



แบบรายงานความก้าวหน้าการดำเนินงานโครงการวิจัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รายงานความก้าวหน้า รอบ...12...เดือน ประจำปีงบประมาณ...2554
หน่วยงาน...คณะวิศวกรรมศาสตร์

ส่วนที่ 1. ข้อมูลทั่วไป

- ชื่อโครงการ อธิปไตยของโครงสร้างอิเล็กโทรดระดับจุลภาคต่อสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง
Effect of Electrode Microstructure on Solid-Oxide Fuel Cell Performance
- รายนามคณะผู้วิจัย
 - นาย สันติ วัฒนานูสรณ์ (หัวหน้าโครงการ)
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โทรศัพท์ 02-329-8360 ต่อ 166 E-mail santi_wattananusorn@hotmail.com
 - นาย นิวัฒน์ ภูเจริญ (ผู้ร่วมโครงการวิจัย)
สำนักบริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 6115 E-mail kpniwat@kmitl.ac.th
- งบประมาณการวิจัยที่ได้รับ...64,900...บาท
- แหล่งงบประมาณแผ่นดิน แหล่งเงินรายได้
- ระยะเวลาทำการวิจัย...1...ปี เริ่มทำการวิจัยเมื่อ...ตุลาคม 2553...ถึง...กันยายน 2554
- วัตถุประสงค์ของโครงการ
เพื่อการศึกษาอิทธิพลของความยาวขอบเขต 3 สถานะต่อสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง
ต่อรูปแบบการไหล (ตามกัน และ สวนกัน) ความร้อน ไฟฟ้า

ส่วนที่ 2. การรายงานความก้าวหน้า

1. ตารางแสดงความก้าวหน้าของโครงการ ณ ช่วงรายงานเมื่อเทียบกับแผนการดำเนินงานทั้งโครงการ

รายละเอียด กิจกรรม	ความก้าวหน้าของโครงการ / เดือน											
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
สืบค้นข้อมูล วิธีการคำนวณ												
ปรับปรุง สมรรถนะ คอมพิวเตอร์												
ดำเนินการสร้าง แบบ 3 มิติ และ สร้างกริด												

แผนงานทั้งโครงการที่วางไว้
 ผลการดำเนินงานจนถึงปัจจุบัน

2. รายละเอียดทางวิชาการที่ได้รับจากการวิจัย

แสดงรายละเอียดความก้าวหน้างานวิจัยโดยย่อ โดยแสดงข้อมูลที่ชัดเจนและเข้าใจง่าย

ซึ่งประกอบด้วยข้อมูล เชิงวิทยาศาสตร์ กราฟ ตาราง หรือภาพประกอบ (ถ้ามี)

..... โปรดดูเอกสารแนบ.....

3. สรุปผลการดำเนินงาน

เป็นไปตามแผน
 ไม่เป็นตามแผน เนื่องจาก.....

4. ความก้าวหน้าการดำเนินงานโครงการวิจัยที่ดำเนินการไปแล้ว คิดเป็นร้อยละ.....100.....

5. รายละเอียดแผนงานที่จะดำเนินการต่อไป โปรดดูตารางรายละเอียดกิจกรรมในข้อ 1

6. การรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณ

6.1 การเบิกจ่ายงบประมาณ

งวดที่ 1 : 64,900 บาท 100 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน 29.พ.ย. 2553

งบประมาณที่เบิกจ่ายไปแล้วรวมทั้งสิ้น 64,900 บาท

6.2 สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้ นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำแนกตามหมวดค่าใช้จ่าย)

หมวดค่าใช้จ่าย	ค่าใช้จ่าย (บาท)
ค่าใช้สอย	19,470
ค่าวัสดุ	12,980
อื่นๆ	32,450

งบประมาณที่จ่ายไปแล้วรวมทั้งสิ้น 64,900 บาท

7. ปัญหา/อุปสรรค —

8. ข้อเสนอแนะ / แนวทางแก้ปัญหา —

9. กำหนดเวลาที่จะส่งรายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ประมาณเดือน กันยายน พ.ศ. 2555

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าข้อความดังกล่าวไว้ในข้างต้นเป็นจริงทุกประการ

ลงชื่อ

(ดร. สันติ วัฒนานุกรณ์)

หัวหน้าโครงการ

วันที่ 27 กันยายน 2555

ลงชื่อ

(ดร. พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์)

หัวหน้าหน่วยงานที่หัวหน้าโครงการสังกัด

วันที่ 27 กันยายน 2555

รายละเอียดของงานวิจัย

1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

โครงการนี้จะนำเสนอการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบโลหะรองรับ ด้วยวิธี membrane-electrode-assembly (MEA) โดยทำการศึกษาอิทธิพลของความยาวขอบเขต 3 สถานะต่อสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง ต่อ รูปแบบการไหล(ตามกันและสวนกัน) ความร้อน ไฟฟ้า และเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Ramakrishna และคณะ จากปี 2006 [1] โดยมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสำหรับการทำโครงการวิจัยเป็นดังต่อไปนี้

1.1. สมการอนุพันธ์ และสมมติฐานของแบบจำลอง

แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งอยู่บนพื้นฐานของสมการอนุพันธ์ มวล โมเมนตัม พลังงาน ไฟฟ้า และสปีชีส์ (species) สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงการจำลองที่สำคัญ ได้แก่ ปฏิกิริยาการถ่ายโอนในวัสดุพรุน (porous media) เช่น ปฏิกิริยาเฮเทอโรเจนีอัส (heterogeneous reaction) ในอิเล็กโทรด (electrode) และมีปฏิสัมพันธ์ ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (electrochemical) กับสนามของศักย์ไฟฟ้า (current-potential field) สมมติฐานของแบบจำลอง 1. สภาวะคงตัว (steady state) 2. ไหลราบเรียบ (laminar flow) 3. อุณหภูมิที่ขอบเขตของการจำลองคงที่ (isothermal) 4. แก๊สอุดมคติ (ideal gas) 5. ไม่คิดอิทธิพลของการกลายเป็นไอ (vaporization) และของเหลว (condensation) ในสถานะแก๊ส 6. ใช้สมการ Stefan-Maxwell อธิบายการแพร่ของแก๊สชนิดต่างๆ (multi-species) 7. ใช้สมการ Butler-Volmer อธิบายปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) 8. ใช้สมการ Nerst-Planck อธิบายการถ่ายโอนไอออนในอิเล็กโทรด 9. ใช้กฎของ Ohm อธิบาย polarization curve 10. ไม่คิดอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง

1.2. การแพร่ของแก๊สในอิเล็กโทรด

สมมติฐานของสมการอนุพันธ์มวลและโมเมนตัมในวัสดุพรุนให้คิอิทธิพลของ porosity ϵ และ permeability K ร่วมด้วย จะได้

สมการอนุพันธ์มวล

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon\rho) + \nabla \cdot (\epsilon\rho\mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

เมื่อ ϵ เป็น isotropic porosity , ρ เป็น ความหนาแน่น และ \mathbf{v} เป็น เวกเตอร์ความเร็ว ของแก๊สผสม

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\varepsilon \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) = -\varepsilon \nabla p + \nabla \cdot (\varepsilon \boldsymbol{\delta}) + \frac{\varepsilon^2 \mu \mathbf{v}}{\kappa} \quad (2)$$

เมื่อ p เป็น ความดัน , $\boldsymbol{\delta}$ เป็น เทนเซอร์ความเค้นเฉือน (shear stress tensor) , μ เป็น ความหนืดพลวัต , κ เป็น ค่าการซึมผ่านได้ ส่วนเทอมสุดท้ายด้านขวามือ (2) เป็น Darcy's drag force ขึ้นอยู่กับช่องว่าง (pore) ของของไหล ซึ่งมีผลต่อความดันตกคร่อม (pressure drop) ในอิเล็กทรอนิกส์

สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} [(1-\varepsilon)\rho_B h_B + \varepsilon \rho h] + \nabla \cdot (\varepsilon \rho \mathbf{v} h) \\ & = \nabla \cdot \mathbf{q} + \varepsilon \boldsymbol{\delta} \cdot \nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \cdot \nabla (\varepsilon \rho) - j_t \left(\frac{S}{V} \right)_{eff} \eta + \frac{|\mathbf{i} \cdot \mathbf{i}|}{\sigma} \end{aligned} \quad (3)$$

เมื่อ h เป็น enthalpy ของแก๊สผสม , ρ_B , h_B เป็น ความหนาแน่นและ enthalpy ของของแข็ง เทอมที่ 2 และ 3 ด้านขวามือของ (3) เป็น พลังงานเนื่องจากการสลายตัวของความหนืด (viscous dissipation) และ งานเนื่องจากการอัดตัว (compression work) ซึ่งเป็นกระบวนการย้อนกลับได้ ตามลำดับ ส่วน \mathbf{q} เป็น heat flux ประกอบด้วย ความร้อนเนื่องจากการนำ (thermal conduction) และความร้อนเนื่องจากการแพร่ของสปีชีส์ (species diffusion) สามารถเขียนเป็น

$$\mathbf{q} = \lambda_{eff} \nabla T + \sum_i \mathbf{J}_i h_i \quad (4)$$

เมื่อ h_i เป็น enthalpy ของสปีชีส์ใดๆ ซึ่งเป็นผลรวมของ enthalpy of formation และ sensible enthalpy , \mathbf{J}_i เป็น diffusion flux , T เป็น อุณหภูมิ และ λ_{eff} เป็น effective thermal conductivity ของของไหลและของแข็งร่วมกัน ส่วน 2 เทอมสุดท้ายด้านขวามือของ (4) เป็น electrical work และ Joule heating ตามลำดับ เทอมที่ 2 และ 5 เป็นการสูญเสียอันเนื่องมาจากกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ (irreversible loss) เกิดขึ้นขณะทำปฏิกิริยา โดยการเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานความร้อนตามกฎอนุรักษ์พลังงาน ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว

สมการอนุรักษ์สปีชีส์

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho \mathbf{v} w_i) = \nabla \cdot \mathbf{J}_i + M_i (v_i'' - v_i') \left(\frac{S}{V} \right)_{eff} \frac{j_t}{F} \quad (5)$$

ด้านซ้ายมือของ (5) เป็นเทอมการพา (convection term) ส่วนเทอมสุดท้ายด้านขวามือเป็น source term ของอัตราการสร้าง (creation rate) หรือ อัตราการบริโภค (consumption rate) ของสปีชีส์ใดๆต่อปริมาตรของวัสดุพอร์ ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า แบบเฮเทอโรเจนีอัส (heterogeneous electrochemical reactions) ซึ่งผลผลิต (product) ของ

ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ในกรณีนี้เป็นแบบ อัตราผลผลิตเชิงปริมาตร (volumetric production rate) ส่วน v'_i และ v''_i เป็น normalized stoichiometric coefficients สำหรับ ตัวทำปฏิกิริยา (reactants) และ ผลผลิต ตามลำดับ และ M_i เป็น molecular weight ของสปีชีส์ใดๆ, $(S/V)_{eff}$ เป็น effective surface-to-volume ratio ซึ่งเชื่อมต่อโดยตรงกับ triple phase boundary (TPB) และเทอมแรกด้านขวามือ (5) เรียกว่า เทอมการแพร่ (diffusion term) มี J_i เป็น diffusion flux สามารถเขียนใหม่เป็น

$$J_i = \rho D_{i,eff} \nabla w_i + \frac{\rho w_i}{M} D_{i,eff} \nabla M + \rho w_i \sum_j D_{j,eff} \nabla w_j + \rho w_i \frac{\nabla M}{M} \sum_j D_{j,eff} w_j \quad (6)$$

เทอมแรกเป็นการแพร่แบบ Fickian diffusion เกิดจาก concentration gradients ส่วน 3 เทอมที่เหลือเรียกว่า correction terms ซึ่งอยู่ในรูปของ effective diffusion coefficient ของสปีชีส์ j ใดๆในช่องการไหล $D_{i,eff}$ และ $D_{j,eff}$ เป็น effective mass diffusion coefficient ใช้บอกขนาดของการแพร่เข้าสู่อิเล็กโทรด ของ Stefan-Maxwell diffusion โดยอนุมานจาก free stream diffusion coefficient $D_{i,FS}$ หรือเรียกว่า Bruggemann model ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า tortuosity τ ตามสมการ (7)

$$D_{i,eff} = D_{i,FS} \varepsilon^\tau \quad (7)$$

1.3. แบบจำลองของ Ramakrishna

จากการศึกษาและการจำลองเปรียบเทียบแบบจำลองของ Hwang และคณะ จากปี 2005 [2] และแบบจำลองของ Ramakrishna และคณะ จากปี 2006 [1] ผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ จากนั้นเราศึกษาแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง ชนิดราบแบบ โลหะรองรับ ด้วยการเพิ่มแบบจำลองวัสดุพอร์นเข้าไปในแบบจำลองของ Ramakrishna หน้า 2 mm. ทำด้วย ผงผสม STS430 โดยให้อยู่ด้านอา-โนด [3,4] โดยสมมุติให้คุณสมบัติวัสดุพอร์นของโลหะรองรับ เป็นไปตามสมการด้านล่าง

$$\kappa = \frac{d_p^2}{36k_0 \tau} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}$$

โดยอาศัยความสัมพันธ์ของ Kozeny-Carman [5] เมื่อ d_p เป็น average particle diameter, k_0 เป็น shape factor ซึ่ง Wyllie และคณะ พบว่า k_0 มีค่าระหว่าง 2.0-3.0 อย่างไรก็ตาม Carman รายงานว่าค่าของ $k_0 \tau$ ที่สอดคล้อง (fit) กับผลการทดลอง จะมีค่าเท่ากับ 5 หรือเรียกว่า Kozeny constant

สำหรับค่า permeability K ของโลหะรองรับ ทางคณะผู้วิจัยทำการศึกษาเปรียบเทียบโดยการเปลี่ยนค่า d_p จาก 20 μm ถึง 200 μm จะได้ค่า K อยู่ระหว่าง $1\text{e-}12 \text{ m}^2$ ถึง $1\text{e-}10 \text{ m}^2$ และจากผลการจำลองพบว่า permeability แปรผกผันกับ current density และได้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจาก โลหะรองรับที่มีขนาดความพอร์นที่ใหญ่ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ เพราะ พื้นที่ตัวนำไฟฟ้าลดลงตามขนาดความพอร์น

1.4. ความยาวของขอบเขต 3 สถานะและความเป็นรูปพรุน

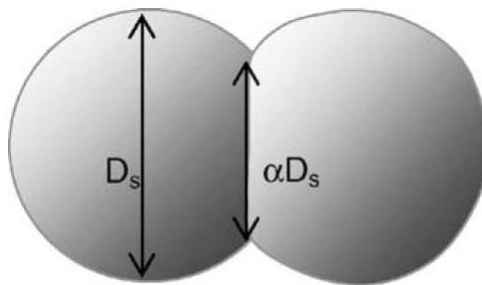
แบบจำลองพื้นที่ผิวปฏิกิริยาต่อหน่วยปริมาตร มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับขอบเขต 3 สถานะ และถูกใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเชิงปริมาตร แต่ไม่ได้เชื่อมโยงรูปแบบสมการต่อตัวแปรการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ดังจะแสดงในสมการด้านล่างนี้

$$A_v J = A_v J_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha z F \eta_{act}}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\alpha) z F \eta_{act}}{RT}\right) \right] \quad (8)$$

เมื่อ $A_v J$ คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเชิงปริมาตร มีหน่วยเป็น $[L^2/L^3][A/L^2]$ และ

$$J_0 = J_{0,ref} \left(\frac{x}{x_{ref}}\right)^\gamma \left(\frac{p}{p_{ref}}\right)^\gamma \left(\frac{T_{ref}}{T}\right)^\gamma \quad \text{เมื่อ } \gamma \text{ คือ อันดับปฏิกิริยา} \quad (9)$$

จากสมการ (9) การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับอัตราส่วนของเศษส่วนโมล, อัตราส่วนของความดันและอัตราส่วนของอุณหภูมิ ดังนั้น การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอ้างอิง อาจเป็นสัมประสิทธิ์การแปรผันตรงของสมการ ซึ่งสมการนี้แปรผันตรงกับความยาวของขอบเขต 3 สถานะ ซึ่งความยาวของขอบเขต 3 สถานะสามารถหาได้จาก ขนาดของเกรน ความพรุนและขนาดรูพรุน แบบจำลองนี้พัฒนาขึ้นจากแบบจำลองทางเรขาคณิต ในปี 2005 โดย Xiaohua Deng และคณะ ซึ่งมีสมมุติฐานว่า ขนาดของเกรนหรืออนุภาคตัวนำอิเล็กทรอนิกส์และไอออน มีขนาดเท่ากัน โดยดูรูปด้านล่างประกอบคำอธิบาย



รูปที่ 1 แนวคิดแบบจำลองของ Xiaohua Deng และคณะ

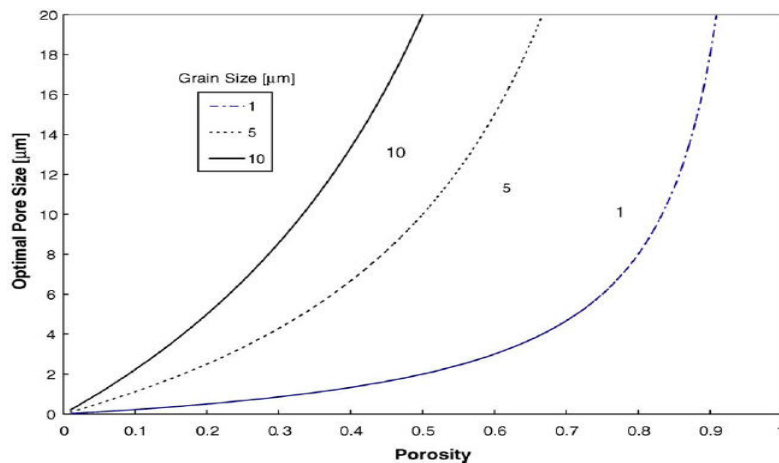
จากรายงานการศึกษา พบว่า การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับความยาวของขอบเขต 3 สถานะ และสามารถคำนวณได้จาก ขนาดของเกรน ความพรุนและขนาดรูพรุน ดังนี้

$$L_{TPB} = \frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s) V_p] V_p}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})} \quad (10)$$

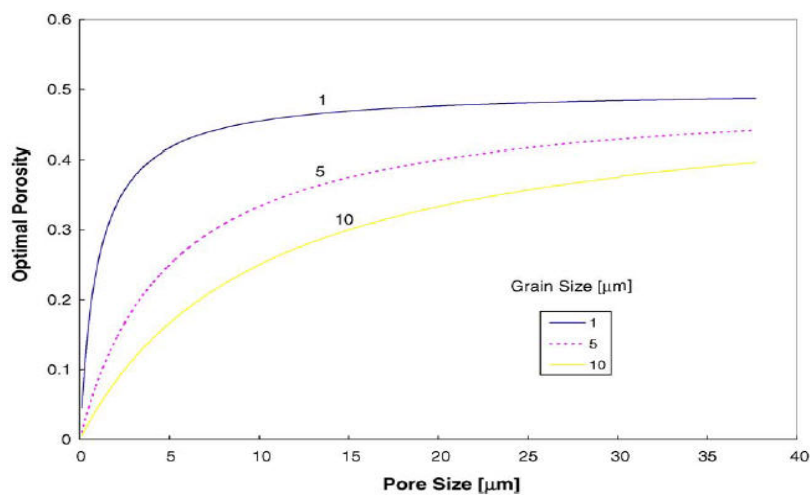
เมื่อ L_{TPB} คือ ความยาวของขอบเขต 3 สถานะ มีหน่วยเป็น $[L/L^4]$, α คือ อัตราส่วนความยาวของการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคตัวนำอิเล็กทรอนิกส์และไอออน, V_p คือ ความพรุนของอิเล็กโทรด, $D_{s,p}$ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเกรนและรูพรุนตามลำดับ จากสมการพบว่า ความยาวของขอบเขต 3 สถานะแปรผกผันกับขนาดของเกรน ดังนั้น หากต้องการได้ การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงต้องทำให้ขนาดของเกรนเล็กเท่าที่จะทำได้ แต่อย่างไรก็เราควรหาขนาดของรูพรุนและความพรุนที่เหมาะสมสำหรับขนาดของเกรนตามต้องการ ดังต่อไปนี้

ขนาดรูพรุนที่เหมาะสม
$$D_p^{opt} = 2D_s \frac{V_p}{1-V_p} \quad (11)$$

ความพรุนที่เหมาะสม
$$V_p^{opt} = \frac{D_p}{2(D_p + D_s)} \quad (12)$$



รูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ของสมการ (11)



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ของสมการ (12)

และจากการค้นคว้าเพิ่มเติม พบที่จะได้ขนาดของรูพรุนและความพรุน ที่ใช้ในการศึกษากันอยู่ ณ ขณะนี้ ซึ่งเป็นข้อมูลหรือแนวทางในการคำนวณย้อนกลับหาค่าขนาดของเกรน เพื่อประเมินค่าการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ตามตารางด้านล่างนี้

ตารางที่ 1 คุณสมบัติวัสดุพรุนของ Ni-YSZ และ/หรือ LSM-YSZ

$\kappa_{anode} [m^2]$	$\kappa_{cathode} [m^2]$	METHOD	MICROSTRUCTURE	SOURCE
$2-18 \times 10^{-14}$		Permeametry, porosimetry.	$\varepsilon \approx 0.4,$ $1\mu m > d_p > 5\mu m$	[37]
$1-4 \times 10^{-14}$		Permeametry	$\varepsilon > 0.3$	[38]
	2.96×10^{-14}	Permeametry	$\varepsilon=0.3, d_p=1\mu m$	[39]
9.83×10^{-15}		Permeametry	$d_p \approx 0.5-10\mu m$	[40]
$1-5 \times 10^{-15}$		Permeametry, porosimetry	$0.2 > \varepsilon > 0.5$	[41]
10^{-12}	10^{-12}	constant parameter	$\varepsilon=0.38 - 0.5,$ $d_p=1-2\mu m$	[42,43]
1.7×10^{-12}	1.7×10^{-12}	constant parameter	$\varepsilon=0.3, d_p=1\mu m$	[44]
1.57×10^{-12}	1.57×10^{-12}	constant parameter	$d_p=1\mu m$	[4]
1.76×10^{-11}	1.76×10^{-11}	constant parameter	$\varepsilon = 0.5$	[2]
1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}	constant parameter	$\varepsilon=0.9$	[5]
2.18×10^{-14}	3.6×10^{-14}	Kozeny-Carman	$\varepsilon=0.35, d_p=0.5\mu m$	[45]
1.27×10^{-15}	1.27×10^{-15}	Kozeny-Carman	$\varepsilon=0.3, d_p=0.5\mu m$	[16]
9.237×10^{-15}	9.237×10^{-15}	Kozeny-Carman	$\varepsilon=0.5, d_p=2.5\mu m$	[17]
1.9×10^{-15}	1.9×10^{-15}	Kozeny-Carman	$\varepsilon=0.3, d_p=1\mu m$	[46]
8×10^{-16} (6×10^{-15})	8×10^{-16} (6×10^{-15})	Kozeny-Carman (numerical experiment)	$\varepsilon=0.4, d_p=0.9\mu m$	[47]
1.27×10^{-15}	1.27×10^{-15}	Kozeny-Carman	$\varepsilon=0.3, d_p=0.5\mu m$	[26]

ดังนั้น การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่แปรผันตรงกับความยาวของขอบเขต 3 สถานะ สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$J_{0,i} \propto \frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s) V_p] V_p}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})} \quad (13)$$

และจากความสัมพันธ์ทั้ง 2 รูปแบบของการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$J_{0,a} \propto \frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s) V_p] V_p}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})} \left(\frac{P_{H_2}}{P_{ref}} \right) \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{ref}} \right) \exp\left(-\frac{E_{act,a}}{RT} \right) \quad (14)$$

สำหรับด้านแอโนด

$$J_{0,a} = k_a \frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s) V_p] V_p \left(\frac{P_{H_2}}{P_{ref}} \right) \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{ref}} \right) \exp\left(-\frac{E_{act,a}}{RT}\right)}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})} \quad (15)$$

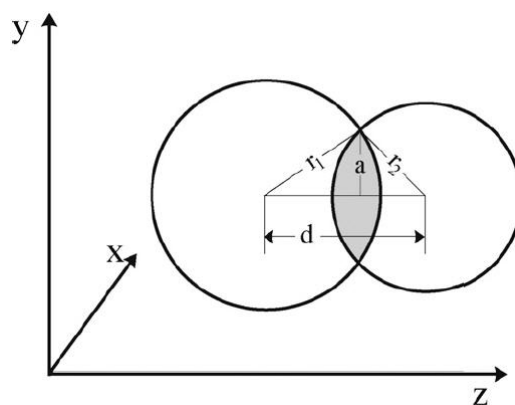
และ

$$J_{0,c} \propto \frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s) V_p] V_p \left(\frac{P_{O_2}}{P_{ref}} \right)^{0.25} \exp\left(-\frac{E_{act,c}}{RT}\right)}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})} \quad (16)$$

สำหรับด้านคาโทด

$$J_{0,c} = k_c \frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s) V_p] V_p \left(\frac{P_{O_2}}{P_{ref}} \right)^{0.25} \exp\left(-\frac{E_{act,c}}{RT}\right)}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})} \quad (17)$$

เมื่อ $k_{a,c}$ คือ สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าด้านแอโนดและคาโทด ตามลำดับ และจากสมการ (15) และ (17) แสดงให้เห็นว่า การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เป็นฟังก์ชันของโครงสร้างทางจุดภาคของ อิเล็กโทรดและเงื่อนไขขณะทำงาน แต่อย่างไรก็ตาม แบบจำลองของ Xiaohua Deng และคณะ ยังอยู่บนพื้นฐานของ อนุภาคตัวนำอิเล็กตรอนและไอออน ที่มีขนาดเท่ากัน ซึ่งในความเป็นจริงคณะผู้วิจัยทางด้านวัสดุศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิง อาจจะพัฒนาให้อนุภาคตัวนำอิเล็กตรอนและไอออน มีขนาดไม่เท่ากัน เพื่อหวังผลในทางที่ดีขึ้น ก็ย่อมเป็นไปได้



รูปที่ 4 แนวคิดแบบจำลองของ Vinod M. Janardhanan และคณะ

ดังนั้น ในปี 2008 Vinod M. Janardhanan และคณะ ได้พัฒนาแบบจำลองความยาวของขอบเขต 3 สถานะ โดยสามารถใช้ได้ทั้งขนาดของอนุภาคตัวนำอิเล็กตรอนและไอออน เท่ากันและไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4 และความยาวของขอบเขต 3 สถานะแบบอนุภาคตัวนำอิเล็กตรอนและไอออน มีขนาดไม่เท่ากัน สามารถเขียนแสดงได้ดังนี้

อนุภาคไม่เท่ากัน
$$vL_{TPB} = \frac{\phi(1-\phi)(1+M)Z_{i-e}2\pi a}{(4/3)\pi(r_1^3 + Mr_2^3) - (1-\psi)(1+M)V_1} \quad (18)$$

และ

อนุภาคเท่ากัน
$$vL_{TPB} = \frac{\phi(1-\phi)Z_{i-e}2\pi a}{(4/3)\pi r^3 - (1-\psi)V_1} \quad (19)$$

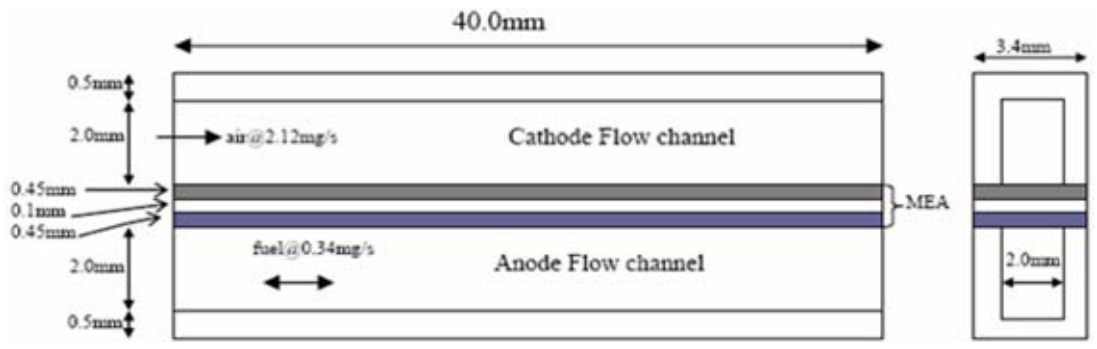
เมื่อ vL_{TPB} คือ ความยาวของขอบเขต 3 สถานะ มีหน่วยเป็น $[L]/[L^3]$, ϕ คือ ความพรุน, M คือ อัตราส่วนของจำนวนอนุภาคตัวนำไอออนและอิเล็กตรอน, Z_{i-e} คือ จำนวนการประสานกันของอนุภาคตัวนำไอออนและอิเล็กตรอน, a คือ รัศมีความยาวของการสัมผัสระหว่างอนุภาคตัวนำไอออนและอิเล็กตรอน, $r_{1,2}$ คือ รัศมีความยาวของอนุภาคตัวนำที่โตกว่าและที่เล็กกว่า ตามลำดับ, ψ คือ เศษส่วนของการซ้อนกัน, V_1 คือ ปริมาตรสูญเสีย แต่อย่างไรก็ตาม แบบจำลองนี้ น่าจะพัฒนาต่อยอดจากแนวคิดของ Costamagna และคณะ ดังนั้น ในบทความนี้ ผู้วิจัยได้ละ สมการของแต่ละตัวแปรเอาไว้ ณ ที่นี้ และผู้วิจัยท่านอื่นๆสามารถศึกษาค้นคว้าได้จากเอกสารที่เกี่ยวข้องได้ ตามลำดับต่อไป จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมด เป็นการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา ต่อไปเราจะศึกษาตัวแปรการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส เป็นลำดับต่อไป

2. การจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งของผู้ทำวิจัย

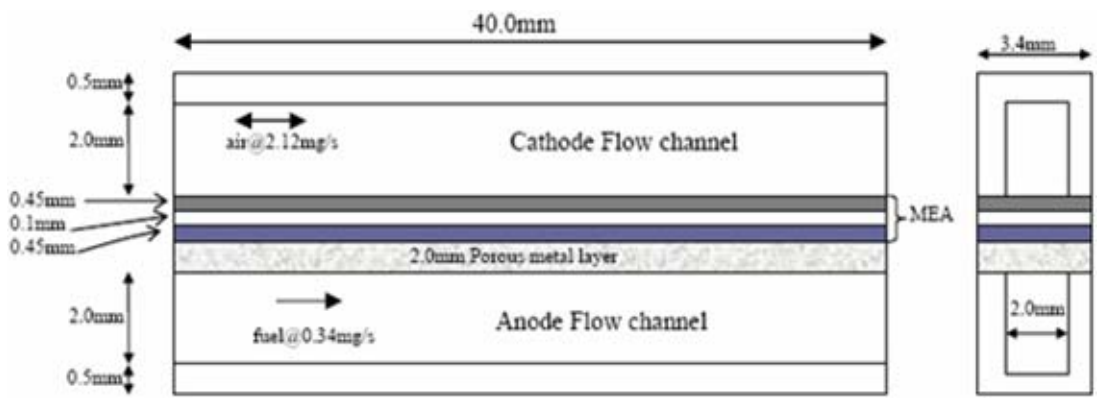
จากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเราค้นพบว่าการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับความยาวของขอบเขต 3 สถานะ และสามารถคำนวณได้จาก ขนาดของเกรน ความพรุนและขนาดรูพรุนความยาวของขอบเขต 3 สถานะ ซึ่งแปรผกผันกับขนาดของเกรน โดยหากต้องการได้การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขนาดของเกรนต้องมีขนาดเล็กเท่าที่จะทำได้และควรหาขนาดของรูพรุนและความพรุนที่เหมาะสมสำหรับขนาดของเกรนตามต้องการ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำความความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ 3 สถานะกับคุณสมบัติความเป็นรูพรุนของวัสดุรูพรุน (ตาราง 1) มาเป็นแนวทางสำหรับการสร้างรูปแบบการจำลองและลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง มีรายละเอียดแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง รวมทั้ง เงื่อนไขของแบบจำลอง การสร้างกริด และการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปดังต่อไปนี้

2.1. รูปร่างของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง

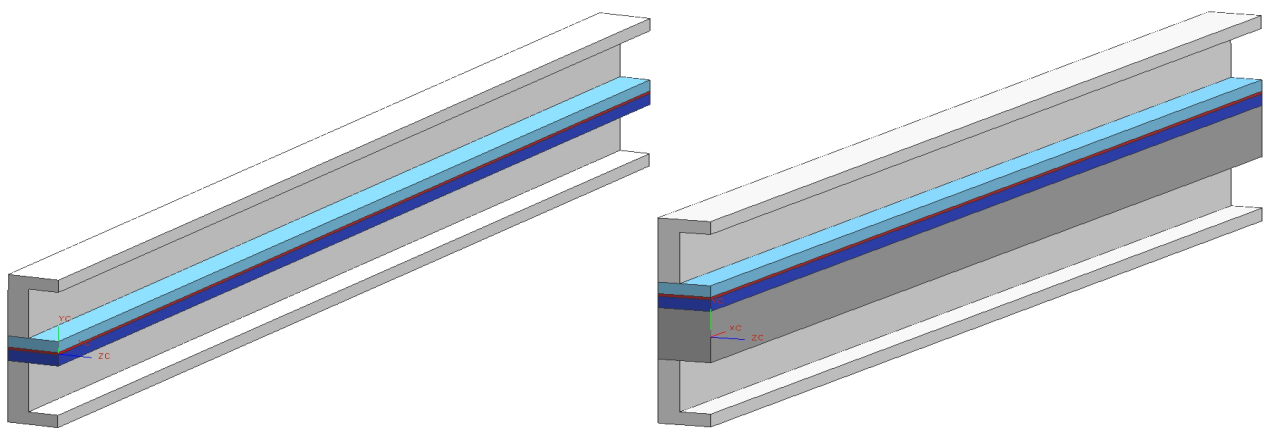
แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบ ก.) และแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบโลหะรองรับ ข.) เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาและพัฒนาอินเตอร์-คอนเนคเตอร์ โดยคณะผู้วิจัยเพิ่มโลหะรองรับ ซึ่งเป็นวัสดุรูพรุนที่ด้านอาโนด หนา 2 mm. ทำด้วยผสม STS430 ดังในรูปที่ 7



รูปที่ 5 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบ



รูปที่ 6 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบโลหะรองรับ



ก.) แบบจำลอง 3 มิติ ชนิดราบ

ข.) แบบจำลอง 3 มิติ แบบโลหะรองรับ

รูปที่ 7 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง

ตารางที่ 2 คุณสมบัติวัสดุพอร์นและโลหะ [1]

Volume name	ϵ	K	k	RXN	S/V	Pore	Diffusivity	σ_M
Anode	0.4	1e-12	6.23	Eq. 8	1e2	1e-6	Bruggman(2)	1e5
Cathode	0.5	1e-12	9.6	Eq. 9	1e2	1e-6	Bruggman(2)	7.7e3
Electrolyte	0.01	1e-18	2.7	-	-	1e-6	Bruggman(2)	1e-20
Metal-supported	0.5	1e-10	27	-	-	20e-6	Bruggman(2)	85e4
	[6]	[7]	[8]			[9]	[1]	[8]
Anode contact	-	-	27	-	-	-	-	85e4
			[8]					[8]
Cathode contact	-	-	27	-	-	-	-	85e4
			[8]					[8]

ϵ : porosity (fluid volume/total volume); K : permeability (m^2) (total volume/surface area)²; k: thermal conductivity (W/m.K); S/V: surface to volume ratio (1/m) and σ_M : electrical conductivity ($1/\Omega m$)

ตารางที่ 3 คุณสมบัติการถ่ายโอนของวัสดุพอร์น [1]

Volume name	ρ	μ	σ_s	C_p	k	Γ
Anode	IGL	MixKin	10	JANNAF	MixKin	SCH(0.7)
Cathode	IGL	MixKin	10	JANNAF	MixKin	SCH(0.7)
Electrolyte	IGL	MixKin	10	JANNAF	MixKin	SCH(0.7)
Metal-supported	IGL [1]	MixKin	1e-20	JANNAF	MixKin	SCH(0.7)
		[1]	[1]	[1]	[1]	[1]
Anode channel	IGL	MixKin	1e-20	JANNAF	MixKin	SCH(0.7)
Cathode channel	IGL	MixKin	1e-20	JANNAF	MixKin	SCH(0.7)
Anode contact	7.7e3	-	-	0.8	-	-
Cathode contact	7.7e3	-	-	0.8	-	-

ρ : density (kg/m^3); IGL: ideal gas law; μ : viscosity (kg/ms); MixKin: kinetic theory; σ_s : electrical conductivity ($1/\Omega m$); C_p : specific heat (J/kgK) by JANNAF curve fit; k: thermal conductivity (W/mK) and Γ : mass diffusivity (kg/ms) by Schmidt number yttrium stabilized ZrO₂ (8 mol% Y₂O₃)

2.2. เงื่อนไขขอบเขตแบบจำลอง กริด (grid) และรูปแบบของกริด

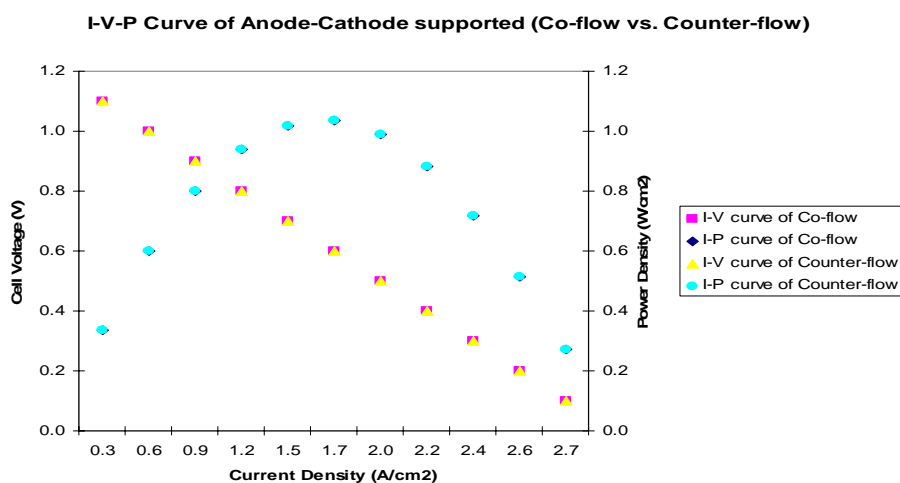
กำหนดอัตราส่วนโดยมวลของอากาศทางเข้าด้านคาโธด 3.415×10^{-6} kg/s อัตราส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิงทางเข้าด้านแอโนด 2.12×10^{-5} kg/s อุณหภูมิและความดันทางเข้าของทั้ง 2 ด้านเป็น 1,073 K และ 1 atm ตามลำดับ ส่วนเงื่อนไขการจำลองรูปแบบการไหลของการศึกษาในโครงการมีการไหลตามกันและการไหลสวนกัน จำนวนกริดที่ใช้ในการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง เป็นจำนวนกริดที่ไม่ส่งผลต่อคำตอบของปัญหา (grid-independent) ซึ่งได้ตามแกน (x,y,z) ดังนี้ (80,70,10) ตามลำดับ และรูปร่างของกริด คือ กริดสี่เหลี่ยมหกด้านแบบสามมิติ (hexahedral mesh)

2.3. โปรแกรมสำเร็จรูปและเวลาที่ใช้ในการจำลอง

การศึกษาโครงการนี้ ใช้โปรแกรม CFD-RC ถูกพัฒนาจากวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method) ใช้ SIMPLEC algorithm ในการคำนวณค่าตัวแปรในโดเมนของการคำนวณ และใช้แบบจำลอง Darcy สำหรับวัสดุพรุน โดยสมมติให้ความต้านทานเป็นเชิงเส้นแบบเท่ากันทุกทิศทาง (isotropic linear resistance model) สำหรับเวลาที่ใช้ในการคำนวณโดยเฉลี่ยของแต่ละแบบจำลองประมาณ 3 ชั่วโมง โดยกำหนดค่าเข้าสู่คำตอบ (convergence) 1×10^{-4} คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ IBM, ระบบประมวลผล (CPU) Intel PM 1.73 GHz และขนาดหน่วยความจำ (RAM) 2 GB

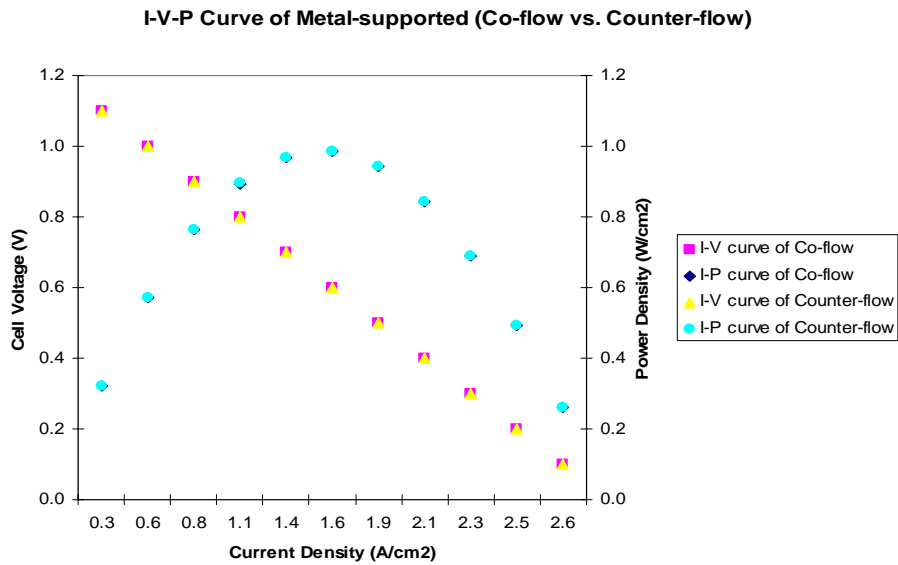
3. ผลการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง

ผลการจำลองนำเสนอในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ของเซลล์ และความหนาแน่นไฟฟ้ากำลัง (I-V-P curve) ซึ่งประกอบไปด้วย แบบจำลองของ Ramakrishna (แอโนด-คาโธดรองรับ) และแบบโลหะรองรับ โดยพิจารณาแบบการไหลเป็น การไหลตามกัน และสวนกัน ดังต่อไปนี้



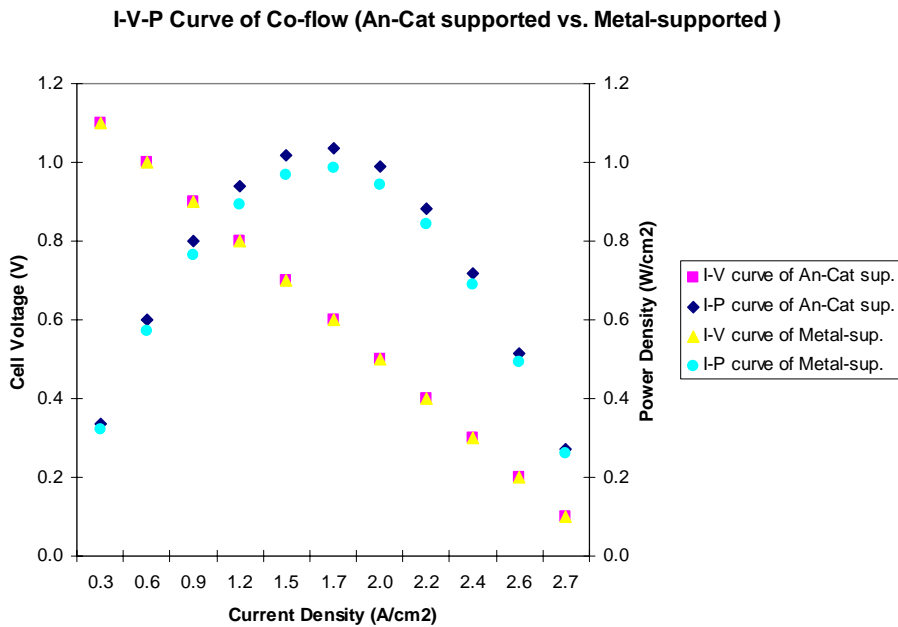
รูปที่ 8 เปรียบเทียบ I-V-P curve ของแอโนด-คาโธดรองรับ สำหรับการไหลตามกันและสวนกัน

ค่าความหนาแน่นไฟฟ้ากำลังสูงสุดของการไหลตามกันและสวนกัน เท่ากับ 1.034 และ 1.035 W/cm² ตามลำดับ สำหรับอะโนด-คาโทดรองรับ ตามรูปที่ 8



รูปที่ 9 เปรียบเทียบ I-V-P curve ของโลหะรองรับ สำหรับการไหลตามกันและสวนกัน

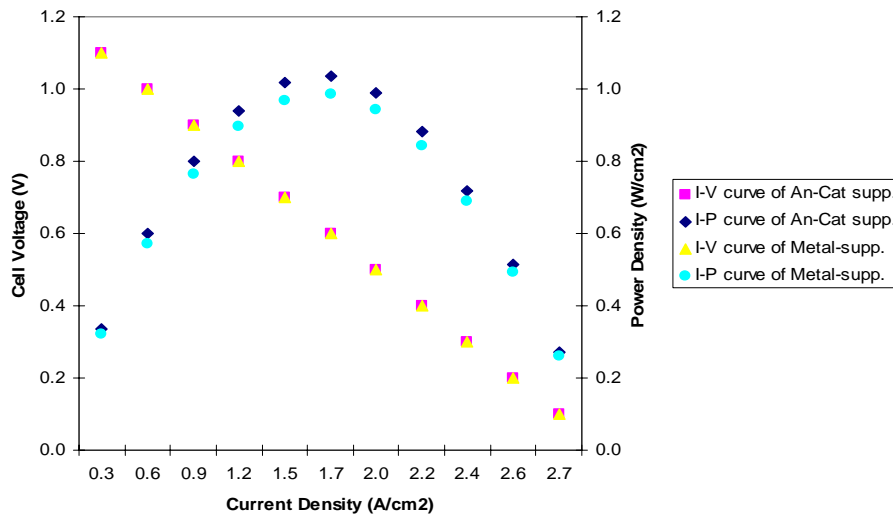
ค่าความหนาแน่นไฟฟ้ากำลังสูงสุดของการไหลตามกันและสวนกัน เท่ากับ 0.9844 W/cm² และ 0.9845 W/cm² ตามลำดับ สำหรับโลหะรองรับ ตามรูปที่ 9



รูปที่ 10 เปรียบเทียบ I-V-P curve ของการไหลตามกันของทั้ง 2 แบบจำลอง

ค่าความหนาแน่นไฟฟ้ากำลังสูงสุดของโลหะรองรับน้อยกว่าอะโนด-คาโทดรองรับ 4.8% สำหรับการไหลตามกัน ตามรูปที่ 10

I-V-P Curve of Counter-flow (An-Cat supported vs. Metal-supported)

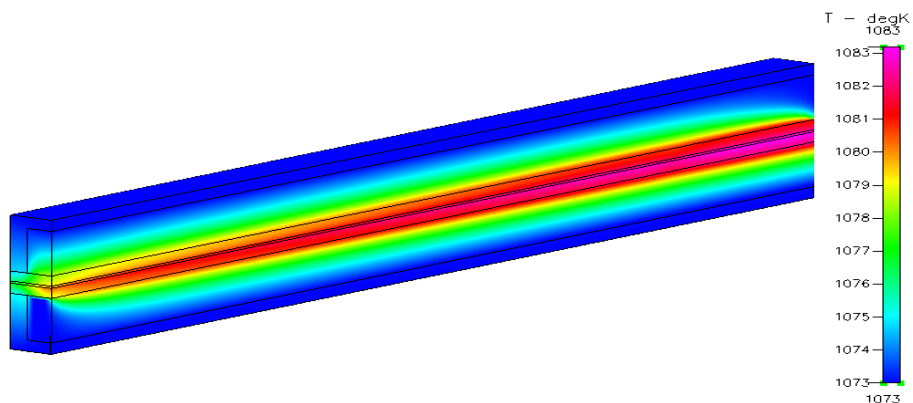


รูปที่ 11 เปรียบเทียบ I-V-P curve ของการไหลสวนกันของทั้ง 2 แบบจำลอง

ค่าความหนาแน่นไฟฟ้ากำลังสูงสุดของโลหะรองรับน้อยกว่าอาโนด-คาโธดรองรับ 5 % สำหรับการไหลสวนกัน ตามรูปที่ 11

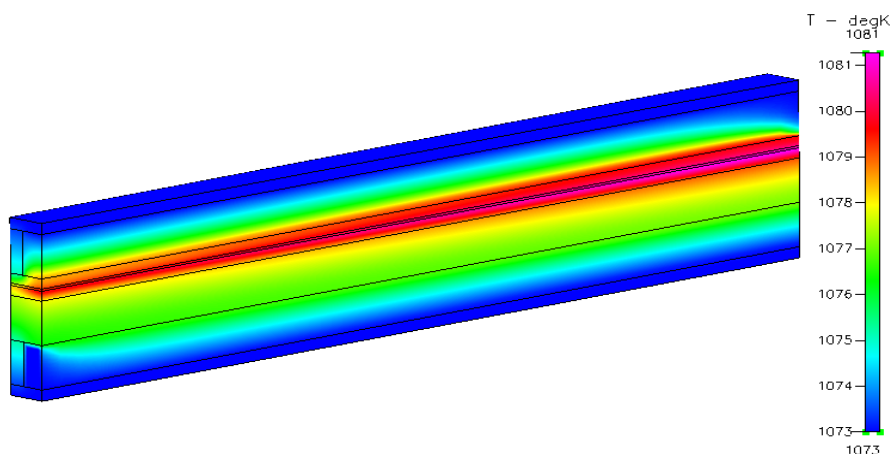
4. การวิเคราะห์ผลการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง

จากผลการจำลองในแบบของอาโนด-คาโธดรองรับ แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอากาศต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า เนื่องจากพบว่า เกิดอุณหภูมิสูงที่บริเวณทางเข้าของอากาศ แต่เกิดอุณหภูมิต่ำที่บริเวณใต้รับ ทั้งการไหลแบบตามกันและสวนกัน ดังในรูปที่ 12



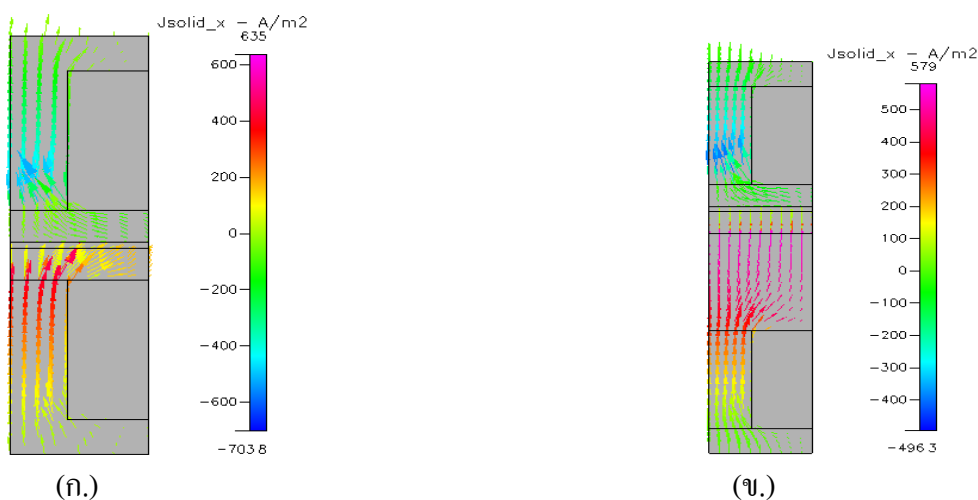
รูปที่ 12 การกระจายอุณหภูมิของอาโนด-คาโธดรองรับ สำหรับการไหลแบบสวนกัน

และ ผลการจำลองของแบบโลหะรองรับ แสดงให้เห็นถึงลักษณะของการกระจายอุณหภูมิคล้ายกันกับแบบ อาโนด-คาโทดรองรับ แต่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และมีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่ำกว่า ซึ่งจากการตรวจสอบค่าความเข้มข้นของเชื้อเพลิงในบริเวณของการเกิดปฏิกิริยา พบว่า ในแบบโลหะรองรับจะมีความเข้มข้นน้อยกว่า ดังนั้น ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า จึงถูกควบคุมโดย gas diffusion rate ด้านอาโนด นั่นคือ แบบจำลองโลหะรองรับ จะเกิด concentration loss จากโลหะรองรับมากกว่า และยังพบว่าโลหะรองรับช่วยระบายความร้อนให้แก่อาโนด เนื่องจากโลหะรองรับมีค่าการนำความร้อนสูงกว่า 4 เท่า จึงเป็นสาเหตุให้อาโนดอุณหภูมิต่ำลง รูปที่ 11 12 และ 13 ตามลำดับ



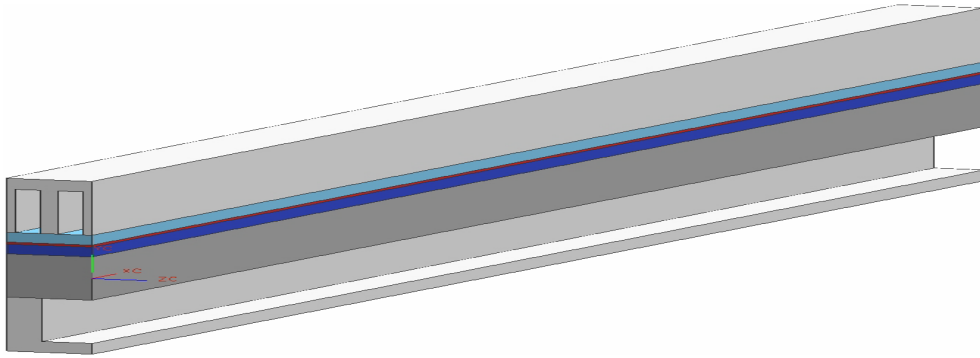
รูปที่ 13 การกระจายอุณหภูมิของโลหะรองรับ สำหรับการไหลแบบสวนกัน

จากนั้นเราได้ปรับปรุงรูปแบบของอินเตอร์คอนเนคต์ด้านคาโทด เพื่อให้ concentration loss ลดน้อยลง และจากผลการจำลองทิศทางการไหลและการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า พบว่าจะมี ohmic loss ด้านคาโทดร่วมด้วย เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเดินทางผ่านคาโทดในทิศแนวอนออกจากอิเล็กโทรไลต์ ดังในรูปที่ 14 (ก.)



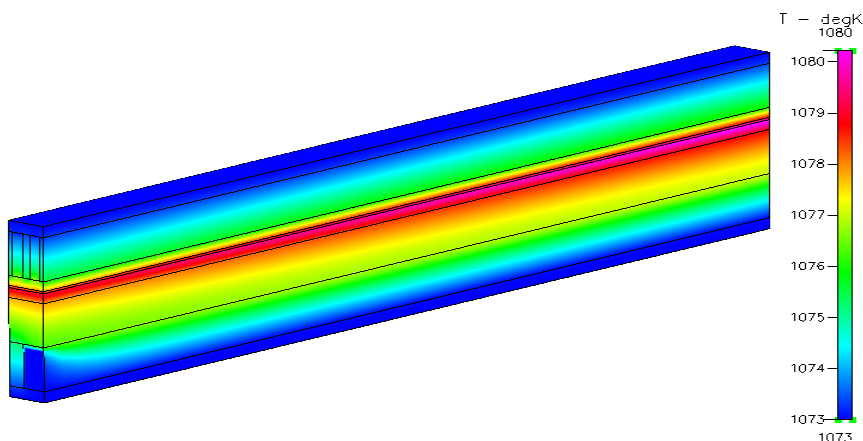
รูปที่ 14 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (ก.) อาโนด-คาโทดรองรับ (ข.) โลหะรองรับ สำหรับการไหลแบบสวนกัน ที่ $x = 20 \text{ mm}$.

และจากการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลง ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในรูปที่ 3.10 (ข.) พบว่า ohmic loss ด้านแอโนด ในแบบโลหะรองรับมีค่าน้อยกว่า ด้านคาโทด เนื่องจาก โลหะมีค่าการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกับอินเตอร์คอนเนค ซึ่งมากกว่า แอโนด 8.5 เท่า และมากกว่าคาโทด 110 เท่า ตามลำดับ ดังนั้น ถ้าเราปรับปรุงรูปแบบของริบด้านคาโทด ให้ออกซิเจนมี โอกาสแพร่เข้าสู่คาโทดถึงอิเล็กโทรไลต์ในระยะทางที่สั้นที่สุด และกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งพื้นที่ผิวสัมผัสของอี เล็กโทรไลต์ เราน่าจะได้รับความหนาแน่นไฟฟ้ากำลังสูงขึ้น เนื่องจาก เรากำลังจะลด concentration loss และ ohmic loss ซึ่งเป็นข้อสันนิฐานของเรา

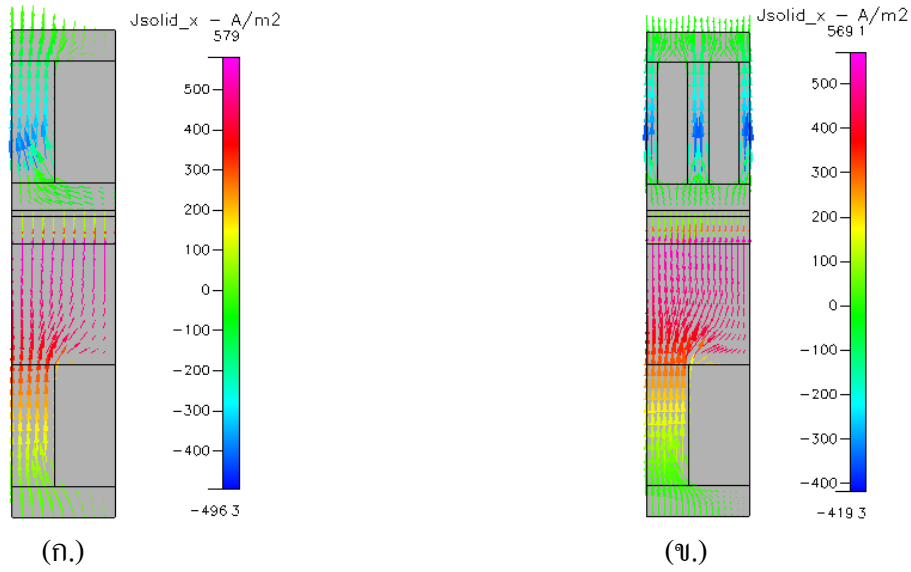


รูปที่ 15 เซลล์เชื้อเพลิงออกไซค์แข็งที่ปรับปรุงอินเตอร์คอนเนคเตอร์

การปรับปรุงรูปแบบของริบ พิจารณาให้อัตราส่วน พื้นที่ของริบต่อช่องการไหล เท่าเดิม โดยเปลี่ยนจาก 0.7:1 เป็น 0.35:0.5 ซึ่งยังสอดคล้องกับรายงานของ Khaleel และคณะ [10] ในปี 2003 ที่แนะนำให้ใช้อัตราส่วนระหว่าง 1:3 ถึง 2:3 จากผลการจำลองของโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว พบว่า ได้คุณสมบัติต่ำกว่าทั้งกรณีของการไหลแบบตามกันและแบบสวน ทางกัน และได้ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงกว่าแบบโลหะรองรับ แต่อย่างน้อยกว่าแบบแอโนด-คาโทดรองรับอยู่เพียง เล็กน้อย (0.132 %) สำหรับการไหลแบบสวนกันและจากรูปที่ 16 ยังพบว่ามีกระจายอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้ง พื้นที่หน้าตัดของแอโนด เนื่องจากการกระจายของบริเวณที่เกิดปฏิกิริยามากขึ้นกว่าแบบแรก ระยะทางเดินของ กระแสไฟฟ้าไปสู่ current collector ลดลง ในขณะที่ระยะทางที่ออกซิเจนเดินทางเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ทั่วถึงมากขึ้น ส่งผล ให้เกิดปฏิกิริยามากขึ้น

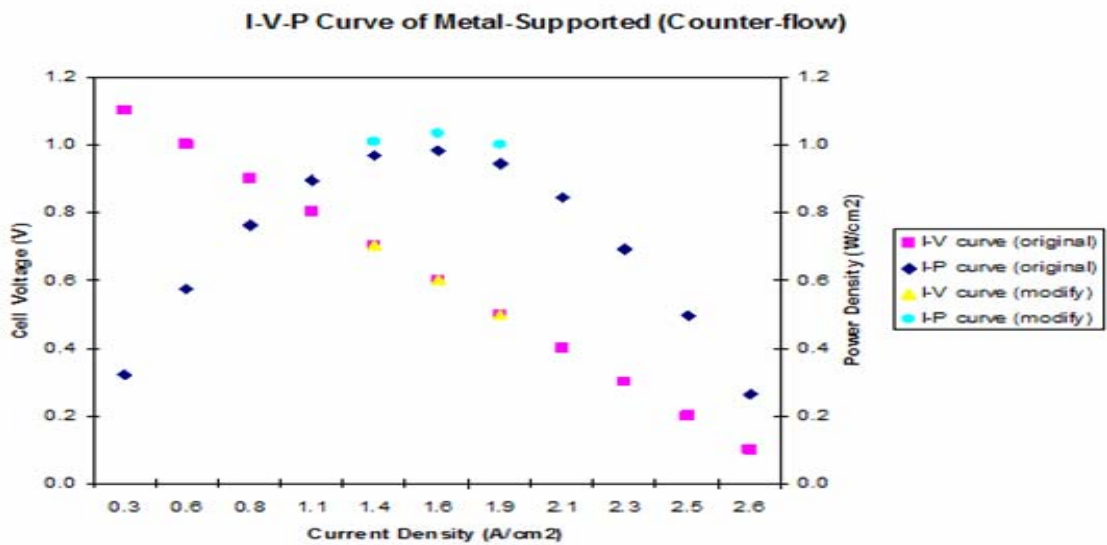


รูปที่ 16 การกระจายอุณหภูมิของโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว สำหรับการไหลแบบสวนกัน

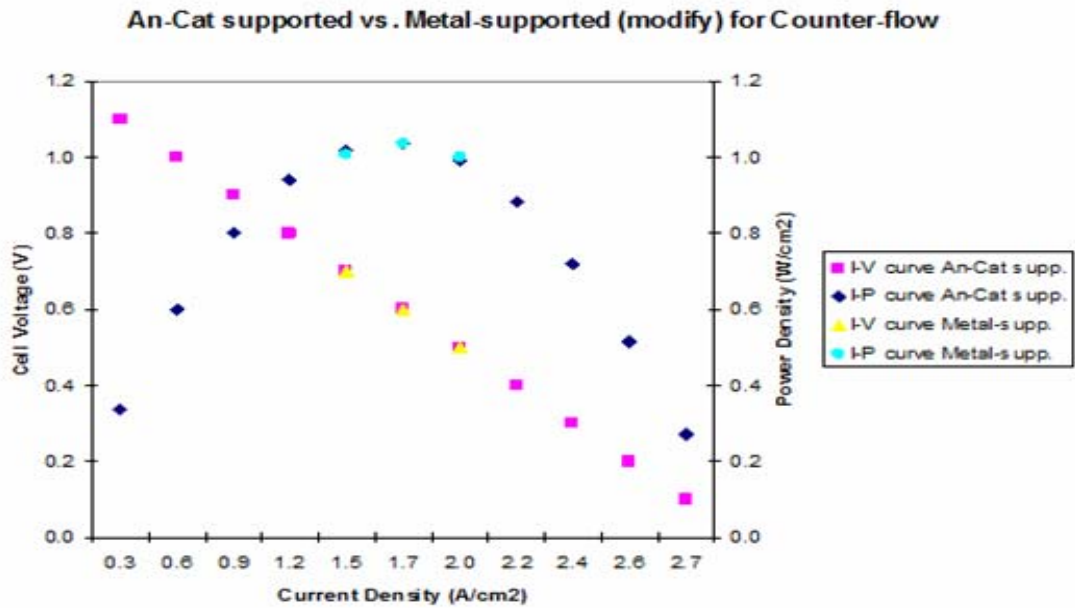


รูปที่ 17 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (ก.) แบบโลหะรองรับ (ข.) แบบโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว
สำหรับการไหลแบบสวนกัน ที่ $x = 20$ mm.

และผลจากการปรับปรุงรูป ในรูปที่ 17 (ข.) จะเห็นลักษณะการเดินทางของกระแสไฟฟ้าจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาไปสู่ current collector ที่สั้นลงนั่นคือ ohmic loss ในคาโรลดลดลงด้วย นอกจากนี้เราจะเห็นว่าระดับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นในบริเวณรับถึงแม้จะมีพื้นที่หน้าตัดรวมเท่าเดิม เนื่องจาก กระแสไฟฟ้าเดินทางได้สะดวกมากขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 18 เปรียบเทียบ I-V-P curve ของโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว สำหรับการไหลแบบสวนกัน



รูปที่ 19 เปรียบเทียบ I-V-P curve ระหว่างแอนคคาโรรองรับกับโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว สำหรับการไหลแบบสวนกัน

ทั้งนี้ อิทธิพลของ ohmic loss ที่ลดลง ส่งผลให้โลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว มีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น โดยมีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงสุด เพิ่มขึ้น 4.8 เปอร์เซ็นต์ ตามรูปที่ 18 และจากรูปที่ 19 การลด ohmic loss ของโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว ยังไม่มากพอที่จะเอาชนะ concentration loss จากโลหะรองรับของตัวเองได้ จึงยังส่งผลให้ความหนาแน่นไฟฟ้ากำลังของโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว ต่ำกว่า เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอนคคาโรรองรับ และมีความหนาแน่นไฟฟ้ากำลังสูงสุด น้อยกว่า 0.132 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการไหลสวนกัน

5. สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยได้ดำเนินการสำหรับตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ โดยการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง ด้วยวิธี MEA ทำให้เราเข้าใจ ปรากฏการณ์ของการแพร่ ของของไหล เข้าสู่อิเล็กโทรด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ที่บริเวณผิวสัมผัส ระหว่างอินเตอร์คอนเนคกับความหนาของอิเล็กโทรด ซึ่งทำให้เราค้นพบลำดับกลไก (mechanism) การเกิด over-potentials ซึ่งเป็นปฏิสัมพันธ์กันระหว่าง concentration loss, activation loss และ ohmic loss และด้วยวิธีนี้ สามารถนำเราไปสู่การออกแบบและพัฒนาเซลล์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งให้รายละเอียดมากกว่าวิธี PEN ตามคำแนะนำของ Khaleel และคณะ [10] ในปี 2003 จากการพัฒนาอินเตอร์คอนเนคเตอร์ พบว่า เพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนเข้าสู่คาโทด, อุณหภูมิกระจายตัวมากขึ้นและช่วยลดทางเดินของกระแสไฟฟ้ามากขึ้น ทั้งหมดนี้เป็นการช่วยการสูญเสียรวมให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งออกซิเจนที่ผลอย่างมากต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ดังนั้น สรุปได้ตามนี้

1. การเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนช่วยลดการสูญเสียเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาและการถ่ายโอนมวลของแก๊ส
2. อินเตอร์คอนเนคเตอร์ที่ปรับปรุงแล้วช่วยลดการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานทางไฟฟ้า
3. อินเตอร์คอนเนคเตอร์ที่ปรับปรุงแล้วช่วยกระจายความร้อนอย่างสม่ำเสมอด้านคาโทด

นอกจากนี้ความเข้าใจเชิงตัวแปรของระบบสมการของเซลล์เชื้อเพลิง มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ผล และช่วยให้เราเข้าใจปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นหลังจากการจำลอง และยังช่วยให้เราคาดเดาความเป็นได้ทางทฤษฎี หากเราไม่ทำการจำลอง

การศึกษาวิจัยในส่วนของพัฒนาปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาคของอิเล็กโทรด มีความสำคัญมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความยาวขอบเขต 3 สถานะ น่าจะเป็นตัวควบคุมการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้น ควรมุ่งเน้นศึกษาต่อยอดทางด้าน

1. การออกแบบโครงสร้างทางจุลภาคของอิเล็กโทรด
2. การออกแบบโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะรองรับสำหรับทำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรคาร์บอน

เอกสารอ้างอิง

- [1] P.A. Ramakrishna, Shi Yang, C.H. Sohn, **Innovative design to improve the power density of a solid oxide fuel cell**. Journal of Power Sources 158, pp. 378–384, 2006.
- [2] J.J. Hwang, C.K. Chen, D.Y. Lai, **Detailed characteristic comparison between planar and MOLB-type SOFCs**. Journal of Power Sources 143, pp. 75–83, 2005.
- [3] Changbo Lee, Joongmyeon Bae, **Fabrication and characterization of metal-supported solid oxide fuel cells**. Journal of Power Sources 176, pp. 62–69, 2008.
- [4] Craig P. Jacobson, Lutgard C. De Jonghe, Steven J. Visco, **LBNL Activity Overview. Presented at the SECA Workshop**, February 20th, 2003.
- [5] Won Yong Lee, **Modeling of Solid Oxide Fuel Cells**. Libraries of Massachusetts Institute of Technology, January 2nd, 2007.
- [6] Shiqiang (Rob) Hui, Dongfang Yang, Zhenwei Wang, Sing Yick, Cyrille Dec`es-Petit, Wei Qu, Adam Tuck, Radenka Maric, Dave Ghosh, **Metal-supported solid oxide fuel cell operated at 400–600 °C**. Journal of Power Sources 167. pp. 336–339, 2007.
- [7] Won Yong Lee, **Modeling of Solid Oxide Fuel Cells**. Libraries of Massachusetts Institute of Technology, January 2nd, 2007.
- [8] Grant Hawkes, Jim O'Brien, Carl Stoots, Steve Herring, Mehrdad Shahnam, **Thermal And Electrochemical Three Dimensional CFD Model Of A Planar Solid Oxide Electrolysis Cell**. Proceedings of ASME Summer Heat Transfer Conference. HT2005-72565, 2005.
- [9] Steve Visco, Craig Jacobson, Lutgard C. De Jonghe, **Development of Low-Cost Alloy Supported SOFCs**. Presented at SECA workshop, June 18, Pittsburgh, PA, 2002.
- [10] Zijong Lin, J.W. Stevenson, M.A. Khaleel, **The effect of interconnect rib size on the fuel cell concentration polarization in planar SOFCs**. Journal of Power Sources 117, pp. 92–97, 2003.