

ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ ΤΥΠΟΥ ΣΤΕΡΕΟΥ ΟΞΕΙΔΙΟΥ ΣΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Ν. Μπιμπήρη^{1,2}, Μ.Ε. Φαρμάκη¹, Κ.Μ. Παπαζήση¹, Σ. Μπαλωμένου¹, Δ. Τσιπλακίδης^{1,2*}

¹ Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών & Ενεργειακών Πόρων/ ΕΚΕΤΑ, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

² Τμήμα Χημείας, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

(*dtsiplak@cperi.certh.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η δυνατότητα των διατάξεων ηλεκτρόλυσης τύπου στερεού οξειδίου (Solid Oxide Electrolysis Cells, SOECs) να μετατρέπουν απευθείας την ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ απευθείας σε χημική ενέργεια έχει προκαλέσει το παγκόσμιο ενδιαφέρον για την παραγωγή ‘καθαρής’ ενέργειας. Μέσω της ηλεκτρόλυσης H₂O ή/και CO₂ στις διατάξεις SOEC, παράγεται H₂ ή/και αέριο σύνθεσης (μίγμα CO και H₂). Προς την κατεύθυνση αυτή και στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετήθηκε η σταθερότητα των διατάξεων αυτών τόσο σε σταθερή, όσο και δυναμική λειτουργία. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκαν μοναδιαίες διατάξεις τύπου SOEC χρησιμοποιώντας ως ηλεκτρολύτη δισκία ζirkονίας ενισχυμένη με ύτρια (8% mol YSZ) με δύο διαφορετικά πάχη, 1.5 mm και 300 μm. Σε κάθε περίπτωση, ως ανοδικό και καθοδικό ηλεκτρόδιο χρησιμοποιήθηκε εμπορικά διαθέσιμο μίγμα LSM-YSZ και το περοβσκιτικό υλικό La_{0.75}Sr_{0.25}Cr_{0.9}Fe_{0.1}O_{3-δ} (LSC-Fe) που συντέθηκε με την τροποποιημένη μέθοδο sol-gel με κιτρικό οξύ, αντίστοιχα. Τα πειράματα σταθερότητας τόσο κατά την ηλεκτρόλυση H₂O, όσο και κατά τη συνδυασμένη ηλεκτρόλυση H₂O-CO₂ είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά καθώς οι διατάξεις εμφάνισαν αξιόλογη σταθερότητα και απόδοση, ιδιαίτερα κατά τις πρώτες 200 h λειτουργίας, που συνήθως εμφανίζεται η μεγαλύτερη υποβάθμιση στις διατάξεις αυτές. Από εικόνες SEM που ελήφθησαν στις διατομές των καθοδικών ηλεκτροδίων των διατάξεων αυτών με το πέρας των πειραμάτων σταθερότητας, δεν παρατηρήθηκε μεταβολή της δομής τους γεγονός που ερμηνεύει τη σταθερή τους απόδοση.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δυνατότητα εκμετάλλευσης της περίσσειας ανανεώσιμης ενέργειας (ΑΠΕ) καθώς και των εκπομπών CO₂ από τις διατάξεις ηλεκτρόλυσης SOEC έχει κατευθύνει την παγκόσμια ερευνητική κοινότητα προς την τεχνολογία αυτή τόσο για την παραγωγή ενέργειας, όσο και για την αξιοποίηση και μείωση των αέριων ρύπων. Το υδρογόνο αποτελεί ένα καθαρό καύσιμο, υψηλής προστιθέμενης αξίας, ενώ το αέριο σύνθεσης μια δομική μονάδα για την παραγωγή μιας σειράς χρήσιμων χημικών και καυσίμων (μέσω της διεργασίας Fischer-Tropsch). Η διάταξη ηλεκτρόλυσης SOEC είναι όμοια με μία Κυψέλη Καυσίμου Στερεού Οξειδίου (SOFC) με αντίστροφη όμως λειτουργία. Πιο συγκεκριμένα, στο ηλεκτρόδιο καυσίμου, όπου πραγματοποιούνται οι αντιδράσεις ηλεκτρόλυσης (1) και (2):



και κυρίως η καταλυτική αντίδραση Reverse Water Gas Shift (3):



τα υλικά που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από υψηλή ηλεκτρονική αγωγιμότητα και ηλεκτροκαταλυτική ενεργότητα, ιδανικό πορώδες και ιοντική αγωγιμότητα, συμβατότητα με τα υπόλοιπα υλικά και τέλος από υψηλή θερμομηχανική σταθερότητα. Λόγω της χαμηλότερης τεχνολογικής ωριμότητας των SOECs έναντι των SOFCs, τα υλικά που χρησιμοποιούν οι πρώτες, χρήζουν περαιτέρω μελέτης και βελτιστοποίησης προκειμένου να υποστηρίξουν μια αποδοτική και σταθερή λειτουργία. Τα υλικά περοβσκιτικής δομής που είναι μικτοί αγωγοί αποτελούν ελπιδοφόρα επιλογή καθώς δεν περιέχουν ελεύθερο μεταλλικό νικέλιο στη δομή τους

και επομένως δεν απαιτείται η τροφοδοσία υδρογόνου για να παραμείνουν ανηγμένα και επομένως αγωγίμα, ενώ παρουσία υγρασίας και ανθρακικών ενώσεων εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή και σταθερότητα, σε αντίθεση με το state-of-the-art κεραμομεταλλικό μίγμα Ni-YSZ. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η απόδοση και η σταθερότητα του χρωμίτη λανθανίου - στροντίου υποκατεστημένου με Fe στη Β-θέση ως ηλεκτρόδιο καυσίμου στις ηλεκτρολύσεις ατμού και ταυτόχρονης ηλεκτρόλυσης ατμού- CO₂.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Χρησιμοποιώντας ως καθοδικό ηλεκτρόδιο το περοβσκιτικό υλικό της μορφής La_{0.75}Sr_{0.25}Cr_{0.9}Fe_{0.1}O_{3-δ} (LSCFe)^[1], αναπτύχθηκαν μοναδιαίες διατάξεις (button cells) οι οποίες μελετήθηκαν τόσο ως διατάξεις ηλεκτρόλυσης H₂O, όσο και ταυτόχρονης ηλεκτρόλυσης H₂O και CO₂. Ως ηλεκτρολύτες χρησιμοποιήθηκαν δισκία YSZ πάχους 1.5±0.5 mm (CoorsTek) και 300±30 μm (Kerafol). Στην περίπτωση αυτή μεταξύ ηλεκτροδίου και ηλεκτρολύτη αναπτύχθηκε και ένα λεπτό στρώμα CGO (Gd_{0.20}Ce_{0.80}O_{1.95}), το οποίο αυξάνει την διαθέσιμη τριεπιφάνεια αερίου-ηλεκτροδίου-ηλεκτρολύτη. Για τη συλλογή του καθοδικού ρεύματος χρησιμοποιήθηκε στρώμα λευκοχρύσου (Pt ink, Fuel Cell Materials). Ως ηλεκτρόδιο ανόδου, σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιήθηκε LSM-YSZ (ink, Fuel Cell Materials, 50/50 % κ.β.) και LSM (ink, Fuel Cell Materials) για τη συλλογή του ρεύματος. Τα ηλεκτρόδια τόσο της ανόδου, όσο και της καθόδου αναπτύχθηκαν μέσω της τεχνικής εναπόθεσης με τελάρο (screen printing, STV, mesh 40 μm) με επιφάνεια ~1.76 cm² (d=15 mm). Ακολούθησε πυροσυσσωμάτωση: α) για το CGO στους 1350°C για 5h, β) για το LSCFe στους 1200°C για 3h, γ) για το LSM/LSM-YSZ στους 1150°C για 2h και δ) για τον Pt στους 1000°C για 1h. Με βάση τα παραπάνω αναπτύχθηκαν δύο διατάξεις ηλεκτρόλυσης με τα παρακάτω χαρακτηριστικά και φορτίσεις:

[1] LSCFe (10 mg cm⁻²)/CGO (10 mg cm⁻²)/YSZ (πάχος 1.5 mm)//LSM-YSZ/LSM (12 mg cm⁻²)

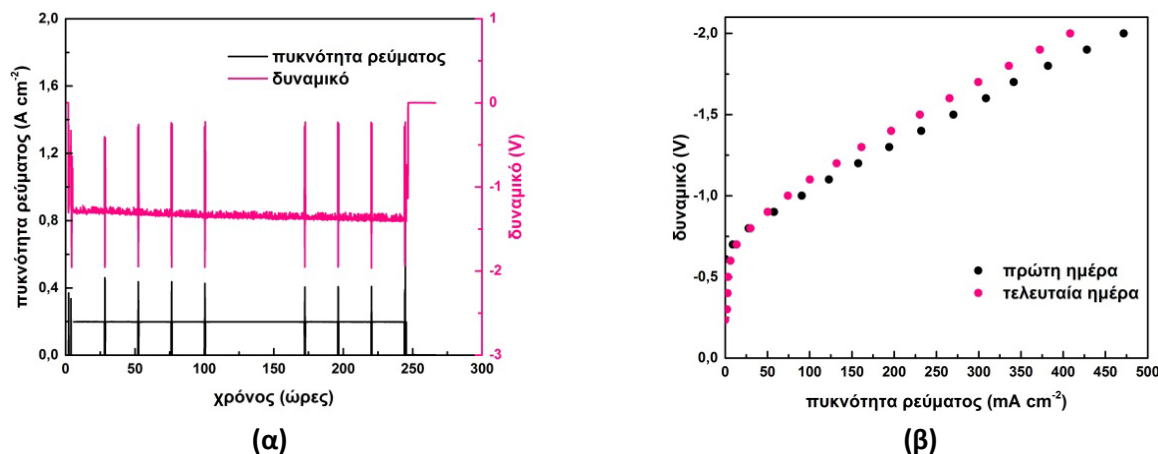
[2] LSCFe (10 mg cm⁻²)/CGO (10 mg cm⁻²)/YSZ (πάχος 300 μm)//LSM-YSZ/LSM (11 mg cm⁻²)

Ο ηλεκτροχημικός χαρακτηρισμός και η αξιολόγηση των διατάξεων τόσο κατά τη λειτουργία της ηλεκτρόλυσης H₂O, όσο και της ταυτόχρονης ηλεκτρόλυσης H₂O-CO₂ πραγματοποιήθηκε σε συσκευή μέτρησης ProboStatTM (NorECs). Η συσκευή αποτελείται από δύο θαλάμους, εσωτερικό (καθοδικό) και εξωτερικό (ανοδικό), οι οποίοι είναι αεροστεγείς και μπορούν να τροφοδοτούνται με διαφορετικές συστάσεις. Για τις ηλεκτροχημικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ένας γαλβανοστάτης/ποτενσιοστάτης (Autolab PGSTAT302N, Metrohm) με ενσωματωμένο αναλυτή παραγωγής συχνότητας (FRA32M) για μέτρηση των εμπεδήσεων (Electrochemical Impedance Spectroscopy) και ένας γαλβανοστάτης/ ποτενσιοστάτης PAR (263A). Η μορφολογία και η δομή των ηλεκτροδίων καθώς και οι διεπιφάνειες ηλεκτροδίων-ηλεκτρολύτη μελετήθηκαν με ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης, σε συνδυασμό με ένα σύστημα ανίχνευσης ενεργειακής διασποράς ακτίνων X (X-ray energy dispersion) για ποσοτική στοιχειακή ανάλυση. Οι αναλύσεις SEM/EDS διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Ανάλυσης και Χαρακτηρισμού Στερεών του ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ με χρήση Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης JEOL 6300 εξοπλισμένου με Oxford ISIS 2000 X-ray EDS για στοιχειακή και ποσοτική ανάλυση.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Την τοποθέτηση της κάθε διάταξης στον αντιδραστήρα ακολούθησε η σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας στη θερμοκρασία λειτουργίας παρουσία αραιού μίγματος υδρογόνου (5% H₂/He). Στη συνέχεια, η διάταξη [1] μελετήθηκε σε λειτουργία ηλεκτρόλυσης ατμού με συγκέντρωση 23.5% στους 900°C υπό σταθερή πυκνότητα ρεύματος $i=200 \text{ mA cm}^{-2}$ για περισσότερες από 200 ώρες, ενώ η διάταξη [2] μελετήθηκε στους 800°C σε συνθήκες ταυτόχρονης ηλεκτρόλυσης H₂O-CO₂ (δυσ διαφορετικών συγκεντρώσεων) υπό σταθερή πυκνότητα ρεύματος 150 mA cm⁻². Η απουσία του υδρογόνου από το μίγμα τροφοδοσίας αποτελεί χαρακτηριστικό της μελέτης της συμπεριφοράς και των δυο διατάξεων, σε σταθερή λειτουργία.

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται για την διάταξη [1]: (α) η συμπεριφορά σε λειτουργία ηλεκτρόλυσης ατμού 23.5% H₂O στους 900 °C υπό σταθερή πυκνότητα ρεύματος $i=200 \text{ mA cm}^{-2}$ σε συνάρτηση με το χρόνο και (β) οι χαρακτηριστικές καμπύλες πυκνότητας ρεύματος – δυναμικού (iV) που κατεγράφησαν κατά την πρώτη και τελευταία ημέρα λειτουργίας. Η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος σε τιμή δυναμικού 2 V ήταν 472 mA cm^{-2} .



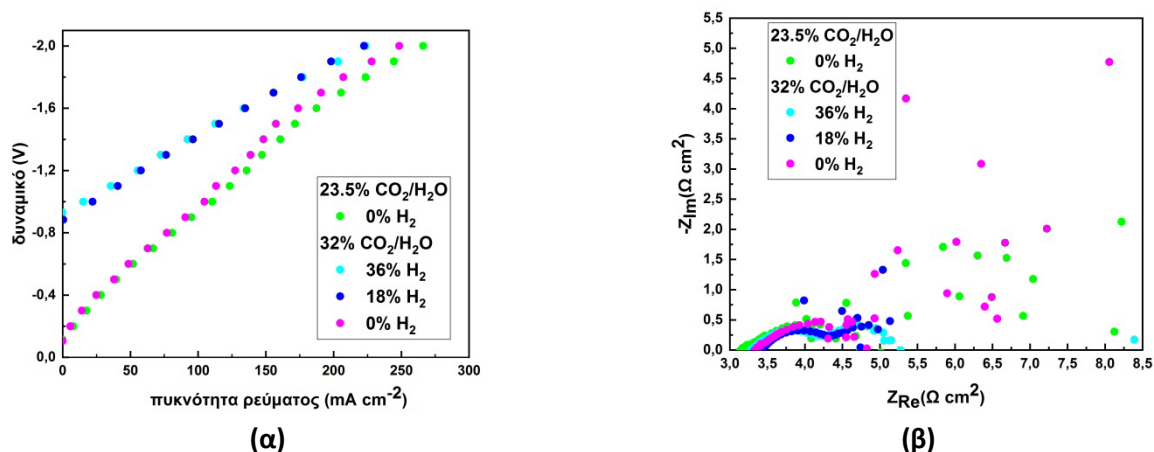
Σχήμα 1. (α) Καταγραφή πυκνότητας ρεύματος και δυναμικού σε συνάρτηση με το χρόνο κατά τη λειτουργία ηλεκτρόλυσης ατμού 23.5% H₂O στους 900°C υπό σταθερή πυκνότητα ρεύματος $i=200 \text{ mA cm}^{-2}$ και (β) Χαρακτηριστικές καμπύλες πυκνότητας ρεύματος – δυναμικού (iV), κατά την πρώτη και τελευταία ημέρα λειτουργίας σε διάταξη με πάχος ηλεκτρολύτη YSZ: 1.5 mm και ηλεκτρόδιο καθόδου: LSC-Fe

Όπως παρατηρείται από τα παραπάνω διαγράμματα, η διάταξη επιδεικνύει ικανοποιητική σταθερότητα. Ο ρυθμός υποβάθμισης είναι υψηλός τις πρώτες 120 ώρες λειτουργίας, ενώ επιβραδύνεται αισθητά στη συνέχεια, κάτι το οποίο είναι χαρακτηριστικό για τις διατάξεις αυτού του τύπου όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφία^[2]. Έτσι, ο ρυθμός υποβάθμισης υπολογίζεται ίσος με 0.64 mV h^{-1} και το ποσοστό υποβάθμισης 6% κατά τις πρώτες 120 ώρες, ενώ στη συνέχεια περιορίζεται σε 0.2 mV h^{-1} και 1.75%, αντίστοιχα. Ο συνολικός ρυθμός υποβάθμισης υπολογίζεται ίσος με 0.42 mV h^{-1} και το ποσοστό υποβάθμισης 7.8%.

Η μορφή των καμπυλών iV είναι χαρακτηριστική για τη λειτουργία ηλεκτρόλυσης H₂O, απουσία H₂ σε υψηλή θερμοκρασία, ακολουθώντας μια σχεδόν γραμμική συμπεριφορά για το μεγαλύτερο εύρος δυναμικών. Από τη σύγκριση των καμπυλών iV της πρώτης και τελευταίας ημέρας φαίνεται η σταθερότητα της διάταξης με την υποβάθμιση της απόδοσης να απεικονίζεται ως εξής: για την ίδια πυκνότητα ρεύματος (που αντιστοιχεί στο παραγόμενο H₂) απαιτείται μεγαλύτερο δυναμικό (υπέρταση) και άρα μεγαλύτερη ισχύς. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι παρατηρήθηκαν συμπυκνώσεις H₂O, οι οποίες είχαν ως αποτέλεσμα διακυμάνσεις στην τιμή του δυναμικού κατά τη σταθερή λειτουργία.

Για τη διάταξη αυτή υπολογίστηκε η ειδική αντίσταση ASR ως η κλίση του γραμμικού τμήματος των χαρακτηριστικών καμπυλών πυκνότητας ρεύματος – δυναμικού (iV). Κατά την πρώτη ημέρα λειτουργίας η ειδική αντίσταση ASR είναι ίση με $2.75 \Omega \text{ cm}^2$, ενώ κατά την τελευταία ημέρα $3.17 \Omega \text{ cm}^2$. Συνολικά, η ASR αυξάνεται κατά 15.3% στη διάρκεια του πειράματος σταθερότητας (240h). Να σημειωθεί ότι η ASR εμφανίζει υψηλές τιμές ($\sim 3 \Omega \text{ cm}^2$) λόγω του μεγάλου πάχους του ηλεκτρολύτη της διάταξης [1] (1.5 mm).

Σε λειτουργία ταυτόχρονης ηλεκτρόλυσης H₂O-CO₂, μελετήθηκε η διάταξη [2]. Στο Σχήμα 2α παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες iV, οι οποίες καταγράφηκαν στους 800°C κατά την ηλεκτρόλυση μίγματος με περιεκτικότητα 32% CO₂/H₂O τόσο παρουσία, όσο και απουσία H₂, αλλά και κατά την ηλεκτρόλυση μίγματος 23.5% CO₂/H₂O απουσία H₂. Οι τιμές της πυκνότητας ρεύματος παρουσία H₂ σε δυναμικό 1.7V είναι περίπου 160 mA cm^{-2} , ενώ απουσία του περίπου 200 mA cm^{-2} .

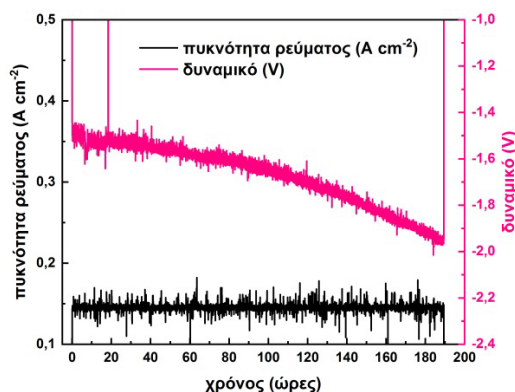


Σχήμα 2. (α) Καμπύλες iV και (β) Φάσματα εμπέδησης (Διάγραμμα Nyquist) καταγεγραμμένα σε δυναμικό 1.3 V, κατά τη διεργασία ηλεκτρόλυσης μίγματος CO₂-H₂O παρουσία/απουσία H₂ σε θερμοκρασία 800°C. Η διάταξη στην οποία μελετήθηκαν οι διεργασίες αυτές έχει πάχος ηλεκτρολύτη YSZ: 300 μm και καθοδικό ηλεκτρόδιο: LSC-Fe.

Στις περιπτώσεις όπου το H₂ απουσιάζει από το τροφοδοτούμενο μίγμα, οι καμπύλες iV εμφανίζουν μια σιγμοειδή μεταβολή περίπου στα 175 mA cm⁻² η οποία προέρχεται από την παραγωγή ποσότητας H₂ και CO ικανής για την εξασφάλιση μιας πρότυπης τιμής δυναμικού. Η λογαριθμική αυτή αύξηση του δυναμικού εξηγείται από την εξίσωση δυναμικού Nernst. Στην περιοχή πυκνότητας ρεύματος μεγαλύτερης από 175 mA cm⁻² οι καμπύλες που καταγράφηκαν απουσία H₂ εμφανίζουν ίδια ωμική συμπεριφορά (ίδια κλίση), κάτι το οποίο παρατηρείται και μεταξύ των καμπυλών παρουσία H₂.

Στις ίδιες συνθήκες οι καμπύλες Nyquist (Σχήμα 2β) που ελήφθησαν σε δυναμικό 1.3 V και εύρος συχνοτήτων από 100 kHz έως 10 mHz, εμφανίζουν την ίδια συμπεριφορά με τις καμπύλες iV , καθώς η ωμική αντίσταση δεν εξαρτάται σημαντικά από την σύσταση του μίγματος, ενώ αντιθέτως η αντίσταση πόλωσης απουσία H₂ αυξάνεται.

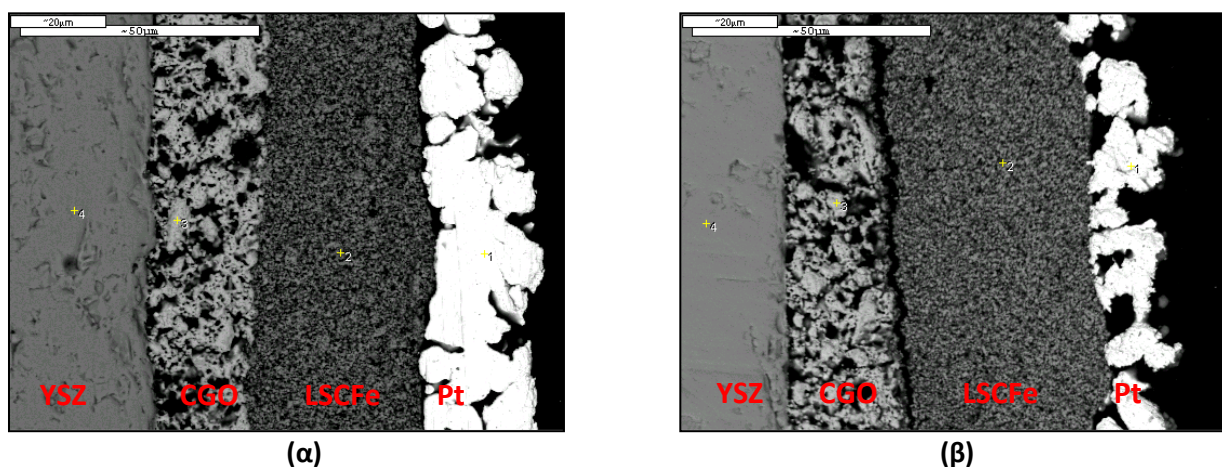
Μετά την καταγραφή των καμπυλών iV στις διαφορετικές συγκεντρώσεις μιγμάτων H₂O-CO₂/H₂, πραγματοποιήθηκε πείραμα σταθερότητας (190 h) κατά την συνδυασμένη ηλεκτρόλυση 23.5% CO₂/H₂O απουσία H₂ υπό σταθερή πυκνότητα ρεύματος, $i=150$ mA cm⁻² στους 800°C. Η πυκνότητα ρεύματος και το δυναμικό συναρτήσε του χρόνου λειτουργίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Τιμές δυναμικού και πυκνότητας ρεύματος σε συνάρτηση με το χρόνο, κατά την ηλεκτρόλυση μίγματος 23.5% CO₂/H₂O- 0% H₂ υπό γαλβανοστατικές συνθήκες ($i=150$ mA/cm²), σε διάταξη με πάχος ηλεκτρολύτη YSZ: 300 μm και ηλεκτρόδιο καθόδου: LSC-Fe.

Όπως φαίνεται το δυναμικό παραμένει σχετικά σταθερό τις πρώτες 100 ώρες παρουσιάζοντας μια υποβάθμιση της τάξεως του 10%, ενώ μετά το πέρας των 100 ωρών η υποβάθμιση σχεδόν διπλασιάζεται και αγγίζει το ποσοστό του 19%. Ο ρυθμός της υποβάθμισης της διάταξης στο συνολικό χρονικό διάστημα υπολογίζεται 2.42 mV h^{-1} .

Μετά το πέρας των μετρήσεων οι διατάξεις εξήχθησαν από τον αντιδραστήρα και οδηγήθηκαν προς ανάλυση SEM-EDS. Με σκοπό τη λήψη εικόνων από τις διατομές (cross section) των διατάξεων, ακολούθησε ψυχρός εγκιβωτισμός των δειγμάτων με τη χρήση εποξειδικής ρητίνης EpoFix (Struers) σε ανάμιξη με σκληρυντή, με αναλογία 15/2 κατ' όγκο. Στη συνέχεια, ακολούθησε λείανση σε τροχό Struers LaboPol-5 με λειαντικά χαρτιά SiC διαδοχικά χαμηλότερης κοκκομετρίας 220 έως 1000, και στίλβωση σε συσκευή Struers RotoPol-15, με χαρτί γυαλίσματος DP-Mol. Οι τομές των διεπιφανειών ηλεκτρολύτη/ηλεκτροδίου καυσίμου που έχουν ληφθεί με χρήση ανιχνευτή οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (backscattered electron imaging) απεικονίζονται στο Σχήμα 4 (α) και (β) για τη πρώτη και δεύτερη διάταξη, αντίστοιχα.



Σχήμα 4. Εικόνες SEM των διεπιφανειών YSZ//CGO/LSCFe/Pt του δείγματος [1] (α) και του δείγματος [2] (β) μετά τη λειτουργία τους σε συνθήκες ηλεκτρόλυσης..

Τα επιμέρους στρώματα του ηλεκτροδίου καυσίμου διακρίνονται ξεκάθαρα και τα μέσα πάχη τους υπολογίζονται ως εξής, για τη διάταξη [1] από το Σχήμα 4 (α): CGO 23 μm και LSCFe 35 μm , ενώ για τη διάταξη [2], από το Σχήμα 4 (β): CGO 23 μm και LSCFe 42 μm . Στο Σχήμα 4α παρατηρείται ιδιαίτερα καλή προσκόλληση του ηλεκτροδίου καυσίμου στον ηλεκτρολύτη και μεταξύ των επιμέρους στρωμάτων ακόμα και μετά τα πειράματα σταθερότητας. Στο Σχήμα 4β φαίνεται πως η μεταξύ, των στρωμάτων LSCrFe-Pt συνοχή, καθώς και μεταξύ του στρώματος CGO με τον ηλεκτρολύτη YSZ, έμεινε ανεπηρέαστη από την εκτεταμένη έκθεση της διάταξης στις διάφορες ηλεκτρολυτικές συνθήκες. Σε αντίθεση με τα στρώματα LSCrFe και CGO, η Pt αποτελεί ένα συμπαγές χωρίς διακριτά σωματίδια, στρώμα, ενώ η μερική αποκόλλησή του οφείλεται σε ένα μεγάλο βαθμό στον τρόπο που εξάγεται η διάταξη από τον αντιδραστήρα. Το ηλεκτρόδιο LSCrFe διαθέτει ικανοποιητικό πορώδες και αποτελείται από ένα δίκτυο ομοιόμορφων σωματιδίων μεγέθους $\sim 0.6 \mu\text{m}$ και με ομοιογενή κατανομή, και στις δύο διατάξεις.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μελέτη των δυο διατάξεων με καθοδικό ηλεκτρόδιο περοβσκιτικής δομής (LSCFe) επιδεικνύει ιδιαίτερη σταθερότητα σε 200 ώρες λειτουργίας τόσο κατά την ηλεκτρόλυση H_2O , όσο και κατά την ταυτόχρονη ηλεκτρόλυση $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$. Το γεγονός αυτό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των state-of-the-art διατάξεων που χρησιμοποιούν Ni-YSZ ως καθοδικό ηλεκτρόδιο, το οποίο απαιτεί τη συν-τροφοδότηση αναγωγικού μέσου (π.χ. H_2) για τη διατήρηση της ανηγμένης μορφής του ηλεκτροκαταλύτη. Τη σταθερότητα των κεραμικών διατάξεων επιβεβαιώνουν και οι

εικόνες SEM, όπου διακρίνεται η σταθερή μικροδομή του ηλεκτροδίου LSCFe και στις δύο διατάξεις. Ωστόσο, η διάταξη [1] κατά την ηλεκτρόλυση H₂O, εμφάνισε μικρότερο ρυθμό υποβάθμισης από τη διάταξη [2] στην ταυτόχρονη ηλεκτρόλυση H₂O- CO₂. Η αποκόλληση που επισημάνθηκε στη διάταξη [2] (μεταξύ CGO-LSCFe) επιβεβαιώνει αυτή τη μεταξύ τους διαφορά, ενώ σε γενικότερο πλαίσιο η οποία υποβάθμιση των διατάξεων, επήλθε ως ένα βαθμό από τις συμπυκνώσεις ατμού που παρατηρήθηκαν στο σύστημα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο Ερευνητικού Έργου *SEI/γSOs* που χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και την τεχνολογική πλατφόρμα Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (Grant Agreement No. 671481) και της Δράσης ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ – ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ, και συγχρηματοδοτήθηκε από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης (ΕΤΠΑ) της Ευρωπαϊκής Ένωσης και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνΕΚ) (κωδικός έργου:Τ1ΕΔΚ-01631).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] K. M. Papazisi, S. Balomenou, D. Tsiplakides. *J. Applied Electrochem.* 40 (2010) 1875-1881.
- [2] M. Rao, X. Sun, A. Hagen. *J. Electrochem. Soc.* 165(10) (2018) F748-F755].