

ผลของการออกแบบช่องทางไหลและพารามิเตอร์ดำเนินการต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง
ฟิวเอ็่มแบบเปิดด้านแคโทด: การศึกษาเชิงคำนวณ



นายสุชาติ กริแสง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF FLOW CHANNEL DESIGN AND OPERATING PARAMETERS ON
OPEN-CATHODE PEM FUEL CELL PERFORMANCE: A COMPUTATIONAL STUDY

Mr. Suchart Kreesaeng



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Fuel Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | ผลของการออกแบบช่องทางทางรถไฟและพารามิเตอร์ ดำเนินการต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มแบบเปิด ด้านแคโทด: การศึกษาเชิงคำนวณ |
| โดย | นายสุชาติ กริแสง |
| สาขาวิชา | เทคโนโลยีเชื้อเพลิง |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ |

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกื้อวลี พุกษาทร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คุณากร ภูจินดา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.เทอดไทย วัฒนธรรม)

สุชาติ กรีแสง : ผลของการออกแบบช่องทางการไหลและพารามิเตอร์ดำเนินการต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์แบบเปิดด้านแคโทด: การศึกษาเชิงคำนวณ (EFFECTS OF FLOW CHANNEL DESIGN AND OPERATING PARAMETERS ON OPEN-CATHODE PEM FUEL CELL PERFORMANCE: A COMPUTATIONAL STUDY) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, 87 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองสามมิติ ภูมิภาคเดียวที่สภาวะคงตัวและอุณหภูมิคงที่ เพื่อที่จะศึกษาผลของการออกแบบช่องทางการไหลของแก๊สด้านแคโทดด้วยการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนด้านกว้างต่อด้านสูงและค่าพื้นที่ตัดขวางของช่องทางการไหลของแก๊ส รวมทั้งอัตราการป้อนอากาศ ความชื้นของอากาศ และอุณหภูมิของเซลล์ต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์แบบเปิดด้านแคโทดด้วยวิธีทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 6.3

ผลจากการคำนวณโดยแบบจำลองพบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของพื้นที่ตัดขวางลดลงจะทำให้ออกซิเจนสามารถแพร่ไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้มากขึ้นทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น สำหรับขนาดของพื้นที่ตัดขวางพบว่า การเพิ่มพื้นที่ตัดขวางส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบไม่เป็นเชิงเส้นโดยเมื่อพื้นที่ตัดขวางเพิ่มขึ้นจะทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงในช่วงแรกและเพิ่มขึ้นในช่วงถัดไป ทั้งนี้พบว่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับทั้งระยะห่างระหว่างช่องทางการไหลที่อยู่ติดกันและพื้นที่สัมผัสระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกับชั้นการแพร่ของแก๊ส โดยในการออกแบบควรมีระยะห่างระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สน้อยและมีพื้นที่สัมผัสมาก ซึ่งค่าอัตราส่วนและขนาดพื้นที่ตัดขวางที่เหมาะสมเท่ากับ 0.8 และ 2 ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ

การศึกษาผลของพารามิเตอร์ดำเนินการต่างๆต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าเมื่ออัตราการป้อนอากาศสูงขึ้นจะทำให้ออกซิเจนแพร่ไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นมีผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มความชื้นของอากาศไม่ส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงและการเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาหรือค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ท้องถิ่นสูงขึ้นมีผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น

| | | | |
|------------|---------------------|----------------------------|-------|
| ภาควิชา | เคมีเทคนิค | ลายมือชื่อนิสิต | |
| สาขาวิชา | เทคโนโลยีเชื้อเพลิง | ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก | |
| ปีการศึกษา | 2557 | ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม | |

5572144423 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY

KEYWORDS: PEMFC / OPEN-CATHODE / ASPECT RATIO / CROSS-SECTIONAL AREA / CFD SIMULATION

SUCHART KREESAENG: EFFECTS OF FLOW CHANNEL DESIGN AND OPERATING PARAMETERS ON OPEN-CATHODE PEM FUEL CELL PERFORMANCE: A COMPUTATIONAL STUDY. ADVISOR: ASSOC. PROF. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. BENJAPON CHALERMSINSUWAN, Ph.D., 87 pp.

Three dimensional, steady state, single phase and isothermal model is developed to investigate the effect of cathode channel design with varying cross-sectional area and aspect ratio, air flow rate, air humidity and cell temperature on open-cathode PEM fuel cell performance by using computational fluid dynamic technique in commercial software ANSYS FLUENT 6.3.

The result shows that decreasing of aspect ratio increases molar concentration of oxygen at the interface of gas diffusion layer and catalyst layer and then increases cell performance. Cross-sectional area does not affect linearly on the cell performance. The cell performance first decreases and then increases as the cross-sectional area increases. It is also found that cell performance depends on rib area and contract area between flow channel and gas diffusion layer together. The cathode channel should be designed with small rib area and large contract area. The optimal flow channel aspect ratio is 0.8 and optimal cross-sectional area is 2 mm²

Moreover, increasing of air flow rate increases molar concentration of oxygen at the interface of gas diffusion layer and catalyst layer and consequently increases cell performance. On the contrary increasing of air humidity does not affect on the cell performance. Finally, increasing of cell temperature increases exchange current density, leading to the increase of average current density and cell performance.

Department: Chemical Technology Student's Signature

Field of Study: Fuel Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2014 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ต้องขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมี เทคนิคที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ มอบคำแนะนำและข้อคิดเห็นที่มีประโยชน์ต่อข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุกษาทร ประธานกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เทอดไทย วัฒนธรรม และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คุณากร ภูจินดา คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยมอบคำแนะนำและข้อคิดเห็นเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อังคีร์ ศรีภคการ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และนางสาวสรวงรัตน์ เกียรติธรรมรงค์ นิสิตระดับบัณฑิตศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ช่วยอนุเคราะห์ข้อมูลเพื่อใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆและน้องๆในห้องวิจัย Cybernetic รวมทั้งนิสิตระดับบัณฑิตศึกษาภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ช่วยให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายขอขอบพระคุณครอบครัวและเพื่อนๆทุกคน รวมทั้ง คุณเลิศเชาว์ สุทธาพานิช และ คุณณัฐยา ตรีสุนทรคนพวงศ์ ที่เป็นกำลังใจ ให้การช่วยเหลือและการสนับสนุนอย่างดีเสมอมาจนจบการศึกษา

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | จ |
| กิตติกรรมประกาศ | ฉ |
| สารบัญ | ช |
| สารบัญตาราง | ฅ |
| สารบัญรูป | ฉ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 3 |
| 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 4 |
| 1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย | 4 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 5 |
| 2.1 เซลล์เชื้อเพลิง | 5 |
| 2.2 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง | 5 |
| 2.3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม) | 10 |
| 2.4 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม | 11 |
| 2.4 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม | 12 |
| 2.4.1 ชั้นประกอบเมมเบรนและขั้วไฟฟ้า | 12 |
| 2.4.2 แผ่นช่องทางไหลของแก๊ส | 14 |
| 2.5 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้านแคโทด | 15 |
| 2.6 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง | 16 |
| 2.6.1 การสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาริเซชันของปฏิกิริยา | 16 |

| | |
|---|----|
| 2.6.2 การสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากความต้านทานหรือการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าโอห์มมิก..... | 17 |
| 2.6.3 การสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาริเซชันของความเข้มข้น..... | 18 |
| 2.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม..... | 19 |
| 2.7.1 กระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE..... | 24 |
| 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 25 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย..... | 28 |
| 3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... | 28 |
| 3.1.1 สมการอนุรักษ์มวล..... | 28 |
| 3.1.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม..... | 29 |
| 3.1.3 สมการอนุรักษ์องค์ประกอบ..... | 30 |
| 3.1.4 สมการทางเคมีไฟฟ้า..... | 31 |
| 3.2 การออกแบบช่องทางการไหลและการสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตในการคำนวณ..... | 34 |
| 3.3. การจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent 6.3..... | 38 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล..... | 43 |
| 4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง..... | 43 |
| 4.2 ผลของการออกแบบช่องทางการไหลของแก๊ส..... | 47 |
| 4.2.1 การกระจายตัวของความดันภายในช่องทางการไหลของแก๊ส..... | 47 |
| 4.2.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของพื้นที่ตัดขวาง..... | 51 |
| 4.2.3 ผลของขนาดพื้นที่ตัดขวาง..... | 56 |
| 4.3 ผลของพารามิเตอร์ดำเนินการ..... | 61 |
| 4.3.1 ผลของอัตราการไหลของมวลอากาศขาเข้า..... | 61 |
| 4.3.2 ผลของความชื้นของอากาศ..... | 66 |
| 4.3.3 ผลของอุณหภูมิเซลล์เชื้อเพลิง..... | 68 |

| | |
|---|----|
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 74 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย | 74 |
| 5.1.1 ผลของการออกแบบช่องทางการไหลของแก๊ส | 74 |
| 5.1.1.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของพื้นที่ตัดขวาง | 74 |
| 5.1.1.2 ผลของขนาดพื้นที่ตัดขวาง | 75 |
| 5.1.2 ผลของพารามิเตอร์ดำเนินการ..... | 75 |
| 5.1.2.1 อัตราการไหลของมวลอากาศขาเข้า | 75 |
| 5.1.2.2 ผลของความชื้นของอากาศ..... | 76 |
| 5.1.2.3 ผลของอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง | 76 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 76 |
| รายการอ้างอิง..... | 77 |
| ภาคผนวก..... | 79 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 87 |

สารบัญตาราง

หน้า

| | |
|--|----|
| ตารางที่ 2.1 ชนิดและสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทต่างๆ [2, 4] | 10 |
| ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการออกแบบช่องทางการไหลของแก๊ส | 34 |
| ตารางที่ 3.2 ขนาดของแบบจำลองส่วนต่างๆ | 35 |
| ตารางที่ 3.3 ค่าตัวแปรสำหรับแบบจำลอง..... | 41 |
| ตารางที่ 3.4 สภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง..... | 42 |
| ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของช่องทางการไหลแบบต่างๆ | 53 |
| ตารางที่ 4.2 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดจำแนกตามพื้นที่ตัดขวาง | 54 |
| ตารางที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดจำแนกตามอัตราส่วน | 58 |
| ตารางที่ 4.4 สถิติความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%) ของประเทศไทยในช่วงฤดูกาลต่างๆ [19]..... | 66 |
| ตารางที่ 4.5 สัดส่วนโดยมวลของอากาศขาเข้าที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ..... | 66 |
| ตารางที่ ก1 ค่าความดันไอ ความดันไออิ่มตัว ค่าอัตราส่วนผสม และค่าสัดส่วนโดยมวลของแก๊สองค์ประกอบในอากาศขาเข้าที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ | 82 |

สารบัญรูป

หน้า

| | |
|---|----|
| รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงระบบเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม: (ก) ระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้าน แคโทด และ (ข) ระบบเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มแบบทั่วไป..... | 2 |
| รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม..... | 11 |
| รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของเนฟออนเมมเบรน | 13 |
| รูปที่ 2.3 รูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊ส (ก) แบบช่องขนานตรง (ข) แบบคดเคี้ยว (ค) แบบช่องระหว่างนิ้ว | 14 |
| รูปที่ 2.4 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้านแคโทดขนาด 1 กิโลวัตต์..... | 15 |
| รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มแบบเปิดด้านแคโทด..... | 35 |
| รูปที่ 3.2 การจัดอุปกรณ์ในการทดสอบ | 35 |
| รูปที่ 3.3 แบบจำลองเชิงเรขาคณิตช่องทางการไหลแบบต่างๆในระนาบ X-Y (ก) แบบที่ 1 (ข) แบบที่ 2 (ค) แบบที่ 3 (ง) แบบที่ 4 (จ) แบบที่ 5 และ (จ) แบบที่ 6..... | 37 |
| รูปที่ 3.4 แบบจำลองเชิงเรขาคณิตช่องทางการไหลแบบต่างๆในระนาบ Y-Z (ก) แบบที่ 1 (ข) แบบที่ 2 (ค) แบบที่ 3 (ง) แบบที่ 4 (จ) แบบที่ 5 และ (จ) แบบที่ 6..... | 38 |
| รูปที่ 3.5 ขั้นตอนในการทำการจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง..... | 40 |
| รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างแบบจำลองและการทดลองจริง ของช่องทางการไหลของแก๊สแบบที่ 1..... | 44 |
| รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างแบบจำลองและการทดลองจริง ของช่องทางการไหลของแก๊สแบบที่ 2..... | 44 |
| รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างแบบจำลองและการทดลองจริง ของช่องทางการไหลของแก๊สแบบที่ 3..... | 45 |
| รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างแบบจำลองและการทดลองจริง ของช่องทางการไหลของแก๊สแบบที่ 4..... | 45 |
| รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างแบบจำลองและการทดลองจริง ของช่องทางการไหลของแก๊สแบบที่ 5..... | 46 |

รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างแบบจำลองและการทดลองจริง
ของช่องทางการไหลของแก๊สแบบที่ 6.....46

รูปที่ 4.7 ความดันในช่องทางการไหลของแก๊สแบบที่ 148

รูปที่ 4.8 ความดันในช่องทางการไหลของแก๊สแบบที่ 248

รูปที่ 4.9 ความดันในช่องทางการไหลของแก๊สแบบที่ 349

รูปที่ 4.10 ความดันในช่องทางการไหลของแก๊สแบบที่ 449

รูปที่ 4.11 ความดันในช่องทางการไหลของแก๊สแบบที่ 550

รูปที่ 4.12 ความดันในช่องทางการไหลของแก๊สแบบที่ 650

รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างค่าอัตราส่วน 0.8 (แบบที่ 1)
กับ 1.25 (แบบที่ 2) ที่ขนาดของพื้นที่ตัดขวางเท่ากับ 2 ตารางมิลลิเมตร51

รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างค่าอัตราส่วน 0.8 (แบบที่ 3)
กับ 1.25 (แบบที่ 4) ที่ขนาดของพื้นที่ตัดขวางเท่ากับ 5 ตารางมิลลิเมตร52

รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างค่าอัตราส่วน 0.8 (แบบที่ 5)
กับ 1.25 (แบบที่ 6) ที่ขนาดของพื้นที่ตัดขวางเท่ากับ 8 ตารางมิลลิเมตร52

รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของแก๊สออกซิเจนในระนาบ Y-Z ที่จุด X=60 มิลลิเมตร ของพื้นที่
ตัดขวางขนาด 2 ตารางมิลลิเมตร อัตราส่วน 1.25 (ด้านบน) และ 0.8 (ด้านล่าง) ที่ $\eta_{act,c} =$
0.1752 โวลต์54

รูปที่ 4.17 การกระจายตัวของแก๊สออกซิเจนในระนาบ Y-Z ที่จุด X=60 มิลลิเมตร ของพื้นที่
ตัดขวางขนาด 5 ตารางมิลลิเมตร อัตราส่วน 1.25 (ด้านบน) และ 0.8 (ด้านล่าง) ที่ $\eta_{act,c} =$
0.1752 โวลต์55

รูปที่ 4.18 การกระจายตัวของแก๊สออกซิเจนในระนาบ Y-Z ที่จุด X=60 มิลลิเมตร ของพื้นที่
ตัดขวางขนาด 8 ตารางมิลลิเมตร อัตราส่วน 1.25 (ด้านบน) และ 0.8 (ด้านล่าง) ที่ $\eta_{act,c} =$
0.1752 โวลต์55

รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างขนาดพื้นที่ตัดขวาง 2 5 และ 8
ตารางมิลลิเมตร (แบบที่ 1 3 และ 5 ตามลำดับ) ที่อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้าง 1.25...56

| | |
|--|----|
| รูปที่ 4.20 กราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างขนาดพื้นที่ตัดขวาง 2.5 และ 8 ตารางมิลลิเมตร (แบบที่ 2.4 และ 6 ตามลำดับ) ที่อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้าง 0.8..... | 57 |
| รูปที่ 4.21 กราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างขนาดพื้นที่ตัดขวาง 2.5 และ 8 ตารางมิลลิเมตร ที่อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้าง 1.25 (แบบที่ 1.3 และ 5 ตามลำดับ) และอัตราการป้อนอากาศเข้า 3.03×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที..... | 59 |
| รูปที่ 4.22 กราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างขนาดพื้นที่ตัดขวาง 2.5 และ 8 ตารางมิลลิเมตร ที่อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้าง 0.8 (แบบที่ 2.4 และ 6 ตามลำดับ) และอัตราการป้อนอากาศเข้า 3.03×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที..... | 60 |
| รูปที่ 4.23 กราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของอากาศเข้าต่างๆ | 61 |
| รูปที่ 4.24 การกระจายตัวของแก๊สออกซิเจนในช่องทางการไหลของแก๊ส ที่ $\eta_{act,c} = 0.1752$ โวลต์และอัตราการไหลเข้า 1.2335×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที..... | 62 |
| รูปที่ 4.25 การกระจายตัวของแก๊สออกซิเจนในช่องทางการไหลของแก๊ส ที่ $\eta_{act,c} = 0.1752$ โวลต์และอัตราการไหลเข้า 2.467×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที | 63 |
| รูปที่ 4.26 การกระจายตัวของแก๊สออกซิเจนในช่องทางการไหลของแก๊ส ที่ $\eta_{act,c} = 0.1752$ โวลต์และอัตราการไหลเข้า 4.934×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที | 63 |
| รูปที่ 4.27 การกระจายตัวของแก๊สออกซิเจนบนผิวรอยต่อระหว่างชั้นการกระจายตัวของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ $\eta_{act,c} = 0.1752$ โวลต์ ที่อัตราการไหลเข้า 1.2335×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที..... | 64 |
| รูปที่ 4.28 การกระจายตัวของแก๊สออกซิเจนบนผิวรอยต่อระหว่างชั้นการกระจายตัวของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ $\eta_{act,c} = 0.1752$ โวลต์ ที่อัตราการไหลเข้า 2.467×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที.. | 64 |
| รูปที่ 4.29 การกระจายตัวของแก๊สออกซิเจนบนผิวรอยต่อระหว่างชั้นการกระจายตัวของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ $\eta_{act,c} = 0.1752$ โวลต์ ที่อัตราการไหลเข้า 4.934×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที.. | 65 |
| รูปที่ 4.30 ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนภายในช่องทางการไหล (Bulk concentration) และบนผิวรอยต่อระหว่างชั้นการกระจายตัวของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Surface concentration)..... | 65 |
| รูปที่ 4.31 กราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ | 67 |

รูปที่ 4.32 ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนภายในช่องทางการไหล (Bulk concentration) และบนผิวรอยต่อระหว่างชั้นการกระจายตัวของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Surface concentration).....68

รูปที่ 4.33 กราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงต่างๆ.....69

รูปที่ 4.34 การกระจายตัวของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าท้องถิ่นบนผิวรอยต่อระหว่างชั้นการกระจายตัวของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ $\eta_{act,c} = 0.1666$ โวลต์ และอุณหภูมิ 333 เคลวิน..70

รูปที่ 4.35 การกระจายตัวของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าท้องถิ่นบนผิวรอยต่อระหว่างชั้นการกระจายตัวของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ $\eta_{act,c} = 0.1666$ โวลต์ และอุณหภูมิ 338 เคลวิน..70

รูปที่ 4.36 การกระจายตัวของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าท้องถิ่นบนผิวรอยต่อระหว่างชั้นการกระจายตัวของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ $\eta_{act,c} = 0.1666$ โวลต์ และอุณหภูมิ 343 เคลวิน..71

รูปที่ 4.37 การกระจายตัวของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าท้องถิ่นบนผิวรอยต่อระหว่างชั้นการกระจายตัวของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ $\eta_{act,c} = 0.1666$ โวลต์ และอุณหภูมิ 348 เคลวิน..71

รูปที่ 4.38 การกระจายตัวของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าท้องถิ่นบนผิวรอยต่อระหว่างชั้นการกระจายตัวของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ $\eta_{act,c} = 0.1666$ โวลต์ และอุณหภูมิ 353 เคลวิน..72

รูปที่ 4.39 กราฟแสดงค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาริเซชันของความเข้มข้นเทียบกับค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาริเซชันของปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิต่างๆ73

รูปที่ ข1 หน้าต่างโปรแกรม Fluent เมื่อทำการเลือกคำสั่ง Volume Integrals83

รูปที่ ข2 หน้าต่างโปรแกรม Fluent เมื่อทำการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้า.....84

รูปที่ ข3 หน้าต่างโปรแกรม Fluent เมื่อทำการคำนวณค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในช่องทางการไหลของแก๊ส85

รูปที่ ข4 หน้าต่างโปรแกรม Fluent เมื่อทำการเลือกคำสั่ง Surface Integrals86

รูปที่ ข5 หน้าต่างโปรแกรม Fluent เมื่อทำการคำนวณค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นการแพร่ของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา86

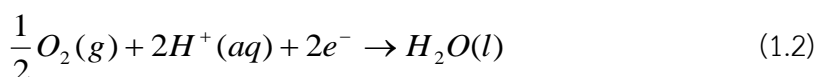
บทที่ 1

บทนำ

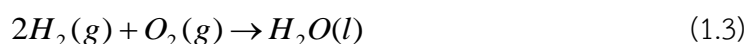
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันสังคมมีการตื่นตัวเรื่องภาวะโลกร้อนเป็นอย่างมาก โดยมีสาเหตุหลักจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเพื่อผลิตพลังงาน ดังนั้นจึงมีการมองหาแหล่งเชื้อเพลิงหรือแหล่งพลังงานใหม่ที่มีการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง ซึ่งพลังงานจากแก๊สไฮโดรเจนเป็นทางเลือกที่ดีทางเลือกหนึ่ง เนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้วจะไม่มีมีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และอุปกรณ์ที่จะสามารถนำพลังงานจากแก๊สไฮโดรเจนมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพก็คือเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell)

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานเคมีของสารตั้งต้นไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงโดยใช้ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี สามารถดำเนินการได้อย่างต่อเนื่องตามการป้อนสารตั้งต้นเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง โดยเซลล์เชื้อเพลิงมีหลายประเภท แต่ประเภทที่นิยมนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายคือ เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนหรือเซลล์เชื้อเพลิงพรีเอ็ม (Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) เชื้อเพลิงหรือสารตั้งต้นของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้คือแก๊สไฮโดรเจน (H_2) และ แก๊สออกซิเจน (O_2) และผลิตภัณฑ์ที่ได้คือน้ำและความร้อน โดยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงที่ขั้วแอโนดและแคโทดแสดงโดยปฏิกิริยา (1.1) - (1.2) ตามลำดับ

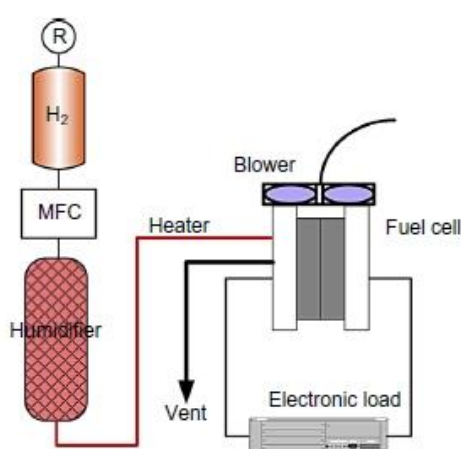


ได้สมการรวมที่เกิดขึ้น คือ

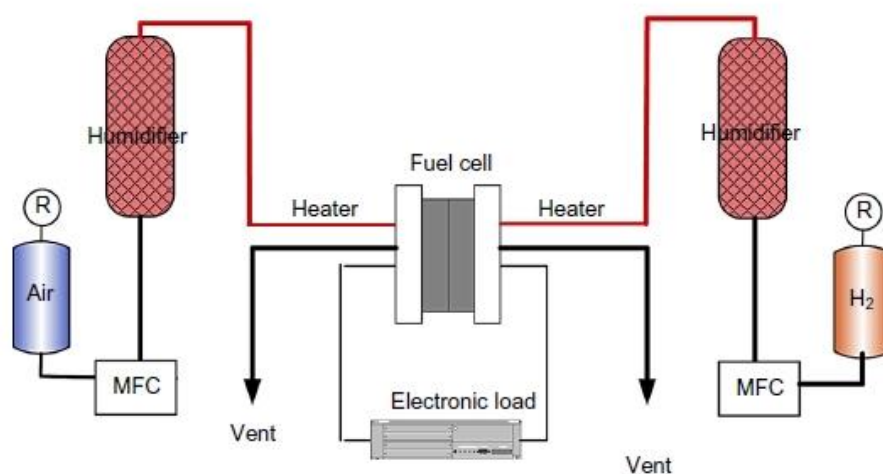


อากาศมีแก๊สออกซิเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ 21% ซึ่งสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงพรีเอ็มแทนการใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ได้ ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนของสารตั้งต้น ทั้งนี้ในการใช้

งานจริงของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวอีเอ็มนั้นจะต้องใช้เซลล์เชื้อเพลิงฟิวอีเอ็มแบบแถว (Stack PEM fuel cell) และมีอุปกรณ์อื่นๆ ร่วมด้วย เช่น ถังบรรจุก๊าซตั้งต้น ตัวปรับความชื้น (Humidifier) ดังรูปที่ 1.1(ข) ซึ่งทำให้ระบบของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวอีเอ็มมีขนาดใหญ่ จึงมีการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงฟิวอีเอ็มแบบเปิดด้านแคโทดที่จะสามารถป้อนอากาศเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงฟิวอีเอ็มได้โดยตรงทำให้สามารถลดการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ที่ฝั่งแคโทดได้เพื่อเป็นการลดขนาดของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแต่อาจจะต้องเพิ่มพัดลมเพื่อใช้ในการดึงอากาศเข้าสู่เซลล์ให้มากขึ้นดังรูปที่ 1.1(ก)



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงระบบเซลล์เชื้อเพลิงฟิวอีเอ็ม: (ก) ระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้านแคโทด และ (ข) ระบบเซลล์เชื้อเพลิงฟิวอีเอ็มแบบทั่วไป [1]

ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลแบบเปิดด้านแคโทดนั้นมีข้อเสีย คือ การป้อนอากาศเข้าสู่ขั้วแคโทด จะเกิดโดยการพาแบบธรรมชาติเท่านั้นซึ่งทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลด้อยกว่า เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลแบบอัดอากาศ นอกจากนี้ การใช้พัดลมเพื่อป้อนอากาศสู่ด้านแคโทดนั้นจะทำให้เกิดการไหลที่ไม่เป็นระเบียบตลอดช่องทางการไหลของแก๊สซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของ เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ล ซึ่งการปรับแต่งช่องทางการไหลของแก๊สจะสามารถเพิ่มสมรรถนะของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้านแคโทดได้

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของพื้นที่ ตัดขวางของช่องทางการไหลของแก๊สที่ฝั่งแคโทดที่ขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลของแก๊ส ต่างกัน อัตราการป้อนอากาศ ความชื้นและอุณหภูมิของเซลล์ที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ โดยเหตุผลที่ เลือกศึกษาปัจจัยที่เป็นอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างเท่ากับ 0.8 และ 1.25 เพราะลักษณะของพื้นที่ตัดขวางของช่องทางการไหลของแก๊สจะมีรูปแบบต่างกันคือที่อัตราส่วน 0.8 ความสูงจะน้อยกว่าความกว้างช่องทางการไหลของแก๊สจะอยู่ในรูปแบบแนวนอนส่วนอัตราส่วน 1.25 ความสูงจะมากกว่าความกว้างทำให้อยู่ในรูปแบบแนวตั้งซึ่งทั้งสองแบบจะมีพื้นที่ที่ติดต่อกับ ชั้นการแพร่ของแก๊สต่างกัน มีการลดลงของความดันต่างกัน ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อ ความกว้างของพื้นที่ตัดขวางนั้นจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ล จึงเป็นที่มาของ งานวิจัยโดยมีจุดประสงค์เพื่อหาอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความยาวที่เหมาะสมเพื่อจะให้ สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลแบบเปิดด้านแคโทดสูงขึ้น นอกจากนี้ อัตราการป้อนอากาศ ความชื้นและอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะเซลล์เช่นกัน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จะวิเคราะห์ผลของตัวแปรดำเนินการเหล่านี้ที่มีต่อสมรรถนะเซลล์ด้วยเช่นกัน

1.2 วัตถุประสงค์

1. พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงการคำนวณ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลแบบ เปิดด้านแคโทดเพื่อใช้ในการทำนายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลแบบ เปิดด้านแคโทด
2. ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของพื้นที่ตัดขวางของช่องทางการ ไหลของแก๊สที่ขนาดของพื้นที่ตัดขวางขนาดต่างๆ ต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ฟิวเอ็ลแบบเปิดด้านแคโทด

3. ศึกษาผลของอัตราการป้อนอากาศ ความชื้นของอากาศ และอุณหภูมิเซลล์ ต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวีเอ็มแบบเปิดด้านแคโทด

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงฟิวีเอ็มแบบเปิดด้านแคโทดและได้ค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่จะใช้ในการปรับปรุงช่องทางการไหลของแก๊สฝั่งแคโทดในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวีเอ็มแบบเปิดด้านแคโทด

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ
2. พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
3. จำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวีเอ็มแบบเปิดด้านแคโทดที่อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้าง 0.8 และ 1.25 ที่ขนาดของพื้นที่ตัดขวางเท่ากับ 2 5 และ 8 ตารางมิลลิเมตร ด้วยโปรแกรม Fluent[®]
4. เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองกับผลที่ได้จากการทดลองจริงจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทำการปรับปรุงแบบจำลองเพื่อให้ผลจากการจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลองจริง
5. จำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวีเอ็มแบบเปิดด้านแคโทดด้วยแบบจำลองที่ได้ทำการปรับปรุงแล้วเพื่อศึกษาผลของอัตราการป้อนอากาศ ความชื้นและอุณหภูมิของเซลล์ต่อสมรรถนะของเซลล์
6. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์แปลงรูปพลังงานโดยจะแปลงพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงผ่านปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงทั่วไปที่มีหลายขั้นตอน พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าเนื่องจากมีขั้นตอนเพียงขั้นตอนเดียว ทั้งนี้เซลล์เชื้อเพลิงมีความคล้ายคลึงกับแบตเตอรี่เนื่องจากมีอิเล็กโทรไลต์ขั้วไฟฟ้าบวกและลบเป็นส่วนประกอบหลัก รวมทั้งผลิตไฟฟ้าผ่านกระบวนการเคมีไฟฟ้าเหมือนกัน แต่เซลล์เชื้อเพลิงมีความแตกต่างจากแบตเตอรี่ตรงที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีการป้อนเชื้อเพลิง ตรงกันข้ามกับแบตเตอรี่ที่จะผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงที่ถูกบรรจุอยู่ในแบตเตอรี่เท่านั้น

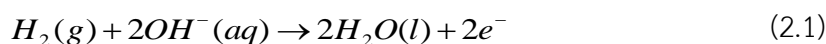
2.2 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงสามารถแบ่งประเภทได้หลากหลายแบบ เช่น ชนิดของสารตั้งต้น ชนิดของอิเล็กโทรไลต์ หรือ อุณหภูมิการทำงาน แต่ที่นิยมคือแบ่งตามชนิดของอิเล็กโทรไลต์ โดยสามารถแบ่งได้ดังนี้ [2, 3]

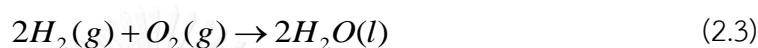
1. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ (Alkaline fuel cells, AFCs)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นอิเล็กโทรไลต์โดยจะถูกเก็บไว้ในเมทริกซ์ที่มักจะใช้เป็นแร่ใยหิน (Asbestos) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้หลากหลาย เช่น นิกเกิล เงิน โลหะออกไซด์ หรือโลหะมีตระกูล ช่วงอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงอยู่ที่ 50 – 200 เซลเซียส โดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีข้อดี คือ มีประสิทธิภาพการทำงานสูงเนื่องจาก สามารถเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็ว แต่มีข้อเสียที่มีความทนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์

(CO) ต่ำ จึงจำเป็นต้องใช้สารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์สูง ปฏิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ แสดงดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

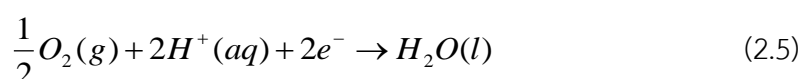


และปฏิกิริยารวมแสดงดังสมการที่ 2.3

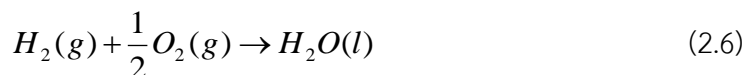


2. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสเฟอริก (Phosphoric acid fuel cells, PAFCs)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสเฟอริก เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้กรดฟอสเฟอริกเข้มข้น (H_3PO_4) เป็นอิเล็กโทรไลต์โดยจะถูกเก็บไว้ในเมทริกซ์ที่มักจะใช้เป็นซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะใช้เป็นแพลทินัม ช่วงอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงอยู่ที่ 150 – 200 เซลเซียส โดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีข้อดี คือ สามารถทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีทำให้สามารถใช้สารตั้งต้นได้หลากหลายชนิด และน้ำที่เกิดขึ้นสามารถนำกลับไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าร่วมได้ แต่มีข้อเสียคือเซลล์เชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก และมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น ปฏิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ แสดงดังสมการที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ

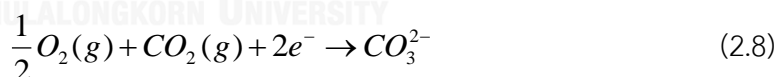
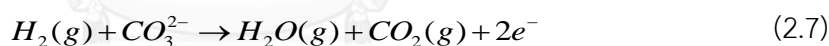


และปฏิกิริยารวมแสดงดังสมการที่ 2.6

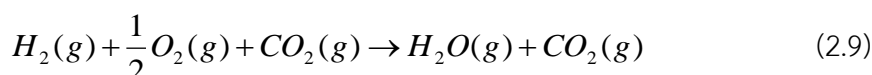


3. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอม (Molten carbonate fuel cells, MCFCs)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอม (MCFCs) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้เกลือคาร์บอเนตของโลหะแอลคาไลด์ เช่น Li Na หรือ K โดยจะถูกเก็บไว้ในเมทริกที่เป็นเซรามิกส์ของ $LiAlO_2$ ช่วงอุณหภูมิการทำงาน of เซลล์เชื้อเพลิงอยู่ที่ 600 – 700 เซลเซียส และเนื่องจากช่วงอุณหภูมิการทำงานที่สูงจึงไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะมีตระกูล และนอกจากนี้ยังสามารถใช้สารตั้งต้นได้หลายชนิด ซึ่งเป็นข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ แต่ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ คือ ใช้เวลาในการเริ่มต้นในการทำงานนาน และอาจจะมีการเสียหายของส่วนประกอบเนื่องจากอุณหภูมิที่สูง ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ แสดงดังสมการที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ

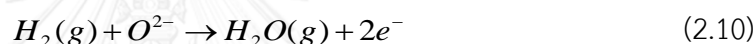


และปฏิกิริยารวมแสดงดังสมการที่ 2.9

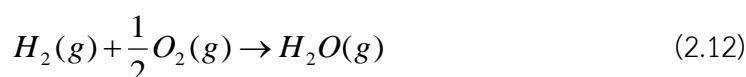


4. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide fuel cells, SOFCs)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (SOFCs) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ของแข็งที่เป็นออกไซด์ของโลหะที่ไม่มีรูพรุนซึ่งมักจะใช้เป็น อิตเทรียสเตบิลไลซ์เซอร์โคเนีย (Y_2O_3 -stabilized ZrO_2) ช่วงอุณหภูมิการทำงาน of เซลล์เชื้อเพลิงอยู่ที่ 800 – 1000 เซลเซียส ด้วยช่วงอุณหภูมิการทำงานที่สูงทำให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีข้อดี คือ มีเสถียรภาพสูง ไม่ต้องการตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะมีตระกูล และน้ำที่ได้จากปฏิกิริยาสามารถนำไปใช้ใน ระบบการผลิตไฟฟ้าร่วมได้ แต่ก็ทำให้มีข้อเสีย คือ ใช้เวลาในการเริ่มต้นในการทำงานนาน และอาจจะมีการเสียหายของส่วนประกอบเนื่องจากอุณหภูมิที่สูง ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ แสดงดังสมการที่ 2.10 และ 2.11 ตามลำดับ



และปฏิกิริยารวมแสดงดังสมการที่ 2.12

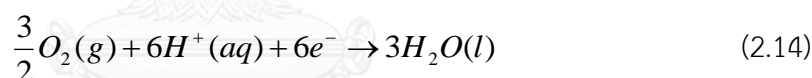
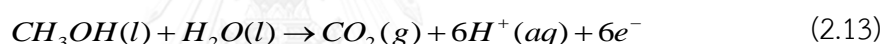


5. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Polymer electrolyte membrane fuel cells, PEMFCs)

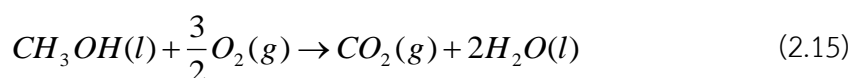
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้โพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติในการนำโปรตอนเป็นอิเล็กโทรไลต์ ช่วงอุณหภูมิในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงอยู่ที่ 30-100 เซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะใช้เป็นแพลทินัม โดยรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

6. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรง (Direct methanol fuel cells, DMFCs)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรง ซึ่งจะใช้อิเล็กโทรไลต์แบบเดียวกับ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแลกเปลี่ยนโปรตอน แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เนื่องจากสารตั้งต้นที่ใช้ คือ เมทานอล (CH_3OH) ซึ่งมีธาตุคาร์บอนเป็นส่วนประกอบจึงอาจทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ขึ้นในเซลล์ได้ ช่วงอุณหภูมิในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงอยู่ที่ 20-100 เซลเซียส มีข้อดีคือ สารตั้งต้นที่เป็นเมทานอลจะอยู่ในสถานะของเหลว จึงมีความปลอดภัยสูง มีค่าพลังงานต่อปริมาตรสูงกว่าเมื่อเทียบกับแก๊สไฮโดรเจน จัดเก็บและขนส่งได้ง่าย แต่จะมีข้อเสียคือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้ามากส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์ต่ำ ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ แสดงดังสมการที่ 2.13 และ 2.14 ตามลำดับ



และปฏิกิริยารวมแสดงดังสมการที่ 2.15



เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ มีการทำงานที่คล้ายคลึงกับจึงสรุปรายละเอียดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

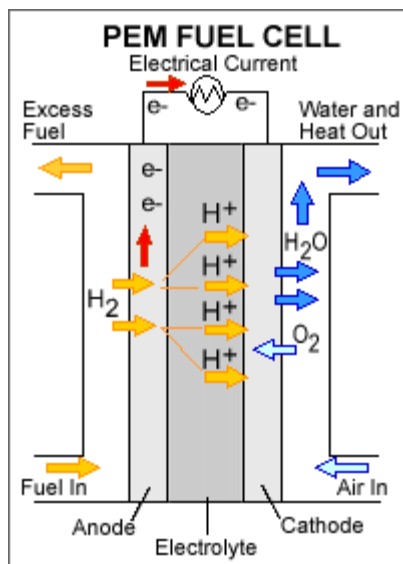
ตารางที่ 2.1 ชนิดและสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทต่างๆ [2, 4]

| ชนิดของเซลล์ เชื้อเพลิง | อิเล็กโทรไลต์ | ไอออนที่ เคลื่อนที่ | ชนิดของ เชื้อเพลิง | อุณหภูมิใน การใช้งาน (เซลเซียส) | ประสิทธิภาพ ทางไฟฟ้า (ร้อยละ) |
|-----------------------------|---|------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| แอลคาไลน์ | KOH | OH^- | H_2 | 50-200 | 64 |
| กรดฟอสฟอริก | H_3PO_4 | H^+ | H_2 | 150 – 200 | 42 |
| ออกไซด์ของแข็ง | Y_2O_3 -stabilized ZrO_2 | O^{2-} | H_2 หรือ CH_3 | 800-1000 | 40 |
| คาร์บอเนต หลอม | Li_2CO_3 , Na_2CO_3 หรือ K_2CO_3 | CO_3^{2-} | H_2 | 600-700 | 50 |
| เมทานอล โดยตรง | Perfluorosufonic acid membrane | H^+ | CH_3OH | 20-100 | 65 |
| เมมเบรนแลกเปลี่ยน โปรตอน | Perfluorosufonic acid membrane | H^+ | H_2 | 30-100 | 58 |

2.3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม)

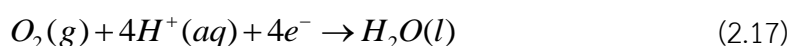
เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน เนื่องจากมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีช่วงอุณหภูมิในการทำงานของเซลล์มีค่าต่ำอยู่ที่ 30-100 เซลเซียส สามารถพัฒนาไปใช้กับอุปกรณ์ขนาดเล็กหรือรถยนต์ มีอายุการใช้งานนาน ใช้เวลาเริ่มต้นในการทำงานสั้น ประสิทธิภาพสูง แต่เนื่องจากต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแพลทินัม ทำให้มีราคาสูงและจำเป็นต้องใช้สารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์สูงเพราะตัวเร่งปฏิกิริยามีความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำ

2.4 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

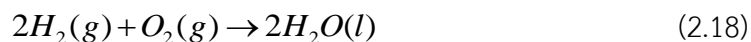


รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม [5]

หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มแสดงดังรูปที่ 2.2 กล่าวคือแก๊สไฮโดรเจนจะถูกป้อนเข้ามาทางฝั่งแอโนดและแพร่ผ่านชั้นการแพร่ของแก๊สไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแตกตัวเป็นโปรตอนและอิเล็กตรอน โดยโปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านโพลต์ไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของด้านแคโทดเพื่อเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่ถูกป้อนเข้ามาจากทางด้านแคโทด ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือไฟฟ้า น้ำและความร้อน โดยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ แสดงดังสมการที่ 2.16 และ 2.17 ตามลำดับ



และปฏิกิริยารวมแสดงดังสมการที่ 2.18



2.4 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์

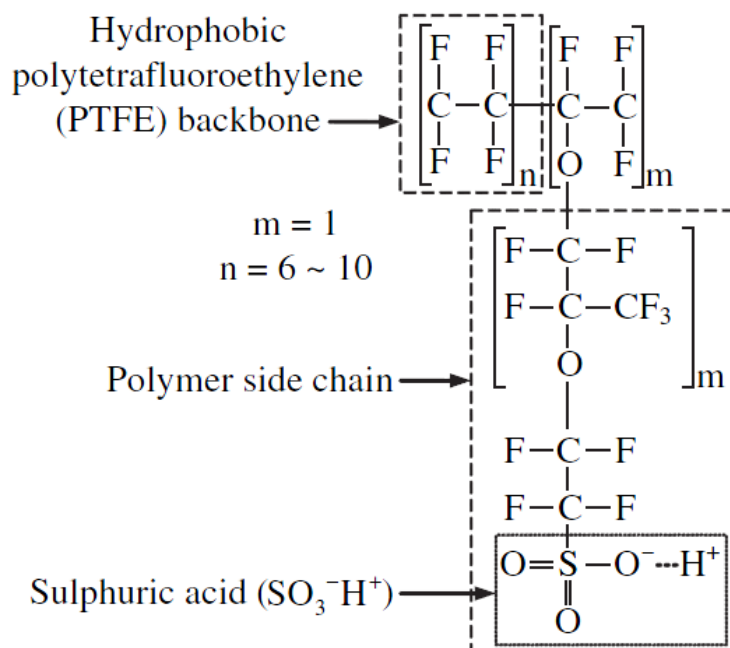
เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ชั้นประกอบเมมเบรนและขั้วไฟฟ้า (Membrane electrode assembly, MEA) และ แผ่นช่องทางการไหลของแก๊ส (Flow field plate)

2.4.1 ชั้นประกอบเมมเบรนและขั้วไฟฟ้า

ชั้นประกอบเมมเบรนและขั้วไฟฟ้าประกอบด้วยเมมเบรนที่ถูกประกบด้วยชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและชั้นการแพร่ของแก๊สทั้งด้านแอโนดและแคโทด โดยแต่ละส่วนประกอบมีรายละเอียด ดังนี้

1. เมมเบรน

เมมเบรนทำหน้าที่ส่งผ่านโปรตอนที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด นอกจากนี้ยังมีหน้าที่ป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเกิดการแพร่ไปยังด้านตรงข้ามและเกิดปฏิกิริยากันโดยตรง จึงทำให้เมมเบรนที่ดีจะต้องมีความสามารถในการนำโปรตอนได้ดี มีเสถียรภาพทางเคมีและทางกายภาพ เมมเบรนที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ในปัจจุบันเป็นโพลีเมอร์ผสมระหว่างเปอร์ฟลูออโรซัลโฟเนต (Perfluorosulfonate) และเทฟลอน (Tetrafluoroethylene, Teflon) ซึ่งมีชื่อทางการค้าว่า “เนฟลอนเมมเบรน” โครงสร้างของเนฟลอนเมมเบรนแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของเนฟลอนเมมเบรน [4]

2. ชั้นการแพร่ของแก๊ส

ชั้นการแพร่ของแก๊สเป็นชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยากับช่องทางการไหลของแก๊ส ชั้นการแพร่ของแก๊สมีหน้าที่เป็นทางผ่านของแก๊สเพื่อป้อนแก๊สไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังเป็นช่องทางพาน้ำออกจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังช่องทางการไหลของแก๊ส เป็นตัวนำอิเล็กตรอนจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังแผ่นสะสมประจุ เป็นตัวรองรับแรงทางกลและตัวส่งผ่านความร้อน

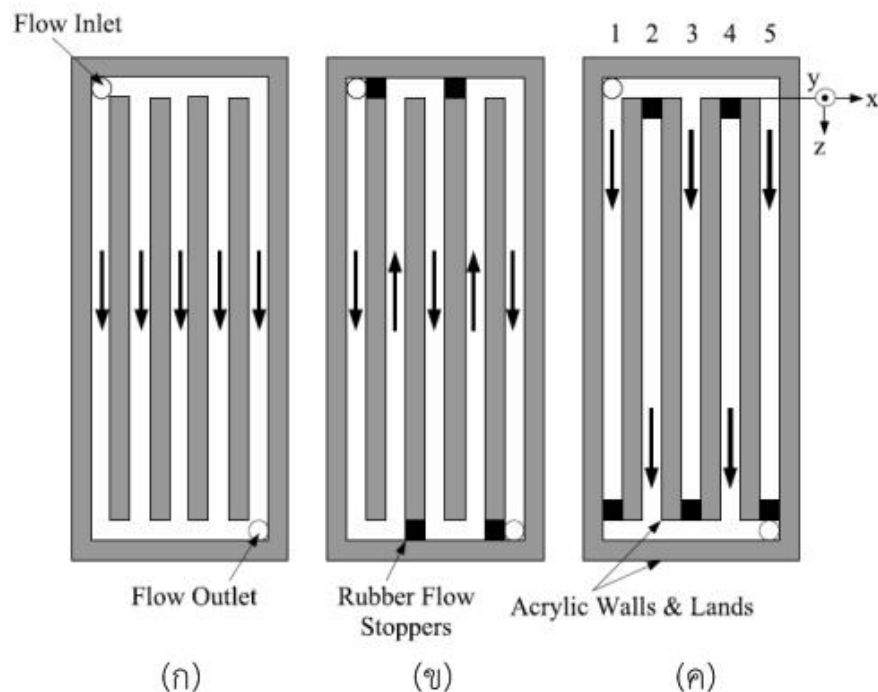
3. ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นชั้นที่อยู่ระหว่างเมมเบรนกับชั้นการแพร่ของแก๊ส เป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะปลดพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) ของปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous reaction) ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีจึงควรมีขนาดเล็กเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังควรมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ความสามารถในการ

การนำไฟฟ้าที่ดี และทนทานต่อภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่มักใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม คือ แพลทินัม

2.4.2. แผ่นช่องทางการไหลของแก๊ส

แผ่นช่องทางการไหลของแก๊สทำหน้าที่นำสารตั้งต้นเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังมีหน้าที่นำน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกจากเซลล์ แผ่นช่องทางการไหลที่ดีนั้นจะต้องมีการนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดี ไม่ยอมให้แก๊สซึมผ่านและมีความแข็งแรง ซึ่งการออกแบบรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สจะช่วยในการแพร่กระจายตัวของสารตั้งต้น รวมทั้งช่วยเรื่องความสามารถในการกำจัดน้ำออกจากเซลล์เชื้อเพลิง โดยการออกแบบแผ่นช่องทางการไหลของแก๊สมีหลายรูปแบบ เช่น แบบช่องขนานตรง (Straight parallel channel) แบบคดเคี้ยว (Serpentine flow field) หรือแบบช่องระหว่างนิ้ว (Interdigitated flow field) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 รูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊ส (ก) แบบช่องขนานตรง (ข) แบบคดเคี้ยว (ค) แบบช่องระหว่างนิ้ว [6]

2.5 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้านแคโทด

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้านแคโทดเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่พัฒนาต่อมาจากเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ล โดยมีความประสงค์เพื่อใช้ออกซิเจนจากบรรยากาศเป็นสารตั้งต้นโดยตรง โดยการป้อนอากาศเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงเกิดได้ 2 รูปแบบคือ การพาแบบธรรมชาติ และการพาแบบบังคับ โดยการพาแบบธรรมชาตินั้นด้านแคโทดจะเปิดสู่สิ่งแวดล้อมโดยตรงเพียงเท่านั้น แต่การพาแบบบังคับนั้นจะใช้พัดลมในการป้อนอากาศเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้เกิดการแพร่ของออกซิเจน โดยข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้านแคโทดคือประหยัดค่าใช้จ่ายและขนาดของระบบเซลล์เชื้อเพลิงเล็กงทำให้สามารถพัฒนาไปเป็นอุปกรณ์เคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แต่มีข้อเสียคือการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของออกซิเจนซึ่งจะส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง



รูปที่ 2.4 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้านแคโทดขนาด 1 กิโลวัตต์ [7]

2.6 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถบอกได้จากกราฟโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิง โดยกราฟโพลาริเซชันเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มตามทฤษฎีเมื่อวงจรเปิด (OCV) จะมีค่าเท่ากับ 1.23 โวลต์เมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงไฮโดรเจน แต่ในการใช้งานจริงเมื่อมีการดึงกระแสไฟฟ้าจะเกิดการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ได้แก่ การสูญเสียเนื่องจากการปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้ (Irreversible loss) การสูญเสียจากการแพร่ผ่านเมมเบรนของแก๊สเชื้อเพลิง (Fuel crossover) การสูญเสียจากโพลาริเซชันของปฏิกิริยา (Activation polarization loss) การสูญเสียจากความต้านทานไฟฟ้าหรือการสูญเสียโอห์มมิก (Ohmic loss) และการสูญเสียจากโพลาริเซชันของความเข้มข้น (Concentration polarization loss) [2, 3]

2.6.1 การสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาริเซชันของปฏิกิริยา

การสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาริเซชันของปฏิกิริยา เกิดจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าจะเกิดทั้งด้านแคโทดและแอโนด โดยค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาริเซชันสามารถคำนวณได้จากพจน์ที่ 1 และ 2 ของสมการ Butler-Volmer ดังสมการที่ 2.19 และ 2.20

$$\eta_{act,c} = \frac{RT}{\alpha_c nF} \ln \left(\frac{i}{i_{0,c}} \right) \quad (2.19)$$

$$\eta_{act,a} = \frac{RT}{\alpha_a nF} \ln \left(\frac{i}{i_{0,a}} \right) \quad (2.20)$$

เมื่อ $\eta_{act,c}$ คือ ค่าโพลาริเซชันของปฏิกิริยาฝั่งแคโทด

$\eta_{act,a}$ คือ ค่าโพลาริเซชันของปฏิกิริยาฝั่งแอโนด

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส

T คือ อุณหภูมิ

| | |
|------------|--|
| α_c | คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนประจุของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของด้านแคโทด |
| α_a | คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนประจุของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของด้านแอโนด |
| n | คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า |
| F | คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ |
| i | คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า |
| $i_{0,c}$ | คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนของด้านแคโทด |
| $i_{0,a}$ | คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนของด้านแอโนด |

ดังนั้นค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาริเซชันของปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิง จะเท่ากับ

$$\eta_{act} = \eta_{act,c} + \eta_{act,a} = \frac{RT}{\alpha_c n F} \ln \left(\frac{i}{i_{0,c}} \right) + \frac{RT}{\alpha_a n F} \ln \left(\frac{i}{i_{0,a}} \right) \quad (2.21)$$

แต่เนื่องจากปฏิกิริยาทางด้านแอโนดเกิดได้รวดเร็วกว่าด้านแคโทดมาก ทำให้มีค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าน้อยกว่ามาก จึงสามารถตัดออกจากสมการได้ ดังนั้นสมการที่ 2.21 จะลดรูปเป็นสมการที่ 2.22

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha_c n F} \ln \left(\frac{i}{i_{0,c}} \right) \quad (2.22)$$

เมื่อ η_{act} คือค่าโพลาริเซชันของปฏิกิริยาทั้งหมดของเซลล์เชื้อเพลิง

2.6.2 การสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากความต้านทานหรือการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าโอห์มมิก

การสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากความต้านทานหรือการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าโอห์มมิก เกิดจากความต้านทานในการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเมมเบรน และความต้านทานในการ

เคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านส่วนประกอบต่างๆที่มีหน้าที่ในการนำไฟฟ้า โดยค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากความต้านทานสามารถคำนวณได้จากกฎของโอห์มดังสมการที่ 2.23

$$\eta_{ohm} = iR_{tot} \quad (2.23)$$

เมื่อ η_{ohm} คือ ค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าโอห์มมิก
 R_{tot} คือ ความต้านทานรวมของเซลล์เชื้อเพลิง

2.6.3 การสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาริเซชันของความเข้มข้น

การสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาริเซชันของความเข้มข้น เกิดขึ้นเมื่อมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงทำให้มีการใช้แก๊สเชื้อเพลิงอย่างรวดเร็วและแก๊สเชื้อเพลิงไม่สามารถแพร่มาทำปฏิกิริยาที่ผิวของขั้วไฟฟ้าได้ทัน ทำให้เกิดเป็นความแตกต่างของความเข้มข้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า โดยค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาริเซชันของความเข้มข้นสามารถคำนวณได้จากสมการของเนิร์นสต์ดังสมการที่ 2.24

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{C_B}{C_S}\right) \quad (2.24)$$

และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัดดังสมการที่ 2.25

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{i_L}{i_L - i}\right) \quad (2.25)$$

เมื่อ η_{conc} คือ ค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาริเซชันของความเข้มข้น
 C_B คือ ความเข้มข้นของแก๊สเชื้อเพลิงที่อยู่ห่างจากพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า
 C_S คือ ความเข้มข้นของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผิวของขั้วไฟฟ้า

i_L คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัด (limiting current density) ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็วมากจนแก๊สเชื้อเพลิงที่ผิวของขั้วไฟฟ้าถูกใช้จนหมด ($C_s=0$)

2.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม

ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (finite volume method) ในการแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ของการไหลทั้งการแพร่ (diffusion) และการพา (convection) สามารถแสดงเป็นสมการควบคุมพื้นฐานในรูปแบบทั่วไปของตัวแปร ϕ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{\text{Transient Term}} + \underbrace{\frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y}}_{\text{Convection Term}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y}\right)}_{\text{Diffusion Terms}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{Source Term}} \quad (2.26)$$

สมการข้างต้นเป็นสมการอนุพันธ์พื้นฐานที่จะนำมาแก้สมการ พจน์ทางด้านซ้ายประกอบด้วยพจน์แรกคือ พจน์ที่บอกถึงความเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของของไหลตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป และ พจน์ที่ 2 คือพจน์ของการพา (Convection term) ตามแนวแกน x และแนวแกน y ส่วนพจน์แรกทางด้านขวา คือ พจน์ของการแพร่ (Diffusion term) ตามแนวแกน x และ y และ พจน์ที่ 2 คือพจน์อื่นๆ (Source term) ซึ่งระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม จะเป็นการเปลี่ยนรูปสมการอนุพันธ์ให้เป็นสมการพีชคณิต (Algebraic equation) เพื่อให้คำนวณได้ง่ายขึ้น เรียกวิธีการนี้ว่า การ Discretization แล้วจึงทำการอินทิเกรตตลอดปริมาตรควบคุม (Control volume, CV) ได้เป็น

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) dV + \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} (\rho u\phi) dV + \int_{CV} \frac{\partial}{\partial y} (\rho v\phi) dV = \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x} \right) dV + \int_{CV} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} \right) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (2.27)$$

ในกรณีของการไหลแบบภาวะคงตัว 2 มิติ สมการจะลดรูปลงเหลือ

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} (\rho u\phi) dV + \int_{CV} \frac{\partial}{\partial y} (\rho v\phi) dV = \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x} \right) dV + \int_{CV} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} \right) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (2.28)$$

จากนั้นทำการพิจารณาที่ละพจน์ของสมการอินทิเกรต จะได้เทอมของการพา คือ

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) dV = (\rho u A)_e \phi_e - (\rho u A)_w \phi_w = F_e \phi_e - F_w \phi_w \quad (2.29)$$

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial y} (\rho u \phi) dV = (\rho u A)_n \phi_n - (\rho u A)_s \phi_s = F_n \phi_n - F_s \phi_s \quad (2.30)$$

เทอมของการแพร่กระจาย คือ

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dV = \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_w = D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W) \quad (2.31)$$

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dV = \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} A \right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} A \right)_w = D_n (\phi_N - \phi_P) - D_s (\phi_P - \phi_S) \quad (2.32)$$

และพจน์อื่นๆ (Source term) คือ

$$\int_{CV} S_\phi dV = S_\phi V \quad (2.33)$$

เมื่อ F คือ สัมประสิทธิ์ของการพา มีค่าเป็น $\rho u A$ และ D คือสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย มีค่าเป็น $\frac{\Gamma A}{\delta}$ โดยค่าของตัวแปร ϕ บนผิวปริมาตรควบคุมสามารถหาได้จากการประมาณค่าด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical scheme) ในการแก้ปัญหาคั้งทีจะใช้วิธีการดังต่อไปนี้ Upwind differencing scheme, Power-law scheme, Hybrid differencing scheme, Quick scheme โดยรายละเอียดของแต่ละวิธี Discretization มีดังต่อไปนี้

1. Central Differencing Scheme

วิธีการนี้จะใช้เทคนิคการประมาณค่าเข้าช่วย โดยเฉลี่ยจากค่า ϕ ที่จุดหลักที่อยู่ข้างเคียง ดังนั้นค่า ϕ ที่ Interface จะเป็นดังต่อไปนี้

$$\phi_e = \frac{\phi_P + \phi_E}{2} \quad (2.34)$$

$$\phi_w = \frac{\phi_W + \phi_P}{2} \quad (2.35)$$

โดยค่าของ ϕ_n และ ϕ_s ก็จะหาได้ในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นสามารถเขียนสมการพีชคณิตของสมการทั่วไปได้เป็น

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + S_\phi V \quad (2.36)$$

เมื่อ $a_N = D_n - \frac{F_n}{2}$

$$a_S = D_s + \frac{F_s}{2}$$

$$a_E = D_e - \frac{F_e}{2}$$

$$a_W = D_w + \frac{F_w}{2}$$

$$a_P = a_N + a_S + a_E + a_W + (F_n - F_s + F_e - F_w)$$

จากค่าสัมประสิทธิ์ข้างต้น จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์มีโอกาสที่จะติดลบได้ ซึ่งถ้ากรณีนี้เกิดขึ้นจะส่งผลให้ผลเฉลยจะไม่ลู่เข้าคำตอบ

2. First order upwind differencing scheme

เป็นวิธีเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดจากการสมมติว่าค่าของการพาที่ Interface เกิดจากค่าเฉลี่ยระหว่างค่าที่สองด้านของ Interface (Central differencing scheme) โดยการคิดว่าเทอมของการแพร่กระจายไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนในเทอมของการพาจะคำนวณโดยสมมติฐานที่กล่าวว่า ค่าของตัวแปร ϕ ที่ Interface มีค่าเท่ากับค่าที่ grid point ของผิวปริมาตรควบคุมด้านต้นกระแสน้ำไหล (Upstream) นั่นคือ

$$\phi_e = \phi_p \quad \text{เมื่อ} \quad F_e > 0 \quad (2.37)$$

$$\phi_e = \phi_E \quad \text{เมื่อ} \quad F_e < 0 \quad (2.38)$$

$$\phi_w = \phi_W \quad \text{เมื่อ} \quad F_w > 0 \quad (2.39)$$

$$\phi_w = \phi_p \quad \text{เมื่อ} \quad F_w < 0 \quad (2.40)$$

โดยค่าของ ϕ_n และ ϕ_s ก็จะหาได้ในลักษณะเดียวกัน ดังนั้น สามารถเขียนสมการพีชคณิตของสมการทั่วไปได้เป็น

$$a_p \phi_p = a_w \phi_w + a_E \phi_E + a_s \phi_s + a_N \phi_N + S_\phi V \quad (2.41)$$

เมื่อ $a_N = \max[-F_n, 0]$ ($\max[A, B]$ คือ ค่าสูงสุดที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าของ A กับ B)

$$a_s = \max[F_s, 0]$$

$$a_E = \max[-F_e, 0]$$

$$a_w = \max[F_w, 0]$$

$$a_p = a_N + a_s + a_E + a_w + (F_n - F_s + F_e - F_w)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ จะไม่สามารถมีค่าเป็นลบได้ ทำให้ผลเฉลยที่ได้มีค่าเป็นไปตามลักษณะกายภาพที่เกิดขึ้นจริง และทำให้สามารถแก้ปัญหาต่างๆ ได้โดยที่ผลเฉลยอยู่เข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง

3. Power-law differencing scheme

วิธีนี้เป็นวิธีที่ให้ค่าผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงสำหรับปัญหาหนึ่งมิติมากกว่าวิธีการอื่นๆ (พัฒนามาจากคำตอบเชิงวิเคราะห์ของปัญหาหนึ่งมิติ) เป็นการประมาณแบบพอลิโนเมียล สามารถเขียนสมการพีชคณิตได้เป็น

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + S_\phi V \quad (2.42)$$

เมื่อ

$$a_N = D_n \max \left[0, (1 - 0.1 |F_n / D_n|)^5 \right] + \max [-F_n, 0]$$

$$a_S = D_s \max \left[0, (1 - 0.1 |F_s / D_s|)^5 \right] + \max [F_s, 0]$$

$$a_E = D_e \max \left[0, (1 - 0.1 |F_e / D_e|)^5 \right] + \max [-F_e, 0]$$

$$a_W = D_w \max \left[0, (1 - 0.1 |F_w / D_w|)^5 \right] + \max [F_w, 0]$$

$$a_P = a_N + a_S + a_E + a_W + (F_n - F_s + F_e - F_w)$$

4. Hybrid differencing scheme

วิธีนี้เป็นการรวมข้อดีของวิธี Central differencing scheme และ First order upwind differencing scheme ไว้ด้วยกัน โดยเลือกใช้ค่าจาก Central differencing scheme ตรงช่วงที่มีความถูกต้อง (เป็น second order scheme จึงมีความถูกต้องสูง) และเปลี่ยนมาใช้ค่าจาก First order upwind differencing (เป็น first order scheme จึงมีความ stable สูง) ตรงที่ Central differencing scheme ทำนายค่าได้ไม่ถูกต้อง ($Pe = F/D > 2$ และ $Pe < -2$) เขียนสมการพีชคณิตได้เป็น

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + S_\phi V \quad (2.43)$$

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ} \quad a_N &= \max \left[-F_n, D_n - \frac{F_n}{2}, 0 \right] \\
 a_S &= \max \left[F_s, D_s + \frac{F_s}{2}, 0 \right] \\
 a_E &= \max \left[-F_e, D_e - \frac{F_e}{2}, 0 \right] \\
 a_W &= \max \left[F_w, D_w + \frac{F_w}{2}, 0 \right] \\
 a_P &= a_N + a_S + a_E + a_W + (F_n - F_s + F_e - F_w)
 \end{aligned}$$

2.7.1 กระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE

ในการแก้สมการความต่อเนื่อง ค่าความดันและความเร็วในผลเฉลยของสมการอนุพันธ์โมเมนตัมและสมการอนุพันธ์มวลอาจจะไม่สอดคล้องกัน เพื่อให้ได้ค่าที่สอดคล้องกัน กระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation) จึงถูกนำมาใช้แก้ปัญหาคาร์ไหล คือ สมมติว่าค่าความดันและความเร็วของของเขตปัญหาที่สนใจ แล้วคำนวณค่าความเร็วในสมการอนุพันธ์โมเมนตัม เพื่อนำค่าความเร็วที่ได้ไปคำนวณเพื่อหาค่าความดันอีกครั้งในสมการอนุพันธ์มวล โดยใช้ Pressure-correction method ช่วยในการคำนวณเพื่อให้ได้ค่าความดันที่ถูกต้อง ซึ่งค่า Pressure-correction method จะถูกนำกลับมาคำนวณหาค่าความเร็ว และทำซ้ำจนกระทั่งได้ผลเฉลยเข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ทำให้ได้ค่าความดันและความเร็วที่มีความสัมพันธ์กันไปตามการอนุพันธ์มวลและโมเมนตัม อย่างไรก็ตาม ในการคำนวณที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงอาจจะปรากฏภาวะการคำนวณลู่ออกเข้าสู่คำตอบที่เร็วเกินไป จนส่งผลให้คำตอบไม่เกิดการลู่ออก (Diverge) ได้ เพื่อป้องกันไม่ให้คำตอบเปลี่ยนแปลงค่าที่ได้จากการคำนวณเร็วเกินไป อาจใส่ค่า Under-relaxation factor เข้าไปเพื่อชะลอการเปลี่ยนแปลงคำตอบ โดยจะมีค่าตั้งแต่ศูนย์ถึงหนึ่ง สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการดังนี้

$$\phi = \phi_{old} + \alpha \Delta \phi \quad (2.44)$$

เมื่อ ϕ_{old} คือ ตัวแปรจากการคำนวณในครั้งก่อน
 α คือ Under-relaxation factor (มีค่า $0 \leq \alpha \leq 1$)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wang และคณะ [8] ได้พัฒนาแบบจำลอง 3 มิติของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่รวมของช่องทางการไหลของแก๊สต่อพื้นที่การเกิดปฏิกิริยาทั้งหมดและอัตราการไหลของแก๊สทางด้านแคโทดต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่มีรูปแบบช่องทางการไหลแบบช่องขนานตรงและแบบช่องระหว่างนิ้ว พบว่าอัตราส่วนจะมีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงก็ต่อเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ความต่างศักย์ต่ำกว่า 0.7 โวลต์และจะมีผลมากขึ้นเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ความต่างศักย์ต่ำลง โดยสำหรับรูปแบบช่องทางการไหลแบบช่องขนานตรงเมื่ออัตราส่วนเพิ่มขึ้นจะเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ส่วนรูปแบบช่องทางการไหลแบบช่องระหว่างนิ้ว อัตราส่วนจะมีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงน้อยมาก นอกจากนี้เมื่ออัตราการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้นสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ Wang และคณะ [9] ยังศึกษาผลของการออกแบบช่องทางการไหลของแก๊ส คือ อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของพื้นที่ตัดขวางของช่องทางการไหลของแก๊สที่ค่าความกว้างคงที่ และขนาดของพื้นที่ตัดขวางของช่องทางการไหลของแก๊สต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่มีรูปแบบช่องทางการไหลแบบช่องขนานตรงและแบบช่องระหว่างนิ้ว พบว่าอัตราส่วนจะมีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงก็ต่อเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ความต่างศักย์ต่ำกว่า 0.7 โวลต์และจะมีผลมากขึ้นเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ความต่างศักย์ต่ำลง โดยสำหรับรูปแบบช่องทางการไหลแบบช่องขนานตรง เมื่ออัตราส่วนและขนาดของพื้นที่ตัดขวางลดลงจะเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ส่วนรูปแบบช่องทางการไหลแบบช่องระหว่างนิ้ว อัตราส่วนและขนาดของพื้นที่ตัดขวางจะมีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงน้อยมาก โดยเมื่ออัตราส่วนและขนาดของพื้นที่ตัดขวางเพิ่มขึ้นสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นแล้วลดลงในช่วงถัดมา ซึ่งรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้มีอัตราส่วนเท่ากับ 1.0 และมีขนาดพื้นที่ตัดขวางเท่ากับ 1 ตารางมิลลิเมตร

Maher และ Sadiq [10] ได้พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ 3 มิติแบบหลายภูมิภาค และอุณหภูมิไม่คงที่ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลแบบเปิดด้านแคโทดและแบบมีช่องทางการไหลของอากาศ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงทั้งสองแบบ และพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลแบบเปิดด้านแคโทดนั้นมีสมรรถนะสูงกว่าแบบมีช่องทางการไหลของอากาศ เนื่องจากการกระจายตัวของแก๊สออกซิเจนที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สม่ำเสมอมากกว่า ส่งผลให้การกระจายตัวของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอมากกว่า จึงไม่ทำให้เกิดจุดความร้อนที่จะทำให้เมมเบรนเกิดการแห้งที่ส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง

Kumar และ Kolar [11] ได้พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ 3 มิติแบบภูมิภาคเดียว อุณหภูมิไม่คงที่ และอยู่ในสภาวะคงตัว สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลแบบเปิดด้านแคโทด เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะที่ได้จากการออกแบบด้านแคโทด 2 แบบคือแบบปิดช่องทางการไหลกับเปิดช่องทางการไหล ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้านแคโทดที่เปิดช่องทางการไหลจะต่ำกว่าแบบปิดช่องทางการไหลในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำและปานกลางเนื่องจากมีหยดน้ำเกิดขึ้นในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้านี้ต่างกับแบบปิดช่องทางการไหลที่เกิดหยดน้ำเฉพาะช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ หลังจากนั้นในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสมรรถนะของเซลล์แบบเปิดช่องทางการไหลจะสูงกว่าแบบปิดช่องทางการไหล เนื่องจากแบบเปิดช่องทางการไหลจะมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัดสูงกว่า นอกจากนี้ Kumar และ Kolar [12] ยังได้ใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ 3 มิติแบบ 1 ภูมิภาค อุณหภูมิไม่คงที่ และอยู่ในสภาวะ คงตัว ศึกษาผลของมิติของช่องทางการไหลของแก๊สที่ความกว้าง ความยาว และความสูงต่างๆต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลแบบเปิดด้านแคโทด ซึ่งพบว่า การเพิ่มความยาวและความสูงจะเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลแบบเปิดด้านแคโทด ทั้งนี้ การเพิ่มความยาวของช่องทางการไหลของแก๊สจะเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจนถึงค่าความยาว 6 มิลลิเมตร แต่เมื่อเพิ่มความยาวจนถึง 10 มิลลิเมตรสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าหากความกว้างของพื้นที่ระหว่างช่องทางการไหลมีขนาดเล็กจะส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงมี สมรรถนะเพิ่มมากขึ้น

Wang และคณะ [13] ได้พัฒนาแบบจำลอง 3 มิติแบบ 2 ภูมิภาค ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่มีรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สแบบคดเคี้ยว เพื่อศึกษาผลของขนาดของช่องทางการไหลของแก๊สต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าขนาดของช่องทางการไหลของแก๊สจะมีผลต่อ

สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงก็ต่อเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ความต่างศักย์ต่ำกว่า 0.7 โวลต์และจะมีผลมากขึ้นเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ความต่างศักย์ต่ำลง โดยเมื่อขนาดของช่องทางการไหลรวมทั้งพื้นที่ระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สมีขนาดเล็กลงจะเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ แต่จะทำให้ความดันลดลงมากขึ้น

Manso และคณะ [14] ได้ใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ 3 มิติเพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของพื้นที่หน้าตัดช่องทางการไหลของแก๊สต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ที่มีรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สแบบคดเคี้ยว ซึ่งพบว่าอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดที่มีค่าน้อย (ความสูง น้อยกว่า ความกว้าง) จะมีการกระจายตัวของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ มีปริมาณของน้ำในเมมเบรนน้อยกว่าซึ่งทั้งหมดส่งผลให้สมรรถนะโดยรวมน้อยกว่าแบบที่มีอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดที่มีค่ามาก (ความสูงมากกว่า ความกว้าง) โดยแบบจำลองที่มีอัตราส่วนเท่ากับ 10/6 และ 12/5 เป็นแบบจำลองที่ดีที่สุด

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะทำการจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงเพียงด้านแคโทดเท่านั้น โดยส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงที่จะทำการจำลองประกอบด้วย ช่องทางการไหลของแก๊ส ชั้นการแพร่ของแก๊ส และชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสมการที่ใช้ในแบบจำลองประกอบไปด้วย สมการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum) สมการอนุรักษ์องค์ประกอบ (Conservation of species) และสมการอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า โดยมีสมมุติฐานในการสร้างแบบจำลองดังนี้

- แบบจำลอง 3 มิติ
- จำลองแบบ 1 ภูมิภาค
- จำลองที่สภาวะคงตัว
- จำลองที่อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงคงที่
- แก๊สขาเข้าเป็นแก๊สในอุดมคติ
- การไหลของแก๊สเป็นแบบราบเรียบ
- ขั้วอิเล็กโทรดแบบมีรูพรุนมีสมบัติสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น
- การสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาริเซชันของปฏิกิริยาจะพิจารณาที่ด้านแคโทดเท่านั้น
- ความเข้มข้นของโปรตอนมีมากเกินพอต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
- ความต้านทานไฟฟ้ารวมของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าคงที่

3.1.1 สมการอนุรักษ์มวล

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.1)$$

สำหรับการแพร่ของแก๊สและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นชั้นที่มีรูพรุน สมการอนุรักษ์มวลจะเป็น

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.2)$$

เมื่อ ε คือ ค่าความพรุน

ρ คือ ความหนาแน่นของแก๊ส (กิโลกรัมต่อตารางเมตร, kg/m^3)

\vec{v} คือ เวกเตอร์ความเร็วแก๊ส (เมตรต่อวินาที, m/s)

3.1.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{v}) + S_{mom} \quad (3.3)$$

สำหรับการแพร่ของแก๊สและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นชั้นที่มีรูพรุน สมการอนุรักษ์โมเมนตัมจะเป็น

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho \vec{v} \vec{v}) = -\varepsilon \nabla P + \nabla \cdot (\varepsilon \mu \nabla \vec{v}) + S_{mom} \quad (3.4)$$

เมื่อ P คือ ความดัน (พาสคาล, Pa)

μ คือ ค่าความหนืดของแก๊ส (กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที, $\text{kg/m}\cdot\text{s}$)

S_{mom} คือ พจน์เพิ่มเติมของสมการอนุรักษ์โมเมนตัม

สำหรับพจน์เพิ่มเติมของสมการโมเมนตัมนี้จะอธิบายการเกิดขึ้นของความดันลด โดยจะพิจารณาเฉพาะตัวกลางที่มีรูพรุนเท่านั้น ในกรณีการไหลแบบราบเรียบผ่านตัวกลางที่มีรูพรุน ความดันลดที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงกับความเร็วของของไหล ซึ่งจะเป็นไปตามกฎของดาร์ซี (Darcy's law)[11, 12, 15] โดยพจน์เพิ่มเติมแสดงดังสมการ

$$S_{mom} = -\frac{\mu \vec{v}}{\beta} \quad (3.5)$$

เมื่อ β คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ (ตารางเมตร, m^2)

3.1.3 สมการอนุรักษ์องค์ประกอบ

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}_i x_i) = \nabla \cdot (\rho D_i^{eff} \nabla x_i) + S_{s,i} \quad (3.6)$$

สำหรับชั้นการแพร่ของแก๊สและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นชั้นที่มีรูพรุน สมการอนุรักษ์องค์ประกอบจะเป็น

$$\nabla \cdot (\epsilon \rho \vec{v}_i x_i) = \nabla \cdot (\epsilon \rho D_i^{eff} \nabla x_i) + S_{s,i} \quad (3.7)$$

เมื่อ x_i คือ สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบ

D_i^{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบ (ตารางเมตรต่อวินาที, m^2/s)

$S_{s,i}$ คือ พจน์เพิ่มเติมของสมการอนุรักษ์องค์ประกอบ

โดยสัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบจะแปรผันกับอุณหภูมิ ความดันและค่าความพรุนของตัวกลาง แสดงดังสมการ

$$D_i^{eff} = \epsilon^{1.5} D_i^{ref} \left(\frac{P^{ref}}{P} \right) \left(\frac{T}{T^{ref}} \right)^{1.5} \quad (3.8)$$

เมื่อ D_i^{ref} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบที่สภาวะอ้างอิง (ตารางเมตรต่อวินาที, m^2/s)

P^{ref} คือ ความดันสภาวะอ้างอิง (พาสคาล, Pa)

T^{ref} คือ อุณหภูมิที่สภาวะอ้างอิง (เคลวิน, K)

สำหรับพจน์เพิ่มเติมของสมการอนุรักษ์องค์ประกอบจะพิจารณาเฉพาะชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้น เนื่องจากเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า โดยในแบบจำลองนี้จะพิจารณาเฉพาะแก๊สออกซิเจนและน้ำที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดเท่านั้นซึ่งแสดงดังสมการ[3, 15]

$$S_{s,O_2} = -\frac{M_{O_2}}{4F} i_c \quad (3.9)$$

$$S_{s,H_2O} = \frac{M_{H_2O}}{2F} i_c \quad (3.10)$$

- เมื่อ S_{s,O_2} คือ พจน์เพิ่มเติมสำหรับแก๊สออกซิเจน (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรวินาที, $\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$)
- S_{s,H_2O} คือ พจน์เพิ่มเติมสำหรับน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรวินาที, $\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$)
- M_{O_2} คือ มวลโมเลกุลของแก๊สออกซิเจน (กิโลกรัมต่อโมล, kg/mol)
- M_{H_2O} คือ มวลโมเลกุลของน้ำ (กิโลกรัมต่อโมล, kg/mol)
- F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (คูลอมต่อโมล, C/mol)
- i_c คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าท้องถิ่นของขั้วแคโทด (แอมแปร์ต่อลูกบาศก์เมตร, A/m^3)

3.1.4 สมการทางเคมีไฟฟ้า

สมการคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าท้องถิ่น สามารถคำนวณได้จากสมการ Butler-Volmer [2, 3] โดยแสดงดังสมการ

$$i_c = a i_{c,0} \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2}^{ref}} \right) \exp \left(\frac{\alpha_c F}{RT} \eta_{act,c} \right) \quad (3.11)$$

- เมื่อ a คือ สัดส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา (ต่อเมตร, m^{-1})
- $i_{c,0}$ คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยน (แอมแปร์ต่อตารางเมตร, A/m^2)

- C_{O_2} คือ ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน (กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร, kmol/m^3)
- $C_{O_2}^{ref}$ คือ ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่สภาวะอ้างอิง (กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร, kmol/m^3)
- α_c คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนประจุของด้านแคโทด
- $\eta_{act,c}$ คือ การสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาริเซชันของปฏิกิริยา (โวลต์, V)

โดยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ[3] โดยแสดงดังสมการ

$$i_{c,0} = i_{c,0}^{ref} \exp \left[-\frac{E_c}{RT} \left(1 - \frac{T}{T^{ref}} \right) \right] \quad (3.12)$$

- เมื่อ $i_{c,0}^{ref}$ คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนที่สภาวะอ้างอิง (แอมแปร์ต่อตารางเมตร, A/m^2)
- E_c คือ พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด (จูลต่อโมล, J/mol)

สมการหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย สามารถคำนวณได้โดยการอินทิเกรตค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าท้องถิ่นตลอดปริมาตรของขั้วตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วหารด้วยพื้นที่การเกิดปฏิกิริยาซึ่งในที่นี้คือพื้นที่ของขั้วตัวเร่งปฏิกิริยา[3, 15] แสดงได้ดังสมการ

$$I_{ave} = \frac{1}{A} \int_{V_c} i_c dV \quad (3.13)$$

- เมื่อ I_{ave} คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร, A/cm^2)
- A คือ ขนาดพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยา (ตารางเซนติเมตร, cm^2)
- V_c คือ ปริมาตรของขั้วตัวเร่งปฏิกิริยา (ลูกบาศก์เซนติเมตร, cm^3)

สมการหาค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าโอห์มมิก สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและค่าความต้านทานไฟฟ้ารวมของเซลล์เชื้อเพลิง แสดงดังสมการ

$$\eta_{ohm} = R_{cell} \cdot I_{ave} \quad (3.14)$$

เมื่อ η_{ohm} คือ การสูญเสียศักย์ไฟฟ้าโอห์มมิก
 R_{cell} คือ ความต้านทานไฟฟ้ารวมของเซลล์เชื้อเพลิง (โอห์ม-ตารางเซนติเมตร, $\Omega \cdot \text{cm}^2$)

สมการหาค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาไรเซชันของความเข้มข้น สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน 2 บริเวณ แสดงดังสมการ [16]

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{C_{O_2}^{bulk}}{C_{O_2}^{sur}} \right) \quad (3.15)$$

เมื่อ η_{conc} คือ การสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาไรเซชันของความเข้มข้น (โวลต์, V)
 $C_{O_2}^{bulk}$ คือ ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในช่องทางการไหลของแก๊ส (กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร, kmol/m^3)
 $C_{O_2}^{sur}$ คือ ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นการแพร่ของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร, kmol/m^3)

สมการหาค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง คำนวณได้จากสมการ

$$V_{cell} = V_{OCV} - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc} \quad (3.16)$$

เมื่อ V_{cell} คือ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง (โวลต์, V)

V_{OCV} คือ ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์เชื้อเพลิง (โวลต์, V)

3.2 การออกแบบช่องทางการไหลและการสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตในการคำนวณ

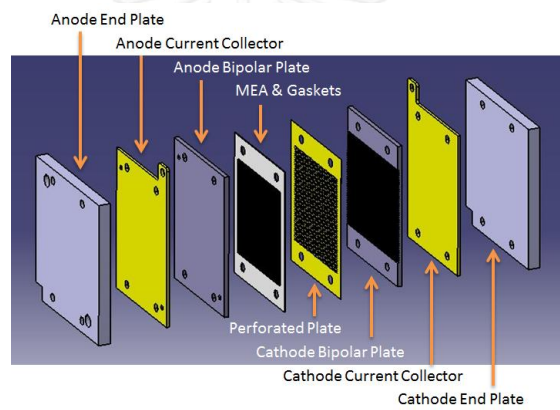
ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาตามงานวิจัยของสรวงรัตน์และอังคีร์ [17] โดยทำการออกแบบช่องทางการไหลของแก๊สด้วยการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนด้านสูงต่อด้านกว้าง รวมทั้งค่าพื้นที่ตัดขวางของช่องทางการไหลของแก๊ส โดยในการออกแบบจะได้รูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สทั้งหมด 6 รูปแบบแสดงดังตารางที่ 3.1 โดยทุกรูปแบบจะมีความยาวของช่องทางการไหล ความกว้าง ความยาวและความหนาของชั้นการแพร่ของแก๊สและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากันแสดงดังตารางที่ 3.2 ทั้งนี้ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มแบบเปิดด้านแคโทดที่ใช้ในการทดลองของสรวงรัตน์และอังคีร์แสดงดังรูปที่ 3.1 และการจัดอุปกรณ์ทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการออกแบบช่องทางการไหลของแก๊ส

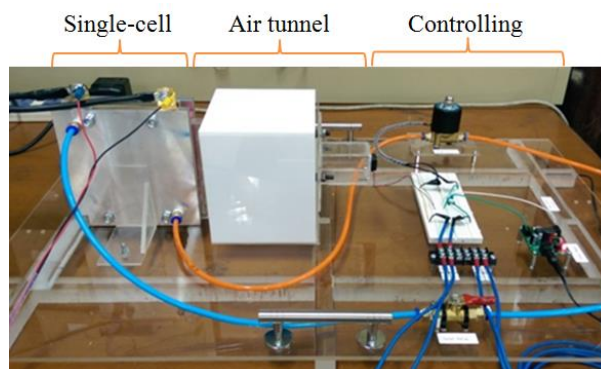
| แบบที่ | พื้นที่ตัดขวาง (มม ²) | อัตราส่วน สูง:กว้าง | กว้าง (มม) | สูง (มม) | ระยะห่าง (มม) | จำนวนช่อง ทางการ ไหล |
|--------|--------------------------------------|------------------------|---------------|-------------|------------------|----------------------------|
| 1 | 2.0 | 1.25 | 1.26 | 1.58 | 1.26 | 40 |
| 2 | | 0.8 | 1.58 | 1.26 | 0.94 | 40 |
| 3 | 5.0 | 1.25 | 2.00 | 2.50 | 2.00 | 25 |
| 4 | | 0.8 | 2.50 | 2.00 | 1.50 | 25 |
| 5 | 8.0 | 1.25 | 2.53 | 3.16 | 2.53 | 20 |
| 6 | | 0.8 | 3.16 | 2.53 | 1.90 | 20 |

ตารางที่ 3.2 ขนาดของแบบจำลองส่วนต่างๆ

| รายละเอียด | แกน | ค่า | หน่วย |
|----------------------|-----|------|-----------|
| ช่องทางการไหลของแก๊ส | | | |
| - ความยาว | x | 120 | มิลลิเมตร |
| ชั้นการแพร่ของแก๊ส | | | |
| - ความกว้าง | y | 100 | มิลลิเมตร |
| - ความยาว | x | 100 | มิลลิเมตร |
| - ความหนา | z | 0.41 | มิลลิเมตร |
| ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา | | | |
| - ความกว้าง | y | 100 | มิลลิเมตร |
| - ความยาว | x | 100 | มิลลิเมตร |
| - ความหนา | z | 0.01 | มิลลิเมตร |



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มแบบเปิดด้านแคโทด

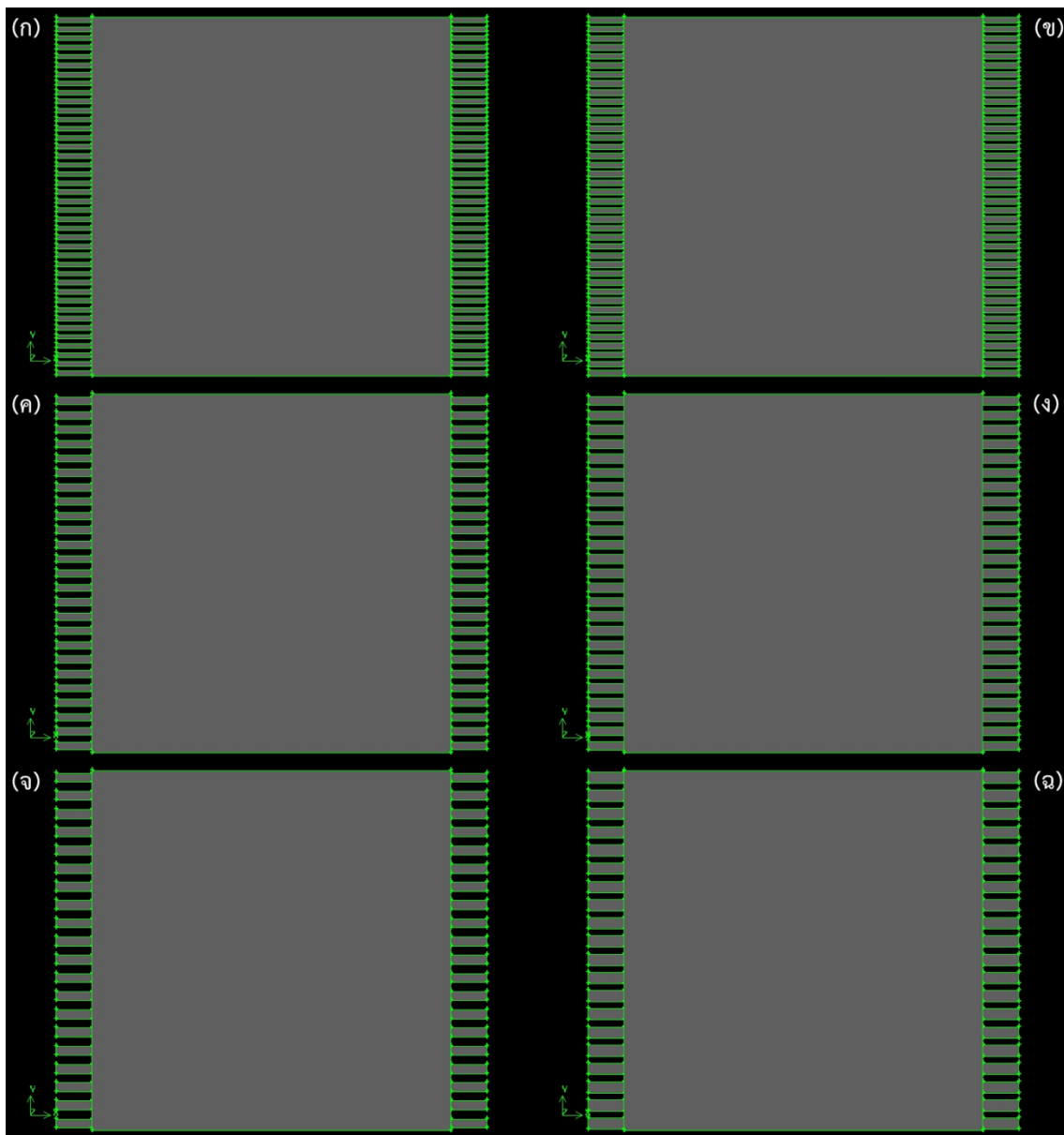


รูปที่ 3.2 การจัดอุปกรณ์ในการทดสอบ

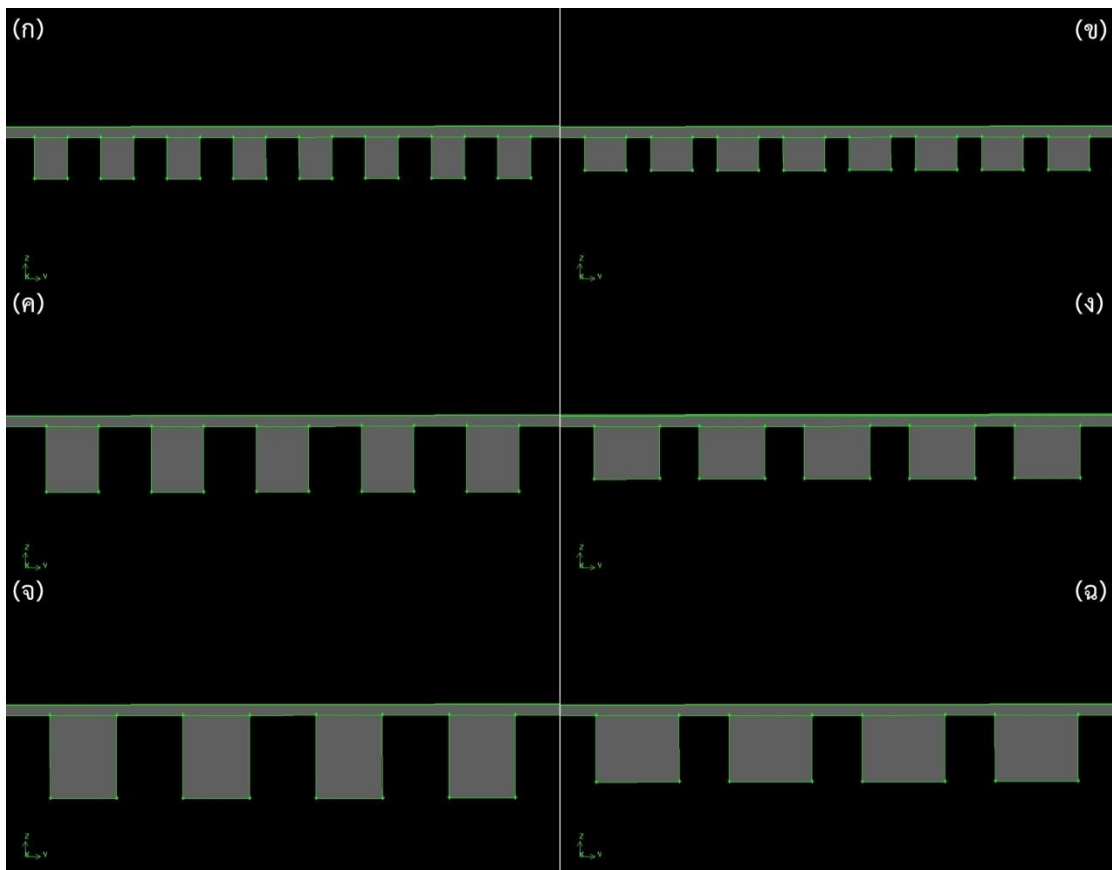
โดยแบบจำลองเชิงเลขาคณิตที่ใช้ในการคำนวณจะถูกสร้างและแบ่งพื้นที่การคำนวณด้วยโปรแกรม Gambit 2.2.30 ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และ 3.4 และทำการกำหนดชนิดของภาวะขอบดังนี้

1. พื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลของแก๊ส (ค่าแกน $X=0$) กำหนดเป็น สภาวะมวลแก๊สขาเข้า (Mass flow inlet)
2. พื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลของแก๊ส (ค่าแกน $X=120$) กำหนดเป็น สภาวะความดันขาออก (Pressure outlet)
3. พื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลของแก๊สที่อยู่ติดกับชั้นการแพร่ของแก๊ส กำหนดเป็น สภาวะขอบเขตภายใน (Interior)
4. พื้นที่หน้าตัดของชั้นการแพร่ของแก๊สที่อยู่ติดกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา กำหนดเป็น สภาวะขอบเขตภายใน (Interior)
5. สำหรับบริเวณอื่นๆนอกเหนือจากที่กล่าวข้างต้น กำหนดเป็น สภาวะขอบเขตกำแพง (Wall)

หลังจากนั้นจะนำแบบจำลองเชิงเรขาคณิตที่ได้ไปใช้ทำการจำลองในโปรแกรม ANSYS Fluent 6.3



รูปที่ 3.3 แบบจำลองเชิงเรขาคณิตช่องทางกรรไหลแบบต่างๆในระนาบ X-Y (ก) แบบที่ 1 (ข) แบบ
ที่ 2 (ค) แบบที่ 3 (ง) แบบที่ 4 (จ) แบบที่ 5 และ (ฉ) แบบที่ 6



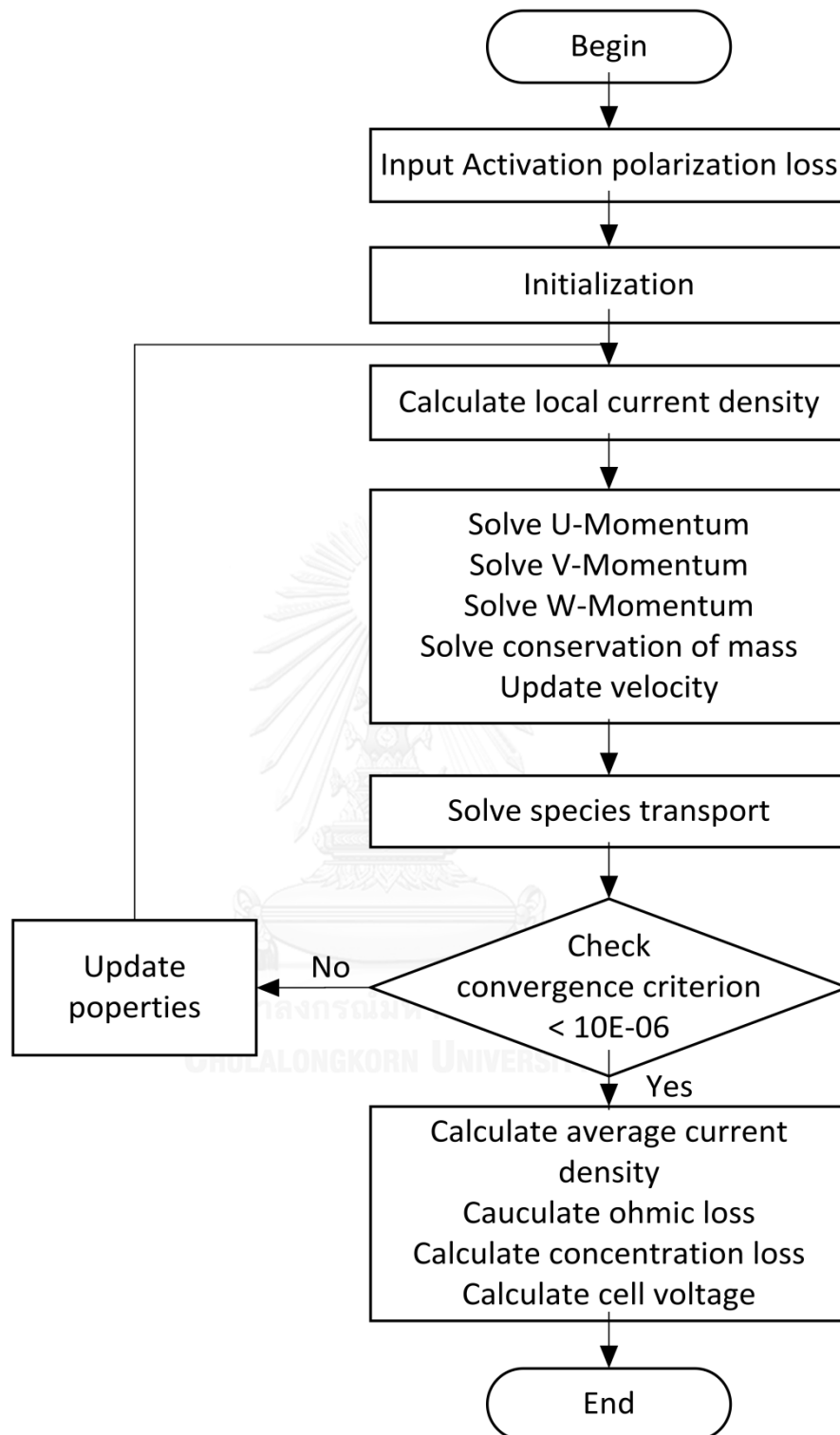
รูปที่ 3.4 แบบจำลองเชิงเรขาคณิตช่องทางการไหลแบบต่างๆในระนาบ Y-Z (ก) แบบที่ 1 (ข) แบบที่ 2 (ค) แบบที่ 3 (ง) แบบที่ 4 (จ) แบบที่ 5 และ (จ) แบบที่ 6

3.3. การจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent 6.3

สำหรับการจำลองด้วยโปรแกรม Fluent ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้เครื่องมือในการแก้สมการ (Solver) เป็น Pressure-Based แบบ Segregated และใช้ Numerical scheme เป็น First order upwind differencing scheme โดยขั้นตอนการทำการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.5 โดยเริ่มจากกำหนดค่าโพลารไรเซชันของปฏิกิริยาทั้งหมดของเซลล์เชื้อเพลิงที่จะใช้ในการคำนวณเช่นเดียวกับงานวิจัยของกรกนก หงษ์ทอง [18] หลังจากนั้นจึงทำการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรต่างๆ ที่จะใช้ในการคำนวณโดยในงานวิจัยนี้จะทำการกำหนดค่าอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง จากนั้นจึงเริ่มทำการคำนวณโดยเริ่มจากการคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าท้องถิ่นเพื่อนำไปใช้เป็นพจน์เพิ่มเติมในสมการอนุรักษ์องค์ประกอบ ทำการคำนวณในส่วนของสมการอนุรักษ์โมเมนตัมและสมการอนุรักษ์มวลในลำดับถัดไปโดยใช้กระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE ในการ

เชื่อมโยงผลลัพธ์จากทั้งสองสมการให้สอดคล้องกัน หลังจากนั้นจึงเป็นการคำนวณในส่วนของสมการอนุพันธ์องค์ประกอบ ซึ่งใน 1 รอบการคำนวณ (iteration) โปรแกรมจะทำการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้เทียบกับผลลัพธ์ของการคำนวณในรอบก่อนหน้านั้น ซึ่งหากพบว่าค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) ยังสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งในกรณีนี้เท่ากับ 10^{-6} โปรแกรมจะทำการคำนวณซ้ำต่อไปจนกว่าจะได้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าที่กำหนดไว้หรือจำนวนรอบการคำนวณเท่ากับจำนวนรอบสูงสุด (Max iteration) ที่ตั้งไว้ หลังจากที่ได้ผลลัพธ์จากการคำนวณแล้วในลำดับถัดไปจะเป็นการคำนวณในส่วน of ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าโอห์มมิก ค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาริเซชันของความเข้มข้น และค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในลำดับถัดไป





รูปที่ 3.5 ขั้นตอนในการทำการจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

ในงานวิจัยนี้จะถูกแบ่งเป็นสองส่วนโดยในส่วนแรกจะทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยเทียบกับผลการทดลองจริง และทำการศึกษาผลของการออกแบบช่องทางการไหลของแก๊สต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง โดยค่าตัวแปรต่างๆสำหรับแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 3.3 และสถานะในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะใช้สถานะที่ใกล้เคียงกับการทดลองจริง โดยแสดงดังตารางที่ 3.4 หลังจากนั้นจะเป็นการศึกษาในส่วนที่สองคือผลของปัจจัยต่างๆในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

ตารางที่ 3.3 ค่าตัวแปรสำหรับแบบจำลอง

| ตัวแปร | สัญลักษณ์ | ค่า | หน่วย |
|---|---------------------|------------------------|---------------------|
| ค่าความพรุนของชั้นการแพร่ของแก๊ส | ε_{GDL} | 0.5 | |
| ค่าความพรุนของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา | ε_{CL} | 0.5 | |
| ค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของชั้นการแพร่ของแก๊ส | β_{GDL} | 1.76×10^{-10} | m^2 |
| ค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา | β_{CL} | 1.76×10^{-11} | m^2 |
| ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของออกซิเจนที่สถานะอ้างอิง | $D_{O_2,0}$ | 2.20×10^{-5} | $m^2 s^{-1}$ |
| สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำที่สถานะอ้างอิง | $D_{H_2O,0}$ | 2.56×10^{-5} | $m^2 s^{-1}$ |
| ค่าสัดส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา | a | 4.50×10^7 | m^{-1} |
| ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนที่สถานะอ้างอิง | $i_{c,0}^{ref}$ | 2.80×10^{-3} | $A m^{-2}$ |
| ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ | E_c | 6.60×10^4 | $J mol^{-1}$ |
| ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่สถานะอ้างอิง | $C_{O_2}^{ref}$ | 25.629 | $mol m^{-3}$ |
| ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนประจุของด้านแคโทด | α_c | 1 | |
| ค่าคงที่ของฟาราเดย์ | F | 96485 | $C mol^{-1}$ |
| ค่าคงที่ของแก๊ส | R | 8.314 | $J mol^{-1} K^{-1}$ |
| ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด | V_{OCV} | 0.95 | V |
| ค่าความต้านทานรวม | R_{cell} | 0.9 | $\Omega \cdot cm^2$ |

ตารางที่ 3.4 สภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

| Parameter | Value | Unit |
|--|------------------------|--------------------|
| ค่าอุณหภูมิแก๊สขาเข้า | 298 | K |
| ค่าอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง | 348 | K |
| ค่าความดันของเซลล์เชื้อเพลิง | 101325 | Pa |
| ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของแก๊สขาเข้า | 70% | - |
| ค่าอัตราการไหลของมวลอากาศขาเข้าสำหรับพื้นที่ตัดขวางขนาด 2 ตร.มม. | 2.47×10^{-04} | kg s^{-1} |
| ค่าอัตราการไหลของมวลอากาศขาเข้าสำหรับพื้นที่ตัดขวางขนาด 5 ตร.มม. | 3.20×10^{-04} | kg s^{-1} |
| ค่าอัตราการไหลของมวลอากาศขาเข้าสำหรับพื้นที่ตัดขวางขนาด 8 ตร.มม. | 3.03×10^{-04} | kg s^{-1} |

จากตารางที่ 3.4 ค่าอัตราการไหลของมวลอากาศขาเข้าสำหรับพื้นที่ตัดขวางจะมีค่าแตกต่างกันในแต่ละขนาดเนื่องจากในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มแบบเปิดด้านแคโทดจะทำการป้อนอากาศด้วยพัดลมซึ่งในการทำงานของพัดลมจะสอดคล้องกับการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งการเซลล์เชื้อเพลิงมีสภาวะการทำงานแตกต่างกันพัดลมก็จะทำงานแตกต่างกันตามไปด้วย โดยจำนวนเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละรูปแบบช่องทางการไหลจะไม่เท่ากันแต่จะมีขนาดของเซลล์กัน โดยช่องทางการไหลแบบที่ 1-6 มีจำนวนเซลล์ดังนี้ 64,160 56,410 71,225 65,225 68,990 และ 68,740 เซลล์ตามลำดับ ซึ่งเป็นจำนวนเซลล์ที่ให้ผลการคำนวณโดยไม่ขึ้นกับจำนวนเซลล์ (Grid Independence) โดยมีจำนวนประมาณ 30,000 เซลล์เป็นต้นไป [19]

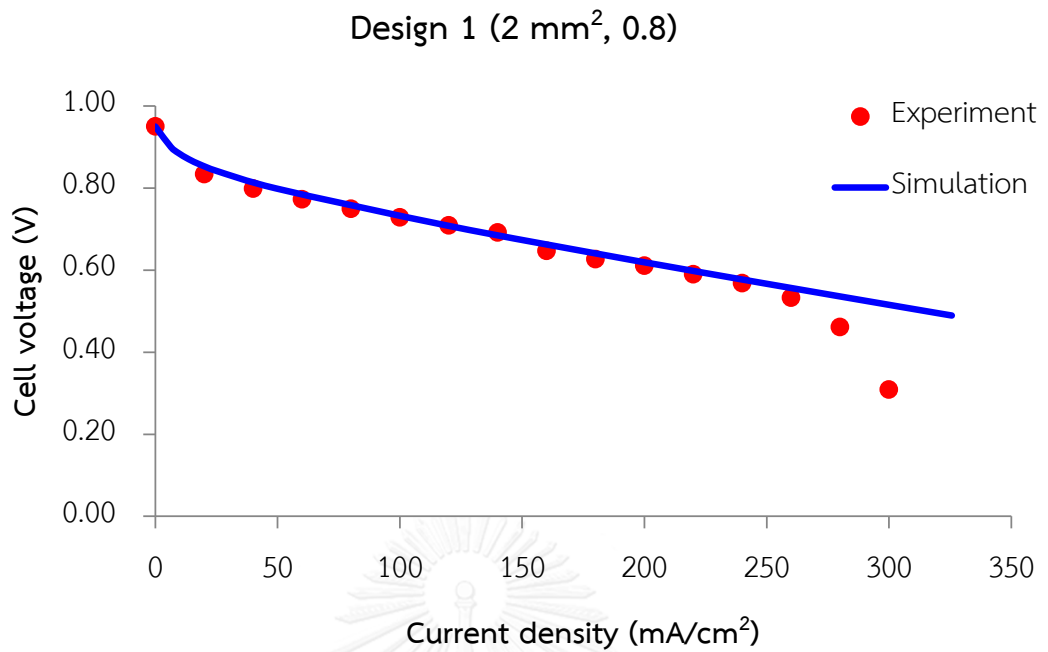
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

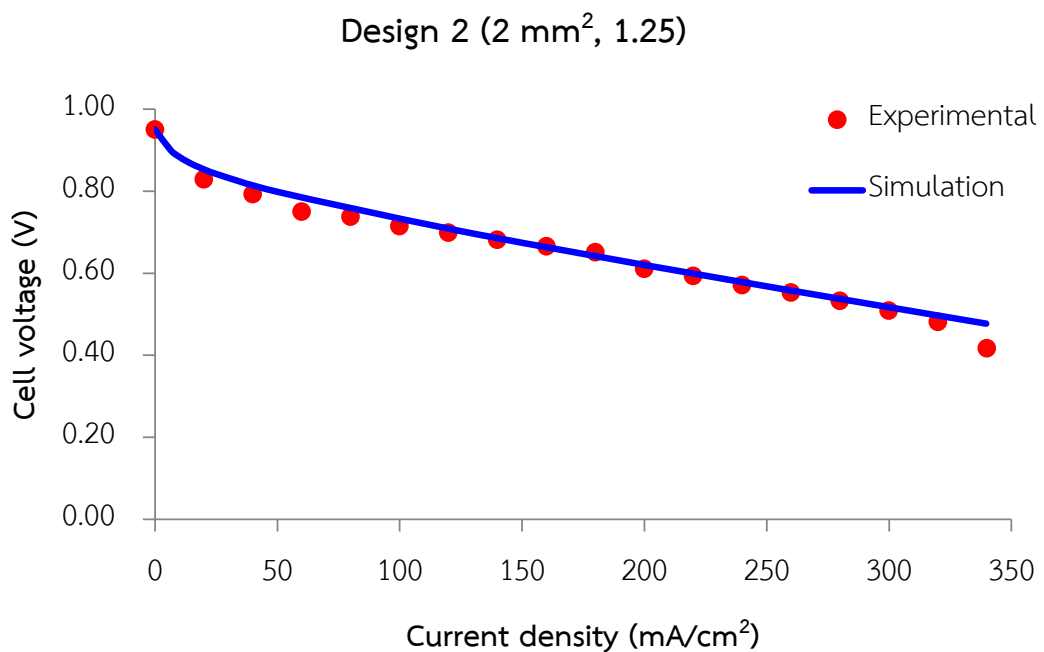
ในงานวิจัยนี้จะมีขั้นตอนการทำการวิจัยออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนการพัฒนาแบบจำลอง ส่วนที่สองคือการศึกษาผลของการออกแบบช่องทางการไหลของแก๊สด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และ ส่วนที่ 3 คือส่วนที่นำแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในการศึกษาผลของพารามิเตอร์ดำเนินการต่อ สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้านแคโทดโดยเลือกรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สจาก ส่วนที่สองมาใช้เพียง 1 รูปแบบ ดังนั้นจึงทำการเสนอผลงานวิจัยออกเป็น 3 ส่วน

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

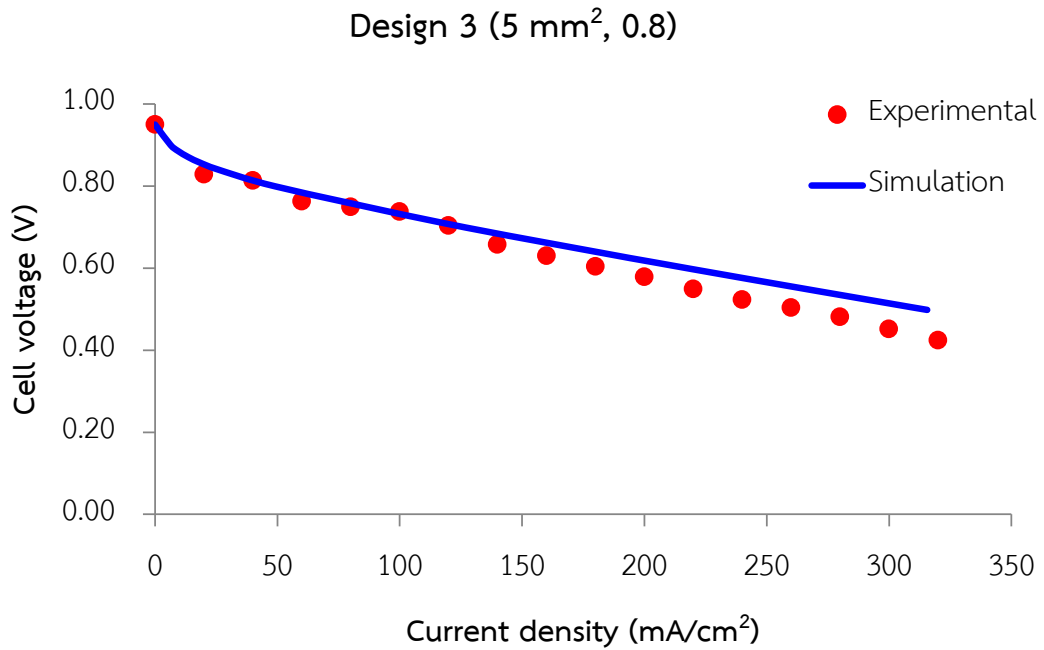
ในงานวิจัยนี้จะทำการจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้านแคโทด โดยใช้ สภาพะการทำงานใกล้เคียงกับผลการทดลองของสรวงรัตน์และอังศ์ร์และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยจะทำการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองและผลการ ทดลองจริงในทุกรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สและสภาวะที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตารางที่ 3.4 ซึ่งในการเปรียบเทียบจะทำการเปรียบเทียบกราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงโดยแสดงในรูปที่ 4.1 - 4.6



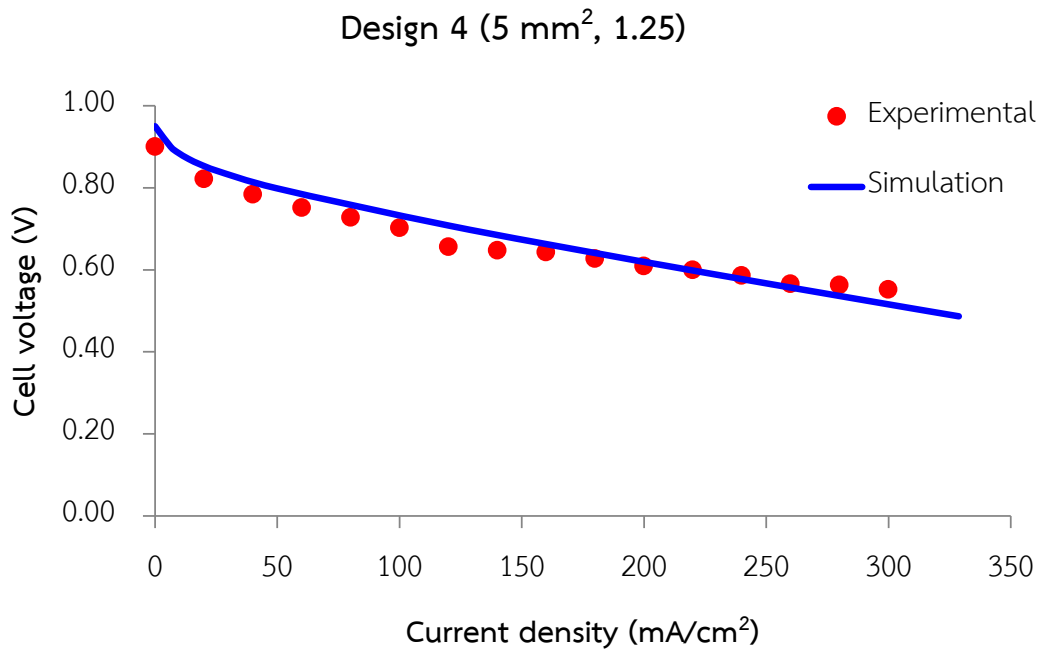
รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างแบบจำลองและการทดลองจริงของช่องทางไหลของแก๊สแบบที่ 1



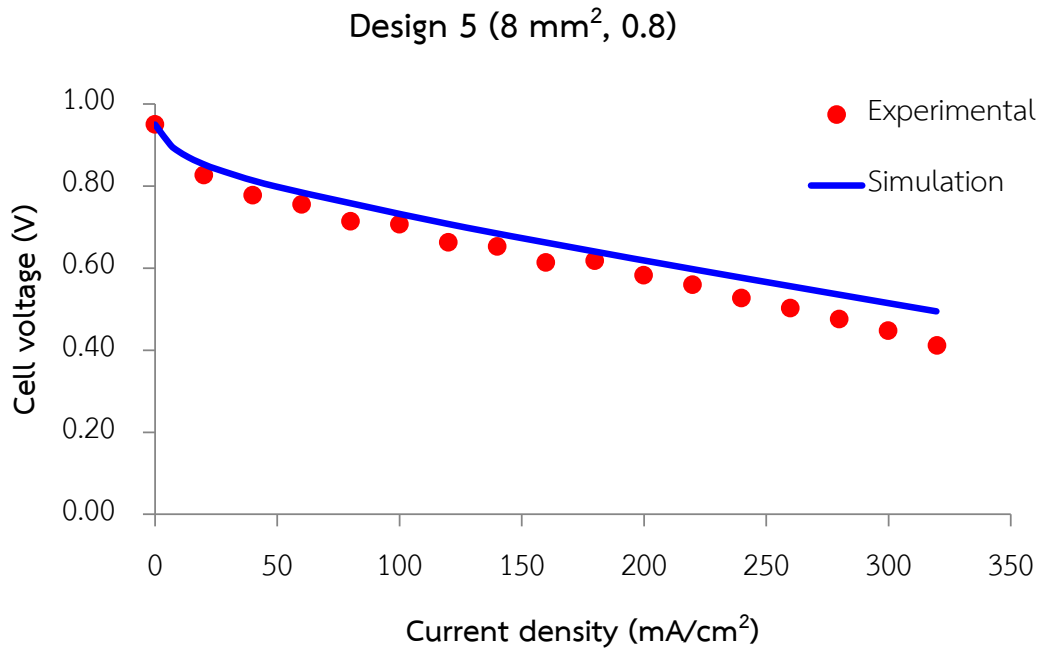
รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างแบบจำลองและการทดลองจริงของช่องทางไหลของแก๊สแบบที่ 2



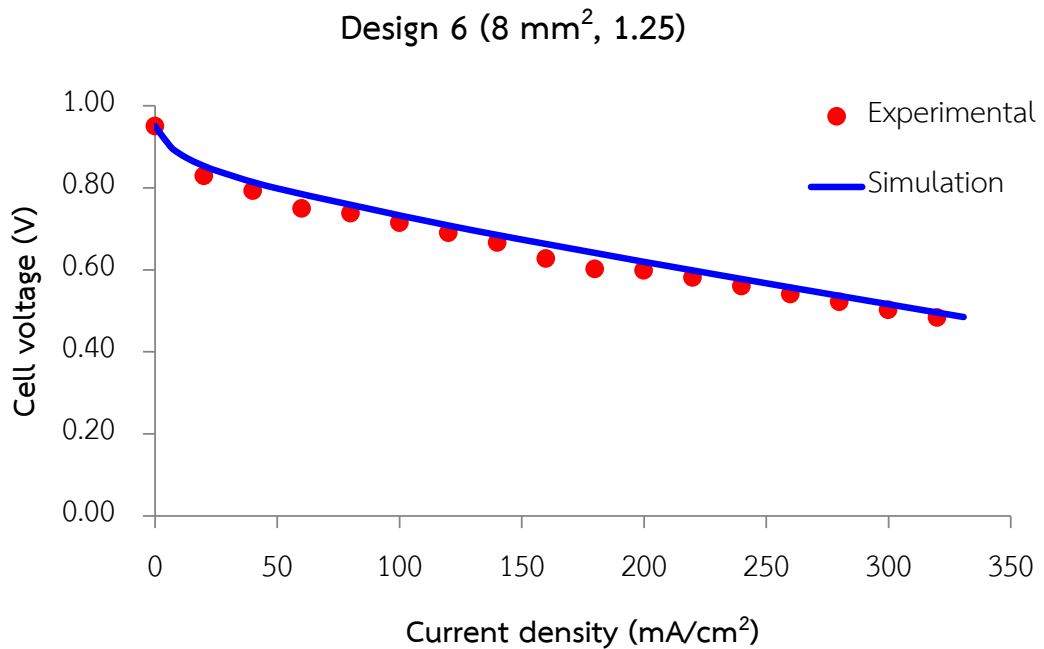
รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างแบบจำลองและการทดลองจริงของช่องทางไหลของแก๊สแบบที่ 3



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างแบบจำลองและการทดลองจริงของช่องทางไหลของแก๊สแบบที่ 4



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างแบบจำลองและการทดลองจริงของช่องทางไหลของแก๊สแบบที่ 5



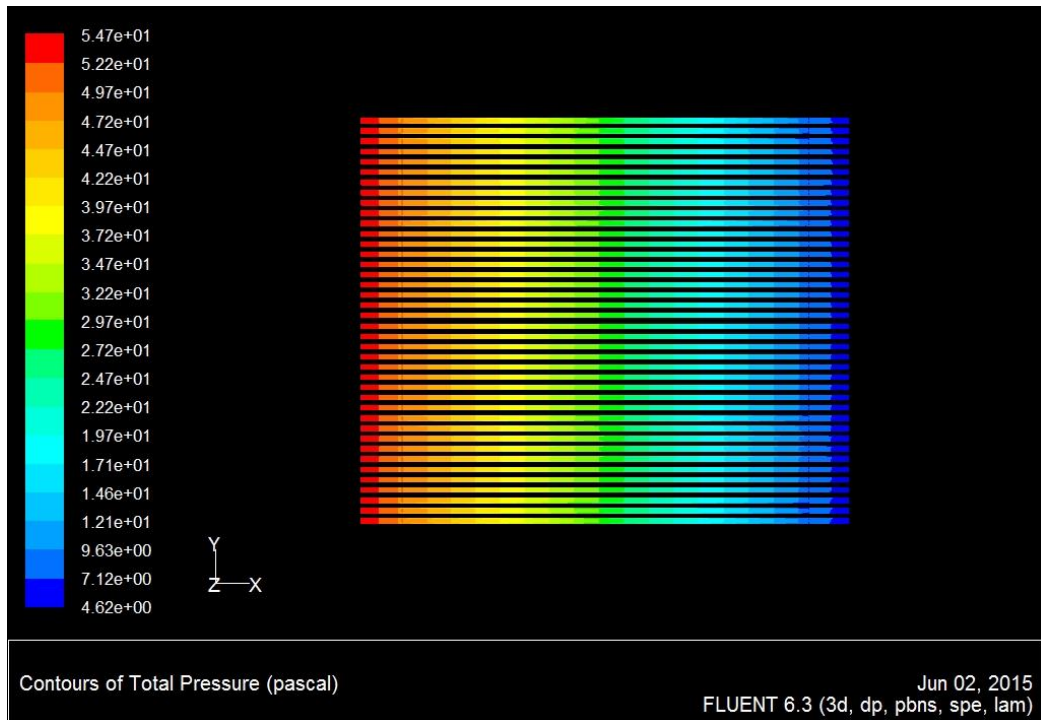
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างแบบจำลองและการทดลองจริงของช่องทางไหลของแก๊สแบบที่ 6

จากการเปรียบเทียบจะพบว่าผลของแบบจำลองค่อนข้างใกล้เคียงกับผลจากการทดลองจริง ในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ แต่ในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงผลของแบบจำลองจะมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากแบบจำลองเป็นแบบวิภาคเดียว ซึ่งในกรณีที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงหมายถึงมีปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดขึ้นอย่างมากเช่นกัน ทำให้มีการผลิตน้ำออกมาเป็นปริมาณมากซึ่งอาจควบแน่นเป็นหยดน้ำ ขวางช่องทางการไหลของแก๊สและมีผลทำให้การแพร่ของสารตั้งต้นไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง ซึ่งน้ำในสถานะของเหลวนี้ไม่รวมอยู่ในแบบจำลองนี้ ทำให้ผลของปรากฏการณ์จากแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองจริง โดยช่องทางการไหลแบบที่ 1 - 6 มีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) ดังนี้ 0.86 0.96 0.93 0.89 0.89 และ 0.97 ตามลำดับ โดยจากกราฟจะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของพื้นที่ตัดขวางลดลงความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงจะลดลง ซึ่งคาดว่าเกิดจากความสามารถในการจัดการน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น

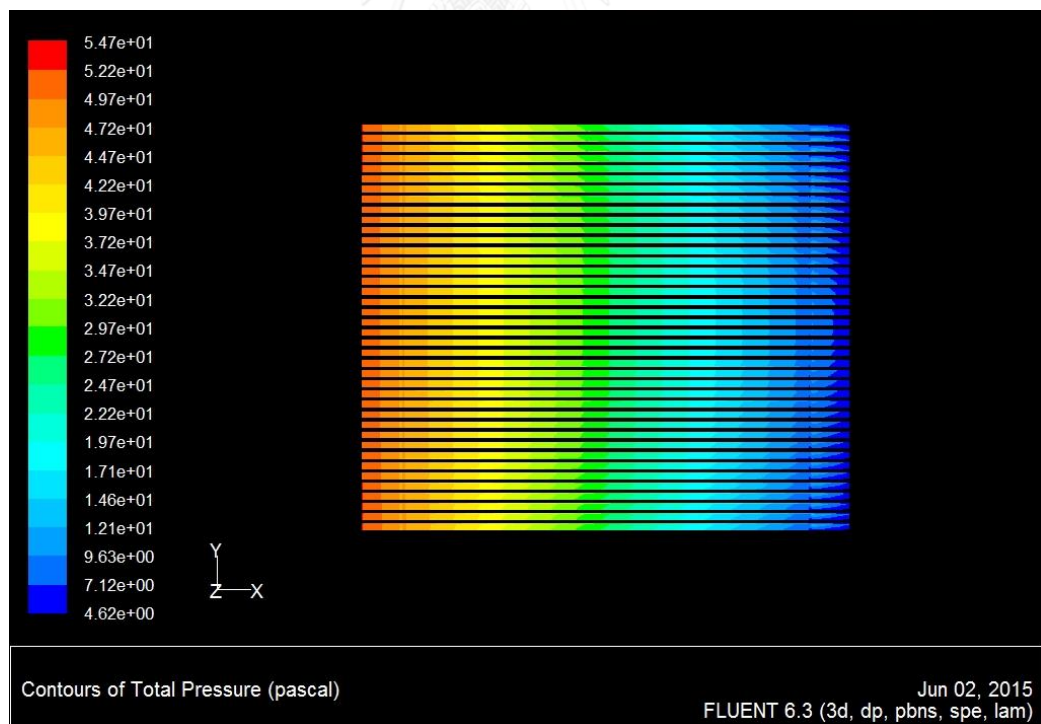
4.2 ผลของการออกแบบช่องทางการไหลของแก๊ส

4.2.1 การกระจายตัวของความดันภายในช่องทางการไหลของแก๊ส

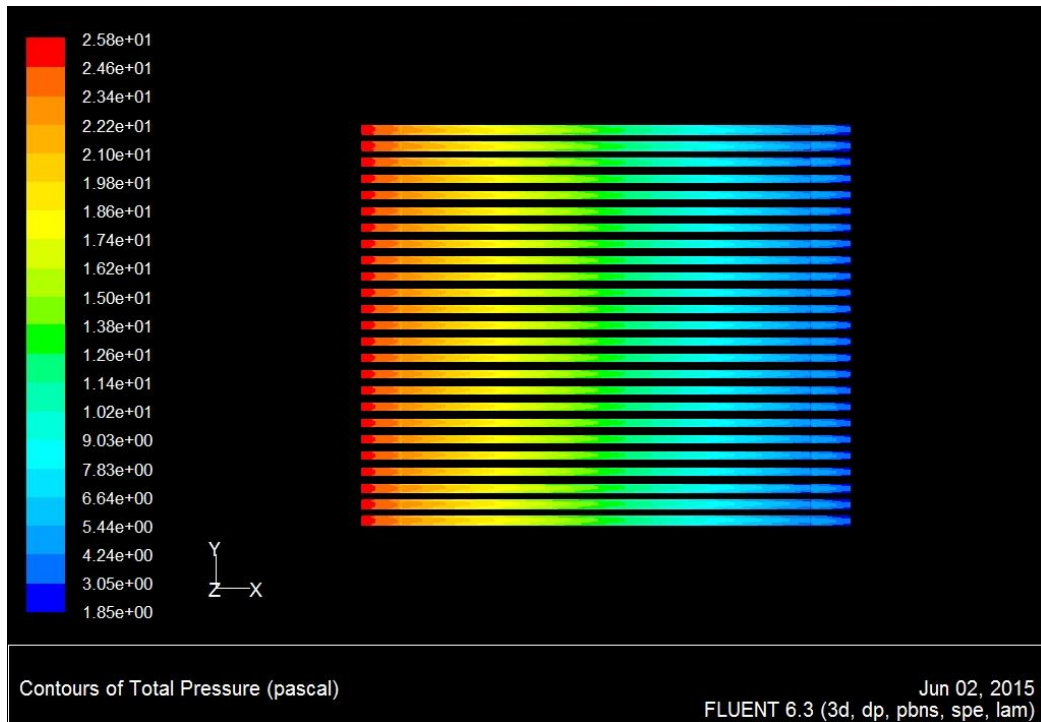
ภาพที่ 4.7-4.13 แสดงความดันในช่องทางการไหลของแก๊สแบบต่างๆ จะเห็นว่า การกระจายตัวของความดันจะเหมือนกันในทุกช่องทางการไหล และทุกรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สมีรูปแบบการกระจายตัวที่เหมือนกันแตกต่างกันที่ค่าของความดัน โดยพบว่าช่องทางการไหลแบบที่ 1 มีค่าความดันลดระหว่างขาเข้ากับทางออกมากที่สุด



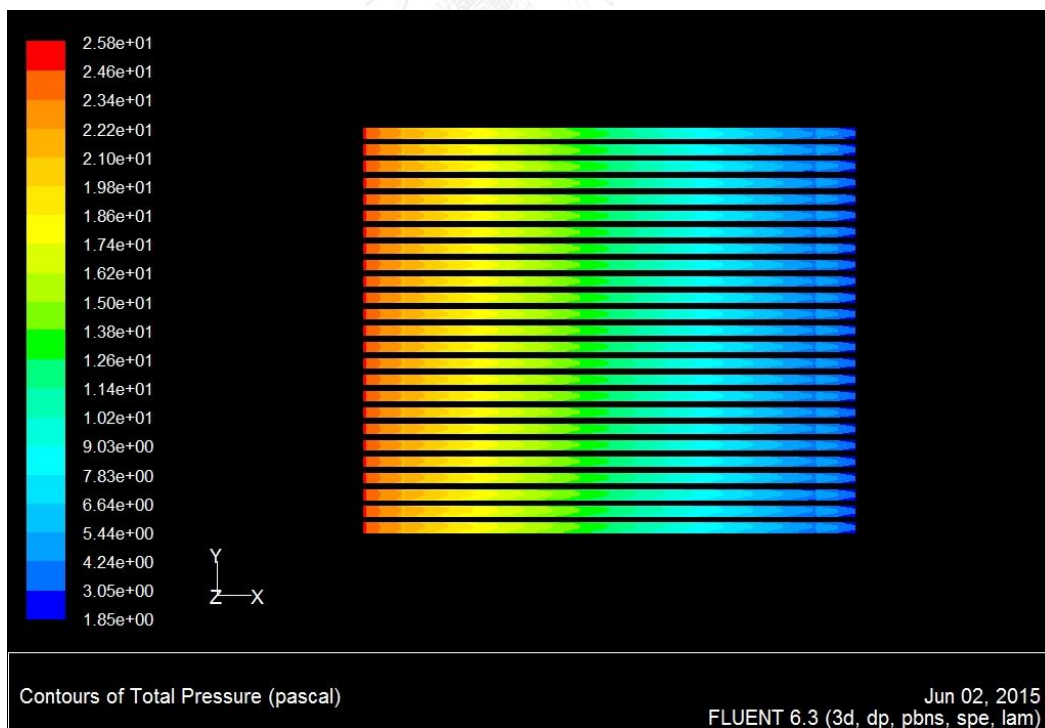
รูปที่ 4.7 ความดันในช่องทางการไหลของแก๊สแบบที่ 1



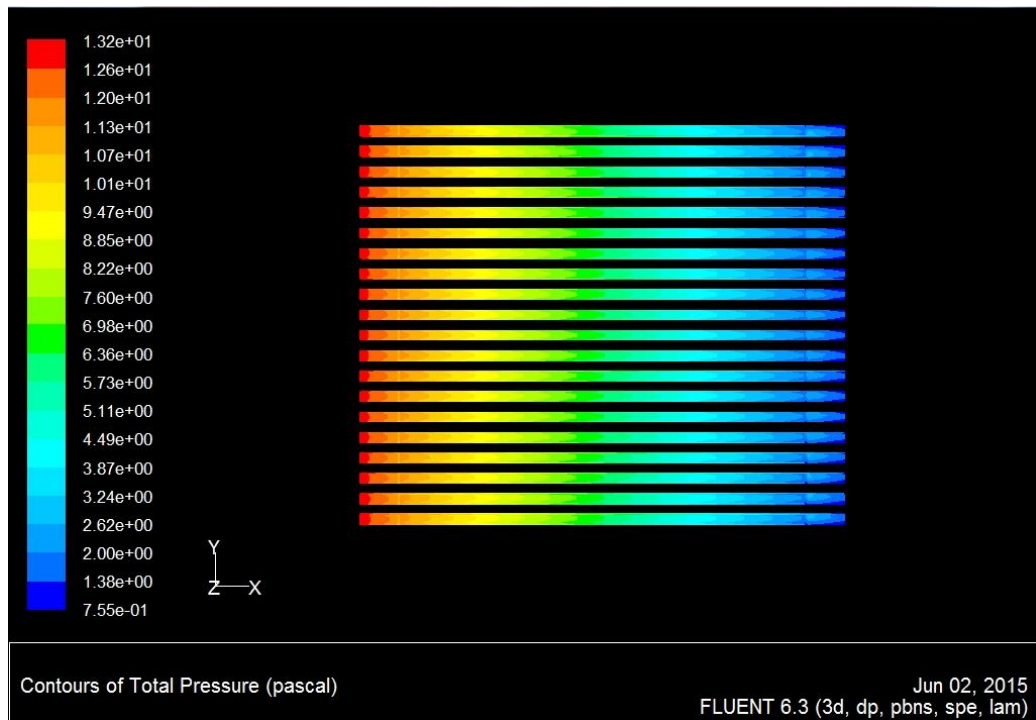
รูปที่ 4.8 ความดันในช่องทางการไหลของแก๊สแบบที่ 2



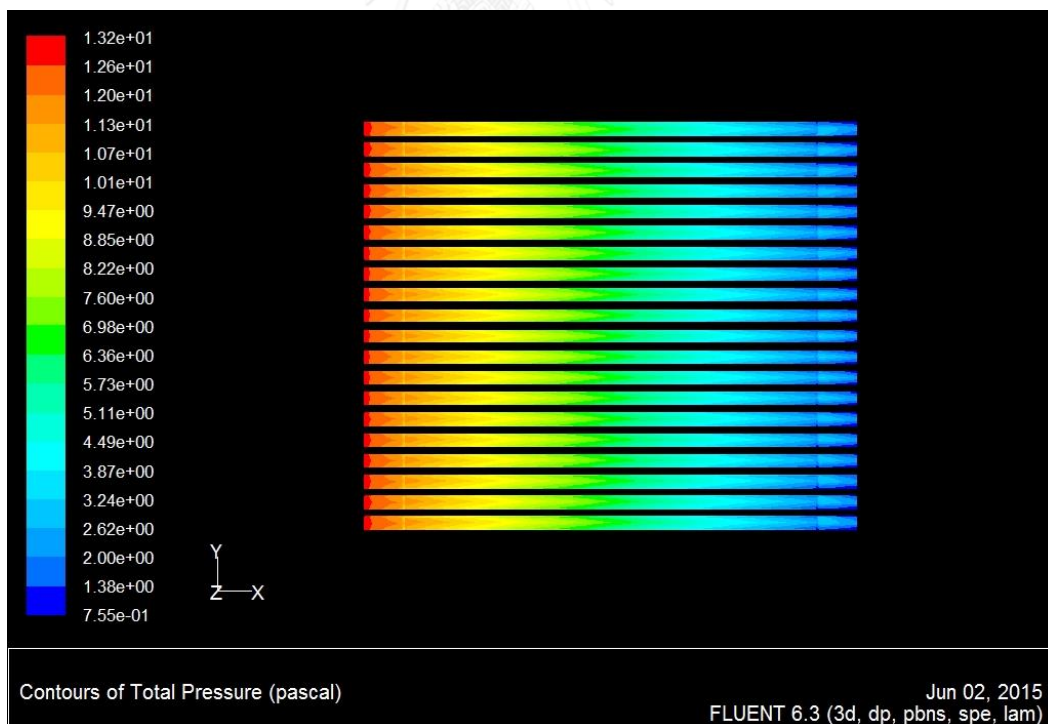
รูปที่ 4.9 ความดันในช่องทางการไหลของแก๊สแบบที่ 3



รูปที่ 4.10 ความดันในช่องทางการไหลของแก๊สแบบที่ 4



รูปที่ 4.11 ความดันในช่องทางการไหลของแก๊สแบบที่ 5

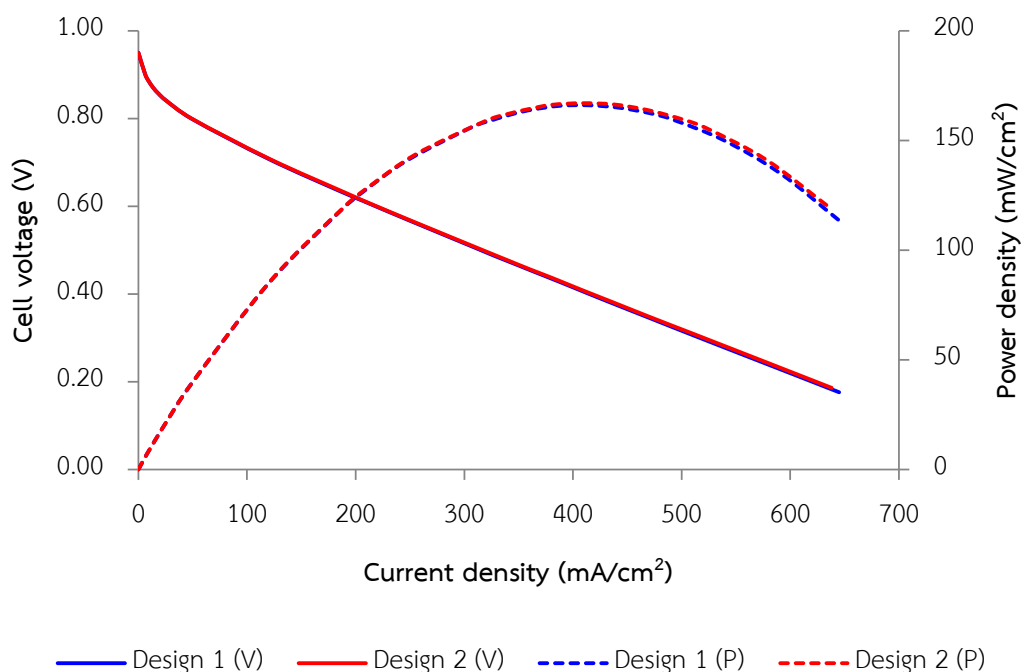


รูปที่ 4.12 ความดันในช่องทางการไหลของแก๊สแบบที่ 6

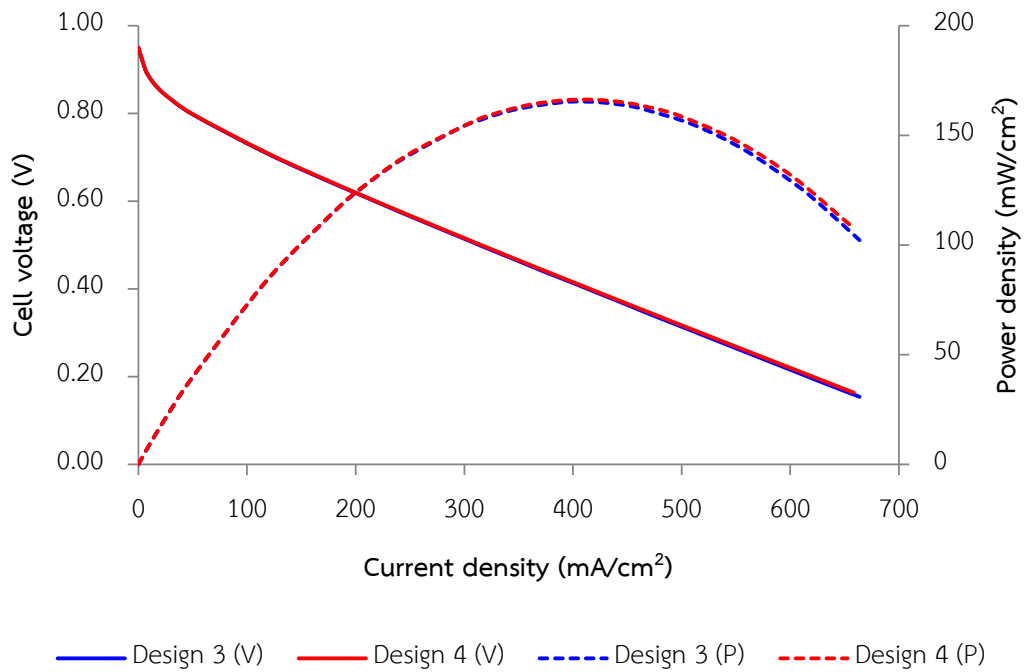
เมื่อความดันในช่องทางการไหลของแก๊สทุกช่องทางมีรูปแบบการกระจายตัวที่เหมือนกัน นั่นคือความดันในช่องทางการไหลสองช่องทางที่อยู่ติดกันจะมีค่าเท่าๆกัน ซึ่งทำให้ไม่เกิดการแพร่ของแก๊สออกซิเจนข้ามช่องทางการไหลของแก๊สผ่านชั้นการแพร่ของแก๊สที่อยู่ระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สทั้งสอง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang และคณะ [8] ที่ว่าช่องทางการไหลแบบขนานตรงออกซิเจนจะเคลื่อนที่ไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการแพร่เป็นหลัก

4.2.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของพื้นที่ตัดขวาง

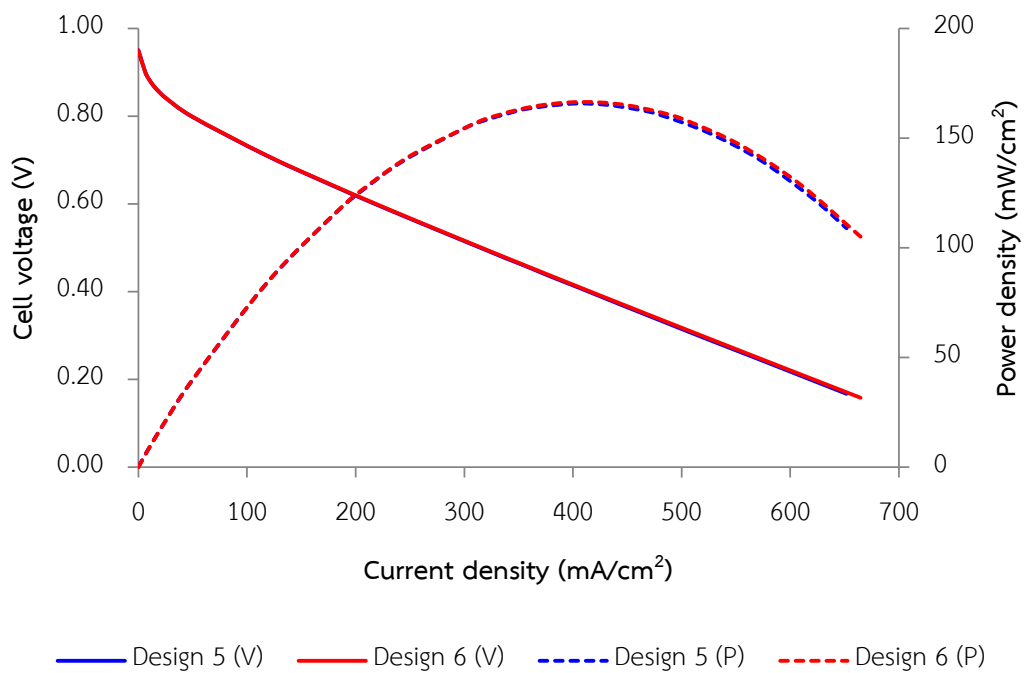
ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาค่าอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของพื้นที่ตัดขวาง 2 ค่า คือ 0.8 และ 1.25 โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามขนาดของพื้นที่ตัดขวาง ซึ่งกราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ขนาดของพื้นที่ตัดขวางต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.13 - 4.15



รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างค่าอัตราส่วน 0.8 (แบบที่ 1) กับ 1.25 (แบบที่ 2) ที่ขนาดของพื้นที่ตัดขวางเท่ากับ 2 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างค่าอัตราส่วน 0.8 (แบบที่ 3) กับ 1.25 (แบบที่ 4) ที่ขนาดของพื้นที่ตัดขวางเท่ากับ 5 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างค่าอัตราส่วน 0.8 (แบบที่ 5) กับ 1.25 (แบบที่ 6) ที่ขนาดของพื้นที่ตัดขวางเท่ากับ 8 ตารางมิลลิเมตร

จากกราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพบว่าที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของพื้นที่ตัดขวางจะไม่ส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง แต่จะเห็นผลชัดเจนขึ้นเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น เนื่องจากที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำช่องทางการไหลของแก๊สทุกแบบจะสามารถป้อนแก๊สออกซิเจนได้อย่างเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า แต่เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของพื้นที่ตัดขวางจะเห็นผลชัดเจนขึ้นเนื่องจากความสามารถในการแพร่ของแก๊สออกซิเจนที่แตกต่างกันซึ่งมีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงโดยตรง

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของช่องทางการไหลแบบต่างๆ

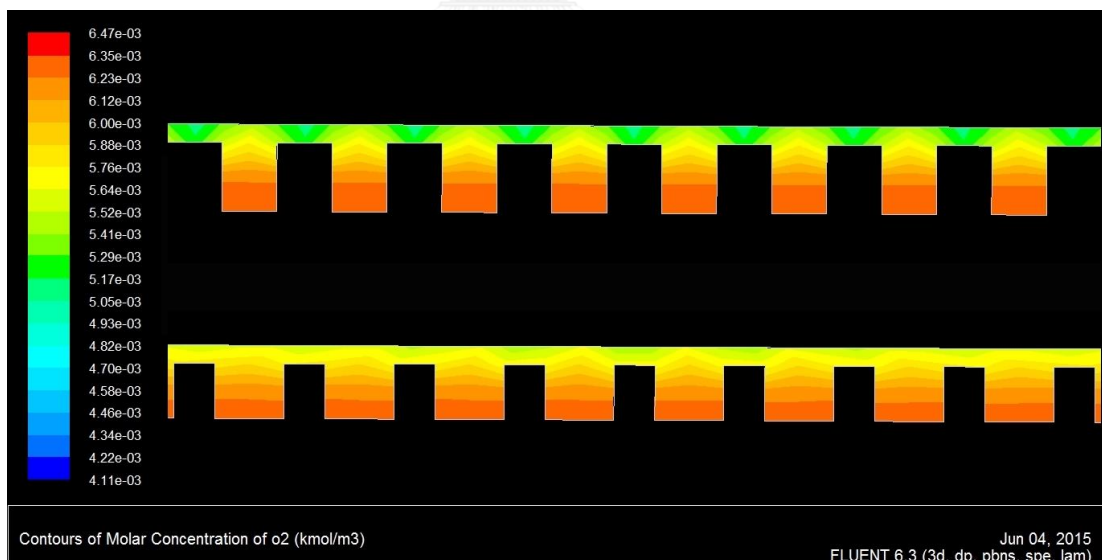
| แบบที่ | พื้นที่ตัดขวาง (มม ²) | อัตราส่วน | กว้าง (มม) | สูง (มม) | ระยะห่าง (มม) | จำนวนช่องทางการไหล | พื้นที่สัมผัสทั้งหมด (มม ²) |
|--------|-----------------------------------|-----------|------------|----------|---------------|--------------------|---|
| 1 | 2.0 | 1.25 | 1.26 | 1.58 | 1.26 | 40 | 5040 |
| 2 | | 0.8 | 1.58 | 1.26 | 0.94 | 40 | 6320 |
| 3 | 5.0 | 1.25 | 2.00 | 2.50 | 2.00 | 25 | 5000 |
| 4 | | 0.8 | 2.50 | 2.00 | 1.50 | 25 | 6250 |
| 5 | 8.0 | 1.25 | 2.53 | 3.16 | 2.53 | 20 | 5060 |
| 6 | | 0.8 | 3.16 | 2.53 | 1.90 | 20 | 6320 |

จากตารางที่ 4.1 เมื่ออัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของพื้นที่ตัดขวางลดลงจาก 1.25 เป็น 0.8 จะทำให้ความกว้างของช่องทางการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้น แต่ระยะห่างระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สที่อยู่ติดกันลดลง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความกว้างของช่องทางการไหลจะเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกับชั้นการแพร่ของแก๊สทำให้แก๊สออกซิเจนสามารถแพร่ไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น และเนื่องจากไม่มีการแพร่ข้ามช่องทางการไหลของแก๊ส การลดลงของระยะห่างระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สที่อยู่ติดกันจะลดพื้นที่ที่มีการแพร่ของแก๊สออกซิเจนได้น้อยนั่นคือแก๊สออกซิเจนจะแพร่ไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.16 – 4.18 ซึ่งจากสาเหตุทั้ง 2 นี้ทำให้การลดลงของอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของพื้นที่ตัดขวางมีผลให้สมรรถนะของเซลล์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในกราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงและตารางที่ 4.2

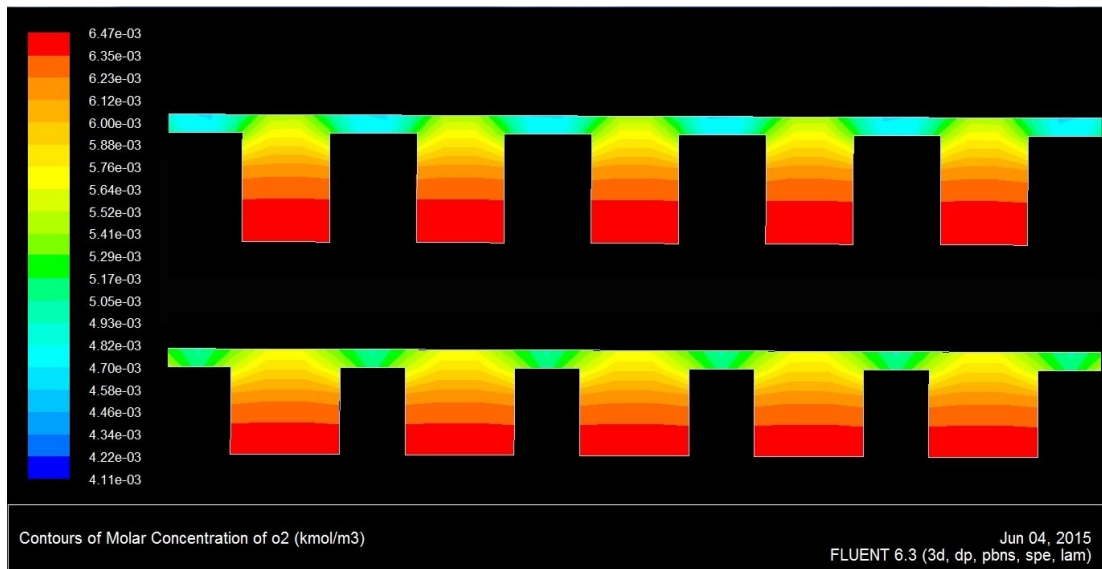
ที่แสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาริเซชันของปฏิกิริยาเท่ากับ 0.1752 โวลต์และค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากการคำนวณ

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดจำแนกตามพื้นที่ตัดขวาง

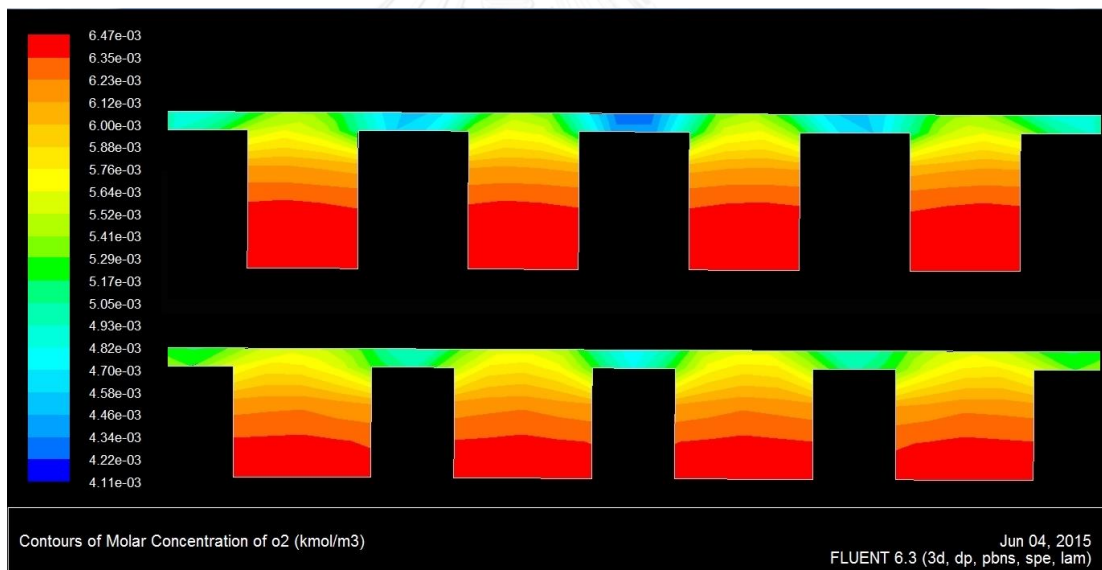
| แบบที่ | พื้นที่ตัดขวาง | | เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง | | เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง | |
|--------|-----------------------------------|-----------|---|----------------|---|----------------|
| | พื้นที่ตัดขวาง (มม ²) | อัตราส่วน | ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (มิลลิแอมแปร์/ซม ²) | การเปลี่ยนแปลง | ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุด (มิลลิวัตต์/ซม ²) | การเปลี่ยนแปลง |
| 1 | 2.0 | 1.25 | 415.059 | 5.50 | 166.024 | 0.58 |
| 2 | | 0.8 | 437.885 | | 166.983 | |
| 3 | 5.0 | 1.25 | 397.471 | 5.71 | 165.348 | 0.52 |
| 4 | | 0.8 | 420.180 | | 166.213 | |
| 5 | 8.0 | 1.25 | 405.270 | 4.44 | 165.757 | 0.32 |
| 6 | | 0.8 | 423.260 | | 166.291 | |



รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของแก๊สออกซิเจนในระนาบ Y-Z ที่จุด X=60 มิลลิเมตร ของพื้นที่ตัดขวางขนาด 2 ตารางมิลลิเมตร อัตราส่วน 1.25 (ด้านบน) และ 0.8 (ด้านล่าง) ที่ $\eta_{act,c} = 0.1752$ โวลต์



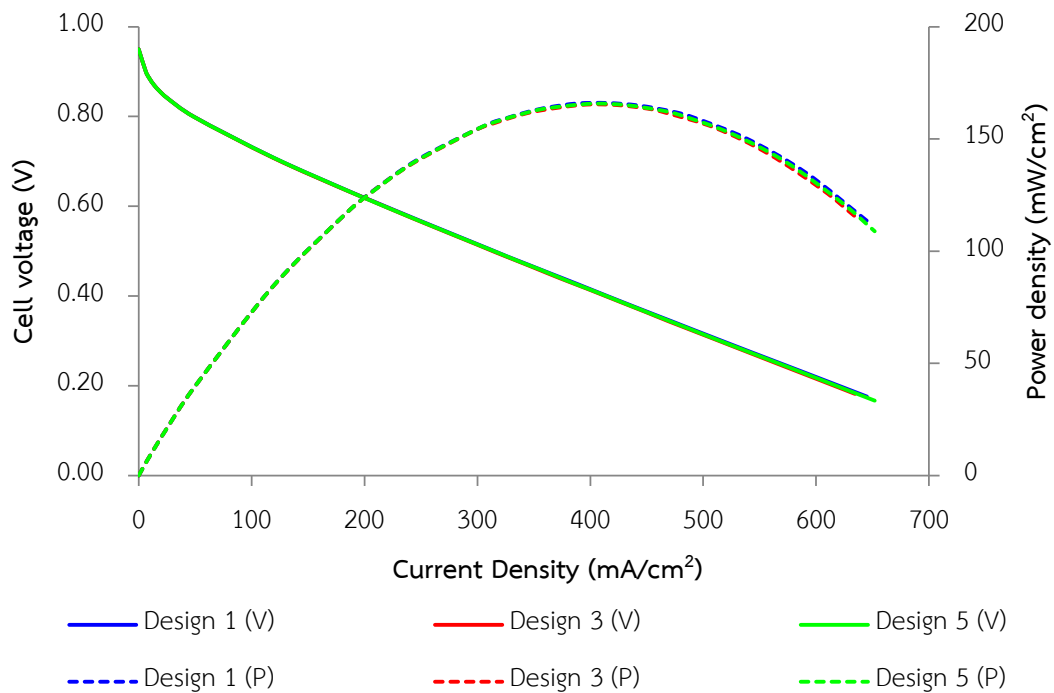
รูปที่ 4.17 การกระจายตัวของแก๊สออกซิเจนในระนาบ Y-Z ที่จุด X=60 มิลลิเมตร ของพื้นที่ตัดขวางขนาด 5 ตารางมิลลิเมตร อัตราส่วน 1.25 (ด้านบน) และ 0.8 (ด้านล่าง) ที่ $\eta_{act,c} = 0.1752$ โวลต์



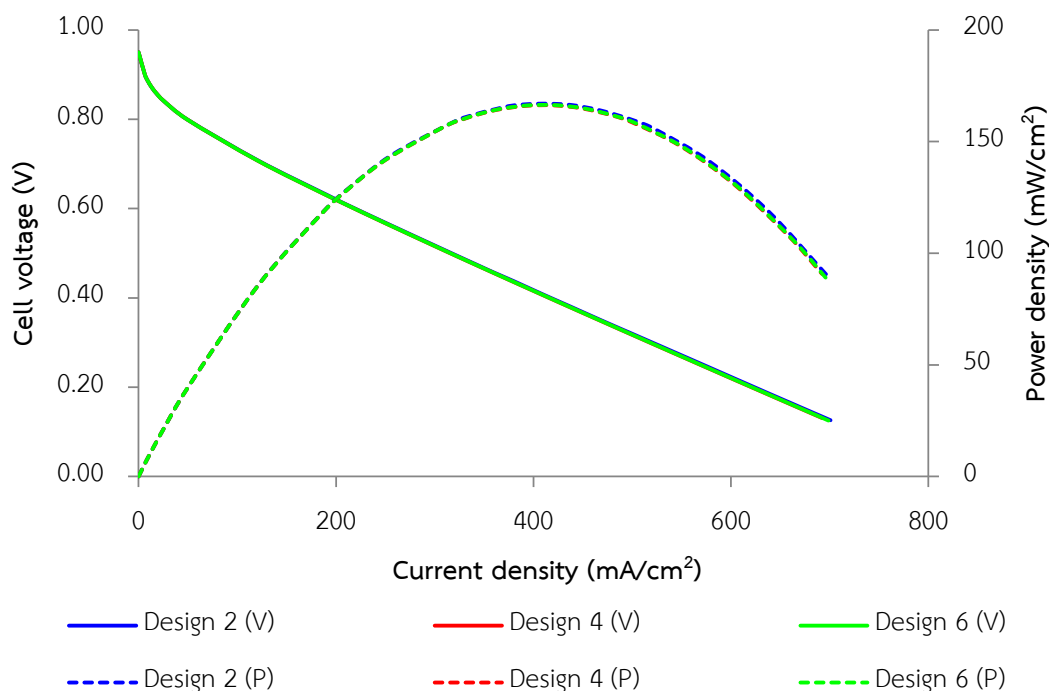
รูปที่ 4.18 การกระจายตัวของแก๊สออกซิเจนในระนาบ Y-Z ที่จุด X=60 มิลลิเมตร ของพื้นที่ตัดขวางขนาด 8 ตารางมิลลิเมตร อัตราส่วน 1.25 (ด้านบน) และ 0.8 (ด้านล่าง) ที่ $\eta_{act,c} = 0.1752$ โวลต์

4.2.3 ผลของขนาดพื้นที่ตัดขวาง

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาขนาดพื้นที่ตัดขวาง 3 ค่า คือ 2 5 และ 8 ตารางมิลลิเมตร โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มตามอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของพื้นที่ตัดขวาง กราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่ 4.19 – 4.20



รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างขนาดพื้นที่ตัดขวาง 2 5 และ 8 ตารางมิลลิเมตร (แบบที่ 1 3 และ 5 ตามลำดับ) ที่อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้าง 1.25



รูปที่ 4.20 กราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างขนาดพื้นที่ตัดขวาง 2 5 และ 8 ตารางมิลลิเมตร (แบบที่ 2 4 และ 6 ตามลำดับ) ที่อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้าง 0.8

เช่นเดียวกับผลของอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของพื้นที่ตัดขวางคือขนาดพื้นที่ตัดขวางจะไม่ส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ แต่จะเห็นผลชัดเจนขึ้นเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น

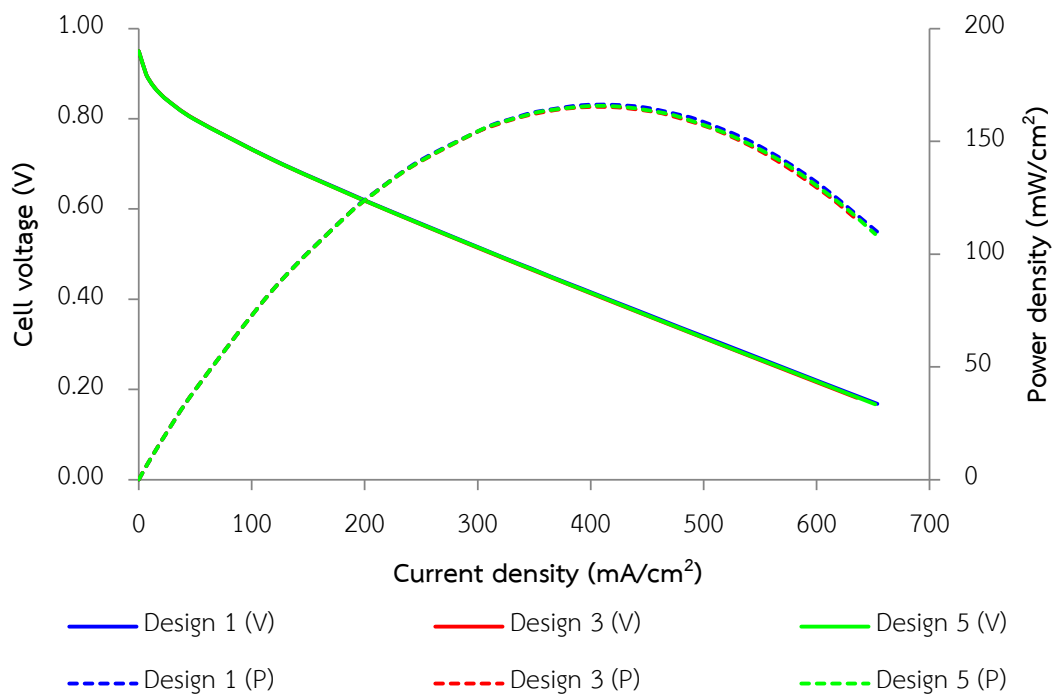
จากตารางที่ 4.1 พบว่าที่อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างเท่ากับ 1.25 เมื่อขนาดพื้นที่ตัดขวางเพิ่มขึ้นจะทำให้ความกว้างของช่องทางการไหลของแก๊สและระยะห่างระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สที่อยู่ติดกันเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของความกว้างของช่องทางการไหลจะเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกับชั้นการแพร่ของแก๊สทำให้แก๊สออกซิเจนสามารถแพร่ไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น มีผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สจะเพิ่มพื้นที่ที่มีการแพร่ของแก๊สออกซิเจนได้น้อยนั่นคือแก๊สออกซิเจนจะแพร่ไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ลดลงมีผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงและเมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพบว่าขนาดพื้นที่ตัดขวาง 2 ตารางมิลลิเมตรมีสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสูงสุด รองลงมาคือ 8 ตารางมิลลิเมตร และ 5 ตารางมิลลิเมตรตามลำดับดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดจำแนกตามอัตราส่วน

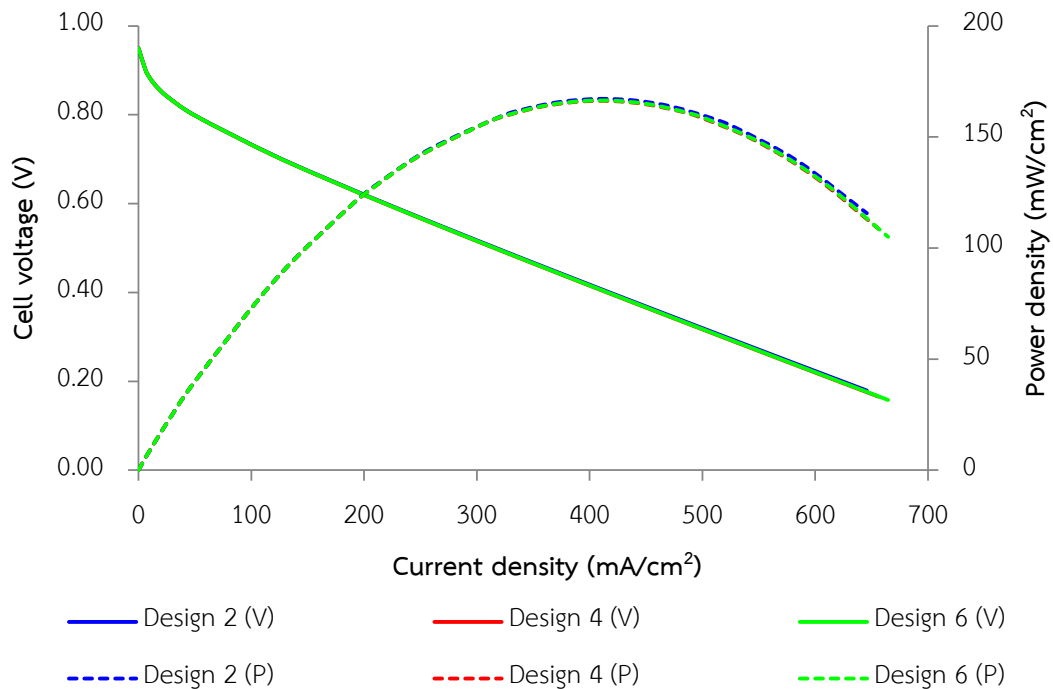
| แบบที่ | อัตราส่วน | พื้นที่ตัดขวาง (มม ²) | ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (มิลลิแอมแปร์/ซม ²) | เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง | ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุด (มิลลิวัตต์/ซม ²) | เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง |
|--------|-----------|-----------------------------------|---|---------------------------|---|---------------------------|
| 1 | | 2.0 | 415.059 | | 166.024 | |
| 3 | 1.25 | 5.0 | 397.471 | -4.24 | 165.348 | -0.41 |
| 5 | | 8.0 | 405.270 | 1.96 | 165.757 | 0.25 |
| 2 | | 2.0 | 437.885 | | 166.983 | |
| 4 | 0.8 | 5.0 | 420.180 | -4.04 | 166.213 | -0.46 |
| 6 | | 8.0 | 423.260 | 0.73 | 166.291 | 0.05 |

ที่อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างเท่ากับ 0.8 จะมีพื้นที่สัมผัสระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกับชั้นการแพร่ของแก๊สของขนาดพื้นที่ตัดขวาง 2 และ 8 ตารางมิลลิเมตรเท่ากัน โดยขนาดพื้นที่ตัดขวางเท่ากับ 5 ตารางมิลลิเมตรจะมีพื้นที่สัมผัสน้อยที่สุด ส่วนระยะห่างระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สที่อยู่ติดกันจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดพื้นที่ตัดขวางเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่อัตราส่วนเท่ากับ 0.8 คือขนาดพื้นที่ตัดขวาง 2 ตารางมิลลิเมตรมีสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสูงสุด รองลงมาคือ 8 ตารางมิลลิเมตร และ 5 ตารางมิลลิเมตรตามลำดับดังตารางที่ 4.3

เพื่อตัดผลที่เกิดจากอัตราการป้อนมวลอากาศขาเข้าที่ไม่เท่ากันในแต่ละขนาดพื้นที่ตัดขวาง จึงทำการจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงโดยกำหนดให้อัตราการป้อนมวลอากาศขาเข้าเท่ากันที่ 3.03×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที โดยกราฟแสดงสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของพื้นที่ตัดขวางเท่ากับ 1.25 และ 0.8 ที่ได้ดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 กราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างขนาดพื้นที่ตัดขวาง 2.5 และ 8 ตารางมิลลิเมตร ที่อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้าง 1.25 (แบบที่ 1, 3 และ 5 ตามลำดับ) และอัตราการป้อนอากาศขาเข้า 3.03×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที



รูปที่ 4.22 กราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างขนาดพื้นที่ตัดขวาง 2 5 และ 8 ตารางมิลลิเมตร ที่อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้าง 0.8 (แบบที่ 2 4 และ 6 ตามลำดับ) และ อัตราการป้อนอากาศเข้า 3.03×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที

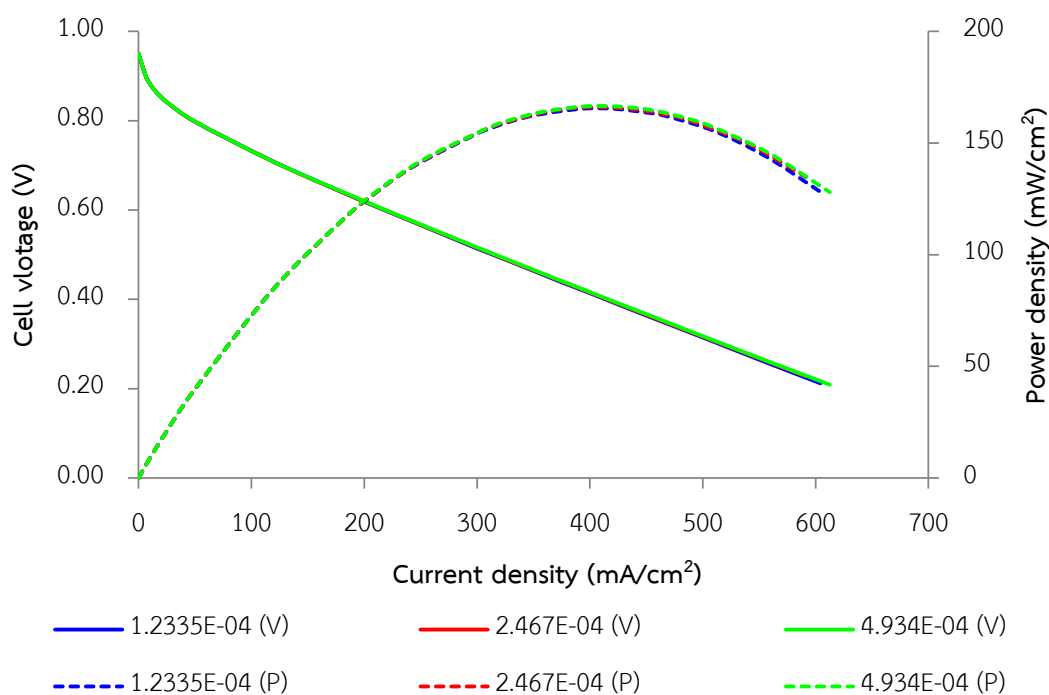
เมื่อตัดผลของอัตราการป้อนมวลอากาศเข้ากราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงยังมีแนวโน้มเช่นเดิมคือขนาดพื้นที่ตัดขวาง 2 ตารางมิลลิเมตรมีสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสูงที่สุด รองลงมาคือ 8 ตารางมิลลิเมตร และ 5 ตารางมิลลิเมตรตามลำดับ ดังนั้นเพื่อให้เซลล์เชื้อเพลิงมีสมรรถนะสูง ในการออกแบบช่องทางการไหลของแก๊สจะต้องพิจารณาถึงพื้นที่สัมผัสระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกับชั้นการแพร่ของแก๊สและระยะห่างระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สที่อยู่ติดกัน โดยในการออกแบบควรมีพื้นที่สัมผัสสูงและมีระยะห่างระหว่างช่องทางการไหลต่ำ

4.3 ผลของพารามิเตอร์ดำเนินการ

ในการศึกษาผลของพารามิเตอร์ดำเนินการของเซลล์เชื้อเพลิงจะเลือกรูปแบบของช่องทางไหลแบบที่ 1 โดยสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง คือ อุณหภูมิแก๊สขาเข้า 298 เคลวิน อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง 348 เคลวิน ความดันของเซลล์เชื้อเพลิง 101325 ปาสคาล ความชื้นสัมพัทธ์ของแก๊สขาเข้า 70% และอัตราการไหลของมวลอากาศขาเข้า 2.47×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที มาใช้เป็นกรณีพื้นฐาน

4.3.1 ผลของอัตราการไหลของมวลอากาศขาเข้า

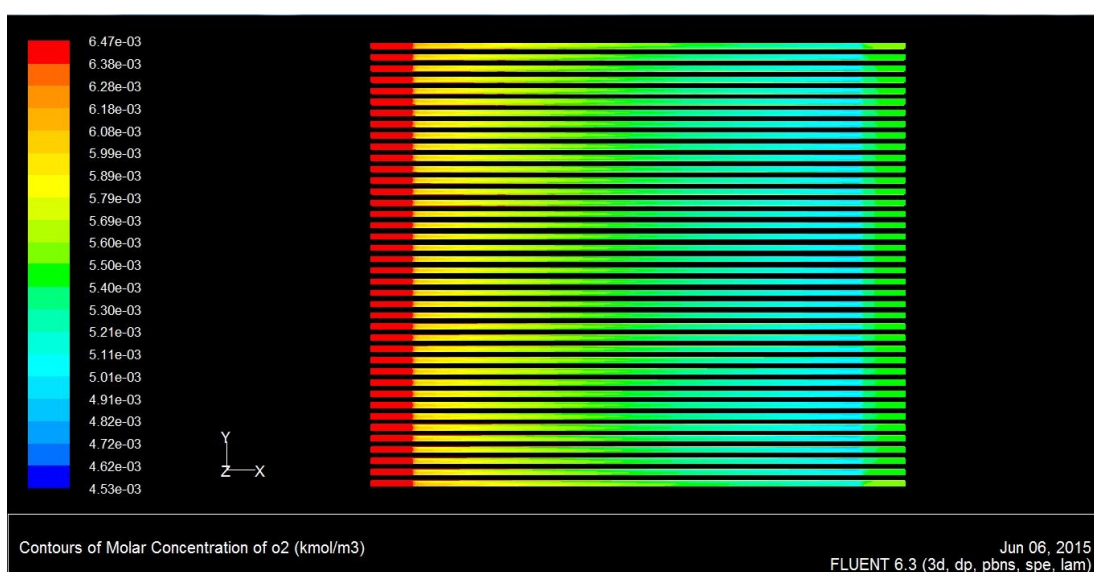
ในการศึกษานี้จะทำการศึกษาอัตราการไหลของมวลอากาศขาเข้าทั้งหมด 3 จำนวน คือ 1.2335×10^{-4} 2.467×10^{-4} และ 4.934×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที โดยกราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของมวลอากาศขาเข้าต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.23



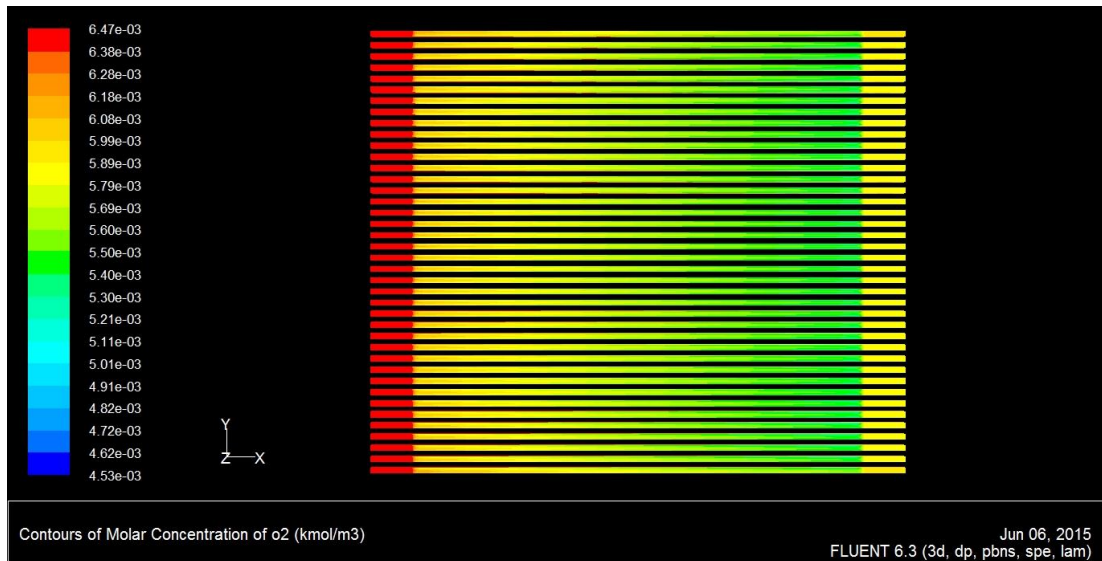
รูปที่ 4.23 กราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของอากาศขาเข้าต่างๆ

เช่นเดียวกับผลของผลของการออกแบบช่องทางไหลของแก๊ส อัตราการไหลของอากาศขาเข้าจะไม่ส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ แต่จะเห็นผล

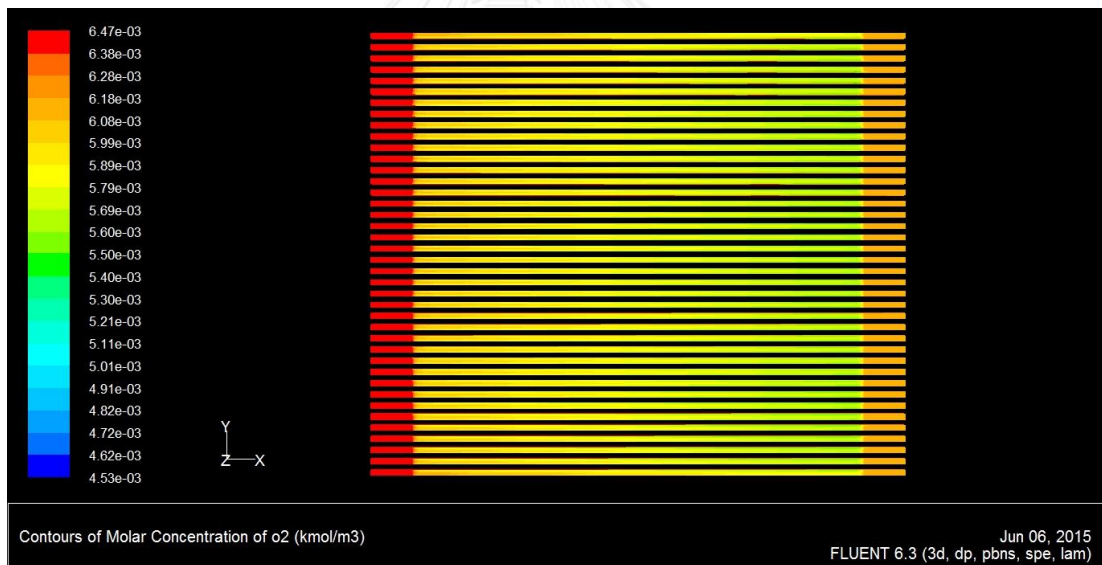
ชัดเจนขึ้นเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น โดยเมื่ออัตราการไหลของอากาศขาเข้าเพิ่มขึ้นจะเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนในช่องทางการไหลของแก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 4.24 - 4.26 และแสดงอยู่ในรูปแบบกราฟแท่งดังรูปที่ 4.30 ทำให้ความแตกต่างของความเข้มข้นเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นแรงผลักดันให้เกิดการแพร่สำหรับการแพร่แบบบังคับ จึงทำให้ปริมาณออกซิเจนที่แพร่เข้าสู่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.27 - 4.29 และแสดงอยู่ในรูปแบบกราฟแท่งดังรูปที่ 4.30 มีผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น



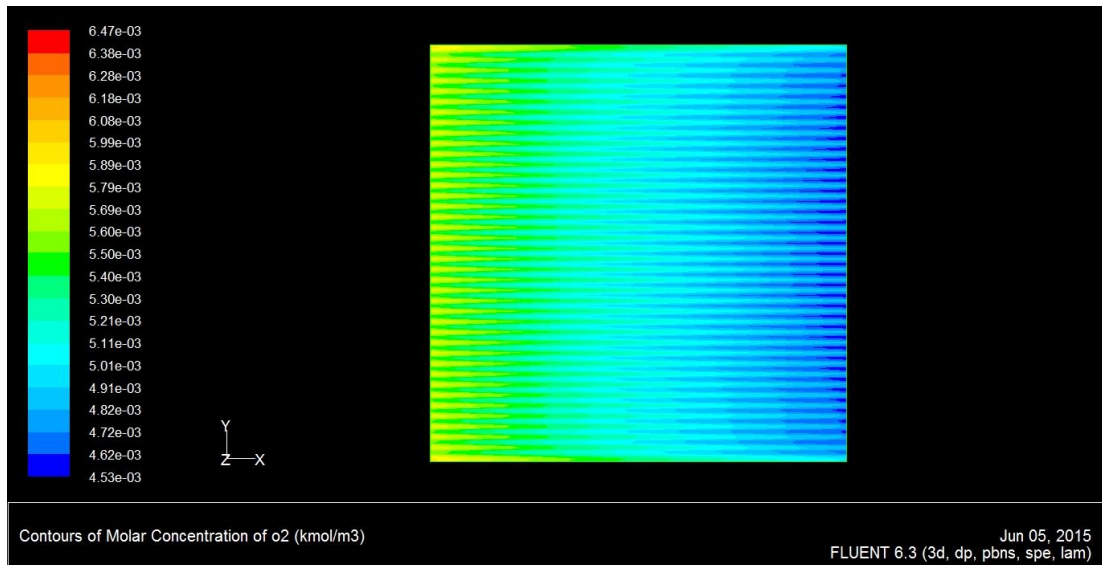
รูปที่ 4.24 การกระจายตัวของแก๊สออกซิเจนในช่องทางการไหลของแก๊ส ที่ $\eta_{act,c} = 0.1752$ โวลต์ และอัตราการไหลขาเข้า 1.2335×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที



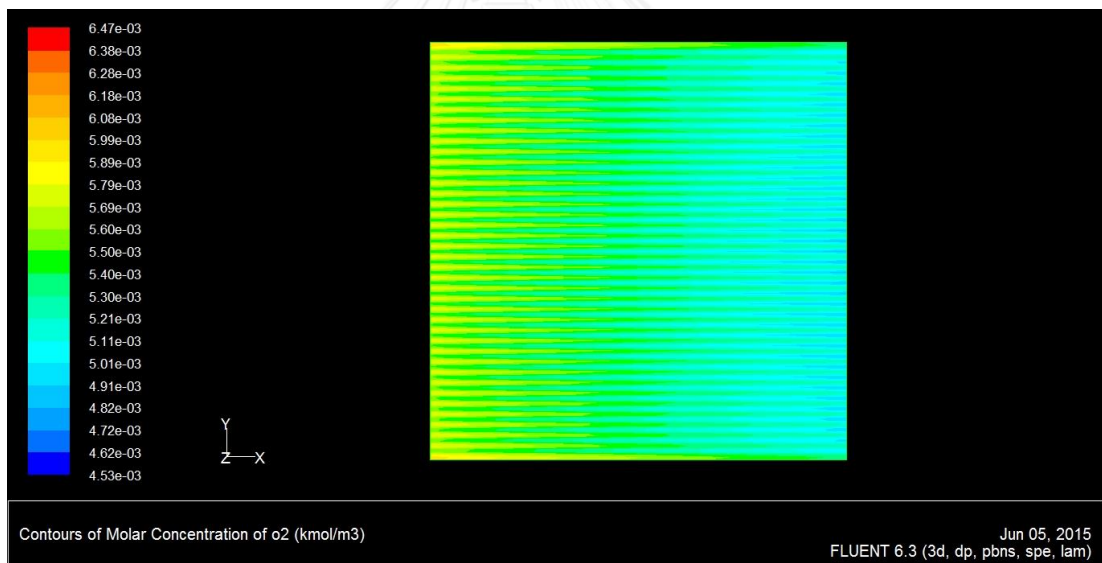
รูปที่ 4.25 การกระจายตัวของแก๊สออกซิเจนในช่องทางการไหลของแก๊ส ที่ $\eta_{act,c} = 0.1752$ โวลต์ และอัตราการไหลขาเข้า 2.467×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที



รูปที่ 4.26 การกระจายตัวของแก๊สออกซิเจนในช่องทางการไหลของแก๊ส ที่ $\eta_{act,c} = 0.1752$ โวลต์ และอัตราการไหลขาเข้า 4.934×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที



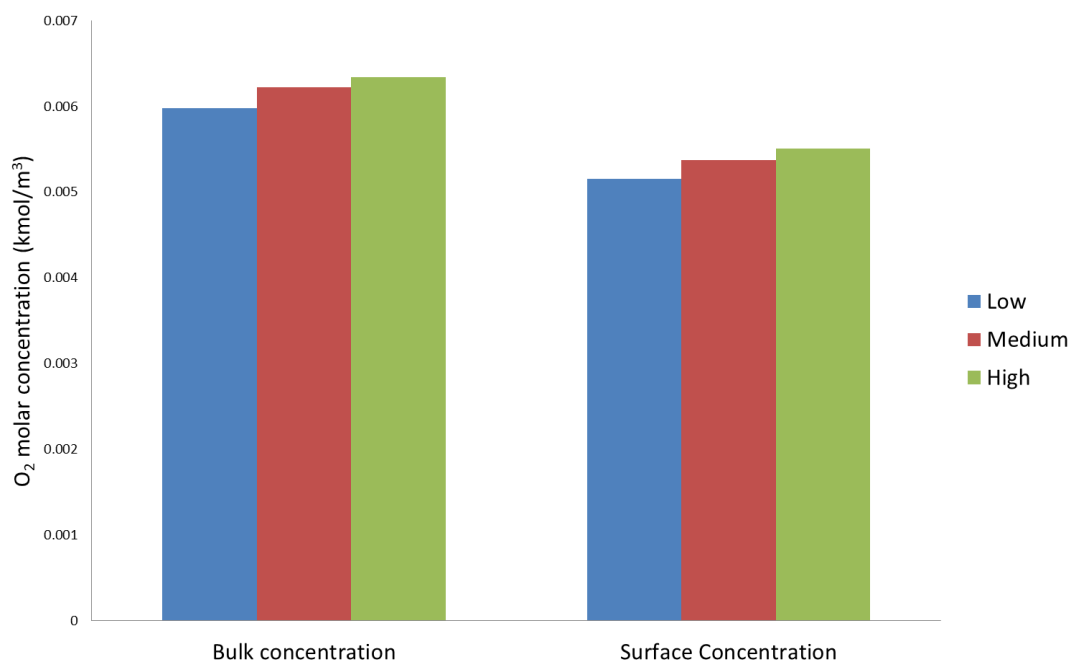
รูปที่ 4.27 การกระจายตัวของแก๊สออกซิเจนบนผิวรอยต่อระหว่างชั้นการกระจายตัวของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ $\eta_{act,c} = 0.1752$ โวลต์ ที่อัตราการไหลขาเข้า 1.2335×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที



รูปที่ 4.28 การกระจายตัวของแก๊สออกซิเจนบนผิวรอยต่อระหว่างชั้นการกระจายตัวของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ $\eta_{act,c} = 0.1752$ โวลต์ ที่อัตราการไหลขาเข้า 2.467×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที



รูปที่ 4.29 การกระจายตัวของแก๊สออกซิเจนบนผิวรอยต่อระหว่างชั้นการกระจายตัวของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ $\eta_{act,c} = 0.1752$ โวลต์ ที่อัตราการไหลขาเข้า 4.934×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที



รูปที่ 4.30 ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนภายในช่องทางการไหล (Bulk concentration) และบนผิวรอยต่อระหว่างชั้นการกระจายตัวของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Surface concentration)

ที่ $\eta_{act,c} = 0.1752$ โวลต์ ที่อัตราการไหลขาเข้าต่างๆ

4.3.2 ผลของความชื้นของอากาศ

เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้านแคโทดในประเทศไทย จึงทำการศึกษาสถิติค่าความชื้นของอากาศในประเทศไทยจากกรมอุตุนิยมวิทยา โดยแสดงดังตารางที่ 4.4

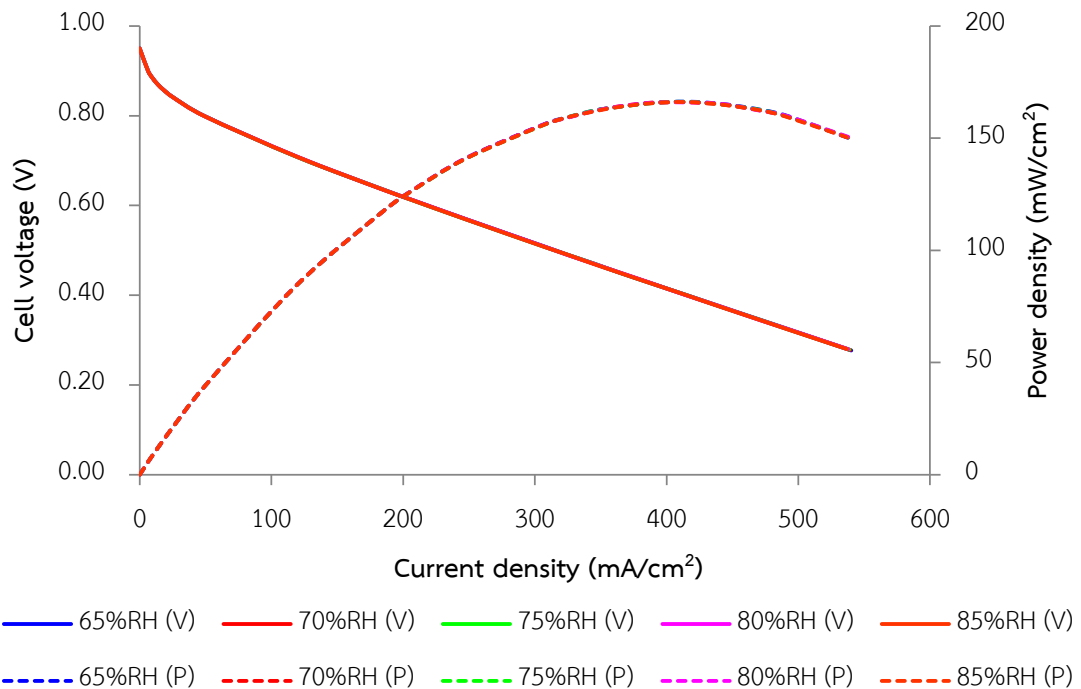
ตารางที่ 4.4 สถิติความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%) ของประเทศไทยในช่วงฤดูกาลต่างๆ [20]

| ภาค | ฤดูหนาว | ฤดูร้อน | ฤดูฝน | ตลอดปี |
|--------------------|---------|---------|-------|--------|
| เหนือ | 73 | 62 | 81 | 74 |
| ตะวันออกเฉียงเหนือ | 69 | 65 | 80 | 72 |
| กลาง | 71 | 69 | 79 | 73 |
| ตะวันออก | 71 | 74 | 81 | 76 |
| ใต้ฝั่งตะวันออก | 81 | 77 | 78 | 79 |
| ใต้ฝั่งตะวันตก | 77 | 76 | 84 | 80 |

จากสถิติค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุดและสูงสุดคือ 62% และ 84% ตามลำดับ ดังนั้นในการศึกษานี้จะทำการศึกษาค่าความชื้นของอากาศทั้งหมด 5 จำนวน คือ 65 70 75 80 และ 85 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบภูมิภาคเดียวจึงไม่มีการพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของอากาศจะส่งผลต่อสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบในอากาศขาเข้าเพียงเท่านั้น โดยคำนวณตาม ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.5 และกราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่ 4.31

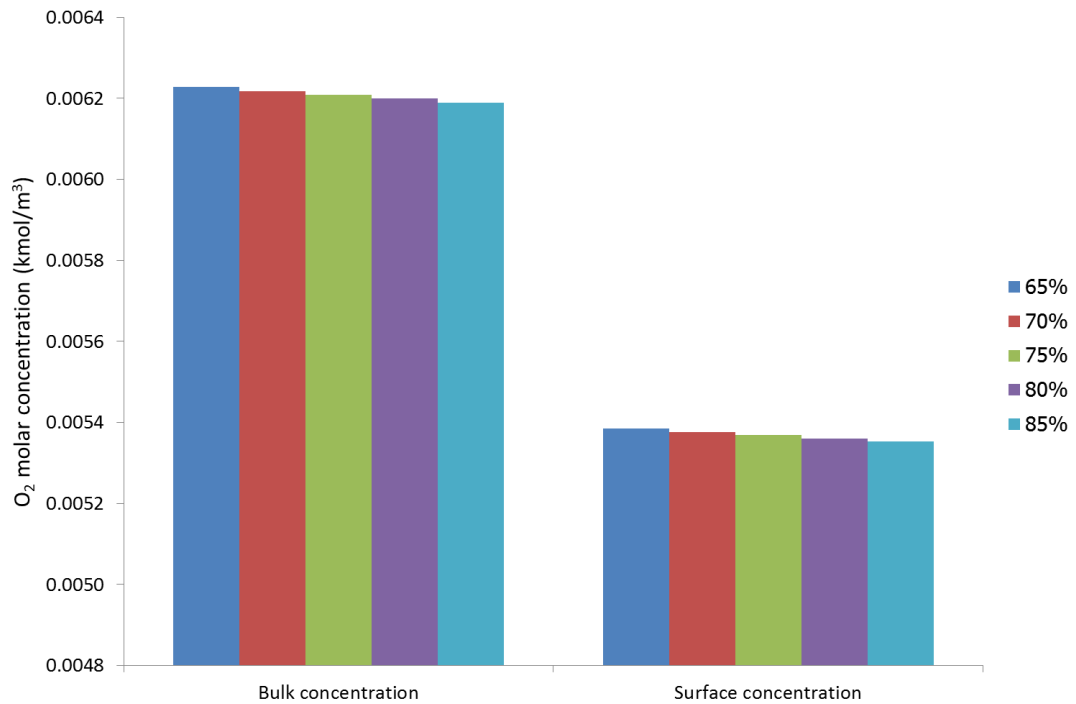
ตารางที่ 4.5 สัดส่วนโดยมวลของอากาศขาเข้าที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ

| ความชื้นสัมพัทธ์ (%) | สัดส่วนโดยมวลของไอน้ำ | สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจน | สัดส่วนโดยมวลของไนโตรเจน |
|----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| 65 | 0.0127 | 0.2271 | 0.7602 |
| 70 | 0.0137 | 0.2268 | 0.7594 |
| 75 | 0.0147 | 0.2266 | 0.7587 |
| 80 | 0.0157 | 0.2264 | 0.7579 |
| 85 | 0.0167 | 0.2262 | 0.7571 |



รูปที่ 4.31 กราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ

จากกราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพบว่า การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ไม่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากในการศึกษานี้ การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์จะส่งผลต่อสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในมวลอากาศขาเข้าเท่านั้น ซึ่งมีผลต่อความเข้มข้นของออกซิเจนในช่องทางไหลของแก๊สน้อยมาก จึงไม่ส่งผลต่อการแพร่ของแก๊สออกซิเจนไปยังขั้วตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 4.32 มีผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงไม่เปลี่ยนแปลง

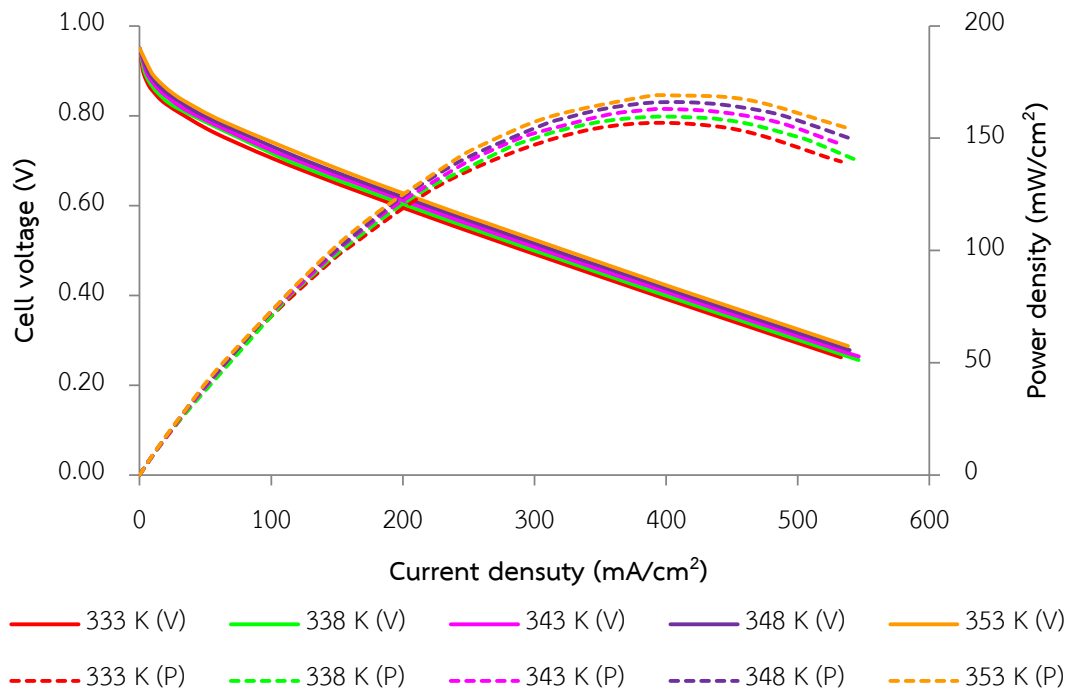


รูปที่ 4.32 ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนภายในช่องทางการไหล (Bulk concentration) และบนผิวรอยต่อระหว่างชั้นการกระจายตัวของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Surface concentration)

ที่ $\eta_{act,c} = 0.1752$ โวลต์ ที่ค่าความชื้นของอากาศต่างๆ

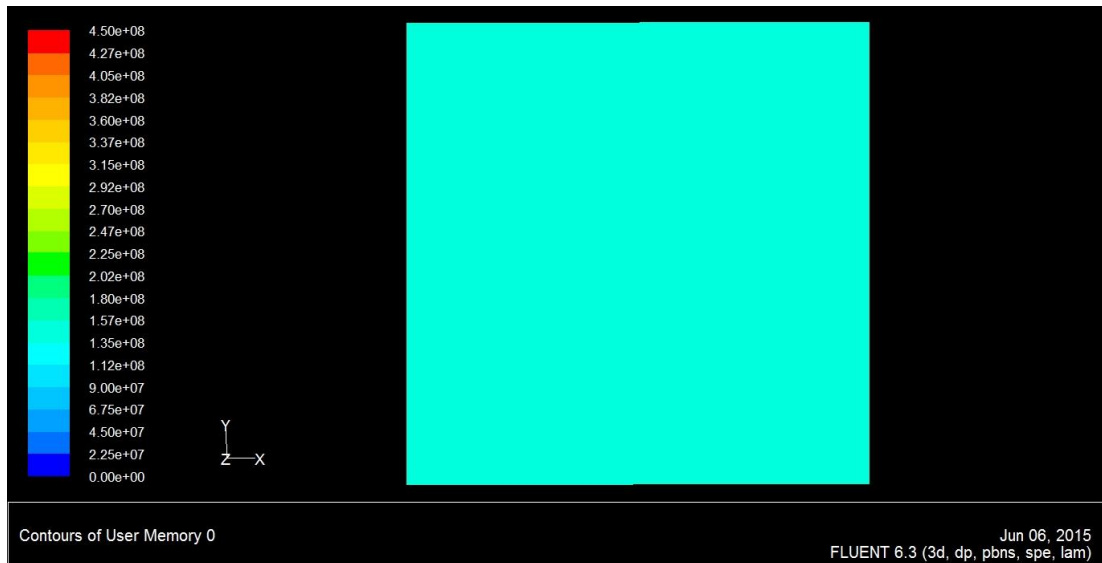
4.3.3 ผลของอุณหภูมิเซลล์เชื้อเพลิง

ในการศึกษานี้จะทำการศึกษาอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงทั้งหมด 5 จำนวน คือ 333 338 343 348 353 และ 358 เคลวิน โดยกราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.33

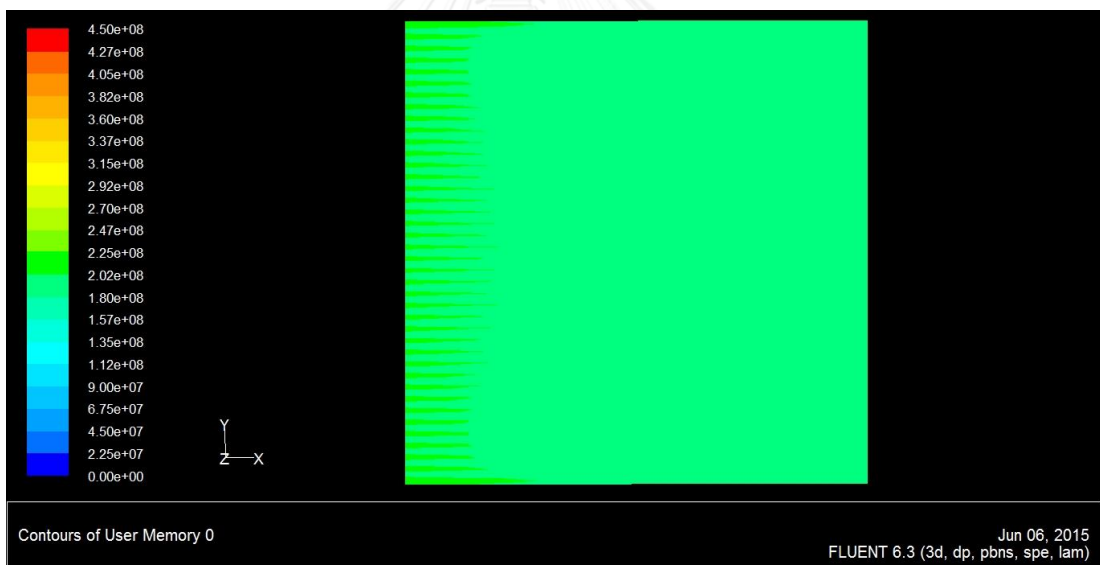


รูปที่ 4.33 กราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงต่างๆ

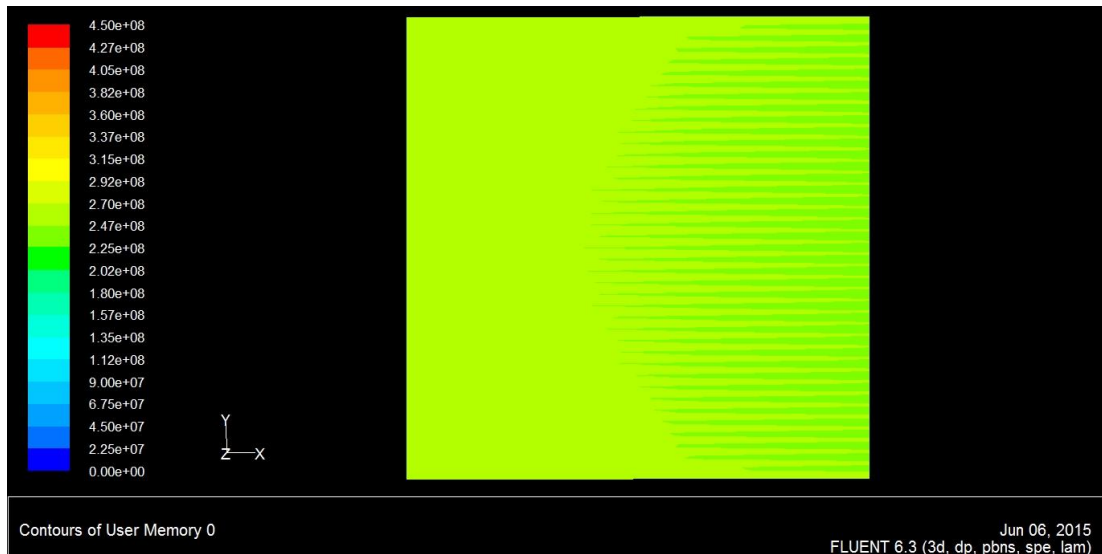
จากกราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพบว่าผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงจะแสดงผลต่อเซลล์เชื้อเพลิงทุกช่วงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยเมื่ออุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าซึ่งในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงคือค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยน ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าท้องถิ่นสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.34 - 4.38 จึงทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงขึ้น มีผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้น



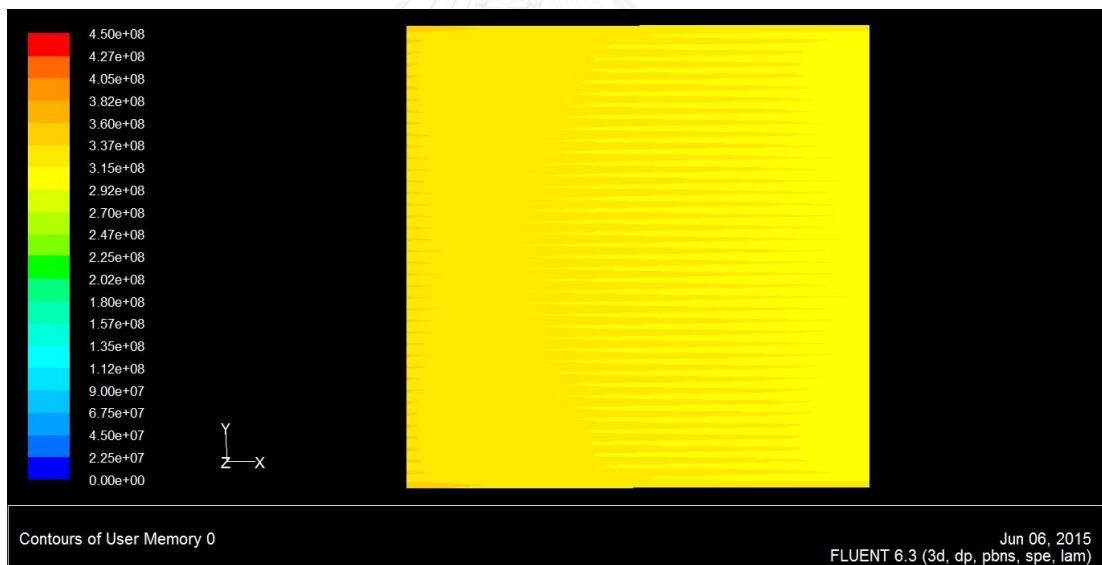
รูปที่ 4.34 การกระจายตัวของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าท้องถิ่นบนผิวรอยต่อระหว่างชั้น
การกระจายตัวของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ $\eta_{act,c} = 0.1666$ โวลต์ และอุณหภูมิ 333 เคลวิน



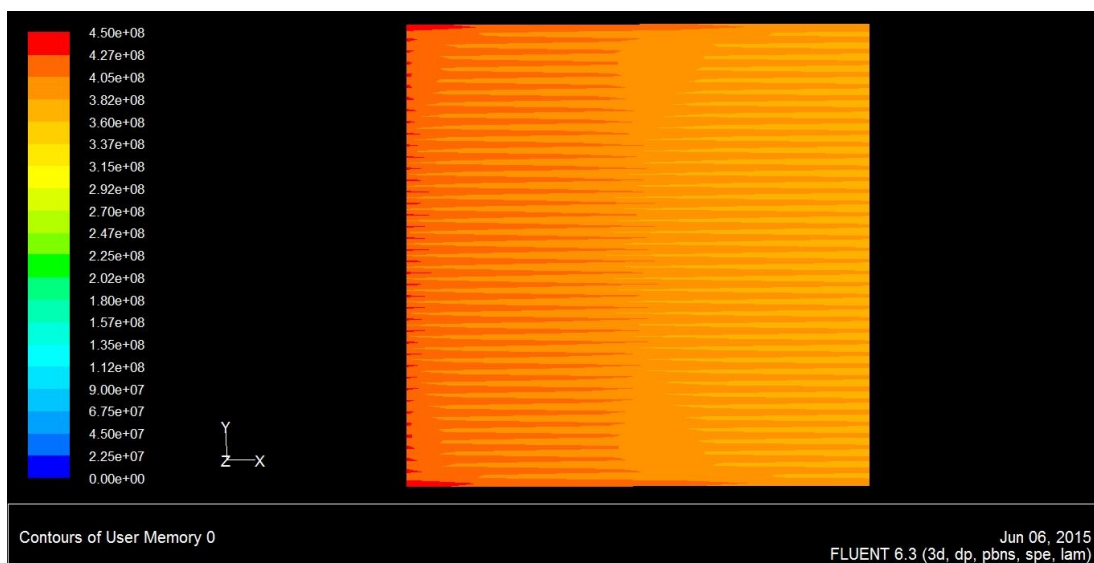
รูปที่ 4.35 การกระจายตัวของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าท้องถิ่นบนผิวรอยต่อระหว่างชั้น
การกระจายตัวของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ $\eta_{act,c} = 0.1666$ โวลต์ และอุณหภูมิ 338 เคลวิน



รูปที่ 4.36 การกระจายตัวของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าท้องถิ่นบนผิวรอยต่อระหว่างชั้น การกระจายตัวของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ $\eta_{act,c} = 0.1666$ โวลต์ และอุณหภูมิ 343 เคลวิน

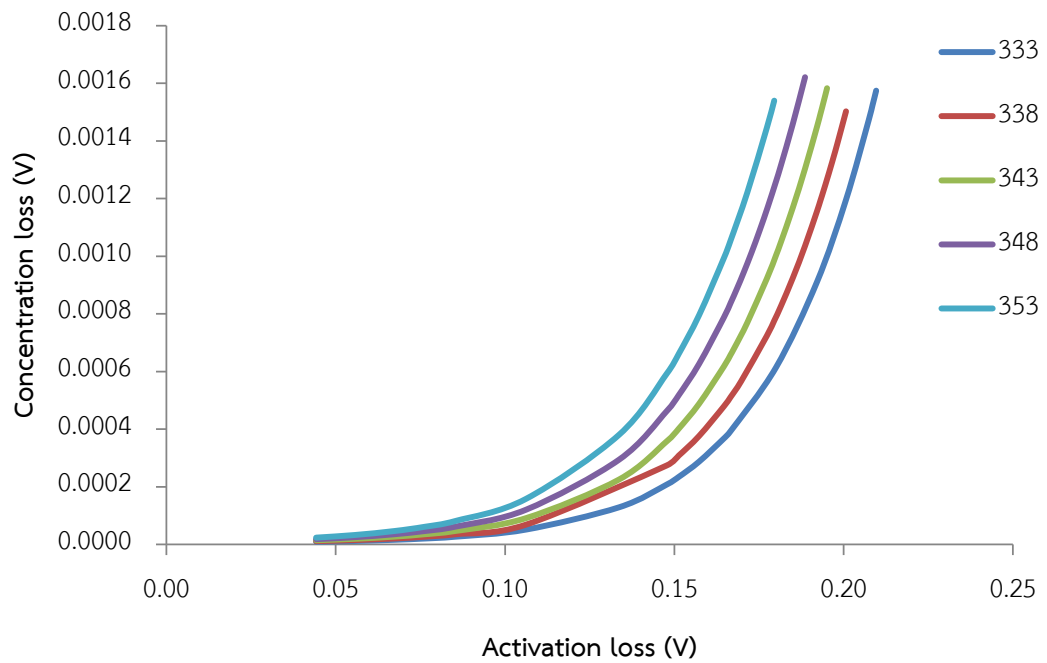


รูปที่ 4.37 การกระจายตัวของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าท้องถิ่นบนผิวรอยต่อระหว่างชั้น การกระจายตัวของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ $\eta_{act,c} = 0.1666$ โวลต์ และอุณหภูมิ 348 เคลวิน



รูปที่ 4.38 การกระจายตัวของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าท้องถิ่นบนผิวรอยต่อระหว่างชั้น การกระจายตัวของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ $\eta_{act.c} = 0.1666$ โวลต์ และอุณหภูมิ 353 เคลวิน

เมื่อพิจารณาค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาริเซชันของความเข้มข้น การเพิ่มขึ้นของ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าจะส่งผลให้ใช้ออกซิเจนในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นทำให้ค่าการสูญเสีย ศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาริเซชันของความเข้มข้นเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.39 แต่ส่งผลต่อสมรรถนะ โดยรวมน้อยกว่าผลจากการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากการศึกษานี้ไม่ได้รวมผลของ อุณหภูมิของเซลล์ต่อความต้านทานไฟฟ้ารวมทั้งความต้านทานการถ่ายโอนประจุจึงทำให้การเพิ่มขึ้น ของอุณหภูมิส่งผลแต่ในด้านบวกต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาริเซชันของความเข้มข้นเทียบกับค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากโพลาริเซชันของปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิต่างๆ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองสามมิติหนึ่งภูมิภาคของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มแบบเปิดด้านแคโทดและทำการจำลองการทำงานของด้านแคโทดเพียงด้านเดียว ด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT 6.3 โดยทำการศึกษาผลของการออกแบบช่องทางการไหลของแก๊ส คือ อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของพื้นที่ตัดขวางและขนาดพื้นที่ตัดขวาง นอกจากนี้ยังศึกษาผลของพารามิเตอร์ดำเนินการ คือ อัตราการไหลของมวลอากาศขาเข้า ความชื้นของอากาศ และอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งผลของแบบจำลองใกล้เคียงกับผลจากการทดลองจริง โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง 0.024 ถึง 0.058 ซึ่งแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงเนื่องจากแบบจำลองเป็นแบบภูมิภาคเดียวจึงไม่สามารถทำนายผลของน้ำในสถานะของเหลวต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มแบบเปิดด้านแคโทดซึ่งมักจะเห็นได้ชัดเจนในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงได้

5.1.1 ผลของการออกแบบช่องทางการไหลของแก๊ส

5.1.1.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของพื้นที่ตัดขวาง

การลดอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของพื้นที่ตัดขวางจะมีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้านแคโทดในช่วงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูง โดยการลดอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของพื้นที่ตัดขวางจะลดระยะห่างระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สที่อยู่ติดกันและเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกับชั้นการแพร่ของแก๊ส ทำให้ออกซิเจนแพร่ไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้มากขึ้น มีผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้านแคโทดเพิ่มขึ้น

5.1.1.2 ผลของขนาดพื้นที่ตัดขวาง

การเพิ่มขนาดพื้นที่ตัดขวางจะมีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้านแคโทดในช่วงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูง โดยผลของการเพิ่มขนาดพื้นที่ตัดขวางต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจะไม่เป็นเชิงเส้น คือ เมื่อขนาดพื้นที่ตัดขวางเพิ่มขึ้นสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจะลดลงในช่วงแรก 2-5 ตารางมิลลิเมตรและกลับมาเพิ่มขึ้นในช่วงถัดมา 5-8 ตารางมิลลิเมตร เนื่องจากพื้นที่ตัดขวางขนาด 2 ตารางมิลลิเมตรมีระยะห่างระหว่างช่องทางการไหลที่ของแก๊สอยู่ติดกันน้อยที่สุดแม้จะมีพื้นที่สัมผัสระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกับชั้นการแพร่ของแก๊สน้อยกว่าพื้นที่ตัดขวางขนาด 8 ตารางมิลลิเมตรก็ตาม ส่วนพื้นที่ตัดขวางขนาด 5 ตารางมิลลิเมตรมีพื้นที่สัมผัสระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สน้อยที่สุดถึงแม้จะมีระยะห่างระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สที่อยู่ติดกันน้อยกว่าพื้นที่ตัดขวางขนาด 8 ตารางมิลลิเมตรก็ตาม

ดังนั้นในการออกแบบช่องทางการไหลของแก๊สทางด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มแบบเปิดด้านแคโทดจะต้องพิจารณาถึงพื้นที่สัมผัสระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกับชั้นการแพร่ของแก๊สและระยะห่างระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สที่อยู่ติดกัน โดยในการออกแบบควรมีพื้นที่สัมผัสสูงและมีระยะห่างระหว่างช่องทางการไหลต่ำ โดยอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างและขนาดของพื้นที่ตัดขวางที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้คือ 0.8 และ 2 ตารางมิลลิเมตรตามลำดับ

5.1.2 ผลของพารามิเตอร์ดำเนินการ

5.1.2.1 อัตราการไหลของมวลอากาศขาเข้า

การเพิ่มอัตราการไหลของมวลอากาศขาเข้าจะมีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้านแคโทดในช่วงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูง โดยการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของมวลอากาศขาเข้าจะเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนในช่องทางการไหลของแก๊ส

ทำให้ออกซิเจนแพร่ไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้มากมีผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้านแคโทดเพิ่มขึ้น

5.1.2.2 ผลของความชื้นของอากาศ

การเพิ่มความชื้นของอากาศจะไม่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้านแคโทดเนื่องจากแบบจำลองเป็นแบบวิภูภาคเดียว ความชื้นของอากาศจะส่งผลต่ออัตราส่วนโดยมวลของแก๊สออกซิเจนในอากาศขาเข้าเท่านั้นซึ่งการเพิ่มความชื้นของอากาศจะทำให้อัตราส่วนโดยมวลของแก๊สออกซิเจนในอากาศขาเข้าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

5.1.2.3 ผลของอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง

การเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าซึ่งก็คือค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยน ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงขึ้น มีผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ควรปรับปรุงเพื่อให้สามารถจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้านแคโทดได้แม่นยำขึ้น ดังต่อไปนี้

- เพิ่มด้านแอโนดลงในแบบจำลองเชิงเรขาคณิตที่จะใช้ในการจำลอง
- พัฒนาแบบจำลองให้เป็นแบบสองวิภูภาคเพื่อให้แบบจำลองสามารถทำนายผลของน้ำในสถานะของเหลวต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้านแคโทด
- พัฒนาแบบจำลองโดยรวมสมการอนุรักษ์พลังงานเพื่อให้แบบจำลองสามารถทำนายผลของความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเปิดด้านแคโทด
- พัฒนาแบบจำลองโดยรวมสมการอนุรักษ์ประจุเพื่อให้แบบจำลองทำงานโดยใช้การกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นค่าป้อนเข้าของการคำนวณ ซึ่งจะทำให้สามารถเปรียบเทียบผลของตัวแปรที่ศึกษาได้ง่ายขึ้น

รายการอ้างอิง

1. Kim, B., et al., *Effects of cathode channel size and operating conditions on the performance of air-blowing PEMFCs*. Applied Energy, 2013. 111: p. 441-448.
2. มะลิ หุ่นสม, เซลล์เชื้อเพลิงและการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า. 1 ed. 2552, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
3. Barbir, F., *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*. 2 ed. 2013, USA: Elsevier.
4. ธรวัฒน์ กรณ์ทอง, แบบจำลองเชิงพลวัต 3 มิติของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มขนาด 5 ตารางเซนติเมตร, in เคมีเทคนิค. 2552, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
5. EERE. *POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE FUEL CELLS*. Available from: <http://energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells#pemfc>.
6. Laboratory, T.F.C.R. *Particle Image Velocimetry Measurements*. Available from: http://www.me.udel.edu/research_groups/prasad/research/pivm.html.
7. Inc., H.F.C., *H-1000 Fuel Cell Stack User Manual*. 2008.
8. Wang, X.-D., Y.-Y. Duan, and W.-M. Yan, *Numerical study of cell performance and local transport phenomena in PEM fuel cells with various flow channel area ratios*. Journal of Power Sources, 2007. 172(1): p. 265-277.
9. Wang, X.-D., et al., *Effects of flow channel geometry on cell performance for PEM fuel cells with parallel and interdigitated flow fields*. Electrochimica Acta, 2008. 53(16): p. 5334-5343.
10. Sadiq Al-Baghdadi, M.A.R., *Performance comparison between airflow-channel and ambient air-breathing PEM fuel cells using three-dimensional computational fluid dynamics models*. Renewable Energy, 2009. 34(7): p. 1812-1824.
11. Manoj Kumar, P. and A.K. Kolar, *Effect of cathode design on the performance of an air-breathing PEM fuel cell*. International Journal of Hydrogen Energy, 2010. 35(2): p. 671-681.

12. Manoj Kumar, P. and A.K. Kolar, *Effect of cathode channel dimensions on the performance of an air-breathing PEM fuel cell*. International Journal of Thermal Sciences, 2010. 49(5): p. 844-857.
13. Wang, X.-D., et al., *Numerical study on channel size effect for proton exchange membrane fuel cell with serpentine flow field*. Energy Conversion and Management, 2010. 51(5): p. 959-968.
14. Manso, A.P., et al., *Numerical analysis of the influence of the channel cross-section aspect ratio on the performance of a PEM fuel cell with serpentine flow field design*. International Journal of Hydrogen Energy, 2011. 36(11): p. 6795-6808.
15. Hashemi, F., S. Rowshanzamir, and M. Rezakazemi, *CFD simulation of PEM fuel cell performance: Effect of straight and serpentine flow fields*. Mathematical and Computer Modelling, 2012. 55(3-4): p. 1540-1557.
16. Spiegel, C., *Fuel Cell Mass Transport*, in *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab*. 2008, Elsevier. p. 97–125.
17. Kiattamrong, S. and A. Sripakagorn. *Effects of the Geometry of the Air Flowfield on the Performance of an Open-Cathode PEMFC*. in *5th SEE*. 2014. Bangkok, Thailand.
18. กรรณก หงษ์ทอง, ผลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม, in เคมีเทคนิค. 2547, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
19. Sasmito, A.P. and A.S. Mujumdar, *Performance evaluation of a polymer electrolyte fuel cell with a dead-end anode: A computational fluid dynamic study*. International Journal of Hydrogen Energy, 2011. 36(17): p. 10917-10933.
20. กรมอุตุนิยมวิทยา. หนังสืออุตุนิยมวิทยา. Available from: <http://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=56>.



ภาคผนวก ก

การคำนวณสัดส่วนโดยมวลของอากาศขาเข้าที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ

ในการคำนวณสัดส่วนโดยมวลของอากาศขาเข้า จะเริ่มจากคำนวณค่าความดันไอของน้ำจากสมการ ก.1

$$P_w = \frac{\%RH \times P_{ws}}{100} \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ $\%RH$ คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์, %)

P_w คือ ค่าความดันไอของน้ำ (พาสคาล, Pa)

P_{ws} คือ ค่าความดันไออิ่มตัวของน้ำ, 3169 (พาสคาล, Pa)

หลังจากนั้นนำค่าความดันไอของน้ำไปคำนวณหาค่าอัตราส่วนผสมซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างมวลของไอน้ำต่อมวลของอากาศแห้งจากสมการ ก.2

$$X = \frac{B \cdot P_w}{(P_{tot} - P_w)} \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ X คือ อัตราส่วนผสม (กรัมต่อกิโลกรัม, g/kg)

B คือ ค่าคงที่โดยขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊ส, 621.9907 (กรัมต่อกิโลกรัม, g/kg)

P_{tot} คือ ค่าความดันรวมของอากาศ, 101325 (พาสคาล, Pa)

เมื่อได้ค่าอัตราส่วนผสมแล้วจึงนำไปหาค่าอัตราส่วนโดยมวลของ ไอน้ำ แก๊สออกซิเจน และ แก๊สไนโตรเจน โดยให้อัตราส่วนโดยมวลของแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจนในอากาศแห้งเท่ากับ 0.23 และ 0.77 ตามลำดับ ซึ่งในการคำนวณจะพิจารณาที่อากาศแห้ง 1 กิโลกรัม

ตัวอย่างเช่น ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 65%

คำนวณค่าความดันไอของน้ำ;
$$P_w = \frac{65 \times 3169}{100} = 2059.85 \text{ Pa}$$

คำนวณค่าอัตราส่วนผสม;
$$X = \frac{621.9907 \times 2059.85}{(101325 - 2059.85)} = 12.9069 \text{ g/Kg}$$

ดังนั้นที่อากาศแห้ง 1 กิโลกรัม

จะมีมวลของไอน้ำ 12.9069 กรัม

มวลอากาศรวม เท่ากับ $1000 + 12.9069 = 1012.9069$ กรัม

อัตราส่วนโดยมวลของไอน้ำ เท่ากับ $\frac{12.9069}{1012.9069} = 0.0127$

จะมีมวลของแก๊สออกซิเจน เท่ากับ $1000 \times 0.23 = 230$ กรัม

อัตราส่วนโดยมวลของแก๊สออกซิเจน เท่ากับ $\frac{230}{1012.9069} = 0.2271$

จะมีมวลของแก๊สไนโตรเจน เท่ากับ $1000 \times 0.77 = 770$ กรัม

อัตราส่วนโดยมวลของแก๊สไนโตรเจน เท่ากับ $\frac{770}{1012.9069} = 0.7602$

โดยค่าที่ได้จากการคำนวณแสดงดังตาราง ก.1

ตารางที่ ก1 ค่าความดันไอ ความดันไออิ่มตัว ค่าอัตราส่วนผสม และค่าสัดส่วนโดยมวลของแก๊ส
องค์ประกอบในอากาศขาเข้าที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ

| RH (%) | pws (Pa) | pw (Pa) | X (g/Kg) | total mass (g) | mass fraction of water | mass fraction of O ₂ | mass fraction of N ₂ |
|-----------|-------------|------------|-------------|-------------------|------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 65 | 3169 | 2059.85 | 12.9069 | 1012.9069 | 0.0127 | 0.2271 | 0.7602 |
| 70 | 3169 | 2218.3 | 13.9220 | 1013.9220 | 0.0137 | 0.2268 | 0.7594 |
| 75 | 3169 | 2376.75 | 14.9403 | 1014.9403 | 0.0147 | 0.2266 | 0.7587 |
| 80 | 3169 | 2535.2 | 15.9619 | 1015.9619 | 0.0157 | 0.2264 | 0.7579 |
| 85 | 3169 | 2693.65 | 16.9867 | 1016.9867 | 0.0167 | 0.2262 | 0.7571 |



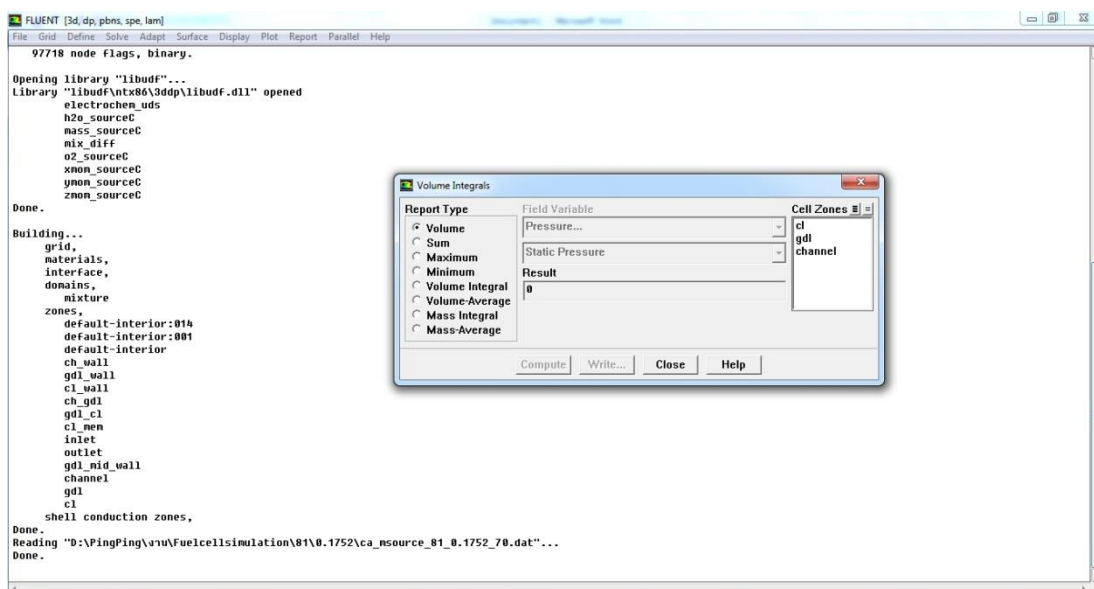
ภาคผนวก ข

คู่มือการใช้โปรแกรมในการคำนวณและแสดงค่าที่ต้องการ

1. การคำนวณและแสดงค่ากระแสไฟฟ้า

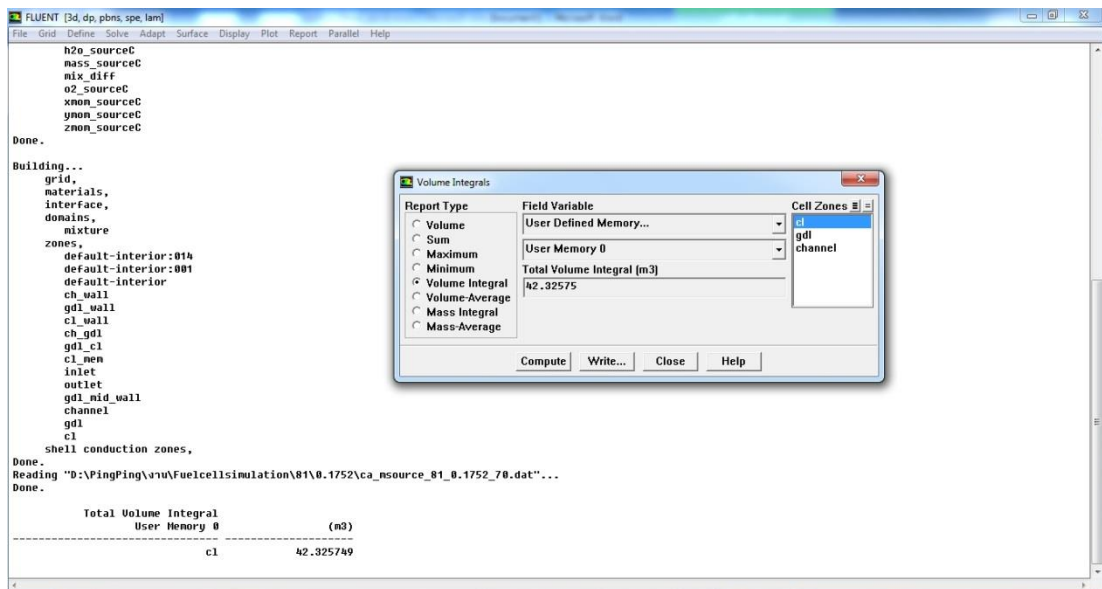
จะมีขั้นตอนดังนี้

- 1.1. หลังจากโปรแกรมคำนวณเสร็จหรือทำการเปิดเพิ่มข้อมูลที่ทำให้การคำนวณเสร็จ เลือกเมนูคำสั่ง Report>Volume Integrals... โปรแกรมจะแสดงหน้าต่าง Volume Integrals ดังรูปที่ ข1



รูปที่ ข1 หน้าต่างโปรแกรม Fluent เมื่อทำการเลือกคำสั่ง Volume Integrals

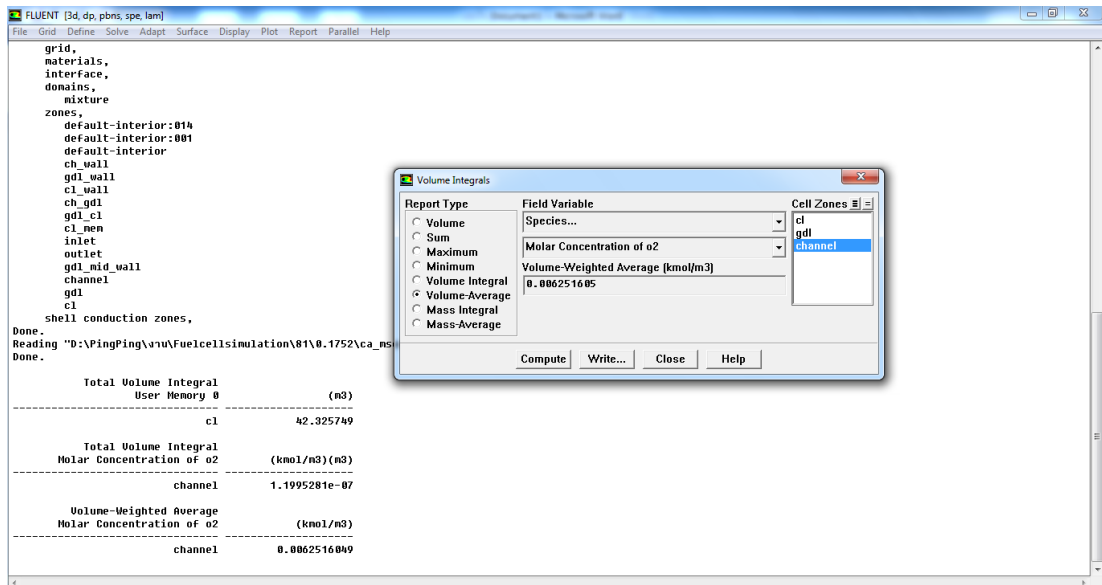
- 1.2. เลือก Report Type เป็น Volume Integral แล้วทำการเลือก Field Variable เป็น User Define Memory>User Define Memory 0 และเลือก Cell Zones เป็น ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ในกรณีนี้คือ c1 แล้วทำการ Compute ค่ากระแสไฟฟ้าจะแสดงในชื่อ Result ดังรูปที่ ข2



รูปที่ ข2 หน้าต่างโปรแกรม Fluent เมื่อทำการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้า

2. การคำนวณและแสดงค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในช่องทางการไหลของแก๊ส จะมีขั้นตอนดังนี้

- 2.1. หลังจากโปรแกรมคำนวณเสร็จหรือทำการเปิดแฟ้มข้อมูลที่ทำการคำนวณเสร็จ เลือกเมนูคำสั่ง Report>Volume Integrals... โปรแกรมจะแสดงหน้าต่าง Volume Integrals ดังรูปที่ ข1
- 2.2. เลือก Report Type เป็น Volume-Average แล้วทำการเลือก Field Variable เป็น Species...>Molar Concentration of o2 และเลือก Cell Zones เป็นช่องทางการไหลของแก๊ส ในกรณีนี้คือ channel แล้วทำการ Compute ค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนจะแสดงในข้อ Result ดังรูปที่ ข3

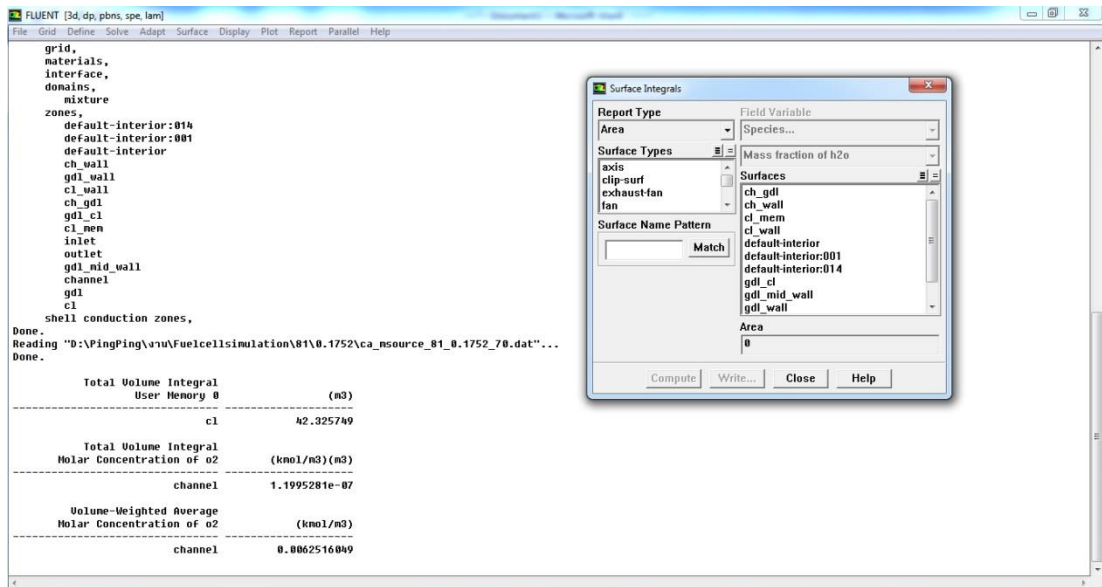


รูปที่ ข3 หน้าต่างโปรแกรม Fluent เมื่อทำการคำนวณค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในช่องทางไหลของแก๊ส

3. การคำนวณและแสดงค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นการแพร่ของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา

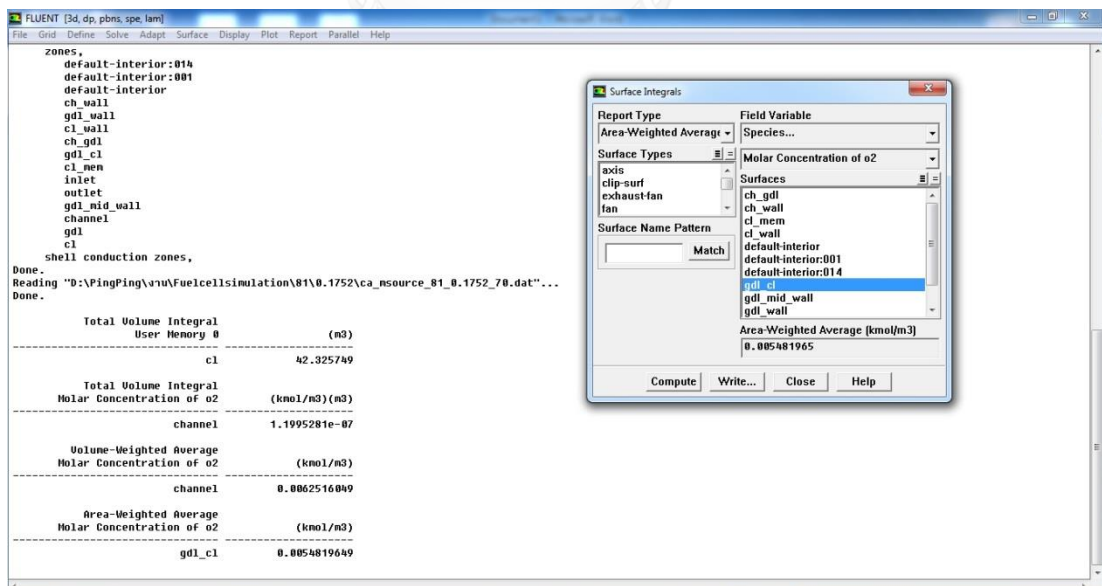
จะมีขั้นตอนดังนี้

- 3.1. หลังจากโปรแกรมคำนวณเสร็จหรือทำการเปิดแฟ้มข้อมูลที่ทำการคำนวณเสร็จ เลือกเมนูคำสั่ง Report>Surface Integrals... โปรแกรมจะแสดงหน้าต่าง Volume Integrals ดังรูปที่ ข4



รูปที่ ข4 หน้าต่างโปรแกรม Fluent เมื่อทำการเลือกคำสั่ง Surface Integrals

3.2. เลือก Report Type เป็น Area-Weighted Average แล้วทำการเลือก Field Variable เป็น Species...>Molar Concentration of o2 และเลือก Surface เป็นบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นการแพร่ของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ในกรณีนี้คือ gdl_cl แล้วทำการ Compute ค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนจะแสดงในข้อ Result ดังรูปที่ ข5



รูปที่ ข5 หน้าต่างโปรแกรม Fluent เมื่อทำการคำนวณค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นการแพร่ของแก๊สกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุชาติ กริแสง เกิดเมื่อวันที่ 25 สิงหาคม 2530 ที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร เมื่อปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

