**ΑΣΚΗΣΗ 1 Επίπεδη κυψέλη στερεών οξειδίων (planar-SOFC)**

Κυψέλη καυσίμου τύπου p-SOFC με επιφάνεια ηλεκτροδίων 100 cm2 (επιφάνεια ανόδου 100 cm2 και επιφάνεια καθόδου 100 cm2) λειτουργεί σε θερμοκρασία 800 oC. Οι τροφοδοσίες της ανόδου και της καθόδου αποτελούνται από 0,5 lt(STP)/min καθαρό υδρογόνο και 4 lt (STP)/min ατμοσφαιρικού αέρα, αντίστοιχα. Να υπολογιστούν:

α. το αντιστρεπτό δυναμικό (ισορροπίας) της κυψέλης στις συνθήκες λειτουργίας

β. η ωμική υπέρταση αν το πάχος του ηλεκτρολύτη (YSZ), της ανόδου (Ni/YSZ) της καθόδου (LSM/YSZ) και των interconnectors (LaCrO3) είναι 20, 50 10 και 100 μm, αντίστοιχα

γ. η ανοδική και η καθοδική υπέρταση ενεργοποίησης

δ. το δυναμικό λειτουργίας και η παραγόμενη ισχύς

ε. ο συντελεστής χρήσης καυσίμου και

στ. η ηλεκτρική και η ολική απόδοση της κυψέλης,

για πυκνότητα ρεύματος 600 mA/cm2. Δίνονται:

συντελεστής μεταφοράς φορτίου α = 0,5

ωμική υπέρταση: ηΩ = RΩ \* Ι [V], όπου RΩ [ohm] η ωμική αντίσταση και Ι η ένταση του ρεύματος [Α], που διαρρέει την κυψέλη

ωμική αντίσταση: RΩ = Rel + Ran + Rcath + Rint [Ω]

, όπου ρi [Ω\*m] η ειδική ωμική αντίσταση του κάθε στοιχείου της κυψέλης, li το πάχος του και si το εμβαδόν του:

 [Ωm]

 YSZ: Αi = 2,9 10-6 [Ωm] βi = -10350 K (ηλεκτρολύτης)

 Ni/YSZ: Αi = 3,0 10-6 [Ωm] βi = +1392 K (άνοδος)

 LSM/YSZ: Αi = 8,1 10-6 [Ωm] βi = -600 K (κάθοδος)

LaCrO3: Αi = 1256 10-6 [Ωm] βi = -4690 K (interconnect)

υπέρταση ενεργοποίησης: ηan = I x Ract,an Volt ηcath = I x Ract,cath Volt

άνοδος: D = 2,130 108 A/m2 m = 0,25 E = 110.000 J/mol

κάθοδος: D = 1,489 1011 A/m2 m = 0,25 E = 160.000 J/mol

ελεύθερη ενέργεια καύσης του υδρογόνου, στους 25 oC: ΔGo = -228,593 kJ/mol H2

ανώτερη θερμογόνο δύναμη του υδρογόνου: HHVH2 = 285,840 kJ/mol H2

κατώτερη θερμογόνο δύναμη του υδρογόνου: LHVH2 = 241,826 kJ/mol H2

σταθερά Faraday: F = 96484 cb/mol e-

**ΛΥΣΗ**

α. Το δυναμικό ισορροπίας (ή αντιστρεπτό δυναμικό) υπολογίζεται από την Εξίσωση του Nernst:

 ή

όπου Pi = Yi \* Ptotal, Yi το γραμμομοριακό κλάσμα του συστατικού i στην αέρια φάση της ανόδου ή της καθόδου και Ρi η μερική του πίεση. Το δυναμικό ισορροπίας Εο στις πρότυπες συνθήκες (25 oC, 1 atm), υπολογίζεται από την ελεύθερη ενέργεια ΔG της συνολικής αντίδρασης της κυψέλης (Η2(an) + 1/2O2(kath) = H2O(an)):

 = 1,185 Volt

Όπου n = 2, τα ηλεκτρόνια που ανταλλάσσονται κατά τη συνολική αντίδραση στην κυψέλη:

Κάθοδος: Ο2 + 4 e- = 2 Ο2-

Άνοδος: 2 Η2 + 2 Ο2- = 2 Η2Ο + 4e-

Ολική: Ο2 + 2 Η2 = 2 Η2Ο

Οπότε n = (4 e-)/(2 H2O) = (2 e-)/(H2O) = 2 (το n = 2 αντιστοιχεί στην αντίδραση 1/2Ο2 + Η2 = Η2Ο, η οποία εμφανίζεται στην παρένθεση του λογαριθμικού όρου της Εξίσωσης του Nernst).

Τα γραμμομοριακά κλάσματα του υδρογόνου και του οξυγόνου στην είσοδο της κυψέλης είναι:

και εισέρχονται (όπου 22,4 lt/mol είναι ο γραμμομοριακός όγκος):

στην άνοδο: και

στην κάθοδο: και

Σύμφωνα με το **Νόμο του Faraday**: **r = I/nF**, όπου I το ρεύμα που διαρρέει την κυψέλη (Ampere – πυκνότητα ρεύματος (Α/cm2) επί επιφάνεια (cm2)), r o ρυθμός (η ταχύτητα, mol/s) οξείδωσης ή αναγωγής στην άνοδο ή την κάθοδο, αντίστοιχα:

οξείδωση Η2 στην άνοδο: Η2 + Ο2- → H2Ο + 2e- Αντίδραση 1

αναγωγή Ο2 στην κάθοδο: Ο2 + 4e- → 2 Ο2- Αντίδραση 2

n ο αριθμός των ηλεκτρονίων που ανταλλάσσεται κατά την ηλεκτροχημική οξείδωση ή αναγωγή (2 mol e- για κάθε mol Η2 που οξειδώνεται στην Αντίδραση 1, 4 mol e- για κάθε mol Ο2 που ανάγεται, στην Αντίδραση 2) και F η σταθερά του Faraday (96484 cb/mol e-), σύμφωνα με τον Νόμο του Faraday λοιπόν, για πυκνότητα ρεύματος 600 mA/cm2 στην άνοδο οξειδώνονται (δηλαδή καίγονται ή καταναλώνονται):

 και

Μονάδες: και

και παράγονται 0,01866 mol H2O, ενώ στην κάθοδο ανάγονται:

Οπότε, από την κυψέλη εξέρχονται:

**άνοδος** 0,02232 – 0,01866 = 0,00367 mol H2/min **και** 0,01866 mol H2O/min

**κάθοδος** 0,03750 – 0,00933 = 0,02817 mol O2/min **και** 0,14107 – 0 = 0,14107 mol N2/min

Οπότε, τα αντίστοιχα γραμμομοριακά κλάσματα στην έξοδο της καθόδου και της ανόδου είναι:

 Κάθοδος άνοδος

Έτσι, τα μέσα γραμμομοριακά κλάσματα, κατά μήκος της κυψέλης είναι:

και το αντίστοιχο δυναμικό ισορροπίας είναι:

β. Η ειδική ωμική αντίσταση των στοιχείων της κυψέλης στους 800 oC, είναι

ενώ η αντίστοιχη ωμική αντίσταση είναι:

Οπότε η συνολική ωμική αντίσταση της κυψέλης είναι:

R = Rel + Ran + Rcath + Rint = 9-5 + 4,1-9 + 1,4-8 + 9,9-4 = 10-3 = 0,00108 Ω

και αντίστοιχα η ωμική υπέρταση είναι:

i = 0,6 Α/cm2: ηΩ,600 = Ι x RΩ = (0,6 Α/cm2 x 100 cm2) x 0,00108 ohm = 0,0648 Volt

γ. Η ειδική επιφανειακή αντίσταση (area specific resistance – ASR με μονάδες αντίστασης επί επιφάνεια) ενεργοποίησης της καθόδου, είναι:

 Ωm2

και η αντίστοιχη υπέρταση ενεργοποίησης καθόδου:

ηcath = I x Ract,cath = (0,6 A/cm2 x 100 cm2)x (1,45 x 10-5 Ωm2/0,01 m2) =

= (60 Α) x (1,45 x 10-3 Ω) = 0,087 Volt

(Η ειδική επιφανειακή αντίσταση είναι το πηλίκο του δυναμικού (V, με μονάδες [Volt]) προς την πυκνότητα ρεύματος (i, με μονάδες [Ampere/m2]. Όπως R = V/I, έτσι και ASR = V/i. Οι μονάδες του ASR είναι V/(A/m2) = Ω\*m2) – Στον παραπάνω υπολογισμό 0,01 m2 είναι η επιφάνεια της κυψέλης σε m2. Η διαίρεση αυτή γίνεται για τον εξής λόγο: Η αντίσταση ενεργοποίησης της κυψέλης θα ήταν 0,01 Ω αν η κυψέλη είχε επιφάνεια 1 m2. Ελαττώνοντας τη διατομή μίας αντίστασης, η αντίσταση αυξάνεται αναλογικά. Έτσι, με ελάττωση της επιφάνειας της κυψέλης από 1 m2 σε 0,01 m2 είναι, η αντίσταση θα αυξηθεί 100 φορές, γιατί η επιφάνεια ελαττώθηκε κατά εκατό φορές.

Η αντίσταση ενεργοποίηση της ανόδου, είναι:

 Ωm2

και η αντίστοιχη υπέρταση ενεργοποίησης ανόδου:

ηan = i x Ract,an = (0,6 A/cm2 x 100 cm2)x (5,65 x 10-5 Ωm2/0,01 m2) = 0,338 Volt

δ. Το δυναμικό λειτουργίας της κυψέλης, είναι:

 1,161 – **(0,065 + 0,087 + 0,338)** = 1,161 – 0,490 = 0,672 Volt

όπου: ηtotal = ηΩ + ηact,cath + ηact,an = 0,490 V είναι η ολική **υπέρταση** της κυψέλης, στο σημείο λειτουργίας της (στα 600 mA/cm2).

H παραγόμενη ισχύς, είναι: P = Ι \* Vcell = (0,6 A/cm2 x 100 cm2) x 0,672 Volt = 40,30 Watt

ε. Ο συντελεστής χρήσης καυσίμου (Utilization Factor, UF), είναι:

στ. Η ηλεκτρική απόδοση της κυψέλης, ορίζεται ως:

 =

Αν η ηλεκτρική απόδοση οριστεί ως προς την κατώτερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου:

Η ολική απόδοση της κυψέλης, ορίζεται ως:

ενώ αν η ολική απόδοση οριστεί ως προς την κατώτερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου: