

# ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ, ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑ- ΝΑΛΩΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕ ΜΙΑ ΜΟΝΑΔΑ Η-ΤΕC ΠΑΤΡΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2023

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

- 1 Σκοπός
- 2 Εισαγωγή
- 3 Θεωρία
  - 3.1 Αρχή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού κύτταρο (ΦΚ)
  - 3.2 Βασικές Αρχές της ηλεκτροχημείας
  - 3.3 Αρχή λειτουργίας του ηλεκτρολυτικού κελιού (ΗΚ)
    - 3.3.1 Δομή του ηλεκτρολυτικού κελιού
    - 3.3.2 Καμπύλη  $IU$  του ηλεκτρολυτικού κελιού
    - 3.3.3 Ενεργειακή απόδοση του ηλεκτρολυτικού κελιού,  $\epsilon_{HK-\epsilon}$
    - 3.3.4 Φαρανταϊκή απόδοση του ηλεκτρολυτικού κελιού,  $\epsilon_{HK-F}$
    - 3.3.5 Απώλειές σύζευξης (coupling losses)
  - 3.4 Αρχή λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου (ΚΚ)
    - 3.4.1 Δομή της κυψέλης καυσίμου
    - 3.4.2 Αντιστρεπτή και αδιαβατική λειτουργία της κυψέλης καυσίμου
    - 3.4.3 Πραγματική λειτουργία της κυψέλης καυσίμου
    - 3.4.4 Ενεργειακή απόδοση της κυψέλης καυσίμου,  $\epsilon_{KK-\epsilon}$
    - 3.4.5 Φαρανταϊκή απόδοση της κυψέλης καυσίμου,  $\epsilon_{KK-F}$
- 4 Πειραματική διάταξη
- 5 Πειραματική διεργασία
  - 5.1 Επίδειξη και εισαγωγή στην μονάδα με πλήρη λειτουργία των τμημάτων (demonstration mode)
  - 5.2 Μέρος 1 με βάση δεδομένων: Μέτρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης του φωτοβολταϊκού κυττάρου συναρτήσει της έντασης του φωτός, καμπύλες  $IU$
  - 5.3 Πειραματικό Μέρος 2: Προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης  $IU$  του ηλεκτρολυτικού κελιού
  - 5.4 Πειραματικό Μέρος 3: Προσδιορισμός του ρυθμού παραγωγής υδρογόνου και οξυγόνου.
  - 5.5 Πειραματικό Μέρος 4: Προσδιορισμός της απόδοσης της κυψέλης καυσίμου και μέτρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης  $IU$  της
- 6 Επεξεργασία αποτελεσμάτων - Ζητούμενα της άσκησης
- 7 Βιβλιογραφία

Οι σημειώσεις των εργαστηριακών ασκήσεων έχουν διαμορφωθεί σύμφωνα με το Πρόγραμμα Σπουδών του Τμήματος Χημικών Μηχανικών. Η συγγραφή των σημειώσεων έγινε με την συνεργασία των

Susanne Brosda, ΕΔΙΠ, ΤΧΜ  
Ευτυχία Μαρτίνο, ΤΧΜ

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

ΦΚ	φωτοβολταϊκό κύτταρο	
ΗΚ	ηλεκτρολυτικό κελί	
ΚΚ	κυψέλη καυσίμου	
ΜΕΑ	Membrane Electrode Assembly	
GDΛ	Gas Diffusion Layer (στρώματα διάχυσης αερίου)	
ΜΡΡ	Maximum Power Point, σημείο μέγιστος ισχύος	
ΟΡ	Operation point, σημείο λειτουργίας	
ΡΕΜ	Proton Exchange Membrane, πολυμερική μεμβράνη	
$dG$	Μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
$dH$	Μεταβολή της ενθαλπίας	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\Delta_R H_0$	Ενθαλπία αντίδρασης διάσπασης του νερού	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
$dS$	Μεταβολή της εντροπίας	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
$F$	Σταθερά του Faraday	$96485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ ( $1\text{C} = 1\text{As}$ )
$R$	παγκόσμια σταθερά των αερίων	$8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$A$	Επιφάνεια	$\text{m}^2$
$I$	Ένταση του ρεύματος	A
$U$	Γενικά η τάση ή το δυναμικό	Δυναμικό
$U_{op}$	Δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος	V
$U_{rev}$	Αντιστρεπτό δυναμικό	V
$t$	χρόνος	s
$T$	θερμοκρασία	K
$z$	αριθμός ηλεκτρονίων που απαιτούνται για τον διαχωρισμό ενός μορίου	
$n$	ποσότητα ουσίας	mol
$p$	πίεση	Pa
$P_{\Phi K-out}, P_{MMP}$	παραγόμενη μέγιστη ισχύς του κυττάρου	W
$P_{\Phi K-in}$	η προσπίπτουσα ισχύς της φωτεινής ακτινοβολίας	W
$P_{OP}$	ισχύς λειτουργίας	W
$Q$	ηλεκτρικό φορτίο	C
$V$	όγκος παραγόμενου ή καταναλωμένου αερίου	$\text{m}^3$
$\varepsilon$	Γενικά η απόδοση	%
$\varepsilon_{\Phi K}$	απόδοσή του φωτοβολταϊκού κύτταρο	
$\varepsilon_{\text{ΗΚ}-\varepsilon}$	ενεργειακή απόδοση του ηλεκτρολυτικού κελιού	
$\varepsilon_{\text{ΗΚ}-F}$	Φαρανταϊκή απόδοση του ηλεκτρολυτικού κελιού	

$\epsilon_{\Phi K/HK}$	απώλειες σύζευξης (coupling losses)	
$\epsilon_{KK-\epsilon}$	ενεργειακή απόδοση της κυψέλης καυσίμου	
$\epsilon_{KK-F}$	Φαρανταϊκή απόδοση της κυψέλης καυσίμου	
$\eta$	Γενικά η υπέρταση	V
$\eta_{act}$	υπέρταση ενεργοποίησης	V
$\eta_{conc}$	υπέρταση συγκέντρωσης	V
$\eta_{\Omega\mu}$	Ωμική υπέρταση	V

## 1 Σκοπός

Στη παρούσα άσκηση θα γίνει η παραγωγή, αποθήκευση και κατανάλωση υδρογόνου και οξυγόνου σε μονάδα η οποία αποτελείται από τρία τμήματα: (1) ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο, (2) ένα ηλεκτρολυτικό κελί και (3) μια κυψέλη καυσίμου. Γενικός σκοπός είναι να μελετήσετε σε μια συσκευή «πράσινης» τεχνολογίας η οποία είναι μικρογραφία μιας σύγχρονης μονάδας παραγωγής, αποθήκευσης και κατανάλωσης H<sub>2</sub> και O<sub>2</sub>.

Συγκεκριμένα στην παρούσα εργαστηριακή άσκηση:

- ✓ συγκρίνεται η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού
- ✓ προσδιορίζεται η απόδοσης σύζευξης
- ✓ μελετάται η σχέση του ρεύματος με την τάση του ηλεκτρολυτικού κελιού και της κυψέλης καυσίμου (χαρακτηριστικές καμπύλες *IU*) και προσδιορίζονται οι βέλτιστες συνθήκες για τη λειτουργία του ηλεκτρολυτικού κελιού.
- ✓ προσδιορίζονται οι μετατροπές ενέργειας και μάζας.
- ✓ προσδιορίζεται η απόδοση στην παραγωγή H<sub>2</sub> και O<sub>2</sub>.

Η άσκηση χωρίζεται σε πέντε μέρη, δύο εκ των οποίων ερευνώνται με γνωστά δεδομένα.

### ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ

φωτοβολταϊκό κύτταρο, ηλιακή ενέργεια, ηλεκτρολυτικό κελί, κυψέλη καυσίμου, νόμος του Faraday, ενεργειακή απόδοση, φαραδαϊκή απόδοση, υπέρταση

## 2 Εισαγωγή

Η παγκόσμια ενεργειακή οικονομία βασίζεται κατά κύριο λόγο σε μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Δεν αποτελεί κάποια πρόσφατη εξέλιξη, αλλά ισχύει από τις απαρχές της εκβιομηχάνισης, η οποία τροφοδοτήθηκε και τροφοδοτείται από την εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων.

Μια στροφή προς την οικονομία «πράσινου υδρογόνου» μπορεί να μειώσει τις εκπομπές σε CO<sub>2</sub>, να αυξήσει τη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών στο δίκτυο παραγωγής ενέργειας και να βελτιώσει την ενεργειακή ασφάλεια. Η ανάπτυξη τεχνολογιών υδρογόνου υπόσχεται σημαντικές συνεισφορές στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της οικονομίας, ενώ παράλληλα μειώνει την (αστική) ρύπανση και το συνολικό αποτύπωμα του άνθρακα και οδεύει προς την κυκλική οικονομία.

Οι βασικές, μη ανανεώσιμες τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου περιλαμβάνουν

- ✓ Την αεριοποίηση του άνθρακα.
- ✓ Την αναμόρφωση του φυσικού αερίου με ατμό.
- ✓ Τις πυρηνικές διεργασίες

Οι βασικές, ανανεώσιμες τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου περιλαμβάνουν

- ✓ Την αεριοποίηση της βιομάζας.
- ✓ Την ηλεκτρόλυση του νερού σε υψηλές θερμοκρασίες.
- ✓ Την **Ηλεκτρόλυση του νερού με τη χρήση «πράσινης» ηλεκτρικής ενέργειας.**

Το υδρογόνο διαθέτει την υψηλότερη ενεργειακή απόδοση ανά μονάδα μάζας, το οποίο είναι 2,75 φορές μεγαλύτερη από εκείνη των καυσίμων που προέρχονται από υδρογονάνθρακες. Συγκεκριμένα 1 kg υδρογόνου περιέχει την ίδια ποσότητα ενέργειας με 2,1 kg φυσικού αερίου ή 2,8 kg βενζίνης.

Το υδρογόνο αποτελεί φορέα ενέργειας, όπως είναι και το ηλεκτρικό ρεύμα, και όχι μια πρωταρχική πηγή ενέργειας και πρέπει να παραχθεί από κάποια άλλη πηγή ενέργειας. Η ηλεκτρόλυση, η οποία χρησιμοποιεί συνεχές ρεύμα για να διασπάει το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο, θα μπορούσε να είναι μια πιθανή τεχνολογία για την παραγωγή υδρογόνου, χωρίς μόλυνση του περιβάλλοντος. Το παραγόμενο υδρογόνο μπορεί να θεωρηθεί ως καθαρός και «πράσινος» φορέας ενέργειας μόνο όταν χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τότε. Αν το ηλεκτρικό ρεύμα που απαιτείται από τη συσκευή ηλεκτρόλυσης προέρχεται από ορυκτά καύσιμα δεν προσδίδει κανένα πλεονέκτημα έναντι του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται απευθείας από τα ορυκτά καύσιμα.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα της ηλεκτρόλυσης είναι ότι απαιτεί μια αρκετή μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Σε ένα ιδανικό σύστημα, απαιτούνται 3.9 kWh ηλεκτρικής ενέργειας και ένα λίτρο καθαρού νερού, για τη παραγωγή 0.111 kg υδρογόνου. Οι τυπικές εμπορικές συσκευές ηλεκτρόλυσης του νερού έχουν απόδοση που κυμαίνεται μεταξύ 55 και 75%, το οποίο αντιστοιχεί σε 5.6 kWh ηλεκτρικού ρεύματος για την παραγωγή 0.111 kg υδρογόνου.

Η διάσπασή του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο, είναι μια αντιστρεπτή διεργασία. Τα δύο αυτά αέρια μπορούν να αντιδράσουν σχηματίζοντας νερό, χρησιμοποιώντας μια κυψελίδα καυσίμου, με την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας ως υποπροϊόντα. Αλλά εδώ είναι και η παγίδα: τα 0.111 kg υδρογόνου περιέχουν 3.7 kWh ενέργειας που μπορεί να μετατραπεί μόνο σε 1.8 kWh ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω μιας κυψελίδας καυσίμου (απόδοση μετατροπής ~50%).

Σήμερα, περίπου 4% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου προέρχεται από την ηλεκτρόλυση του νερού. Αυτή η διεργασία είναι ήδη οικονομικά αποδοτική για την παραγωγή υπερ-καθαρού υδρογόνου σε μικρές ποσότητες, αλλά παραμένει ακριβή για εφαρμογές μεγαλύτερης κλίμακας, λόγω κυρίως της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζεται και αναλύεται η διεργασία και οι θεωρητικές αρχές μιας μονάδας η οποία μπορεί να χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό ρεύμα από φωτοβολταϊκό κύτταρο για την παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης του νερού και την χρήση του υδρογόνου, στην συνέχεια, για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος σε μια κυψέλη καυσίμου.

### 3 Θεωρία

#### 3.1 Αρχή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού κύτταρο (ΦΚ)

Οι απαραίτητες γνώσεις για την θεωρία περιέχονται στις σημειώσεις «[Φωτοβολταϊκό Κύτταρο](#)» του εργαστηρίου φυσικής, και στο προπτυχιακό μάθημα Φυσική II του Τμήματος.

Η πιο σημαντική παράμετρος του φωτοβολταϊκού κυττάρου είναι η **απόδοσή** του  $\epsilon_{\Phi K}$ , η ικανότητά του δηλαδή να μετατρέπει τη φωτεινή ενέργεια σε ηλεκτρική. Ορίζεται από τον λόγο

$$\epsilon_{\Phi K} = P_{\Phi K\_out}/P_{\Phi K\_in} \quad (1)$$

όπου  $P_{\Phi K\_out}$  είναι η μέγιστη παραγόμενη ισχύς (Maximum Produced Power, MPP) του κυττάρου και  $P_{\Phi K\_in}$  είναι η προσπίπτουσα ισχύς της φωτεινής ακτινοβολίας.

Στην παρούσα άσκηση χρησιμοποιείται μια λυχνία ως πηγή φωτισμού. Αν δεν υπάρχει μια διαθέσιμη συσκευή για τη μέτρηση της έντασης της ακτινοβολίας του, ορίζεται η προσπίπτουσα ισχύς του φωτός ως εξής:

Υποθέτοντας ότι το κύτταρο βομβαρδίζεται με φως και παράγεται το «φωτορεύμα»  $I_{\Phi K}$  το οποίο εξαρτάται μόνο από την ένταση και το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός, μπορεί να θεωρηθεί το ρεύμα βραχυκυκλώματος,  $I_{SC}$  (μέγιστο ρεύμα φωτονίου) ως μια ποσότητα ανάλογη της προσπίπτουσα ισχύος του φωτός. Για να προσδιοριστεί τελικά η προσπίπτουσα ισχύς του φωτός πρέπει να πολλαπλασιαστεί η τιμή του μετρούμενου ρεύματος βραχυκυκλώματος με έναν παράγοντα  $\Pi$  που υπολογίζεται ως εξής:

Η μέγιστη τιμή της έντασης της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τις ηλιόλουστες ημέρες παίρνει την τιμή  $1000 \text{ Wm}^{-2}$ . Η μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκυκλώματος,  $I_{SC}$  (η οποία καθορίζεται από τον κατασκευαστή σε τυπικές συνθήκες δοκιμής, προφανώς λιακάδας,  $SC = short\ circuit$ ) ανέρχεται σε  $I_{SC} = 350 \text{ mA}$ . Επομένως μπορούμε να ορίσουμε την παράμετρο  $\Pi$  ως

$$\Pi = \frac{1000 \text{ Wm}^{-2}}{350 \text{ mA}} = 2,86 \text{ Wm}^{-2}\text{mA}^{-1} \quad (2)$$

Έτσι η προσπίπτουσα ισχύς του φωτός  $P_{\Phi K-in}$  στην παρούσα άσκηση μπορεί να υπολογισθεί από την

$$P_{\Phi K-in} = \Pi \cdot A \cdot I_{SC} \quad (3)$$

όπου  $A$  είναι η ενεργή επιφάνεια του φωτοβολταϊκού κυττάρου.

#### 3.2 Βασικές Αρχές της ηλεκτροχημείας

Ηλεκτρόδιο καλούμε μια διαχωριστική επιφάνεια μέταλλο-ηλεκτρολύτη, το οποίο διαθέτει δύο σημαντικές ιδιότητες (δείτε την άσκηση «[Ηλεκτροανάλυση](#)», εργαστήριο φυσικοχημείας):

- (α) την εκτέλεση μίας μη αυθόρμητης χημικής αντίδρασης με την χρήση ηλεκτρικού ρεύματος που διέρχεται μέσα από αυτό και καλείται ηλεκτρολυτικό στοιχείο (σε αυτή την άσκηση το ηλεκτρολυτικό κελί = electrolyzer) ή
- (β) την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος σε αυτό με την εκτέλεση μίας αυθόρμητης χημικής αντίδρασης και καλείται γαλβανικό στοιχείο (σε αυτή την άσκηση η κυψέλη καυσίμου = fuel cell).

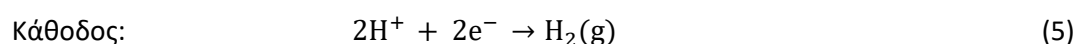
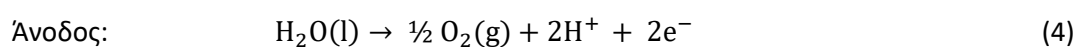
Στον Πίνακα 1 παρατίθενται κύριες διαφορές και ομοιότητες μεταξύ ηλεκτρολυτικού και γαλβανικού στοιχείου.

**Πίνακας 1:** Κύριες διαφορές και ομοιότητες μεταξύ ηλεκτρολυτικού και γαλβανικού στοιχείου

ηλεκτρολυτικό στοιχείο	γαλβανικό στοιχείο
Αποτελείται γενικά από δύο διαφορετικά μέταλλα συνδεδεμένα με γέφυρα άλατος, ή μεμονωμένα ημιστοιχεία που διαχωρίζονται με πορώδη μεμβράνη.	
κίνηση ηλεκτρονίων στο εξωτερικό κύκλωμα και κίνηση ιόντων στον ηλεκτρολύτη (ο ηλεκτρολύτης μπορεί να είναι σε υγρή ή στερεή μορφή)	
το γαλβανικό στοιχείο μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρολυτικό με την πρόσθεση μιας εξωτερικής ηλεκτρικής πηγής (π.χ. μπαταρία, φωτοβολταϊκό κύτταρο)	
Για να γίνει μια αντίδραση, η τάση της εξωτερικής πηγής πρέπει να είναι λίγο μεγαλύτερη από το δυναμικό (την τάση του στοιχείου, ΗΕΔ).	Η κινητήρια δύναμη των αντιδράσεων είναι η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων.
πραγματοποιείται μια μη αυθόρμητη οξειδοαναγωγική αντίδραση ( $\Delta G > 0$ ) με μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική	πραγματοποιείται μια αυθόρμητη οξειδοαναγωγική αντίδραση ( $\Delta G < 0$ ) με μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική
Το ηλεκτρόδιο (άνοδος) με τη μεγαλύτερη αλγεβρική τιμή δυναμικού συνδέεται με το θετικό πόλο της πηγής της πηγής.	Η άνοδος είναι το ηλεκτρόδιο όπου λαμβάνει χώρα η οξείδωση (απώλεια ηλεκτρονίων). Η άνοδος συνδέεται με τον αρνητικό ακροδέκτη του βολτόμετρου/αμπερομέτρου.
Το ηλεκτρόδιο (κάθοδος) με τη μικρότερη αλγεβρική τιμή δυναμικού συνδέεται με τον αρνητικό πόλο της πηγής.	Η κάθοδος είναι το ηλεκτρόδιο όπου λαμβάνει χώρα η αναγωγή (εισοδή των ηλεκτρονίων). Η κάθοδος συνδέεται με τον θετικό ακροδέκτη του βολτόμετρου/αμπερομέτρου.

### 3.3 Αρχή λειτουργίας του ηλεκτρολυτικού κελιού (ΗΚ)

Η αρχή της ηλεκτρόλυσης που βασίζεται στις κυψέλες τύπου PEM (polymer electrolyte membrane) περιγράφεται στις παρακάτω Εξισώσεις

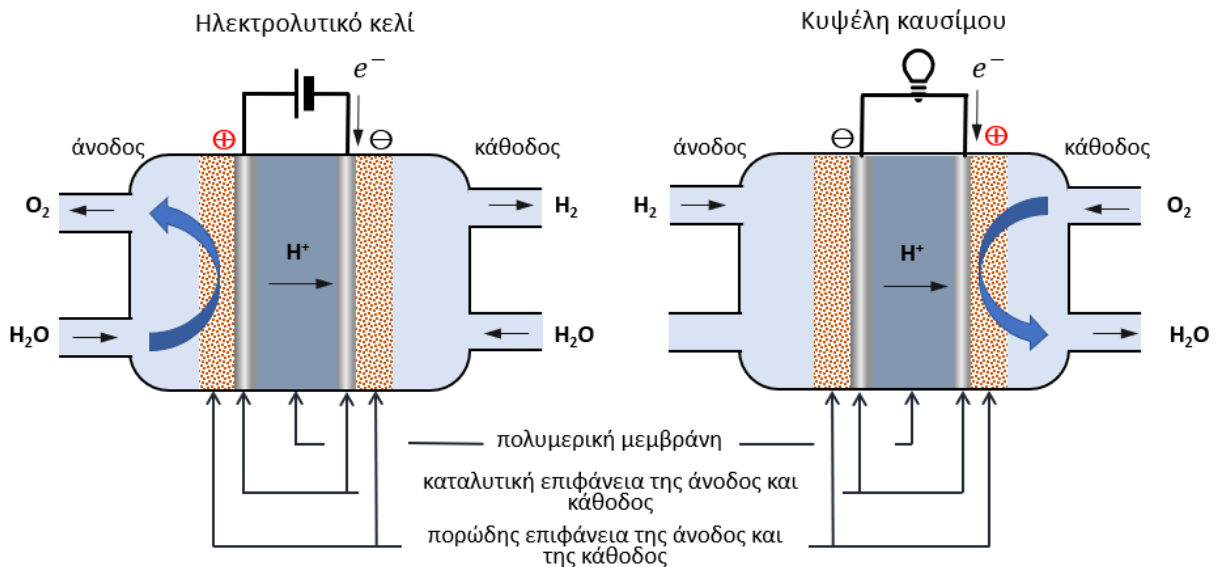




Πιο αναλυτικά: το νερό εισάγεται στο κελί από την άνοδο σε υγρή μορφή (Σχήμα 1, αριστερά). Κατά την διάχυση, το νερό φτάνει στην καταλυτική επιφάνεια της ανόδου μέσω της πορώδους επιφάνειας και οξειδώνεται σε πρωτόνια, ηλεκτρόνια και οξυγόνο (Εξίσωση 4). Το παραγόμενο οξυγόνο μεταφέρεται μέσω της ανοδικής πορώδους επιφάνειας και απομακρύνεται από το κελί. Τα παραγόμενα πρωτόνια της αντίδραση μεταφέρονται από την άνοδο μέσω της μεμβράνης στην καθοδική καταλυτική επιφάνεια όπου και παράγεται το μοριακό υδρογόνο μέσω αναγωγής (Εξίσωση 5). Το παραγόμενο υδρογόνο απομακρύνεται από το κελί μέσω της πορώδους επιφάνειας της καθόδου. Η κίνηση των πρωτονίων διαμέσου της μεμβράνης συνοδεύεται από μια παράλληλη μεταφορά νερού ως αποτέλεσμα της ηλεκτρωσμωτικής παράσυρσης. Η συνολική αντίδραση είναι το άθροισμα των δύο ημιαντιδράσεων (Εξίσωση 6).



Οι PEM συσκευές ηλεκτρόλυσης μπορούν να σχεδιαστούν για να λειτουργούν σε πιέσεις μέχρι αρκετές εκατοντάδες bar. (Εξετάστε αυτήν την δυνατότητα. Γιατί είναι ωφέλιμο να λειτουργεί το ηλεκτρολυτικό κελί υπό πίεση;).



**Σχήμα 1:** Διατομή ενός ηλεκτρολυτικού κελιού PEM (αριστερά), και μίας κυψέλης καυσίμου (δεξιά) αποτελούμενο από μια πολυμερική μεμβράνη επικαλυπτόμενη από ανοδικές και καθοδικές ηλεκτροκαταλυτικές επιφάνειες (electrocatalyst) και μια πορώδη επιφάνεια (gas diffusion layer).

Στον Πίνακα 2 παρατίθενται οι κύριες διαφορές και ομοιότητες μεταξύ ενός ηλεκτρολυτικού κελιού και μίας κυψέλης καυσίμου.

**Πίνακας 2:** Κύριες διαφορές και ομοιότητες μεταξύ ηλεκτρολυτικού κελιού και κυψέλης καυσίμου

ηλεκτρολυτικό κελί (PEM)	Κυψέλη καυσίμων (PEM)
Αποτελείται γενικά από δύο διαφορετικές ηλεκτροκαταλυτικές επιφάνειες που έρχονται σε άμεση επαφή με μια πολυμερική μεμβράνη.	
κίνηση ηλεκτρονίων στο εξωτερικό κύκλωμα και κίνηση ιόντων ( $H^+$ ) στον ηλεκτρολύτη	
Η κυψέλη καυσίμων μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρολυτικό κελί με την πρόσθεση μιας εξωτερικής ηλεκτρικής πηγής συνεχούς τάσης (π.χ. μπαταρία, φωτοβολταϊκό κύτταρο).	
πραγματοποιείται μη αυθόρμητη διάσπαση του νερού (ηλεκτρόλυση) σε $H_2$ και $O_2$ ( $\Delta G < 0$ ) με μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική	πραγματοποιείται αυθόρμητη οξείδωση του υδρογόνου και αναγωγή οξυγόνου ( $\Delta G > 0$ ) με μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική
η τάση της εξωτερικής πηγής πρέπει να είναι λίγο μεγαλύτερη από το δυναμικό της αντίδρασης	η κινητήρια δύναμη των αντιδράσεων είναι η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο ηλεκτρόδιων.
Ο θετικός πόλος της πηγής αντλεί ηλεκτρόνια από την άνοδο στην οποία πραγματοποιείται η οξείδωση. $H_2O(l) \rightarrow \frac{1}{2} O_2(g) + 2H^+ + 2e^-$	Η άνοδος (αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο) είναι το ηλεκτρόδιο όπου λαμβάνει χώρα η οξείδωση (απώλεια ηλεκτρονίων): $H_2(g) + 2e^- \leftrightarrow 2H^+$ Η άνοδος συνδέεται με τον αρνητικό ακροδέκτη του καταναλωτή.
Η κάθοδος στην οποία πραγματοποιείται η αναγωγή συνδέεται με τον αρνητικό πόλο της πηγής, και τροφοδοτείται με ηλεκτρόνια από αυτήν. $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2(g)$	Η κάθοδος (θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο) είναι το ηλεκτρόδιο όπου λαμβάνει χώρα η αναγωγή (αύξηση των ηλεκτρονίων): $\frac{1}{2} O_2(g) + 2H^+ + 2e^- \leftrightarrow H_2O(l)$ Η κάθοδος συνδέεται με τον θετικό ακροδέκτη του καταναλωτή.

### 3.3.1 Δομή του ηλεκτρολυτικού κελιού (HK)

Η παρακάτω περίληψη της δομής του ηλεκτρολυτικού κελιού PEM ισχύει και για τις κυψέλες καυσίμου τύπου PEM. Τα ηλεκτρολυτικά κελία PEM και οι κυψέλες καυσίμου PEM διαφέρουν γενικά μόνο ως προς την εφαρμογή και τη λειτουργία τους (Σχήμα 1).

Οι PEM συσκευές χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο Nafion<sup>®</sup> ως πολυμερικό ηλεκτρολύτη (Σχήμα 1). Είναι αναγκαίο η μεμβράνη να διατηρείται ενυδατωμένη για την εξασφάλιση της ιονικής αγωγιμότητας ( $H^+$ ).

Τα κύρια λειτουργικά χαρακτηριστικά που καθιστούν μια μεμβράνη ικανή για χρήση είναι

- Να παρουσιάζουν υψηλή πρωτονιακή αγωγιμότητα
- Μηδενική ηλεκτρονική αγωγιμότητα και
- Χαμηλή διαπερατότητα στα αέρια ( $H_2$  κα  $O_2$ )

Οι PEM συσκευές χρησιμοποιούν για ηλεκτρολύτη αποκλειστικά ενυδατωμένη μεμβράνη. Η βασική τους μορφή αποτελείται από μια μεμβράνη στις δυο πλευρές της οποίας εναποτίθενται τα ηλεκτρόδια και τα στρώματα διάχυσης των αέριων, δημιουργώντας έτσι μια συστοιχία άνοδο/ηλεκτρολύτη/κάθοδο για την οποία χρησιμοποιείται η ονομασία ΜΕΑ .

Τα ηλεκτρόδια των PEM διατάξεων βρίσκονται πλήρως διεσπαρμένα σε στρώματα διάχυσης αερίου (gas diffusion layer, GDL):

- ✓ Παρέχουν στην ΜΕΑ την απαιτούμενη μηχανική σταθερότητα.
- ✓ Επιτρέπουν την διάχυση του προϊόντος ή αντιδρώντος αερίου και του νερού.
- ✓ Αποτελούν δίοδο για την ροή των ηλεκτρονίων από και προς τα καταλυτικά στρώματα.

Το καταλυτικό στρώμα βρίσκεται σε επαφή τόσο με το στρώμα διάχυσης αερίου όσο με την ηλεκτρολυτική μεμβράνη, ώστε και τα είδη που συμμετέχουν στην λειτουργία της διάταξης (H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub> και O<sub>2</sub>, τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια) να μπορούν να έρθουν σε επαφή με το καταλυτικό στρώμα.

Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας καθιστά αναγκαία την χρήση ευγενών ακριβών καταλυτών. Ο λευκόχρυσος είναι ο κύριος καταλύτης ο οποίος χρησιμοποιείται τόσο στην άνοδο όσο και στην κάθοδο λόγω της υψηλής ηλεκτροκαταλυτικής του ενεργότητας.

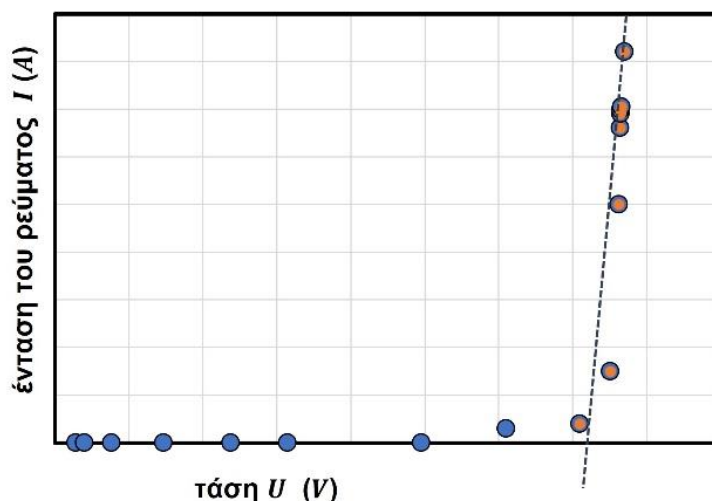
### 3.3.2 Καμπύλη $IU$ του ηλεκτρολυτικού κελιού (ΗΚ).

Ως αντιστρεπτό δυναμικό ( $U_{rev}$ ) ορίζεται η ελάχιστη τιμή τάσης που πρέπει να εφαρμοστεί για τη διάσπαση των μορίων του H<sub>2</sub>O και σχετίζεται με την ελεύθερη ενέργεια Gibbs,  $\Delta G$ . Σε πρότυπες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (25°C και 1 atm) το αντιστρεπτό δυναμικό συμβολίζεται με  $U_{rev}^o$  και υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση του Nernst

$$U_{rev}^o = \frac{\Delta G}{zF} \quad (7)$$

όπου,  $z$  αριθμός των ηλεκτρονίων που συμμετέχουν σε κάθε αντίδραση ( $n = 2$  στη περίπτωση του H<sub>2</sub>) και  $F$  η σταθερά του Faraday (96.485,33 C · mol<sup>-1</sup>).

Για να υπολογιστεί το ελάχιστο δυναμικό που απαιτείται για την ηλεκτρόλυση του νερού, θεωρείται η αντίδραση H<sub>2</sub>O(l) → H<sub>2</sub>(g) + 1/2O<sub>2</sub>(g) (Εξίσωση (6)). Η τιμή που θα εκτιμηθεί είναι προσεγγιστική, διότι δεν λαμβάνεται υπ' όψη η υπέρταση στην κάθοδο και στην άνοδο (δείτε την άσκηση «[Ηλεκτροανάλυση](#)», εργαστήριο φυσικοχημείας). Το Σχήμα 2 παρουσιάζει σχηματικά την καμπύλη  $IU$  ενός ηλεκτρολυτικού κελιού. Αυξάνοντας την τάση της πηγής μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά η τάση έναρξης της ηλεκτρόλυσης από το γραμμικό εύρος σε υψηλές εντάσεις του ρεύματος (η διακεκομμένη γραμμή η οποία τέμνει τον άξονα X της τάσης, τετμημένη).



Σχήμα 2: Σχηματική καμπύλη  $IU$  του ηλεκτρολυτικού κελιού.

Γενικά για να διεξαχθεί μια ηλεκτροχημική αντίδραση, σε ένα ηλεκτρολυτικό κελί, πρέπει η τάση που εφαρμόζεται εξωτερικά, να είναι τόση ώστε να είναι θερμοδυναμικά επιτρεπτή η διεξαγωγή της ολικής αντίδρασης και να υπερνικούνται τα φαινόμενα πόλωσης, και η ωμική αντίσταση του συστήματος. Για να είναι θερμοδυναμικά επιτρεπτή η ολική ηλεκτροχημική αντίδραση, πρέπει το εφαρμοζόμενο δυναμικό στους πόλους του κελιού να είναι τουλάχιστον ίσο και αντίθετο με τη διαφορά των δυναμικών ισορροπίας της καθοδικής και της ανοδικής αντίδρασης του κελιού. Όταν το δυναμικό του ηλεκτροδίου είναι ίσο με το δυναμικό ισορροπίας του, μπορούν να λάβουν χώρα μόνον αντιστρεπτές ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, δηλαδή αντιδράσεις στις οποίες όλα τα στάδια διεξάγονται χωρίς την παραμικρή παρεμπόδιση. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ωστόσο, ένα ή περισσότερα από τα στάδια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης παρεμποδίζονται, οπότε για να διεξαχθεί η αντίδραση και να περάσει από το σύστημα φαρανταϊκό ρεύμα, το εφαρμοζόμενο δυναμικό πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το δυναμικό ισορροπίας. Στην περίπτωση αυτή, η αντίδραση είναι μη-αντιστρεπτή και η διαφορά δυναμικού, που εφαρμόζεται από το δυναμικό ισορροπίας ονομάζεται υπέρταση.

Υπάρχουν δύο διακριτοί τύποι αποδοτικότητας για τη μέθοδο της ηλεκτρόλυσης, η Φαρανταϊκή απόδοση και η Ενεργειακή απόδοση, δείτε αναλυτικά παρακάτω.

### 3.3.3 Ενεργειακή απόδοση του ηλεκτρολυτικού κελιού, $\epsilon_{HK-\epsilon}$

Η ενεργειακή απόδοση,  $\epsilon_{HK-\epsilon}$ , ορίζεται ως το πηλίκο της ποσότητας ενέργειας που εμπεριέχεται στα προϊόντα με την ηλεκτρική ενέργεια που προσδίδεται στο σύστημα:

$$\epsilon_{HK-\epsilon} = \frac{E_{H_2}}{E_{\eta\lambda\epsilon\kappa}} = \frac{V_{H_2} \cdot \Delta H}{\bar{U} \cdot \bar{I} \cdot t} \quad (8)$$

όπου  $V_{H_2}$  ο παραγόμενος όγκος υδρογόνου,  $\Delta H$  η θερμιδική αξία του υδρογόνου\*,  $\bar{U}$  και  $\bar{I}$  ο μέσος όρος της τάσης και του ρεύματος στην διάρκεια της ηλεκτρόλυσης, και  $t$  ο χρόνος.

\* Η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την καύση μιας ουσίας (οξειδωση), ορίζεται ως θερμιδική αξία ή δύναμη,  $H_h$  (ανωτέρα θερμογόνος αξία, higher heating value). Η ανώτερη θερμογόνος δύναμη περιλαμβάνει και τη θερμότητα που ελευθερώνεται από τη συμπύκνωση του ατμού. Η ενέργεια αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συμβατικά συστήματα καύσης. Οπότε, διαμορφώνεται ένα επιπλέον μέγεθος που δεν περιλαμβάνει την ενέργεια

της συμπύκνωσης. Το μέγεθος αυτό λέγεται καθαρή ή κατώτερη θερμογόνος αξία ή δύναμη, H<sub>i</sub> και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόδοσης συστημάτων θέρμανσης, κινητήρων και κυψελών καυσίμου.

### 3.3.4 Φαρανταϊκή απόδοση του ηλεκτρολυτικού κελιού, $\epsilon_{HK-F}$

Χρησιμοποιώντας τον δεύτερο νόμο του *Faraday* και την καταστατική εξίσωση ιδανικών αερίων, θα καθοριστεί μια σχέση μεταξύ της έντασης του ρεύματος και της θεωρητικά παραγόμενης ποσότητας H<sub>2</sub> και O<sub>2</sub>. Η Φαρανταϊκή απόδοση είναι ο λόγος ανάμεσα στη θεωρητικά υπολογιζόμενη ποσότητα αερίου προς την πραγματικά παραγόμενη ποσότητα αερίου.

$$Q = I \cdot t = n \cdot z \cdot F \quad (9)$$

Η καταστατική εξίσωση ιδανικών αερίων είναι η ακόλουθη:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (10)$$

Με τον συνδυασμό των δύο παραπάνω (απαλοιφή του  $n$ ) εξισώσεων προκύπτει ο όγκος του παραγομένου αερίου ως ακολούθως:

$$V = \frac{R \cdot I \cdot T \cdot t}{F \cdot p \cdot z} \quad (11)$$

όπου  $V$  = όγκος θεωρητικά παραγόμενου αερίου, m<sup>3</sup>,  $R$  = παγκόσμια σταθερά των αερίων (ίση με 8,314 J · mol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>),  $p$  = πίεση (Pa),  $F$  = σταθερά του *Faraday* (ίση με 96485 C · mol<sup>-1</sup>),  $T$  = η απόλυτη θερμοκρασία (K),  $I$  = μετρούμενο ρεύμα (A),  $t$  = χρόνος (s),  $Q$  = ηλεκτρικό φορτίο (C),  $n$  = ποσότητα ουσίας (mol),  $z$  = αριθμός ηλεκτρονίων που απαιτούνται για τον διαχωρισμό ενός μορίου, (π.χ.  $z(\text{H}_2) = 2$ , δηλαδή 2 ηλεκτρόνια απαιτούνται για την παραγωγή ενός μοριακού H<sub>2</sub>,  $z(\text{O}_2) = 4$  δηλαδή 4 ηλεκτρόνια απαιτούνται προκειμένου να παραδοθεί ένα O<sub>2</sub>).

Η Φαρανταϊκή απόδοση προκύπτει από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\epsilon_{KK-F} = \frac{V_{\text{H}_2}(\text{πραγματικού})}{V_{\text{H}_2}(\text{θεωρητικού})} \quad (12)$$

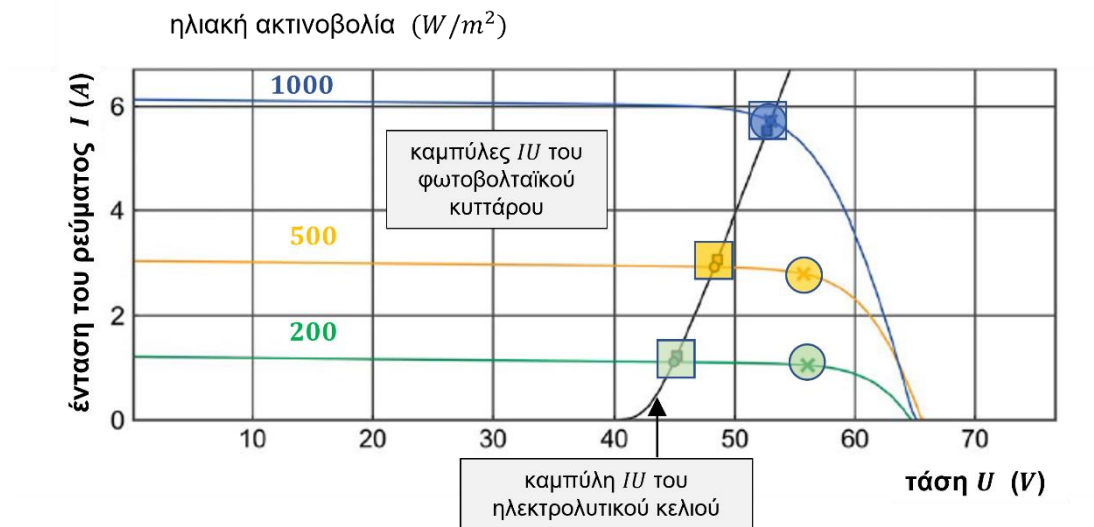
Η ποσότητα του υδρογόνου που παράγεται στην πραγματικότητα είναι μικρότερη από την θεωρητική που υπολογίζετε. Μπορείτε να σκεφτείτε το γιατί;

**Πρώτος νόμος του Faraday.** Η μάζα της ουσίας που αποτίθεται σε κάθε ηλεκτρόδιο είναι ανάλογη της ποσότητας του ηλεκτρισμού (ηλεκτρικού φορτίου) που διέρχεται από τον ηλεκτρολυτικό αγωγό.

**Δεύτερος νόμος του Faraday.** Οι μάζες των διαφορετικών ιόντων που αποτίθενται στα ηλεκτρόδια κατά τη δίοδο της ίδιας ποσότητας ηλεκτρισμού (ηλεκτρικού φορτίου) είναι χημικά ισοδύναμες, είναι δηλαδή ανάλογες προς τα γραμμοϊσοδύναμα ( $g\text{-eq}$ ) αυτών.

### 3.3.5 Απώλειες σύζευξης (coupling losses)

Το Σχήμα 3 παρουσιάζει τρεις καμπύλες  $IU$  ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού (π.χ. αλλαγή της ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια της ημέρας). Τα ιδανικά σημεία MPP (Maximum Power Point = σημείο μέγιστης ισχύος) υποδεικνύονται με «κυκλάκια» στην κάθε καμπύλη. Το γράφημα παρουσιάζει επίσης την καμπύλη  $IU$  του ηλεκτρολυτικού κελιού, η οποία τέμνει τις τρεις καμπύλες  $IU$  του ΦΚ σε διαφορετικά σημεία και αντιπροσωπεύει το σημείο λειτουργίας (OP) του ΗΚ. Τα τρία αυτά σημεία υποδεικνύονται με «τετραγωνάκια» στην κάθε καμπύλη.



**Σχήμα 3:** Καμπύλες  $IU$  ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού επικαλυμμένες με την καμπύλη  $IU$  του ηλεκτρολυτικού κελιού [ ].

Προφανώς η ικανότητά του ΦΚ δηλαδή να μετατρέπει τη φωτεινή σε ηλεκτρική ενέργεια γίνεται μεγαλύτερη όσο αυξάνει η απόδοση του φωτός, π.χ. το γράφημα δείχνει την μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκυκλώματος,  $I_{SC}$  στα  $1000 W \cdot m^{-2}$  να ανέρχεται σε  $I_{SC} \sim 6 A$  (ενώ η αντίστοιχη τιμή στα  $500 W \cdot m^{-2}$  είναι  $I_{SC} \sim 3 A$ , και στα  $200 W \cdot m^{-2}$  μόλις  $I_{SC} \sim 1,2 A$ ). Επίσης, για την υψηλότερη ακτινοβολία, το σημείο MPP του ΦΚ συμπίπτει με το σημείο λειτουργίας (OP - operation point) του ΗΚ. Για χαμηλότερες ακτινοβολίες, αυτή η συμπεριφορά αλλάζει και η καμπύλη του ΗΚ τέμνει τις καμπύλες  $IU$  του ΦΚ σε χαμηλότερη τάση (και ρεύμα). Ως αποτέλεσμα, εμφανίζονται απώλειες ισχύος (coupling losses - απώλειες σύζευξης) επειδή χρησιμοποιείται μόνο ένα μέρος της μέγιστης ισχύος εξόδου. Αυτές οι απώλειες οδηγούν στον ορισμό της απόδοσης σύζευξης:

$$\varepsilon_{\Phi K/HK} = \frac{P_{OP}}{P_{MMP}} \quad (13)$$

όπου το  $P_{OP}$  είναι η ισχύς λειτουργίας (OP – operation point) και  $P_{MMP}$  η μέγιστη ισχύς.

### 3.4 Αρχή λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου

Ο κυριότερος και ευρέως διαδομένος τύπος κυψέλη καυσίμου είναι ο τύπος PEM με θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας 10 – 80°C και χρησιμοποιούν υγρά (π.χ. αλκοόλες) ή αέρια (π.χ. H<sub>2</sub>) καύσιμα. Το οξειδωτικό μέσο είναι αέριο οξυγόνο ή ατμοσφαιρικός αέρας (20%κ.ο. O<sub>2</sub> σε N<sub>2</sub>), δεξιά πλευρά του Σχήματος 1.

Η οξείδωση που λαμβάνει χώρα σε μια ΚΚ είναι η



Η οποία αποτελείται από της ημιαντηδράσεις



#### 3.4.1 Δομή της κυψέλης καυσίμου

Δείτε την παραπάνω ενότητα «3.3.1 Η δομή του ηλεκτρολυτικού κελιού (ΗΚ)».

#### 3.4.2 Αντιστρεπτή και αδιαβατική λειτουργία της κυψέλης καυσίμου

Το μέγιστο παραγόμενο έργο από μια ισόθερμη και αντιστρεπτή διεργασία είναι ίσο κατά απολυτή τιμή με την διαφορά της ελεύθερης ενεργείας Gibbs,  $\Delta G$ , μεταξύ των προϊόντων και των αντιδρώντων της αντίδρασης. Όταν η ΚΚ δεν διαρρέεται από ρεύμα, τότε το μέγιστο έργο που μπορεί να παραχθεί είναι

$$\Delta G = -z \cdot F \cdot U_{rev} \quad (14)$$

όπου  $n$  ο αριθμός των ηλεκτρονίων που παίρνουν μέρος στην οξείδωση ( $z = 2$ , όπως φαίνεται από τις ημιαντιδράσεις παραπάνω),  $F$  η σταθερά του Faraday και  $U_{rev}$  το θεωρητικό μέγιστο δυναμικό (αντιστρεπτό - reversible).

Θερμο-ουδέτερο δυναμικό ονομάζεται το δυναμικό το οποίο παράγεται κατά την αδιαβατική λειτουργία μιας ΚΚ

$$U_{th} = \frac{\Delta H^o}{zF} \quad (15)$$

όπου η μεταβολή της ενθαλπίας ( $\Delta H$ ) εκφράζει το ποσό της θερμότητας που παράγεται υπό σταθερή πίεση.

Το αντιστρεπτό δυναμικό ( $U_{rev}$ ) εξαρτάται από την θερμοκρασία της κυψέλης και τις μερικές πιέσεις του υδρογόνου ( $p_{H_2}$ ), του οξυγόνου ( $p_{O_2}$ ), και του νερού ( $p_{H_2O}$ ) και δίνεται για πίεση ίση με  $1 atm$  και θερμοκρασίες διαφορετικές των  $25^\circ C$  από την εξίσωση NERNST:

$$U_{rev} = U_{rev}^o + \frac{RT}{2F} \ln \frac{p_{H_2} \times p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \quad (16)$$

όπου  $U_{rev}^o$  το αντιστρεπτό δυναμικό σε πρότυπη θερμοκρασία  $T$  και πίεση, και  $R$  η σταθερά των αερίων.

### 3.4.3 Πραγματική λειτουργία της κυψέλης καυσίμου

Σε πραγματική λειτουργία η κυψέλη καυσίμου παράγει ηλεκτρική ενέργεια και το σύστημα διαρρέεται από ρεύμα. Το παραγόμενο δυναμικό ( $U$ ) είναι μικρότερο από τον αντιστρεπτό ( $U_{rev}$ ), και αυτή η διαφορά ονομάζεται υπέρταση ( $\eta$ ), εκφράζει γενικά απώλειες, τις οποίες περιγράφονται παρακάτω, και είναι ίση με:

$$\eta = U_{rev} - U \quad (17)$$

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται μια σχηματική καμπύλη δυναμικού – έντασης ρεύματος. Προσέξτε, ότι η απεικόνιση της καμπύλης έγινε σε ένα γράφημα που ο άξονας X αντιπροσωπεύει την ένταση και ο άξονας Y το δυναμικό (η τάση) στην οποία

- (1) διακρίνεται το θερμοουδέτερο δυναμικό ( $U_{th}$ ) σε σχέση με το αντιστρεπτό δυναμικό ( $U_{rev}$ ), το δυναμικό ανοικτού κυκλώματος (στο σημείο όπου η ένταση του ρεύματος  $I = 0$ ), και ισχύει ότι  $U_{th} > U_{rev}$ .
- (2) κατά μήκος της καμπύλης διακρίνονται τρεις περαιτέρω περιοχές :
  - a) Σε υψηλές τιμές του δυναμικού (σε χαμηλές τιμές των εντάσεων) ο ρυθμός των ηλεκτροκαταλυτικών αντιδράσεων είναι αργός, και στην άνοδο καθώς και στην κάθοδο, λόγω αργής μεταφοράς φορτίου. Οι απώλειες αυτές περιγράφονται με τον όρο «*υπέρταση ενεργοποίησης*».
  - b) Τα ηλεκτρόδια, ο ηλεκτρολύτης και οι επαφές ηλεκτροδίου-ηλεκτρολύτη αποτελούν συστατικά ενός ηλεκτρικού κυκλώματος και επομένως έχουν μη αμελητέα ωμική αντίσταση. Οι απώλειες αυτές περιγράφονται με τον όρο «*ωμική υπέρταση*».
  - c) Σε χαμηλές τιμές του δυναμικού (ψηλές τιμές των εντάσεων) εμφανίζονται απώλειες οι οποίες περιγράφονται με τον όρο «*υπέρταση συγκέντρωσης*». Οι απώλειες οφείλονται σε αργή μεταφορά μάζας (από την αέρια φάση στις επαφές ηλεκτροδίου-ηλεκτρολύτη) και σε αργή διάχυση των αντιδρώντων και προϊόντων προς και από τα ηλεκτρόδια.

Θεωρούμε έτσι ότι η υπέρταση  $\eta$  αποτελείται από την υπέρταση ενεργοποίησης ( $\eta_{act}$ ), την ωμική υπέρταση ( $\eta_{\Omega}$ ) και την υπέρταση συγκέντρωσης ( $\eta_{conc}$ ):



$$\eta = \eta_{act} + \eta_{\Omega} + \eta_{conc} \quad (18)$$



**Σχήμα 4:** Σχηματική καμπύλη δυναμικού – έντασης ρεύματος μιας κυψέλης καυσίμου.

- Για μια κυψέλη καυσίμου PEM, η *υπέρταση ενεργοποίησης* ( $\eta_{act}$ ) προκαλεί σημαντικές απώλειες εξαιτίας της χαμηλής λειτουργικής θερμοκρασίας (25 – 80°C). Προκειμένου να αποφευχθούν αυτές οι απώλειες, πρέπει να αυξάνεται η ηλεκτρολυτική ενεργότητα της ανόδου καθώς και της καθόδου.
- Προκειμένου να μειωθεί η τιμή της *ωμικής υπέρτασης* ( $\eta_{\Omega}$ ), είναι απαραίτητη η χρήση πολύ αγώγιμου ηλεκτρολύτη μικρού πάχους καθώς και η χρήση πολύ αγώγιμων ηλεκτροδίων τα οποία να έχουν καλή μηχανική και ηλεκτρική συνοχή με τον ηλεκτρολύτη.
- Η *υπέρταση συγκέντρωσης* ( $\eta_{conc}$ ) προκαλεί σημαντικές απώλειες εξαιτίας της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας για μια κυψέλη καυσίμου PEM. Γενικά, σε χαμηλές θερμοκρασίες οι τιμές της αέριας και της επιφανειακής διαχυτότητας είναι μικρότερες. Η χρήση πορωδών ηλεκτροδίων, που διευκολύνουν διάχυση των αντιδρώντων και προϊόντων προς και από τα ηλεκτρόδια, είναι απαραίτητη.

#### 3.4.4 Ενεργειακή απόδοση της κυψέλης καυσίμου, $\varepsilon_{KK-\varepsilon}$

Η θερμοδυναμική απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου εκφράζεται ως λόγος του παραγόμενου έργου  $W$  προς την συνολικά διαθέσιμη ενέργεια (θερμική ενέργεια του καυσίμου),  $-\Delta H^{\circ}$ :

$$\varepsilon_{th} = \frac{W}{-\Delta H^o} = \frac{U}{U_{th}} = \frac{\Delta G}{\Delta H^o} \cdot \frac{U}{U_{rev}} \quad (18)$$

Η ιδανική (ή αντιστρεπτή) απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου ορίζεται ως λόγος της θεωρητικής ενέργειας που μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική,  $\Delta G$ , προς τη συνολική διαθέσιμη ενέργεια,  $\Delta H$ :

$$\varepsilon_{rev} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{U_{rev}}{U_{th}} \quad (19)$$

Η ηλεκτροχημική απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου εκφράζει τον λόγο του παραγόμενου έργου προς τη θεωρητικά μέγιστη ενέργεια που μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική (η οποία είναι ίση με  $\Delta G$ ):

$$\varepsilon_{KK-\varepsilon} = \frac{W}{-\Delta G} = \frac{U}{U_{rev}} \quad (20)$$

Η ηλεκτροχημική απόδοση είναι ίση με 100% όταν η κυψέλη δεν διαρρέεται από ρεύμα και ισχύει  $U = U_{rev}$ .

### 3.4.5 Φαρανταϊκή απόδοση της κυψέλης καυσίμου

Χρησιμοποιώντας τον δεύτερο νόμο του *Faraday* και την καταστατική εξίσωση ιδανικών αερίων, μπορεί να εξαχθεί μια εξίσωση που συνδέει την ποσότητα του καταναλισκόμενου αερίου στην κυψέλη και του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα. Δείτε αναλυτικά την ενότητα «3.3.4 Φαρανταϊκή απόδοση του ηλεκτρολυτικού κελιού,  $\varepsilon_{HK-F}$ »

Η Φαρανταϊκή απόδοση της κυψέλης καυσίμου είναι ο λόγος ανάμεσα στη θεωρητικά υπολογιζόμενη ποσότητα αερίου προς την πραγματικά καταναλισκόμενη ποσότητα αερίου.

Οπότε, η Φαρανταϊκή απόδοση προκύπτει από τις εξισώσεις (9) – (11)

$$\varepsilon_{KK-F} = \frac{V_{H_2}(\text{θεωρητικού})}{V_{H_2}(\text{πραγματικού})} \quad (21)$$

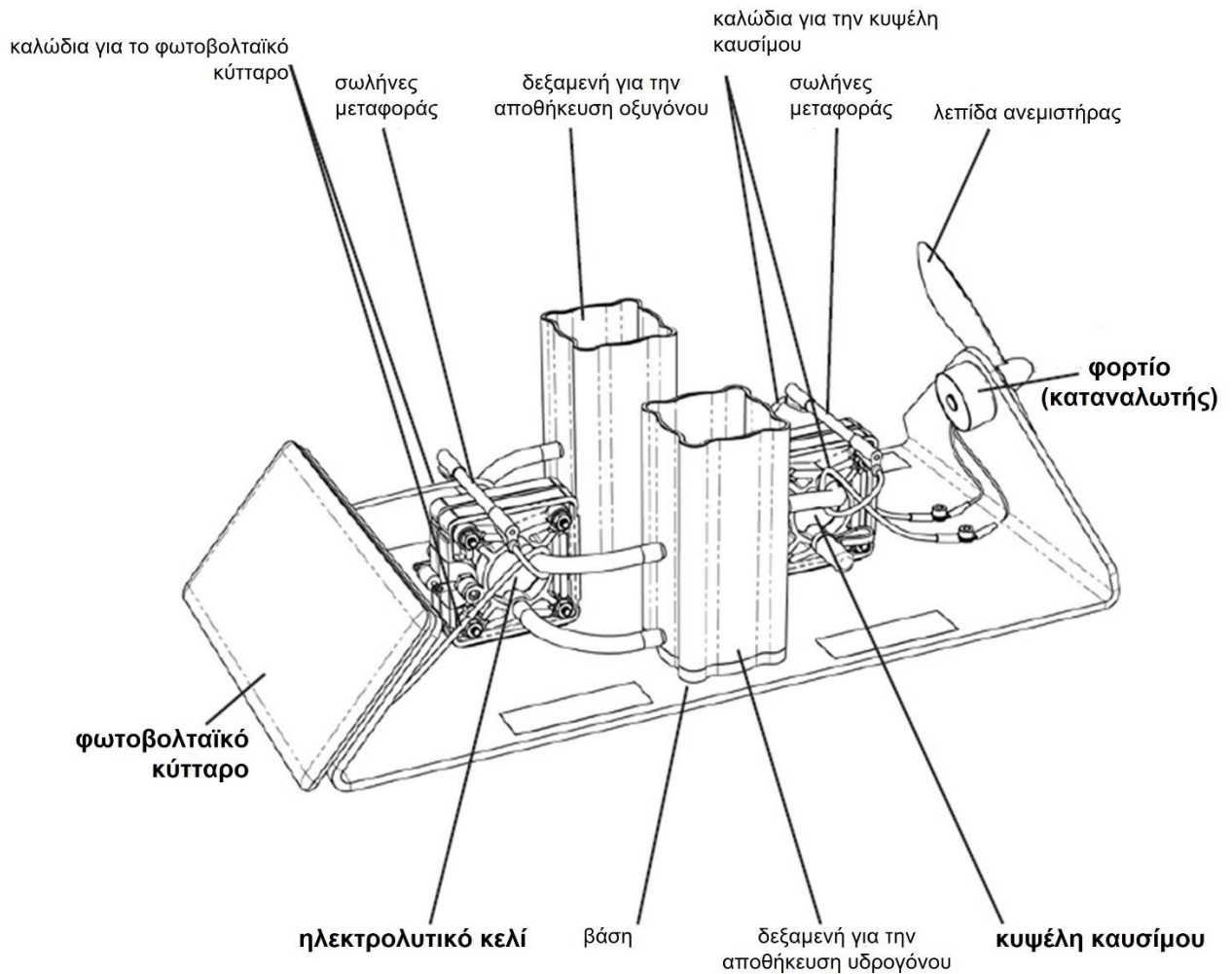
Η ποσότητα του υδρογόνου που καταναλώνεται στην πραγματικότητα είναι μεγαλύτερη από την θεωρητική που υπολογίζετε. Μπορείτε να σκεφτείτε το γιατί;

## 4 Πειραματική διάταξη

Με την παρακάτω πειραματική διάταξη της [h-tec](#) (Σχήμα 5) ο χρήστης μπορεί:

- Να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα από την χρήση μιας ανανεώσιμης πηγής, όπως ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο.
- Να παράγει και να αποθηκεύει υδρογόνο και οξυγόνο.

- Να καταγράψει την καμπύλη  $IU$  του φωτοβολταϊκού κυττάρου, του ηλεκτρολυτικού κελιού και της κυψέλης καυσίμου, ξεχωριστά για κάθε τμήμα



Σχήμα 5: Πειραματική διάταξη της [h-tec](#) [ ]

Τα κυριότερα μέρη της συσκευής είναι:

- Το φωτοβολταϊκό κύτταρο (Πηγή τάσης)
- Το ηλεκτρολυτικό κελί
- Η κυψέλη καυσίμου
- Το φορτίο (ανεμιστήρας)
- Οι δεξαμενές για την αποθήκευση υδρογόνου και οξυγόνου

### Απαραίτητα επιπλέον στοιχεία

- λυχνία για τη λειτουργία του ηλιακού πάνελ

- βολτόμετρο, για την μέτρηση συνεχής τάσης, αμπερόμετρο, για την μέτρηση της έντασης του ρεύματος, μεταβλητή αντίσταση, καλώδια
- χρονόμετρο
- απεσταγμένο νερό (Αγωγιμότητα γερού  $< 2 \mu\text{Scm}^{-1}$ )

#### Χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού κυττάρου

ενεργή ηλιακή επιφάνεια	56 cm <sup>2</sup>
τάση λειτουργίας	2 V
ένταση ρεύματος λειτουργίας	350 mA

#### Χαρακτηριστικά του ηλεκτρολυτικού κελιού (PEM)

Παραγωγή υδρογόνου	1 ml min <sup>-1</sup>
Παραγωγή οξυγόνου	0,5 ml min <sup>-1</sup>
Επιτρεπόμενη ένταση του ρεύματος	0 – 1,5 A
Επιτρεπόμενη τάση	0 – 2,0 V
Επιφάνεια ηλεκτροδίου	3,6 cm <sup>2</sup>

#### Χαρακτηριστικά της κυψέλης καυσίμου (PEM)

H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> ισχύς	580 – 640 mW (1,5 A)
Επιφάνεια ηλεκτροδίου	3,6 cm <sup>2</sup>
Επιτρεπόμενη τάση	0,45 – 0,96 V

## 5 Πειραματική διεργασία

### 5.1 Επίδειξη και εισαγωγή στην μονάδα με πλήρη λειτουργία των τμημάτων (demonstration mode)

Στόχος της επίδειξης είναι μια σύντομη εισαγωγή στην μονάδα h-tec, με όλα τα τμήματα σε λειτουργία.

- ✓ Αφαιρέστε τα επάνω δοχεία από της δυο δεξαμενές. Γεμίστε το κάτω μέρος των δύο δεξαμενών με απεσταγμένο νερό μέχρι την επάνω ένδειξη (= 0) στο δοχείο διαστολής.
- ✓ Ανοίξτε τους σφιγκτήρες των εύκαμπτων σωλήνων στην πλευρά της κυψέλης καυσίμου. Ο αέρας διαφεύγει από τις δεξαμενές αποθήκευσης. Η διαδικασία ολοκληρώνεται μόλις σταματήσει να πέφτει η στάθμη του νερού στις δεξαμενές. Στη συνέχεια, κλείστε ξανά τους σφιγκτήρες των σωλήνων.
- ✓ Συνδέστε το φωτοβολταϊκό κύτταρο με το ηλεκτρολυτικό κελί χρησιμοποιώντας τα καλώδια σύνδεσης. Δώστε προσοχή στην πολικότητα.

- ✓ Εστιάστε τη λυχνία επάνω στο φωτοβολταϊκό κύτταρο σε απόσταση ~ 60 cm μακριά από αυτό.
- ✓ Θέτοντας τη λυχνία σε λειτουργία, προσέξτε την δημιουργία φυσαλίδων στο ηλεκτρολυτικό κελί και την αποθήκευσή τους στις δεξαμενές.
- ✓ Περιμένετε περίπου 10 – 15 λεπτά για την παραγωγή και αποθήκευση 5 – 10 ml υδρογόνου.
- ✓ θέσετε τη λυχνία εκτός λειτουργίας.
- ✓ Συνδέστε τη κυψέλη καυσίμου με τον ανεμιστήρα χρησιμοποιώντας τα καλώδια σύνδεσης. Δώστε προσοχή στην πολικότητα.
- ✓ Ανοίξτε τους σφιγκτήρες των εύκαμπτων σωλήνων στην πλευρά της κυψέλης καυσίμου. Το υδρογόνο και το οξυγόνο διαφεύγουν σταδιακά από τις δεξαμενές αποθήκευσης.
- ✓ Τι παρατηρείτε;
- ✓ Περιμένετε μέχρι ο ανεμιστήρας να σταματήσει να περιστρέφεται.

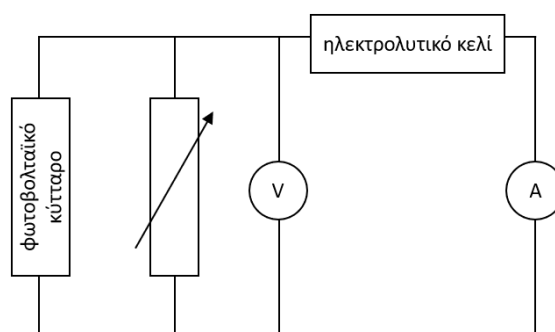
## 5.2 Μέρος 1 με βάση δεδομένων: Μέτρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης του φωτοβολταϊκού κυττάρου συναρτήσει της έντασης του φωτός, καμπύλες $IU$

Στόχος του μέρους 1 είναι ο προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης  $IU$  του φωτοβολταϊκού κυττάρου σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού.

Λεπτομέρειες (κατάστρωση κυκλώματος, τρόπος μέτρησης της τάσης και της έντασης του ρεύματος) για την πειραματική διάταξη βρίσκονται στις σημειώσεις του εργαστηρίου φυσικής.

## 5.3 Πειραματικό Μέρος 2: Προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης $IU$ του ηλεκτρολυτικού κελιού

Το ηλεκτρολυτικό κελί παράγει H<sub>2</sub> και O<sub>2</sub> μόνο όταν έχει ξεπεραστεί μια ορισμένη τιμή του συνεχούς ρεύματος, δηλαδή το δυναμικό της έναρξης της ηλεκτρόλυσης. Στόχος είναι η καταγραφή της χαρακτηριστικής καμπύλης  $IU$  του ΗΚ και ο γραφικός προσδιορισμός της ελάχιστης τάσης για την διάσπασή του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο.



**Σχήμα 6:** Ηλεκτρικό κύκλωμα για την μελέτη της χαρακτηριστικής ( $IU$ ) του ηλεκτρολυτικού κελιού με μη ελεγχόμενη πηγή τάσης

- ✓ Αφαιρέστε τα επάνω δοχεία από της δυο δεξαμενές. Γεμίστε το κάτω μέρος των δύο δεξαμενών με απεσταγμένο νερό μέχρι την επάνω ένδειξη ( $= 0$ ) στο δοχείο διαστολής.
- ✓ Ανοίξτε τους σφιγκτήρες των εύκαμπτων σωλήνων στην πλευρά της κυψέλης καυσίμου. Ο αέρας διαφεύγει από τις δεξαμενές αποθήκευσης. Η διαδικασία ολοκληρώνεται μόλις σταματήσει να πέφτει η στάθμη του νερού στις δεξαμενές. Στη συνέχεια, κλείστε ξανά τους σφιγκτήρες των σωλήνων.
- ✓ Πραγματοποιήστε τη σύνδεση που φαίνεται στο Σχήμα 6. Για αντίσταση χρησιμοποιήστε το κουτί μεταβλητής αντίστασης. Θυμηθείτε ότι:

Το αμπερόμετρο (A) συνδέεται πάντα σε σειρά στο κύκλωμα.

Το βολτόμετρο, (V) συνδέεται πάντα παράλληλα στα σημεία που θέλουμε να μετρήσουμε τη διαφορά δυναμικού.

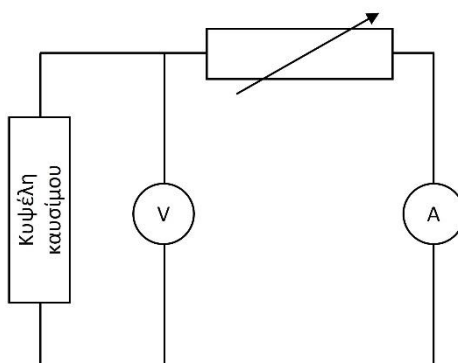
- ✓ Εστιάστε τη λυχνία επάνω στο φωτοβολταϊκό κύτταρο σε απόσταση  $\sim 60$  cm μακριά από αυτόν.
- ✓ Θέτοντας τη λυχνία σε λειτουργία, η μέτρηση της  $IU$  αρχίζει στο  $U = 0$  V (μηδενική αντίσταση).
- ✓ Αυξάνοντας την αντίσταση, αυξάνετε την τάση σε βήματα  $0.2 - 0.4$  V, και καταγράψτε την αντίσταση, την τάση και την ένταση του ρεύματος. Μεταξύ των μετρήσεων περιμένετε μέχρι να έχουν σταθεροποιηθεί οι τιμές για να λάβετε αντιπροσωπευτικές τιμές της τάσης και του ρεύματος.
- ✓ Προσέξτε και καταγράψτε επίσης την τάση από την οποία αρχίζει η δημιουργία φυσαλίδων στο ηλεκτρολυτικό κελί (και η αποθήκευσή των προϊόντων στις δεξαμενές).
- ✓ Όταν έχετε φτάσει στην μεγαλύτερη αντίσταση (και προφανώς στην μεγαλύτερη τάση) θέστε το χρονόμετρο σε λειτουργία και παρακολουθείστε άμεσα την διαδικασία του παρακάτω τρίτου πειραματικού μέρους.

#### 5.4 Πειραματικό Μέρος 3: Προσδιορισμός του ρυθμού παραγωγής υδρογόνου και οξυγόνου.

Στόχος του μέρους 3 είναι ο προσδιορισμός του ρυθμού παραγωγής υδρογόνου και οξυγόνου σε βέλτιστες συνθήκες.

- ✓ Με σταθερή μέγιστη αντίσταση καταγράψτε τον χρόνο, την τάση και την ένταση του ρεύματος, και τον αποθηκευμένο όγκο υδρογόνου και οξυγόνου στις δεξαμενές για περίπου 20 – 30 λεπτά.
- ✓ Θέστε τη λυχνία εκτός λειτουργίας.

#### Πειραματικό Μέρος 4: Προσδιορισμός της απόδοσης της κυψέλης καυσίμου και η χαρακτηριστική καμπύλης $IU$ της.



**Σχήμα 7:** Ηλεκτρικό κύκλωμα για την μελέτη της χαρακτηριστικής ( $IU$ ) της κυψέλης καυσίμου.

- ✓ Πραγματοποιήστε τη σύνδεση που φαίνεται στο Σχήμα 7. Για αντίσταση χρησιμοποιήστε το κουτί μεταβλητής αντίστασης.
- ✓ Η καταγραφή της χαρακτηριστικής  $IU$  γίνεται από την μέγιστη τιμή της αντίστασης (μέγιστη τάση) μειώνοντας την τάση σε βήματα 0.2 – 0.4 V. Καταγράψτε την αντίσταση, την τάση και την ένταση του ρεύματος. Μεταξύ των μετρήσεων περιμένετε μέχρι να έχουν σταθεροποιηθεί οι τιμές για να λάβετε αντιπροσωπευτικές τιμές της τάσης και του ρεύματος.

## 6 Επεξεργασία αποτελεσμάτων – ζητούμενα της άσκησης

Κάθε ομάδα παραδίδει μια έκθεση, η οποία περιλαμβάνει

- a. το αρχείο EXCEL και
- b. το υπόλοιπο γραπτό (με τις γραφικές παραστάσεις!) σε μορφή pdf.

ακολουθώντας τις γενικές οδηγίες που έχουν δοθεί στις [Οδηγίες για το Εργαστήριο Διεργασιών I](#). Η τελική μορφή των κειμένων που θα δημοσιευθούν θα πρέπει να ακολουθεί πιστά τις οδηγίες συγγραφής που δίνονται στο παράδειγμα ([πρότυπο για την έκθεση](#)).

Παρακαλώ, **ΜΗ συμπιέστε** τα δύο αρχεία σε ένα (ούτε rar ούτε zip). Έχετε την δυνατότητα να ανεβάστε δυο αρχεία καθώς για τις ατομικές και ομαδικές εργασίες (Μέγιστο μέγεθος αρχείου: 100M).

Κάθε έκθεση ελέγχεται για λογοκλοπή με το πρόγραμμα [Turnitin](#). Σε περίπτωση [λογοκλοπής](#) άνω του 30%, η έκθεση θα αξιολογηθεί με 0/10.

### Ζητούνται τα ακόλουθα στην ενότητα της Θεωρίας (δύο σελίδες):

- (1) Υπάρχουν πολλοί τρόποι παραγωγής του υδρογόνου ώστε στην συνέχεια να χρησιμοποιηθεί σαν καύσιμο. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται η «χρωματική ταξινόμηση του υδρογόνου» (*colour classification of hydrogen*). Κάθε «χρώμα» αντιστοιχεί σε μια διαφορετική διαδικασία παραγωγής. Ποια χρώματα χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση της πηγής υδρογόνου; Δώστε μια σύντομη επισκόπηση (κατά προτίμηση έναν πίνακα) με χαρακτηριστικά όπως το κόστος, το επίπεδο παραγωγής και τις περιβαλλοντικές πτυχές.
- (2) Να κατασκευαστεί από το Σχήμα 4 της πειραματικής διάταξης ένα διάγραμμα ροής το οποίο περιλαμβάνει τις διαφορές μετατροπές ενέργειας και μάζας. Να συζητηθούν πιθανές απώλειες ενέργειας και μάζας κατά την παραγωγή, αποθήκευσή και κατανάλωσης του υδρογόνου και οξυγόνου.

### Δεν υπάρχουν ζητούμενα στην ενότητα της πειραματικής διάταξης και διαδικασίας, μη την αναφέρετε.

### Ζητούνται τα ακόλουθα στην ενότητα των αποτελεσμάτων (εξισώσεις, σταθερές, πίνακες με τα κύρια αποτελέσματα και γραφήματα με τον τίτλο τους, και μια σύντομη εξήγηση για κάθε ενότητα)

#### ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΟΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΟΝΟ ΣΤΟ ΑΡΧΕΙΟ EXCEL:

#### **Μέρος 1 με βάση δεδομένων: Μέτρηση χαρακτηριστικής καμπύλης $IU$ του φωτοβολταϊκού κυττάρου**

Με τα δεδομένα ανά ομάδα,

- (1) Να κατασκευαστούν τα γραφήματα  $IU$  (ένταση του ρεύματος συναρτήσει της τάσης) και  $PU$  (ισχύς συναρτήσει της τάσης) σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού (κοινό γράφημα).
- (2) Να προσδιοριστεί για κάθε μελέτη το σημείο  $I_{SC}$ .
- (3) Να προσδιοριστεί για κάθε μελέτη το σημείο της μέγιστης ισχύος,  $MPP$ .
- (4) Να προσδιοριστεί για κάθε μελέτη η απόδοση  $\epsilon_{\phi K}$ .
- (5) Να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα (2) – (4) σε έναν πίνακα. Εξηγήστε σύντομα.

#### **Μέρος 2: Μέτρηση χαρακτηριστικής του ηλεκτρολυτικού κελιού**

- (6) Να κατασκευαστεί το γράφημα  $IU$  του ηλεκτρολυτικού κελιού. Να προσδιοριστεί γραφικά η πειραματική τάση έναρξης της ηλεκτρόλυσης.
- (7) Χρησιμοποιώντας ξανά το γράφημα  $IU$  του ερωτήματος (1), να προσθέσετε τη καμπύλη  $IU$  του (6).



- (8) Να προσδιοριστούν γραφικά οι τομές των καμπυλών (σημεία λειτουργίας).
- (9) Να προσδιοριστεί για κάθε μελέτη η απόδοση σύζευξης. Εξηγήστε σύντομα.
- (10) Να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα (8) και (9) σε έναν πίνακα. Εξηγήστε σύντομα.

### **Μέρος 3: Προσδιορισμός του ρυθμού παραγωγής υδρογόνου και οξυγόνου.**

- (11) Να κατασκευαστεί το γράφημα  $V_{H_2}$  και  $V_{O_2}$  (μετρούμενοι όγκοι προϊόντων) συναρτήσει του χρόνου και να προσδιοριστεί ο ρυθμός παραγωγής του υδρογόνου και του οξυγόνου.
- (12) Να προσδιοριστεί από την συνολική παραγωγή αερίων η ενεργειακή απόδοση και η Φαρανταϊκή απόδοση. Εξηγήστε σύντομα.

### **Μέρος 4: Προσδιορισμός της απόδοσης της κυψέλης καυσίμου και η χαρακτηριστική καμπύλη $IU$ της.**

- (13) Να υπολογιστεί από θερμοδυναμικά δεδομένα για την αντίδραση  $H_2(g) + 1/2O_2(g) \leftrightarrow H_2O(l)$  σε  $T = 25^\circ C$  το θερμό-ουδέτερο δυναμικό ( $U_{th}$ ), το αντιστρεπτό δυναμικό ( $U_{rev}$ ) και η ιδανική απόδοση.
- (14) Να κατασκευαστούν τα γραφήματα  $IU$  (τάση συναρτήσει του ρεύματος) και  $IP$  (ισχύς συναρτήσει του ρεύματος) με βάση δεδομένων. Παρουσιάστε τις διάφορες υπερτάσεις που εμφανίζονται στην καμπύλη  $IU$  που κατασκευάσατε με χρωματική διαφοροποίηση. Εξηγήστε τη σημασία τους.
- (15) Να προσδιοριστεί γραφικά η πειραματική τάση  $U_{oc}$  στο σημείο  $I = 0$  και το σημείο της μέγιστης ισχύος,  $MPP$ . Να προσδιοριστεί για την τάση  $U_{oc}$  η ηλεκτροχημική απόδοση. Γιατί η ηλεκτροχημική απόδοση δεν είναι ίση με 100%; Εξηγήστε σύντομα.

## **7 Βιβλιογραφία**

- [1] J. Steyn and C. Render, "Hydrogen as Energy Carrier", [Research Gate](#), (2020)
- [2] F. Elmanakhly, A. DaCosta, B. Berry, R. Stasko, M. Fowler and X-Y. Wu, "Hydrogen economy transition plan: A case study on Ontario", *AIMS Energy*, **9(4)** (2021) 775, DOI: 10.3934/energy.2021036
- [3] G. Antonopoulou, I.Ntaikou, K. Stamatelatu and G. Lyberatos Handbook of Biofuels Production, Woodhead Publishing Series in Energy, Chapter 13 "Biological and fermentative production of hydrogen", 2011, Pages 305-346
- [4] S. Shiva Kumar, V. Himabindu "Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review", *Materials Science for Energy Technologies* **2** (2019) 442–454
- [5] G.M. Sriramagiri, W. Luc, F. Jiao, K. Ayers, K.D. Dobson and S.S. Hegedus, "Computation and assessment of solar electrolyzer field performance: comparing coupling strategies", *Sustainable Energy Fuels* **3** (2019) 42
- [6] M. Reuß, J. Reul, T. Grube, M. Langemann, S. Calnan, M. Robinius, R. Schlatmann, U. Rau and D. Stolten, "Solar hydrogen production: a bottom-up analysis of different photovoltaic–electrolysis pathways", *Sustainable Energy Fuels* **3** (2019) 801

- [7] A. Mraoui, B. Benyoucef, L. Hassaine, "Experiment and simulation of electrolytic hydrogen production: Case study of photovoltaic-electrolyzer direct connection" *Int. J. of Hydrogen energy* **43** (2018) 3441-3450
- [8] J. Lagorsea, M.G. Simoes, A. Miraoui, P. Costerg, "Energy cost analysis of a solar-hydrogen hybrid energy system for stand-alone applications", *Int. J. of Hydrogen energy* **33** (2008) 2871–2879
- [9] Φ. Ζαραβέλη, Μελέτη λειτουργίας συστήματος ηλεκτρόλυσης  $H_2O$  με πολυμερικό ηλεκτρολύτη, υπό υψηλές πίεση (High pressure PEM electrolyzer), Διπλωματική εργασία, ΤΧΜ, Πανεπιστήμιο Πατρών (2019)
- [10] Ε.Ε. Μαρτίνο «Μελέτη του φαινομένου πολλαπλών μονίμων καταστάσεων σε συμβατικές κυψέλες καυσίμου και μελέτη, μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση τριοδικών κυψελών καυσίμου», Μεταπτυχιακή Εργασία Ειδίκευσης, ΤΧΜ, Πανεπιστήμιο Πατρών (2015)
- [11] Μ.Α. Χάσα, «Παρασκευή Χαρακτηρισμός και μελέτη καινοτόμων καταλυτών για γαλβανικά και ηλεκτρολυτικά στοιχεία χαμηλών θερμοκρασιών», Διδακτορική Διατριβή, ΤΧΜ, Πανεπιστήμιο Πατρών (2018)
- [12] Ι.Χ. Ευθυμίου, "Συστήματα Ηλεκτρόλυσης του Νερού για Παραγωγή Υδρογόνου και Χρήση αυτού σε Κυψελίδες Καυσίμου Πολυμερικής Μεμβράνης (PEMFCs): Τρέχουσα Κατάσταση, Προκλήσεις και Προοπτικές", Μεταπτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Βόλος 2011
- [13] Δ. Κουζούδης, Σ. Κέννου και S. Brosda, «[Φωτοβολταϊκό Κύτταρο](#)», σημειώσεις του εργαστηρίου φυσικής (e-class)
- [14] Δ. Σωτηροπούλου «[Ηλεκτροανάλυση](#)», σημειώσεις του εργαστηρίου φυσικοχημείας (e-class)
- [15] Solar-Hydrogen Cycle Experimentation Book, h-tec
- [16] [Energy Efficiency](#)
- [17] [The colours of hydrogen](#)
- [18] [The Color Palette of the Colorless Hydrogen](#)