναφοράς.

Η δοκιμή θερμικής καταπόνησης κυψέλης καυσίμου συνίσταται στην εκτέλεση δύο καμπυλών πόλωσης, (όπως περιγράφεται στο παράρτημα ΣΤ), της δοκιμής 1 και της δοκιμής 2 ρυθμίζοντας τις τιμές των παραμέτρων βάσει του Πίνακα 4.20, ενώ όλες οι άλλες συνθήκες δοκιμής διατηρούνται στις ρυθμίσεις αναφοράς που δίνονται στον Πίνακα τιμών εισόδου 4.19

Πίνακας 4.20 : Τιμές εισόδου δοκιμής θερμικής καταπόνησης κυψέλης καυσίμου (πηγή : <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC99115>)

Παράμετρος	Δοκιμή 1	Τιμή αναφοράς	Δοκιμή 2
Θερμοκρασία λειτουργίας κυψέλης καυσίμου (°C)	45	80	95
Θερμοκρασία εισόδου αέριου καυσίμου (°C)	50	85	100
Υγρασία εισόδου αέριου καυσίμου (%)	85	50	25
Θερμοκρασία εισόδου αέριου οξειδωτικού μέσου (°C)	50	85	100
Υγρασία εισόδου αέριου οξειδωτικού μέσου (%)	85	30	20

- **Δοκιμή καταπόνησης 1:** Τιμή θερμοκρασίας χαμηλότερη από τιμή αναφοράς : Η ρύθμιση των 45 °C έχει επιλεγεί για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς της κυψέλης σε συνθήκες παρόμοιες με την κατάσταση της κυκλοφοριακής συμφόρησης της πόλης με κρύο και υγρασία. Συμφωνήθηκε, επίσης, πως δεδομένου ότι ορισμένες διατάξεις ελέγχου δεν μπορούσαν να ανταποκριθούν στη χαμηλή τιμή της σχετικής υγρασίας, όπως απαιτείται στη ρύθμιση αναφοράς, να επιτρέπεται η χρήση υψηλότερης ρύθμισης σχετικής υγρασίας
- **Δοκιμή Καταπόνησης 2:** Τιμή θερμοκρασίας υψηλότερη από τιμή αναφοράς: Η υψηλή τιμή των 95 °C έχει επιλεγεί για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της κυψέλης σε συνθήκες θερμοκρασίας παρόμοιες με την οδήγηση σε θερμές συνθήκες ερήμου.

Δοκιμή καταπόνησης κυψέλης καυσίμου σε σχέση με τις τιμές υγρασίας εισόδου των αέριων αντιδρώντων

Σκοπός αυτής της δοκιμής είναι να αξιολογηθεί η επίδραση της μεταβολής υγρασίας εισόδου των αερίων στην απόδοση των κυψελών καυσίμου. Υπάρχουν δύο πηγές νερού κατά τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου: α) η εισαγωγή υδρατμών από το σύστημα μεταβολής υγρασίας των αντιδραστηρίων στις εισόδους και β) το νερό που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου λόγω ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Η αγωγιμότητα πρωτονίων της μεμβράνης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την περιεκτικότητά της σε νερό. Επομένως, με τα σημερινά υλικά το νερό είναι απολύτως απαραίτητο για τη λειτουργία των κυψελών καυσίμου. Η στάθμη του νερού σε μια κυψέλη καυσίμου επηρεάζει έντονα όχι μόνο τις ιδιότητες της μεμβράνης, αλλά και τη μεταφορά των αντιδρώντων και την κινητική της αντίδρασης του ηλεκτροδίου.

Πίνακας 4.21 : Συνδυασμοί ρυθμίσεων τιμών υγρασίας (πηγή : <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC99115>)

	A	B	Γ	Δ	E	ΣΤ	Z	H
Άνοδος	Τιμή αναφοράς	Τιμή δοκιμής 1	Τιμή δοκιμής 1	Τιμή δοκιμής 2	Τιμή δοκιμής 1	Τιμή δοκιμής 2	Τιμή αναφοράς	Τιμή δοκιμής 2
Κάθοδος	Τιμή δοκιμής 1	Τιμή δοκιμής 2	Τιμή αναφοράς	Τιμή αναφοράς	Τιμή δοκιμής 1	Τιμή δοκιμής 1	Τιμή δοκιμής 2	Τιμή δοκιμής 2
Δοκιμές που θα εκτελεστούν	X	X					X	
Δοκιμές που απορρίπτονται			X	X	X	X		X

Οι δοκιμές Γ και Δ εξαιρούνται από τη δοκιμή, λόγω αμελητέας επίδρασης της μεταβολής υγρασίας ανόδου στην απόδοση των κυψελών καυσίμου για λεπτές μεμβράνες τελευταίας τεχνολογίας . Η δοκιμή E αντιστοιχεί στη ρύθμιση χαμηλής υγρασίας και στις δύο πλευρές της ανόδου και της καθόδου. Επειδή όμως η παρατεταμένη λειτουργία με ρυθμίσεις χαμηλής τιμής υγρασίας μπορεί να προκαλέσει ανεπανόρθωτη βλάβη στην μεμβράνη, απορρίπτεται, επίσης, αυτή η δοκιμή. Οι δοκιμές Β και ΣΤ αντιστοιχούν σε υψηλή διαφορά υγρασίας μεταξύ των εισόδων ανόδου και καθόδου. Για τον περιορισμό του συνολικού αριθμού δοκιμών, η ΣΤ εξαιρείται επίσης. Η δοκιμή Η απορρίπτεται λόγω υψηλού κινδύνου πλημμύρας, καθώς τόσο η άνοδος όσο και η κάθοδος έχουν υψηλές ρυθμίσεις σχετικής υγρασίας. Ως εκ τούτου, η Δοκιμή καταπόνησης κυψέλης καυσίμου σε σχέση με τις τιμές υγρασίας εισόδου των αέριων αντιδρώντων, αποτελείται από την αναπαραγωγή τριών καμπυλών πόλωσης, που βασίζονται σε συνδυασμούς τιμών υγρασίας των δοκιμών Α, Β και Ζ (βλ. Πίνακα 4.21). Οι ρυθμίσεις εισόδων ελέγχου παρατίθενται παρακάτω (Πίνακα 4.22) , ενώ όλες οι άλλες συνθήκες δοκιμής διατηρούνται στις τιμές αναφοράς (Πίνακας 4.19) εκτός από τη θερμοκρασία κυψέλης που έχει ρυθμιστεί στους 95 °C:

- **Δοκιμή καταπόνησης 3:** Συνθήκες ξηρής μεμβράνης: Εξετάζει τη χαμηλή τιμή σχετικής υγρασίας καθόδου, ενώ η τιμή σχετικής υγρασίας της ανόδου διατηρείται στη ρύθμιση αναφοράς (Πίνακας 4.19) .
- **Δοκιμή καταπόνησης 4:** Υψηλή διαφορά Σχετικής υγρασίας: (Χωρίς εξωτερικό υγραντήρα) Εξετάζει την επίδραση που έχει η διαφορά της σχετικής υγρασίας μεταξύ των αντιδρώντων ανόδου και καθόδου, με τιμή υγρασίας καυσίμου στη χαμηλή ρύθμιση και τιμή υγρασίας οξειδωτικού σε υψηλή ρύθμιση
- **Δοκιμή καταπόνησης 5:** Πλημμύρα καθόδου: (Μεγάλος εξωτερικός υγραντήρας) Η σχετική υγρασία του καυσίμου διατηρείται στη ρύθμιση αναφοράς (Πίνακας 4.19) και η σχετική υγρασία οξειδωτικού σε υψηλή ρύθμιση για τη μελέτη της επίδρασης της οξειδωτικής δράσης που επέρχεται με την υψηλή ύγραση. Δεδομένου ότι η σχετική υγρασία της ανόδου έχει ρυθμιστεί σε χαμηλή τιμή, το μεγαλύτερο μέρος του νερού που απαιτείται για την μεταβολή υγρασίας της μεμβράνης προέρχεται από την πλευρά της καθόδου λόγω της οπίσθιας διάχυσης.

Πίνακας 4.22 : Τιμές εισόδου δοκιμής ευαισθησίας στις διαφορετικές τιμές υγρασίας (πηγή : <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC99115>)

		Συνθήκες Καταπόνησης			
		Τιμή αναφοράς	Δοκιμή 3	Δοκιμή 4	Δοκιμή 5
Θερμοκρασία Κυψέλης (°C)		80	95	95	95
Υγρασία εισόδου αέριου καυσίμου	Σχετ. Υγρασία εισόδου ανόδου (%)	50	50	25	50
	Σημείο δρόσου θερμ. Εισόδου ανόδου	64	77.2 στους 95 °C	61.2 στους 95 °C	77.2 στους 95 °C
Υγρασία εισόδου αέριου οξειδωτικού μέσου	Σχετ. Υγρασία εισόδου καθόδου (%)	30	20	45	45
	Σημείο δρόσου θερμ. Εισόδου καθόδου	53	56.4 στους 95 °C	74.6 στους 95 °C	74.6 στους 95 °C

Δοκιμή καταπόνησης κυψέλης καυσίμου σε σχέση με τις τιμές πίεσης εισόδου των αέριων αντιδρώντων

Η δοκιμή καταπόνησης κυψέλης καυσίμου σε σχέση με τις τιμές πίεσης εισόδου των αέριων αντιδρώντων πραγματοποιείται για την εξέταση της επίδρασης διαφόρων τιμών πίεσης αερίου στην απόδοση της κυψέλης καυσίμου. Σκοπός της δοκιμής πίεσης ανόδου και καθόδου (Δοκιμή 6 και Δοκιμή 7) είναι ο καθορισμός της απόδοσης κυψέλης όταν λειτουργεί σε διαφορετικές τιμές πίεσης και συγκεκριμένα: σε τιμή υψηλότερη από τη ρύθμιση αναφοράς και σε χαμηλότερη τιμή από τη ρύθμιση αναφοράς.

Η εφαρμογή των δοκιμών 6 και 7 συνίσταται στην εκτέλεση δύο καμπυλών πόλωσης στις ρυθμίσεις που δίνονται στον Πίνακα 4.23 με όλες τις άλλες συνθήκες δοκιμής να διατηρούνται στις ρυθμίσεις αναφοράς τους (Πίνακας 4.19):

Πίνακας 4.23 : Τιμές εισόδου δοκιμής καταπόνησης σε σχέση με τις τιμές πίεσης αντιδρώντων (πηγή : <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC99115>)

		Συνθήκες Καταπόνησης	
		Τιμή αναφοράς	
		Δοκιμή 6	Δοκιμή 7
Πίεση εισόδου αέριου καυσίμου (absolute)	250	160	300
Πίεση εισόδου αέριου οξειδωτικού μέσου (absolute)	230	140	280

- **Δοκιμή καταπόνησης 6:** Χαμηλή πίεση: τιμή πίεσης αέριου καυσίμου και οξειδωτικού μέσου χαμηλότερη από την τιμή αναφοράς
- **Δοκιμή καταπόνησης 7:** Υψηλή πίεση: τιμή πίεσης αέριου καυσίμου και οξειδωτικού μέσου υψηλότερη από την τιμή αναφοράς

Δοκιμή καταπόνησης της κυψέλης καυσίμου σε σχέση με τις τιμές στοιχειομετρίας του οξειδωτικού μέσου

Ο σκοπός αυτής της δοκιμής είναι να καθορίσει την απόδοση της κυψέλης, όταν λειτουργεί με διαφορετικές τιμές στοιχειομετρίας εισόδου οξειδωτικού, συγκεκριμένα: σε τιμή χαμηλότερη από την τιμή αναφοράς και σε υψηλότερη από την τιμή αναφοράς.

Η Δοκιμή καταπόνησης της κυψέλης καυσίμου σε σχέση με τις τιμές στοιχειομετρίας του οξειδωτικού μέσου αποτελείται από την αναπαραγωγή δύο καμπυλών πόλωσης (Δοκιμή 8 και Δοκιμή 9) στις ρυθμίσεις που δίνονται στον Πίνακα 4.24 με όλες τις υπόλοιπες συνθήκες δοκιμής να διατηρούνται στις ρυθμίσεις αναφοράς τους:

Πίνακας 4.24 : Τιμές εισόδου δοκιμής καταπόνησης σε σχέση με τις τιμές στοιχειομετρίας (πηγή : <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC99115>)

	Τιμή αναφοράς	Συνθήκες καταπόνησης	
		Δοκιμή 8	Δοκιμή 9
Στοιχειομετρία εισόδου οξειδωτικού	1.5	1.3	2.0

- **Δοκιμή καταπόνησης 8:** Έλλειψη Αερίου : Στοιχειομετρία καυσίμου ρυθμισμένη στην τιμή αναφοράς και στοιχειομετρία οξειδωτικού μέσου σε τιμή χαμηλότερη από την τιμή αναφοράς
- **Δοκιμή καταπόνησης 9:** Υψηλή τιμή στοιχειομετρίας: Στοιχειομετρία καυσίμου ρυθμισμένη στην τιμή αναφοράς και στοιχειομετρία οξειδωτικού σε τιμή υψηλότερη από την τιμή αναφοράς

Δοκιμή καταπόνησης της κυψέλης καυσίμου σε σχέση με τις τιμές στοιχειομετρίας του οξειδωτικού μέσου

Δεδομένου ότι η ανακυκλοφορία του υδρογόνου στην άνοδο στα συστήματα μεταφορών εξασφαλίζει μια ελάχιστη στοιχειομετρία καυσίμου σε χαμηλό φορτίο και η διακύμανση της απόδοσης των κυψελών καυσίμου λόγω αλλαγών στη στοιχειομετρία καυσίμου είναι αμελητέα, δεν προτείνεται δοκιμή ευαισθησίας στη στοιχειομετρία καυσίμου.

Μέθοδος αξιολόγησης απόδοσης

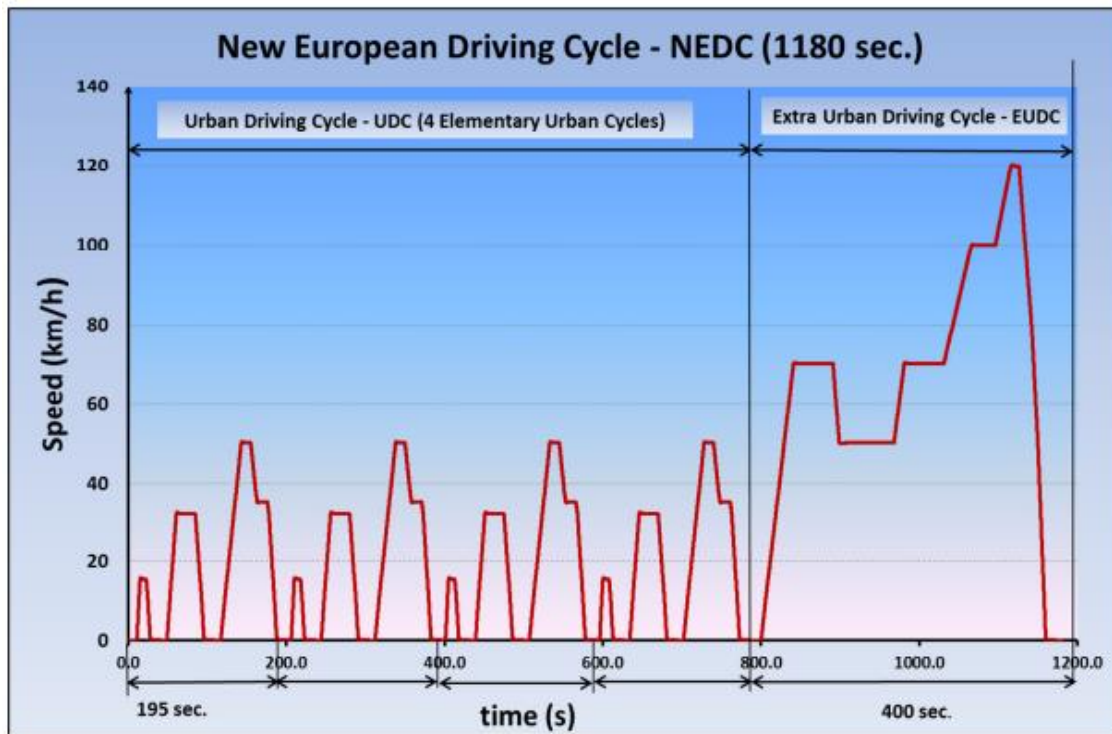
Πριν από την αξιολόγηση της απόδοσης της κυψέλης υπό συνθήκες καταπόνησης, μέσω αναπαραγωγής καμπυλών πόλωσης σε γαλβανοστατική λειτουργία (σταθερή πυκνότητα ρεύματος), το σύστημα μεμβράνης ηλεκτροδίου θα πρέπει να ελέγχεται υπό συνθήκες αναφοράς.(βλέπε Παράρτημα ΣΤ)

Στο τέλος της δοκιμής οι τελευταίες τιμές της καμπύλης πόλωσης θα μετρώνται υπό τις συνθήκες αναφοράς για την αξιολόγηση της απώλειας απόδοσης που σημειώθηκε κατά την εκτέλεση των δοκιμών υπό συνθήκες καταπόνησης.

Κύκλοι επαναλαμβανόμενου φορτίου

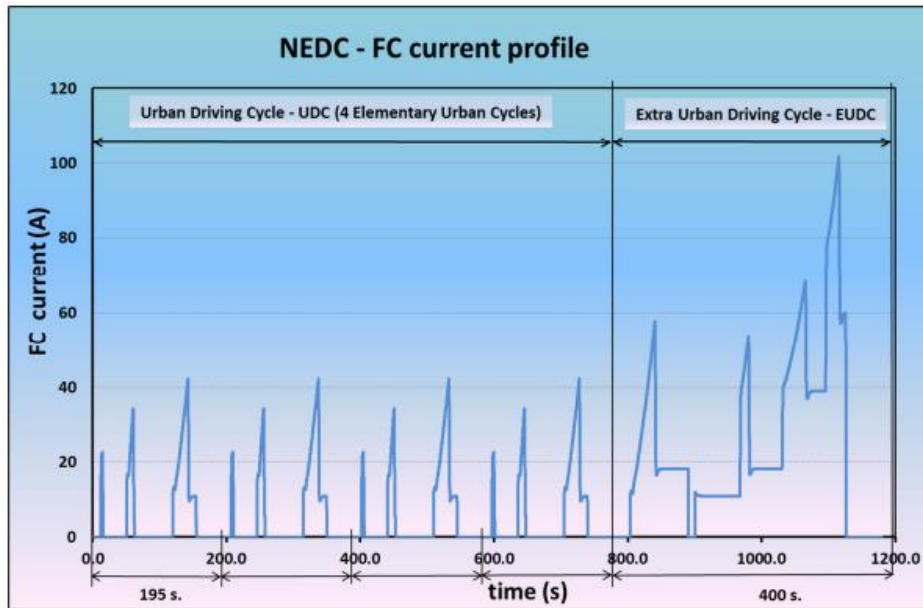
Ο σκοπός των κύκλων επαναλαμβανόμενου φορτίου είναι να γίνει μια εργαστηριακή προσομοίωση πραγματικών συνθηκών οδήγησης. Από αυτή τη σκοπιά, οι κύκλοι φόρτισης χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της αντοχής της κυψέλης καυσίμου κατά τη διάρκεια μιας σχετικά μεγάλης περιόδου εκθέτοντας την κυψέλη στον ίδιο κύκλο φόρτισης επαναλαμβανόμενα. Οι μονάδες ισχύος τύπου PEM αυτοκινήτων υπόκεινται σε διαφορετικά καθεστάτα λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένων γρήγορων μεταβολών στο φορτίο, παρατεταμένης έκθεσης στην τάση ανοιχτοκυκλώσεως, καθώς και περιόδων σταθερής λειτουργίας κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής τους. Όταν εφαρμόζεται αυτό το επαναλαμβανόμενο φορτίο στην κυψέλη, για 500 ώρες, αντιστοιχεί σε μέσο όρο χρήσης οχήματος 80 λεπτών ημερησίως σε διάστημα ενός έτους (ετήσια χιλιομετρική απόσταση περίπου 16.000 km).

Ο κύκλος κυψελών καυσίμου βασίζεται στον «Νέο Ευρωπαϊκό Κύκλο Οδήγησης» (New European Driving Cycle - NEDC), όπως γίνεται διακριτό στο σχήμα 4.2. Ο κύκλος NEDC χρησιμοποιείται για την έγκριση οχημάτων ελαφρού τυπού και περιλαμβάνει χρονικά διαστήματα επιτάχυνσης, επιβράδυνσης και σταθερής ταχύτητας. Αποτελείται από τέσσερις επαναλήψεις ενός αστικού κύκλου χαμηλής ταχύτητας 195 δευτερολέπτων η καθεμία, που ακολουθείται από ένα τμήμα που προσομοιώνει έναν κύκλο οδήγησης αυτοκινητόδρομου (εθνικό δρόμο) διάρκειας 400 δευτερολέπτων. Αυτό ισοδυναμεί με μια θεωρητική απόσταση περίπου 11 km που διανύεται σε περίπου 20 λεπτά.



Σχήμα 4.2 : Νέος Ευρωπαϊκός Κύκλος Οδήγησης (πηγή : <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC99115>)

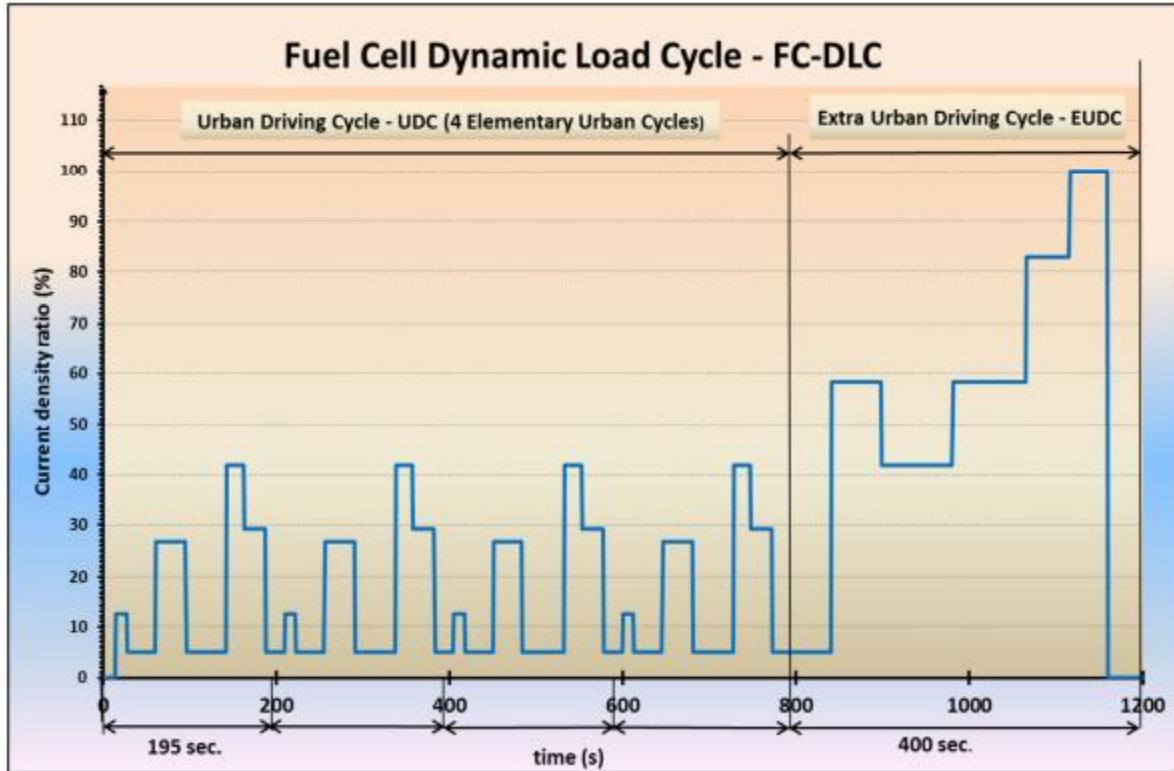
Το προφίλ ταχύτητας του NEDC εφαρμόστηκε σε ένα τυπικό αυτοκίνητο κυψελών καυσίμου και το προκύπτον προφίλ ρεύματος φορτίου κυψέλης καυσίμου που μετρήθηκε φαίνεται στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3 : Εφαρμογή του νέου ευρωπαϊκού κύκλου οδήγησης (πηγή : <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC99115>)

Ο κύκλος που παρουσιάζεται, όμως δεν μπορεί να αναπαραχθεί εύκολα από τις διατάξεις ελέγχου κυψελών καυσίμου, επομένως ήταν απαραίτητο να απλοποιηθεί σε έναν τροποποιημένο κύκλο που μπορεί να εκτελεστεί από διαφορετικές διατάξεις, που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος από την πλειοψηφία ή τις ομάδες έρευνας. Ο μετασχηματισμός έγινε με βάση την παρακάτω σχέση, η οποία αντιπροσωπεύει το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο που παρέχεται από την κυψέλη καυσίμου κατά τη διάρκεια ολόκληρης της διάρκειας του κύκλου NEDC. Έτσι προέκυψε ο κύκλος που διακρίνεται στο Σχήμα 4.4.

$$\int_0^{1180} I_{NDEC} dt = \int_0^{1180} I_{squared} dt \quad (4.17)$$



Σχήμα 4.4 : Τροποποιημένος κύκλος εφαρμογής του ευρωπαϊκού κύκλου οδήγησης (πηγή : <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC99115>)

Ωστόσο, ο τρέχων κύκλος όπως περιγράφεται στο Σχήμα 4.3 θα παράγαγε αρκετές περιόδους παρατεταμένης έκθεσης σε συνθήκες τάσης ανοιχτοκυκλώσεως, προκαλώντας έτσι υπερβολική μείωση της απόδοσης. Έτσι, για να ελαχιστοποιηθεί η έκθεση σε τάση ανοιχτοκυκλώσεως, όλα εκτός από την αρχική περίοδο των 15 δευτερολέπτων και την τελευταία περίοδο των 21 δευτερολέπτων του OCV αντικαθίστανται από μια πυκνότητα ρεύματος που αντιστοιχεί στο 5% του μέγιστου φορτίου (ρεύμα). Ο έτσι τροποποιημένος κύκλος ονομάζεται στη συνέχεια Fuel Cell Dynamic Load Cycle, FC-DLC και προέκυψε σε συνεργασία με το έργο FCH-JU 303445 StackTest που υποστηρίζεται από το FCH-JU.

Έλεγχος αντοχής

Η επιτυχής λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου εξαρτάται όχι μόνο από την απόδοσή της αλλά και από την αντοχή της. Αντοχή είναι η ικανότητα της κυψέλης να διατηρεί την απόδοσή της για μια χρονική περίοδο, χωρίς να είναι επιζήμιες οι μη αντιστρεπτές αλλαγές, στην αρχική καταγεγραμμένη απόδοση.

Η αντοχή των κυψελών καυσίμου αξιολογείται μέσω της παρακάτω δοκιμής, εφαρμόζοντας ένα προφίλ φορτίου στην κυψέλη και μετρώντας την απώλεια απόδοσης (ως προς την τάση της κυψέλης) συναρτήσει των ωρών λειτουργίας. Η απώλεια απόδοσης με την πάροδο του χρόνου δεν μπορεί να αποφευχθεί, αλλά το ποσοστό θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί και να αξιολογηθεί.

Οι μετρήσεις τάσης κυψελών καυσίμου εκτελούνται συνήθως με αναπαραγωγή καμπυλών πόλωσης πριν τη δοκιμή, μετά, καθώς και περιοδικά κατά τη διάρκεια διαφόρων σταδίων της δοκιμής αντοχής για τον προσδιορισμό της εξέλιξης της τιμής της τάσης για δεδομένη τιμή ρεύματος (ρυθμός απώλειας) και για την κατανόηση των ειδικών επιπτώσεων της απώλειας

Για την αξιολόγηση του ρυθμού απώλειας απόδοσης κυψέλης προτείνονται δύο κύρια προφίλ φορτίου για δοκιμή αντοχής:

- Δυναμικός κύκλος φόρτισης
- Κύκλος ενεργοποίησης/απενεργοποίησης φορτίου

A. Δυναμικός Κύκλος φόρτισης

Η δοκιμή περιλαμβάνει συνολικά 1400 κύκλους που αντιστοιχούν σε ένα έτος συνήθους χρήσης οχήματος που ισοδυναμεί με περίπου 15.400 km οδήγησης. Υποτίθεται ότι το όχημα καταναλώνει ολόκληρο το καύσιμο υδρογόνου που περιέχεται σε μια τυπική δεξαμενή αυτοκινήτου που παρέχει μέση αυτονομία περίπου 550 km.

Κάθε δοκιμή αντοχής ξεκινά με την κατάλληλη δοκιμή διαρροής κελιού, ανάλυση δομής και προετοιμασία και εκτελείται σύμφωνα με το ακόλουθο πρωτόκολλο (αποτελούμενο από 5 βήματα).

1. Ρύθμιση των συνθηκών λειτουργίας δοκιμής σε συνθήκες αναφοράς ή συνθήκες καταπόνησης.
2. Στην αρχή της δοκιμής, αναπαράγεται μια καμπύλη πόλωσης σύμφωνα με το Παράρτημα ΣΤ ή καταγράφεται η τάση του κελιού στα 0,1, 0,8 και 1,8 A/cm^2 με χρόνους παραμονής όπως καθορίζονται στο Παράρτημα Δ.
3. Στη συνέχεια, ακολουθεί η λειτουργία κυψέλης στον κύκλο οδήγησης FC-DLC, του Σχήματος 4.4, για 50 διαδοχικούς κύκλους.
4. Στο τέλος των 50 FC-DLC αναπαράγεται μια καμπύλη πόλωσης ή καταγράφεται η τιμή τάσης κυψέλης στα 0,1, 0,8 και 1,8 A/cm^2 , συγκρίνονται με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην αρχή της δοκιμής και παρατηρείται ο ρυθμός απώλειας απόδοσης σε $\mu V/\omega ra$.
5. Τέλος, τα βήματα από 3 έως 4 επαναλαμβάνονται έως ότου φτάσουν συνολικά τους 1400 κύκλους οδήγησης.

B. Αντιστρεπτή και μη αντιστρεπτή απώλεια απόδοσης

Μέρος της συνολικής απώλειας τάσης που παρατηρείται κατά τη λειτουργία της κυψέλης, σε σταθερή κατάσταση ή υπό επαναλαμβανόμενο φορτίο, μπορεί να ανακτηθεί κατά τον τερματισμό λειτουργίας κυψέλης και τη διαδοχική επανεκκίνηση. Έχει επίσης αναφερθεί ότι μια τέτοια λειτουργία μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένο συνολικό ρυθμό απώλειας απόδοσης, σε σύγκριση με την αδιάλειπτη (σταθερή ή δυναμική) λειτουργία. Αυτό υποδηλώνει ότι η συνολική απώλεια της τάσης αποτελείται από αντιστρεπτή και μη αντιστρεπτή.

Το ανακτήσιμο μέρος της συνολικής απώλειας τάσης ονομάζεται αντιστρεπτή απώλεια τάσης ΔV_{rev} . Για σταθερή ή δυναμική λειτουργία, για ένα χρονικό διάστημα Δt_i μεταξύ εκκίνησης και διακοπής λειτουργίας, η αντιστρεπτή απώλεια τάσης $\Delta V_{rev,i}$ μπορεί να υπολογιστεί ως η διαφορά μεταξύ των Τάση στοιχείου $V_{(t_i+1)}$ στον χρόνο έναρξης $t_i + 1$ και τάση $V_{(t_i+\Delta t_i)}$ στον χρόνο λήξης $t_i + \Delta t_i$ ως εξής:

$$\Delta V_{rev,i} = V_{(t_i+1)} - V_{(t_i+\Delta t_i)} \quad (4.18)$$

Το μη αντιστρεπτό (μη ανακτήσιμο) τμήμα της απώλειας τάσης μπορεί να οριστεί ως η διαφορά μεταξύ της τάσης του στοιχείου $V_{(t_i)}$ στον χρόνο έναρξης t_i και της τάσης $V_{(t_{i+1})}$ στο χρόνο λήξης t_{i+1} της περιόδου ανάκαμψης Δt_{tri} (δηλ τάση κατά τον χρόνο εκκίνησης $t_i + 1$) ως εξής:

$$\Delta V_{irrev,i} = V_{(t_i)} - V_{(t_{i+1})} \quad (4.19)$$

Η συνολική μη αντιστρεπτή απώλεια τάσης $\Delta V_{irrev,1 \rightarrow N}$ στο τέλος της δοκιμής κατά την εκτέλεση N δοκιμαστικών μπλοκ στο σύνολο, εκφρασμένη σε (mV) είναι το άθροισμα όλων των μη αντιστρεπτων απωλειών τάσης ως εξής:

$$\Delta V_{irrev,1 \rightarrow N} = \sum_{i=1}^N \Delta V_{irrev,i} = V_{(t_1)} - V_{(t_N)} \quad (4.20)$$

Επομένως, για τη διάκριση μεταξύ αντιστρεπτών και μη αντιστρεπτών φαινομένων απώλειας προτείνεται το ακόλουθο πρωτόκολλο:

1. Ρύθμιση των συνθηκών λειτουργίας δοκιμής: συνθήκες αναφοράς ή συνθήκες καταπόνησης.
2. Στην αρχή της δοκιμής, εκτελείται μια καμπύλη πόλωσης ή καταγράφεται η τάση της κυψέλης στα 0,1, 0,8 και 1,8 A/cm^2 , αντιπροσωπευτικά του $V_{(t_1)}$.
3. Στη συνέχεια ακολουθεί η λειτουργία κυψέλης σύμφωνα με τον κύκλο οδήγησης FC-DLC για 50 διαδοχικούς κύκλους.
4. Εκτελείται μια καμπύλη πόλωσης ή καταγράφεται η τάση στο 0,1, 0,8 και 1,8 A/cm^2 , αντιπροσωπευτικό του $V_{(t_1 + \Delta t_1)}$ (ή $V_{(t_i + \Delta t_i)}$ σε μεταγενέστερες επαναλήψεις)
5. Εκτελείται ένα πρωτόκολλο ανάκτησης.
6. Μετά την εκκένωση N_2 από την πλευρά της ανόδου για λίγα λεπτά, λαμβάνει χώρα η επανεκκίνηση της κυψέλης ρυθμίζοντας τις αρχικές συνθήκες λειτουργίας και αφήνεται να σταθεροποιηθεί για 30 λεπτά.
7. Εκτελείται μια καμπύλη πόλωσης ή καταγράφεται η τάση της κυψέλης στο 0,1, 0,8 και 1,8 A/cm^2 , αντιπροσωπευτικό της V_i
8. Επαναλαμβάνονται τα βήματα από το 3 έως το βήμα 7. Η δοκιμή τελειώνει με το βήμα 4 μετά από 1.400 FC-DLC κύκλους οδήγησης.
9. Τέλος, η κυψέλη αφήνεται να ψυχθεί.

Γ. Πρωτόκολλο ανάκτησης απόδοσης

Αρχικά μηδενίζεται το φορτίο. Στη συνέχεια, γίνεται παύση ροής αέρα στην είσοδο της καθόδου. Διατηρείται ελάχιστη ροή καυσίμου στην άνοδο μέχρι η τάση κυψέλης να μηδενιστεί, και αφήνεται σε αυτήν την κατάσταση για 10 λεπτά. Ακολουθεί το κλείσιμο παροχής καυσίμου και το καθάρισμα των δύο διαμερισμάτων (άνοδου/καθόδου) με άζωτο για λόγους ασφαλείας και στη συνέχεια και με αέρα. Η κυψέλη αφήνεται να φτάσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Διατήρηση της κυψέλης σε συνθήκες περιβάλλοντος για περίπου 16,5 ώρες που ισοδυναμεί με τη συνολική διάρκεια 50 διαδοχικών FC-DLC. Τέλος, γίνεται καθάρισμα των δύο διαμερισμάτων με άζωτο για λόγους ασφαλείας και εκτελείται επανεκκίνηση ρύθμισης συνθηκών λειτουργίας δοκιμής.

Δ.Δοκιμή επαναλαμβανόμενου φορτίου ενεργοποίησης/απενεργοποίησης

Στόχος της συγκεκριμένης δοκιμής είναι η καταπόνηση την κυψέλη καυσίμου μέσω στιγμιαίων και εναλλασσόμενων φάσεων ενεργοποίησης/απενεργοποίησης φορτίου, που προκαλούν συχνές αλλαγές στην πίεση και τη θερμοκρασία. Η κυψέλη δοκιμάζεται εφαρμόζοντας φορτία στα $1,5 A/cm^2$ ή στη μέγιστη πυκνότητα ρεύματος που θα μπορούσε να φτάσει το σύστημα μεμβράνης ηλεκτροδίου (φάση ON) ακολουθούμενη από μια περίοδο προσεκτικής διακοπής λειτουργίας (φάση OFF) όπου το φορτίο (ρεύμα) τίθεται στο μηδέν. Η τάση της κυψέλης καταγράφεται κατά τη φάση ON για να παρατηρηθεί η εξέλιξή της. Πριν την έναρξη της δοκιμής και στο τέλος, πραγματοποιούνται μετρήσεις καμπύλης πόλωσης. Η δοκιμή επαναλαμβανόμενου φορτίου ενεργοποίησης/απενεργοποίησης ξεκινά με την κατάλληλη δοκιμή διαρροής κυψέλης, ανάλυση δομής κυψέλης καυσίμου και προετοιμασία και εκτελείται σύμφωνα με τα ακόλουθα βήματα:

1. ρύθμιση συνθηκών λειτουργίας δοκιμής: συνθήκες αναφοράς ή συνθήκες καταπόνησης
2. στην αρχή της δοκιμής, πραγματοποιείται καμπύλης πόλωσης ή καταγραφή της τάσης του στοιχείου στο 0,1, 0,8 και $1,8 A/cm^2$. Επίσης, καταγράφεται η μέση πυκνότητα ρεύματος στα 0,65 V (ως μέσος όρος των μετρήσεων της καμπύλης αύξουσας και φθίνουσας πόλωσης). Αυτή η τιμή ρεύματος χρησιμοποιείται ως πυκνότητα ρεύματος 100% του προφίλ ON/OFF.
3. Αύξηση πυκνότητας ρεύματος στο 100%.
4. Λειτουργία κυψέλης στις καθορισμένες συνθήκες λειτουργίας για 30 λεπτά και καταγραφή τάσης της κυψέλης ενώ υπολογίζετε κατά μέσο όρο τα τελευταία 60 δευτερόλεπτα εγγραφής.
5. Μείωση φορτίου ρεύματος σε μηδενικό ρεύμα και μηδενισμός φορτίου
6. διακοπή παροχής αντιδραστηρίου στην είσοδο της κυψέλης (χωρίς καθαρισμό). έτσι μειώνονται οι πιέσεις εισόδου τους. Η κυψέλη αφήνεται να κρυώσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος όπου διατηρείται για 30 λεπτά.
7. Επανεκκίνηση του αντικειμένου ελέγχου, ρύθμιση αρχικών συνθηκών λειτουργίας T , P , RH και στη συνέχεια ρύθμιση ρεύματος και σταθεροποίηση τάσης του στοιχείου.
8. Επανάληψη βημάτων 3 έως 6 έως ότου η τάση κυψέλης, που καταγράφηκε στο βήμα 4, μειωθεί κατά 10 % της αρχικής της τιμής.
9. Στο τέλος της δοκιμής, πραγματοποιούνται μετρήσεις όπως στο βήμα 2.
10. Η κυψέλη αφήνεται να ψυχθεί. Τέλος δοκιμής

4.2. Διαδικασίες Ελέγχου σε Συστοιχία Κυψελών Καυσίμου

4.2.1 Καμπύλη πόλωσης συστοιχίας PEMFC

Ο σκοπός αυτής της δοκιμής είναι ο χαρακτηρισμός της απόδοσης μιας συστοιχίας κυψελών καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων υπό συνθήκες σταθερού ρεύματος. Γίνεται μέτρηση της τάσης και της ισχύος της συστοιχίας ως συνάρτηση του καταναλισκόμενου ρεύματος. Εάν ο εξοπλισμός είναι κατάλληλος, μπορούν επίσης να μετρηθούν μεμονωμένες τάσεις κυψελών, διαφορετικές θερμοκρασίες, ροές αντιδρώντων και πτώσεις πίεσης ρευστού συστοιχίας. Είναι μια γενική μέθοδος χαρακτηρισμού που χρησιμοποιείται στην έρευνα και ανάπτυξη των κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Η δοκιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βασική μέτρηση για τον χαρακτηρισμό μιας συστοιχίας και των στοιχείων της, όπως σύστημα μεμβράνης ηλεκτροδίου και διπολικές πλάκες, σε μια δεδομένη εφαρμογή.

Αυτή η διαδικασία προορίζεται κυρίως για συστοιχίες με υδρόψυξη και κυψέλες ανοιχτής καθόδου.

Μεταβλητές Τιμές Εισόδου

Πίνακας 4.25 : Μεταβλητές τιμές εισόδου δοκιμής καμπύλης πόλωσης συστοιχίας (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Είσοδος	Τιμή/Εύρος	Αβεβαιότητα μέτρησης	Ρυθμός Δειγματοληψίας (Hz)
$i \left(\frac{A}{cm^2} \right)$	0 - 2	$\pm 2\%$ για $< 0.1 \frac{A}{cm^2}$ $\pm 1\%$ για $> 0.1 \frac{A}{cm^2}$	≥ 1
$Q_{v,fuel}$	Κατ'αντιστοιχία με τη στοιχειομετρία	$\pm 1\%$ πλήρους κλίμακας	≥ 1
$Q_{v,ox}$	Κατ'αντιστοιχία με τη στοιχειομετρία	$\pm 1\%$ πλήρους κλίμακας	≥ 1

Σταθερές Τιμές Εισόδου

Πίνακας 4.26 : Σταθερές τιμές εισόδου δοκιμής καμπύλης πόλωσης συστοιχίας (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

είσοδος	Τιμή/Εύρος	Αβεβαιότητα μέτρησης	Ρυθμός Δειγματοληψίας
p_A	100	-	1
ϕ_{fuel}	Μέχρι 100% H_2	$\pm 0,005\%$	
ϕ_{ox}	21% O_2 – 79% H_2	$\pm 1\% O_2$	
T_{stack}	$T_A - 80$	± 2	1
$T_{cool,in}$	$T_A - 75$	± 2	1
ΔT_{cool}	Μέγιστη τιμή σύμφωνα με τον κατασκευαστή συστοιχίας	± 4	1
$Q_{v,cool}$	Σύμφωνα με τον κατασκευαστή	$\pm 1\%$ πλήρους κλίμακας	1

$P_{fuel/ox,out}$	100 - 300	±2% Πλήρους κλίμακας	≥ 1
λ_{H_2}	1.1 - 1.5		
λ_{ox}	2 - 2.5		
$Q_{v,fuel/ox,min}$		±1% πλήρους κλίμακας	≥ 1
$T_{fuel/ox,in}$	$T_A - 80$	±2	1
$T_{dew,fuel/ox,in}$	$T_A - 80$	±2	1
$RH_{fuel/ox}$	0 - 100		1
T_A	$T_{amb} - 50$	±2	1
$P_{fluid,in}$	Σύμφωνα με τον κατασκευαστή		1

Συνιστάται η T_{stack} να οριστεί ως $T_{cool,out}$. Για υδρόψυκτες συστοιχίες, το $Q_{v,cool,in}$ πρέπει να ρυθμίζεται, ώστε να διατηρεί, όπου είναι εφικτό, είτε την $T_{cool,in}$ είτε $T_{cool,out}$, ώστε να αποφεύγεται η συμπύκνωση καυσίμου και οξειδωτικού μέσου στην είσοδο της συστοιχίας. Η μέθοδος μεταβολής υγρασίας του αντιδρώντος αερίου δεν ορίζεται. Ωστόσο, η μέθοδος πρέπει να περιγραφεί στην τεχνική έκθεση μαζί με τα σημεία δρόσου του αντιδρώντος αερίου (και σχετική υγρασία, RH). Ανάλογα με τη φύση της συστοιχίας, η φύση ορισμένων από τις εισόδους μπορεί να αλλάξει. Αυτό σημαίνει ότι, υπό ορισμένες συνθήκες, ορισμένες από τις σταθερές τιμές εισόδου μπορεί να μην είναι απαραίτητα ρυθμισμένες σε συγκεκριμένες τιμές ή και να μεταβάλλονται. Για παράδειγμα, το $Q_{v,cool}$ μπορεί να αυξάνεται καθώς αυξάνεται το I.

Αποτελέσματα Μετρήσεων

Πίνακας 4.27 : Τιμές Εξόδου δοκιμής καμπύλης πόλωσης συστοιχίας (πηγή: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Έξοδος	Τιμή/Εύρος	Αβεβαιότητα μέτρησης	Ρυθμός Δειγματοληψίας
P	Υπολογιζόμενο μέγεθος		-
V		±1%	≥1
		±1 mV	
ΣP_i	Υπολογιζόμενο μέγεθος		-
ΣV_i			-
T_s		±2	1
$T_{fuel/ox,out}$			
$T_{dew,fuel/ox,out}$			
$T_{cool,out}$			
ΔT_{cool}			
$\Delta p_{fuel/ox}$		±2%	≥1
Δp_{cool}			
η_e	Υπολογιζόμενο μέγεθος		
η_t			

Ενδέχεται να μην είναι δυνατή η μέτρηση όλων αυτών των τιμών εξόδου ελέγχου ανάλογα με τη διαμόρφωση της συστοιχίας και της διάταξης ελέγχου, ωστόσο συνιστάται. Σε περίπτωση μέτρησης της θερμοκρασίας επιφάνειας, η θέση μέτρησης πρέπει να προσδιορίζεται στην τεχνική έκθεση. Οι αποκλίσεις από την ακόλουθη συνιστώμενη διαδικασία θα πρέπει να περιγράφονται στην τεχνική έκθεση ελέγχου. Ο στόχος αυτής της διαδικασίας δοκιμής είναι να προσδιορίσει την απόδοση μιας συστοιχίας κυψελών καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων και την σταθεροποίηση κατάστασης λειτουργίας των τιμών εισόδου/εξόδου ελέγχου ως συνάρτηση της διάρκειας δοκιμής, της πυκνότητας ρεύματος, και ισχύος συστοιχίας. Είναι σημαντικό η συστοιχία να λειτουργεί υπό σταθερές συνθήκες πριν από την έναρξη του τρίτου βήματος δοκιμής (βήμα λήψης μετρήσεων).

Τα κριτήρια σταθεροποίησης κατάστασης λειτουργίας για, τουλάχιστον, το ρεύμα, τη θερμοκρασία συστοιχίας και την τάση συστοιχίας θα πρέπει να ορίζονται στην τεχνική έκθεση. Ο έλεγχος της σταθεροποίησης κατάστασης λειτουργίας των τιμών εξόδου ακολουθεί τον έλεγχο της ευστάθειας των τιμών εισόδου δοκιμής.

Για παράδειγμα, ένα κριτήριο σταθεροποίησης κατάστασης λειτουργίας για μια τιμή εισόδου δοκιμής μπορεί να οριστεί ως εξής:

- Προετοιμασία του αντικειμένου δοκιμής:
Μια τιμή εισόδου δοκιμής θεωρείται σταθερή όταν το εύρος των τιμών που μετρήθηκαν κατά τα τελευταία 30 λεπτά (χρόνος σταθεροποίησης) της διάρκειας αυτού του βήματος δοκιμής εμπίπτει στην αβεβαιότητα μέτρησης αυτής της εισόδου, όπως καθορίστηκε παραπάνω.
- Ρύθμιση των συνθηκών ελέγχου (τιμές εισόδου δοκιμής):
Σε περίπτωση που μια τιμή εισόδου δοκιμής διαφέρει σε αυτό το βήμα από εκείνη του προηγούμενου βήματος, αυτή η τιμή εισόδου θεωρείται σταθερή όταν το εύρος των τιμών της, που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια ενός κατάλληλου χρόνου σταθεροποίησης, εμπίπτει στην αβεβαιότητα μέτρησης, όπως καθορίζεται. Αυτός ο χρόνος σταθεροποίησης πρέπει να περιγράφεται στην τεχνική έκθεση.
- Μέτρηση των τιμών εξόδου δοκιμής:
Η τιμή εισόδου δοκιμής θεωρείται σταθερή, όταν το εύρος των τιμών της μετράται κατά το χρόνο σταθεροποίησης, και το t_{stab} εμπίπτει στην αβεβαιότητα μέτρησης αυτής της εισόδου. Για κάθε διάστημα k , η διάρκεια του t_{stab} θα είναι τουλάχιστον διπλάσια από εκείνη της απόκτησης δεδομένων, t_{acq} . (βλέπε Παράρτημα Δ)

Το κριτήριο σταθεροποίησης κατάστασης λειτουργίας για μία τιμή εξόδου δοκιμής μπορεί, για παράδειγμα, να οριστεί ως εξής:

- Προετοιμασία του αντικειμένου δοκιμής:
Η τιμή εξόδου δοκιμής θεωρείται σταθερή όταν κατά τη διάρκεια των τελευταίων 30 λεπτών της διάρκειας που έχει παρέλθει αυτού του βήματος δοκιμής η σχετική τυπική απόκλιση (η RSD), είναι μικρότερη από 1%.
- Ρύθμιση των συνθηκών δοκιμής:
Σε αυτό το βήμα δεν χρειάζεται να πραγματοποιηθεί έλεγχος της ευστάθειας μιας τιμής εξόδου δοκιμής.
- Μέτρηση των τιμών εξόδου δοκιμής:

Η τιμή εξόδου δοκιμής θεωρείται σταθερή όταν κατά τη διάρκεια του t_{stab} το RSD είναι μικρότερο από 1%.

Διαδικασία Ελέγχου

Βήμα 1° : Προετοιμασία του αντικειμένου δοκιμής

Η εκκίνηση της συστοιχίας και το βήμα προετοιμασίας μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε ακολουθώντας τη διαδικασία:

- που προτείνεται από τον κατασκευαστή του αντικειμένου δοκιμής
- είτε προτείνεται από τον κατασκευαστή ενός εξαρτήματος που ελέγχεται στη δοκιμή
- ή τη διαδικασία που αποτελεί κοινή πρακτική στον φορέα που εκτελεί τη δοκιμή
- ή όπως συνιστάται παρακάτω:

Η πιο σημαντική πτυχή αυτού του βήματος είναι να επιτευχθεί η σταθεροποιημένη κατάσταση λειτουργίας όλων των σταθερών τιμών εισόδου, η τάση συστοιχίας και η τάση των κυψελών πριν από την έναρξη του βήματος λήψης μετρήσεων (βήμα 3)

Η δοκιμή ξεκινά ρυθμίζοντας τις συνθήκες δοκιμής (τιμές εισόδου δοκιμής) στις τιμές που καθορίζονται για την προετοιμασία της συστοιχίας. Η προετοιμασία συνίσταται στη διατήρηση αυτών των συνθηκών σταθερών και στην εξισορρόπηση της προκύπτουσας τάσης συστοιχίας σύμφωνα με τα κριτήρια σταθεροποίησης κατάστασης λειτουργίας. Η σταθεροποίηση των συνθηκών για την προετοιμασία της συστοιχίας μπορεί να είναι μέρος της διαδικασίας εκκίνησης. Εάν δεν συμβαίνει αυτό, συνιστάται η λειτουργία της συστοιχίας μέχρι να σταθεροποιηθούν οι τιμές εισόδου των αντιδρώντων αερίων όπως δίνονται παραπάνω. Στη συνέχεια, η συστοιχία θα πρέπει να λειτουργεί σε λειτουργία γαλβανοστατικού φορτίου (σταθερό ρεύμα) για τουλάχιστον 30 λεπτά στην πυκνότητα ρεύματος που καθορίζεται από τον κατασκευαστή της. Εναλλακτικά, η συστοιχία θα πρέπει να λειτουργεί σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας για την ίδια διάρκεια με πυκνότητα ρεύματος που επιτρέπει την τάση κάθε στοιχείου να υπερβαίνει τα 500 mV (ή την ελάχιστη τάση κυψέλης που καθορίζεται από τον κατασκευαστή της συστοιχίας). Η αύξηση της πυκνότητας ρεύματος συνιστάται να γίνεται κλιμακωτά ή βαθμιαία, όπως συνιστάται από τον κατασκευαστή της συστοιχίας. Εάν δεν υπάρχει τέτοια σύσταση, συνιστάται η εφαρμογή βημάτων πυκνότητας ρεύματος 100 mA/cm^2 ή η αύξηση της πυκνότητας ρεύματος με ρυθμό που δεν υπερβαίνει τα 10 mA/cm^2 ανά δευτερόλεπτο. Οι διαδικασίες εκκίνησης και προετοιμασίας της συστοιχίας, συμπεριλαμβανομένων των τιμών εισόδου/εξόδου ελέγχου αυτού του σταδίου, περιγράφονται λεπτομερώς στην τεχνική έκθεση.

Βήμα 2° : Ρύθμιση των συνθηκών δοκιμής (τιμές εισόδου δοκιμής)

Αυτό το βήμα της δοκιμής ξεκινάει φέρνοντας τις τιμές εισόδου δοκιμής στις τιμές που καθορίζονται στον Πίνακα τιμών εισόδου. Εκτελείται υπό γαλβανοστατικό φορτίο. Το πρώτο σημείο ρύθμισης για την πυκνότητα ρεύματος θα αντιστοιχεί είτε στην τιμή που χρησιμοποιείται για το στάδιο δοκιμής 1 είτε σε μια τιμή που καθορίζεται από τον στόχο δοκιμής. Στην τελευταία περίπτωση, μπορούν να καθοριστούν κριτήρια σταθεροποίησης κατάστασης λειτουργίας για τις τιμές εισόδου δοκιμής.

Βήμα 3^ο : Αποτελέσματα Μετρήσεων

Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου δοκιμής, οι σταθερές τιμές εισόδου δοκιμής πρέπει να διατηρούνται στις τιμές τους εντός των καθορισμένων ορίων. Όλες οι εισοδοί και έξοδοι δοκιμής θα μετρώνται σε συνάρτηση με τη διάρκεια της δοκιμής. Ο κύριος στόχος είναι να προσδιοριστεί η μεταβολή της τάσης συστοιχίας (και της ισχύος συστοιχίας) κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου αύξησης της πυκνότητας ρεύματος από μια αυθαίρετη τιμή έναρξης (π.χ. όπως μπορεί να συμβεί σε κύκλους και μακροπρόθεσμες δοκιμές με μετρήσεις διακοπτόμενης καμπύλης πόλωσης) σε ένα καθορισμένο μέγιστο, μειώνοντάς το στο μηδέν (τάση ανοιχτού κυκλώματος, OCV) και, τέλος, αυξάνοντάς το στην τιμή έναρξης

Η μέθοδος μέτρησης για αυτό το βήμα της δοκιμής προτείνεται στο Παράρτημα Γ.

Το πρωτόκολλο για την απόκτηση δεδομένων που μετρά τις τιμές εισόδου/εξόδου δοκιμής για κάθε σημείο ρύθμισης πυκνότητας ρεύματος k προτείνεται στο Παράρτημα Δ.

Προτείνεται να αναπαραχθούν οι καμπύλες πόλωσης (γραφήματα τάσης συστοιχίας V , και ισχύος P έναντι πυκνότητας ρεύματος, i)

Η διάρκεια αυτού του βήματος δοκιμής εξαρτάται από τη μέθοδο μέτρησης, ιδίως από τον πραγματικό χρόνο παραμονής, t_{dwell} σε κάθε τρέχον βήμα, τον εφαρμοσμένο ρυθμό αύξησης/μείωσης ρεύματος για αυτά βήματα και την αιτία λήξης της δοκιμής:

επιτυγχάνεται είτε μέγιστο ρεύμα είτε ελάχιστη τάση συστοιχίας/κυψέλης.

Κριτήριο λήξης δοκιμής:

Η δοκιμή διακόπτεται μετά από έναν πλήρη κύκλο πυκνότητας ρεύματος. Η δοκιμή μπορεί να διακοπεί πρόωρα όταν ληφθεί μια τιμή έκτακτης ανάγκης (να δω ξανά στο Παράρτημα Α).

Βήμα 4^ο : Επεξεργασία δεδομένων

Η ισχύς συστοιχίας $P(W) = V(V) \cdot I(A)$ είναι μια υπολογισμένη έξοδος δοκιμής.

Η στιγμιαία ηλεκτρική απόδοση συστοιχίας η_e υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta_e = \frac{V(V) \cdot I(A)}{n_{H_2, supplied} \left(\frac{mol}{s} \right) \Delta H_f(H_2Og)} \quad (4.21)$$

όπου το $n_{H_2, supplied}$: ο μοριακός ρυθμός υδρογόνου που παρέχεται στην είσοδο συστοιχίας,

V : τάση συστοιχίας

I : ρεύμα συστοιχίας,

και $\Delta H_f(H_2Og)$: 241,826 kJ/mol είναι η ενθαλπία σχηματισμού υδρατμών SATP

Είναι ισοδύναμο με τη χαμηλότερη τιμή θέρμανσης (LHV) του υδρογόνου.

Η στιγμιαία θερμική απόδοση συστοιχίας (ή απόδοση ανάκτησης θερμότητας), η_t υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta_t = \frac{Q_{cool} \left(\frac{g}{s}\right) * C_p \left(\frac{J}{gK}\right) * \Delta T (K)}{n_{H_2, supplied} \left(\frac{mol}{s}\right) * \Delta H_f (H_2 O_g)} \quad (4.22)$$

όπου Q_{cool} : η ροή του νερού ψύξης,

C_p : η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού στη θερμοκρασία συστοιχίας

και ΔT : η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας εξόδου ψυκτικού και εισόδου.

4.2.2 Διαδικασία ελέγχου για εφαρμογές οικιακών συστημάτων

Για να προσδιοριστεί η εποχική απόδοση μιας οικιακής μονάδας κυψελών καυσίμου, (η απόδοση) πρέπει να μετράται υπό σταθερή κατάσταση και μεταβατικά φορτία καθώς και κατά την εκκίνηση της μονάδας.

Τέσσερις ξεχωριστές δοκιμές προβλέπονται για τον προσδιορισμό της συνολικής απόδοσης των οικιακών συστημάτων κυψελών καυσίμου: σταθερή κατάσταση, σταθερή κατάσταση με θερμικό φορτίο, μεταβατική και αρχική εκκίνηση.

Δοκιμή σταθερής κατάστασης

Σε μία δοκιμή σταθερής κατάστασης μετράται η ηλεκτρική απόδοση της μονάδας με ένα προκαθορισμένο σύνολο συνθηκών εισόδου (θερμοκρασία περιβάλλοντος, σχετική υγρασία και συντελεστής ηλεκτρικής ισχύος). Η απόδοση μετράται ως ο λόγος της ωφέλιμης παραγωγής ενέργειας από τη μονάδα προς την ενέργεια που παρέχεται στη μονάδα. Υπό συνθήκες σταθερής κατάστασης χωρίς θερμικό φορτίο, η απόδοση μπορεί να υπολογιστεί όπως φαίνεται παρακάτω.

$$n = \frac{q_{electrical} (kWh)}{q_{fuel} (kWh) + q_{auxiliary} (kWh)} \quad (4.23)$$

Όπου :

$q_{electrical}$ = ηλεκτρικής ισχύς της μονάδας

q_{fuel} = ενέργεια του καυσίμου που παρέχεται στη μονάδα

$q_{auxiliary}$ = ενέργεια που παρέχεται στην μονάδα, πέραν της κύριας πηγής καυσίμου

Κατά τη δοκιμή σταθερής κατάστασης, το φορτίο και οι περιβαλλοντικές συνθήκες παραμένουν σταθερές. Οι μεταβλητές που απαιτούνται για τον υπολογισμό της απόδοσης στην παραπάνω εξίσωση μετρώνται σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα. Η δοκιμή έχει ολοκληρωθεί όταν η τιμή ηλεκτρικής απόδοσης δεν κυμαίνεται περισσότερο από δύο τοις εκατό.

Δοκιμή θερμικού φορτίου

Για οικιακές μονάδες κυψελών καυσίμου που παράγουν χρήσιμη θερμότητα, καθώς και ηλεκτρική ενέργεια, η δοκιμή θερμικού φορτίου θα μετρήσει τη συνολική απόδοση της μονάδας σε προκαθορισμένες συνθήκες εισόδου.

Η χρήσιμη θερμότητα μεταφέρεται σε ένα ρευστό, συνήθως νερό, το οποίο διατηρείται σε καθορισμένη θερμοκρασία εισόδου και ρυθμό ροής.

Παρόμοια με τη δοκιμή σταθερής κατάστασης, η απόδοση μπορεί να υπολογιστεί ως ο λόγος της ωφέλιμης ενέργειας εξόδου από τη μονάδα προς την ενέργεια που παρέχεται στη μονάδα, αλλά στην περίπτωση αυτή, η ωφέλιμη ενέργεια εξόδου περιλαμβάνει τόσο τη θερμική όσο και την ηλεκτρική ενέργεια, όπως φαίνεται παρακάτω.

$$\eta = \frac{q_{\text{electrical}} (\text{kWh}) + q_{\text{thermal}} (\text{kWh})}{q_{\text{fuel}} (\text{kWh}) + q_{\text{auxiliary}} (\text{kWh})} \quad (4.24)$$

Όπου, $q_{\text{electrical}}$: ηλεκτρική ισχύς

q_{thermal} : θερμική ισχύς

q_{fuel} : ενέργεια του καυσίμου που παρέχεται στη μονάδα

$q_{\text{auxiliary}}$: ενέργεια που παρέχεται στην μονάδα, πέραν της κύριας πηγής καυσίμου

Η θερμική ισχύς της μονάδας θα υπολογιστεί ως το άθροισμα της θερμότητας που μετράται περιοδικά, όπως φαίνεται παρακάτω.

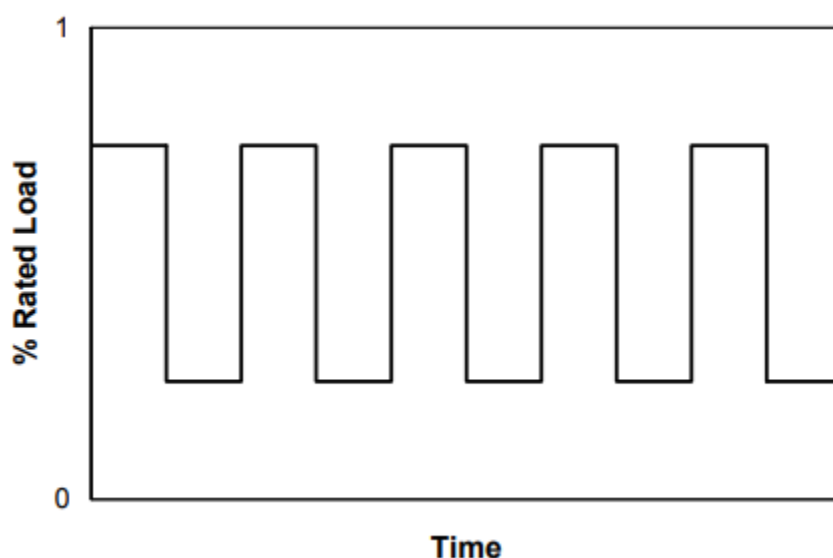
$$q_{\text{thermal}} = \Sigma \left(\frac{\rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) * V \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) * Cp \left(\frac{\text{KJ}}{\text{kg} * \text{K}} \right) * (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) (\text{°C}) * \Delta t (\text{s})}{3600} \right) \quad (4.25)$$

Παρόμοια με τη δοκιμή σταθερής κατάστασης, το φορτίο, το υγρό μεταφοράς θερμότητας και οι περιβαλλοντικές συνθήκες παραμένουν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Οι μετρήσεις γίνονται σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα και η δοκιμή ολοκληρώνεται όταν η συνολική τιμή απόδοσης δεν κυμαίνεται περισσότερο από δύο τοις εκατό. Και πάλι, η δοκιμή πιθανότατα θα επαναλαμβανόταν για έναν αριθμό συνθηκών αξιολόγησης προκειμένου να παρασχεθεί ένας χάρτης απόδοσης της συνολικής απόδοσης της μονάδας.

Παροδική Δοκιμή

Η παροδική ηλεκτρική απόδοση των κυψελών καυσίμου οικιακών συστημάτων μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην απόδοση της μονάδας, ειδικά σε εφαρμογές ανεξάρτητες από το δίκτυο όπου το ηλεκτρικό φορτίο μεταβάλλεται γρήγορα. Το μέγεθος αυτής της επίδρασης μετριέται αλλάζοντας επανειλημμένα το επίπεδο φορτίου σύμφωνα με ένα προδιαγεγραμμένο προφίλ φορτίου με τις συνθήκες να διατηρούνται σε σταθερές τιμές.

Εάν τα παροδικά ηλεκτρικά φορτία δεν έχουν καμία επίδραση στην απόδοση της μονάδας, η απόδοση θα είναι ίση με το σταθμισμένο άθροισμα κάθε επιπέδου φορτίου. Για το προφίλ φορτίου δείγματος, η χρονικά σταθμισμένη απόδοση θα είναι ο μέσος όρος των αποδόσεων στα δύο επίπεδα φορτίου.



Σχήμα 4.5 : Δείγμα προφίλ φορτίου για Παροδικό ηλεκτρικό έλεγχο της απόδοσης (πηγή: <https://www.nist.gov/publications/proposed-testing-methodology-and-laboratory-facilities-evaluating-residential-fuel-cell>)

Η ηλεκτρική απόδοση μετράται με τον ίδιο τρόπο, όπως στη δοκιμή σταθερής κατάστασης, κατά την περίοδο της δοκιμής. Η παροδική δοκιμή εκτελείται σε διάφορες συνθήκες για να διαπιστωθεί η συνολική επίδραση των παροδικών ηλεκτρικών φορτίων στην απόδοση των οικιακών συστημάτων κυψελών καυσίμου.

Δοκιμή εκκίνησης

Όταν οι οικιακές κυψέλες καυσίμου αφήνονται να κρυώσουν κάτω από τη θερμοκρασία λειτουργίας, η μονάδα πρέπει να ξαναθερμανθεί στην κατάλληλη θερμοκρασία, πριν παράγει ισχύ. Η δοκιμή εκκίνησης θα καθορίσει το χρόνο που απαιτείται για την επίτευξη μιας λειτουργικής θερμοκρασίας από τις συνθήκες περιβάλλοντος και τη σχετική ηλεκτρική απόδοση της μονάδας, καθώς φτάνει σε σταθερή κατάσταση.

Για την προετοιμασία της κυψέλης πριν τη δοκιμή, δεν πρέπει να λαμβάνεται ρεύμα από τη μονάδα, επιτρέποντάς της να κρυώσει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος του θαλάμου. Στη συνέχεια, αντλείται ισχύς από τη μονάδα αρχικοποιώντας τη διαδικασία εκκίνησης, η οποία τη φέρνει σε θερμοκρασία λειτουργίας για κάποιο χρονικό διάστημα. Τα δεδομένα καταγράφονται καθώς η μονάδα θερμαίνεται. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες παραμένουν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Η δοκιμή θα συνεχιστεί έως ότου η ηλεκτρική απόδοση της μονάδας γίνει σταθερή εντός δύο τοις εκατό.

Κεφάλαιο 5° : Εξοπλισμός Πιστοποιημένου Εργαστηρίου

5.1 Απαραίτητα τεχνικά χαρακτηριστικά εξοπλισμού

Για να είναι εφικτό να πραγματοποιηθούν οι προαναφερθείσες διαδικασίες, ένα πιστοποιημένο εργαστήριο ελέγχου κυψελών καυσίμου θα πρέπει να είναι εξοπλισμένο με τη διάταξη ελέγχου και τους αισθητήρες που περιγράφονται παρακάτω.

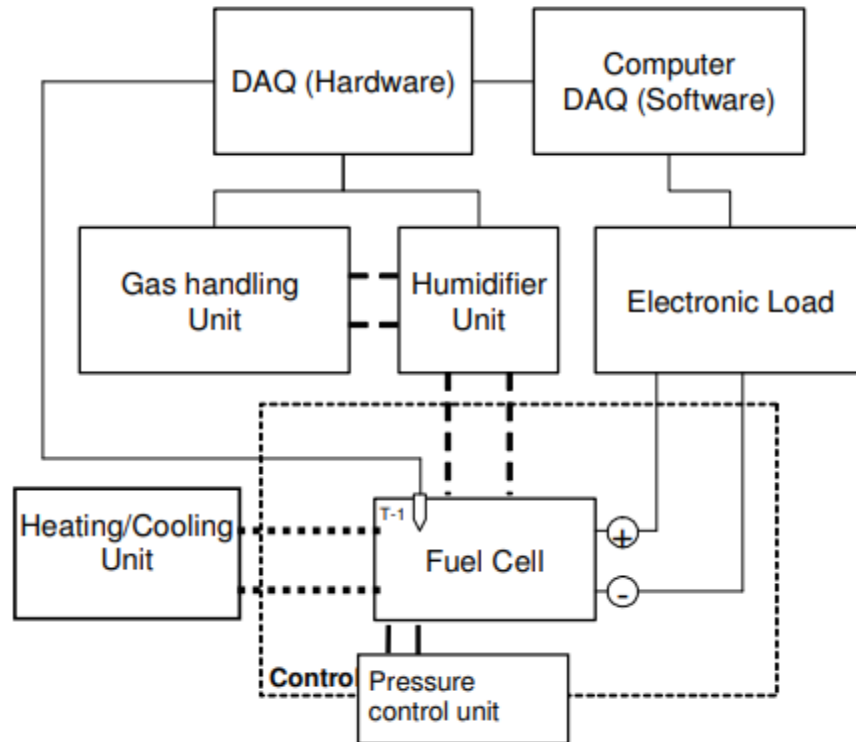
Η διάταξη ελέγχου κυψελών καυσίμου αποτελείται από υποσυστήματα για την παροχή καυσίμου και οξειδωτικού μέσου στην κυψέλη (ρυθμός ροής, πίεση, θερμοκρασία, υγρασία), έναν ρυθμιστή ηλεκτρικού φορτίου για να αντλεί ρεύμα/φορτίο από τη μοναδιαία κυψέλη/συστοιχία και ένα υποσύστημα θέρμανσης (πιθανή θέρμανση/ψύξη) για τον έλεγχο της θερμοκρασίας κυψέλης. Πέραν αυτών στην εγκατάσταση, θα πρέπει να υπάρχει κι ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής, ο οποίος ελέγχει την εγκατάσταση και λειτουργεί ως μονάδα συλλογής δεδομένων.

Στον παρακάτω πίνακα γίνεται περιγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών που θα πρέπει να πληρεί κάθε υποσύστημα :

Πίνακας 5.1 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά απαιτούμενης Διάταξης Ελέγχου (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Περιγραφή	Τεχνικά Χαρακτηριστικά
Αισθητήρας Αντίθλιψης οξειδωτικού	Πίεση περιβάλλοντος έως 500 kPa για το εξεταζόμενο εύρος ρυθμών ροής οξειδωτικών
Αισθητήρας Αντίθλιψης Καυσίμου	Πίεση περιβάλλοντος έως 500 kPa για το εξεταζόμενο εύρος ρυθμών ροής καυσίμου
Μετρητής ροής οξειδωτικού μέσου	Ρυθμοί ροής για το εξεταζόμενο εύρος ρεύματος
Μετρητής ροής καυσίμου	Ρυθμοί ροής για το εξεταζόμενο εύρος ρεύματος
Συσκευή ρύθμισης τιμής υγρασίας οξειδωτικού	Θερμοκρασία 25 έως 90 °C, σχετική υγρασία 0 έως 100%
Συσκευή ρύθμισης τιμής υγρασίας καυσίμου	Θερμοκρασία 25 έως 90 °C, σχετική υγρασία 0 έως 100%
Αισθητήρας θερμοκρασίας κυψέλης	Θερμοκρασία περιβάλλοντος έως 100 °C
Συσκευές θέρμανσης/ψύξης κυψέλης	Θερμοκρασία περιβάλλοντος έως 100 °C
Ρυθμιστής ηλεκτρικού φορτίου	Μέγιστη εφικτή τιμή ρεύματος σε $1,2 > U > 0 \text{ V}$ - Πιθανή γαλβανοστατική λειτουργία
Συσκευή ελέγχου και συλλογής δεδομένων	Η χωρητικότητα του συστήματος συλλογής δεδομένων πρέπει να είναι επαρκής για την καταγραφή όλων των μεταβλητών δοκιμής με τους καθορισμένους ρυθμούς δειγματοληψίας

Παρακάτω παρατίθεται σχηματική απεικόνιση τους περιβάλλοντος δοκιμών



Σχήμα 5.1 : Περιβάλλον Δοκιμών (πηγή:https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

5.2 Διαθέσιμος εξοπλισμός στην αγορά

Αναλόγα με την δυναμικότητα που επιλέγεται να έχει το πιστοποιημένο εργαστήριο ελέγχου κυψελών καυσίμου, επιλέγεται και η αντίστοιχη διάταξη (πχ διάταξη για μοναδιαία κυψέλη ή για συστοιχίες μικρής/μεγάλης ισχύος). Όπως γίνεται κατανοητό, πέραν της επιλογής διάταξης ελέγχου, το εργαστήριο θα πρέπει να έχει και έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος θα ελέγχει τις διαδικασίες και θα συλλέγει τα δεδομένα. Η επιλογή του Η/Υ, γίνεται βάσει του επιθυμητού ρυθμού δειγματοληψίας, ώστε να ανταπεξέρχεται στη διαδικασία της επεξεργασίας δεδομένων.

Παρακάτω γίνεται περιγραφή μερικών παραδειγμάτων εξοπλισμού, διαθέσιμου στην αγορά, που θα κάλυπταν ένα εργαστήριο ελέγχου και πιστοποίησης κυψελών καυσίμου :

TSFC PRO-601 PEM Fuel Cell Test Station



Σχήμα 5.2 : Διάταξη ελέγχου κυψελών καυσίμου TSFC PRO-601

Το σύστημα μπορεί να ελεγχθεί με υπολογιστή και λογισμικό FCSOft. Με αυτό το λογισμικό είναι δυνατός ο έλεγχος ολόκληρου του συστήματος, η συλλογή δεδομένων για τα χρονικά διαστήματα που ορίζει ο χρήστης, εμφάνιση γραφικών παραστάσεων αλλά και η λήψη ιστορικών δεδομένων από τη βάση δεδομένων. Οι παράμετροι/μεταβλητές των δοκιμών μπορούν να καταχωρηθούν είτε χειροκίνητα είτε αυτόματα μετά από προγραμματισμό.

Πίνακας 5.2 : Τεχνικά χαρακτηριστικά διάταξης ελέγχου TSFC PRO-601

Τεχνικά χαρακτηριστικά ροής αντιδρώντων	
Συσκευή Ελέγχου ροής μάζας καυσίμου - οξειδωτικού μέσου	50 slpm με εύρος τιμών 2 - 100%
Προγραμματιζόμενο ηλεκτρικό φορτίο	400, 600, 800, 1200 ή 1500 W
Επιπλέον τεχνικά χαρακτηριστικά	Εξοπλισμός για τον καθαρισμό αζώτου Εξοπλισμένο με βαλβίδες ελέγχου για αποτροπή φαινομένου αντίθλιψης.

Open Cathode Stack Tester OBT



Σχήμα 5.3 : LeanCat OBT - Διάταξη Ελέγχου συστοιχίας ανοιχτής καθόδου

Η συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιείται για έλεγχο συστοιχιών τύπου PEM ανοιχτής καθόδου. Μπορούν να ελεγχούν μέχρι και 60 κελιά. Η διάταξη διαθέτει πλήρως αυτοματοποιημένη λειτουργία ασφαλείας, δηλαδή καθαρισμό με ξηρό άζωτο.

Πίνακας 5.3 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά Διάταξης Συστοιχίας ανοιχτής καθόδου

Φορτίο	
Μέγιστη τιμή ισχύος	1.4 / 2.1 / 3.2 kW
Μέγιστη τιμή ρεύματος	1.5 120 / 180 / 300 A
Μέγιστη τιμή τάσης	60 V
Σύστημα ασφαλείας	Ασφαλής απενεργοποίηση με ροή ξηρού αζώτου κουμπί έκτακτης ανάγκης αισθητήρες ανίχνευσης υδρογόνου (1 μέσα στη διάταξη και 1 στο περιβάλλον)

Fuel Cell Test Station PBT



Σχήμα 5.4 : LeanCat PBT - Διάταξη ελέγχου μοναδιαίας κυψέλης

Η συγκεκριμένη διάταξη είναι κατάλληλη για έλεγχο μοναδιαίας κυψέλης με ωφέλιμη επιφάνεια από 25 έως 50 cm^2 . Η διάταξη διαθέτει πλήρως αυτοματοποιημένη λειτουργία ασφαλείας, δηλαδή καθαρισμό με ξηρό άζωτο.

Πίνακας 5.4 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά Διάταξης Ελέγχου μοναδιαίας κυψέλης

Τεχνικά χαρακτηριστικά ροής αντιδρώντων	
Συσκευή Ελέγχου ροής μάζας καυσίμου	0,04 – 2 slpm
Συσκευή Ελέγχου ροής μάζας οξειδωτικού μέσου	0,1 – 5 slpm
Φορτίο	
Ηλεκτρονικό φορτίο με μηδενική τάση	60 V 60 A (κυψέλες με max. 25 cm^2) 60 V 120 A (κυψέλες max. 50 cm^2)

Fuel Cell Test Station PTS-10



Σχήμα 5.5 : LeanCat PTS-10 - Διάταξη ελέγχου για μοναδιαία κυψέλη και μικρές συστοιχίες

Η συγκεκριμένη διάταξη ελέγχου είναι κατάλληλη για δοκιμές μοναδιαίων κυψελών και μικρών συστοιχιών (εύρος ισχύος 100W – 1kW).

Πίνακας 5.5 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά Διάταξης Ελέγχου μοναδιαίας κυψέλης – μικρών συστοιχιών

Τεχνικά Χαρακτηριστικά ροής αντιδρώντων	
Συσκευή Ελέγχου ροής μάζας Καυσίμου	0,5 – 25 slpm
Συσκευή Ελέγχου ροής μάζας οξειδωτικού μέσου	1,8 – 90 slpm
Έλεγχος αντίθλιψης	Μέχρι 3 bar
Φορτίο	
Εύρος ισχύος	100 W - 1 kW
Εύρος ρεύματος	μέχρι 400 A

Fuel Cell Test Station PTS-100



Σχήμα 5.6 : LeanCat PTS – 100 – Διάταξη Ελέγχου συστοιχιών

Η συγκεκριμένη διάταξη είναι κατάλληλη για έλεγχο συστοιχιών (εύρος Ισχύος 1 – 10kW)

Τεχνικά Χαρακτηριστικά ροής αντιδρώντων	
Συσκευή Ελέγχου ροής μάζας Καυσίμου	5 – 250 slpm
Συσκευή Ελέγχου ροής μάζας οξειδωτικού μέσου	18 – 900 slpm
Φορτίο	
Εύρος ρεύματος	μέχρι 1000 A

Κεφάλαιο 6° : Συμπεράσματα

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά που προκαλούν το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας να στραφεί προς τη μελέτη και αξιοποίηση των συστημάτων κυψελών καυσίμου είναι, η αυξημένη απόδοση, η αθόρυβη λειτουργία, η υψηλή πυκνότητα ρεύματος, καθώς και οι μηδενικοί ρύποι που εκπέμπουν όταν το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι καθαρό υδρογόνο. Ένα ακόμα πλεονέκτημα τους είναι οι ποικίλες εφαρμογές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως συστήματα στον τομέα μεταφορών, συστήματα συμπαραγωγής ενέργειας, συστήματα εφεδρικής ενέργειας.

Παράλληλα, υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα που εμποδίζουν την ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων. Το σημαντικότερο είναι το υψηλό κόστος (πχ κόστος παραγωγής καυσίμου, κόστος αποθήκευσης καυσίμου, κόστος καταλύτη). Ωστόσο, υπάρχουν τεράστιες δυνατότητες μείωσης του κόστους με την εκβιομηχάνιση της κατασκευής κυψελών καυσίμου, δηλαδή μεγαλύτερη παραγωγή αριθμού συστημάτων κυψελών καυσίμου. Έπειτα είναι σημαντικό να υπάρξει ανάπτυξης της εφοδιαστικής αλυσίδας για πρόσβαση στους διάφορους προμηθευτές. Τέλος, η ανακύκλωση των καταλυτών και η επαναχρησιμοποίηση των διπολικών πλακών, μειώνουν το συνολικό κόστος του κύκλου ζωής των κυψελών καυσίμου.

Γενικά, αναμένεται μία πτωτική τάση του κόστους, επομένως τα χρόνια που θα ακολουθήσουν είναι σημαντικό να μεθοδευτεί η ανάπτυξη περισσότερων εργαστηρίων ελέγχου και πιστοποίησης των κυψελών καυσίμου. Αυτό είναι σημαντικό να συμβεί, ώστε να διασφαλίζεται η ποιότητα των κυψελών καυσίμου, όσον αφορά καλύτερο σχεδιασμό από τις εταιρίες παραγωγής τους, και άρα καλύτερη απόδοση. Επίσης, για να επιτυγχάνεται ασφάλεια κατά την χρήση τους, δηλαδή αποφυγή πυρκαγιάς ή ηλεκτρικού σοκ. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου εργαστηρίου είναι σχετικά προσιτή, και προβλέπεται να γίνει πιο εύκολη στο μέλλον. Πριν την ανάπτυξη ενός πιστοποιημένου εργαστηρίου ελέγχου κυψελών καυσίμου, θα πρέπει να γίνει μία τεχνικοοικονομική μελέτη, βάσει του κλάδου που θα αφορά (πχ τομέας μεταφορών), καθώς βάσει αυτού κρίνεται και η δυναμικότητα που θα έχει το πιστοποιημένο εργαστήριο, τα επενδυτικά, τα λειτουργικά έξοδα και, εν τέλει, η βιωσιμότητα του.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] T Malkow, G De Marco, A Pilenga, M. Honselaar, G Tsotridis, 2010, FCTesQA Test Module TM PEFC ST 5-1 “Testing the humidification sensitivity of a single PEFC Characterisation of the performances of a PEFC operating with fuel and oxidant at various relative humidity”, Version 2010-04-30, EUR 24126 EN 2009, Luxembourg: Publications Office of the European Union
- [2] T Malkow, G De Marco, A Pilenga, M. Honselaar, G Tsotridis, 2010, FCTesQA Test Module TM PEFC ST 5-2 “Testing the voltage and power as function of current density Polarisation curve for a PEFC single cell”, Version 2010-04-30, EUR 24126 EN 2009, Luxembourg: Publications Office of the European Union
- [3] T Malkow, G De Marco, A Pilenga, M. Honselaar, G Tsotridis, 2010, FCTesQA Test Module TM PEFC ST 5-3 “Testing the voltage and the power as function of the current density (Polarization curve for a PEFC stack)”, Version 2010-04-30, EUR 24126 EN 2009, Luxembourg: Publications Office of the European Union
- [4] T Malkow, G De Marco, A Pilenga, M. Honselaar, G Tsotridis, 2010, FCTesQA Test Module TM PEFC ST 5-4 “Testing the voltage and the power as a function of the current density following an on/off profile versus time Accelerated ageing on/off cycling test for a PEFC single cell”, Version 2010-04-30, EUR 24126 EN 2009, Luxembourg: Publications Office of the European Union
- [5] T Malkow, G De Marco, A Pilenga, M. Honselaar, G Tsotridis, 2010, FCTesQA Test Module TM PEFC ST 5-6 “Testing the voltage and the power as a function of time at a fixed current density Long term durability steady test for a single PEFC”, Version 2010-04-30, EUR 24126 EN 2009, Luxembourg: Publications Office of the European Union
- [6] T Malkow, G De Marco, A Pilenga, M. Honselaar, G Tsotridis, 2010, FCTesQA Test Module TM PEFC ST 5-7 “Testing the voltage and the power as a function of the current density following a dynamic profile versus time Dynamic load cycling ageing test for a PEFC single cell”, Version 2010-04-30, EUR 24126 EN 2009, Luxembourg: Publications Office of the European Union
- [7] T Malkow, G De Marco, A Pilenga, M. Honselaar, G Tsotridis, 2015, “EU Harmonised Test Protocols for PEMFC MEA Testing in Single Cell Configuration for Automotive Applications”, EUR 27632. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union
- [8] Mark W. Davis, 2002, Proposed Testing Methodology and Laboratory Facilities for Evaluating Residential Fuel Cell Systems
- [9] 2004, “Fuel Cell Handbook”, 7th Edition
- [10] Alteryx Systems, 2010, πηγή : https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f12/csqw_radley.pdf
- [11] Fuel Cells and Hydrogen Observatory, 2021, Chapter 1 - 2021 Technology & Market Report
- [12] Corrosionpedia, 2019, Τίτλος άρθρου : “What is Galvanostatic? - Definition from Corrosionpedia”, πηγή: <https://www.corrosionpedia.com/definition/575/galvanostatic>
- [13] Energy.gov, τίτλος άρθρου : “Comparison of Fuel Cell Technologies”, πηγή : <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/comparison-fuel-cell-technologies>
- [14] CFPA Europe, 2022, “CFPA-E Guideline No 28:2012 F”
- [15] C. Rivkin, R. Burgess, and W. Buttner , “Hydrogen Technologies Safety Guide”

Παράρτημα Α: Υπολογισμός Ογκομετρικών Ρυθμών ροής Αντιδρώντων αερίων

Οι ογκομετρικοί ρυθμοί ροής των αντιδρώντων αερίων μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$Q_{v,\lambda} \left(\frac{l}{sec} \right) = \frac{M \left(\frac{g}{mol} \right) * I(A) * \lambda}{z * F \left(\frac{C}{mol} \right) * \rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) * \varphi} \quad (7.1)$$

Όπου $F = 96485.3 \text{ C/mol}$

Οι ιδιότητες των αντιδρώντων αερίων για τον υπολογισμό του ογκομετρικού ρυθμού ροής, $Q_{v,\lambda}$ των αντιδρώντων, παρουσιάζονται παρακάτω :

Πίνακας 7.1 : Ιδιότητες αντιδρώντων αερίων

Αντιδρώντα αέρια	M (g/mol)	z	ρ (kg/Nm ³)
H₂	2.02	2	0.0898
O₂	32.0	4	1.429
Αέρας	28.8	4	1.292

Εκφράσεις για τον υπολογισμό του ογκομετρικού ρυθμού ροής, $Q_{v,\lambda}$ των αντιδρώντων αερίων βάσει της σχέσης 7.1 και του Πίνακα 7.1

Πίνακας 7.2 : Εκφράσεις Ογκομετρικού ρυθμού ροής αντιδρώντων αερίων

Αντιδρώντα αέρια	$Q_{v,\lambda}$ (Nml/min)
H₂	$6.97 * I(A) * \lambda$
O₂	$3.35 * I(A) * \lambda$
Αέρας	$3.35 / 0.209 * I(A) * \lambda = 16.59 * I(A) * \lambda$

Παράρτημα Β: Μέθοδος μέτρησης για 3^ο βήμα ελέγχου συστοιχίας

Στον παρακάτω πίνακα, παρατίθενται οι τιμές πυκνότητας ρεύματος που πρέπει να οριστούν για κάθε βήμα λήψης μετρήσεων, για την αξιολόγηση απόδοσης της συστοιχίας. Η πυκνότητα ρεύματος αλλάζει βήμα προς βήμα κλιμακωτά ή βαθμιαία. Η διάρκεια κάθε βήματος είναι είτε μια δεδομένη τιμή είτε εξαρτάται από το κριτήριο σταθεροποίησης κατάστασης λειτουργίας. Οι τιμές εκφράζονται σε ποσοστιαίες τιμές ονομαστικής πυκνότητας ρεύματος.

Πίνακας 7.3 : Τιμές πυκνότητας ρεύματος για έλεγχο συστοιχίας

A/A	Ποσοστιαίες τιμές ονομαστικής πυκνότητας ρεύματος
0	0 OCV
1	2%
2	5%
3	10%
4	15%
5	20%
6	25%
7	30%
8	40%
9	50%
10	60%
11	70%
12	80%
13	90%
14	100%

Κριτήριο λήξης

Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με τις προτεινόμενες κρίσιμες τιμές και κριτήρια επείγουσας ματαίωσης της δοκιμής. Η μόνιμη παρακολούθηση αυτών των τιμών είναι απαραίτητη προς αποφυγή ζημιών στην συστοιχία και τα στοιχεία της, καθώς και για την ασφαλή διεξαγωγή του ελέγχου. Στην περίπτωση που επιτευχθεί τιμή έκτακτης ανάγκης, η δοκιμή πρέπει να ματαιωθεί αμέσως με ασφαλή τρόπο. Συνιστάται χρήση διαδικασίας αυτοματοποιημένου τερματισμού λειτουργίας.

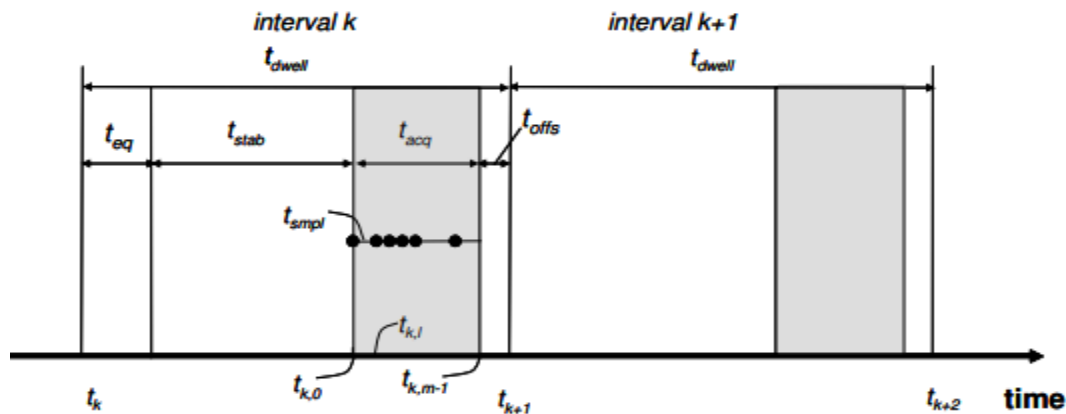
Πίνακας 7.4 : Κριτήρια επείγουσας ματαίωσης ελέγχου

Κριτήριο	Σύμβολο	Προειδοποιητική Τιμή	Κρίσιμη
1	V_{min}	0,3 nV	0,2 nV
2	$V_{i,min}$ ($1 \leq i \leq n$)	0,3V	0,2 V
3	ΔV_i	Σύμφωνα με τον κατασκευαστή	
4	I_{max}	Σύμφωνα με τον κατασκευαστή	
5	T_{stack}	+3,5 °C έναντι σημείου T_{stack}	+5 °C έναντι σημείου T_{stack}
6	$T_{cool,out}$	+3,5 °C έναντι σημείου T_{stack}	+5 °C έναντι σημείου T_{stack}

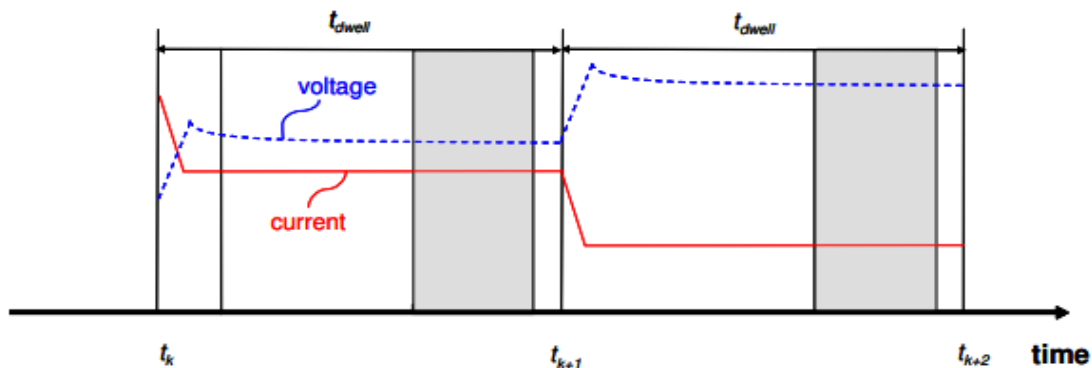
7	$T_{fuel/ox,out}$	+3,5 °C έναντι σημείου $T_{fuel/ox}$	+10 °C έναντι σημείου T_{stack}
8	ΔT_{cool}	3,5 K	5K
9	$p_{fluid,in}$	Σύμφωνα με τον κατασκευαστή	
10	$\Delta p_{fluid,max}$	Σύμφωνα με τον κατασκευαστή	
11	$\Delta p_{fuel/ox,max}$	Σύμφωνα με τον κατασκευαστή	

Παράρτημα Γ: Πρωτόκολλο Συλλογής Δεδομένων

Ο χρόνος παραμονής για κάθε σημείο ρύθμισης k περιλαμβάνει περιόδους εξισορρόπησης (t_{eq} -equilibration), σταθεροποίησης κατάστασης λειτουργίας (t_{stab} -stabilization) και συλλογής δεδομένων (t_{acq} -acquisition), και τελειώνει με ένα χρόνο μετατόπισης (t_{offs} -offset). Κατά την περίοδο εξισορρόπησης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι τιμές εισόδου και εξόδου της δοκιμής για να επιτυγχάνεται σχεδόν σταθερή κατάσταση κατά την αλλαγή φορτίου και, κατά περίπτωση, για την κλίση του φορτίου από το διάστημα k στο διάστημα $k+1$ και, για καθυστερήσεις λόγω προσαρμογών της διάταξης δοκιμών -ιδιαίτερα των ρυθμών ροής των αντιδραστηρίων ως αποτέλεσμα της αλλαγής του φορτίου. Ο έλεγχος της σταθεροποίησης των τιμών εισόδου/εξόδου δοκιμής, σύμφωνα με τα κριτήριά τους, εκτελείται κατά τη διάρκεια της περιόδου σταθεροποίησης κατάστασης λειτουργίας, είτε σε απευθείας σύνδεση που συνεπάγεται ότι το t_{stab} μεταβάλλεται είτε εκτός σύνδεσης όταν το t_{stab} λαμβάνει μια δεδομένη τιμή. Η περίοδος απόκτησης δεδομένων είναι η πραγματική μέτρηση των τιμών εισόδου και εξόδου ελέγχου. Ο χρόνος αντιστάθμισης μπορεί να οφείλεται σε καθυστερήσεις στην συλλογή δεδομένων από τη διάταξη ελέγχου. Το χρονοδιάγραμμα συλλογής δεδομένων και τα βασικά προφίλ ρεύματος και τάσης συστοιχίας εμφανίζονται ποιοτικά στα σχήματα 7.1 και 7.2, αντίστοιχα.



Σχήμα 7.1 : Χρονοδιάγραμμα συλλογής δεδομένων (πηγή : https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)



Σχήμα 7.2 : Ποιοτικό προφίλ τάσης και ρεύματος συστοιχίας (πηγή : https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Πίνακας 7.5 : Εκφράσεις των χρονικών μεταβλητών χρονοδιαγράμματος συλλογής δεδομένων (πηγή : https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
t_k	$(k-1) * t_{dwell}$	min
t_{dwell}	$t_{eq} + t_{stab} + t_{acq} + t_{offs}$	min
t_{eq}	ανάλογα με την κλίση φορτίου και την προσαρμογή τιμής ρυθμού ροής αντιδρώντος	min
t_{stab}	$\geq 2 t_{acq}$	min
t_{offs}	σύμφωνα με την προβλεπόμενη καθυστέρηση στην συλλογή δεδομένων της διάταξης ελέγχου	s
t_{acq}	>1	min
t_{smp}	1	s
m	$(t_{acq}/t_{smp}) + 1$	-
$t_{k,l}$	$t_k + t_{k,eq} + t_{k,stab} + l * t_{smp}$	min

Παράρτημα Δ: Πρότυπο Τεχνικής Έκθεσης

Η τεχνική έκθεση θα πρέπει να περιλαμβάνει :

- Μία εισαγωγή με επεξήγηση του στόχου του ελέγχου
- Περιγραφή εγκατάστασης και αντικείμενου ελέγχου (περιγραφή της διάταξης ελέγχου, περιγραφή του τύπου, του μεγέθους, της γεωμετρίας, των υλικών της μοναδιαίας κυψέλης)
- Περιγραφή των συνθηκών λειτουργίας/τιμές εισόδου και εξόδου της δοκιμής
- Οι διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα (διαδικασία σταθεροποίησης κατάστασης λειτουργίας, διαδικασία εκκίνησης, σκόπιμες ή τυχαίες αποκλίσεις από τις προτεινόμενες διαδικασίες)
- Τα αποτελέσματα της δοκιμής (Πίνακες ή γραφήματα που παρουσιάζουν τη λειτουργική απόδοση που προέκυψε κατά τη διάρκεια του βήματος λήψης μετρήσεων, αλλά και κατά της εκκίνησης, τα βήματα προετοιμασίας και σταθεροποίησης κατάστασης λειτουργίας και τα αποτελέσματα (μετά την επεξεργασία δεδομένων))
- Συμπεράσματα που αφορούν στον στόχο της δοκιμής και στα κριτήρια αποδοχής

Παρακάτω ακολουθεί πρότυπη φόρμα

Πίνακας 7.6 : Γενικές πληροφορίες τεχνικής έκθεσης (πηγή : https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Αναφορές	...
Τίτλος τεχνικής έκθεσης	...
Συγγραφείς	...
Αριθμός Δοκιμής	...
Έκδοση	...
Εταιρία που αιτήθηκε την δοκιμή	...
Αριθμός αιτήματος δοκιμής	...
Ημερομηνία	...
Εταιρία που εκτελεί τη δοκιμή	...
Τοποθεσία	...
Εξοπλισμός	...

Εισαγωγή και προγραμματισμός δοκιμών

Οι συγγραφείς θα πρέπει να αναφέρουν :

- τη διαδικασία που ακολουθήθηκε και , εάν χρειάζεται, να αναφέρεται ο λόγος που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη διαδικασία
- οποιαδήποτε άλλο έγγραφο-τεκμηρίωση χρησιμοποιείται (πχ έγγραφο ορολογίας, πίνακας συμβόλων κλπ)

Στόχος και πεδίο εφαρμογής της δοκιμής

Εδώ θα πρέπει να περιγράφονται περαιτέρω στόχοι δοκιμής , πέραν πχ στόχος είναι να αναπαραχθεί μία καμπύλη πόλωσης ...

Για παράδειγμα

Στόχο της δοκιμής αποτελεί ο χαρακτηρισμός

... της γενικής απόδοσης μίας κυψέλης καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης

Οι συνθήκες λειτουργίας που λαμβάνονται υπόψη για αυτή τη δοκιμή αντιστοιχούν σε

... στις τρέχουσες συνθήκες που χρησιμοποιούνται από τα μέλη της κοινότητας των κυψελών καυσίμου

Η απόδοση της κυψέλης μετράται από την τάση ανοιχτοκυκλώσεως έως την υψηλότερη πυκνότητα ρεύματος που έχει καθοριστεί από

... τις ιδιότητες του αντικειμένου ελέγχου

... από τις προδιαγραφές της εφαρμογής που αφορά

Πίνακας 7.7 : Περιγραφή του αντικείμενου ελέγχου (πηγή : https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Κατασκευαστής κυψελών	...
Τεχνολογία κυψελών καυσίμου	...
Μοντέλο κυψέλης	...
Προϊόν ή αντικείμενο προς έλεγχο	...
Αριθμός προϊόντος	...
Αριθμός ταυτοποίησης αντικείμενου δοκιμής	...
Κυψέλη καυσίμου: υλικό των μονοπολικών πλακών	...
Κυψέλη καυσίμου: σχεδιασμός πεδίου ροής	...
Κυψέλη καυσίμου: ενεργή περιοχή (cm ²)	...
Τύπος φλάντζας	...
Πάχος φλάντζας	...
Τεχνολογία κυψελών (συλλέκτες)	...
Σύσφιξη κυψέλης	...
Σύστημα θέρμανσης/ψύξης	...
Κατεύθυνση ροής αερίου	...
Συναρμολόγηση συστήματος μεμβράνης ηλεκτροδίου	...
Ηλεκτρόδια	...
Στρώμα διάχυσης αερίου (πάχος, τύπος)	...
Κάθοδος καταλυτικού στρώματος (σύνθεση)	...
Άνοδος καταλυτικού στρώματος (σύνθεση)	...
Μεμβράνη (πάχος, τύπος)	...

Χαμηλότερη επιτρεπόμενη τάση κυψέλης (V)	...
Επιτρεπόμενη διαφορά πίεσης μεταξύ ανόδου και καθόδου (kPa)	...
Σύσταση κατασκευαστή για τη στοιχειομετρία αέρα	...

Κατάσταση αντικειμένου ελέγχου

Εδώ γίνεται παρουσίαση του ιστορικού δοκιμών της, υπό εξέταση, κυψέλης με σύντομη περιγραφή των πειραμάτων -τα αναγνωριστικά τους, με διαδοχική σειρά

Περιγραφή εγκατάστασης και εξοπλισμού

Πρέπει να δοθεί λεπτομερής περιγραφή της εγκατάστασης και του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται, συμπεριλαμβανομένου του τύπου και της θέσης των αισθητήρων και συγκεκριμένων συσκευών (για παράδειγμα υποσυστήματα θέρμανσης/ψύξης), ώστε να βοηθήσει στην κατανόηση των αποτελεσμάτων.

Είσοδοι/έξοδοι και συνθήκες λειτουργίας δοκιμής

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται όλες οι τιμές εισόδου και εξόδου δοκιμής και συνθήκες λειτουργίας σε πίνακες που περιλαμβάνουν αβεβαιότητα μέτρησης και ρυθμό δειγματοληψίας κάθε μεγέθους

Πίνακας 7.8 : Πρότυπο πίνακα τιμών εισόδου και εξόδου ελέγχου (πηγή : https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/fuel-cells-and-electrolyser-testing-facilities_en)

Είσοδος/Εξοδος	Περιγραφή	Μονάδα μέτρησης	Αβεβαιότητα μέτρησης	Ρυθμός δειγματοληψίας
...

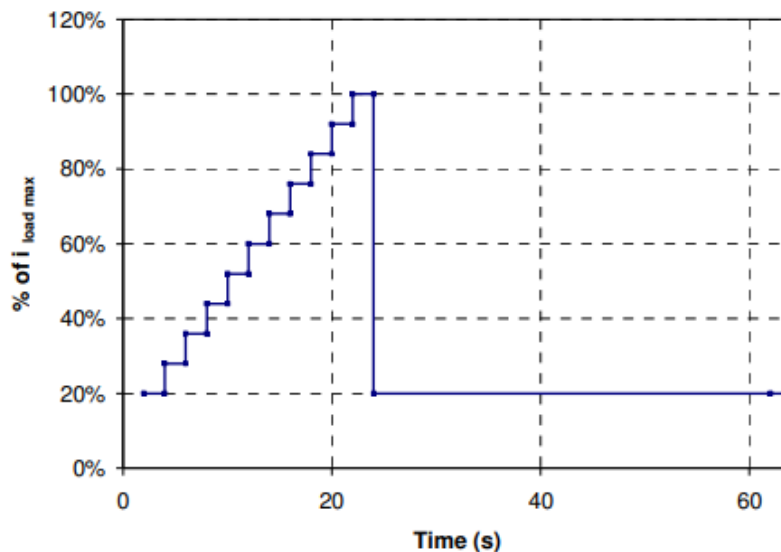
Παράρτημα Ε : Μέθοδοι εφαρμογής των δυναμικών κύκλων

Οι κύκλοι φόρτισης εφαρμόζονται υπό γαλβανοστατικό έλεγχο μεταξύ δύο τιμών πυκνότητας ρεύματος, που αντιστοιχούν σε δύο επίπεδα πυκνότητας ισχύος της αρχικής απόδοσης της μοναδιαίας κυψέλης. Στόχος αυτού του παραρτήματος είναι η παρουσίαση περισσότερων λεπτομερειών για τον έλεγχο της πυκνότητας ρεύματος, κατά τη διάρκεια των δυναμικών κύκλων. Δύο μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν για τον έλεγχο πυκνότητας ρεύματος, μεταξύ $i_{load,min}$ και $i_{load,max}$:

- με βήματα σταθερής πυκνότητας ρεύματος ή
- με σάρωση πυκνότητας ρεύματος με σταθερό ρυθμό μεταβολής από το $i_{load,min}$ στο $i_{load,max}$

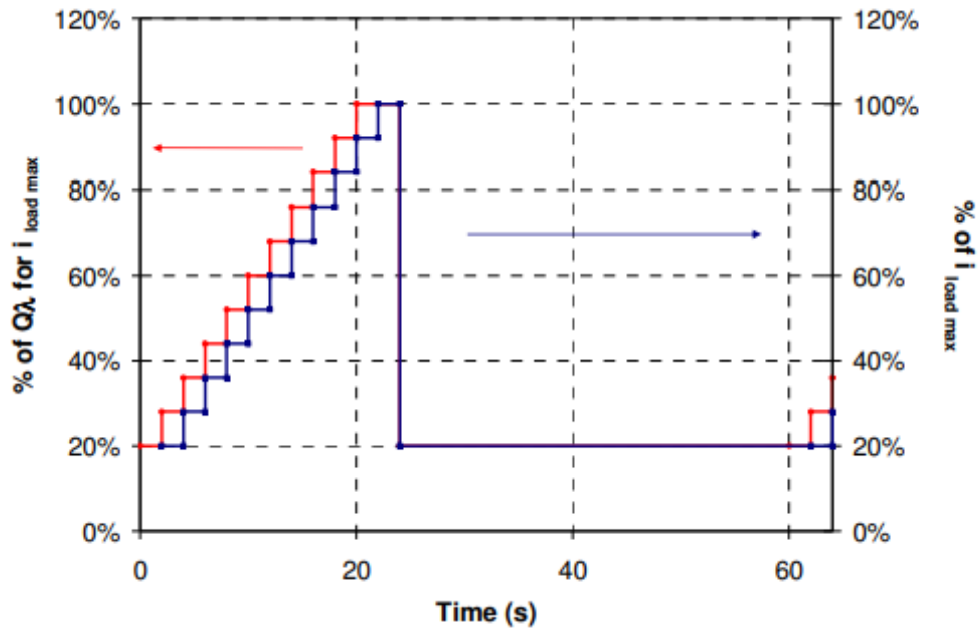
Μέθοδος βημάτων σταθερής πυκνότητας ρεύματος

Σε αυτή την περίπτωση, η πυκνότητα ρεύματος αυξάνεται βήμα προς βήμα. Συνιστάται χρόνος παραμονής καθορισμένος στα 2 δευτερόλεπτα για όλα τα βήματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.3:



Σχήμα 7.3 : Προφίλ πυκνότητας ρεύματος

Για την αποφυγή υπερβολικής πτώσης τάσης στο μέγιστο φορτίο i , συνιστάται, η εκ των προτέρων αύξηση των ρυθμών ροής καυσίμου και οξειδωτικών. Σε αυτήν την περίπτωση, το επόμενο βήμα πυκνότητας ρεύματος εφαρμόζεται με καθυστέρηση 2 δευτερολέπτων σε σύγκριση με τους ρυθμούς ροής για κάθε βήμα κατά την αύξηση της πυκνότητας ρεύματος. Για τη φθίνουσα φάση, συνιστάται η ταυτόχρονη μείωση των ρυθμών ροής και της πυκνότητας ρεύματος από τη μέγιστη στην ελάχιστη, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.4 :



Σχήμα 7.4 : Προφίλ πυκνότητας ρεύματος

Σάρωση πυκνότητας ρεύματος με σταθερό ρυθμό μεταβολής από το $i_{load,min}$ στο $i_{load,max}$

Εάν η διάταξη ελέγχου επιτρέπει την εφαρμογή σάρωσης στην πυκνότητα ρεύματος, η πυκνότητα ρεύματος μπορεί να αυξηθεί με σταθερό ρυθμό $[(i_{load,max} - i_{load,min})/20]$, $[(A/cm^2)/s]$. Σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει να ελεγχθεί, εάν οι ρυθμοί ροής θα μπορούσαν, επίσης, να αυξηθούν ακολουθώντας τον ίδιο ρυθμό σάρωσης ή ακολουθώντας το ίδιο βήμα προς βήμα προφίλ όπως περιγράφεται παραπάνω.

Παράρτημα ΣΤ : Διαδικασία αναπαραγωγής Καμπύλης Πόλωσης

Σκοπός της αναπαραγωγής μιας καμπύλης πόλωσης είναι ο προσδιορισμός της απόδοσης του συστήματος μεμβράνης ηλεκτροδίου ως προς την τάση και την πυκνότητα της κυψέλης έναντι της πυκνότητας ρεύματος. Ο χρόνος παραμονής κάθε σημείου ρύθμισης πρέπει να είναι επαρκής, ώστε να διασφαλίζεται ότι τα κριτήρια σταθεροποίησης κατάστασης λειτουργίας της τάσης κυψέλης είναι ± 5 mV εντός 2 λεπτών, αλλά όχι περισσότερο από 15 λεπτά, εκτός από την τάση ανοιχτοκυκλώσεως που δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1 λεπτό χρόνου παραμονής. Στον πίνακα 7.9, φαίνονται τα προτεινόμενα σημεία της καμπύλης.

Πίνακας 7.9 : Προτεινόμενα σημεία καμπύλης πόλωσης (πηγή : <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC99115>)

	Πυκνότητα Ρεύματος (A/cm ²)	Συνιστώμενος χρόνος παραμονής, t _{dwell} (s)	Συνιστώμενος χρόνος απόκτησης δεδομένων (s)
1	0,00	≤60	≥30
2	0,02	≤60	≥30
3	0,04	≤60	≥30
4	0,06	≤60	≥30
5	0,08	≤60	≥30
6	0,10	≤60	≥30
7	0,20	≥120	≥30
8	0,30	≥120	≥30
9	0,40	≥120	≥30
10	0,60	≥120	≥30
11	0,80	≥120	≥30
12	1,00	≥120	≥30
13	1,20	≥120	≥30
14	1,40	≥120	≥30
15	1,60	≥120	≥30
16	1,80	≥120	≥30
17	2,00	≥120	≥30
18	1,80	≥120	≥30
19	1,60	≥120	≥30
20	1,40	≥120	≥30
21	1,20	≥120	≥30
22	1,00	≥120	≥30
23	0,80	≥120	≥30
24	0,60	≥120	≥30
25	0,40	≥120	≥30
26	0,30	≥120	≥30
27	0,20	≥120	≥30
28	0,10	≤60	≥30
29	0,08	≤60	≥30
30	0,06	≤60	≥30
31	0,04	≤60	≥30
32	0,02	≤60	≥30
33	0,00	≤60	≥30

Εάν δεν μπορεί να επιτευχθεί η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος των 2,0 A/cm², το τελικό σημείο της καμπύλης πόλωσης θα είναι στην πλησιέστερη ρύθμιση τιμής ρεύματος με τιμή τάσης κυψέλης 0,4 V. Εάν είναι δυνατές ρυθμίσεις πυκνότητας ρεύματος υψηλότερες από 2,0 A/cm², συνιστάται η συνέχιση της εγγραφής σε βήματα 0,2 A/cm² έως ότου επιτευχθεί τάση κυψέλης 0,4 V. Οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται σε γαλβανοστατική λειτουργία. Για κάθε σημείο ρύθμισης πυκνότητας ρεύματος, η τάση μετράται συναρτήσει του χρόνου παραμονής. Ο χρόνος παραμονής αποτελείται από το χρόνο σταθεροποίησης που ακολουθείται από το χρόνο συλλογής δεδομένων. Κατά τη διάρκεια του χρόνου απόκτησης δεδομένων (δηλ. 30 sec.) γίνεται δειγματοληψία της τάσης της κυψέλης, καταγράφεται και στη συνέχεια υπολογίζεται ο μέσος όρος όλων των δειγμάτων τιμής τάσης (V_i). Στη συνέχεια, η μέση τάση (V_{avg}) χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της καμπύλης πόλωσης. Για να δοθεί η ακρίβεια των μετρήσεων κατά την εκτέλεση της δοκιμής, συνιστάται ο σχεδιασμός ράβδων σφάλματος. Οι ράβδοι σφαλμάτων βασίζονται στην Τυπική Απόκλιση που υπολογίζεται σύμφωνα με τον οδηγό ISO/IEC 98-:1998, Αβεβαιότητα μέτρησης – Μέρος 3: Οδηγός για την έκφραση της αβεβαιότητας στη μέτρηση (GUM) V_{stdev} που υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_{stdev} = \sqrt{\left(\frac{1}{m-1} * \sum_{i=0}^{m-1} (V_i - V_{avg})^2\right)}$$

Όπου

V_i : οι τιμές που μετρήθηκαν

V_{avg} : η μέση τιμή των μετρήσεων

m : μέγεθος δείγματος της μεταβλητής V_i