

ผลของความหนาแน่นขั้วแอโนดและขั้วแคโทดต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง

Effect of Thickness of Anode and Cathode Electrodes on the Efficiency of Solid Oxide Fuel Cell

ศศิธร งามแพรวพราว¹, สีนีนางู ศรีมังกุล², สหัททยา รัตนมังกุล², ดวงกมล ผลเต็ม²

Sasitorn Ngamprawprow¹, Sineenart Srimongkol², Sahattaya Rattanamongkolkul², Duangkamol Poltem²

Received: 18 January 2014; Accepted: 10 March 2014

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้รายงานผลการจำลองแบบเชิงตัวเลขของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งใน 3 มิติ โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถภาพของเซลล์เชื้อเพลิงกับความหนาของชั้นอิเล็กโทรด มีสมการควบคุมประกอบด้วยสมการความต่อเนื่องของมวล กฎอนุรักษ์โมเมนตัม กฎอนุรักษ์พลังงานและกฎอนุรักษ์สปีชีส์ และทำการหาผลเฉลยเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics ผลการจำลองแบบแสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งโดยการปรับความหนาของชั้นอิเล็กโทรด เมื่อทำการกำหนดค่าความพรุนของอิเล็กโทรด ความสูงและความยาวของช่องก๊าซซึ่งพบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับความหนาของชั้นแคโทดและแปรผกผันกับความหนาของชั้นแอโนด นั่นคือการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า ทำได้โดยการเพิ่มความหนาของชั้นแคโทดหรือลดความหนาของชั้นแอโนด

คำสำคัญ: เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง ความหนาของชั้นอิเล็กโทรด ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

In this paper, the numerical results of a solid oxide fuel cell (SOFC) were reported in three dimensions. The relationship between the cell performance and the thickness of electrodes was investigated. The governing equations for mass continuity, momentum conservation, energy conservation and species conservation were discrete with the finite element method using COMSOL Multiphysics. The current density was compared with the results between various thicknesses of electrodes in a single cell. The porosity, height and length of the gas channel in the SOFC were input. It was found that the current density increased with the increasing of the thickness of cathode electrodes; nevertheless, the current density decreased with the increasing of thickness of the anode electrodes. Thus, the current density can be improved by increasing the thickness of the cathode electrode or reducing thickness of the anode electrode.

Keywords: solid oxide fuel cell, thickness electrode, finite element method

บทนำ

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งเป็นทางเลือกของแหล่งพลังงานใหม่ ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นภายในแล้วจะให้พลังงานไฟฟ้าออกมาอย่างมีประสิทธิภาพ มีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทวีปยุโรป อเมริกา และประเทศญี่ปุ่นพลังงานที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจะเกิดจากการเปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิง เช่น แก๊สไฮโดรเจน แก๊สธรรมชาติ มีเทน เมทานอลและแก๊สจากถ่านหิน โดยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง

ซึ่งการเกิดมลพิษจากเซลล์เชื้อเพลิงนี้น้อยมาก เมื่อเทียบกับพลังงานจากแหล่งอื่น¹

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงคล้ายกับการทำงานของแบตเตอรี่ ต่างกันที่เซลล์เชื้อเพลิงไม่สามารถเก็บพลังงานไว้ได้เหมือนแบตเตอรี่และชาร์จไม่ได้ แต่เซลล์เชื้อเพลิงจะให้พลังงานไฟฟ้าออกมาสม่ำเสมอ เมื่อมีการให้เชื้อเพลิงและตัวออกซิไดซ์ในเซลล์อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้การใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงยังให้ผลดีในแง่ที่ไม่เกิดการเผาไหม้ทำให้ปราศจากมลภาวะ รวมทั้งไม่มีเสียงดังรบกวนเกิดขึ้น จากข้อดี

¹ นิสิตปริญญาโท, ²อาจารย์ประจำ, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

¹ Master degree student, ²Lecturer, Faculty of Science, Burapha University

ที่กล่าวถึงนี้ทำให้นักวิจัยพยายามที่จะพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน เมื่อปี ค.ศ. 1960 มีการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อที่จะใช้กับยานอวกาศ ซึ่งองค์การนาซาต้องเสียค่าใช้จ่ายถึงสิบล้านดอลลาร์ เพื่อใช้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า ในการส่งยานอพอลโลไปยังดวงจันทร์ เซลล์เชื้อเพลิงที่ได้ผลิตในครั้งนั้นใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง และทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์และใช้แก๊สออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ ซึ่งนอกจากจะได้พลังงานไฟฟ้าจากปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงแล้วยังมีน้ำเกิดขึ้นเป็นผลพลอยได้ ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงจนสามารถใช้เป็นน้ำดื่มในยานอวกาศได้ ปัจจุบันมีการทดลองใช้เซลล์เชื้อเพลิงในระบบขนส่งมวลชน เช่น รถโดยสารในซิดคาโกและแวนคูเวอร์ หรือใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานในบ้านพักอาศัย เป็นต้น²

เซลล์เชื้อเพลิงในปัจจุบันมีหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้มี 2 ชนิด คือเซลล์เชื้อเพลิงแบบโพลีเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน และเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง โดยเซลล์เชื้อเพลิงแบบโพลีเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรนสามารถนำไปใช้ในรถยนต์ ซึ่งไม่เพียงแต่ใช้เชื้อเพลิงที่เป็นแก๊สไฮโดรเจนเท่านั้น แต่ยังสามารถใช้เชื้อเพลิงที่เป็นของเหลวเช่นเมทานอลหรือเอทานอล ซึ่งเป็นข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ เนื่องจากใช้ของเหลวเป็นเชื้อเพลิงจึงง่ายต่อการจัดเก็บและการขนส่ง นอกจากนี้เชื้อเพลิงที่เป็นของเหลวในเซลล์เชื้อเพลิงแบบโพลีเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรนยังเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีได้ค่อนข้างไวที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ค่าใช้จ่ายไม่สูงและไม่ก่อให้เกิดมลพิษ จากเหตุผลดังกล่าวทำให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ในช่วงที่อุณหภูมิอยู่ในช่วง 50 - 80 °C ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งสามารถใช้งานที่อุณหภูมิค่อนข้างสูงในช่วง 800 - 1000 °C เซลล์ชนิดนี้จะให้ประสิทธิภาพการผลิตกำลังไฟฟ้าได้ถึง 60% และถ้านำความร้อนที่เหลือทิ้งกลับมาใช้ร่วมด้วยประสิทธิภาพจะเพิ่มเป็น 85% เนื่องจากเซลล์ทำงานที่อุณหภูมิสูงทำให้ไม่ต้องใช้โลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและการปรับเชื้อเพลิงเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ ทำให้เลือกใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิดโดยไม่ต้องเพิ่มตัวปรับเชื้อเพลิงภายนอกให้กับระบบซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายในการสร้างเซลล์เชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ทนต่อกำมะถันมากที่สุดและไม่ถูกทำลายด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จึงสามารถใช้ก๊าซจากถ่านหินได้และยังใช้ได้กับก๊าซธรรมชาติ และก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จากชีวมวล ซึ่งงานวิจัยในครั้งนี้จะเน้นศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง

จากข้อดีและประโยชน์ที่ได้กล่าวมา ทำให้มีผู้สนใจพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง และมีผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการออกแบบ

ชั้นวางเซลล์เชื้อเพลิง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมานั้นจะนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการคำนวณประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงและอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในชั้นวางเซลล์เชื้อเพลิงเช่นการกระจายตัวของก๊าซเชื้อเพลิง ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและการกระจายความร้อน เป็นต้น ข้อมูลที่ได้เหล่านี้มีสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบชั้นวางเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด ซึ่งงานออกแบบที่ใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยนั้นจะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการสร้างต้นแบบและการทำการทดลอง

Figure 1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง 1 เซลล์ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ ขั้วแอโนด ขั้วแคโทดและอิเล็กโทรไลต์มาประกอบกันโดยแต่ละส่วนจะมีอินเตอร์คอนเนคเป็น ตัวที่เชื่อมต่อเซลล์เข้าด้วยกัน วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรไลต์จะเป็นออกไซด์ของเซอร์โคเนีย เช่น ยิทเทรียมเซอร์โคเนีย (YSZ) เป็นต้น และจะใช้นิกเกิล (Ni) โคบอลต์ (Co) หรือรูทีเนียม (Ru) เป็นวัสดุในการทำขั้วแอโนด² ส่วนขั้วแคโทดจะใช้แลนทานัมออกไซด์ (La_2O_3) หรือแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) ซึ่งส่วนที่มีความพรุน ได้แก่ ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด³⁻⁷ ซึ่งมีความพรุนอยู่ในช่วง 0.3 - 0.5 (30 - 50%) มีผู้วิจัยพบว่าการลดความหนาของชั้นอิเล็กโทรไลต์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง⁸⁻¹⁰ นอกจากนี้มีผู้วิจัยที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับความหนาของชั้นอิเล็กโทรดทั้งแบบศึกษาเพียงตัวแปรเดียวหรือควบคู่กับตัวแปรอื่นๆ ซึ่งพบว่าการเพิ่มความหนาของชั้นแอโนดจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำลง^{8,11-12} จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่าการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแบบจำลองเชิงตัวเลขมีความสำคัญในการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิง โดยถูกนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการคำนวณประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าและอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อพัฒนาให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

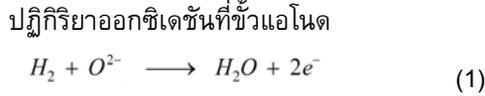
วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาความหนาของชั้นอิเล็กโทรด (แอโนดและแคโทด) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง

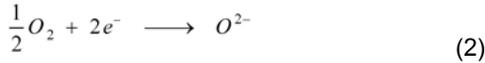
หลักการและทฤษฎี

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากการเปลี่ยนพลังงานทางเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าซึ่งหลักการที่ใช้คือการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและการลำเลียงของอิเล็กตรอนและไอออน

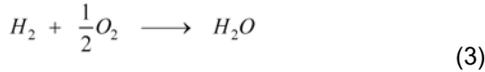
นำมาต่อกันเป็นวงจรปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นเกิดจาก 3 สปีชีส์ คือ H_2 , H_2O และ O_2 สามารถแสดงให้เห็นดังสมการ³



ปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด



ได้เป็นปฏิกิริยาเคมี



แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในงานวิจัยนี้ ศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของ แข็ง 1 เซลล์ โดยทำการแบ่งบริเวณที่ศึกษาออกเป็น 3 ส่วน คือ ขั้วแอโนด ขั้วแคโทดและอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีสมการการไหล การแพร่ การถ่ายเทความร้อน สมการปฏิกิริยาเคมีและสมการปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเป็นสมการควบคุม ดังนี้

1. การกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าภายในเซลล์

1.1 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของเชื้อเพลิงภายในขั้วแอโนด

ปฏิกิริยาเคมีสามารถอธิบายได้จากสมการการถ่ายเทมวลขององค์ประกอบของก๊าซ ผ่านวัสดุพรุนจากสมการของ Stefan - Maxwell ซึ่งเป็นแบบ Multi - Component Species และการแพร่ของ Knudsen เพื่ออธิบายการชนของอนุภาคกับผนังที่มีผลต่อการแพร่ โดยมีสมการของ Butler - Volmer เป็นสมการควบคุมเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะต้องอาศัยอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ดังสมการ

$$Q_{a,c_i} = Q_{0,a} \left[\frac{c_{H_2}}{c_{H_2,ref}} \exp\left(\frac{0.5F}{RT} \eta\right) - \frac{c_{H_2O}}{c_{H_2O,ref}} \exp\left(\frac{-1.5F}{RT} \eta\right) \right] \quad (4)$$

โดยที่

- $Q_{0,a}$ = ค่ากระแสไฟฟ้าที่ขั้วแอโนด (A/m^2)
- c_{H_2O} = ความเข้มข้นโดยมวลของน้ำ (mol/m^3)
- c_t = ผลรวมของความเข้มข้นทั้งหมด (mol/m^3)
- $c_{H_2,ref}$ = ความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่จุดอ้างอิง (mol/m^3)
- $c_{H_2O,ref}$ = ความเข้มข้นของน้ำที่จุดอ้างอิง (mol/m^3)
- F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (C/mol)
- R = ค่าคงที่ของก๊าซ ($J/(mol \cdot K)$)

T = อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง (K)

η = ค่าแรงดันไฟฟ้า (V)

เนื่องจากข้อจำกัดของอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของไฮโดรเจนที่ขั้วไฟฟ้าแอโนด เขียนในรูปของสมการ

$$\eta = \phi_{electronic} - \phi_{ionic} - \Delta\phi_{eq} \quad (5)$$

เมื่อ $\Delta\phi_{eq}$ = ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสมดุล (V)

1.2 ปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนภายในขั้วแคโทด

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งที่ขั้วแคโทด สามารถเขียนแทนด้วยสมการปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีได้ดังนี้

$$Q_{c,c_i} = Q_{0,c} \left(\exp\left(\frac{3.5F}{RT} \eta\right) - x_{O_2} \frac{c_t}{c_{H_2O,ref}} \exp\left(\frac{-0.5F}{RT} \eta\right) \right) \quad (6)$$

โดยที่

$Q_{0,c}$ = ค่ากระแสไฟฟ้าที่ขั้วแคโทด (A/m^2)

x_{O_2} = สัดส่วนโดยมวลของก๊าซออกซิเจน

บริเวณทางเข้าที่ขั้วแอโนด กำหนดให้ศักย์ไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ และที่ขั้วแคโทดมีค่าเท่ากับศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ซึ่งคำนวณได้จาก

$$V_{cell} = \Delta\phi_{eq,c} - \Delta\phi_{eq,a} - V_{pol} \quad (7)$$

เมื่อ

V_{cell} = ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (V)

V_{pol} = ค่าโพลาริเซชัน (V)

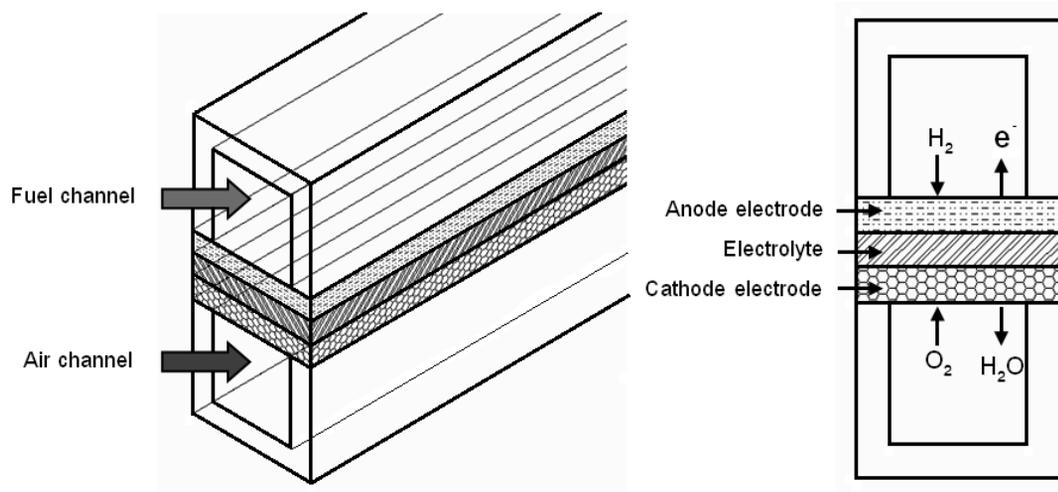


Figure 1 Three dimensional of a single cell solid oxide fuel cell

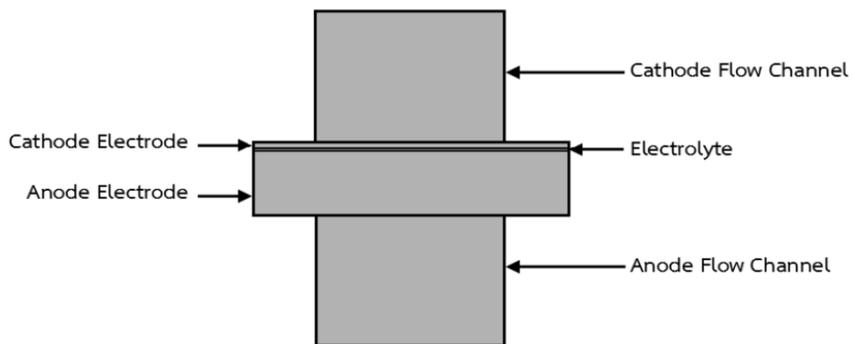


Figure 2 Configuration of unit cell solid oxide fuel cell

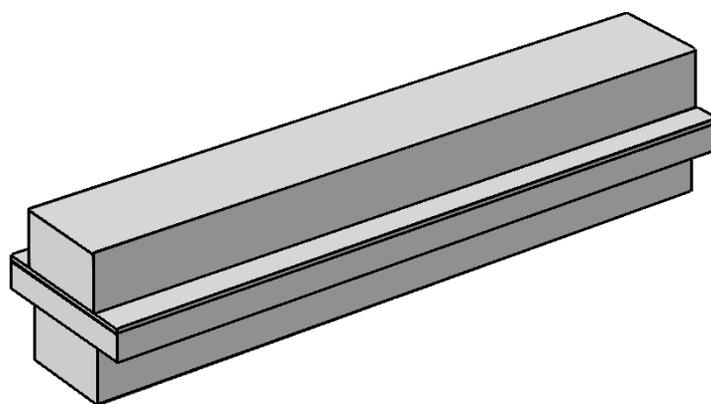


Figure 3 Computational domain (a unit cell solid oxide fuel cell)

Table 1 Three – dimensional solid oxide fuel cell geometry⁵

Structure	Thickness (mm)	Width (mm)	Length (mm)
1. Cathode flow channel	1	2.5	10
2. Cathode electrode	0.05	1.5	10
3. Electrolyte	0.01	1.5	10
4. Anode electrode	0.5	1.5	10
5. Anode flow channel	1	2.5	10

2. การถ่ายเทมวลของก๊าซแต่ละชนิด¹³

2.1 สมการถ่ายเทมวล ใช้ในการคำนวณก๊าซ

แต่ละชนิด

$$\nabla \cdot \mathbf{j}_i + \nabla \cdot (\rho \omega_i \mathbf{u}) = \mathbf{R}_i \quad (8)$$

เมื่อ

ρ = ความหนาแน่นของก๊าซผสม

\mathbf{u} = ความเร็วเฉลี่ยของก๊าซผสม

ω_i = สัดส่วนโดยมวลของก๊าซ i

\mathbf{j}_i = อัตราการไหลของมวล

\mathbf{R}_i = อัตราการผลิตของปฏิกิริยา

2.2 สมการการแพร่กระจายของ Maxwell-Stefan

ซึ่งสัมพันธ์กับเวกเตอร์ฟลักซ์เชิงมวล

$$\mathbf{j}_i = -\rho \omega_i \sum_{k=1}^Q D_{ik} \mathbf{d}_k - \frac{D_i^T}{T} \nabla T \quad (9)$$

เมื่อ

D_{ik} = เมตริกซ์การแพร่กระจายตามกฎข้อ 1 ของ Fick

D_i^T = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความร้อน

T = อุณหภูมิ (K)

\mathbf{d}_k = แรงขับเคลื่อนการแพร่กระจาย

ซึ่งแรงขับเคลื่อนการแพร่กระจาย สามารถคำนวณได้จาก

สมการ

$$\mathbf{d}_k = \nabla x_k + \frac{1}{n} (x_k - c_k) \nabla p \quad (10)$$

$$x_k = \frac{\omega_k M_n}{A_k} \quad (11)$$

$$M_n = \left(\sum_i \frac{\omega_i}{M_i} \right)^{-1} \quad (12)$$

3. การแพร่ภายในวัสดุพอร์นที่ตัวอิเล็กโทรด

3.1 สมการแพร่และการซึมผ่านของก๊าซภายใน

วัสดุพอร์นการถ่ายเทมวลของก๊าซชนิดต่าง ๆ เกิดขึ้นโดยการแพร่แบบไบนารี ซึ่งมีค่าความต้านทานของการถ่ายเทมวลของ

ก๊าซผ่านแอนโนดและแคโทด ณ ค่าของความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าของเซลล์ โดยไม่คิดผลของการดูดซับและการคายของสารที่แพร่และไม่คิดการแพร่ที่ผิว เนื่องจากการวิเคราะห์การไหลและการกระจายตัวของก๊าซผ่าน วัสดุพอร์นภายในขั้วแอนโนดและแคโทดถูกควบคุมโดย Brinkman's Equation ซึ่งบริเวณช่องการไหลของแอนโนดและแคโทด ขั้วแอนโนดและขั้วแคโทด ถูกควบคุมโดยสมการ (13) และ (14)

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (13)$$

$$\rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + \mu (\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} \right] + F \quad (14)$$

และที่บริเวณขั้วแอนโนดและขั้วแคโทด ถูกควบคุมโดย

สมการ (15) และ (16)

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = Q_{br} \quad (15)$$

$$\frac{\rho}{\varepsilon} (\mathbf{v} \cdot \nabla) \frac{\mathbf{v}}{\varepsilon} = \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + \frac{\mu}{\varepsilon} (\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T) - \frac{2}{3} \frac{\mu}{\varepsilon} (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} \right] - \left(\frac{\mu}{\kappa_{br}} + \beta_F |\mathbf{v}| + Q_{br} \right) \mathbf{v} + F \quad (16)$$

โดยที่

ρ = ความหนาแน่นในเฟสของก๊าซผสม

\mathbf{v} = ความเร็วแนวแกน x , y , z ของก๊าซผสม

μ = ค่าความหนืดของก๊าซผสม

p = ความดัน

ε = ความพรุนตัวของอิเล็กโทรด

κ_{br} = ค่าความสามารถในการซึมผ่านของอิเล็กโทรด

Q_{br} = ผลผลิตที่ได้

β_F = ค่า Forchheimer Drag

$\beta_F |\mathbf{v}| \mathbf{v}$ = สัดส่วนความหนืดต่อความเร็ว² ของของไหล

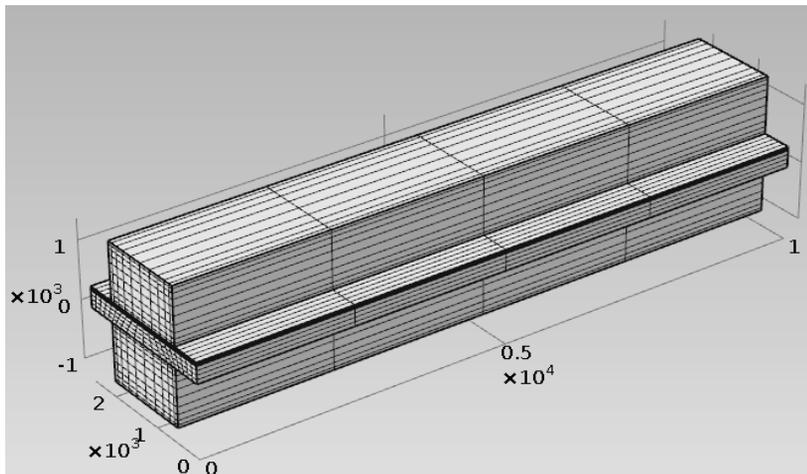


Figure 4 Computational mesh of unit cell solid oxide fuel cell

4. เงื่อนไขค่าขอบ

กำหนดให้เชื้อเพลิงเข้าในช่องแคโทดและช่องแอโนดซึ่งมีทิศการไหลสวนทางกัน และให้ก๊าซไฮโดรเจนเข้าที่ขั้วแอโนดทางด้านซ้าย สำหรับสมการ ionic charge balance คำนวณที่ขั้วแคโทด ขั้วแอโนดและอิเล็กโทรไลต์ กำหนดให้ภายนอกถูกหุ้มด้วยฉนวน มีเงื่อนไขค่าขอบดังสมการ (15)

$$-n \cdot J = 0 \tag{15}$$

สำหรับในช่องแอโนด กำหนดค่าเริ่มต้นสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนเท่ากับ 0.4 ที่เข้าทางซ้ายและออกทางขวาของช่องแอโนด และกำหนดค่าขอบด้านนอกของชั้นแอโนดและช่องการไหลของแอโนดดังสมการ (16)

$$-n \cdot (j_i + \rho u \omega_i) = 0 \tag{16}$$

ผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ ศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งใน 3 มิติ 1 เซลล์ ซึ่งประกอบด้วย ช่องการไหลของแคโทด ชั้นแคโทด ชั้นอิเล็กโทรไลต์ ชั้นแอโนดและช่องการไหลของแอโนด ตามลำดับแสดงดัง Figure 2 และ Figure 3 ซึ่งเน้นการศึกษาผล ความหนาของชั้นแอโนดและแคโทดที่มีต่อประสิทธิภาพของ เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง โดยจำลองขนาดของเซลล์ เชื้อเพลิงดัง Table 1 และใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์¹⁴ แบ่ง โดเมนออกเป็นทรงสี่เหลี่ยมหกหน้าจำนวน 1,600 เอลิเมนต์ 2,255 จุดต่อ แสดงดัง Figure 4 เพื่อใช้ในแบบจำลองเชิง ตัวเลข ผู้วิจัยได้ใช้แบบจำลองของ Mahceneet al⁵ (Table 1) เป็นแบบจำลองอ้างอิงในการศึกษาความหนาของชั้น อิเล็กโทรดซึ่งเป็นส่วนที่มีความพรุน โดยใช้ค่าความพรุน 0.3 และ ค่าการซึมผ่านของก๊าซ $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ เพื่อศึกษาถึงผลของความ

หนาของชั้นอิเล็กโทรดต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยการกำหนดค่าความพรุนคงที่และทำการปรับความหนาของ ชั้นที่ขั้วแอโนดเป็น $500 \pm 200 \text{ }\mu\text{m}$ และกำหนดความหนา ของชั้นแคโทดไว้ที่ $50 \text{ }\mu\text{m}$ การประมวลผลผ่านโปรแกรม COMSOL Multiphysics ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า แสดงดัง Table 2

Table 2 The simulation results of SOFC (50 μm Ca-thickness)

Anode thickness (μm)	Current density (A/m^2)
300	1,944.29
500	1,818.85
700	1,784.28

Voltage Polarization = 0.5

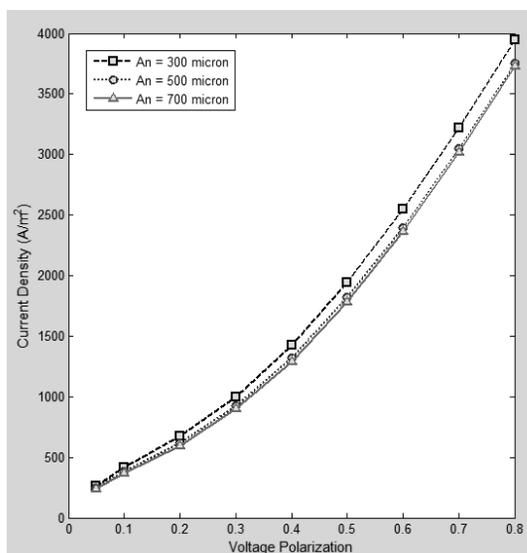


Figure 5 Effect of thickness of anode on SOFC current density

Figure 5 แสดงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเมื่อปรับความหนาของชั้นแอโนดเป็น 300 500 และ 700 μm ทำงานที่ 800 $^{\circ}\text{C}$ พบว่าเมื่อชั้นแอโนดหนา 300 μm ให้กระแสไฟฟ้า 1,944.29 A/m^2 เมื่อเปรียบเทียบผลจากการปรับความหนาแอโนดที่ 500 และ 700 μm สรุปได้ว่าเมื่อความหนาของชั้นแอโนดเพิ่มขึ้นกระแสไฟฟ้าจะลดลง Figure 6 แสดงปริมาณกระแสไฟฟ้าของชั้นอิเล็กโทรไลต์เมื่อชั้นแอโนดหนา 300 μm Figure 7 แสดงการกระจายตัวของก๊าซออกซิเจนบริเวณช่องแคโทดและที่ขั้วแคโทด ส่วน Figure 8 แสดงการกระจายตัวของก๊าซไฮโดรเจนบริเวณช่องแอโนดและที่ขั้วแอโนด โดย Figure 7 และ Figure 8 แสดงผลภาคตัดขวาง 20 สไลด์ ที่ค่าโพลาริเซชัน 0.5 โวลต์

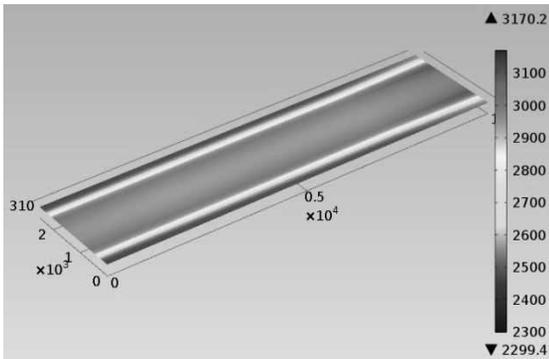


Figure 6 The electrolyte current density in the unit cell operating at 0.5 voltage

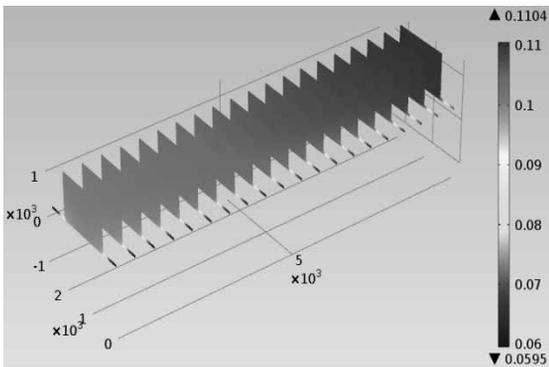


Figure 7 Oxygen distribution in the cathode

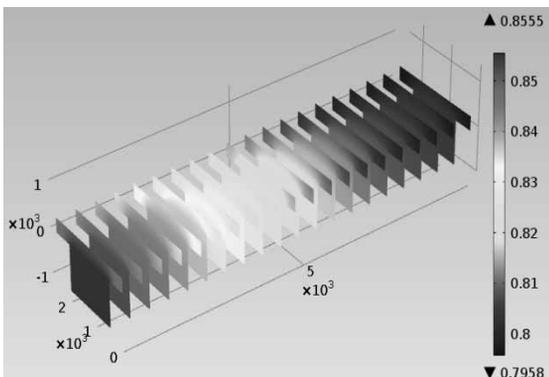


Figure 8 Hydrogen distribution in the anode

สำหรับการปรับความหนาของชั้นแคโทด ผู้วิจัยทำการจำลองแบบโดยเลือกความหนาของชั้นแอโนดที่ 300 μm และปรับความหนาของชั้นแคโทดเป็น $50 \pm 20 \mu\text{m}$ ผลที่ได้แสดงดัง Table 3

Table 3 The simulation results of SOFC (300 μm An-thickness)

Cathode thickness (μm)	Current density* (A/m^2)
30	1,489.70
50	1,944.29
70	2,232.72

* Voltage Polarization = 0.5

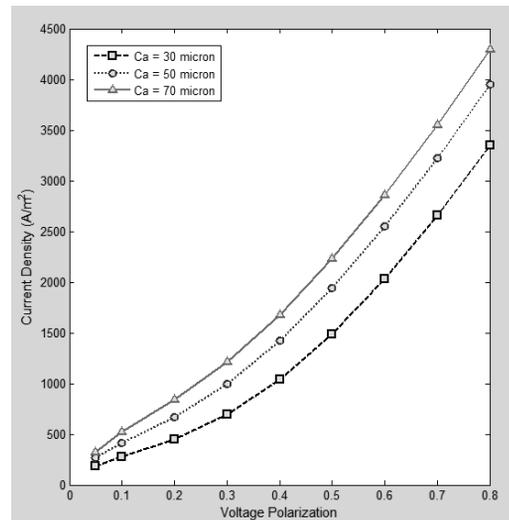


Figure 9 Effect of thickness of cathode on SOFC current density

Figure 9 แสดงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเมื่อปรับความหนาของชั้นแคโทดเป็น 30 50 และ 70 μm ทำงานที่อุณหภูมิ 800 $^{\circ}\text{C}$ พบว่าที่ขั้วแคโทดหนา 30 μm ให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1,489.70 A/m^2 เมื่อเพิ่มความหนาของชั้นแคโทดเป็น 50 μm ได้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 1,944.29 A/m^2 คิดเป็น 23.38% และที่ความหนา 70 μm ได้ให้กระแสไฟฟ้า 2,232.72 A/m^2 คิดเป็น 12.92% และจากการประมวลผลพบว่าเมื่อเพิ่มความหนาของชั้นแคโทดจะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อถึงจุดที่เหมาะสมแล้วอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าจะลดลง

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1. กรณีปรับความหนาของชั้นแอโนด พบว่าเมื่อให้แอโนดมีความหนา 300 μm เซลล์เชื้อเพลิงจะให้กระแสไฟฟ้าสูงสุดคือ 1,944.29 A/m^2 สำหรับค่าของกระแสไฟฟ้าที่แอโนดมีความหนา 500 และ 700 μm จะมีกระแสไฟฟ้าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงที่ให้ความหนาของชั้นแอโนดเป็น 300 μm สรุปได้ว่าเมื่อความหนาของชั้นแอโนดเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าจะลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Miao⁶ และ Gross et al¹¹

2. กรณีปรับความหนาของชั้นแคโทด พบว่าที่ความหนาของชั้นแคโทด 30 μm ได้กระแสไฟฟ้าต่ำสุด 1,489.70 A/m^2 และค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อให้ความหนาของชั้นแคโทดเป็น 50 และ 70 μm พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาของชั้นแคโทดจะทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแต่เมื่อถึงจุดที่เหมาะสมแล้วอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าจะลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Miao⁶

สรุปผลการทดลอง

จากการประมวลผลเชิงตัวเลขของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics พบว่าประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจะแปรผกผันกับความหนาของชั้นแอโนดแต่แปรผันตามความหนาของชั้นแคโทด หากต้องการพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งโดยการปรับความหนาของชั้นอิเล็กโทรด ควรเลือกปรับความหนาชั้นแคโทดเนื่องจากมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงมากกว่าการปรับความหนาชั้นแอโนด แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งจะต้องคำนึงถึงความแข็งแรง การนำความร้อนและความคงทนต่อการสึกกร่อน เป็นต้น ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมีผลต่ออายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิง ผู้วิจัยหวังว่าการจำลองแบบเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งในงานวิจัยนี้ จะเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านคณิตศาสตร์ (Centre Excellence in Mathematics) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และศาสตราจารย์ ดร. เบญจวรรณ วิวัฒน์ปฐพี ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. สุภาพรณัฏ์ เทอดเทียนวงษ์, อภิชัย เทอดเทียนวงษ์, กฤษณพงศ์ กীরติกร,ชาย สิวิวัฒน์ชัยกุล,ณาวดี ภิรมย์, พีระ เตชะมงคลาภิวัฒน์. เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง ทางเลือกใหม่ของการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ. *Industrial Technology Review* 2543;77:143-8.
2. อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี, นัทธมน คุณแสง. เซลล์เชื้อเพลิงและการวิจัยพัฒนา. *วิศวกรรมสาร* มก.2547;18(52): 66-76.
3. ประณุดา จิวากานนท์, พิมพา ลิ้มทองกุล, สุमितตรา จรัสโรจน์กุล, รพีพงษ์ สุวรรณวรางกูร. การพัฒนาแบบจำลองคุณภาพของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งโดยใช้อาโนดเป็นฐาน. ใน: การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3. โรงแรมไบเบกสกาย. กรุงเทพฯ;2550. หน้า 1-7.
4. นิวัฒน์ ภูเจริญ, ทวี เทศเจริญ, จารุวัตร เจริญสุข. การจำลองเชิงตัวเลขของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งแบบโลหะรองรับ. ใน: การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่22. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต. ปทุมธานี; 2551. หน้า 29-35.
5. Mahcene H, Moussa HB, Bouguettaia H, Bechki D, Zeroual M. Computational modeling of the transport and electrochemical phenomena in solid oxide fuel cell. *Energy Procedia* 2011; 6:65-74.
6. Miao F. Impact on fuel transport efficiency in anode of planar solid oxide fuel cell. *Int J Electro chem Sci* 2013;8:11814-22.
7. Wang C, Huang GPG. Computational analysis of solid oxide fuel cell with functionally graded electrodes. In: 49th AIAA Aerospace Science Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando: Florida; 2011. P.1-10.
8. ญาณี พรพัชรวรโชต,อมรชัย อภรณ์วิชานพ. การวิเคราะห์ทางทฤษฎีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่เกิดการรีฟอร์มมิงก๊าซมีเทนภายใน. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมเคมีคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2552.
9. Hildenbrand N, Boikamp BA, Nammensma P, Blank DHA. Improved cathode/electrolyte interface of SOFC. *Solid State Ionics* 2011; 192:12-5.
10. Myers D, Carter JD, Ralph J, Cruse T, Kumer R. Bipolar plate supported solid oxide fuel cell. In: Hy-

drogen Fuel Cells and Infrastructure Technologies.

Argonne: America; 2003. P.1-4.

11. Gross MD, Vohs JM, Gorte RJ. An examination of SOFC anode functional layers based on ceria in YSZ. *Journal of the Electrochemical Society* 2007;154(7):B694-9.
12. Ko C, Kerman K, Ramanathan S. Ultra-thin film solid oxide fuel cells utilizing un-doped nanostructured zirconia electrolytes. *Journal of Power Sources* 2012;213:343-9.
13. ปราโมทย์ เดชะอำไพ. พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และไฟไนต์วอลุ่ม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2553.
14. ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานเชิงวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2550.