

## ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΣΗΣ H<sub>2</sub> ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ ΠΑΛΛΑΔΙΟΥ

**Χ. Ματσούκα<sup>1,\*</sup>, Ν. Λαζαρίδου<sup>1</sup>, Δ. Κουτσονικόλας<sup>1</sup>, Α. Ασημακοπούλου<sup>1</sup>, Γ. Καραγιαννάκης<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Εργαστήριο Καινοτόμων Τεχνολογιών και Προηγμένων Υλικών-ARTEMIS, Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών & Ενεργειακών Πόρων-ΙΔΕΠ, Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης-ΕΚΕΤΑ, 57001, Θέρμη, Θεσσαλονίκη

(\*[ch.matsouka@certh.gr](mailto:ch.matsouka@certh.gr))

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

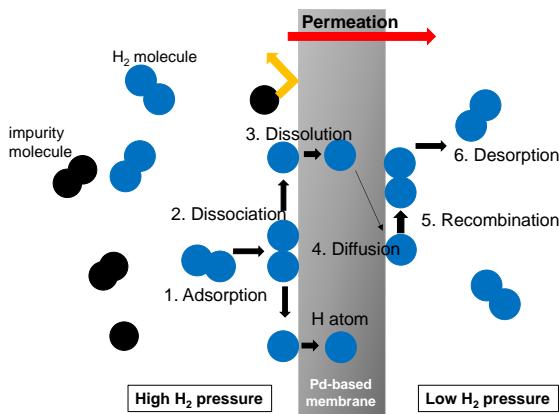
Το υδρογόνο αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο καθαρό εναλλακτικό καύσιμο για εφαρμογές μικρής και μεγάλης κλίμακας, όπου οι απαιτήσεις καθαρότητας διαφέρουν ανάλογα με την τελική εφαρμογή του. Ανάμεσα στις διάφορες μεθόδους διαχωρισμού και ανάκτησης του υδρογόνου, οι τεχνολογίες μεμβρανών εμφανίζουν εγγενή πλεονεκτήματα, όπως χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, ευέλικτη και εύκολη λειτουργία και γραμμική και απλή κλιμάκωση μεγέθους. Σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους προσρόφησης, έχουν τη δυνατότητα να εκτελούν συνεχή διαχωρισμό, μειώνοντας το λειτουργικό κόστος. Για την παραγωγή H<sub>2</sub> υψηλής καθαρότητας σε ένα στάδιο έχουν προταθεί οι μεταλλικές μεμβράνες παλλαδίου, οι οποίες παρουσιάζουν σχεδόν 100% εκλεκτικότητα H<sub>2</sub> και υψηλή διαπερατότητα H<sub>2</sub> σε μεσαίες και υψηλές θερμοκρασίες. Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η αξιολόγηση της διαπέρασης υδρογόνου και της διαχωριστικής ικανότητας σύνθετων εμπορικών μεμβρανών παλλαδίου Mr. Hydrogen®. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιούνται πειράματα διαπέρασης και προκύπτει ότι η ροή του H<sub>2</sub> διαμέσου της μεμβράνης αυξάνεται με αύξηση της πίεσης τροφοδοσίας και της θερμοκρασίας. Με χρήση του νόμου Sieverts υπολογίζεται ο εκθετικός παράγοντας εξάρτησης της ροής από την πίεση,  $n$ , για τη βελτιστοποίηση της αξιολόγησης και τη μελέτη του μηχανισμού διαπέρασης. Ο παράγοντας  $n$  κυμαίνεται μεταξύ 0.41-0.56, υποδηλώνοντας ότι η διαπέραση καθορίζεται από τη διάχυση του ατομικού υδρογόνου διαμέσου του μετάλλου στις θερμοκρασιακές περιοχές 350°C > T > 400°C και 425°C > T > 500°C. Στους 400°C και 425°C και για 0.78 < n < 0.81, συμπεραίνεται ότι η διαπέραση καθορίζεται τόσο από τη διάχυση όσο και από τη διάσταση του υδρογόνου στην επιφάνεια της μεμβράνης. Προκύπτει ότι η διαπέραση του H<sub>2</sub> παραμένει σταθερή με αύξηση του ΔΡ και λαμβάνει μέγιστη τιμή στους 500°C. Ωστόσο, η σύνθετη δομή της εμπορικής μεμβράνης επηρεάζει τη διαπέραση στους 400°C και 425°C, όπου λαμβάνεται η χαμηλότερη τιμή της. Η αξιολόγηση της διαχωριστικής ικανότητας της μεμβράνης πραγματοποιήθηκε με χρήση αέριου μίγματος H<sub>2</sub> με αδρανή αέρια και προκύπτει ότι η ανάκτηση H<sub>2</sub> αυξάνεται με αύξηση του ΔΡ με μέγιστη τιμή στους 450°C. Για τη μελλοντική βελτιστοποίηση της διεργασίας αναπτύχθηκε μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη λειτουργία της συσκευής και προσομοιώνει αρκετά καλά τα πειραματικά ευρήματα.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** παραγωγή υδρογόνου, μεμβράνες διαχωρισμού, μεμβράνες παλλαδίου

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια εναλλακτική λύση για την αντιμετώπιση της ενεργειακής κρίσης, την ενεργειακή αυτονομία και τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> είναι η χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο<sup>[1]</sup>. Το υδρογόνο βρίσκεται σε αφθονία στο σύμπαν, ωστόσο δεν είναι διαθέσιμο σε ελεύθερη μορφή αλλά συναντάται σε ενώσεις, όπως το νερό, και σε διάφορα οργανικά υλικά<sup>[1-3]</sup>. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι παραγωγής H<sub>2</sub> είναι η αναμόρφωση και η αεριοποίηση ορυκτών καυσίμων, η ηλεκτρόλυση του νερού και η αεριοποίηση βιομάζας, οι οποίες συνοδεύονται από παραγωγή διάφορων παραπροϊόντων. Επομένως, ο αποδοτικός διαχωρισμός του H<sub>2</sub> κρίνεται αναγκαίος, και επηρεάζει τελικά τη βιωσιμότητά του<sup>[1]</sup>.

Τα τελευταία χρόνια, η ζήτηση του υδρογόνου αυξάνεται συνεχώς, ενώ ανάλογα με την τελική εφαρμογή του διαφέρουν οι απαιτήσεις καθαρότητάς του<sup>[4]</sup>. Οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή H<sub>2</sub> υψηλής καθαρότητας είναι η προσρόφηση με εναλλαγή πίεσης (Pressure Swing Adsorption – PSA), η κρυογονική απόσταξη και οι τεχνολογίες μεμβρανών διαχωρισμού. Οι δύο πρώτες μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρέως, ωστόσο οι τεχνολογίες μεμβρανών διαχωρισμού πλεονεκτούν ως προς τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, την ευέλικτη και εύκολη λειτουργία τους και τη γραμμική και απλή κλιμάκωση μεγέθους<sup>[4,5]</sup>. Επιπρόσθετα, οι μεμβράνες διαχωρισμού προσφέρουν τη δυνατότητα συνεχούς διαχωρισμού, σε εφαρμογές μικρής και μεσαίας κλίμακας, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό το λειτουργικό κόστος. Για διεργασίες διαχωρισμού αερίων έχουν προταθεί πολυμερικές, ανόργανες και μεταλλικές μεμβράνες. Συγκεκριμένα, για την παραγωγή H<sub>2</sub> υψηλής καθαρότητας έχει προταθεί η χρήση μεταλλικών μεμβρανών παλλαδίου εξαιτίας της πολύ υψηλής εκλεκτικότητας και διαπερατότητας υδρογόνου που παρουσιάζουν σε μεσαίες και υψηλές θερμοκρασίες και τη δυνατότητα παραγωγής H<sub>2</sub> υπερ-υψηλής καθαρότητας σε ένα μόνο στάδιο<sup>[5,6]</sup>. Ο μηχανισμός διαπέρασης του υδρογόνου διαμέσου μεμβρανών παλλαδίου βασίζεται στο μοντέλο διάλυσης-διάχυσης (solution-diffusion model). Αναλυτικότερα, η μεταφορά του υδρογόνου πραγματοποιείται από την πλευρά υψηλής πίεσης της μεμβράνης προς την πλευρά χαμηλής πίεσης και περιλαμβάνει τα εξής βήματα (Σχήμα 1):



**Σχήμα 1.** Μεταφορά υδρογόνου διαμέσου μεμβράνης παλλαδίου

1. προσρόφηση (adsorption) των μορίων υδρογόνου στην πλευρά τροφοδοσίας της μεμβράνης
2. διάσπαση (dissociation) των μορίων υδρογόνου στην επιφάνεια της μεμβράνης
3. διάλυση (dissolution) του ατομικού υδρογόνου
4. διάχυση (diffusion) του ατομικού υδρογόνου διαμέσου της μεταλλικής μεμβράνης
5. ανασχηματισμός (recombination) του ατομικού υδρογόνου
6. εκρόφηση (desorption) του υδρογόνου από την επιφάνεια προς την πλευρά διαπέρασης της μεμβράνης.

Η διαπέραση του υδρογόνου διαμέσου της

μεταλλικής μεμβράνης περιγράφεται με βάση το νόμο Sieverts (Εξίσωση 1)<sup>[6,7]</sup>:

$$J_{H_2} = A \cdot (P_{feed}^n - P_{permeate}^n) \quad (1)$$

όπου  $J_{H_2}$  η διαπέραση του υδρογόνου,  $A$  η επιφάνεια της μεμβράνης,  $P_{feed}$  η πίεση τροφοδοσίας στη μεμβράνη,  $P_{permeate}$  η πίεση εξόδου στην πλευρά διαπέρασης της μεμβράνης και  $n$  ο εκθετικός παράγοντας εξάρτησης της ροής από την πίεση. Στην ιδανική περίπτωση η διαπέραση καθορίζεται από τη διάχυση του ατομικού υδρογόνου διαμέσου της μεταλλικής μεμβράνης και ο εκθετικός παράγοντας είναι ίσος με  $n=0.5$ . Στην περίπτωση που ο παράγοντας  $n$  λαμβάνει χαμηλότερες τιμές, η προσρόφηση του υδρογόνου παίζει καθοριστικό ρόλο, ενώ όταν  $0.5 < n < 1$  η διαπέραση επηρεάζεται από επιφανειακά φαινόμενα, όπως η διάσπαση των μορίων του υδρογόνου και η συγκέντρωση πόλωσης (concentration polarization).

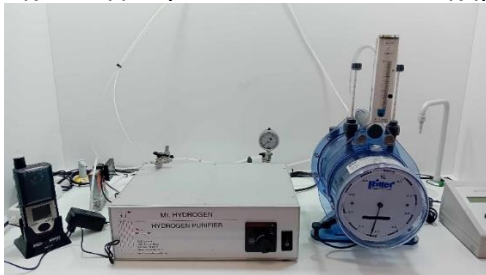
Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η αξιολόγηση της διαπέρασης οξυγόνου και της διαχωριστικής ικανότητας των σύνθετων εμπορικών μεμβρανών παλλαδίου Mr. Hydrogen® (REB-Research & Consulting). Για το σκοπό αυτό πραγματοποιούνται πειράματα διαπέρασης με χρήση καθαρού υδρογόνου σε διάφορες θερμοκρασίες και πιέσεις τροφοδοσίας, ενώ για την περαιτέρω μελέτη του μηχανισμού διαπέρασης εφαρμόζεται ο νόμος του Sieverts για τον υπολογισμό του εκθετικού παράγοντα  $n$ . Η αξιολόγηση της διαχωριστικής ικανότητας των μεμβρανών πραγματοποιείται με χρήση αερίου μίγματος H<sub>2</sub> σε αδρανή αέρια σε διάφορες θερμοκρασίες, πιέσεις τροφοδοσίας και ροές εισόδου. Τέλος, αναπτύσσεται μαθηματικό μοντέλο για την περιγραφή της λειτουργίας της συσκευής και την προσομοίωση των πειραματικών

αποτελεσμάτων.

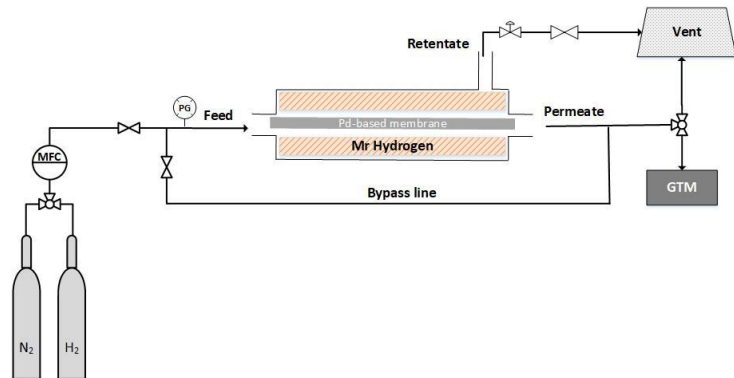
## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της διαπέρασης υδρογόνου και της διαχωριστικής ικανότητας των σύνθετων εμπορικών μεμβρανών παλλαδίου Mr. Hydrogen® (REB – Research & Consulting). Ο Mr. Hydrogen® αποτελείται από τρεις σωληνοειδείς μεμβράνες με βάση το Pd, διαμέτρου  $d=0.2032\text{cm}$  και μήκους  $l=19\text{cm}$  η καθεμία, οι οποίες είναι τοποθετημένες σε μεταλλικό περίβλημα για ασφαλή θέρμανση (Σχήμα 2). Η ρύθμιση τη ροής εισόδου πραγματοποιείται με χρήση ελεγκτή ροής μάζας (Mass Flow Controller-MFC, Broknhkorst), ενώ η ροή εξόδου στην πλευρά διαπέρασης της μεμβράνης μετράται με χρήση ροομέτρου Ritter TG1/5 Drum-type. Για τον έγκαιρο εντοπισμό τυχόν διαρροής υδρογόνου χρησιμοποιείται ανιχνευτής αερίων iBRiD mx6. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της διεργασίας.



**Σχήμα 2.** Πειραματική διάταξη αξιολόγησης διαπέρασης υδρογόνου και διαχωριστικής ικανότητας των σύνθετων εμπορικών μεμβρανών παλλαδίου Mr. Hydrogen®



**Σχήμα 3.** Διάγραμμα ροής διεργασίας

### Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

#### Αξιολόγηση της διαπέρασης υδρογόνου

Η αξιολόγηση της διαπέρασης των σύνθετων εμπορικών μεμβρανών πραγματοποιείται με χρήση καθαρού  $\text{H}_2$  (99.999%) σε θερμοκρασίες  $350^\circ\text{C}$ – $500^\circ\text{C}$  και για διαφορά πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου της μεμβράνης  $\Delta P=200\text{--}900\text{ kPa}$ . Αρχικά, πραγματοποιείται θέρμανση παρουσία  $\text{N}_2$  και όταν το σύστημα φτάσει την επιθυμητή θερμοκρασία διακόπτεται η ροή  $\text{N}_2$  και τροφοδοτείται  $\text{H}_2$  με ροή  $Q_{\text{gas,in}}=1\text{ l/h}$ . Μόλις επέλθει σταθερή κατάσταση καταγράφονται η ροή εξόδου από την πλευρά διαπέρασης της μεμβράνης, καθώς και η θερμοκρασία και η πίεση του αερίου στην έξοδο. Ακολουθεί ελεύθερη ψύξη του συστήματος παρουσία  $\text{N}_2$ .

Με βάση τη ροή εξόδου του υδρογόνου από την πλευρά διαπέρασης της μεμβράνης, την πίεση εισόδου και τη γεωμετρία της μεμβράνης υπολογίζεται η διαπέραση του υδρογόνου σύμφωνα με την Εξίσωση 2.

$$J_{\text{H}_2} = \frac{Q_{\text{gas,out}}}{A \cdot \Delta P^n} \quad (\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-n}) \quad (2)$$

όπου  $J_{\text{H}_2}$  η διαπέραση του υδρογόνου,  $Q_{\text{gas,out}}$  η ροή εξόδου,  $A$  η επιφάνεια της μεμβράνης,  $\Delta P$  η διαφορά πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου της μεμβράνης και  $n$  ο εκθετικός παράγοντας εξάρτησης της ροής από την πίεση. Για τη βελτιστοποίηση της αξιολόγησης και τη μελέτη του μηχανισμού διαπέρασης, υπολογίζεται ο παράγοντας  $n$ , για κάθε θερμοκρασία υπό εξέταση, σύμφωνα με το νόμο Sieverts και με χρήση του πρόσθετου επίλυσης (solver module) στο Microsoft Excel.

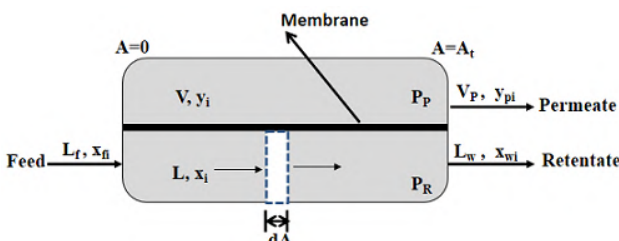
#### Αξιολόγηση της διαχωριστικής ικανότητας

Η αξιολόγηση της διαχωριστικής ικανότητας των σύνθετων εμπορικών μεμβρανών πραγματοποιείται με χρήση αερίου μίγματος  $\text{H}_2$  σε αδρανή αέρια σε θερμοκρασίες  $350^\circ\text{C}$ – $450^\circ\text{C}$ ,

και  $\Delta P$  μεταξύ 200-600 kPa. Η μονάδα θερμαίνεται παρουσία  $N_2$  και όταν φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία διακόπτεται η ροή  $N_2$  και τροφοδοτείται το αέριο μίγμα με ροή εισόδου μεταξύ 0.1-1 l/min, επέρχεται σταθερή κατάσταση και καταγράφονται η ροή εξόδου στην πλευρά διαπέρασης της μεμβράνης, καθώς και η θερμοκρασία και η πίεση του αερίου στην έξοδο. Με βάση τις ροές εισόδου και εξόδου υπολογίζεται η ανάκτηση του υδρογόνου, ενώ η διαπέραση του υδρογόνου υπολογίζεται από την Εξίσωση 2 και τις τιμές του εκθετικού παράγοντα που προέκυψαν από τη μαθηματική ανάλυση.

### Μοντέλο προσομοίωσης του διαχωρισμού αερίων

Για τη μελλοντική βελτιστοποίηση της διεργασίας αναπτύχθηκε μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη λειτουργία της συσκευής και προσομοιώνει τα πειραματικά αποτελέσματα, με βάση τις εξής υποθέσεις: (i) ισόθερμη λειτουργία, (ii) αμελητέα πτώση πίεσης, (iii) εμβολική ροή, (iv) διαπερατότητα υδρογόνου στο αέριο μίγμα ίδια με αυτή του καθαρού αερίου και (v) λειτουργία σε σταθερή κατάσταση. Η προσομοίωση πραγματοποιείται με χρήση των διαφορικών εξισώσεων 3 και 4, ενώ στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η διαπέραση του υδρογόνου διαμέσου της μεμβράνης σε ένα στάδιο.



**Σχήμα 4.** Σχηματική αναπαράσταση διαπέρασης ενός σταδίου διαμέσου της μεμβράνης

#### Πλευρά τροφοδοσίας:

$$\frac{dL_{f,i}}{d\left(\frac{l}{l_0}\right)} = -J_{H_2} \cdot (p_{H_2,f}^n - p_{H_2,p}^n) \cdot A_t \quad (3)$$

#### Πλευρά διαπέρασης:

$$\frac{dV_{p,H_2}}{d\left(\frac{l}{l_0}\right)} = J_{H_2} \cdot (p_{H_2,f}^n - p_{H_2,p}^n) \cdot A_t \quad (4)$$

όπου  $L_{f,i}$  ο μοριακός ρυθμός τροφοδοσίας,  $l/l_0$  η αναλογία μήκους της μεμβράνης,  $J_{H_2}$  η ροή

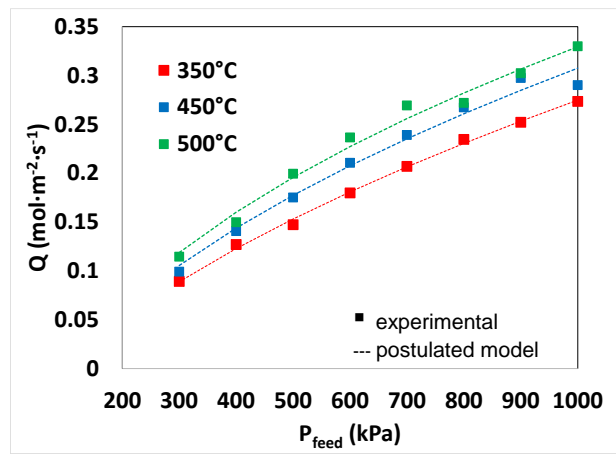
υδρογόνου,  $P_{H_2,f}$  η πίεση τροφοδοσίας,  $P_{H_2,p}$  η πίεση εξόδου στην πλευρά διαπέρασης,  $n$  ο εκθετικός παράγοντας εξάρτησης της ροής από την πίεση,  $A_t$  η διαπερατότητα του υδρογόνου διαμέσου της μεμβράνης και  $V_{p,H_2}$  ο μοριακός ρυθμός εξόδου του υδρογόνου στην πλευρά διαπέρασης της μεμβράνης.

## **ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ**

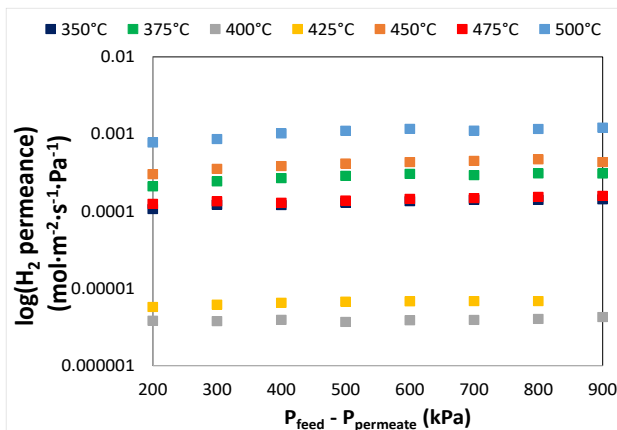
### Αξιολόγηση της διαπέρασης υδρογόνου

Από τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της διαπέρασης υδρογόνου των σύνθετων εμπορικών μεμβρανών παλλαδίου Mr. Hydrogen<sup>®</sup>, προκύπτει ότι η ροή του υδρογόνου διαμέσου της μεμβράνης αυξάνεται με αύξηση της πίεσης τροφοδοσίας και της θερμοκρασίας, ενώ τα πειραματικά αποτελέσματα συμφωνούν με το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο (Σχήμα 5).

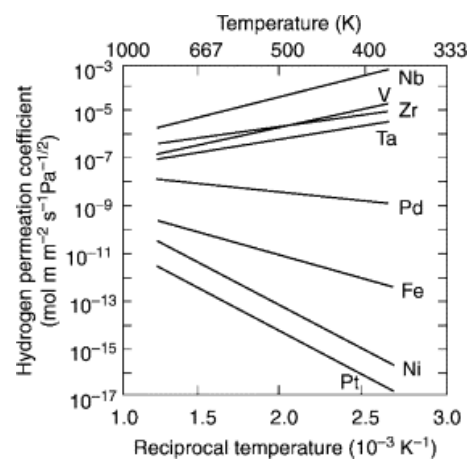
Από τον υπολογισμό του εκθετικού παράγοντα  $n$  προκύπτει ότι στις θερμοκρασιακές περιοχές  $350^\circ\text{C} \geq T > 400^\circ\text{C}$  και  $425^\circ\text{C} > T \geq 500^\circ\text{C}$  η διαπέραση καθορίζεται από τη διάχυση του ατομικού υδρογόνου διαμέσου του μετάλλου, καθώς ο παράγοντας  $n$  κυμαίνεται μεταξύ 0.41 – 0.56. Στους  $400^\circ\text{C}$  και  $425^\circ\text{C}$  ο παράγοντας  $n$  λαμβάνει τιμές 0.81 και 0.78 αντίστοιχα και συμπεραίνεται ότι η διαπέραση του υδρογόνου καθορίζεται από τη διάχυση και τη διάσταση του υδρογόνου στην επιφάνεια της μεμβράνης. Με βάση τις τιμές του παράγοντα και από την Εξίσωση 2 υπολογίζεται η διαπέραση του  $H_2$ , η οποία παραμένει σταθερή με αύξηση του  $\Delta P$  και λαμβάνει μέγιστη τιμή ίση με  $1.21 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$  στους  $500^\circ\text{C}$  (Σχήμα 6). Ωστόσο η πολύπλοκη δομή της σύνθετης μεμβράνης επηρεάζει τη διαπέραση στους  $400^\circ\text{C}$  και  $425^\circ\text{C}$ , όπου λαμβάνονται οι χαμηλότερες τιμές διαπέρασης. Αναλυτικότερα, η διαπέραση  $H_2$  αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας στις μεμβράνες Pd, σε αντίθεση με τα Ta και V που η ύπαρξή τους σαν υποστρώματα στις υπό μελέτη μεμβράνες οδηγεί σε μείωση της διαπέρασης με αύξηση της θερμοκρασίας (Σχήμα 7).



**Σχήμα 5.** Ροή υδρογόνου διαμέσου των σύνθετων εμπορικών μεμβρανών παλλαδίου Mr. Hydrogen® συναρτήσει της πίεσης τροφοδοσίας στους 350°C, 450°C και 500°C



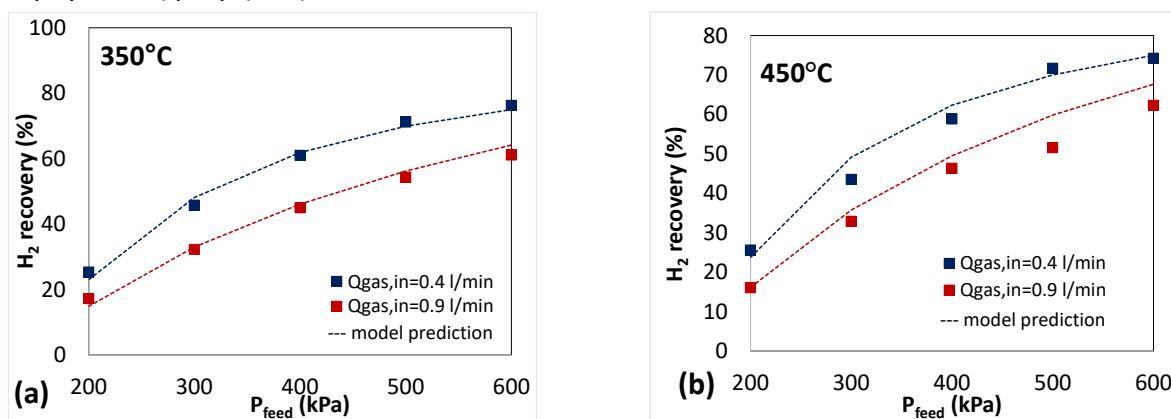
**Σχήμα 6.** Διαπέραση υδρογόνου των σύνθετων εμπορικών μεμβρανών παλλαδίου Mr. Hydrogen® συναρτήσει της διαφοράς πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου στους 350°C – 500°C



**Σχήμα 7.** Διαπέραση υδρογόνου συναρτήσει της θερμοκρασίας για διάφορα μέταλλα<sup>[8]</sup>

Αξιολόγηση της διαχωριστικής ικανότητας

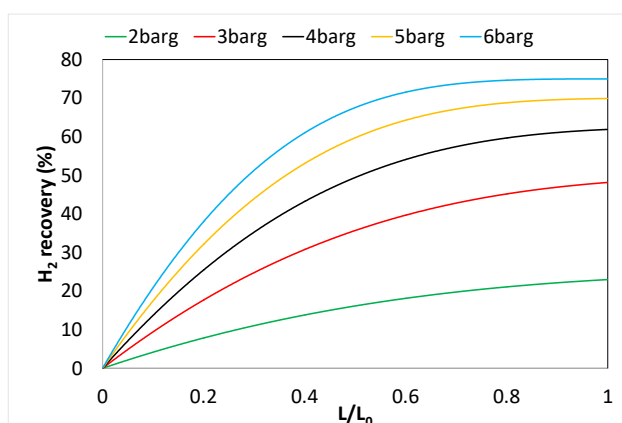
Στα Σχήματα 8α και 8β παρουσιάζεται η ανάκτηση H<sub>2</sub> συναρτήσει της πίεσης τροφοδοσίας στους 350°C και 450°C, αντίστοιχα, και για ροές εισόδου 0.4 και 0.9 l/min. Προκύπτει ότι η ανάκτηση H<sub>2</sub> μειώνεται με αύξηση της ροής εισόδου, ενώ αυξάνεται με αύξηση της πίεσης τροφοδοσίας με μέγιστη τιμή ίση με περίπου 75% στους 450°C. Επιπλέον από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι οι προβλέψεις του μαθηματικού μοντέλου που αναπτύχθηκε βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις.



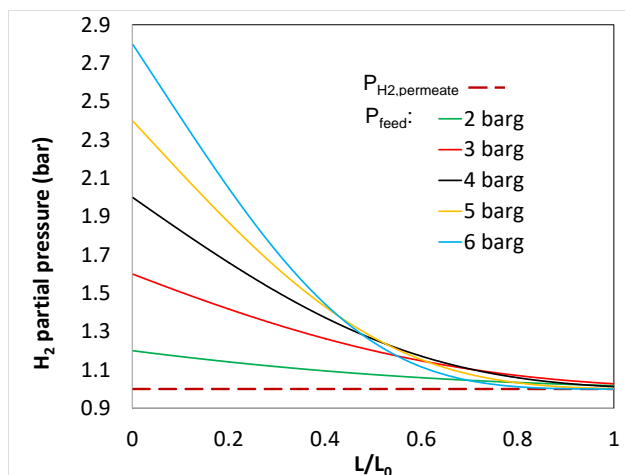
**Σχήμα 8.** Ανάκτηση υδρογόνου συναρτήσει της πίεσης τροφοδοσίας στους (α) 350°C και (β) 450°C και για ροές εισόδου 0.4 και 0.9 l/min

### Μοντέλο προσομοίωσης του διαχωρισμού αερίων

Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε, εφαρμόστηκε για την προσομοίωση της διεργασίας στους 350°C και βρέθηκε ότι η ανάκτηση υδρογόνου αυξάνεται κατά μήκος της μεμβράνης μέχρι  $L/L_0=0.8$  όπου σταθεροποιείται (Σχήμα 9). Επιπρόσθετα, προκύπτει ότι η ανάκτηση υδρογόνου αυξάνεται με αύξηση της διαμεμβρανικής πίεσης. Από το Σχήμα 10 προκύπτει ότι η μερική πίεση τροφοδοσίας του υδρογόνου μειώνεται κατά μήκος της μεμβράνης και σταθεροποιείται όταν  $L/L_0=0.8$ , προσεγγίζοντας τη μερική πίεση στην πλευρά διαπέρασης της μεμβράνης. Με βάση όσα προαναφέρθηκαν, συμπεραίνεται ότι παρά την απλότητα του μοντέλου, η πρόβλεψη ανάκτησης είναι επαρκής.



**Σχήμα 9.** Αποτελέσματα προσομοίωσης: Ανάκτηση υδρογόνου συναρτήσει της αναλογίας μήκους της μεμβράνης για πίεση τροφοδοσίας μεταξύ 2-6 barg



**Σχήμα 10.** Αποτελέσματα προσομοίωσης: Μερική πίεση τροφοδοσίας υδρογόνου συναρτήσει της αναλογίας μήκους της μεμβράνης για πίεση τροφοδοσίας μεταξύ 2-6 barg

### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «En3DSyst» (Κωδικός έργου: KMP6-0232019) στη Δράση «Επενδυτικά Σχέδια Καινοτομίας», του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Κεντρική Μακεδονία 2014-2020» της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας και συγχρηματοδοτήθηκε από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης (ΕΤΠΑ) της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) και Εθνικούς πόρους στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Κεντρική Μακεδονία» 2014-2020»

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ji M, Wang J. (2021). Int. J. Hydrogen Energy, 46 (78), 38612–38635.
- [2] Baykara S. Z. (2018). Int. J. Hydrogen Energy, 43, 10605–10614.
- [3] Osman A. I, Mehta N, Elgarahy A. M, Hefny M, Al-Hinal A, Al-Muhtaseb A. H, Rooney D. W. (2021). Environ. Chem. Lett., 20, 153–188.
- [4] Alique D, Martinez-Diaz D, Sanz R, Calles J.A. (2018). Membranes, 8, 5.
- [5] Yun S, Oyama S.T. (2011). J. Membr. Sci., 375, 25–45.
- [6] Alraeesi A, Gardner T. (2021). Membranes, 11, 778.
- [7] Caravella A, Scura F, Barbieri G, Drioli E. (2010). J. Phys. Chem. B, 114, 6033–6047.
- [8] Adhikari S, Fernando S. (2006). Ind. Eng. Chem. Res, 45, 875–881.