

**ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ H<sub>2</sub>O (PEM ELECTROLYSER) ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ, ΩΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΓΕΝΝΩΜΕΝΗΣ ΚΥΨΕΛΙΔΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

**Σ. Νεοφυτίδης<sup>1</sup>, Δ.Κ. Νιάκοιλας<sup>1, \*</sup>, Φ. Παλούκης<sup>1</sup>, Φ. Ζαραβέλης<sup>1,2</sup>, Κ. Βαγενάς<sup>2</sup>,  
Α. Κατσαούνης<sup>2</sup>, M. Schautz<sup>3</sup>, B. Buegler<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Ινστιτούτο Επιστημών Χημικής Μηχανικής (ΙΕΧΜΗ)/ ΙΤΕ

<sup>2</sup> Τμήμα Χημικών Μηχανικών/Πανεπιστήμιο Πατρών

<sup>3</sup> European Space Research and Technology Centre (ESTEC)/ ESA

(\*[niakolas@iceht.forth.gr](mailto:niakolas@iceht.forth.gr))

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Οι αναγεννώμενες κυψέλες καυσίμου αποτελούν μια ολοκληρωμένη τεχνολογία αποθήκευσης και παραγωγής ενέργειας με πλεονεκτήματα που την καθιστούν ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα σε εφαρμογές, όπου απαιτείται αυτονομία και κυρίως μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα (Wh/kg). Συνολικά πρόκειται για ένα κλειστό, αυτόνομο και αυτοσυντηρούμενο σύστημα, που παράγει ενέργεια με μηδενικούς ρύπους, μεγάλο ωφέλιμο χρόνο ζωής και υψηλή προσαρμοστικότητα σε διαφορετικές ενεργειακές απαιτήσεις. Για τους λόγους αυτούς αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για εφαρμογή σε απομονωμένο ή ειδικό κλειστό περιβάλλον, όπως η χρήση σε διαστημικές και επίγειες εφαρμογές.

Η παρούσα μελέτη εστιάζει στην ανάπτυξη συστοιχίας ηλεκτρόλυσης νερού σε υψηλή πίεση (High Pressure PEM Electrolyser), ως μέρος ενός συστήματος αναγεννώμενης κυψέλης καυσίμου για την παραγωγή ενέργειας. Το συνολικό σύστημα προορίζεται για τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους στα πλαίσια έρευνας για τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA). Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει δύο συστοιχίες τύπου πολυμερικής μεμβράνης, όπου η μία προορίζεται για ηλεκτρόλυση H<sub>2</sub>O και αποθήκευση H<sub>2</sub> και O<sub>2</sub> υπό πίεση, και η άλλη για την παραγωγή ενέργειας (κυψέλη καυσίμου).

Η συστοιχία ηλεκτρόλυσης (1.5 kW) που αναπτύσσεται, βασίζεται σε τεχνολογία εμπορικής πολυμερικής μεμβράνης χαμηλής θερμοκρασίας (T≤80°C) της εταιρείας FumaTech. Η πολυμερική μεμβράνη μαζί με τα ηλεκτρόδια και τα υπόλοιπα υλικά αποτελούν μια μοναδιαία διάταξη (Membrane Electrode Assembly: MEA) ηλεκτρόλυσης. Η μελέτη των βέλτιστων συνδυασμών υλικών (ηλεκτροκαταλυτών, στρωμάτων διάχυσης αερίων/νερού, διπολικών πλακών, υλικών στεγανοποίησης, σχεδιασμού του αντιδραστήρα κ.λπ.), καθώς και η σύντομη λειτουργία, υπό πίεση, σε ένα (1) MEA (5x5 cm<sup>2</sup>) έχουν δημοσιευτεί σε προηγούμενη μελέτη<sup>[1]</sup>.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα πρώτα αποτελέσματα αναφορικά με την κλιμάκωση μεγέθους, κατασκευή και λειτουργία, υπό συνθήκες πίεσης (1 – 80 bar), μίας συστοιχίας (High Pressure PEM Electrolyser stack) τριών (3) MEAs (70 W στα 4.8 V με ηλεκτρική απόδοση 92.5%), ενεργού επιφάνειας 7x7 cm<sup>2</sup>. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε ποσοτικός έλεγχος των αερίων που παράγονται (H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>) μέσω φασματογράφου μάζας, καθώς επίσης και η έκταση της πιθανής διάχυσης του παραγόμενου H<sub>2</sub>, π.χ. διαμέσου της μεμβράνης ηλεκτρολύτη ή λόγω προβληματικής στεγανοποίησης των επιμέρους MEAs, προς το διαμέρισμα παραγωγής O<sub>2</sub> (άνοδος). Στόχος είναι να προσδιοριστούν οι λόγοι πιθανής διάχυσης H<sub>2</sub> και η τελευταία να μειωθεί στο ελάχιστο, ώστε να κυμαίνεται εντός των θεωρητικών ορίων ασφαλείας. Παράλληλα, έγινε έλεγχος σταθερότητας της συστοιχίας σε συνθήκες λειτουργίας υπό υψηλή πίεση.

Σε συνέχεια της παραπάνω μελέτης προχώρησε η κλιμάκωση μεγέθους και κατασκευάστηκε συστοιχία ηλεκτρόλυσης με πέντε (5) MEAs (135 W στα 8 V με ηλεκτρική απόδοση 92.5%), στην οποία εφαρμόστηκαν οι παραπάνω μέθοδοι ταυτοποίησης των αερίων και μελετήθηκε η λειτουργία/σταθερότητα υπό συνθήκες πίεσης. Η τρέχουσα έρευνα επικεντρώνεται σε δοκιμές και μετρήσεις για την ανάπτυξη μιας συστοιχίας ηλεκτρόλυσης με δέκα (10) MEAs (250 W στα 16 V με ηλεκτρική απόδοση 92.5%), έχοντας ως τελικό στόχο τις σαράντα (40). Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι η πρώτη φορά που αναφέρεται η λειτουργία μία τέτοιας συστοιχίας (δηλ., μικρού όγκου και

βάρους με Technology Readiness Level, TRL = 5) για την ηλεκτρόλυση H<sub>2</sub>O και την ταυτόχρονη συμπίεση του παραγόμενου H<sub>2</sub> και O<sub>2</sub> σε εύρος πιέσεων από 1 – 80 bar.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι συνθήκες λειτουργίας είναι ο καθοριστικός παράγοντας της απόδοσης ενός PEM κελιού ηλεκτρόλυσης. Συνοπτικά, αυξανόμενης της θερμοκρασίας, απαιτείται λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια για την διάσπαση του νερού. Στην περίπτωση όπου η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 80 °C, η διατήρηση της υγρής φάσης του νερού είναι εφικτή μόνο στην περίπτωση όπου το κελί ηλεκτρόλυσης λειτουργεί υπό πίεση. Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία του κελιού υπό υψηλή πίεση επιτρέπει την ταυτόχρονη συμπίεση και/ή ξήρανση των παραγόμενων αερίων (H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>), εξαλείφοντας έτσι την προσθήκη ενός εξωτερικού συστήματος συμπίεσης και αυξάνοντας την απόδοση του συστήματος. Η χρήση όμως μίας τέτοιας μονάδας ηλεκτροχημικής συμπίεσης εγείρει θέματα ασφάλειας, τα οποία οφείλονται κυρίως στις υψηλές πιέσεις των αερίων. Για παράδειγμα παρατηρείται αυξημένη διάχυση των αερίων μέσω της μεμβράνης<sup>[2]</sup>, ενώ ένα ακόμα σημαντικό ζήτημα προκύπτει στις υψηλές πυκνότητες ρεύματος (π.χ. 2 A cm<sup>-2</sup> και υψηλότερα). Συγκεκριμένα, αυξάνεται η διάχυση του υγρού νερού μέσω της μεμβράνης προς την πλευρά του H<sub>2</sub>. Συνεπώς, τα ζητήματα που αφορούν στην διαχείριση μεταφοράς μάζας είναι πολύ σημαντικά για την σωστή, αποτελεσματική και μακροχρόνια λειτουργία του κελιού ηλεκτρόλυσης υψηλής πίεσης. Τέλος, ένας ακόμα παράγοντας, άμεσα σχετιζόμενος με την λειτουργία της μονάδας, είναι και η σταδιακή υποβάθμιση των στοιχείων ηλεκτρόλυσης.

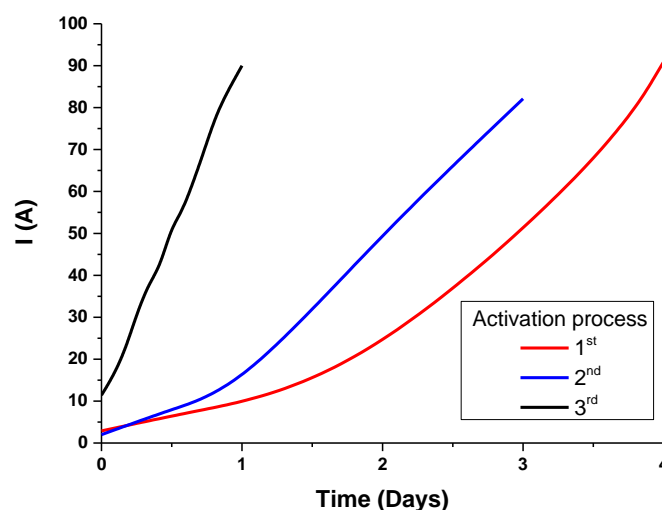
Η παρουσιαζόμενη εφαρμογή της ηλεκτροχημικής διάσπασης H<sub>2</sub>O, με ταυτόχρονη συμπίεση των παραγόμενων αερίων μέσω της συστοιχίας ηλεκτρόλυσης, παρουσιάζει πλεονεκτήματα τόσο στην απόδοση όσο και στο κόστος της συνολικής εγκατάστασης, σε σύγκριση με την ηλεκτρόλυση που συνδυάζεται με εξωτερική μηχανική συμπίεση των παραγόμενων αερίων. Στην περίπτωση της ηλεκτρόλυσης σε συνθήκες χαμηλής πίεσης, το παραγόμενο H<sub>2</sub> πρέπει να υποστεί διεργασίες ξήρανσης, με στόχο την πλήρωση των προδιαγραφών καθαρότητας. Κατά την ηλεκτρόλυση υψηλής πίεσης μειώνεται η περιεκτικότητα σε νερό στα παραγόμενα αέρια<sup>[2]</sup>. Συνεπώς, απαιτείται μικρότερη κατανάλωση ενέργειας για την πλήρη απομάκρυνση του και κατά συνέπεια μειώνεται το κόστος της συνολικής διεργασίας. Επίσης, η λειτουργία της συστοιχίας υπό υψηλή πίεση μειώνει την ενέργεια που απαιτείται για την συμπίεση και αποθήκευση των παραγόμενων αερίων.

Σήμερα, οι εμπορικά διαθέσιμες μονάδες ηλεκτρόλυσης H<sub>2</sub>O παράγουν H<sub>2</sub> και O<sub>2</sub> σε πιέσεις αερίων μεταξύ 30 – 50 bar. Παρόλ' αυτά, έχουν υπάρξει αναφορές άμεσης ηλεκτροχημικής συμπίεσης σε PEM κελιά ηλεκτρόλυσης στα 700 bar όπως στη περίπτωση της Honda<sup>[3]</sup> και σε άλλες αναφορές με λειτουργίες από 10 έως 130 bar<sup>[4]</sup>.

Η συμπίεση αερίου στις περιπτώσεις μηδενικής διαφορικής (ή εξισορροπημένης) πίεσης φαίνεται να είναι ενεργειακά οικονομική. Αναφορικά με την απόδοση όμως, η διάχυση των αερίων αυξάνει με την αύξηση της πίεσης και μειώνεται η φαρανταϊκή απόδοση, ειδικά στις περιπτώσεις χαμηλών πυκνοτήτων ρεύματος. Συγκεκριμένα, η διάχυση ρευστών στις PEM κυψελίδες ηλεκτρόλυσης θεωρείται ως ένα σημαντικό ζήτημα, το οποίο μελετάται συστηματικά εδώ και μερικά χρόνια<sup>[8]</sup>, και φαίνεται να επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις. Η πρώτη σχετίζεται με τη μείωση της απόδοσης των κυψελίδων. Η επόμενη σχετίζεται με την σταδιακή τους υποβάθμιση, ενώ μία ακόμα αφορά το κατώτατο όριο έκρηξης. Ιδιαίτερα στην τελευταία περίπτωση, έχει καθοριστεί ότι η ποσότητα H<sub>2</sub> μέσα στον θάλαμο του O<sub>2</sub> (άνοδος) δεν πρέπει να ξεπερνάει το 4 mol%<sup>[10]</sup>. Η τιμή αυτή είναι γενικά δύσκολο να διατηρηθεί, ειδικά σε χαμηλές πυκνότητες ρεύματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις η καταλληλότερη λύση είναι η χρήση καταλυτικών στρωμάτων, που επιταχύνουν την αντίδραση του διαχωσμένου H<sub>2</sub> με το παραγόμενο O<sub>2</sub><sup>[9]</sup>. Τέλος, οι περισσότερες από τις μελέτες διάχυσης έχουν γίνει με χρήση μεμβρανών Nafion®, οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά κανόνα σε κελιά ηλεκτρόλυσης και καυσίμου τύπου PEM χαμηλής θερμοκρασίας (80 °C).

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Μια σημαντική διεργασία για την κατασκευή και λειτουργία του συστήματος ηλεκτρόλυσης υψηλής πίεσης είναι η ενεργοποίηση των MEAs. Αυτό το βήμα είναι κρίσιμο διότι τα MEAs στην αρχική τους κατάσταση δεν είναι πλήρως λειτουργικά. Ο στόχος λειτουργίας της συστοιχίας ηλεκτρόλυσης έχει οριστεί (από την ESA) στα 1.6 V ανά MEA (ηλεκτρική απόδοση 92.5%) με πυκνότητα ρεύματος τουλάχιστον  $0.3 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Συνεπώς, απαιτείται μια διαδικασία ενεργοποίησης, η οποία έως τώρα πραγματοποιείται ξεχωριστά για κάθε μοναδιαία διάταξη. Πιο συγκεκριμένα, κάθε MEA τοποθετείται ανάμεσα στις επιτελικές πλάκες (bipolar plates) και υγρό νερό τροφοδοτείται στην άνοδο. Πραγματοποιείται ποτενσιοστατική πόλωση με το δυναμικό να ορίζεται στα 1.8 V και την θερμοκρασία να ανεβαίνει σταδιακά μέχρι τους 80 °C. Με αυτό το τρόπο κάθε MEA ενεργοποιείται σταδιακά και το ρεύμα να αυξάνεται, έως ότου η τιμή αυτού πλησιάσει τα 100 A σε δυναμικό 2.3 V. Υπάρχουν δύο περιοριστικοί παράγοντες, οι οποίοι κάνουν την όλη διεργασία χρονοβόρα. Ο πρώτος παράγοντας είναι ότι κάθε φορά μπορεί να ενεργοποιηθεί μόνο ένα MEA, ενώ ο δεύτερος αφορά τον χρόνο ενεργοποίησης. Αναφορικά με τον πρώτο παράγοντα, έχουν υπάρξει προσπάθειες ταυτόχρονης ενεργοποίησης περισσοτέρων του ενός MEA, με τα αποτελέσματα να μην είναι ικανοποιητικά λόγω της ανομοιογενούς ενεργοποίησης της κάθε συστοιχίας μεμβρανών. Αναφορικά με το δεύτερο παράγοντα, έχουν πραγματοποιηθεί πολλαπλές προσπάθειες μείωσης του χρόνου ενεργοποίησης οι οποίες έδωσαν θετικά αποτελέσματα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.

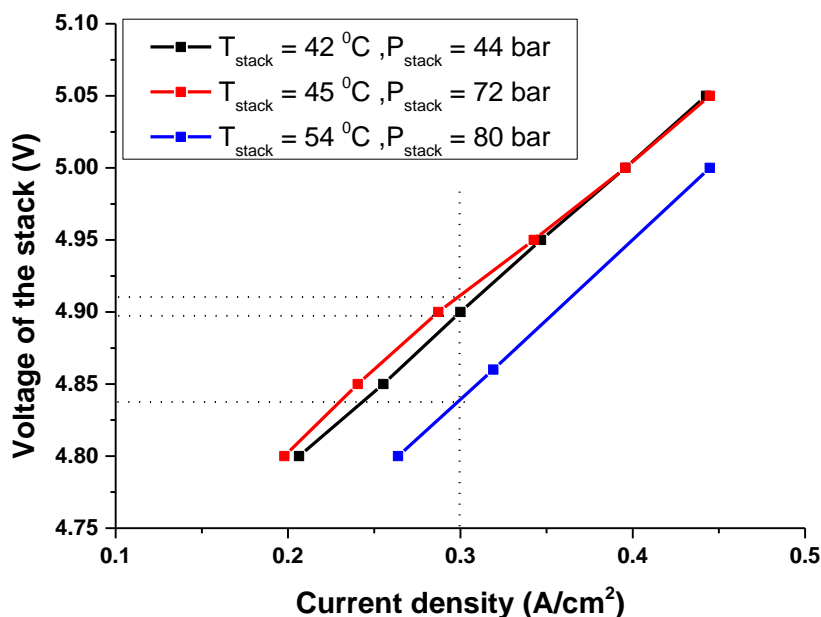


**Σχήμα 1.** Προφίλ της μειωμένης χρονικής διάρκειας για την ενεργοποίηση σε διαφορετικά MEAs

Στη περίπτωση όπου δεν επιβάλλεται εξωτερική θέρμανση, παρατηρείται ότι με αύξηση της πίεσης λειτουργίας έως 80 bar υπάρχει και αύξηση στην απόδοση του κελιού, το οποίο αποδίδεται στην ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2. Συνεπώς, ενώ κάποιος θα περίμενε μείωση της απόδοσης με αύξηση της πίεσης λειτουργίας, η παράλληλη αύξηση της θερμοκρασίας, κυρίως από ωμικές υπερτάσεις, υπερισχύει της θερμοδυναμικής επίδρασης καθώς αυξάνει την κινητική των αντιδράσεων.

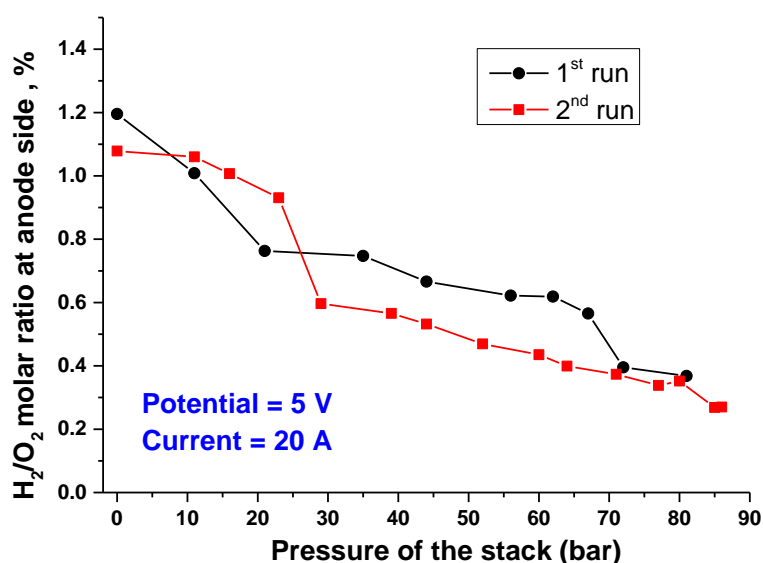
**Πίνακας 1.** Τιμές δυναμικού με αύξηση της πίεσης λειτουργίας υπό σταθερή πυκνότητα ρεύματος χωρίς εξωτερική θέρμανση

Pressure (bar)	Potential (V)(per MEA)	Current density (A/cm <sup>2</sup> )
44	4.90 (1.63)	0.3
72	4.91 (1.64)	0.3
80	4.84 (1.61)	0.3



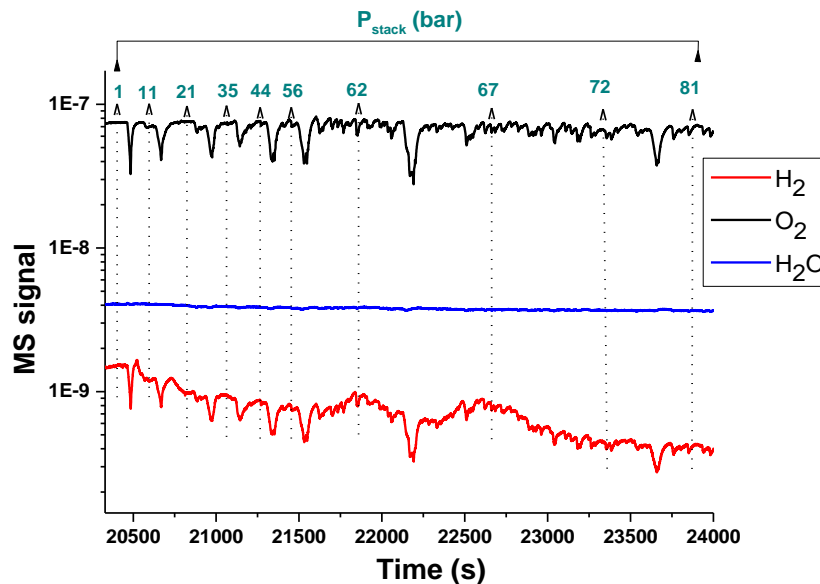
**Σχήμα 2.** Καμπύλες δυναμικού-πυκνότητας ρεύματος της συστοιχίας τριών MEAs χωρίς εξωτερική θέρμανση

Η συμπεριφορά της συστοιχίας ηλεκτρόλυσης ελέγχθηκε και με την χρήση φασματογράφου μάζας (MS), ο οποίος ήταν συνδεδεμένος με την έξοδο του  $O_2$ . Αυτές οι μετρήσεις έγιναν με στόχο την διερεύνηση της διάχυσης του υδρογόνου ( $H_2$  crossover) μέσω της μεμβράνης προς την άνοδο, σε διάφορες πιέσεις λειτουργίας. Μια πρώτη σειρά αποτελεσμάτων φαίνεται στο Σχήμα 3, το οποίο δείχνει το γραμμομοριακό κλάσμα  $\%H_2/O_2$  στην άνοδο για πιέσεις έως και 80 bar.



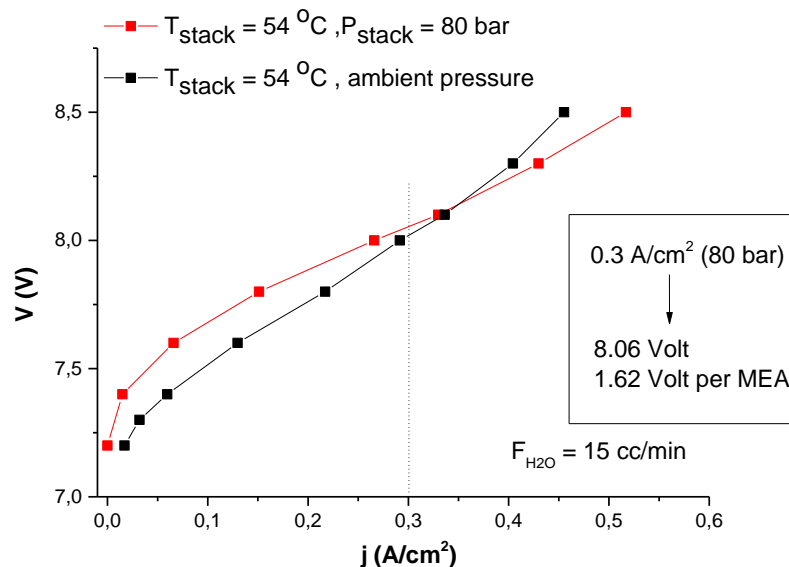
**Σχήμα 3.** Γραμμομοριακό κλάσμα του  $H_2$  στο  $O_2$  στην άνοδο με αύξηση της πίεσης λειτουργίας και σε σταθερό δυναμικό (5 V) και ρεύμα (20 A)

Η ανάλυση με φασματογράφο μάζας της τριπλής συστοιχίας ηλεκτρόλυσης  $H_2O$ , υπό συνθήκες υψηλής πίεσης, φαίνεται και στο Σχήμα 4, όπου παριστάνονται το παραγόμενο  $O_2$ , το  $H_2$  που διαχέεται από την κάθοδο μέσω της πολυμερικής μεμβράνης, όπως και το  $H_2O$  το οποίο δεν έχει μετατραπεί/ηλεκτρολυθεί. Αξίζει να σημειωθεί, για μία ακόμα φορά, η σταθερή λειτουργία της συστοιχίας με αύξηση της πίεσης λειτουργίας. Οι διάφορες κορυφές, στα σήματα των μαζών  $O_2$  και  $H_2$ , αποδίδονται σε «θόρυβο» και οφείλονται στην σταδιακή αύξηση της πίεσης και στην ταυτόχρονη εξισορρόπηση της στα δύο διαμερίσματα (Άνοδος/Κάθοδος) της συστοιχίας.



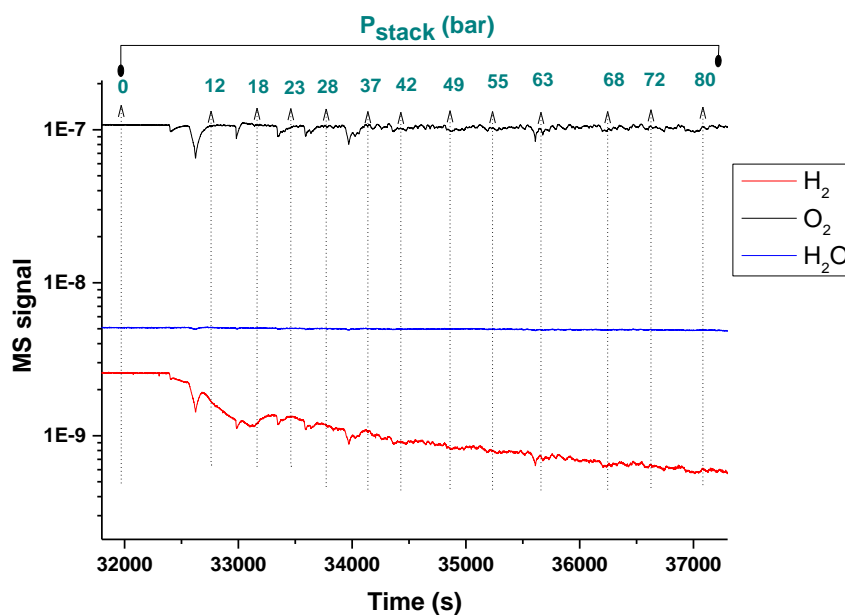
**Σχήμα 4.** Σήματα των παραγόμενων αερίων και του νερού σε φασματογράφο μάζας συνδεδεμένο με την τριπλή συστοιχία ηλεκτρόλυσης

Τα αποτελέσματα από την λειτουργία της τριπλής συστοιχίας ηλεκτρόλυσης κρίθηκαν ως πολύ ικανοποιητικά. Συνεπώς, έχοντας ως στόχο την περαιτέρω κλιμάκωση μεγέθους του συστήματος, κατασκευάστηκε συστοιχία αποτελούμενη από πέντε MEAs (5-MEA stack). Η λειτουργία της πραγματοποιήθηκε χωρίς την επιβολή εξωτερικής θέρμανσης σε πιέσεις έως και 80 bar. Από τα δεδομένα δυναμικού – πυκνότητας ρεύματος στις δύο ακραίες πιέσεις (ατμοσφαιρική και 80 bar), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5, η απόδοση της συστοιχίας είναι σχεδόν παραπλήσια.



**Σχήμα 5.** Καμπύλες δυναμικού-πυκνότητας ρεύματος της συστοιχίας πέντε MEAs χωρίς εξωτερική θέρμανση

Κατ' αντιστοιχία με την πειραματική διαδικασία της τριπλής συστοιχίας, πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις με φασματογράφο μάζας, συνδεδεμένο στην έξοδο της ανόδου, προκειμένου να διαπιστωθεί η ποσότητα του υδρογόνου που διαχύθηκε μέσω της μεμβράνης. Στο Σχήμα 6 παρατηρείται ότι το σήμα της μάζας του υδρογόνου, σε κάθε πίεση λειτουργίας της συστοιχίας, δεν έχει υψηλή τιμή. Συγκεκριμένα, η υψηλότερη τιμή του υπολογίστηκε στα 1.75 %mol H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> σε ατμοσφαιρική πίεση, ενώ με την αύξηση της πίεσης λειτουργίας, παρατηρείται σταδιακή μείωση της συγκέντρωσης H<sub>2</sub> λόγω διάχυσης.



**Σχήμα 6.** Σήματα των παραγόμενων αερίων και του νερού σε φασματογράφο μάζας συνδεδεμένο με την πενταπλή συστοιχία ηλεκτρόλυσης

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η απόδοση της τριπλής συστοιχίας ηλεκτρόλυσης υπό πίεση αγγίζει την απαιτούμενη ελάχιστη πυκνότητα ρεύματος των  $0.3 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  σε δυναμικό 4.88 V, ενώ η πενταπλή συστοιχία επιτυγχάνει αυτή την λειτουργία στα 8.06 V. Σε κάθε περίπτωση, η απόδοση βρίσκεται κοντά στο 92%, κάτι που είναι πολύ ικανοποιητικό στο επίπεδο της παρουσιαζόμενης συστοιχίας με TRL=5. Παράλληλα, μετρήσεις για τη διάχυση του  $\text{H}_2$  διαμέσου της πολυμερικής μεμβράνης; έδειξαν ότι σε κάθε πίεση λειτουργίας, το % γραμμομοριακό κλάσμα  $\text{H}_2/\text{O}_2$  στο διαμέρισμα του οξυγόνου δεν ξεπέρασε το όριο ασφαλείας των 2 mol%<sup>[10]</sup>, ενώ η τιμή του στα 80 bar ήταν ιδιαίτερα χαμηλή (0.3 mol%).

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] D.K. Niakolas, S. Neophytides, C.G. Vayenas, A. Katsaounis, N. Athanasopoulos, S. Balomenou, K.M. Papazisi, D. Tsiplakides, M. Schautz, 11th European Space Power Conference (ESPC-2016), Vol: B03-Electrochemical components.
- [2] U. Babić, M. Suermann, F. Buchl and L. Gubler, "Review: Identifying Critical Gaps for Polymer Electrolyte Water Electrolysis Development," *Journal of The Electrochemical Society*, no. 164 (4), pp. 387-399, 2017.
- [3] E. Ishikawa, N. Kawasaki and H. Daimon, *Honda R&D Technical Review*, 28.1 ed., Honda, 2016.
- [4] F. Marangio, M. Santarelli, M. Pagani and M. Calì Quagli, "Direct High Pressure Hydrogen Production: A Laboratory Scale PEM Electrolyser Prototype," *ECS Transactions*, no. 17, pp. 555-567, 2009.
- [5] P. Millet, R. Ngameni, S. Grigoriev, N. Mbemba, F. Brisset, A. Ranjabari and C. Etievant, "PEM water electrolyzers: From electrocatalysis to stack development," *International Journal of Hydrogen Energy*, no. 35, pp. 5043-5052, 2010.
- [6] K. Kokoh, E. Mayousse, N. Napporn, K. Servat, N. Guillet, E. Soyeze, A. Grosjean, A. Rakotondrainibe and J. Paul-Joseph, "Efficient multi-metallic anode catalysts in a PEM water electrolyzer," *International Journal of Hydrogen Energy*, no. 39, pp. 1924-1931, 2014.
- [7] K. Onda, T. Kyakuno, K. Hattori and K. Ito, "Prediction of production power for high-pressure hydrogen by high-pressure water electrolysis," *Journal of Power Sources*, no. 132, pp. 64-70, 2004.
- [8] V. Sethuraman, J. Weidner, A. Haug and L. Protsailo, "Durability of perfluorosulfonic acid and hydrocarbon membranes: effect of humidity and temperature," *Journal of Electrochemical Society*, no. 155, pp. 119-124, 2008.
- [9] P. Trinke, B. Bensmann, S. Reichstein, R. Hanke-Rauschenbach and K. Sundmacher, "Hydrogen Permeation in PEM Electrolyzer Cells Operated at Asymmetric Pressure Conditions," *Journal of The Electrochemical Society*, no. 163, pp. 3164-3170, 2016.
- [10] M. Carmo, D. Fritz, J. Mergel and D. Stolten, "A comprehensive review on PEM water electrolysis," *International Journal of Hydrogen Energy*, no. 38, pp. 4901-4934, 2013.
- [11] M. Schalenbach, M. Carmo, D. Fritz, J. Mergel and D. Stolten, "Pressurized PEM water electrolysis: Efficiency and gas crossover," *International Journal of Hydrogen Energy*, no. 38, pp. 14921-14933, 2013.