

การศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการผลิตไฮโดรเจน โดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้า

A Parametric Study of Hydrogen Production through Electrolysis Process

นิสาชล กลิ่นศิริ, เก้ากัญญา สูดประเสริฐ

ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140 โทร. 0-2427-0039, 0-2470-8000 E-mail: momo_che21@hotmail.com

Nisachol Klinsari, Kaokunya Sudaprasert

Department of Energy Technology, Faculty of Energy Environment and Material, King Mongkut's University of Technology Thonburi
TongKru, Bangkok 10140 Thailand Tel: 0-2427-0039, 0-2470-8000 E-mail: momo_che21@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางทฤษฎีของเครื่องแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Steam Electrolyzer, SOSE) โดยนำแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาใช้ศึกษาถึงผลของภาวะการทำงานที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน (overpotential) และค่าศักย์ไฟฟ้า (cell potential) ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิและความดัน ที่ 873, 973, 1073, 1173 และ 1273 K และที่ 0.1, 1 และ 5 bar ตามลำดับ จากผลการศึกษา พบว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่า concentration overpotential สูงขึ้น แต่จะทำให้ค่า activation overpotential และค่า ohmic overpotential มีค่าลดต่ำลง นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (cell potential) มีค่าลดต่ำลงอีกด้วย นั่นคือ ที่อุณหภูมิ 1273 K จะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าอุณหภูมิอื่นๆ ส่วนผลของความดันที่ต่อค่า total concentration overpotential และค่าศักย์ไฟฟ้า (cell potential) นั้น ขึ้นอยู่กับช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

Abstract

A theoretical model of Solid Oxide Steam Electrolyzer (SOSE) was been developed to study effects of operating parameters on overpotential and cell potential. These parameters are the operating temperature at 873, 973, 1073, 1173 and 1273 K, and operating at pressure 0.1, 1 and 5 bars, respectively. From the results, it has been found that the higher temperature leads to an increase of concentration overpotential; however, it results in decrease of activation overpotential and ohmic overpotential. Moreover the higher temperature yields a decrease of cell potential that operating temperature at 1273 K has the lower cell potential than another temperature. The pressure effects on total concentration overpotential and cell potential should depend on current density.

คำสำคัญ : ค่าศักย์ไฟฟ้า, ค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน, เครื่องแยกสลายไอน้ำ, แบบจำลองทางทฤษฎี

Keywords : Theoretical model, Electrolyzer, Overpotential, Cell potential

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันความต้องการในการใช้พลังงานมีสูงขึ้น โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนาที่มีความเติบโตทางด้านเศรษฐกิจสูง ความต้องการใช้พลังงานจึงสูงตามไปด้วย จึงเกิดความกังวลเรื่องความเพียงพอของแหล่งพลังงานที่จะนำมาใช้ในอนาคต จากปัญหาเรื่องความต้องการพลังงานและปริมาณเชื้อเพลิงที่จะนำมาใช้ประโยชน์ดังกล่าว จึงได้มีความพยายามในการคิดค้นหาแหล่งพลังงานทางเลือกอื่นๆ ซึ่งพลังงานทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ก็คือพลังงานจากไฮโดรเจน กระบวนการผลิตไฮโดรเจนนั้นมีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ก็คือ การผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธี Hydrocarbon Steam Reforming ซึ่งเป็นการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้กระบวนการทางเคมีที่มีไอน้ำและความร้อน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการแยกตัวของไฮโดรเจนในสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น ก๊าซธรรมชาติจำพวกก๊าซมีเทน, อีเทนและโพรเพน เป็นต้น แต่ข้อเสียของการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีนี้ก็คือ กระบวนการผลิตไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพราะนอกจากจะได้ก๊าซไฮโดรเจนที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแล้ว ยังจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นอันตรายอีกด้วย ซึ่งจากข้อเสียดังกล่าวจึงได้มีความพยายามในการที่จะพัฒนาการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีการอื่นๆ

การผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าจึงเป็นการผลิตไฮโดรเจนอีกวิธีหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจและได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องมาจากการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีนี้จะเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพราะใช้ไอน้ำเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาในทางวิจัยนี้ ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้า โดยจะคำนวณหาค่า overpotential ของเครื่องแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้า แล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของระบบ ได้แก่ อุณหภูมิและความดัน เป็นต้น เพื่อหาสภาวะในการผลิตไฮโดรเจน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

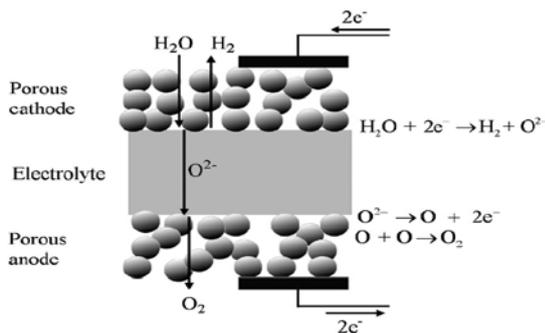
ในปัจจุบัน การพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านการผลิตไฮโดรเจนเป็นไปอย่างแพร่หลาย รวมถึงเทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้า ก็มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องด้วยเช่นเดียวกัน ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้า อันจะนำไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาวิจัยต่อไป

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของกระบวนการแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจน รวมถึงสมการสำคัญต่างๆที่จะนำมาใช้ในการคำนวณ ดังนี้

2.1.1 กระบวนการแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolysis Process) คือ กระบวนการที่เกิดขึ้นโดยกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชัน โดยแยกปฏิกิริยาออกเป็น 2 ส่วน คือ ออกซิเดชันกับรีดักชัน

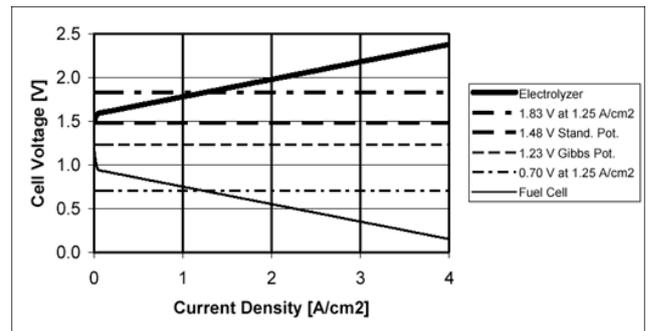
ไอน้ำจะถูกป้อนเข้าที่ขั้วแคโทด เมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าไอน้ำจะแตกตัวกลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนไอออน ก๊าซไฮโดรเจนจะผ่านออกไปที่ขั้วแคโทด ส่วนออกซิเจนไอออนนั้นจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ ไปยังขั้วแอโนด ที่ขั้วแอโนดออกซิเจนไอออนจะให้อิเล็กตรอนออกไป แล้วกลายเป็นออกซิเจนอะตอมที่ไม่เสถียร จึงต้องรวมตัวกับออกซิเจนอะตอมด้วยกัน แล้วจึงกลายเป็นก๊าซออกซิเจนผ่านออกไปที่ขั้วแอโนด



รูปที่ 1 การผลิตไฮโดรเจนในเครื่องแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้า [1]

2.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับค่าศักย์ไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับค่าศักย์ไฟฟ้าของการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้า สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 จากรูปจะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับค่าศักย์ไฟฟ้า จะแปรผันตามกันในกรณีของเครื่องแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolyser) คือ เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าก็จะเพิ่มสูงขึ้นด้วย ตรงกันข้ามกับในกรณีของเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) ที่ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับค่าศักย์ไฟฟ้า จะผกผันกัน



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับค่าศักย์ไฟฟ้า [2]

2.1.3 Fick's law [3]

Fick's law เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equation) ที่อธิบายถึงฟลักซ์และความเข้มข้นของสารนั้นๆ ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลา ถ้าพิจารณาในกรณีของการแพร่เชิงเส้นใน 1 มิติ (Linear one-dimension diffusion) ฟลักซ์ของสาร O ที่ตำแหน่ง x ณ เวลา t, $N_{O(x,t)}$ คือ อัตราการถ่ายเทมวล (Mass transfer rate) ของสาร O

$$-N_{O(x,t)} = D_o \frac{\partial C_{O(x,t)}}{\partial x} \quad \dots (1)$$

ถ้าสาร O เป็นสารที่ทำปฏิกิริยาทางไฟฟ้า (Electroactive substance)

และจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density), $\frac{i}{A}$ จะได้

$$-N_{O(x,t)} = D_o \frac{\partial C_{O(x,t)}}{\partial x} = \frac{i}{nFA} \quad \dots (2)$$

2.1.4 Butler-Volmer equation [3]

$$\text{จาก} \quad \text{O} + n\text{e} \xrightleftharpoons[k_b]{k_f} \text{R} \quad \dots (3)$$

$$\text{จะได้} \quad v_f = k_f C_{O(0,t)} = \frac{i_c}{nFA} \quad \dots (4)$$

$$v_b = k_b C_{R(0,t)} = \frac{i_a}{nFA} \quad \dots (5)$$

เมื่อ $v_f, v_b =$ Forward and Backward reaction rate ($\text{mol/m}^3 \text{ s}$)
 $k_f, k_b =$ Forward and Backward rate constant
 $i_c, i_a =$ Cathodic and Anodic current (A)

Net reaction rate, v_{net} จะเท่ากับ

$$v_{net} = v_f - v_b = k_f C_{O(0,t)} - k_b C_{R(0,t)} = \frac{i}{nFA} \quad \dots (6)$$

$$\text{และ } i = i_c - i_a = nFA [k_f C_{O(0,t)} - k_b C_{R(0,t)}] \quad \dots (7)$$

จากทฤษฎีของ Arrhenius : $k = Ae^{-E_A/RT} \quad \dots (8)$

เมื่อ $A =$ Frequency factor
 $E_A =$ Activation energy

การเปลี่ยนแปลงที่สถานะ Transition state, ใช้สัญลักษณ์ ΔE^\ddagger , ซึ่ง $E_A = \Delta U$

ดังนั้น $\Delta H^\ddagger = \Delta E^\ddagger + \Delta(PV)^\ddagger$, ซึ่ง $\Delta(PV)^\ddagger$ จะ

ละทิ้ง

$$\text{จะได้ } \Delta H^\ddagger \approx \Delta E^\ddagger$$

เมื่อเอา $\Delta H^\ddagger \approx \Delta E^\ddagger$ แทนลงในสมการของ Arrhenius สมการ (8) จะ

$$\text{ได้ } k = Ae^{-\Delta H^\ddagger/RT} \quad \dots (9)$$

กำหนดให้ $A'e^{-\Delta S^\ddagger/R}$ มีค่าเท่ากับ A

$$\text{จะได้ } k = A'e^{-(\Delta H^\ddagger - T\Delta S^\ddagger)/RT} \quad \dots (10)$$

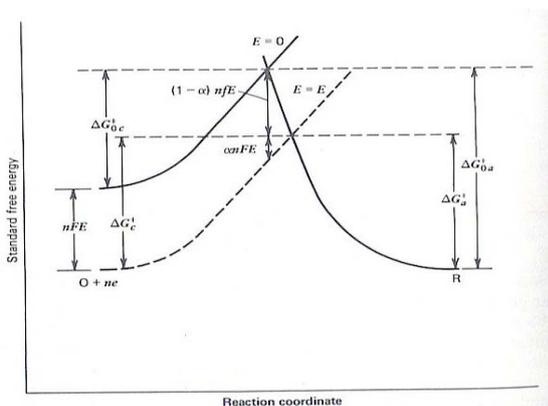
$$k = A'e^{-\Delta G^\ddagger/RT} \quad \dots (11)$$

นั่นก็คือ $k_f = A'_f e^{-\Delta G_c^\ddagger/RT} \quad \dots (12)$

$$k_b = A'_b e^{-\Delta G_a^\ddagger/RT} \quad \dots (13)$$

จาก $\Delta G_a^\ddagger = \Delta G_{0a}^\ddagger - (1-\alpha)nFE \quad \dots (14)$

$$\Delta G_c^\ddagger = \Delta G_{0c}^\ddagger + \alpha nFE \quad \dots (15)$$



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Standard free energy กับ Reaction coordinate [3]

เอาสมการ (14) และ (15) แทนในสมการ (12) และ (13) ตามลำดับ

$$\text{จะได้ } k_f = A'_f e^{-\Delta G_{0c}^\ddagger/RT} e^{-\alpha nFE} \quad \dots (16)$$

$$k_b = A'_b e^{-\Delta G_{0a}^\ddagger/RT} e^{(1-\alpha)nFE} \quad \dots (17)$$

เมื่อ $f = F/RT$

$$\text{และให้ } k_f^0 = A'_f e^{-\Delta G_{0c}^\ddagger/RT}$$

$$k_b^0 = A'_b e^{-\Delta G_{0a}^\ddagger/RT}$$

$$\text{จะได้ } k_f = k_f^0 e^{-\alpha nFE} \quad \dots (18)$$

$$k_b = k_b^0 e^{(1-\alpha)nFE} \quad \dots (19)$$

ที่ Equilibrium ค่า Net reaction rate, v_{net} จะเท่ากับ ศูนย์, $E = E^{0'}$, $k_f = k_b$

$$\text{กำหนดให้ } k^0 = k_f^0 e^{-\alpha nFE^{0'}} = k_b^0 e^{(1-\alpha)nFE^{0'}} \quad \dots (20)$$

เอาสมการ (20) แทนในสมการ (18) และ (19) จะได้

$$k_f = k^0 e^{-\alpha nF(E-E^{0'})} \quad \dots (21)$$

$$k_b = k^0 e^{(1-\alpha)nF(E-E^{0'})} \quad \dots (22)$$

เอาสมการ (21) และ (22) แทนในสมการ (7),

จากสมการ (7), $i = i_c - i_a = nFA [k_f C_{O(0,t)} - k_b C_{R(0,t)}]$

จะได้

$$i = nFAk^0 [C_{O(0,t)} e^{-\alpha nF(E-E^{0'})} - C_{R(0,t)} e^{(1-\alpha)nF(E-E^{0'})}]$$

$$\dots (23)$$

ที่ Equilibrium ค่า Net current, i จะเท่ากับ ศูนย์

$$nFAk^0 C_{O(0,t)} e^{-\alpha nF(E_{eq}-E^{0'})} = nFAk^0 C_{R(0,t)} e^{(1-\alpha)nF(E_{eq}-E^{0'})} \quad \dots (24)$$

และ $e^{nF(E_{eq}-E^{0'})} = C_O^*/C_R^* \quad \dots (25)$

ถึงแม้ว่าค่า Net current จะเท่ากับศูนย์, แต่ก็ต้องทำให้ Faradaic activity สมดุล ซึ่งสามารถแสดงในเทอมของ Exchange current, i_0

$$i_0 = nFAk^0 C_O^* e^{-\alpha nF(E_{eq}-E^{0'})} \quad \dots (26)$$

จากสมการ (25), $e^{-\alpha nF(E_{eq}-E^{0'})} = (C_O^*/C_R^*)^{-\alpha} \quad \dots (27)$

เมื่อแทนสมการ (27) ลงในสมการ (26) จะได้

$$i_0 = nFAk^0 C_O^{*(1-\alpha)} C_R^{*\alpha} \quad \dots (28)$$

เมื่อนำสมการ(23) มาหารด้วยสมการ (28),

จะได้

$$\frac{i}{i_0} = \left[\frac{C_{O(0,t)} e^{-\alpha n f (E-E^0)} - C_{R(0,t)} e^{(1-\alpha) n f (E-E^0)}}{C_0^{*(1-\alpha)} C_R^{*\alpha}} \right] \quad \dots (29)$$

หรือ

$$\frac{i}{i_0} = \frac{C_{O(0,t)}}{C_0^*} e^{-\alpha n f (E-E^0)} \left[\frac{C_0^*}{C_R^*} \right]^\alpha - \frac{C_{R(0,t)}}{C_R^*} e^{(1-\alpha) n f (E-E^0)} \left[\frac{C_0^*}{C_R^*} \right]^{-(1-\alpha)} \quad \dots (30)$$

จากสมการ (30), ค่า $\left[\frac{C_0^*}{C_R^*} \right]^\alpha$ และ $\left[\frac{C_0^*}{C_R^*} \right]^{-(1-\alpha)}$ สามารถหาได้จาก

สมการ (25) และ (27) ดังนั้น

$$i = i_0 \left\{ \frac{C_{O(0,t)}}{C_0^*} e^{-\alpha n f \eta} - \frac{C_{R(0,t)}}{C_R^*} e^{(1-\alpha) n f \eta} \right\} \quad \dots (31)$$

เมื่อ $\eta = E - E_{eq}$ หรือ Current-overpotential equation

กรณีที่ไม่มีผลของการถ่ายเทมวล (No mass transfer effects) มาเกี่ยวข้องกับ สมการ (31) จะเป็น

$$i = i_0 \left\{ e^{-\alpha n f \eta} - e^{(1-\alpha) n f \eta} \right\} \quad \dots (32)$$

ซึ่งสมการ (32) เป็นที่รู้จักในชื่อของ Butler-Volmer equation

2.1.5 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้า (Cell potential) สามารถคำนวณได้จากผลรวมของค่า Operating voltage กับค่า Overvoltage

$$V = E + \eta_{conc,c} + \eta_{conc,a} + \eta_{act,c} + \eta_{act,a} + \eta_{ohm} \quad \dots (33)$$

เมื่อ	V	=	Cell potential (V)
	E	=	Operating Voltage (V)
	η_{conc}	=	Concentration overpotential (V)
	η_{act}	=	Activation overpotential (V)
	η_{ohm}	=	Ohmic overpotential (V)
	a	=	anode electrode
	c	=	cathode electrode

ซึ่งสมการที่ (33) สามารถคำนวณได้จาก [3]

จาก Energy Balance: ให้ระบบมีพลังงานจลน์และพลังงานศักย์น้อยมาก หรือเท่ากับศูนย์

$$\dot{Q}_{CV} - \dot{W}_{CV} + \sum_i (\dot{n}_i \bar{h}_i)_R - \sum_i (\dot{n}_i \bar{h}_i)_P = 0 \quad \dots (34)$$

จาก Entropy Balance:

$$\frac{\dot{Q}_{CV}}{T} + \sum_i (\dot{n}_i \bar{s}_i)_R - \sum_i (\dot{n}_i \bar{s}_i)_P - \dot{\sigma}_{CV} = 0 \quad \dots (35)$$

คูณ T ตลอดสมการ (35),

$$\dot{Q}_{CV} + T \sum_i (\dot{n}_i \bar{s}_i)_R - T \sum_i (\dot{n}_i \bar{s}_i)_P - T \dot{\sigma}_{CV} = 0 \quad \dots (36)$$

จากสมการ (4),

$$\dot{Q}_{CV} = -T \sum_i (\dot{n}_i \bar{s}_i)_R + T \sum_i (\dot{n}_i \bar{s}_i)_P + T \dot{\sigma}_{CV} = 0 \quad \dots (37)$$

จัดสมการ (35) ใหม่เป็น

$$\dot{W}_{CV} = \dot{Q}_{CV} + \sum_i (\dot{n}_i \bar{h}_i)_R - \sum_i (\dot{n}_i \bar{h}_i)_P \quad \dots (38)$$

เอา \dot{Q}_{CV} จากสมการ (37) แทนในสมการ (38) จะได้,

$$\begin{aligned} \dot{W}_{CV} &= \left[-T \sum_i (\dot{n}_i \bar{s}_i)_R + T \sum_i (\dot{n}_i \bar{s}_i)_P + T \dot{\sigma}_{CV} \right] + \sum_i (\dot{n}_i \bar{h}_i)_R - \sum_i (\dot{n}_i \bar{h}_i)_P \\ \dot{W}_{CV} &= \left[T \sum_i (\dot{n}_i \bar{h}_i)_R - T \sum_i (\dot{n}_i \bar{s}_i)_R \right] - \left[\sum_i (\dot{n}_i \bar{h}_i)_P - \sum_i (\dot{n}_i \bar{s}_i)_P \right] + T \dot{\sigma}_{CV} \\ \dot{W}_{CV} &= \left[\sum_i \dot{n}_i (\bar{h}_i - T \bar{s}_i)_R \right] - \left[\sum_i \dot{n}_i (\bar{h}_i - T \bar{s}_i)_P \right] + T \dot{\sigma}_{CV} \quad \dots (39) \end{aligned}$$

จาก Gibb's free energy:

$$\bar{g}_i = \bar{h}_i - T \bar{s}_i$$

เอา \bar{g}_i แทนสมการ (39) จะได้

$$\begin{aligned} \dot{W}_{CV} &= \sum_i (\dot{n}_i \bar{g}_i)_R - \sum_i (\dot{n}_i \bar{g}_i)_P + T \dot{\sigma}_{CV} \\ \dot{W}_{CV} &= \sum_i (\dot{n}_i \bar{g}_i)_R - \sum_i (\dot{n}_i \bar{g}_i)_P + T \dot{\sigma}_{CV} \\ \dot{W}_{CV} &= - \left[\sum_i (\dot{n}_i \bar{g}_i)_P - \sum_i (\dot{n}_i \bar{g}_i)_R \right] + T \dot{\sigma}_{CV} \quad \dots (40) \end{aligned}$$

เนื่องจากไม่มีพลังงานกล (Mechanical work) เข้ามาเกี่ยวข้องกับระบบ

$$\dot{W}_{CV} = - \left[\sum_i (\dot{n}_i \bar{g}_i)_P - \sum_i (\dot{n}_i \bar{g}_i)_R \right] + T \dot{\sigma}_{CV} = 0 \quad \dots (41)$$

และงานทางไฟฟ้าอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้า,

$$\dot{W}_{Elec} = z F E_{cell}$$

จะได้

$$W_{Elec} = zFE_{cell} = - \left[\sum_i (n_i \bar{g}_i)_P - \sum_i (n_i \bar{g}_i)_R \right] + T \sigma_{CV} \quad \dots (42)$$

จาก $\bar{g}_i = \bar{g}^\circ + RT \ln \left(\frac{P_i}{P^\circ} \right)$

และ $-\Delta \bar{G} = RT \ln K$, เมื่อ $\ln K = \frac{zF \bar{E}^\circ}{RT}$

จะได้

$$zFE_{cell} = - \left[\sum_i n_i \left(\bar{g}_i^\circ + RT \ln \left(\frac{P_i}{P^\circ} \right) \right)_P - \sum_i n_i \left(\bar{g}_i^\circ + RT \ln \left(\frac{P_i}{P^\circ} \right) \right)_R \right] + T \sigma_{CV}$$

$$zFE_{cell} = - \left[\sum_i (n_i \bar{g}_i^\circ)_P - \sum_i (n_i \bar{g}_i^\circ)_R \right]$$

$$- \left[\sum_i \left(n_i RT \ln \left(\frac{P_i}{P^\circ} \right) \right)_R - \sum_i \left(n_i RT \ln \left(\frac{P_i}{P^\circ} \right) \right)_P \right] + T \sigma_{CV}$$

$$zFE_{cell} = - \left\{ \Delta \bar{G} - \left[\sum_i \left(n_i RT \ln \left(\frac{P_{iR}}{P_{iP}} \right) \right) \right] \right\} + T \sigma_{CV}$$

$$zFE_{cell} = -\Delta \bar{G} + \sum_i n_i RT \ln \left(\frac{(P_{H_2O})}{(P_{H_2})(P_{O_2})^{1/2}} \right) + T \sigma_{CV}$$

$$zFE_{cell} = RT \left(\frac{zF \bar{E}^\circ}{RT} \right) + \sum_i n_i RT \ln \left(\frac{(P_{H_2O})}{(P_{H_2})(P_{O_2})^{1/2}} \right) + T \sigma_{CV}$$

$$E_{cell} = \bar{E}^\circ + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{(P_{H_2O})}{(P_{H_2})(P_{O_2})^{1/2}} \right) + \frac{T \sigma_{CV}}{2F} \quad \dots (43)$$

The Nernst equation : $E_{Nernst} = \bar{E}^\circ + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{\prod_{Pr} V_i}{\prod_{Re} V_i} \right)$

และ $\frac{T \sigma_{CV}}{2F}$ เป็นเทอมของ Concentration, Activation และ Ohmic overpotential

เมื่อ $\dot{Q} =$ Heat transfer rate (J/s)

\dot{W}	=	Rate of work (J/s)
\bar{h}	=	Molar enthalpy (J/mol)
\bar{s}	=	Molar entropy (J/mol K)
$\dot{\sigma}$	=	Rate of entropy production (J/mol K s)
\bar{g}	=	Molar Gibb's free energy (J/mol)
W_{Elec}	=	Electical work (J)
Z	=	Number of electron transfer
R	=	Reactant
P	=	Product
cv	=	Control volume

1. Operating Voltage

เป็นค่าศักย์ไฟฟ้ากรณีที่เป็น open circuit voltage ไม่มีการสูญเสียทางศักย์เกิดขึ้น

$$E = \bar{E}^\circ + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{(P_{H_2O})}{(P_{H_2})(P_{O_2})^{1/2}} \right) \quad \dots (44)$$

และ $\bar{E}^\circ = 1.253 - 2.2978 \times 10^{-4} T \quad \dots (45)$

เมื่อ	E°	=	Standard potential (V)
	R	=	Universal gas constant (8.3145 J/mol K)
	T	=	Temperature (K)
	F	=	Faraday constant (9.6485 × 10 ⁴ C/mol)
	$P_{H_2O}^\circ, P_{H_2}^\circ, P_{O_2}^\circ$	=	Partial pressures of steam, hydrogen and oxygen at electrode surface (Pa)

ซึ่งค่า E° สามารถหาได้จาก standard condition [4]

จาก $nF \bar{E}^\circ = -\Delta \bar{G} \quad \dots (46)$

$$nF \bar{E}^\circ = \left[\bar{G}_{H_2} + 0.5 \bar{G}_{O_2} - \bar{G}_{H_2O} \right] = -\Delta \bar{G} \quad \dots (47)$$

และ $\bar{G} = \bar{H} - T \bar{S}$

เปิดตารางค่า H° และ S° ได้

substance	$\overset{\circ}{H}_f$ (kJ/mol)	$\overset{\circ}{S}$ (J/mol)
H_2O	-241.83	188.84
H_2	0	130.68
O_2	0	205.00

$$\begin{aligned} \text{หา } G_{H_2O}^{\circ} &= (-241.83 \times 10^3) - 188.84T \\ G_{O_2}^{\circ} &= 0 - 205T = -205T \\ G_{H_2}^{\circ} &= 0 - 130.68T = -130.68T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } -\Delta G^{\circ} &= -130.68T + 0.5(-205T) - [(-241.83 \times 10^3) - \\ &188.84T] \\ &= 241.84 \times 10^3 - 44.34T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } E^{\circ} &= 241.84 \times 10^3 - 44.34T / (2 \times 96485) \\ E^{\circ} &= 1.253 - (2.2978 \times 10^{-4})T \end{aligned}$$

2. Concentration overpotential

เป็นสาเหตุหนึ่งของ Overvoltage เนื่องมาจากมีการขัดขวางหรือต้านทานการเคลื่อนที่ของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$\eta_{conc,c} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{(P_{H_2}^i)(P_{H_2O}^o)}{(P_{H_2O})(P_{H_2}^o)} \right) \quad \dots (48)$$

$$\eta_{conc,a} = \frac{RT}{2nF} \ln \left(\frac{P_{O_2}^i}{P_{O_2}^o} \right) \quad \dots (49)$$

เมื่อ $P_{H_2O}^i, P_{H_2}^i, P_{O_2}^i$ = Partial pressures of steam, hydrogen and oxygen at electrode-electrolyte interface (Pa)

เพื่อจะหา Overvoltage ที่เพิ่มขึ้นของ 2 สมการข้างต้น, ค่า Concentration overpotential สามารถหาได้จากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นบริเวณ electrode surface กับ electrode-electrolyte interface ได้จาก The Nernst equation

จาก The Nernst equation :

$$E_{Nernst} = \overset{\circ}{E} + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{\prod V_i^{Pr_{product}}}{\prod V_i^{Re_{actant}}} \right)$$

ที่ขั้ว cathode

$$\eta_{conc,c} = E_{Nernst, electrode_surface} - E_{Nernst, electrode_electrolyte_interface} \quad \dots (50)$$

$$= \left[\overset{\circ}{E} + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{P_{H_2}^o}{P_{H_2O}^o} \right) \right] - \left[\overset{\circ}{E} + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{P_{H_2}^i}{P_{H_2O}^i} \right) \right]$$

$$= \left[\frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{P_{H_2}^i}{P_{H_2O}^i} \right) \right] - \left[\frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{P_{H_2}^o}{P_{H_2O}^o} \right) \right]$$

$$\text{ดังนั้น } \eta_{conc,c} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{(P_{H_2}^i)(P_{H_2O}^o)}{(P_{H_2O})(P_{H_2}^o)} \right)$$

ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาเคมี บริเวณ electrode-electrolyte interface, อัตราการถ่ายเทมวล (mass transfer rate) ของแต่ละอนุภาค ที่สภาวะ steady state จะเป็น [1]

$$\nabla \cdot N_i = 0$$

$$\dots (51)$$

เมื่อ N_i = Rate of mass transfer of species i (mol/s)

ในเครื่องแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้า (electrolyzer) นั้น, การถ่ายเทมวลภายในรูพรุน จะมีความหมายถึงการแพร่ ซึ่งกระบวนการแพร่ (Diffusion process) สามารถอธิบายได้จาก Fick's model

$$N_i = - \frac{D_i^{eff}}{RT} \frac{\partial(y_i P)}{\partial x} = - \frac{D_i^{eff}}{RT} \frac{\partial(P_i)}{\partial x} \quad \dots (52)$$

เมื่อ P_i = Partial pressure (Pa)

y_i = Molar fraction

D_i^{eff} = Effective diffusion coefficient (m^2/s)

i = H_2O for cathode, O_2 for anode

แทนสมการ (52) ลงในสมการที่ (51) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[- \frac{D_i^{eff}}{RT} \frac{\partial(P_i)}{\partial x} \right] = 0 \quad \dots (53)$$

ที่บริเวณ electrode-electrolyte interface ($X = dc$, ความหนาของ Cathode), อัตราการถ่ายเทมวลบริเวณนี้จะเท่ากับอัตราการแพร่ของไอน้ำเข้าไปสู่ interface (N_{H_2O}) นั่นคือ

$$N_{H_2O} = \frac{J}{2F} \quad \dots (54)$$

โดย J = Current density (A/m^2)

เมื่อแทนสมการ (54) ลงในสมการ (52) จะได้ Boundary condition

เป็น

$$\left. \frac{\partial P_{H_2O}}{\partial x} \right|_{x=d_c} = -\frac{J}{2F} \frac{RT}{D_{H_2O}^{eff}} \quad \dots (55)$$

และให้ $P_{H_2O} \Big|_{x=0} = P_{H_2O}^0 \quad \dots (56)$

สามารถแก้สมการที่ (53) โดยใช้ Boundary condition ทั้งสอง จะได้ partial pressure ของไอน้ำ ที่บริเวณ electrode-electrolyte interface ($P_{H_2O}^I$) เป็น

$$P_{H_2O}^I = P_{H_2O}^0 - \frac{J}{2F} \frac{RT}{D_{H_2O}^{eff}} d_c \quad \dots (57)$$

เนื่องจากอัตราของไอน้ำที่เข้าไป (steam molar consumption rate) จะเท่ากับอัตราของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น (hydrogen molar generation rate) จึงให้ความดันรวมที่ขั้ว cathode คงที่ (the cathode total pressure, $P=P_{H_2O} + P_{H_2}$) ดังนั้น

$$P_{H_2}^I = P - P_{H_2O}^I = P - \left(P_{H_2O}^0 - \frac{J}{2F} \frac{RT}{D_{H_2O}^{eff}} d_c \right) \quad \dots (58)$$

$$= P_{H_2}^0 + \frac{J}{2F} \frac{RT}{D_{H_2O}^{eff}} d_c \quad \dots (59)$$

และเมื่อแทนสมการที่ (57), (58) และ (59) ลงในสมการที่ (48) จะได้

$$\begin{aligned} \eta_{conc,c} &= \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{(P_{H_2}^0 + JRTd_c / 2FD_{H_2O}^{eff}) P_{H_2O}^0}{P_{H_2}^0 (P_{H_2O}^0 - JRTd_c / 2FD_{H_2O}^{eff})} \right] \\ &= \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{1 + JRTd_c / 2FD_{H_2O}^{eff} P_{H_2}^0}{1 - JRTd_c / 2FD_{H_2O}^{eff} P_{H_2O}^0} \right] \quad \dots (60) \end{aligned}$$

การแพร่ภายในรูพรุนของ electrode จะมีกลไกพื้นฐานอยู่ 2 กลไก นั่นก็คือ Molecule diffusion และ Knudsen diffusion ซึ่ง molecule diffusion [1] จะเป็นกลไกหลักก็ต่อเมื่อ ขนาดของรูพรุนมีขนาดใหญ่กว่าค่า mean free path ของโมเลกุลนั้นมากๆ ในกรณีนี้จะเป็นการแพร่ของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล (the molecular-molecular interaction) ในทางตรงกันข้าม ถ้าขนาดของรูพรุนน้อยกว่าค่า mean free path ของโมเลกุลนั้น และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับผนังของรูพรุน (the molecular-pore wall interaction) สูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล, Knudsen diffusion จะเป็นกลไกสำคัญในการแพร่ แต่โดยส่วนมากแล้วในโครงสร้างของรูพรุน ถือว่าทั้งสองกลไกสำคัญทั้งคู่ ดังนั้น ค่า Effective diffusion coefficient ของไอน้ำ, $D_{H_2O}^{eff}$

$$\frac{1}{D_{H_2O}^{eff}} = \frac{\xi}{n^*} \left(\frac{1}{D_{H_2-H_2O}} + \frac{1}{D_{H_2O,k}} \right) \quad \dots (61)$$

เมื่อ ξ = Electrode tortuosity มีค่าเท่ากับ 5.4 (dimentionless)
 n^* = Electrode porosity มีค่าเท่ากับ 0.48 (dimentionless)

ซึ่งค่า $D_{H_2-H_2O}$ และ $D_{H_2O,k}$ สามารถหาได้จาก Table Comparison of Methodes for Estimating Gas Diffusion Coefficients at Low Pressure และ Chapman-Enskog theory ตามลำดับ

จาก Chapman-Enskog theory [5]

$$D_{i,k} = 0.001858 \frac{[T^3 (M_i + M_k) / M_i M_k]^{1/2}}{P \sigma_{ik}^2 \Omega_D} \quad \dots (62)$$

โดย $\sigma_{ik} = \frac{\sigma_i + \sigma_k}{2}$

$$\Omega_D = \frac{A}{T_N^B} + \frac{C}{\exp(DT_N)} + \frac{E}{\exp(FT_N)} + \frac{G}{\exp(HT_N)}$$

$$T_N = \frac{kT}{\varepsilon_{ik}}$$

และ $\varepsilon_{ik} = (\varepsilon_i \varepsilon_k)^{1/2}$

เมื่อ $D_{i,k}$ = Binary diffusion coefficient in the system having component i and k

(cm^2/s)

σ_{ik} = Characteristic length (\AA)

Ω_D = Diffusion collision integral

(dimentionless)

ε_{ik} = Characteristic Lennard-Jones

energy

k = Boltsmann's constant

ค่า σ_i , σ_k และ ε_i , ε_k สามารถดูได้จาก Textbook ส่วน A, B, C, D, E, F, G และ H เป็นค่าคงที่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.06036, 0.15610, 0.19300, 0.47635, 1.03587, 1.52996, 1.76474 และ 3.89411 ตามลำดับ

ที่ขั้ว anode

การคำนวณหาค่า $\eta_{conc,a}$ ก็สามารถหาได้เหมือนขั้ว cathode นั่นคือ

$$\eta_{conc,a} = E_{Nernst, electrode_surface} - E_{Nernst, electrode_electrolyte_interface}$$

$$= \left[E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \left(P_{O_2}^0 \right)^{1/2} \right] - \left[E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \left(P_{O_2}^I \right)^{1/2} \right]$$

$$= \left[\frac{RT}{nF} \ln \left(P_{O_2}^I \right)^{1/2} \right] - \left[\frac{RT}{nF} \ln \left(P_{O_2}^o \right)^{1/2} \right]$$

ดังนั้น $\eta_{conc,a} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{P_{O_2}^I}{P_{O_2}^o} \right)^{1/2}$

$$\eta_{conc,a} = \frac{RT}{2nF} \ln \left(\frac{P_{O_2}^I}{P_{O_2}^o} \right)$$

ที่บริเวณ electrode-electrolyte interface (X = da, ความหนาของ Anode), อัตราการแพร่ของออกซิเจนจาก interface จะเท่ากับอัตราของออกซิเจนที่เกิดขึ้น (N_{O2}) ภายใต้สภาวะ Steady state [1]

$$N_{O_2} = - \frac{J}{4F} \quad \dots (63)$$

เหมือนกับขั้ว cathode, Boundary condition สามารถหาได้จาก

$$\left. \frac{\partial P_{O_2}}{\partial x} \right|_{x=d_a} = \frac{J}{4F} \frac{RT}{D_{O_2}^{eff}} \quad \dots (64)$$

และ $P_{O_2} \Big|_{x=0} = P_{O_2}^o \quad \dots (65)$

เมื่อแก้สมการเหมือนกับขั้ว cathode จาก Boundary condition ทั้งสอง, partial pressure ของออกซิเจน ที่บริเวณ electrode-electrolyte interface จะเท่ากับ

$$P_{O_2}^I = P_{O_2}^o + \frac{J}{4F} \frac{RT}{D_{O_2}^{eff}} d_a \quad \dots (66)$$

จากนั้นแทนสมการ (66) ลงในสมการ (49) จะได้

$$\eta_{conc,a} = \frac{RT}{2F} \ln \left[\left(1 + \frac{RT}{D_{O_2}^{eff} P_{O_2}^o} \frac{J}{4F} d_a \right)^{1/2} \right] \quad \dots (67)$$

และค่า Effective diffusion coefficient ของออกซิเจน, D_{O2}^{eff} ก็สามารถหาได้จาก

$$\frac{1}{D_{O_2}^{eff}} = \frac{\xi}{n} \left(\frac{1}{D_{O_2-N_2}} + \frac{1}{D_{O_2,k}} \right) \quad \dots (68)$$

ซึ่งค่า D_{O2-N2} และ D_{O2,k} สามารถหาได้จาก Fuller at all. [6] และ Chapman-Enskog theory ตามลำดับ จาก Fuller at all.

$$D_{i,k} = 0.00143 \frac{T^{1.75}}{PM_{ik}^{1/2} [(\sum \nu_i)^{1/3} + (\sum \nu_k)^{1/3}]} \quad \dots (69)$$

เมื่อ $M_{ik} = 2[(1/M_i) + (1/M_k)]^{-1}$
 $\nu =$ Atomic diffusion volumes

3. Activation overpotential

เป็น Overvoltage เนื่องมาจากความพยายามในการเอาชนะพลังงานกระตุ้น (Activation energy) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยานั้นๆ

$$\eta_{act,i} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2J_{0,i}} \right) \quad \dots (70)$$

และ $J_{0,a} = \gamma_a \exp \left(- \frac{E_{act,a}}{RT} \right) \quad \dots (71)$

$$J_{0,c} = \gamma_c \exp \left(- \frac{E_{act,c}}{RT} \right) \quad \dots (72)$$

เมื่อ $J_{0,a}, J_{0,c} =$ Exchange current density (A/m)
 $\gamma_a, \gamma_c =$ Pre-exponential factors มีค่าเท่ากับ $2.051 \cdot 10^9, 1.344 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$
 $E_{act,a}, E_{act,c} =$ Activation energy มีค่าเท่ากับ $1.2 \cdot 10^5, 1.0 \cdot 10^5 \text{ J/mol}$

เพื่อจะหาค่า Activation overpotential จำเป็นต้องใช้ Butler –Volmer equation เข้ามาช่วย

จาก Butler –Volmer equation [1]:

$$J = J_{0,i} \left[\exp \left(\frac{\alpha z F \eta_{act,i}}{RT} \right) - \exp \left(- \frac{(1-\alpha) z F \eta_{act,i}}{RT} \right) \right] \quad \dots (73)$$

โดย $\alpha =$ The symmetrical factor or charge transfer coefficient มีค่าเท่ากับ 0.5

$$J = J_{0,i} \left[\exp \left(\frac{0.5 z F \eta_{act,i}}{RT} \right) - \exp \left(- \frac{(1-0.5) z F \eta_{act,i}}{RT} \right) \right] \quad \dots (74)$$

$$J = J_{0,i} \left[\exp \left(\frac{0.5 z F \eta_{act,i}}{RT} \right) - \exp \left(\frac{-0.5 z F \eta_{act,i}}{RT} \right) \right] \quad \dots (75)$$

เอา 2 ขารตลอดสมการที่ (75) จะได้

$$\frac{J}{2} = J_{0,i} \left[\frac{\exp \left(\frac{0.5 z F \eta_{act,i}}{RT} \right) - \exp \left(\frac{-0.5 z F \eta_{act,i}}{RT} \right)}{2} \right] \quad \dots (76)$$

$$\text{จาก } \sinh x = \left(\frac{e^x - e^{-x}}{2} \right)$$

$$\frac{J}{2} = J_{o,i} \sinh\left(\frac{0.5zF \eta_{act,i}}{RT}\right) \quad \dots (77)$$

$$J = 2 J_{o,i} \sinh\left(\frac{zF \eta_{act,i}}{2RT}\right) \quad , z = 2 \quad \dots (78)$$

เอา \sinh^{-1} คูณตลอด

$$\sinh^{-1} J = 2 J_{o,i} \left(\frac{2F \eta_{act,i}}{2RT} \right) \quad \dots (79)$$

จะได้
$$\eta_{act,i} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2J_{o,i}} \right)$$

4. Ohmic overpotential

เป็น Overvoltage อันเนื่องมาจากเกิดการต้านทานหรือขัดขวางการเคลื่อนที่ของไอออน ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินนี้มักจะพบมากในบริเวณ Electrolyte

$$\eta_{ohmic} = 2.99 \times 10^{-5} JL \exp\left(\frac{10300}{T}\right) \quad \dots (80)$$

เมื่อ L = Thickness of the electrolyte (μm)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้และแนวทางในการดำเนินงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้า งานวิจัยที่ได้ศึกษามีดังนี้

Momma และคณะ [8] ได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองทางทฤษฎีกับผลที่ได้จากการทดลองในการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าชนิดออกไซด์แข็ง โดยใช้ขั้วแคโทดที่ทำจาก Ni-YSZ, Electrolyte ที่ทำจาก YSZ และขั้วแอโนดที่ทำจาก LSM-YSZ ที่อุณหภูมิ 1,173, 1,223 และ 1,273 K พบว่า ผลที่ได้จากแบบจำลองทางทฤษฎีกับผลที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันและค่าศักย์ไฟฟ้า (Cell potential) จะลดลง เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น

Meng Ni และคณะ [1] ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าชนิดออกไซด์แข็งที่

อุณหภูมิ 1,273 K โดยศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density) ที่มีต่อค่า Overpotential พบว่า เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่า Ohmic overpotential จะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น รวมทั้งค่า Concentration overpotential ทั้งที่ขั้ว anode และ cathode จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แต่ Concentration overpotential ที่ขั้ว cathode จะมีค่า limiting current density อยู่ที่ประมาณ 100,000 A/m²

N.V. Dale, M.D. Mann และ H Salehfar [9] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 °C ของเครื่องแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าชนิด proton exchange membrane (PEME) โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลองทางทฤษฎี พบว่า ผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลองทางทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกัน และยังพบว่า ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าจะลดลง

Meng Ni และคณะ [1] ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าชนิดออกไซด์แข็ง ที่อุณหภูมิ 1,273 K โดยศึกษาผลของความดันที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้า (Cell potential) ที่ความดัน 0.5, 1 และ 5 bar ตามลำดับ พบว่า ความดันไม่ค่อยมีผลต่อศักย์ไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำๆ และเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ที่ความดันสูง จะส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าจะลดลง

S.H. Chan, K.A. Khor, และ Z.T. Xia [4] ได้ศึกษาถึงผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (SOFC) พบว่า เมื่อความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ส่งผลให้ค่า Concentration, Activation และ Ohmic polarization สูงขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าลดลง

ถึงแม้งานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าที่กล่าวถึงได้รับความสนใจและได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องมาจากการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีนี้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพราะใช้ไอน้ำเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา แต่กระนั้นงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีนี้ก็ยังคงต้องมีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง การพัฒนางานวิจัยในรูปแบบของแบบจำลองทางทฤษฎี รวมไปถึงการหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าก็ยังมีไม่มากนักเช่นเดียวกัน ในงานวิจัยฉบับนี้จึงได้มีความพยายามที่จะศึกษาถึงแบบจำลองทางทฤษฎีและหาสภาวะที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ, ความดัน เป็นต้น ในการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้า

3. ระเบียบวิธีวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีดำเนินงานวิจัยเพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ โดยในบทนี้จะประกอบไปด้วยระเบียบวิธีวิจัย เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ขั้นตอนงานวิจัย ฯลฯ ดังต่อไปนี้

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

- 3.1.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วย ไฟฟ้า
- 3.1.2 ทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของระบบ ได้แก่ อุณหภูมิและความดัน
- 3.1.3 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์, MATLAB เข้ามาช่วยในการคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้า พร้อมทั้งประมวลผลออกมาในรูปของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับตัวแปรต่างๆ ที่ศึกษา ซึ่งคอมพิวเตอร์ที่ใช้มีสมรรถนะในการประมวลผล 3 GHz และมีหน่วยความจำ 8000 MB

3.3 ขั้นตอนการวิจัย

3.3.1 การทดสอบความถูกต้องของสมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณ [1]

3.3.1.1 ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้า โดยเลือกศึกษาถึงการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าชนิดออกไซด์แข็งแบบ Anode-supported SOSE ของ Meng Ni et all. [1] ที่ อุณหภูมิ 1273 K, ความดัน 1 bar และสัดส่วนเชิงโมลของไอน้ำเท่ากับ 60% ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อค่า overpotential และ cell potential ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงขั้นตอนการศึกษาโดยสังเขปได้ดังนี้

$$i = 0 - 200.000 \text{ A/m}^2$$

$T = 1273 \text{ K}$, $P = 1.01 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
 $R = 8.314 \text{ J/mol K}$
 $F = 96485 \text{ C/mol}$
 $P_{\text{H}_2\text{O}}^\circ = 0.6 \cdot 1.01 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
 $P_{\text{O}_2}^\circ = 0.21 \cdot 1.01 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
 Anode-supported : $d_a = 500 \cdot 10^6 \text{ m}$
 $d_c = 50 \cdot 10^6 \text{ m}$
 $L = 50 \cdot 10^6 \text{ m}$

คำนวณค่า overpotential จากสมการ (48), (49), (67) และ (70) และ คำนวณค่า cell potential จากสมการ (33)

3.3.1.2 นำผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงของ Momma และคณะ ที่อุณหภูมิ 1173 และ 1273 K ที่ความดัน 1 bar, สัดส่วนเชิงโมลของไอน้ำเท่ากับ 60% ของเครื่องแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าชนิดออกไซด์แข็งแบบ Anode-supported SOSE ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0 – 6000 A/m²

3.3.2 การดำเนินงานวิจัย

หลังจากได้ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้า ดำเนินงานวิจัยโดยศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่อค่า overpotential และค่า cell potential ได้ดังนี้

3.3.2.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ overpotential และ cell potential

1. ทำการวิจัยศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า overpotential และ cell potential ของเครื่องผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าชนิดออกไซด์แข็งแบบ Anode-supported SOSE ซึ่ง SOSE นี้ทำงานที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 873 ถึง 1273 K จึงเลือกศึกษาผลของอุณหภูมิที่ 873, 973, 1073, 1173 และ 1273 K ที่ความดันคงที่ 1 bar และสัดส่วนเชิงโมลของไอน้ำเท่ากับ 60%
2. ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ โดยเลือกช่วงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0 - 300,000 A/m²
3. คำนวณค่า overpotential จากสมการ (48), (49), (67) และ (70) และค่า cell potential จากสมการ (33)
4. วิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า overpotential และค่า cell potential

3.3.2.2 ศึกษาผลของความดันที่มีต่อค่า overpotential และ cell potential

1. ทำการวิจัยศึกษาถึงผลของความดันที่มีต่อค่า cell potential ของเครื่องผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าชนิดออกไซด์แข็งแบบ Anode-supported SOSE ซึ่ง SOSE นี้ทำงานที่อุณหภูมิ 873, 973, 1073, 1173 และ 1273 K จึงเลือกศึกษาผลของความดัน 0.5, 1, 5 bar และสัดส่วนเชิงโมลของไอน้ำเท่ากับ 60%
2. ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ โดยเลือกช่วงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0 - 300,000 A/m²

3. คำนวณค่า overpotential จากสมการ (48), (49) และค่า cell potential จากสมการ (33)
4. วิเคราะห์ผลของความดันที่มีต่อค่า cell potential

3.3.3 การตั้งสมมติฐานของงานวิจัย

เพื่อช่วยให้การดำเนินงานวิจัยเบื้องต้นเป็นไปด้วยความง่าย จึงได้ใช้ข้อสมมติฐาน พร้อมทั้งทำการกำหนดสมภาวะต่างๆ ดังนี้

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้า จะเป็นระบบที่ไม่ขึ้นกับเวลา (steady-state condition)
2. สมมติให้แก๊สทั้งหมดในระบบ เป็นแก๊สอุดมคติ
3. จะไม่เกิดการสูญเสียความร้อน เนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์ในระบบ
4. คุณสมบัติของของไหลเป็นแบบ ของไหลที่อัดตัวไม่ได้
5. กำหนดให้อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมคงที่

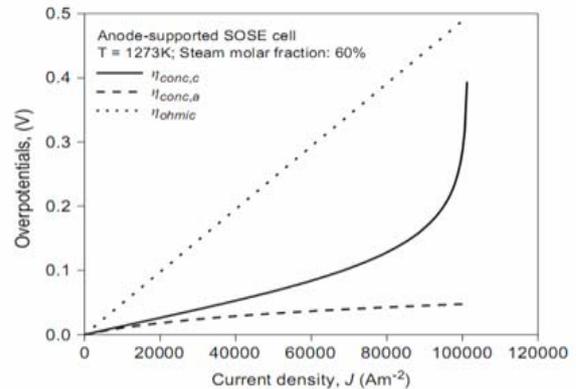
4. ผลการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการทดสอบความถูกต้องของสมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณและผลของการดำเนินงานวิจัยที่ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า overpotential และ cell potential

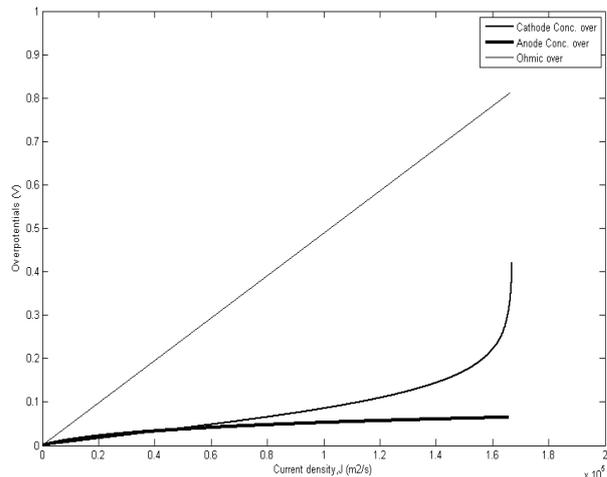
4.1 การทดสอบความถูกต้องของสมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณ

จากที่ได้ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้า โดยเลือกศึกษาถึงการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าชนิดออกไซด์แข็งแบบ Anode-supported SOSE ที่อุณหภูมิ 1273 K, ความดัน 1 bar และสัดส่วนเชิงโมลของไอน้ำ เท่ากับ 60% ของ Meng Ni et al.[1] ซึ่งจากการศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อค่า overpotential พบว่า ค่า Ohmic overpotential จะมีค่าเพิ่มขึ้นแปรผันเป็นเส้นตรงตามความหนาแน่นกระแสที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการที่ (80) ดังสมการจะเห็นได้ว่า ค่าความหนาแน่นของกระแสและค่า Ohmic overpotential แปรผันตรงกัน นั่นคือ เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่า Ohmic overpotential ก็เพิ่มขึ้นด้วย และในทางตรงกันข้าม เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟาลดลง ค่า Ohmic overpotential ก็ลดลงด้วยนั่นเอง เมื่อพิจารณาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อค่า Concentration overpotential ทั้งในขั้ว cathode และ anode พบว่า เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ก็ส่งผลให้ค่า Concentration overpotential ทั้งในขั้ว cathode และ anode เพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณกับผลที่ได้จากงานวิจัยอ้างอิง[1] ซึ่งจากรูปที่ทำการใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ จะเห็นได้ว่า ค่า Concentration overpotential ในขั้ว anode จะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้น และเริ่มคงที่ เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับผลงานวิจัยจากเอกสารอ้างอิง[1] ส่วนค่า Concentration overpotential ในขั้ว cathode จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึง limiting current density ที่ประมาณ 170,000 A/m² โดยพบว่าค่า limiting current

density สูงกว่าผลที่ได้จากงานวิจัยเอกสารอ้างอิง[1] ซึ่ง ณ จุดนี้เป็นจุดที่มีการใช้กระแสไฟฟ้าสูงสุด จนทำให้สารตั้งต้น นั่นก็คือ ไอน้ำถูกใช้จนหมดไปนั่นเอง



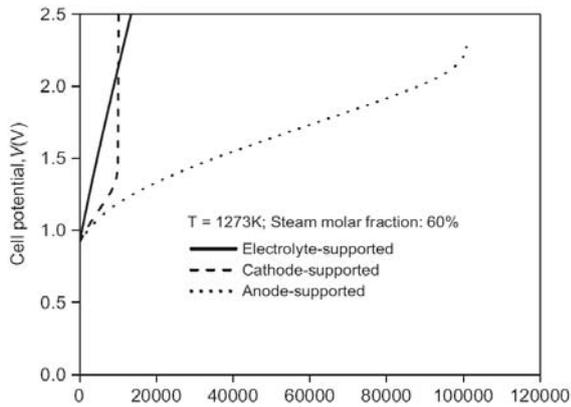
ก) ผลที่ได้จากเอกสารอ้างอิง[1]



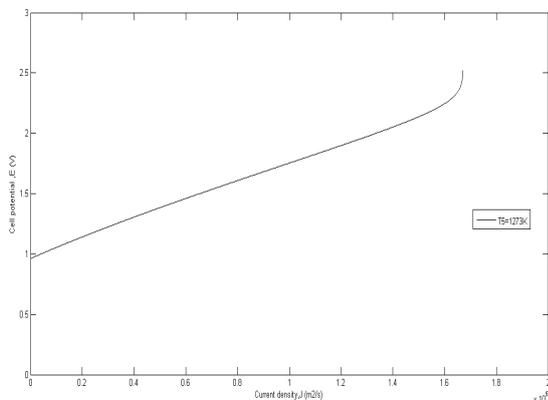
ข) ผลที่ได้จากการใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ

รูปที่ 4 เปรียบเทียบผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อค่า Concentration overpotential ทั้งในขั้ว cathode และ anode, และค่า Ohmic overpotential ระหว่างผลที่ได้จากการใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณกับผลที่ได้จากงานวิจัยเอกสารอ้างอิง [1] ที่อุณหภูมิ 1273 K

หลังจากที่ได้ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อค่า overpotential ดังกล่าวแล้ว จากนั้นเมื่อศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อค่า cell potential ที่สภาวะเดียวกัน พบว่า เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นก็ส่งผลให้ค่า cell potential สูงขึ้นตามไปด้วยตามสมการที่ (33) ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยจากเอกสารอ้างอิง[1] ดังแสดงในรูปที่ 5



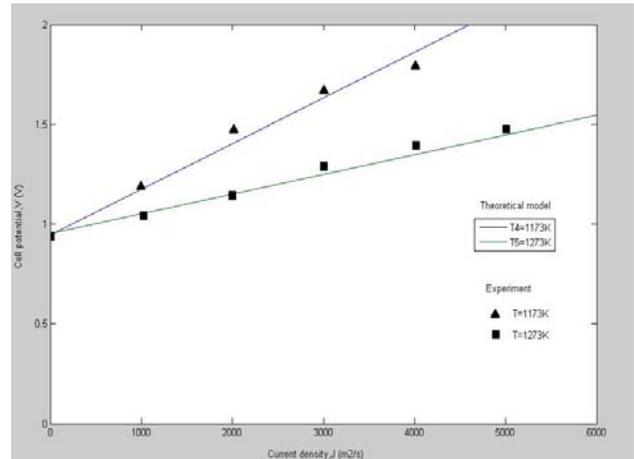
1) ผลที่ได้จากเอกสารอ้างอิง[1]



2) ผลที่ได้จากการใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ

รูปที่ 5 เปรียบเทียบผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อค่า cell potential ระหว่างผลที่ได้จากการใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณกับผลที่ได้จากงานวิจัยเอกสารอ้างอิง [1] ที่อุณหภูมิ 1273 K

จากการทดสอบความถูกต้องของสมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณดังกล่าวข้างต้น โดยเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยกับผลงานวิจัยจากเอกสารอ้างอิง[1] พบว่า ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกัน นั่นคือ เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่า Concentration overpotential, Ohmic overpotential และค่า Cell potential เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย แต่จากการศึกษาจะเห็นได้ว่า ค่า limiting current density ของผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยนั้นสูงกว่าผลที่ได้จากงานวิจัยเอกสารอ้างอิง[1] จึงได้มีการนำผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงของ Momma และคณะ ดังรูปที่ 6 จากรูปได้เปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยกับผลการทดลองจริงของ Momma และคณะ ที่อุณหภูมิ 1173 และ 1273 K ที่ความดัน 1 bar, สัดส่วนเชิงโมลของไอน้ำเท่ากับ 60% ของเครื่องแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าชนิดออกไซด์แข็งแบบ Anode-supported SOSE ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0 – 6000 A/m² พบว่า ผลที่ได้ระหว่างการศึกษากับการทดลองจริงของ Momma และคณะ มีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 6 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยกับผลการทดลองจริงของ Momma และคณะ ที่อุณหภูมิ 1173 และ 1273 K

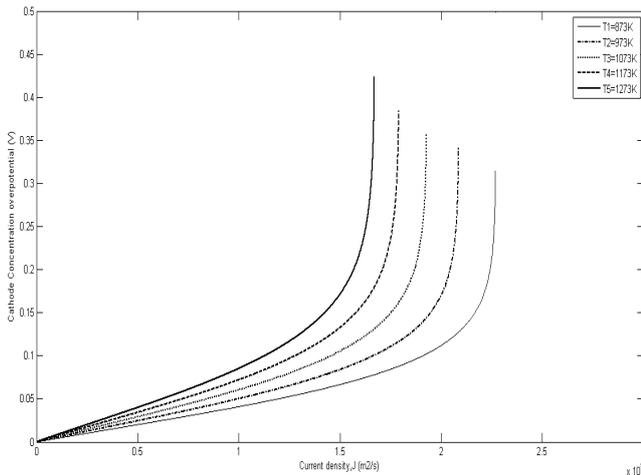
4.2 ผลการดำเนินงานวิจัย

ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่อค่า overpotential และ cell potential ของเครื่องผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าชนิดออกไซด์แข็งแบบ Anode-supported SOSE ที่อุณหภูมิ 873, 973, 1073, 1173 และ 1273 K และสัดส่วนเชิงโมลของไอน้ำเท่ากับ 60% โดยเลือกช่วงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0 - 300,000 A/m² และใช้คอมพิวเตอร์, Matlab ช่วยในการคำนวณ

4.2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า overpotential

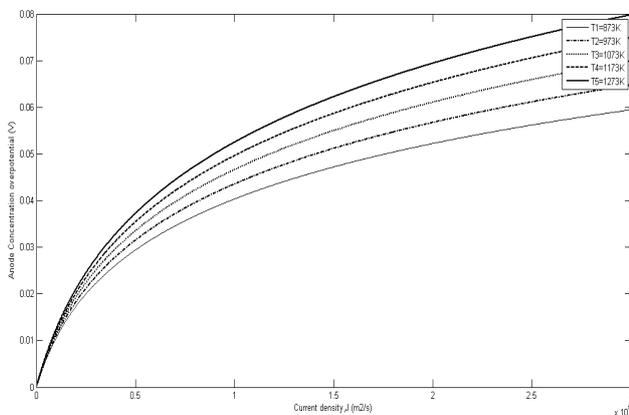
1.ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า Concentration overpotential

จากผลการคำนวณค่า Concentration overpotential ตั้งแต่ช่วงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0 - 300,000 A/m² ที่อุณหภูมิ 873, 973, 1073, 1173 และ 1273 K พบว่า ค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว cathode จะมีค่าใกล้เคียงกันในทุกอุณหภูมิที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่ำๆ และยังพบว่า ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่จุดเดียวกัน อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว Cathode สูงตามไปด้วย ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการที่ (48) หรือ (60) ก็ จะเห็นสอดคล้องดังสมการ นั่นคือ ค่า Concentration overpotential จะแปรผกผันตรงกันอุณหภูมิ นั่นเอง นอกจากนี้ยังพบว่า ที่อุณหภูมิ 873 K มีค่า limiting current density สูงที่สุด และที่อุณหภูมิ 1273 K นั้นมีค่า limiting current density ต่ำที่สุด ค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว cathode สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว cathode

ในส่วนของ Concentration overpotential ที่ขั้ว anode พบว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่า Concentration overpotential สูงขึ้น เช่นเดียวกัน และยังพบว่าเมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว cathode มีค่าสูงกว่าค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว anode โดยค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว anode สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8



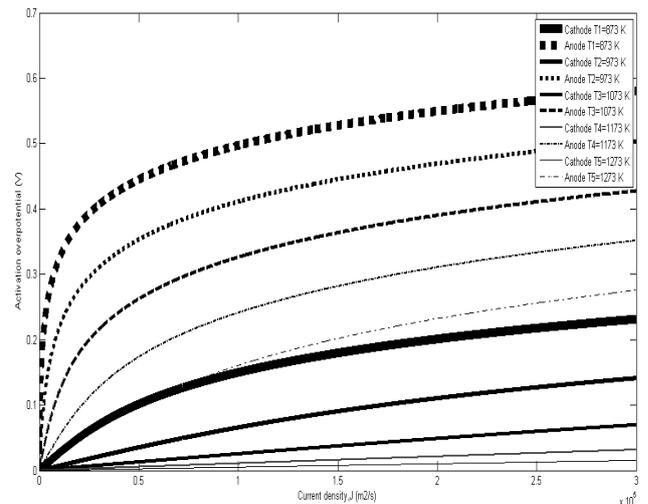
รูปที่ 8 เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว anode

ซึ่งจากรูปที่ 7 และ 8 จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่า concentration overpotential ทั้งที่ขั้ว cathode และ anode สูงขึ้น เพราะค่า concentration overpotential เป็นศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินอันเนื่องมาจากเกิดการขัดขวางหรือต้านทานการเคลื่อนที่ของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ มักพบมากบริเวณขั้วไฟฟ้า (electrode) ทั้ง cathode และ anode นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิลดลงอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่า

น้อยลง ตามทฤษฎีจลนศาสตร์อธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โมเลกุลของแก๊สจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเพิ่มขึ้น จึงมีโอกาที่จะชนกันมากขึ้น และที่บริเวณขั้วไฟฟ้าง่ายๆ โดยเฉพาะขั้ว cathode มีการป้อนสารตั้งต้น คือ ไอน้ำเข้าไปที่ขั้ว และมีไฮโดรเจน (H₂) เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นออกมาจากขั้ว เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่ดังกล่าวจึงไปขัดขวางหรือต้านทานกับไอ น้ำที่ถูกป้อนเข้ามา ดังนั้น concentration overpotential จึงเพิ่มสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

2. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า Activation overpotential

Activation overpotential เป็น Overvoltage เนื่องมาจากความพยายามในการเอาชนะพลังงานกระตุ้น (Activation energy) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยานั้นๆ จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าค่า Activation overpotential ที่ขั้ว anode มีค่าสูงกว่าค่า Activation overpotential ที่ขั้ว cathode ในทุกๆ อุณหภูมิ และยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่า Activation overpotential มีค่าลดต่ำลง เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (70) พบว่า ค่า Activation overpotential ขึ้นอยู่กับค่า exchange current density, j_0 ด้วย ซึ่ง j_0 มีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ดังนั้น อุณหภูมิที่สูงขึ้นจึงส่งผลให้ค่า j_0 มีค่าสูงขึ้น และส่งผลให้ค่า Activation overpotential มีค่าต่ำลงด้วย

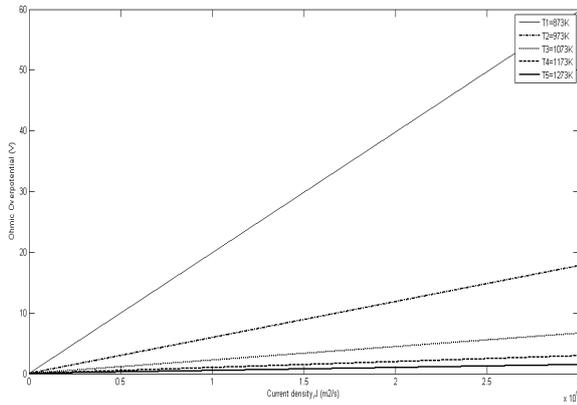


รูปที่ 9 เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า Activation overpotential ที่ขั้ว cathode และ anode

3. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า Ohmic overpotential

จากรูปที่ 10 พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ค่า Ohmic overpotential มีค่าลดต่ำลง นั่นคือ ที่อุณหภูมิ 1273 K จะส่งผลให้ค่า Ohmic overpotential มีค่าต่ำที่สุดและที่อุณหภูมิ 873 K จะส่งผลให้ค่า Ohmic overpotential สูงที่สุด เมื่อพิจารณาที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเดียวกัน เนื่องจาก Ohmic overpotential เป็นศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่เกิดจากการต้านทานหรือขัดขวางการเคลื่อนที่ของไอออน

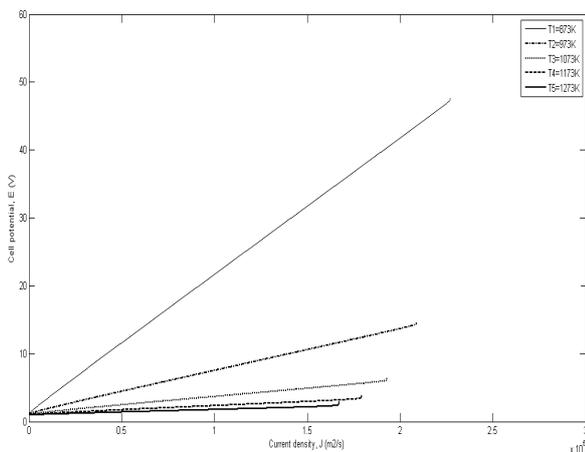
ซึ่งมักจะพบมากในบริเวณอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) นั่นก็คือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะมีค่าเพิ่มขึ้น บริเวณอิเล็กโทรไลต์ที่มีออกซิเจนไอออนเคลื่อนที่ผ่านอยู่สารเดียวกัน ก็จะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่า Ohmic overpotential มีค่าลดต่ำลง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ohmic overpotential กับอุณหภูมิ ตามสมการที่ (80) นั่นคือ ค่า Ohmic overpotential จะแปรผกผันกับอุณหภูมิ นั่นเอง



รูปที่ 10 เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า Ohmic overpotential

4.2.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า cell potential

จากรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิ 1273 K จะให้ค่า cell potential ต่ำที่สุด และที่อุณหภูมิ 873 K จะให้ค่า cell potential สูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า ที่อุณหภูมิ 1273, 1173 และ 1073 K จะให้ค่า cell potential ที่ใกล้เคียงกัน ต่างกับที่อุณหภูมิ 873 K ที่ให้ค่า cell potential ที่สูงกว่าอุณหภูมิอื่นมาก นั่นก็คือ อุณหภูมิที่สูงขึ้นไม่ได้ส่งผลให้ค่า cell potential มีค่าสูงขึ้น แต่ช่วยทำให้ค่า cell potential มีค่าลดลง นั่นเอง



รูปที่ 10 เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า cell potential

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า overpotential ทั้งสามและค่า cell potential พบว่า ที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่า Activation overpotential และ Ohmic overpotential นั้นมีค่าลดต่ำลง แต่กลับส่งผลให้ค่า Concentration overpotential มีค่าสูงขึ้น นั่นก็คือ สภาวะที่อุณหภูมิ 1273 K นั้นจะช่วยลดค่า overpotential อันเนื่องมาจาก Activation overpotential และ Ohmic overpotential ให้ต่ำลงกว่าอุณหภูมิอื่นๆที่ทำการศึกษาดังนั้นจึงส่งผลให้ที่อุณหภูมิดังกล่าวมีค่า cell potential ต่ำที่สุดด้วย

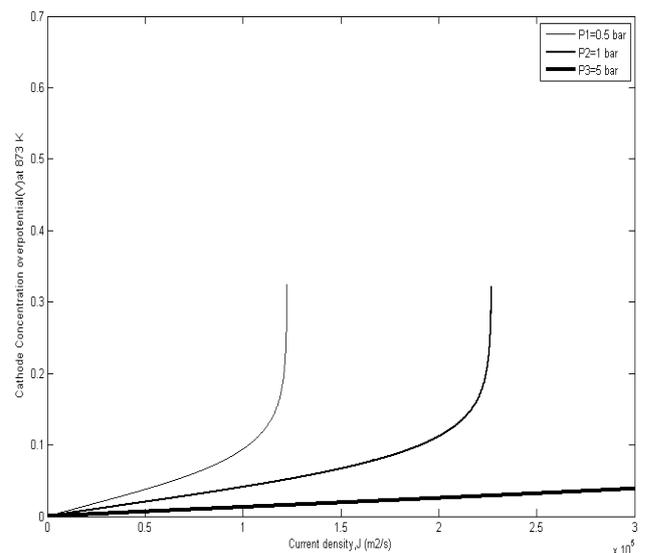
4.2.3 ผลของความดันที่มีต่อค่า overpotential

ในงานวิจัยได้ศึกษาผลของความดัน 0.5, 1 และ 5 bar ต่อค่าศักย์ไฟฟ้า (cell potential) ของเครื่องผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าชนิดออกไซด์แข็งแบบ Anode-supported SOSE ตั้งแต่ช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0 - 300,000 A/m² สัดส่วนเชิงโมลของไอน้ำเท่ากับ 60% ที่อุณหภูมิ 873, 973, 1073, 1173 และ 1273 K

4.2.3.1 ผลของความดันที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว cathode

1. ผลของความดันที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว cathode ที่อุณหภูมิ 873 K

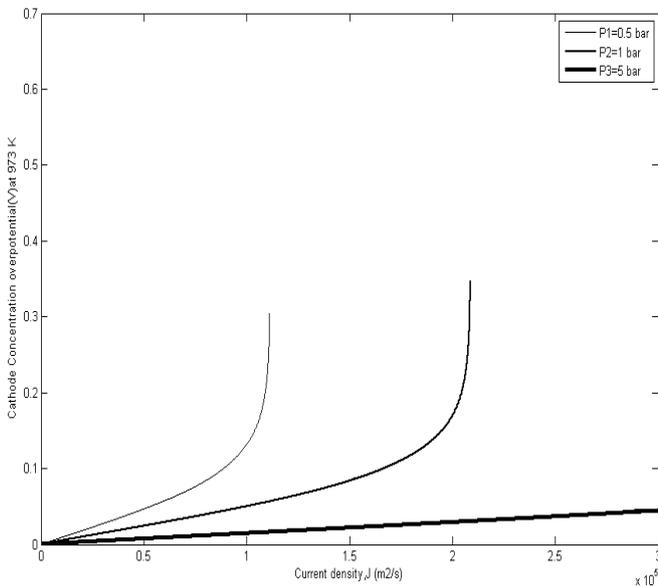
เมื่อศึกษาผลของความดันต่อค่า Concentration overpotential ที่ 0.5, 1 และ 5 bar อุณหภูมิ 873 K พบว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0 - 130,000 ที่ความดัน 5 bar จะให้ค่า Concentration overpotential ต่ำที่สุด ส่วนที่ความดัน 0.5 bar จะให้ค่า Concentration overpotential สูงที่สุด นั่นคือ เมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ Concentration overpotential มีค่าลดต่ำลง และจากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่า ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัด (Limiting current density) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อความดันเพิ่มขึ้น



รูปที่ 11 เปรียบเทียบผลของความดัน 0.5, 1 และ 5 bar ที่มีต่อค่า
Concentration overpotential อุณหภูมิ 873 K ที่ขั้ว cathode

2. ผลของความดันที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว cathode ที่อุณหภูมิ 973 K

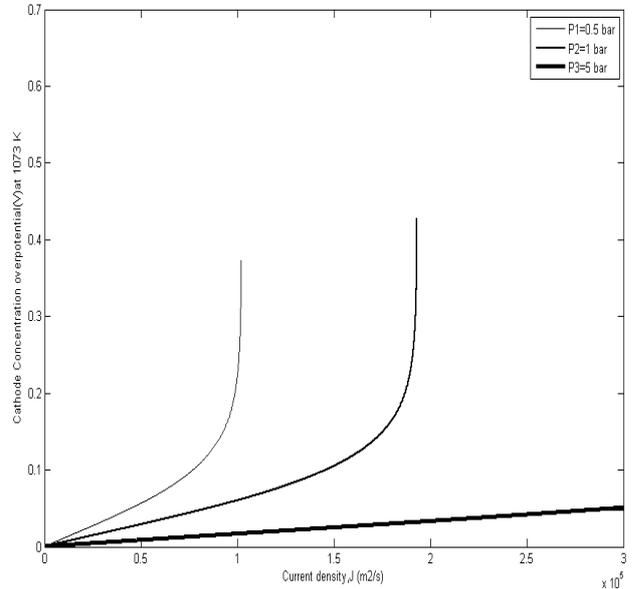
เมื่อศึกษาผลของความดันที่อุณหภูมิ 973 K ที่ความดัน 0.5, 1 และ 5 bar พบว่า ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0 – 125,000 A/m² ความดัน 5 bar จะให้ค่า Concentration overpotential ต่ำที่สุด ส่วนที่ความดัน 0.5 bar จะให้ค่า Concentration overpotential สูงที่สุด เช่นเดียวกันผลของความดันที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่อุณหภูมิ 873 K นั่นก็คือ ความดันที่เพิ่มสูงขึ้นจะช่วยให้ Concentration overpotential มีค่าต่ำลง และเมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัด (Limiting current density) ระหว่างอุณหภูมิ 873 K กับ 973 K พบว่า ที่อุณหภูมิ 873 K จะมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัด ประมาณ 1.3×10^5 A/m² สูงกว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัด ของที่อุณหภูมิ 973 K ซึ่งค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัด เป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ณ ขณะที่ปริมาณการใช้ไปของเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับอัตราการป้อนสูงสุดของเชื้อเพลิงไปยังอิเล็กโทรด จากรูปที่ 12 เมื่อพิจารณาจุดที่มีการใช้เชื้อเพลิงสูงสุด พบว่า ที่อุณหภูมิ 973 K ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 873 K นั่นก็คือ ที่อุณหภูมิสูงกว่า เชื้อเพลิงจะถูกใช้จนหมดไปเร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำนั่นเอง



รูปที่ 12 เปรียบเทียบผลของความดัน 0.5, 1 และ 5 bar ที่มีต่อค่า
Concentration overpotential อุณหภูมิ 973 K ที่ขั้ว cathode

3. ผลของความดันที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว cathode ที่อุณหภูมิ 1073 K

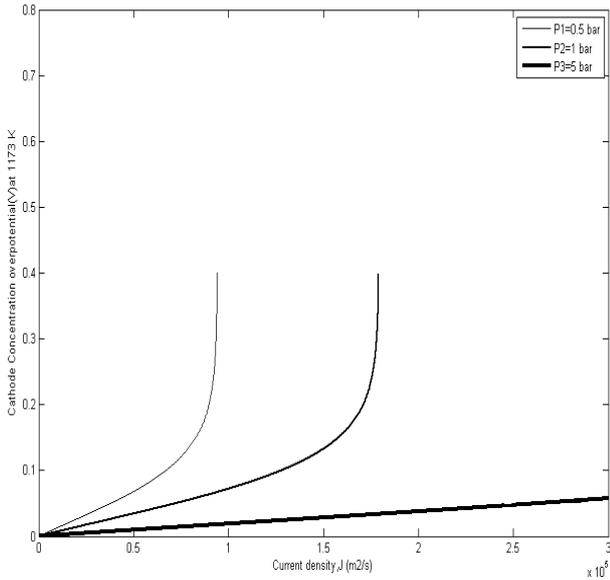
จากรูปที่ 13 เมื่อศึกษาผลของความดันที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว cathode ที่อุณหภูมิ 1073 K พบว่า ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0 – 100,000 A/m² ค่า Concentration overpotential จะมีค่าต่ำสุดที่ความดัน 5 bar แต่จะมีค่าสูงสุดที่ความดัน 0.5 bar



รูปที่ 13 เปรียบเทียบผลของความดัน 0.5, 1 และ 5 bar ที่มีต่อค่า
Concentration overpotential อุณหภูมิ 1073 K ที่ขั้ว cathode

4. ผลของความดันที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว cathode ที่อุณหภูมิ 1173 K

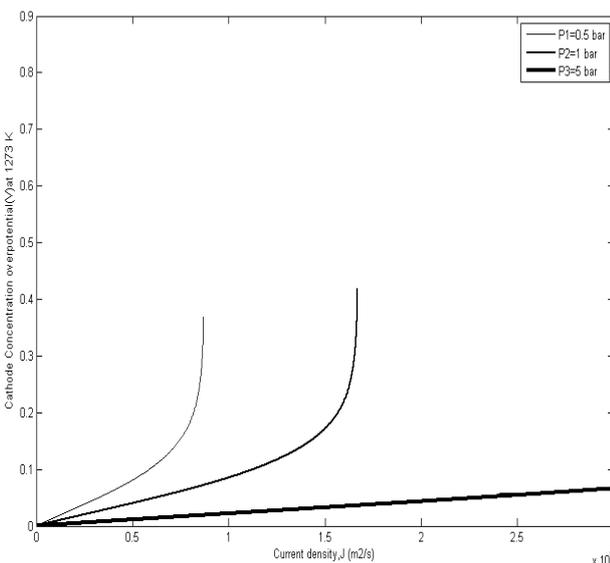
ที่อุณหภูมิ 1173 K เมื่อศึกษาผลของความดันที่ความดัน 0.5, 1 และ 5 bar พบว่า ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0 – 90,000 A/m² ความดัน 0.5 bar จะให้ค่า Concentration overpotential สูงที่สุด รองลงมาคือที่ความดัน 1 bar และที่ความดัน 5 bar จะให้ค่า Concentration overpotential ต่ำที่สุด ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 เปรียบเทียบผลของความดัน 0.5, 1 และ 5 bar ที่มีต่อค่า Concentration overpotential อุณหภูมิ 1173 K ที่ขั้ว cathode

5. ผลของความดันที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว cathode ที่อุณหภูมิ 1273 K

จากรูปที่ 15 จะเห็นได้ว่า เมื่อศึกษาผลของความดันที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว cathode ที่อุณหภูมิ 1273 K พบว่า ที่ความดัน 0.5 bar จะให้ค่า Concentration overpotential สูงที่สุด ส่วนที่ความดัน 5 bar ก็จะให้ค่า Concentration overpotential ต่ำที่สุด ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0 – 85,000 A/m²

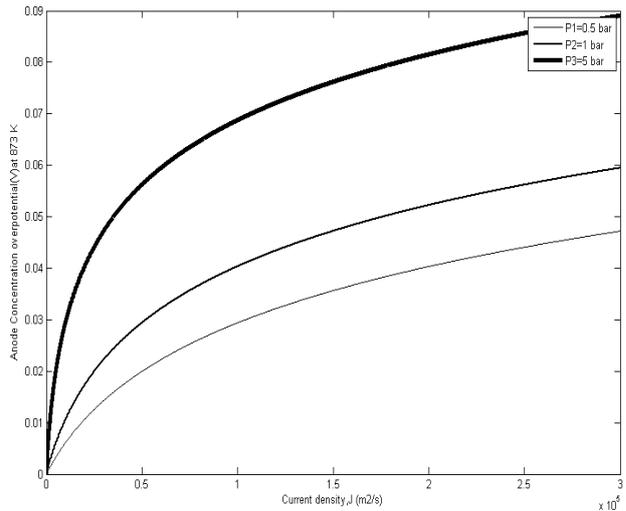


รูปที่ 15 เปรียบเทียบผลของความดัน 0.5, 1 และ 5 bar ที่มีต่อค่า Concentration overpotential อุณหภูมิ 1273 K ที่ขั้ว cathode

4.2.3.2 ผลของความดันที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว anode

1. ผลของความดันที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่ขั้วแอโนด ที่อุณหภูมิ 873 K

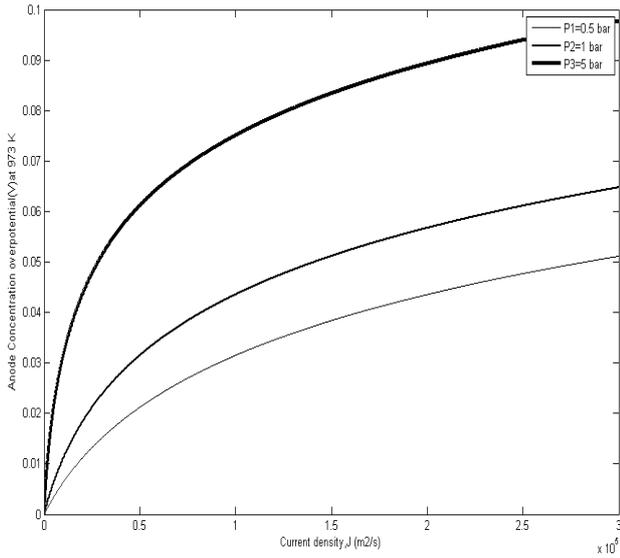
จากรูปที่ 16 จะเห็นได้ว่าที่ขั้ว anode เมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่า Concentration overpotential มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย นั่นคือ ที่ความดัน 5 bar จะให้ค่า Concentration overpotential สูงที่สุด และที่ความดัน 0.5 bar จะให้ค่า Concentration overpotential ต่ำที่สุดด้วย ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (49) นั่นเอง



รูปที่ 16 เปรียบเทียบผลของความดัน 0.5, 1 และ 5 bar ที่มีต่อค่า Concentration overpotential อุณหภูมิ 873 K ที่ขั้ว anode

2. ผลของความดันที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว anode ที่อุณหภูมิ 973 K

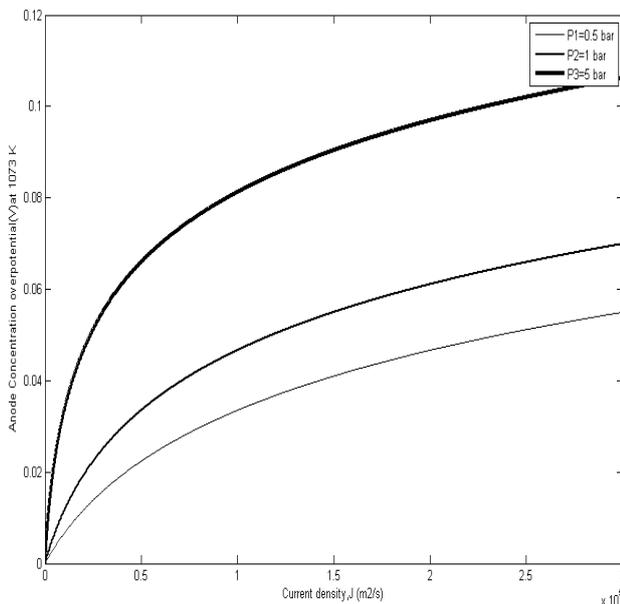
ที่อุณหภูมิ 973 K จากการศึกษาผลของความดันที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว anode พบว่า ค่า Concentration overpotential ที่ความดัน 5 bar จะมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือที่ความดัน 1 bar และค่า Concentration overpotential ที่ความดัน 0.5 bar จะมีค่าต่ำที่สุด ดังรูปที่ 17 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 16 กับรูปที่ 17 พบว่า ที่อุณหภูมิ 973 K จะให้ค่า Concentration overpotential สูงกว่าที่อุณหภูมิ 873 K ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในส่วนของผลอุณหภูมิที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว anode ดังกล่าวในหัวข้อ 4.1.1



รูปที่ 17 เปรียบเทียบผลของความดัน 0.5, 1 และ 5 bar ที่มีต่อค่า Concentration overpotential อุณหภูมิ 973 K ที่ขั้ว anode

3. ผลของความดันที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว anode ที่อุณหภูมิ 1073 K

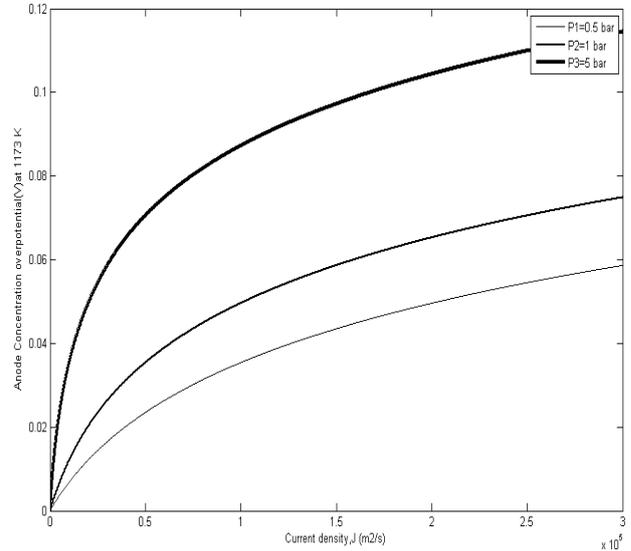
จากรูปที่ 18 พบว่า เมื่อความดันสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่า Concentration overpotential ที่ขั้วแอโนด มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย และค่า Concentration overpotential ที่อุณหภูมิ 1073 K จะมีค่าสูงกว่าค่า Concentration overpotential ที่อุณหภูมิ 873 และ 973 K ตามลำดับ



รูปที่ 18 เปรียบเทียบผลของความดัน 0.5, 1 และ 5 bar ที่มีต่อค่า Concentration overpotential อุณหภูมิ 1073 K ที่ขั้ว anode

4. ผลของความดันที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว anode ที่อุณหภูมิ 1173 K

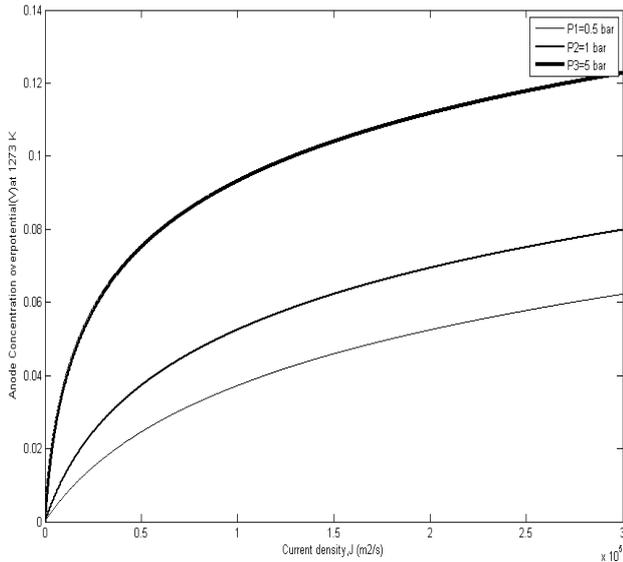
เมื่อศึกษาผลของความดันที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว anode ที่อุณหภูมิ 1173 K พบว่า ที่ความดัน 5 bar จะให้ค่า Concentration overpotential สูงที่สุด รองลงมาคือที่ความดัน 1 และ 0.5 bar ตามลำดับ ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 เปรียบเทียบผลของความดัน 0.5, 1 และ 5 bar ที่มีต่อค่า Concentration overpotential อุณหภูมิ 1173 K ที่ขั้ว anode

5. ผลของความดันที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว anode ที่อุณหภูมิ 1273 K

จากรูปที่ 20 พบว่า ที่อุณหภูมิ 1273 K ค่า Concentration overpotential ที่ความดัน 5 bar มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือที่ความดัน 1 bar ส่วนค่า Concentration overpotential ที่ความดัน 0.5 bar จะมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งผลการศึกษาผลของความดันที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว anode ที่อุณหภูมิดังกล่าว ให้ผลเช่นเดียวกับผลการศึกษาที่อุณหภูมิ 873, 973, 1073 และ 1173 K แต่ค่า Concentration overpotential ที่อุณหภูมิ 1273 K จะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอื่น ในทุกๆความดันที่ทำการศึกษา

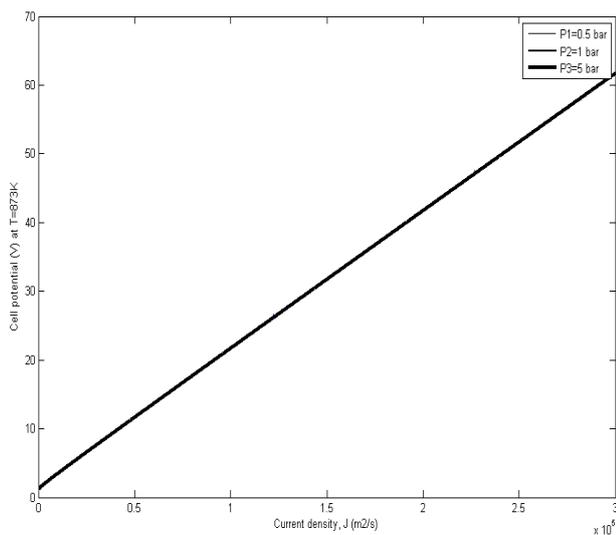


รูปที่ 20 เปรียบเทียบผลของความดัน 0.5, 1 และ 5 bar ที่มีต่อค่า Concentration overpotential อุณหภูมิ 1273 K ที่ขั้ว anode

4.2.4 ผลของความดันที่มีต่อค่า cell potential

1. ผลของความดันที่มีต่อค่า cell potential ที่อุณหภูมิ 873 K

จากนั้นศึกษาผลของความดันที่มีต่อค่า cell potential ของเครื่องผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าชนิดออกไซด์แข็งแบบ Anode-supported SOSE ตั้งแต่ช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0 - 300,000 A/m² ที่อุณหภูมิ 873 K และสัดส่วนเชิงโมลของไอน้ำเท่ากับ 60% โดยพิจารณาศึกษาที่ความดัน 0.5, 1 และ 5 bar พบว่า ผลของความดันที่ 0.5, 1 และ 5 bar ต่อค่า cell potential ไม่แตกต่างกันที่อุณหภูมิดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 21

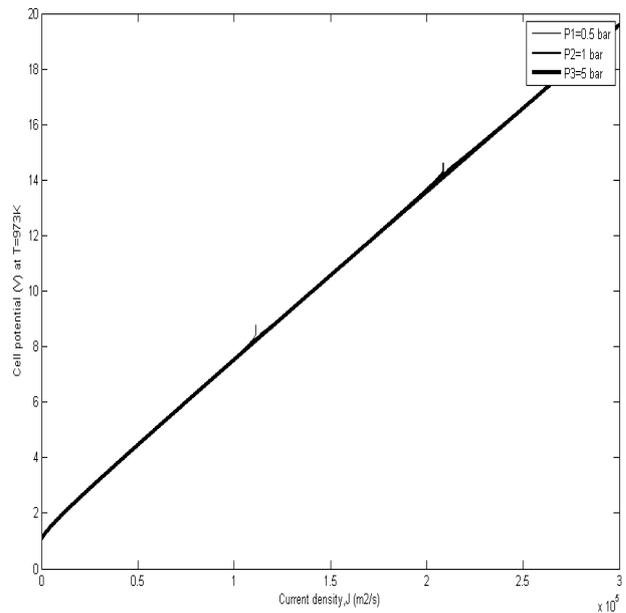


รูปที่ 21 เปรียบเทียบผลของความดัน 0.5, 1 และ 5 bar ที่มีต่อ cell potential ที่อุณหภูมิ 873 K

2. ผลของความดันที่มีต่อค่า cell potential ที่อุณหภูมิ 973 K

ผลของความดัน 0.5, 1 และ 5 bar ต่อค่า cell potential ที่อุณหภูมิ 973 K แสดงดังรูปที่ 22 ซึ่งจากรูป พบว่าผลของความดัน 0.5, 1 และ 5 bar ต่อค่า cell potential ยังคงไม่แตกต่างกัน เหมือนกับผลของที่อุณหภูมิ 873 K แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 21 กับ 22

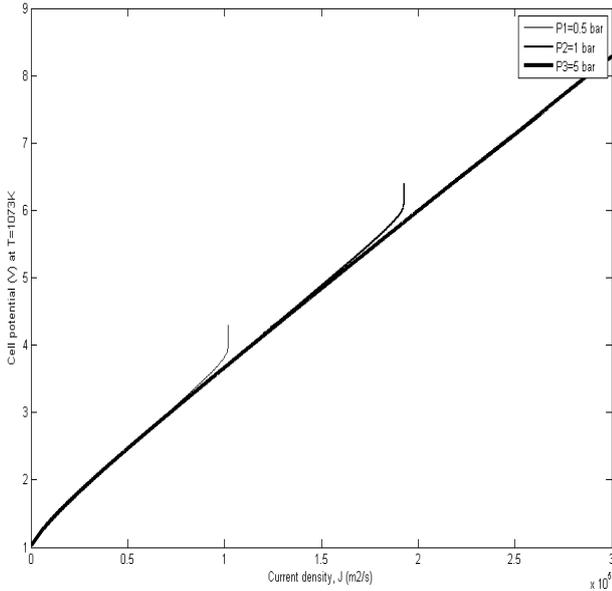
จะเห็นว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจุดเดียวกัน พบว่า ที่อุณหภูมิ 873 K จะให้ค่า cell potential สูงกว่าที่อุณหภูมิ 973 K ในทุกๆความดันที่ทำการศึกษา



รูปที่ 22 เปรียบเทียบผลของความดัน 0.5, 1 และ 5 bar ที่มีต่อ cell potential ที่อุณหภูมิ 973 K

3. ผลของความดันที่มีต่อค่า cell potential ที่อุณหภูมิ 1073 K

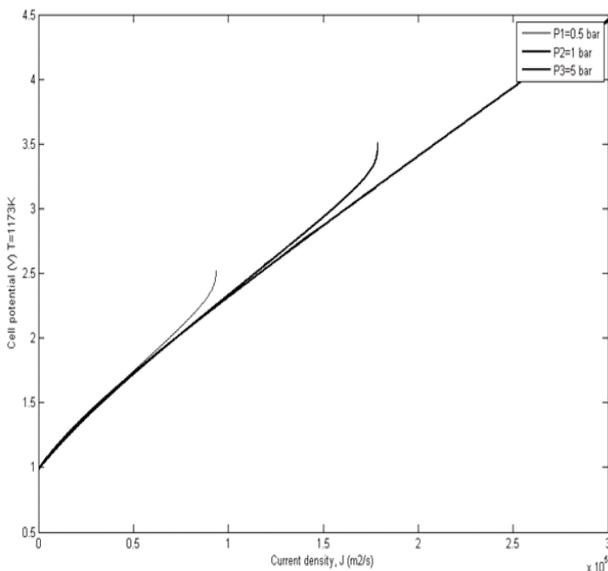
จากรูปที่ 23 ผลของความดันที่มีต่อค่า cell potential เริ่มเห็นชัดเจนมากขึ้น แต่ผลของความดันที่มีต่อค่า cell potential ก็ยังคงไม่แตกต่างกันมากนักในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า 80,000 A/m² แต่ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 80,000 – 100,000 A/m² พบว่า ที่ความดัน 0.5 bar จะให้ค่า cell potential สูงกว่าที่ความดัน 1 และ 5 bar นอกจากนี้จากรูปยังสังเกตเห็นพบว่า ค่า cell potential ที่อุณหภูมิ 1073 K มีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 873 และ 973 K ในทุกๆความดันที่ทำการศึกษา



รูปที่ 23 เปรียบเทียบผลของความดัน 0.5, 1 และ 5 bar ที่มีต่อ cell potential ที่อุณหภูมิ 1073 K

4. ผลของความดันที่มีต่อค่า cell potential ที่อุณหภูมิ 1173 K

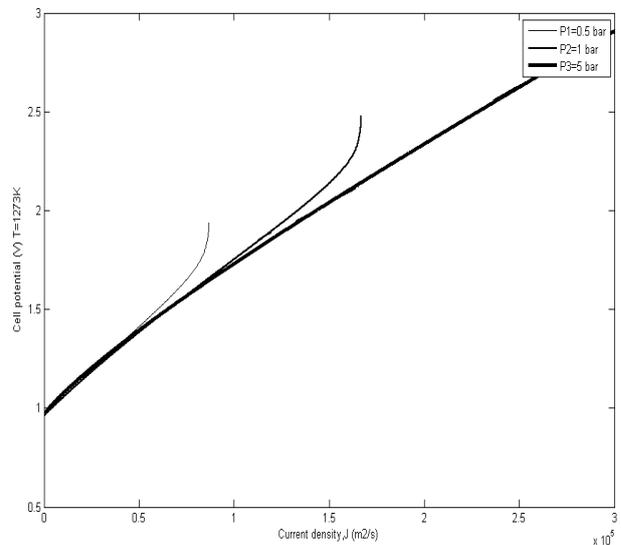
เมื่อศึกษาผลของความดัน 0.5, 1 และ 5 bar ต่อค่า cell potential ที่อุณหภูมิ 1173 K พบว่า ช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า 50,000 A/m² ผลของความดันที่มีต่อค่า cell potential ก็ยังคงไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นในช่วง 50,000 – 80,000 A/m² พบว่า ที่ความดัน 0.5 bar จะให้ค่า cell potential สูงที่สุด และที่ความดัน 5 และ 1 bar จะให้ค่า cell potential ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 24



รูปที่ 24 เปรียบเทียบผลของความดัน 0.5, 1 และ 5 bar ที่มีต่อ cell potential ที่อุณหภูมิ 1173 K

5. ผลของความดันที่มีต่อค่า cell potential ที่อุณหภูมิ 1273 K

จากรูปที่ 25 พบว่า ที่อุณหภูมิ 1273 K จะให้ค่า cell potential ต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 873, 973, 1073 และ 1173 K และยังคงพบว่า ผลของความดันที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้า (cell potential) จะไม่แตกต่างกันนักในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0 - 40,000 A/m² แต่เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเริ่มสูงขึ้นระหว่าง 40,000 – 80,000 A/m² พบว่า ที่ความดัน 0.5 bar จะให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (cell potential) สูงกว่าที่ความดัน 1 และ 5 bar และในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้านี้ที่ความดัน 1 และ 5 bar จะให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (cell potential) ใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 25



รูปที่ 25 เปรียบเทียบผลของความดัน 0.5, 1 และ 5 bar ที่มีต่อ cell potential ที่อุณหภูมิ 1273 K

จากที่ได้ศึกษาผลของความดัน 0.5, 1 และ 5 bar ต่อค่าศักย์ไฟฟ้า (cell potential) cell potential ของเครื่องผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าชนิดออกไซด์แข็งแบบ Anode-supported SOSE ตั้งแต่ช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0 - 300,000 A/m² สัดส่วนเชิงโมลของไอน้ำเท่ากับ 60% ที่อุณหภูมิ 873, 973, 1073, 1173 และ 1273 K พบว่า ผลความดันต่อค่าศักย์ไฟฟ้า (cell potential) นั้น ขึ้นอยู่กับช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ดังนั้น จึงแนะนำให้ใช้ความดันที่ 1 bar เนื่องจากไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มความดันสูงกว่า 1 bar หรือการลดความดันให้ต่ำกว่า 1 bar ล้วนแล้วแต่ต้องมีการใช้พลังงานสูงเข้ามาเกี่ยวข้อง

5. สรุปผลงานวิจัย

5.1 การทดสอบความถูกต้องของสมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณ

จากที่ได้ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้า โดยเลือกศึกษาถึงการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าชนิดออกไซด์แข็งแบบ Anode-supported SOSE ที่อุณหภูมิ 1273 K, ความดัน 1 bar และสัดส่วนเชิงโมลของไอน้ำเท่ากับ 60% ของ Meng Ni et al.[1] ซึ่งจากการศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อค่า overpotential และ cell potential แล้วทดสอบความถูกต้องของสมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณ พบว่า

1. เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ก็ส่งผลให้ค่า Concentration overpotential ทั้งในขั้ว cathode และ anode เพิ่มขึ้นด้วยซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยจากเอกสารอ้างอิง [1] แต่จากการศึกษาพบว่า ค่า Concentration overpotential ในขั้ว cathode มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัด (limiting current density) สูงกว่าผลที่ได้จากงานวิจัยจากเอกสารอ้างอิง

2. ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อค่า Ohmic overpotential มีค่าสอดคล้องกับงานวิจัยจากเอกสารอ้างอิง นั่นคือ ค่า Ohmic overpotential จะเพิ่มขึ้นแปรผันเป็นเส้นตรงตามความหนาแน่นกระแสที่เพิ่มขึ้น

3. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นก็ส่งผลให้ค่า cell potential สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยจากเอกสารอ้างอิง[1] แต่ค่า cell potential ก็ยังคงมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัด (limiting current density) สูงกว่าผลที่ได้จากงานวิจัยจากเอกสารอ้างอิง[1]

จากนั้น จึงได้มีการนำผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงของ Momma และคณะ โดยได้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยกับผลการทดลองจริงของ Momma และคณะที่อุณหภูมิ 1173 และ 1273 K ที่ความดัน 1 bar, สัดส่วนเชิงโมลของไอน้ำเท่ากับ 60% ของเครื่องแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าชนิดออกไซด์แข็งแบบ Anode-supported SOSE ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0 – 6000 A/m² พบว่า

4. ผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยกับการทดลองจริงของ Momma และคณะ มีค่าใกล้เคียงกัน

5.2 ผลการดำเนินงานวิจัย

ได้ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า overpotential และ cell potential ของเครื่องผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วย

ไฟฟ้าชนิดออกไซด์แข็งแบบ Anode-supported SOSE ที่อุณหภูมิ 873, 973, 1073, 1173 และ 1273 K ที่ความดัน 1 bar และสัดส่วนเชิงโมลของไอน้ำเท่ากับ 60% โดยเลือกช่วงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0 - 300,000 A/m² และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์, Matlab ช่วยในการคำนวณ โดยพบว่า

5.2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า overpotential

1. ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่จุดเดียวกัน อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่า Concentration overpotential ทั้งในขั้ว cathode และ anode สูงตามไปด้วย

2. เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่า Activation overpotential มีค่าลดต่ำลง

3. อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่า Ohmic overpotential มีค่าลดต่ำลงเช่นเดียวกัน

5.2.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า cell potential

อุณหภูมิที่สูงขึ้นไม่ได้ส่งผลให้ค่า cell potential มีค่าสูงขึ้น แต่ที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้ค่า cell potential ลดลง

จากนั้นศึกษาผลของความดันที่มีต่อค่า overpotential และ cell potential ของเครื่องผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีแยกสลายไอน้ำด้วยไฟฟ้าชนิดออกไซด์แข็งแบบ Anode-supported SOSE ที่สัดส่วนเชิงโมลของไอน้ำเท่ากับ 60% โดยพิจารณาศึกษาที่ความดัน 1, 0.5 และ 5 bar ตามลำดับ ในช่วงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0 - 300,000 A/m² พบว่า

5.2.3 ผลของความดันที่มีต่อค่า overpotential

1. ผลของความดันที่มีต่อค่า Concentration overpotential ที่ขั้ว cathode ขึ้นอยู่กับช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

2. ที่ขั้ว anode ค่า Concentration overpotential ที่ความดัน 5 bar จะมีค่าสูงที่สุด ส่วนที่ความดัน 0.5 bar ก็จะทำให้ค่า Concentration overpotential ต่ำที่สุดในทุก ๆ อุณหภูมิที่ทำการศึกษา

5.2.4 ผลของความดันที่มีต่อค่า cell potential

ผลความดันต่อค่าศักย์ไฟฟ้า (cell potential) นั้น ขึ้นอยู่กับช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

6. เอกสารอ้างอิง

1. Ni, M., Leung, M.K.H. and Leung, D.Y.C., 2007, "Parametric Study of Solid Oxide Steam Electrolyzer for Hydrogen Production", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, No. 13, pp. 2305-2313
2. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน, 2548, โลกยุคประหยัดพลังงาน [Online], Available : [http:// www.pyo.nu.ac.th](http://www.pyo.nu.ac.th). [21 กรกฎาคม 2551]
3. Allen, J.B. and Larry, R.F., 1980, ELECTROCHEMICAL METHODES, section 3.3 and 4.3.2, pp. 92-103 and 130-133.
4. Chan, S.H., Khor K.A. and Xia Z.T., 2001, "A Complete Polarization Model of a Solid Oxide Fuel Cell and its Sensitivity to the Change of Cell Component Thickness", Journal of Power Sources, Vol. 93, No. 5, pp. 130-140.
5. H., O., Ryon, S. won Cha, C. Whitney, and P. B. Fritz, FUEL CELL FUNDAMENTALS, section 2.2, pp. 32-37.
6. Yakabe H., Hishinuma M. and Uratani M., 2000, "Evaluation and Modelling of Performance of Anode-Supported Solid Oxide Fuel Cell", Journal of Power Sources, Vol. 86, No. 1, pp. 423-431.
7. Properties of gases and liquids, Chapter 11, pp. 577-629.
8. Momma, A., Kato, T., Kaga, Y. and Nagata, S., 1997, "Polarization Behavior of High Temperature Solid Oxide Electrolysis Cells (SOEC)", Journal of Ceramic Society of Japan, Vol. 105, No. 5, pp. 369-373.
9. Dale, N. V., Mann M., D. and Salehfar, H., 2008, "Semiempirical Model based on Thermodynamic Principles for Determining 6 kW Proton Exchange Mambrene Electrolyzer Stack Characteristics", Journal of Power Sources, Vol. 185, No. 21, pp. 1348-1353.

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร. เก้ากัณยา สุดประเสริฐ อาจารย์ประจำสายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้แนวคิดและคำแนะนำในการแก้ปัญหาอันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยนี้ รวมถึง ผศ. ดร. ณัฐฐ์ กาศยปนนันท์, ผศ. ดร. นริส ประทีนทอง และ ผศ. ดร. สันติ หวังนิพนพานโต ที่กรุณาสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และยังให้คำแนะนำสำหรับวิทยานิพนธ์สุดท้ายขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ พี่ๆ และเพื่อนๆ ในสายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน ที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือมาตลอด