

การจำลองเชิงตัวเลขของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งแบบโลหะรองรับ

Numerical Simulation of Metal-Supported Solid Oxide Fuel Cell (mSOFC)

นิวัฒน์ ภูเจริญ ทวี เทศเจริญ และ จารุวัตร เจริญสุข*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 0-2737-3000 ต่อ 6153 โทรสาร 0-2326-4335 *อีเมลล์ kcjaruw@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เราได้นำเสนอผลการจำลองเชิงตัวเลขของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบ ในระดับเมมเบรนอิเล็กโตรดแอสเซมบลี(membrane-electrode-assembly, MEA) โดยทำการศึกษสมรรถนะของเซลล์ที่ประกอบขึ้นในลักษณะที่มีโลหะรองรับเปรียบเทียบกับสมรรถนะของเซลล์แบบเก่าที่เป็นแบบอะโนด-คาโธดรองรับ ภายใต้รูปแบบการไหลตามกันและสวนกัน โดยเปรียบเทียบการกระจายความร้อน และกำลังไฟฟ้าที่ได้ ผลการศึกษาพบว่า การไหลแบบสวนกัน เกิดจุดร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอมากกว่า และให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่การกระจายกำลังไฟฟ้าสูงสุด มากกว่าการไหลแบบตามกัน ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกันทั้ง 2 แบบ อย่างไรก็ตามเราพบว่า จุดร้อน และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่การกระจายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์ชนิดอะโนด-คาโธดรองรับนั้นมีค่าสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากเกิดเกรเดียนท์ของความเข้มข้นของเชื้อเพลิงในชั้นของโลหะรองรับ ดังนั้นเพื่อชดเชยสมรรถนะที่สูญเสียไปเราได้ปรับปรุงรูปแบบของรีบ ด้านคาโธด ผลปรากฏว่า ความหนาแน่นไฟฟ้ากำลัง สูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 0.984 W/cm^2 เป็น 1.034 W/cm^2 ซึ่งต่ำกว่ากรณีที่เป็นแบบอะโนด-คาโธด 0.132 เปอร์เซ็นต์ ที่ภาวะการทำงานเดียวกัน โดยยังคงเกิดจุดร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า สำหรับการไหลแบบสวนกัน

Abstract

In this paper we present the numerical results of planar solid oxide fuel cell at the level of membrane electrode assembly, MEA. It is aimed at studying the performance of metal support design versus the conventional anode-cathode support under co-flow and counter-flow conditions. We have found that the value of peak temperature is lower thus better temperature distribution is achieved with counter-flow configuration. Moreover the corresponding current density at maximum power is also higher with this configuration. This later design however poses greater concentration loss or over-potential due to fuel concentration gradient at the porous layer of supporting metal. To compensate this difference, we have proposed the rib of the current collector

at the cathode side in order to reduce the ohmic loss, while minimizing the concentration loss at the reaction site. The result of this modification suggests an improvement of maximum power density from 0.984 W/cm^2 to 1.034 W/cm^2 . This is slightly less than the reference value for only 0.132% . At this counter-flow configuration the value of peak temperature is also lower as compared with its counterpart.

1. คำนำ

ในระยะเวลา 30 ปีของการพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง มุ่งเน้นที่จะลดต้นทุนของการสร้างสแตค (stack) เพื่อที่จะสามารถนำไปสู่การค้าได้ในอนาคต ซึ่งปัจจุบันการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบ ถูกแบ่งเป็น 3 ยุค ได้ดังนี้ ยุคที่ 1 เป็นอิเล็กโตรไลต์ (electrolyte) รองรับ ใช้ Yttria Stabilised Zirconia (YSZ) เป็นตัวนำไอออน (ion) หนาประมาณ $200 \mu\text{m}$ อุณหภูมิทำงานที่ $1,000^\circ\text{C}$ อินเตอร์คอนเนค (interconnect) เป็น เซรามิก (ceramic) ทำจาก Doped Lanthanum Chromite (LaCrO_3) ต่อมาในยุคที่ 2 เป็นชนิดอะโนดรองรับ ใช้ Ni/YSZ เป็นตัวนำอิเล็กตรอน (electron) หนาประมาณ $200\text{-}1,000 \mu\text{m}$ โดยการลดความหนาของอิเล็กโตรไลต์เหลือประมาณ $10\text{-}50 \mu\text{m}$ อุณหภูมิทำงานที่ 800°C อินเตอร์คอนเนคเป็น สแตนเลส สตีล (Stainless-Steel) ต่อมาในยุคล่าสุด ยุคที่ 3 เป็นโลหะ (อินเตอร์คอนเนค)รองรับ ใช้ผงผสม STS430 เป็นตัวนำอิเล็กตรอน หนาประมาณ $1,000\text{-}2,000 \mu\text{m}$ อยู่ด้านอะโนด และลดความหนาของอิเล็กโตรไลต์ และอะโนด ให้เท่ากันที่ $10 \mu\text{m}$ สามารถทำงานประมาณ $600\text{-}700^\circ\text{C}$ ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดโลหะรองรับ คือ สามารถสร้างสแตคในราคาต่ำได้ ช่วยกระจายความร้อนจากอะโนด เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี รักษาอุณหภูมิของสแตคให้เสถียรและลดเวลาในการอุ่นหอสเซลล์ (cell stack) สู่อุณหภูมิทำงาน

ได้มีการตีพิมพ์ความก้าวหน้าที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งแบบโลหะรองรับ โดยในปี 2005 Brandon และคณะ [1] นำเสนอแบบจำลองที่คิดรวม electronic leakage ด้วยวิธี positive-electrolyte-negative (PEN) สำหรับ metal-supported planar IT-SOFC โดยใช้ gadolinia-doped ceria (CGO) เป็นอิเล็กโตรไลต์ทำงานที่อุณหภูมิ $500\text{-}600^\circ\text{C}$ ผลการจำลองสอดคล้องกับผลการ

ทดลองเป็นอย่างดี เนื่องจากใช้โปรแกรม gPROMS ปรับค่าการจำลอง ให้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง ต่อมาในปี 2008 Lee และ Bae [2] นำเสนอแบบจำลอง 2 มิติ โดยให้ ความดันย่อยของออกซิเจน P_{O_2} เป็น 0.21 และ 1 atm ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 800 °C สำหรับ metal-supported SOFC และใช้ $La_{0.8}Sr_{0.2}Co_{0.4}Mn_{0.6}O_3$ (LSCM-8246) เป็น คาโรต ผลการจำลองสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่า 0.2 A/cm² ทั้ง 2 กรณี

นอกจากนี้ Visco และคณะ [3-4] ทำการศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับการใช้โลหะผสมทองเหลืองทำเป็นซีล (seal) และพัฒนาวัสดุที่ทำให้ อิเล็กโทรไลต์และอะโนดขยายตัวอันเนื่องจากอุณหภูมิที่เท่าๆกัน และเรื่องอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งแบบ โลหะรองรับมาตั้งแต่ปี 2002 จนถึงปัจจุบัน

ในบทความนี้จะนำเสนอการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง ชนิดราบแบบโลหะรองรับ ด้วยวิธี membrane-electrode-assembly โดยทำการศึกษาผลกระทบของโลหะรองรับ ต่อ รูปแบบการไหล (ตามกันและสวนกัน) ความร้อน ไฟฟ้า และเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Ramakrishna และคณะ จากปี 2006 [5]

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งอยู่บนพื้นฐานของสมการอนุรักษ์ มวล โมเมนตัม พลังงาน ไฟฟ้า และสปีชีส์ (species) สำหรับ เซลล์เชื้อเพลิงการจำลองที่สำคัญ ได้แก่ ปฏิกิริยาการถ่ายโอนใน วัสดุพรุน (porous media) เช่น ปฏิกิริยาเฮเทอโรจีเนียส (heterogeneous reaction) ในอิเล็กโทรด (electrode) และมีปฏิสัมพันธ์ ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (electrochemical) กับสนามของศักย์ไฟฟ้า (current-potential field) สมมุติฐานของแบบจำลอง 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 อธิบาย การแพร่ของแก๊สชนิดต่างๆ (multi-species) 7. ใช้สมการ Butler-Volmer อธิบายปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) 8. ใช้สมการ Nerst-Planck อธิบายการถ่ายโอนไอออนในอิเล็กโทรด 9. ใช้ กฎของ Ohm อธิบาย polarization curve 10. ไม่คิดอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง

2.1 การแพร่ของแก๊สในอิเล็กโทรด

สมมุติฐานของสมการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัมในวัสดุพรุนให้คิด อิทธิพลของ porosity ε และ permeability κ ร่วมด้วย จะได้ สมการอนุรักษ์มวล

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

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

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

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

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

สมการอนุรักษ์พลังงาน

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

เมื่อ h เป็น enthalpy ของแก๊สผสม , p_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 ความร้อน เนื่องจากการนำ (thermal conduction) และความร้อนเนื่องจากการ แพร่ของสปีชีส์ (species diffusion) สามารถเขียนเป็น

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

เมื่อ h_i เป็น enthalpy ของสปีชีส์ใด ๆ ซึ่งเป็นผลรวมของ enthalpy of formation และ sensible enthalpy , $\mathbf{J}_i$ เป็น diffusion flux , T เป็น อุณหภูมิ และ λ_{eff} เป็น effective thermal conductivity ของของไหล และของแข็งร่วมกัน ส่วน 2 เทอมสุดท้ายด้านขวามือของ (3) เป็น electrical work และ Joule heating ตามลำดับ เทอมที่ 2 และ 5 เป็นการสูญเสียอันเนื่องมาจากการกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ (irreversible loss) เกิดขึ้นขณะทำปฏิกิริยา โดยการเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงาน ความร้อน ตามกฎอนุรักษ์พลังงาน ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว สมการอนุรักษ์สปีชีส์

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

ด้านซ้ายมือของ (5) เป็นเทอมการพา (convection term) ส่วนเทอมสุดท้ายด้านขวามือเป็น source term ของอัตราการสร้าง (creation rate) หรือ อัตราการบริโภค (consumption rate) ของสปีชีส์ใด ๆ ต่อ ปริมาตรของวัสดุพรุน ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี แบบเฮเทอโรจีเนียส (heterogeneous electrochemical reactions) ซึ่งผลผลิต

(product) ของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี 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 ซึ่งเชื่อมต่อดโดยตรงกับ triple phase boundary (TPB) และเทอมแรกด้านขวามือ (5) เรียกว่า เทอมการแพร่ (diffusion term) มี J_i เป็น diffusion flux สามารถเขียนใหม่เป็น

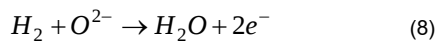
$$J_i = \rho D_{i,eff} \nabla w_i + \frac{\rho w_i}{M} D_{i,eff} \nabla M + \rho w_i \sum_j D_{j,eff} \nabla w_j + \rho w_i \frac{\nabla M}{M} \sum_j D_{j,eff} w_j \quad (6)$$

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)

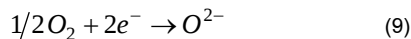
$$D_{i,eff} = D_{i,FS} \varepsilon^\tau \quad (7)$$

2.2 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

แอโนดทำจากวัสดุ nickel และ yttrium stabilized zirconia cermet (Ni/YSZ) และพิจารณาให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ triple-phase boundary ดังนั้น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density) เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่าง ionic species transport และ electron transport โดยพิจารณาให้การถ่ายโอนมวล (mass transport) เกิดขึ้นที่ช่องว่างของแก๊ส (gas pore) และปรากฏการณ์ การถ่ายโอนประจุ (charge transport) ขึ้นอยู่กับ 4 ตัวแปรทางไฟฟ้า (four electric parameters) ได้แก่ ionic conductivities σ_{as} , electronic conductivities σ_{am} , ionic potential ϕ_{as} และ electronic potential ϕ_{am} ส่วนคาโธดทำจากวัสดุ lanthanum manganite ($\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_{3-\delta}$ doped YSZ) พฤติกรรมคล้ายกับแอโนดดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีด้านแอโนด



ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีด้านคาโธด



จลศาสตร์ (kinetics) ของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีใน (8) และ (9) ของอิเล็กโทรด สามารถอธิบายได้ด้วย Butler-Volmer equation ที่ triple-phase boundary สำหรับปฏิกิริยาด้านแอโนด จะได้

$$j_{at} = j_{a0} \left[\exp\left(\frac{\alpha_a F}{RT} \eta_a\right) \frac{[\text{H}_2]}{[\text{H}_2]_0} - \exp\left(-\frac{\alpha_c F}{RT} \eta_a\right) \frac{[\text{H}_2\text{O}]}{[\text{H}_2\text{O}]_0} \right] \quad (10)$$

เมื่อ j_{at} เป็น faradaic current density ด้านแอโนด, α_a และ α_c เป็น symmetry factors หาได้จากการทดลอง Tafel slopes, j_{a0} เป็น exchange current density ด้านแอโนด, F เป็น Faraday constant, R เป็น ideal gas law constant และ $[\text{สปีชีส์}]_0$ เป็น ค่าความเข้มข้นอ้างอิง (concentration values at reference) ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอ้างอิง (reference current density) ส่วน η_a เป็น overpotential นิยามโดย เป็นผลต่างของ electronic potential ϕ_{am} และ ionic potential ϕ_{as} จะได้

$$\eta_a = \phi_{am} - \phi_{as} - E_{a0} \quad (11)$$

เมื่อ E_{a0} เป็น ผลต่างศักย์ (potential difference) ระหว่างอิเล็กโทรไลต์และนิกเกิล (nickel) ที่สภาวะสมดุล (equilibrium) ซึ่งไม่มีการไหลของกระแสไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าในอิเล็กโทรดแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 อยู่ในสถานะอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte phase) และส่วนที่ 2 อยู่ในสถานะอิเล็กตรอนิก (electronic phase) โดยขณะที่ทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี อิเล็กตรอน จะถ่ายโอน (transferred) จากสถานะไอออน (ionic phase) เป็น สถานะอิเล็กตรอนิก (electronic phase) ถ้าเราพิจารณาปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ด้วยกฎอนุรักษ์ประจุ (charge conservation) เราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปกฎของโอห์ม (Ohm's law) สำหรับด้านแอโนด ได้ดังนี้

$$\nabla \cdot (\sigma_{as} \nabla \phi_{as}) = -\nabla \cdot (\sigma_{am} \nabla \phi_{am}) = j_{at} \left(\frac{S}{V} \right)_{eff} \quad (12)$$

3. แบบจำลองเชิงตัวเลข

เราได้ทำการศึกษาและจำลองเปรียบเทียบ แบบจำลองของ Hwang และคณะ จากปี 2005 [6] และ แบบจำลองของ Ramakrishna และคณะ จากปี 2006 [5] ผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ จากนั้นเราศึกษาแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบโลหะรองรับ ด้วยการเพิ่มแบบจำลองวัสดุพูนเข้าไปในแบบจำลองของ Ramakrishna หน้า 2 mm. ทำด้วยผงผสม STS430 โดยให้อยู่ด้านแอโนด [2,7] โดยสมมุติให้คุณสมบัติวัสดุพูนของโลหะรองรับ เป็นไปตามสมการ (13)

$$\kappa = \frac{d_p^2}{36k_0 \tau} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad (13)$$

โดยอาศัยความสัมพันธ์ของ Kozeny-Carman [8] เมื่อ d_p เป็น average particle diameter , k_o เป็น shape factor ซึ่ง Wyllie และคณะ พบว่า k_o มีค่าระหว่าง 2.0-3.0 อย่างไรก็ตาม Carman รายงานว่าค่าของ $k_o \tau$ ที่สอดคล้อง (fit) กับผลการทดลอง จะมีค่าเท่ากับ 5 หรือเรียกว่า Kozeny constant

สำหรับค่า permeability k ของโลหะรองรับ ทางคณะผู้วิจัย ทำการศึกษาเปรียบเทียบโดยการเปลี่ยนค่า d_p จาก 20 μm ถึง 200 μm จะได้ค่า k อยู่ระหว่าง $1e-12 m^2$ ถึง $1e-10 m^2$ และจากผลการจำลองพบว่า permeability แปรผกผันกับ current density และได้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นในบทความนี้ เราจึงเลือกใช้ค่า permeability ที่ก่อให้เกิดความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าน้อย และในการศึกษานี้ เรามุ่งประเด็นไปที่ กรณีศึกษาผลของการพัฒนา current collector เป็นหลัก

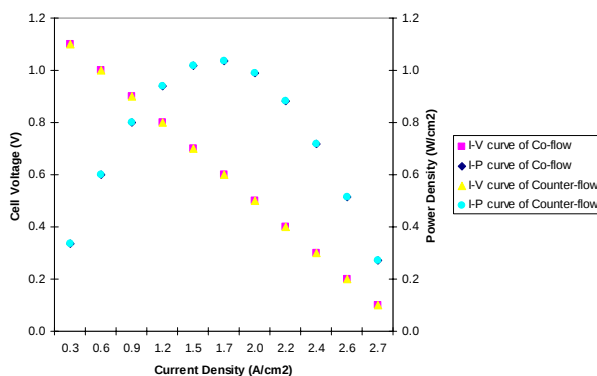
ตารางที่ 1 คุณสมบัติวัสดุพูนของโลหะรองรับ

ตัวแปร	ค่า	เอกสารอ้างอิง
Porosity	0.5	[9]
Permeability (m^2)	$1.0e-10$	[8]
Thermal conductivity (W/mK)	27	[10]
Tortousity	2	[5]
Average pore diameter (μm)	20	[11]
Electrical conductivity (S/m)	$8.5e+5$	[10]

4. ผลการจำลอง

ผลการจำลองยึดตามเงื่อนไขและค่าตัวแปรต่างๆตาม [5] และผลการจำลองประกอบไปด้วย แบบจำลองของ Ramakrishna (อาโนด-คาโธดรองรับ) และแบบโลหะรองรับ โดยพิจารณารูปแบบการไหลเป็นการไหลตามกัน และสวนกัน

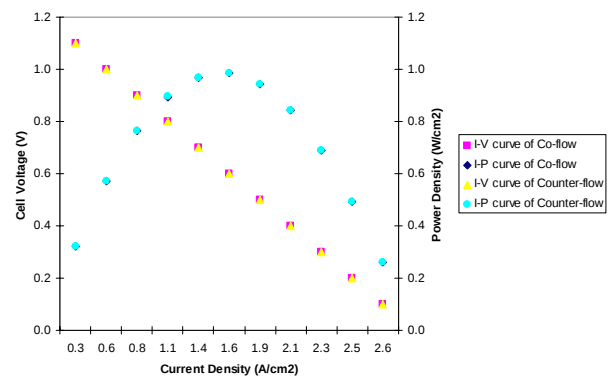
I-V-P Curve of Anode-Cathode supported (Co-flow vs. Counter-flow)



รูปที่ 1. เปรียบเทียบ I-V-P curve ของอาโนด-คาโธดรองรับ

ค่าความหนาแน่นไฟฟ้ากำลังสูงสุดของการไหลตามกันและสวนกัน เท่ากับ 1.034 , 1.035 W/cm^2 ตามลำดับ สำหรับอาโนด-คาโธดรองรับ ตามรูปที่ 1.

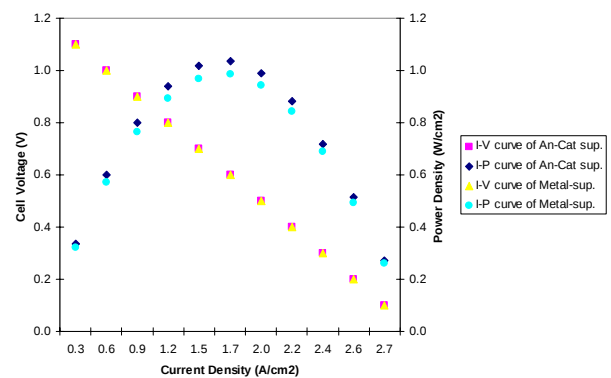
I-V-P Curve of Metal-supported (Co-flow vs. Counter-flow)



รูปที่ 2. เปรียบเทียบ I-V-P curve ของโลหะรองรับ

ค่าความหนาแน่นไฟฟ้ากำลังสูงสุดของการไหลตามกันและสวนกัน เท่ากับ 0.9844 , 0.9845 W/cm^2 ตามลำดับ สำหรับโลหะรองรับ ตามรูปที่ 2.

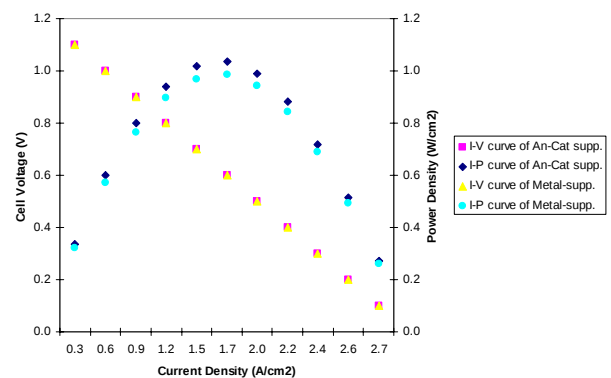
I-V-P Curve of Co-flow (An-Cat supported vs. Metal-supported)



รูปที่ 3. เปรียบเทียบ I-V-P curve ของการไหลตามกันของทั้ง 2 แบบ

ค่าความหนาแน่นไฟฟ้ากำลังสูงสุดของโลหะรองรับน้อยกว่าอาโนด-คาโธดรองรับ 4.8 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการไหลตามกัน ตามรูปที่ 3.

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

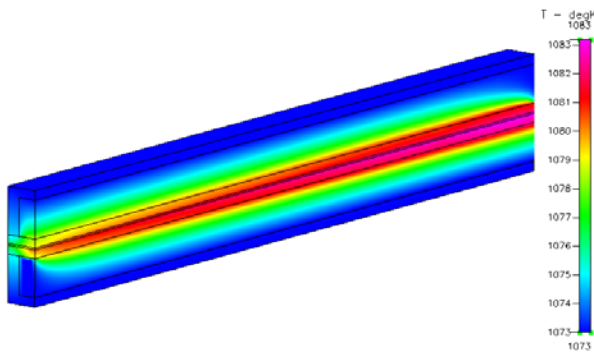


รูปที่ 4. เปรียบเทียบ I-V-P curve ของการไหลสวนกันของทั้ง 2 แบบ

ค่าความหนาแน่นไฟฟ้ากำลังสูงสุดของโลหะรองรับน้อยกว่าอาโนด-คาโธดรองรับ 5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการไหลสวนกัน ตามรูปที่ 4.

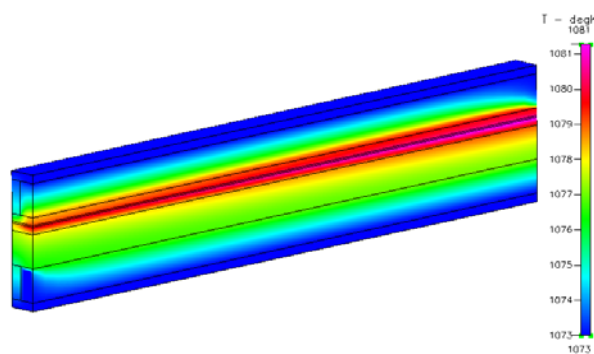
5. วิเคราะห์ผลการจำลอง

จากผลการจำลองในแบบของอาโนด-คาโธดรองรับ แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอากาศต่อการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี เนื่องจากพบว่าเกิดอุณหภูมิสูงที่บริเวณทางเข้าของอากาศ แต่เกิดอุณหภูมิต่ำที่บริเวณใต้รับ ทั้งการไหลแบบตามกันและสวนกัน ดังในรูปที่ 5.



รูปที่ 5. การกระจายอุณหภูมิของอาโนด-คาโธดรองรับ สำหรับการไหลแบบสวนกัน

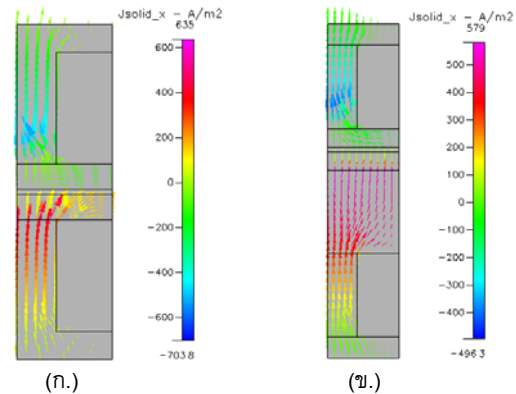
และ ผลการจำลองของแบบโลหะรองรับ แสดงให้เห็นถึงลักษณะของการกระจายอุณหภูมิลักษณะคล้ายกับแบบ อาโนด-คาโธดรองรับ แต่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และมีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่ำกว่า ซึ่งจากการตรวจสอบค่าความเข้มข้นของเชื้อเพลิงในบริเวณของการเกิดปฏิกิริยา พบว่า ในแบบโลหะรองรับจะมีความเข้มข้นน้อยกว่า ดังนั้น ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี จึงถูกควบคุมโดย gas diffusion rate ด้านอาโนด นั่นคือ แบบจำลองโลหะรองรับ จะเกิด concentration loss จากโลหะรองรับมากกว่า และยังพบว่าโลหะรองรับช่วยระบายความร้อนให้แก่อาโนด เนื่องจากโลหะรองรับมีค่าการนำความร้อนสูงกว่า 4 เท่า จึงเป็นสาเหตุให้อาโนดอุณหภูมิต่ำลง ดูรูปที่ 4. 5. และ 6. ตามลำดับ



รูปที่ 6. การกระจายอุณหภูมิของโลหะรองรับ สำหรับการไหลแบบสวนกัน

จากนั้นเราได้ปรับปรุงรูปแบบของอินเตอร์คอนเนคต์ด้านคาโธด เพื่อให้ concentration loss ลดน้อยลง และจากผลการจำลองทิศทางการไหลและการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า พบว่า จะมี ohmic

loss ด้านคาโธดรวมด้วย เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเดินทางผ่านคาโธดในทิศแนวนอน เข้าสู่อิเล็กโทรไลต์ ดังในรูปที่ 7. (ก.)

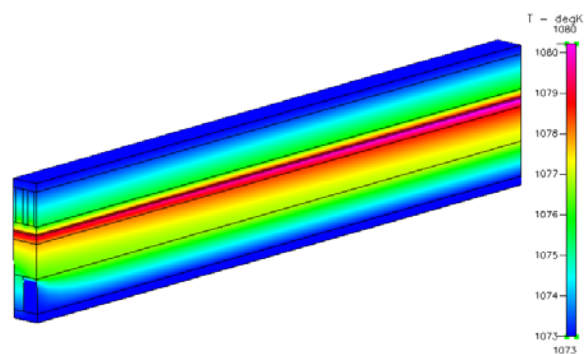


รูปที่ 7. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (ก.) อาโนด-คาโธดรองรับ (ข.) โลหะรองรับ สำหรับการไหลแบบสวนกัน ที่ $x = 20$ mm.

และ จากการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลง ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในรูปที่ 7. (ข.) พบว่า ohmic loss ด้านอาโนดในแบบโลหะรองรับมีค่าน้อยกว่า ด้านคาโธด เนื่องจาก โลหะมีค่าการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกับอินเตอร์คอนเนคต์ ซึ่งมากกว่าอาโนด 8.5 เท่า และมากกว่าคาโธด 110 เท่า ตามลำดับ ดังนั้น ถ้าเราปรับปรุงรูปแบบของริบด้านคาโธด ให้ออกซิเจนมีโอกาสแพร่เข้าสู่คาโธดถึงอิเล็กโทรไลต์ในระยทางที่สั้นที่สุด และกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งพื้นที่ผิวสัมผัสของอิเล็กโทรไลต์ เราจะได้ความหนาแน่นไฟฟ้ากำลังสูงขึ้น เนื่องจาก เรากำลังจะลด concentration loss และ ohmic loss ซึ่งเป็นข้อสันนิฐานของเรา

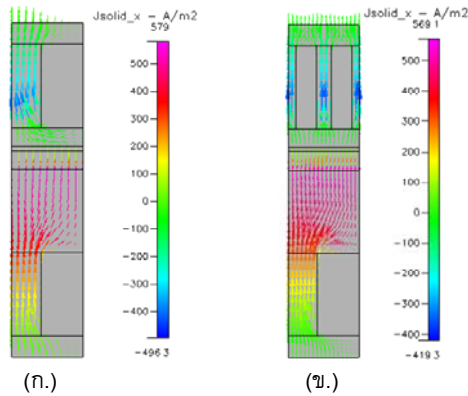
การปรับปรุงรูปแบบของริบ พิจารณาให้อัตราส่วน พื้นที่ของริบต่อช่องการไหล เท่าเดิม โดยเปลี่ยนจาก 0.7:1 เป็น 0.35:0.5 ซึ่งยังสอดคล้องกับรายงานของ Khaleel และคณะ [12] ในปี 2003 ที่แนะนำให้ใช้อัตราส่วนระหว่าง 1:3 ถึง 2:3

จากผลการจำลองของโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว พบว่า ได้ อุณหภูมิต่ำกว่าทั้งกรณีของการไหลแบบตามกันและแบบสวนทางกัน และได้ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงกว่าแบบโลหะรองรับ แต่ยังมีน้อยกว่าแบบอาโนด-คาโธดรองรับอยู่เพียงเล็กน้อย (0.132 %) สำหรับการไหลแบบสวนกัน



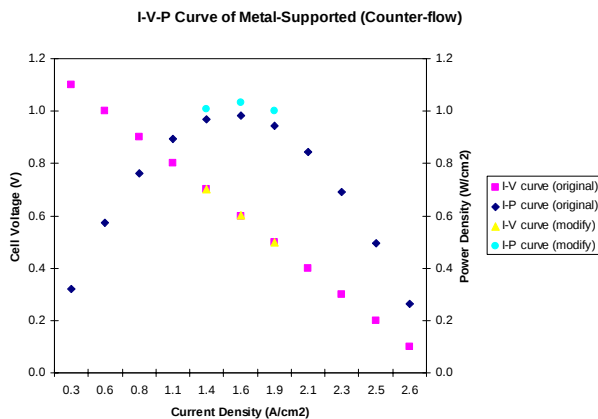
รูปที่ 8. การกระจายอุณหภูมิของโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว สำหรับการไหลแบบสวนกัน

และจากรูปที่ 8. ยังพบว่ามีการกระจายอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัดของแอโนด เนื่องจากการกระจายของบริเวณที่เกิดปฏิกิริยามากขึ้นกว่าแบบแรก ระยะทางเดินของกระแสไฟฟ้าไปสู่ current collector ลดลง ในขณะที่ระยะทางที่ออกซิเจนเดินทางเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ทั่วถึงมากขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยามากขึ้น



รูปที่ 9. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (ก.) แบบโลหะรองรับ (ข.) แบบโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว สำหรับการไหลแบบสวนกัน ที่ $x = 20$ mm.

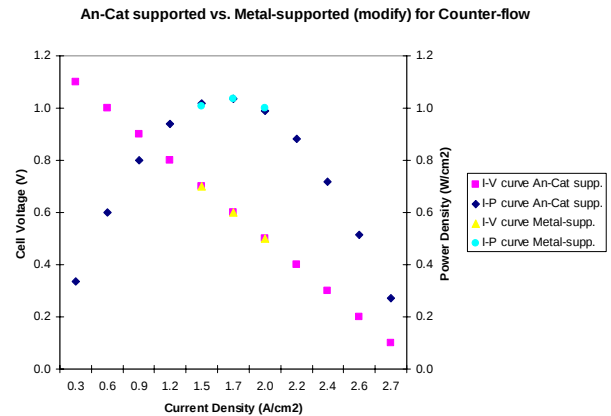
และผลจากการปรับปรุงรูป ในรูปที่ 9. (ข.) จะเห็นลักษณะการเดินทางของกระแสไฟฟ้าจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาไปสู่ current collector ที่สั้นลงนั่นคือ ohmic loss ในคาโรตลดลงด้วย นอกจากนี้เราจะเห็นวาระดับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นในบริเวณรอบถึงแม้จะมีพื้นที่หน้าตัดรวมเท่าเดิม เนื่องจาก กระแสไฟฟ้าเดินทางได้สะดวกมากขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 10. เปรียบเทียบ I-V-P curve ของโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว สำหรับการไหลแบบสวนกัน

ทั้งนี้ อิทธิพลของ ohmic loss ที่ลดลง ส่งผลให้โลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว มีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น โดยมีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงสุด เพิ่มขึ้น 4.8 เปอร์เซ็นต์ ตามรูปที่ 10. และจากรูปที่ 11. การลด ohmic loss ของโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว ยังไม่มากพอที่จะเอาชนะ concentration loss จากโลหะรองรับของตัวเองได้ จึงยังส่งผลให้ความหนาแน่นไฟฟ้ากำลังของโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว ต่ำกว่า เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอโนด-คาโรตรองรับ และมีความหนาแน่น

ไฟฟ้ากำลังสูงสุด น้อยกว่า 0.132 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการไหลสวนกัน



รูปที่ 11. เปรียบเทียบ I-V-P curve ระหว่างแอโนด-คาโรตรองรับกับโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว สำหรับการไหลแบบสวนกัน

6. สรุป

การจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง ด้วยวิธี MEA ทำให้เราเข้าใจ ปรากฏการณ์ของการแพร่ ของของไหล เข้าสู่อิเล็กโทรด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ที่บริเวณผิวสัมผัส ระหว่างอินเตอร์คอนเนคกับแนวความหนาของอิเล็กโทรด ซึ่งทำให้เราค้นพบลำดับกลไก (mechanism) การเกิด over-potentials ซึ่งเป็นปฏิสัมพันธ์กันระหว่าง concentration loss, activation loss และ ohmic loss และด้วยวิธีนี้ สามารถนำเราไปสู่การออกแบบและพัฒนาเซลล์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งให้รายละเอียดมากกว่าวิธี PEN ตามคำแนะนำของ Khaleel และคณะ [12] ในปี 2003

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร. ยศธนา คุณาทร อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่อนุเคราะห์โปรแกรมในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. R.T. Leah, N.P. Brandon, P. Aguiar, 2005. Modelling of cells, stacks and systems based around metal-supported planar IT-SOFC cells with CGO electrolytes operating at 500–600 °C. Journal of Power Sources 145, pp. 336–352.
2. Changbo Lee, Joongmyeon Bae, 2008. Fabrication and characterization of metal-supported solid oxide fuel cells. Journal of Power Sources 176, pp. 62–69
3. Yuriy B. Matus, Lutgard C. De Jonghe, Craig P. Jacobson, Steven J. Visco, 2005. Metal-supported solid oxide fuel cell membranes for rapid thermal cycling. Solid State Ionics 176, pp. 443–449
4. Michael C. Tucker, Lutgard C. De Jonghe, Steven J. Visco, 2006. A braze system for sealing metal-supported solid oxide fuel cells. Journal of Power Sources 160, pp. 1049–1057

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