

การจำลองเชิงตัวเลขสามมิติของผลจากแผ่นกั้นต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มอุณหภูมิสูง



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

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION OF BAFFLES EFFECT ON PERFORMANCE
OF HIGH-TEMPERATURE PEM FUEL CELL

Mr. Wuttisak Kitipanya



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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองเชิงตัวเลขสามมิติของผลจากแผ่นกั้นต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มอุณหภูมิสูง
โดย	นายวุฒิศักดิ์ กิติปัญญา
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)

.....กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. มลธิ ทุนสม)

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

วุฒิศักดิ์ กิติปัญญา : การจำลองเชิงตัวเลขสามมิติของผลจากแผ่นกั้นต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ไฮโดรเจน (THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION OF BAFFLES EFFECT ON PERFORMANCE OF HIGH-TEMPERATURE PEM FUEL CELL)
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม:
 รศ. ดร. บุญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, 125 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการออกแบบรูปร่างของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ไฮโดรเจนที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ไฮโดรเจน สมมติฐานหลักของงานวิจัยนี้คือ เมื่อสารตั้งต้นหรือเชื้อเพลิงไหลในช่องการไหลของแก๊สและถูกกีดขวางด้วยแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สจะทำให้สารตั้งต้นเปลี่ยนทิศทางการไหลและแพร่เข้าสู่ชั้นการแพร่ผ่านและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น ซึ่งจะเพิ่มโอกาสการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของสารตั้งต้นในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้สูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้น ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สช่วยเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้น ในงานวิจัยนี้ สมรรถนะที่ดีที่สุดของเซลล์เชื้อเพลิงพบในกรณีของเซลล์เชื้อเพลิงที่แผ่นกั้นทำมุม 45 องศา และสูง 1.125 มิลลิเมตร โดยมีกำลังไฟฟ้าสุทธิเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.96 เมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สแบบช่องเดี่ยวเมื่ออุณหภูมิดำเนินการเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 20,000 A m⁻² และสมรรถนะเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.01 สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิดำเนินการเท่ากับ 180 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 23,000 A m⁻² สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องการไหลของแก๊สแบบขนานเพิ่มขึ้น เซลล์ที่มีแผ่นกั้นให้กำลังไฟฟ้าสุทธิเพิ่มขึ้นกว่าเซลล์ที่ไม่มีแผ่นกั้นร้อยละ 19.97 เมื่ออุณหภูมิดำเนินการเท่ากับ 100 องศาเซลเซียสและความหนาแน่นกระแส 19,000 A m⁻² นอกจากนี้ยังมีพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงอุณหภูมิดำเนินการ 180 องศาเซลเซียส ให้สมรรถนะที่สูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงอุณหภูมิดำเนินการ 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากพลังงานจลน์ของการเกิดปฏิกิริยาเคมีของปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนและปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนจะเกิดได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5772154923 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS:

WUTTISAK KITIPANYA: THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION OF BAFFLES EFFECT ON PERFORMANCE OF HIGH-TEMPERATURE PEM FUEL CELL. ADVISOR: PROF. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. BENJAPON CHALERMSINSUWAN, Ph.D., 125 pp.

This research has the objective of studying the effect of the gas flow channel baffle configuration on the cell performance of a high-temperature proton exchange membrane fuel cell (HT-PEMFC). The main hypothesis is that when the reactant flows in the gas flow channel and is blocked by baffles, the reactant changes its direction and moves into gas diffusion layers (GDL) and catalyst layers (CL). This will increase the probability of the reactant to react with catalyst more than the HT-PEMFC without baffles. The result of this study showed that the baffles increased the performance of the HT-PEMFC. The best performance of the HT-PEMFC in this study was found with the cell that installed the baffles with an angle of 45 degrees and height of 1.125 mm. In case of single-channel type fuel cell, the net powers were increased by 9.96 and 10.01 percent when the cell was operated at 100-degree Celsius with the current density of 20,000 A.m⁻² and 180-degree Celsius with the current density of 23,000 A m⁻², respectively, comparing to the one without the baffle. In case of parallel-channel type fuel cell, the net powers were increased by 19.97 percent when the cell was operated at 100-degree Celsius with the current density of 19,000 A.m⁻². It was also found that the HT-PEMFC operated at the temperature of 180-degree Celsius showed higher performance than the one operated at 100-degree Celsius. This is because the chemical reaction kinetics of hydrogen oxidation and oxygen reduction reaction (ORR) is increased with the increasing temperature.

Department:	Chemical Technology	Student's Signature
Field of Study:	Chemical Technology	Advisor's Signature
Academic Year:	2015	Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. เบลูจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา และความช่วยเหลืออย่างเต็มที่จนทำให้งานวิจัยชิ้นนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม และรองศาสตราจารย์ ดร. เทิดไทย วัฒนธรรม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณารับเชิญมาเป็นกรรมการการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์อย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ และภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มอบทุนการศึกษา

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยไซเบอร์เนติกส์ และพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และกำลังใจจนทำให้งานวิจัยชิ้นนี้ลุล่วง

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ นายสมเดช กิติปัญญา บิดา นางละอองเดือน กิติปัญญา มารดา นายศราวุฒิ กิติปัญญา พี่ชาย นางสาวเสาวรณีย์ มีรอด และทุกคนในครอบครัว ที่เป็นกำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง	5
2.2 ความหมายและความสำคัญของเซลล์เชื้อเพลิง.....	5
2.3 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงจำแนกตามช่วงอุณหภูมิการทำงาน	6
(ก) เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง	6
(ข) เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก	7
(ค) เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอม	8
(ง) เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์.....	9
(จ) เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่ม	10
(ฉ) เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมทานอลโดยตรง	11
2.4 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่ม	14
2.4.1 แผ่นนำกระแสไฟฟ้า (Current collector plate).....	14

2.4.2	ชั้นประกอบเมมเบรนและขั้วไฟฟ้า (Membrane Electrode Assembly).....	15
2.4.2.1	ขั้วอิเล็กโทรด (Electrode).....	15
2.4.2.2	อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte).....	17
2.5	สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม	18
2.6	แผ่นช่องทางการไหลของแก๊ส.....	21
2.7	การใช้แผ่นกั้นในทิศทางการไหลของแก๊ส	23
2.8	พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์วอลุ่ม	25
2.8.1	สมการควบคุมพื้นฐาน.....	25
2.8.2	การแก้ไขปัญหาการพาและการแพร่	27
2.8.3	ภาวะขอบเขต (Boundary conditions).....	32
2.9	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	39
3.1	การพัฒนาแบบจำลองการไหลทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูง (HT-PEMFC)	39
3.2	สมมติฐานในการสร้างแบบจำลองการไหลทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูง	41
3.3	สมการการควบคุม (Governing equations)	42
3.4	สมการเสริม (Auxiliary Equation).....	45
3.5	ภาวะขอบเขต	47
3.6	ขั้นตอนการคำนวณ.....	48
3.7	พารามิเตอร์การสร้างแบบจำลอง.....	50
3.8	การเปลี่ยนโดเมนคำนวณที่มีการขยายขนาดขึ้น	50
บทที่ 4	ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	52
4.1	การตรวจสอบความเหมาะสมของโดเมนคำนวณ	52

4.1.1 ผลของความอิสระของการแบ่งช่อง (Grid independency).....	52
4.1.2 การเปรียบเทียบผลจากการคำนวณเทียบกับผลการทดลองจริง.....	53
4.2 การศึกษาอุทกพลศาสตร์และการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์ไฮโดรเจน สูงที่มีช่องการไหลของแก๊สแบบเดี่ยว (Single channel)	55
4.2.1 การศึกษาเวกเตอร์ความเร็ว (Velocity vector) ของสารตั้งต้นหรือเชื้อเพลิงใน ส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์ไฮโดรเจนสูง.....	57
4.2.2 การศึกษาสัดส่วนโดยมวล (Mass fraction) ของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์ไฮโดรเจนสูงที่ความหนาแน่นกระแสต่างๆ.....	62
4.2.3 การศึกษาสัดส่วนโดยมวล (Mass fraction) ของออกซิเจนในช่องการไหลของแก๊ส ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์ไฮโดรเจนสูง.....	65
4.2.4 การศึกษาสัดส่วนโดยมวล (Mass fraction) ของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ทางด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์ไฮโดรเจนสูงที่มีรูปร่างของแผ่นกั้นในช่อง การไหลของแก๊สที่แตกต่างกัน	69
4.2.5 การศึกษาสัดส่วนโดยมวล (Mass fraction) ของสารผลิตภัณฑ์หรือไอน้ำใน ส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์ไฮโดรเจนสูง.....	74
4.2.6 การศึกษาความดัน (Pressure) ในส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์ไฮโดรเจน สูง.....	79
4.2.7 การศึกษาความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (Cell power density) และกำลังไฟฟ้าสุทธิ (Net power) ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์ไฮโดรเจนสูงที่มีรูปร่างแผ่นกั้นในช่องการ ไหลของแก๊สแบบต่างๆ	85
4.3 การศึกษาอุทกพลศาสตร์และการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์ไฮโดรเจน สูงที่มีช่องการไหลของแก๊สแบบขนาน (Parallel channel) และมีพื้นที่ตัดขวางในการทำ ปฏิกิริยา 25 ตารางเซนติเมตร	89
4.3.1 การศึกษาสัดส่วนโดยมวล (Mass fraction) ของไฮโดรเจนในเซลล์เชื้อเพลิง ฟิวส์ ไฮโดรเจนสูง	89

4.3.2 การศึกษาสัดส่วนโดยมวล (Mass fraction) ของออกซิเจนในเซลล์เชื้อเพลิง พีอีเอ็มอุณหภูมิสูง	91
4.3.3 การศึกษาสัดส่วนโดยมวล (Mass fraction) ของไอน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูง	93
4.3.4 การศึกษาความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (Cell power density) และกำลังไฟฟ้าสุทธิ (Net power) ของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูงที่มีและไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส	96
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	98
5.1 สรุปผลการวิจัย	98
5.1.1 การศึกษาอุทกพลศาสตร์และการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูงที่มีช่องการไหลของแก๊สแบบเดี่ยว (Single channel).....	98
5.1.1.1 ผลจากการใส่แผ่นกั้นลงไปในช่วงการไหลของแก๊ส	98
5.1.1.1.1 ผลจากมุมของแผ่นกั้นในช่วงการไหลของแก๊ส.....	98
5.1.1.1.2 ผลจากความสูงของแผ่นกั้นในช่วงการไหลของแก๊ส	99
5.1.1.2 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดำเนินการ	99
5.1.2 การศึกษาอุทกพลศาสตร์และการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูงที่มีช่องการไหลของแก๊สแบบขนาน (Parallel channel).....	99
5.1.2.1 ผลจากการใส่แผ่นกั้นลงไปในช่วงการไหลของแก๊ส	99
5.2 ข้อเสนอแนะ	100
รายการอ้างอิง	101
ภาคผนวก.....	103
ภาคผนวก ก	104
ภาคผนวก ข	123
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	125

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง	7
รูปที่ 2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก	8
รูปที่ 2.3 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอนเนตหลอม	9
รูปที่ 2.4 เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์	10
รูปที่ 2.5 เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม	11
รูปที่ 2.6 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมทานอล	13
รูปที่ 2.7 การถ่ายโอนของแก๊ส โปรตอน และอิเล็กตรอนในขั้วอิเล็กโทรด	17
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของวัลโฟเนต ฟลูออโรเอทีลิน	18
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของพอลิเบนซิไมดาโซล (PBI)	18
รูปที่ 2.10 กราฟโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม	19
รูปที่ 2.11 ช่องทางการไหลของแก๊สในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (ก) แบบช่องขนานตรง (ข) แบบ เฉียงต (ค) แบบกระจกเงา (ง) แบบช่องระหว่างนิ้ว (จ) แบบตะแกรงโลหะ และ (ฉ) แบบไม่มี ช่องทางการไหล	23
รูปที่ 2.12 การไหลแบบพาดผ่านชั้นแพร่แก๊สภายใต้สัน (Rib)	24
รูปที่ 2.13 การแบ่งขอบเขตของปัญหาที่สนใจด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มออกเป็นพื้นที่ควบคุม เล็กๆ	26
รูปที่ 2.14 พื้นที่ควบคุมในระบบสองมิติของปัญหาการพาและการแพร่	27
รูปที่ 2.15 พื้นที่ควบคุมที่ผนัง	32
รูปที่ 2.16 การกระจายตัวของความเร็วที่ผนัง	33
รูปที่ 2.17 ลักษณะของผนังเคลื่อนที่	33
รูปที่ 2.18 (ก) ช่องการไหลที่สมมาตร (ข) โดเมนของช่องการไหลที่ใช้ภาวะสมมาตร	34

รูปที่ 3.1 แผนภาพจำลองสามมิติของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่ม.....	40
รูปที่ 3.2 แผนภาพจำลองสามมิติของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มที่มีแผ่นกั้นในช่องทางไหล.....	40
รูปที่ 3.3 โดเมนคำนวณของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มที่มีแผ่นกั้นในช่องทางไหล ก. ไม่มีแผ่นกั้น ข. 90 องศา 1.125 มิลลิเมตร ค. 90 องศา 0.75 มิลลิเมตร ง. 45 องศา 1.125 มิลลิเมตร จ. 45 องศา 0.75 มิลลิเมตร.....	41
รูปที่ 3.4 การแบ่งช่องเล็กๆ ที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลอง (Numerical grid of the model).....	48
รูปที่ 3.5 แผนภาพขั้นตอนของกระบวนการเชิงตัวเลข	49
รูปที่ 3.6 เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มที่มีช่องการไหลของแก๊สแบบขนานและมีพื้นที่ตัดขวางชั้นตัวเร่ง ปฏิกิริยาขนาด 25 ตารางเซนติเมตร.....	51
รูปที่ 4.1 กราฟโพลาริเซชันแสดงความเป็นอิสระของการแบ่งช่องของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่ม อุณหภูมิสูงที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส	53
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบกราฟโพลาริเซชันระหว่างผลการทดลองจริงของ P. Chippar และ H. Ju [3] และ ผลที่ได้จากแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มอุณหภูมิ 100 และ 180 องศา เซลเซียส.....	54
รูปที่ 4.3 กราฟโพลาริเซชันของผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงองศาและความสูงของแผ่นกั้น ต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส.....	56
รูปที่ 4.4 กราฟโพลาริเซชันของผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงองศาและความสูงของแผ่นกั้น ต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส.....	57
รูปที่ 4.5 เวกเตอร์ความเร็วของสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหล ของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m ⁻²	58
รูปที่ 4.6 เวกเตอร์ความเร็วของสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มที่มีแผ่นกั้น 45 องศา สูง 1.125 มิลลิเมตร ในช่องการไหลของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m ⁻²	60

รูปที่ 4.7 เวกเตอร์ความเร็วของสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่แผ่นกั้น 90 องศา สูง 1.125 มิลลิเมตร ในช่องการไหลของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m ⁻²	60
รูปที่ 4.8 เวกเตอร์ความเร็วของสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่แผ่นกั้น 45 องศา สูง 0.75 มิลลิเมตร ในช่องการไหลของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m ⁻²	61
รูปที่ 4.9 เวกเตอร์ความเร็วของสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่แผ่นกั้น 90 องศา สูง 0.75 มิลลิเมตร ในช่องการไหลของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m ⁻²	61
รูปที่ 4.10 สัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนในส่วนต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส และที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m ⁻² ..	62
รูปที่ 4.11 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 1000 A m ⁻²	63
รูปที่ 4.12 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 8000 A m ⁻²	64
รูปที่ 4.13 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 15000 A m ⁻²	64
รูปที่ 4.14 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 20000 A m ⁻²	65
รูปที่ 4.15 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในช่องการไหลของแก๊สที่ไม่มีแผ่นกั้นของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m ⁻²	65
รูปที่ 4.16 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในช่องการไหลของแก๊สที่มีมุมของแผ่นกั้นขนาด 45 องศา สูง 1.125 มิลลิเมตร ของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m ⁻²	67

รูปที่ 4.27 สัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่มีมุมของแผ่นกั้นขนาด 90 องศา สูง 1.125 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m ⁻²	75
รูปที่ 4.28 สัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่มีมุมของแผ่นกั้นขนาด 45 องศา สูง 1.125 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m ⁻²	76
รูปที่ 4.29 สัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่มีมุมของแผ่นกั้นขนาด 90 องศา สูง 0.75 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m ⁻²	76
รูปที่ 4.30 ความดันในส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูงที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m ⁻²	80
รูปที่ 4.31 ความดันในส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูงที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส มุม 45 องศา สูง 1.125 มิลลิเมตร ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m ⁻²	81
รูปที่ 4.32 ความดันในส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูงที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส มุม 90 องศา สูง 1.125 มิลลิเมตร ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m ⁻²	82
รูปที่ 4.33 ความดันในส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูงที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส มุม 45 องศา สูง 0.75 มิลลิเมตร ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m ⁻²	82
รูปที่ 4.34 ความดันในส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูงที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส มุม 90 องศา สูง 0.75 มิลลิเมตร ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m ⁻²	83
รูปที่ 4.35 กราฟความดันลดระหว่างสารตั้งต้นขาเข้าและสารตั้งต้นขาออกทางด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่มีรูปร่างของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส ที่แตกต่างกัน.....	84
รูปที่ 4.36 กราฟความดันลดระหว่างสารตั้งต้นขาเข้าและสารตั้งต้นขาออกทางด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ที่มีรูปร่างของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส ที่แตกต่างกัน.....	84
รูปที่ 4.37 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่มีรูปร่างแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สแบบต่างๆ.....	86
รูปที่ 4.38 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ที่มีรูปร่างแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สแบบต่างๆ.....	86

รูปที่ 4.52 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่มีแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้นในช่อง การไหลของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	97
รูปที่ 4.53 กำลังไฟฟ้าสุทธิของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่มีแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหล ของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	97
รูปที่ ข.1 กราฟความดันที่เกิดจากความเร็วของสารตั้งต้นขาเข้าทางด้านแคโทดของเซลล์ เชื้อเพลิง ฟิวเอ็ลอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่มีรูปร่างของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่ แตกต่างกัน	123
รูปที่ ข.2 กราฟความดันที่เกิดจากความเร็วขาเข้าของสารตั้งต้นทางด้านแคโทดของเซลล์ เชื้อเพลิง ฟิวเอ็ลอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ที่มีรูปร่างของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่ แตกต่างกัน	123
รูปที่ ข.3 กราฟความดันที่เกิดจากความเร็วขาเข้าของสารตั้งต้นทางด้านแอโนดของเซลล์ เชื้อเพลิง ฟิวเอ็ลอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่มีรูปร่างของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่ แตกต่างกัน	124
รูปที่ ข.4 กราฟความดันที่เกิดจากความเร็วขาเข้าของสารตั้งต้นทางด้านแอโนดของเซลล์ เชื้อเพลิง ฟิวเอ็ลอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ที่มีรูปร่างของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่ แตกต่างกัน	124

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตารางการเปรียบเทียบลักษณะการทำงานและสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ	14
ตารางที่ 2.2 สมบัติของแผ่นช่องทางการไหลของแก๊ส	22
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์การถ่ายโอน.....	44
ตารางที่ 3.2 พจน์เพิ่มเติมสำหรับแบบจำลองหนึ่งวัฏภาค	45
ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มอุณหภูมิสูง (HT-PEMFC).....	47
ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่ม และภาวะการดำเนินการ	50
ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มมีช่องการไหลของแก๊สแบบขนานที่มีขนาดพื้นที่ตัดขวางของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 25 ตารางเซนติเมตร	51
ตารางที่ 4.1 เปรอ์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลองจริงของ P. Chippar และ H. Ju [3] และ ผลที่ได้จากแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส.....	54
ตารางที่ 4.2 เปรอ์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลองจริงของ P. Chippar และ H. Ju [3] และ ผลที่ได้จากแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส.....	55
ตารางที่ 4.3 สัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในส่วนประกอบต่างๆ ทางด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มอุณหภูมิสูง ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m ⁻²	77
ตารางที่ 4.4 ความดันลระหว่างความดันขาเข้าและขาออกของอากาศในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ทางด้านแคโทด ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m ⁻²	78

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

การวิเคราะห์ตามทฤษฎีและการตรวจสอบการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่อุณหภูมิสูง (120-150 องศาเซลเซียส) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลได้หลายด้านดังต่อไปนี้ ด้านปฏิกิริยาขั้วไฟฟ้าพลังงานจลน์ (electrode reaction kinetics) ปฏิกิริยาของไฮโดรเจนออกซิเดชันและปฏิกิริยาออกซิเจนรีดักชัน (oxygen reduction reaction ORR) จะเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูงโดยเฉพาะปฏิกิริยาออกซิเจนรีดักชัน ด้านความทนทานต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ การดูดซับของคาร์บอนมอนอกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมจะลดลงที่อุณหภูมิสูง ดังนั้น ความทนทานต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงที่ความบริสุทธิ์สูงจึงเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิตเชื้อเพลิง ด้านการจัดการความร้อน การที่เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ความร้อนที่แตกต่างระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลกับสิ่งแวดล้อมมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันมากทำให้การระบายความร้อนออกจากเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลทำได้ดีกว่าการดำเนินงานที่อุณหภูมิต่ำ ด้านการจัดการน้ำ เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลทำงานที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิสูงมากกว่า 100 องศาเซลเซียส สถานะของน้ำจะมีสถานะเดียวคือสถานะไอน้ำ ดังนั้น การถ่ายเทมวลของน้ำในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและชั้นแพร่แก๊สจึงมีการถ่ายเทมวลของน้ำและการรักษาสมดุลของน้ำในแต่ละชั้นได้ดียิ่งขึ้น และด้านตัวเร่งปฏิกิริยา การเพิ่มอุณหภูมิการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลทำให้ปฏิกิริยาขั้วไฟฟ้าพลังงานจลน์ (electrode reaction kinetics) เพิ่มขึ้นอย่างมากส่งผลให้มีความเป็นไปได้ที่จะไม่ใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมมีราคาแพง ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่แพลทินัมจึงเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย [1]

โดยทั่วไปสารตั้งต้นจะไหลไปตามช่องการไหลไปยังชั้นแพร่แก๊สของชั้นประกอบเมมเบรนและขั้วไฟฟ้า (membrane-electrode assembly MEA) ต่อจากนั้นแก๊สจะแพร่ผ่านชั้นแพร่แก๊สไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วเกิดปฏิกิริยาที่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ในทางกลับกันอาจจะมีสารตั้งต้นอีกส่วนหนึ่งไหลออกจากชั้นแพร่แก๊สโดยไม่เกิดปฏิกิริยา ทำให้เกิดการสูญเสียแก๊สซึ่งไม่เกิดปฏิกิริยาที่บริเวณทางออกของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลเป็นผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง พื้นผิวของช่องการไหลสัมผัสกับชั้นแพร่แก๊สใช้ประโยชน์ได้เพียง 60 เปอร์เซ็นต์ของพื้นผิวที่เกิดปฏิกิริยาทั้งหมดของเซลล์ จึง

เป็นสิ่งที่สำคัญมากที่ควรเพิ่มการไหลเวียนของแก๊สในช่องการไหล เพื่อเพิ่มสัดส่วนของแก๊สที่เกิดปฏิกิริยาและสามารถกำจัดน้ำได้ดีขึ้น การไหลเวียนของแก๊สภายใต้สัน (rib) สามารถเพิ่มได้โดยการเพิ่มความดันในช่องที่ติดกันของโครงสร้างแผ่นช่องทางการไหลของแก๊สแบบสองขั้ว (bipolar plate) ของสนามการไหลที่คดเคี้ยว ด้วยการใส่แผ่นกั้น (baffles) ในช่องการไหลของแก๊ส โดยม้งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพช่วยเพิ่มปริมาณของแก๊สที่จะไหลไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยา [2]

เทคโนโลยีการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงที่มีผู้ศึกษาแล้วนำมาใช้คือ แผ่นกั้นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่นำมาวางการไหลของของไหลในช่องแก๊สและทำให้เกิดการเปลี่ยนเส้นทางการไหลของเชื้อเพลิงเข้าไปยังชั้นแพร่แก๊ส (Gas diffusion Layer GDL) เพื่อเพิ่มโอกาสให้สารตั้งต้นเข้าถึงชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้ามากขึ้นตามไปด้วย ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการสร้างแบบจำลองสามมิติเชิงตัวเลขเพื่อใช้ในการศึกษาผลกระทบของการติดตั้งแผ่นกั้นที่มีต่อการขนส่งสารตั้งต้นในภาวะอุณหภูมิไม่คงที่และต่อกำลังไฟฟ้าสุทธิของเซลล์ในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มที่ดำเนินงานที่อุณหภูมิสูง

1.2 วัตถุประสงค์

1. พัฒนาแบบจำลองสามมิติของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มที่ทำการดำเนินงานที่อุณหภูมิสูง
2. ศึกษาผลของการติดตั้งแผ่นกั้นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูในสนามการไหลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำการดำเนินงานที่อุณหภูมิสูง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

สร้างแบบจำลองสามมิติของเซลล์เชื้อเพลิงแบบฟิวเอ็่มอุณหภูมิสูง แบบช่องการไหลของแก๊สเดี่ยว (single channel) ขนาด 2.25 ตารางเซนติเมตร และแบบช่องการไหลของแก๊สแบบขนาน (parallel channel) ขนาด 25 ตารางเซนติเมตร เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลและปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ระหว่างช่องการไหลของแก๊สที่มีแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้น โดยพื้นที่ส่วนบนของแผ่นกั้นไม่มีเปลี่ยนแปลง โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณคือ ANSYS FLUENT 16.2 และนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์และเสนอแนะการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่ม

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ประมวลความรู้เกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่ดำเนินงานที่อุณหภูมิสูง สนามการไหลภายในเซลล์เชื้อเพลิงและเมมเบรน poly (2,2'(m-phenylene)-5,5'bibenzimidazole) (PBI) เพื่อจำลองการไหลภายในช่องสนามการไหล
2. สร้างแบบจำลอง 3 มิติขนาด 3.99 X 100 X 2.00 ลูกบาศก์มิลลิเมตร สำหรับช่องการไหลของแก๊สภายในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่ดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงโดยใช้โปรแกรม Gambit พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยเขียนภาษาซีเพื่อจำลองการไหลภายในช่องสนามการไหลให้สมบรูณ์มากยิ่งขึ้น โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มในการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขด้วยขั้นตอนกระบวนการแบบ SIMPLE-C สำหรับหาผลเฉลย
3. ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมด้วยการทดสอบเทียบผลกับข้อมูลการทดลองจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ Chhipar และคณะ [3]
4. ศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนค่าขององศาและความสูงของแผ่นกั้นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูในช่องการไหลของแก๊สแบบตรงของแผ่นช่องทางการไหลของแก๊สแบบสองขั้วในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่ดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหลต่างๆภายในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม เช่น ความร้อนภายในช่องการไหลของแก๊ส ความเข้มข้นของสารตั้งต้น รูปแบบอุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม เป็นต้น และเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม เช่น เส้นโค้งโพลาริสซ์ กำลังไฟฟ้าสุทธิขาออก เป็นต้น
5. นำแผ่นกั้นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีค่าขององศาและความสูงที่ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด มาใช้กับช่องการไหลของแก๊สแบบขนานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มขนาดของพื้นที่ทำปฏิกิริยา 25 ตารางเซนติเมตร และดำเนินงานที่อุณหภูมิสูง
6. วิเคราะห์ สรุปผลการทดลอง เขียนบทความและวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แบบจำลองสามมิติของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์
2. ได้แบบแผ่นกั้นรูปลี่เหลี่ยมคางหมูที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งในช่องการไหลของแก๊สของแผ่นช่องทางการไหลของแก๊สแบบสองขั้วของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ที่ดำเนินงานที่อุณหภูมิสูง



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปพลังงานเคมีของสารตั้งต้นให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการเผาไหม้ซึ่งจะได้ไอน้ำและความร้อนเป็นผลพลอยได้ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงจึงมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำงานต่อเนื่องตราบใดที่ยังมีการป้อนเชื้อเพลิงเพลิงเข้าสู่ระบบและมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงกว่ากระบวนการเปลี่ยนรูปพลังงานชนิดอื่น เช่น เครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน เพราะการเปลี่ยนพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีขั้นตอนเดียว ในขณะที่การเปลี่ยนรูปพลังงานโดยเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในจะประกอบด้วยขั้นตอนการเปลี่ยนรูปพลังงานอย่างน้อย 3 ขั้นตอน จึงทำให้มีการสูญเสียสมรรถนะมากในขั้นตอนการเปลี่ยนรูปพลังงาน เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิด ซึ่งชนิดที่กำลังได้รับความสนใจวิจัยพัฒนาในประเทศไทยคือ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดพอลิเมอร์หรือเซลล์เชื้อเพลิงพอลิเมอร์ (Proton exchange membrane fuel cell หรือ PEM fuel cell) เพราะว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่สูง มีขนาดเล็กจึงเหมาะสำหรับเป็นแหล่งพลังงานให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก หรืออุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนที่ เช่น โทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์แบบพกพา และทำงานที่อุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 100 องศาเซลเซียส) ความดันที่ใช้ประมาณ 1-2 บรรยากาศ ซึ่งง่ายต่อการควบคุมความปลอดภัยของกระบวนการ สำหรับ ประเทศไทยมีหลายหน่วยงานทั้งภาครัฐบาลและเอกชนรวมถึงหน่วยงานการศึกษากำลังวิจัยพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำงานพัฒนาส่วนประกอบต่างๆ โดยใช้วัสดุภายในประเทศเพื่อลดการนำเข้าชิ้นส่วนและต้นทุนการผลิตเซลล์เชื้อเพลิง โดยคาดหวังว่าจะนำเซลล์เชื้อเพลิงพอลิเมอร์มาใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับการคมนาคมขนส่งและอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบพกพา [4]

2.2 ความหมายและความสำคัญของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นเครื่องมือทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical device) ที่เปลี่ยนรูปพลังงานเคมี (Chemical energy) ของเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้า (Electrical energy) โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการเผาไหม้ ลักษณะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเหมือนกับแบตเตอรี่คือผลิตกระแสไฟฟ้าโดยตรงจากเชื้อเพลิงด้วยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าและมีส่วนประกอบหลักที่เหมือนกันคือ ขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์ ข้อแตกต่างระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงและแบตเตอรี่คือแบตเตอรี่เป็นเครื่อง

เก็บพลังงาน (Energy storage) ปริมาณพลังงานสูงสุดและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จะขึ้นอยู่กับปริมาณเชื้อเพลิงที่บรรจุขั้วไฟฟ้าในแบตเตอรี่ที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลง ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงทำหน้าที่เป็นเครื่องมือเปลี่ยนรูปพลังงานซึ่งสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ระบบ ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงจะไม่ถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจึงทำให้อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าสูง ดังนั้น อายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงจึงยาวนานกว่าแบตเตอรี่ [4]

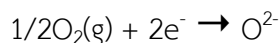
เซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะที่เหมือนกับเครื่องยนต์เผาไหม้ (Combustion engine) คือมีการเก็บแก๊สเชื้อเพลิงและตัวออกซิแดนต้นนอกตัวเครื่อง แต่มีความแตกต่างกันในเรื่องของวิธีการเปลี่ยนรูปพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าในเครื่องยนต์เผาไหม้จะเป็นแบบหลายขั้นตอน (Multistep energy-conversion process) กล่าวคือ เครื่องยนต์เผาไหม้จะเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานความร้อน (Thermal energy) ก่อนด้วยการเผาไหม้ จากนั้นจึงเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานจลน์ (Kinetic energy) ด้วยเครื่องยนต์ความร้อน (Heat engine) และจึงเปลี่ยนพลังงานจลน์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Electric generator) ซึ่งถูกขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ความร้อน

2.3 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงจำแนกตามช่วงอุณหภูมิการทำงาน

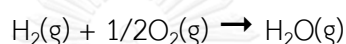
อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ช่วง คือ อุณหภูมิระดับต่ำ (ต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส) ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมทานอลโดยตรง เซลล์เชื้อเพลิงแบบเอลคาไลน์ที่ใช้พอลิเมอร์เป็นอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิระดับกลาง (150-250 องศาเซลเซียส) ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก และเซลล์เชื้อเพลิงแบบเอลคาไลน์ชนิด Bacon type และอุณหภูมิระดับสูง (มากกว่า 650 องศาเซลเซียส) ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง และเซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอนเนทลอม [4]

(ก) เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมและโรงงานไฟฟ้าขนาดใหญ่ เนื่องจากสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูง อิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือ เซรามิกของแข็งที่มีความเป็นรูพรุน เช่น Y_2O_3 stabilized ZrO_2 ซึ่งมีสภาพนำ O^{2-} สูง ขั้วแอโนด ได้แก่ $Co-ZrO_2$ ส่วนแคโทดคือ $Sr-doped LaMnO_3$ อุณหภูมิการทำงานจะอยู่ในช่วง 600-1,000 องศาเซลเซียส สมรรถนะในการผลิตกระแสไฟฟ้าอาจสูงถึงร้อยละ 60-85 เมื่อ

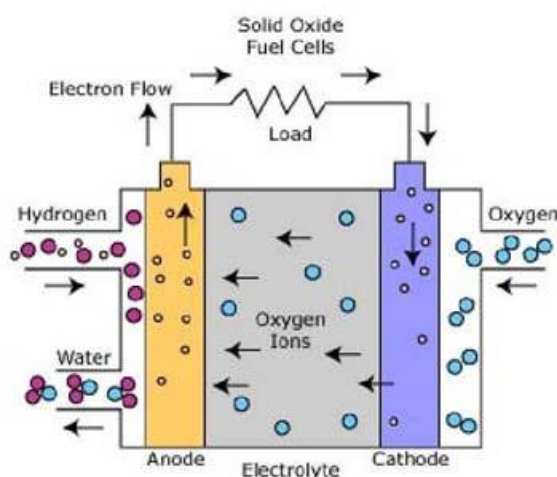
ใช้ในระบบผลิตกระแสไฟฟ้าร่วม (Co-generator) ปฏิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดและแอโนด (Spiegel 2007) โดยปฏิริยาแสดงได้ดังนี้



ไอออน O^{2-} ที่เกิดจากปฏิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วแอโนดและเกิดปฏิริยาออกซิเดชันได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่เกิดจะเคลื่อนที่ผ่านเครื่องดัดการกระแสไฟฟ้า (Load) ไปยังขั้วแคโทดและเกิดปฏิริยากับแก๊สออกซิเจน ปฏิริยารวมที่เกิดขึ้นแสดงโดย



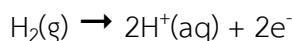
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้นอกจากจะผลิตกระแสไฟฟ้าสูงมากกว่า 100 กิโลวัตต์แล้ว ยังสามารถผลิตความร้อนที่อุณหภูมิสูงถึง 800-1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์ได้ในอุตสาหกรรม ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือมีเสถียรภาพสูง สามารถใช้ตัวเร่งปฏิริยาได้หลายชนิด แต่มีข้อเสียคือใช้เวลาเริ่มต้นในการทำงานนาน และอาจมีการชำรุดหรือการกัดกร่อนของส่วนประกอบเนื่องจากการทำงานที่อุณหภูมิสูง [4]



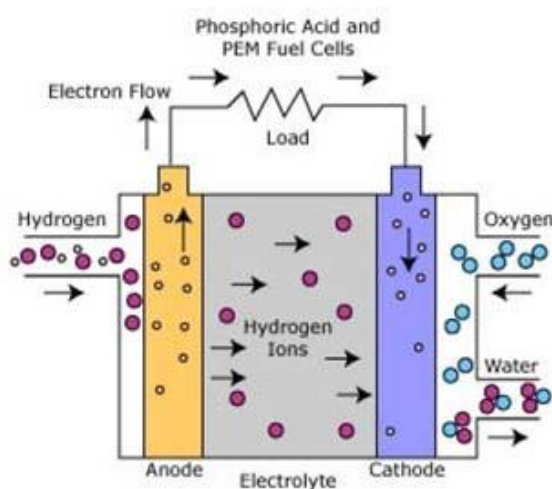
รูปที่ 2.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง [www.neutron.rmutphysics.com]

(ข) เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก อิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก เป็นกรดฟอสฟอริกเข้มข้น (H_3PO_4) มีขั้วแอโนดคือ Pt/C ส่วนแคโทดคือคาร์บอน (C) ช่วงของ

อุณหภูมิการทำงานอยู่ที่ 150-200 องศาเซลเซียส กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถผลิตได้มากถึง 200 กิโลวัตต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดและขั้วแอโนดที่ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงและออกซิเจนเป็นตัวออกซิแดนต์ (Spiegel, 2007) ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดแสดงได้ดังนี้



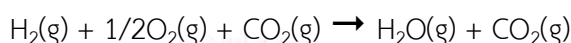
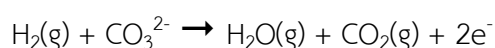
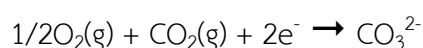
ผลิตภัณฑ์ที่ได้ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดคือ โปรตอนและอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนและเครื่องดัดการกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วแคโทดและเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและกระแสไฟฟ้า เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริกสามารถทนต่อการดูดซับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยาได้สูงถึงร้อยละ 1.5 จึงทำให้สามารถใช้สารตั้งต้นหรือเชื้อเพลิงได้หลากหลายชนิด ได้แก่ แก๊สธรรมชาติ เมทานอล หรือเนฟทา และสามารถมีสมรรถนะสูงถึงร้อยละ 40 นอกจากนี้น้ำที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยายังมีอุณหภูมิสูงสามารถนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าร่วมได้ ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริกคือมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพง และมีสมรรถนะที่ต่ำกว่าเซลล์เชื้อเพลิงประเภทอื่น [4]



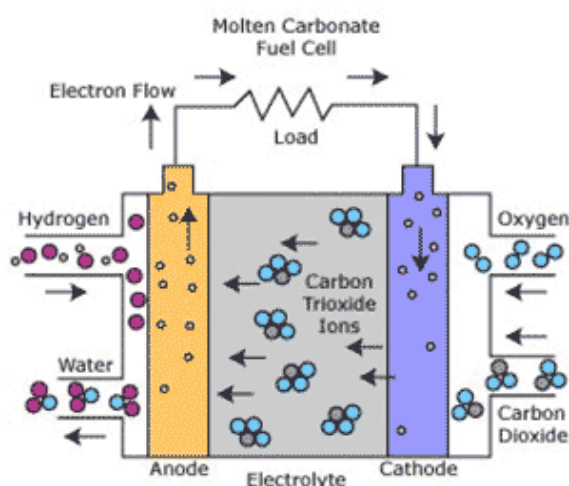
รูปที่ 2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก [www.neutron.rmutphysics.com]

(ค) เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอนเนตหลอมจะใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์จำพวก แอลคาไลต์คาร์บอนเนต ได้แก่ Li_2CO_3 หรือ K_2CO_3 อยู่ในเมทริกซ์ของเซรามิก LiAlO_2 ขั้วแอโนด ได้แก่ $\text{Ni} + 10\text{wt}\%\text{Cr}$ ส่วนแคโทด ได้แก่ NiO อุณหภูมิการทำงานอยู่ในช่วง 600-700 องศาเซลเซียส ที่

อุณหภูมินี้แอลคาไลต์คาร์บอเนตจะหลอมเหลว เรียกว่า เกลือหลอม (Molten salt) ที่มีสภาพการนำไอออนสูง เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอมสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดประมาณ 500 กิโลวัตต์ (Spiegel, 2007) ปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ผลิตภัณฑ์เป็น CO_3^{2-} ซึ่ง CO_3^{2-} จะเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันร่วมกับแก๊สไฮโดรเจนได้ผลิตภัณฑ์เป็น CO_2 ปฏิกิริยาทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังนี้



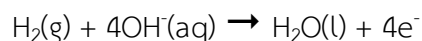
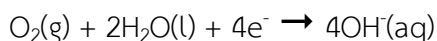
ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอมคือมีประสิทธิภาพสูง สามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายชนิด ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สธรรมชาติ โพรเพน หรือแก๊สที่ได้จากการแปรสภาพเชื้อเพลิงมาเป็นแก๊ส (Gasification) และยังสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับปั๊มความร้อนเคมี (Chemical heat pump) ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอมมีเวลาการเริ่มใช้งานที่นาน และมีการกัดกร่อนของส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากอุณหภูมิการดำเนินงานที่สูง [4]



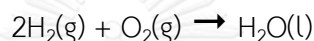
รูปที่ 2.3 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอม [www.neutron.rmutphysics.com]

(ง) เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์ มีสมรรถนะสูงถึงร้อยละ 70 อิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์คือสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) มีช่วงอุณหภูมิการทำงานอยู่

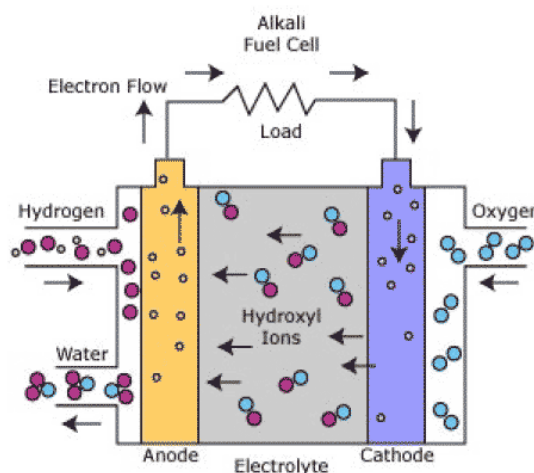
ในช่วง 50-200 องศาเซลเซียส มีขั้วแอโนดเป็นแพลทินัม (Pt) หรือ (Ni) ส่วนขั้วแคโทดเป็นคาร์บอน (C) เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อยู่ในช่วง 10-100 กิโลวัตต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดและแอโนดสามารถแสดงได้ดังนี้



ขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนร่วมกับน้ำแล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็น OH^- แล้ว OH^- จะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วแอโนดและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันร่วมกับแก๊สไฮโดรเจน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ แสดงปฏิกิริยาดังนี้



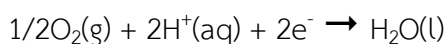
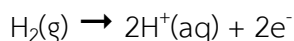
ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์คือมีเวลาเริ่มใช้งานที่น้อย สมรรถนะสูง ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดเกิดได้อย่างรวดเร็วเพราะว่าอิเล็กโทรไลต์เป็นสารแอลคาไลน์ อิเล็กโทรไลต์มีราคาที่ถูก และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ อาจจะเป็นแพลทินัมหรือโลหะอื่นๆ ที่มีราคาถูกกว่าได้ ได้แก่ นิกเกิล ฯลฯ แต่เชื้อเพลิงหรือสารตั้งต้นและสารออกซิแดนต์ต้องเป็นสารบริสุทธิ์เท่านั้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาทนต่อการดูดซับคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ต่ำ [4]



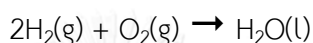
รูปที่ 2.4 เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์ [www.neutron.rmutphysics.com]

(จ) เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม ได้รับความสนใจมากในการนำมาผลิตพลังงานเนื่องจากมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำ (30-100 องศาเซลเซียส) อิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิง

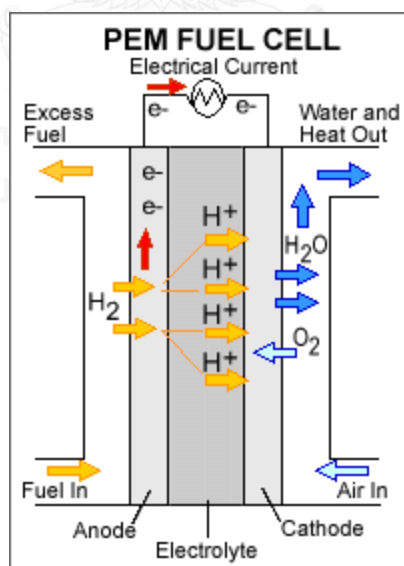
พื้เอ๋มเป็นพอลิเมอร์ที่นำโปรตอนได้ดี ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันมาในเซลล์เชื้อเพลิงพื้เอ๋มคือแพลทินัม ปฏิกิริยาที่เกิดในเซลล์เชื้อเพลิงพื้เอ๋มแสดงได้ดังนี้ (Spiegel, 2007)



ที่ขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้โปรตอนและอิเล็กตรอน หลังจากนั้นโปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไปยังขั้วแคโทด ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านเครื่องดิงภาระกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วแคโทด และเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและความร้อน



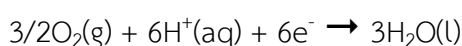
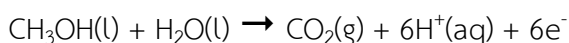
ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงพื้เอ๋มมีอายุการใช้งานที่นาน มีเวลาเริ่มต้นการทำงานที่น้อย และสมรรถนะสูง แต่ก็มีข้อเสียคือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแพลทินัมที่มีราคาแพง และใช้เชื้อเพลิงหรือสารตั้งต้นและตัวออกซิแดนต์ที่ค่อนข้างมีความบริสุทธิ์สูง การใช้เชื้อเพลิงและตัวออกซิแดนต์ที่มีความบริสุทธิ์ต่ำหรือมีการปนเปื้อนของสารอื่น เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ จะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาลดประสิทธิภาพลง [4]



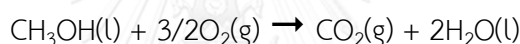
รูปที่ 2.5 เซลล์เชื้อเพลิงพื้เอ๋ม [hgv-auto-blogspot.com]

(ฉ) เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมทานอลโดยตรง ทำงานได้โดยการป้อนเมทานอลเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงโดยตรง อิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมทานอลโดยตรงคือพอลิเมอร์ที่มีสมบัติการนำ

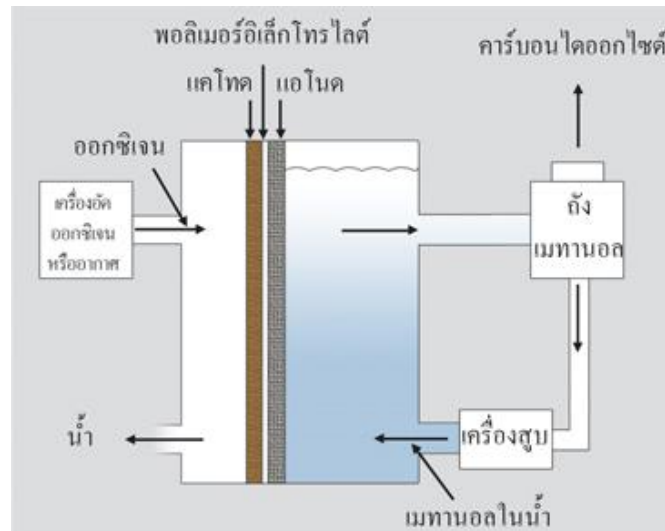
โปรตอนที่ดี ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ด้านแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมทานอลต้องเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทนต่อการดูดซับคาร์บอนมอนอกไซด์ ตัวอย่างเช่น Pt-Ru และตัวเร่งปฏิกิริยาทางด้านแคโทดนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแพลทินัม เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมทานอลโดยตรงมีช่วงของอุณหภูมิในการดำเนินการอยู่ที่ 20-100 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมทานอลโดยตรงแสดงดังต่อไปนี้



ที่ด้านแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเมทานอลกับน้ำได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โปรตอน และอิเล็กตรอน ซึ่งโปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นเมมเบรนไปยังด้านแคโทด แล้วอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านเครื่องดัดการระกระแสไฟฟ้าไปยังด้านแคโทดและเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นน้ำซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้



ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมทานอลโดยตรงคือเมทานอลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตได้จากปฏิกิริยารีดิวซ์ของแก๊สโซลีน (Gasoline) หรือชีวมวล (Biomass) ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมทานอลโดยตรงจึงมีความปลอดภัยกว่าเซลล์เชื้อเพลิงพีเอเอ็มเพราะใช้ของเหลวเป็นเชื้อเพลิง แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเมทานอลจะเกิดได้ช้าเหมือนกับปฏิกิริยาที่ด้านแคโทด และมีการแพร่ผ่านของเมทานอลผ่านชั้นเมมเบรนเกิดขึ้นสูงขณะที่ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit voltage) นอกจากนั้น ยังเกิดสารมัธยันตร์ (Intermediate) ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเมทานอล คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.6 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมทานอล [kanchanapisek.or.th]

การเปรียบเทียบลักษณะการทำงานและสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1 จะเห็นว่าชนิดของประจุที่ใช้ถ่ายโอนผ่านอิเล็กโทรนจะแตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะหรือศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว (Single cell) แต่ละชนิดเซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอนเดทลอมจะให้สมรรถนะหรือศักย์ไฟฟ้าสูงที่สุด และเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมทานอลโดยตรงจะให้สมรรถนะหรือศักย์ไฟฟ้าน้อยที่สุด เพราะว่ปฏิกิริยาที่ช้าของปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันและการสูญเสียเมทานอลเนื่องจากการแพร่ผ่านชั้นเมมเบรนของเมทานอล [4]

ตารางที่ 2.1 ตารางการเปรียบเทียบลักษณะการทำงานและสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

[www.fuelcell.co.th]

ชนิดของเซลล์ เชื้อเพลิง	ไอออนที่เคลื่อนที่	อุณหภูมิการ ดำเนินการ (องศา เซลเซียส)	ลักษณะการใช้งาน
เซลล์เชื้อเพลิงแบบ ออกไซด์แข็ง	O^{2-}	650-1000	เหมาะสำหรับระบบ ทุกขนาด
เซลล์เชื้อเพลิงแบบ ฟอสฟอริก	H^+	170-200	ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูง ถึง 200 กิโลวัตต์
เซลล์เชื้อเพลิงแบบ เกลือคาร์บอนเนต หลอม	CO_3^{2-}	500-650	เหมาะสำหรับสถานี ไฟฟ้าขนาดกลางถึง ขนาดใหญ่
เซลล์เชื้อเพลิงแบบ แอลคาไลน์	OH^-	60-120	ใช้งานด้านอวกาศ
เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์	H^+	50-100	ยานพาหนะและ อุปกรณ์พกพาต่างๆ
เซลล์เชื้อเพลิงแบบ เมทานอลโดยตรง	H^+	20-100	มีความปลอดภัย เนื่องจากใช้ของเหลว เป็นเชื้อเพลิง

2.4 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์

เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ประกอบด้วย 4 องค์ประกอบหลักๆ คือ แผ่นนำกระแสไฟฟ้า ขั้ว อิเล็กโทรด อิเล็กโทรไลต์ [5]

2.4.1 แผ่นนำกระแสไฟฟ้า (Current collector plate)

แผ่นนำกระแสไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบขั้วเดียว (Unipolar plate) และแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่จำเป็นของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ เพราะว่าแผ่นนำกระแสไฟฟ้าทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ออกจากเซลล์ และเป็นเส้นทางการไหลของแก๊ส หรือเป็นที่อยู่ของช่องการไหลของแก๊ส (Gas flow field plate) ที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นนำกระแสไฟฟ้า

เพื่อให้แก๊สไหลผ่านต่อไปยังขั้วอิเล็กโทรด นอกจากนั้นแผ่นนำกระแสไฟฟ้ายังทำหน้าที่ระบายความร้อน และกำจัดน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีออกจากเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

2.4.2 ชั้นประกอบเมมเบรนและขั้วไฟฟ้า (Membrane Electrode Assembly)

ชั้นประกอบเมมเบรนและขั้วไฟฟ้า (MEA) ถือเป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม เพราะว่าเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาเคมีและมีการถ่ายโอนประจุ ชั้นประกอบเมมเบรนและขั้วไฟฟ้าประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลักๆ คือ เมมเบรนทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ และขั้วอิเล็กโทรดที่มีชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา การประกอบชั้นประกอบเมมเบรนและขั้วไฟฟ้าทำได้โดยการนำเอาขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว คือ ขั้วแคโทดและขั้วแอโนดมาประกบเข้ากับเมมเบรน โดยวิธีการอัดด้วยความร้อน (Hot pressing) องค์ประกอบที่สำคัญของชั้นประกอบเมมเบรนและขั้วไฟฟ้า มีดังนี้

2.4.2.1 ขั้วอิเล็กโทรด (Electrode)

ขั้วอิเล็กโทรดเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า เป็นทางผ่านของแก๊สเชื้อเพลิงหรือสารตั้งต้นและตัวออกซิแดนต์เพื่อเข้าไปทำปฏิกิริยาและเป็นทางผ่านของอิเล็กตรอน ขั้วอิเล็กโทรดโดยทั่วไปประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ชั้นแพร่แก๊ส (Gas diffusion layer) และส่วนที่สอง ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer)

(1) ชั้นแพร่แก๊ส (Gas diffusion layer)

เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างแผ่นนำกระแสไฟฟ้าและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ชั้นแพร่แก๊สที่ดีควรมีความต้านทานต่ำหรือมีการนำกระแสไฟฟ้าได้ดีและมีความเป็นรูพรุนที่สูง ความเป็นรูพรุนของชั้นแพร่แก๊สที่มากจะทำให้เพิ่มพื้นที่ในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าและช่วยให้แก๊สเชื้อเพลิงแพร่ผ่านชั้นแพร่แก๊สไปยังชั้นการเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น โดยทั่วไปชั้นแพร่แก๊สจะถูกทำด้วยเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) นำมาขึ้นรูปเป็นกระดาษคาร์บอน (Carbon paper) และ ผ้าคาร์บอน (Carbon cloth) หน้าที่ของชั้นแพร่แก๊สมีดังนี้

- เป็นชั้นผ่านของแก๊สเชื้อเพลิงหรือตัวออกซิแดนต์จากช่องการไหลของแก๊ส (Flow field channel) ไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer) ที่อยู่ด้านเดียวกัน
- เป็นชั้นการแพร่ผ่านของน้ำที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีบริเวณชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังช่องการไหลของแก๊ส
- เป็นตัวนำอิเล็กตรอนจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเคลื่อนที่ต่อไปยังแผ่นนำกระแสไฟฟ้าเพื่อทำให้ครบวงจรแล้วได้กระแสไฟฟ้าออกมาจากเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

- ส่งผ่านความร้อนออกนอกเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ เนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีบริเวณชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นมาด้วย
- เป็นตัวรองรับเชิงกล (Mechanical support) เพื่อป้องกันการซ้อนทับกันของชั้นประกอบเมมเบรนและขั้วไฟฟ้ากับช่องการไหลของแก๊ส

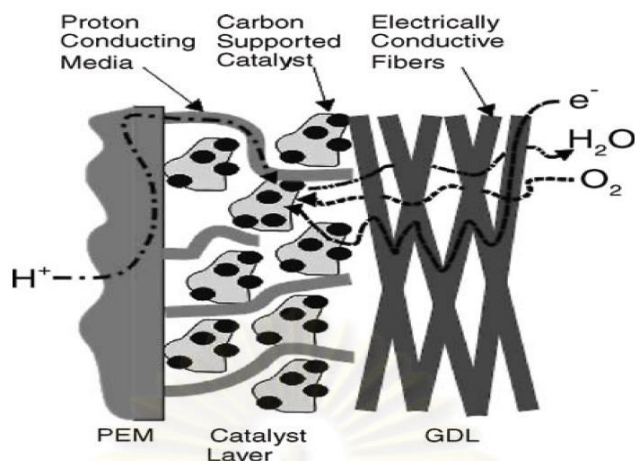
(2) ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer)

เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นแพร่แก๊สและชั้นเมมเบรน เป็นชั้นที่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ในอุณหภูมิปกติเชื้อเพลิงหรือสารตั้งต้นและตัวออกซิแดนต์จะไม่แตกตัวเป็นไอออน เพราะว่าโมเลกุลของเชื้อเพลิงหรือสารตั้งต้นและตัวออกซิแดนต์มีความเสถียรมากจำเป็นต้องมีตัวกระตุ้นทำให้เกิดการแตกตัว ยกตัวอย่างการกระตุ้น เช่น การเพิ่มอุณหภูมิหรือการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเข้าไปลดพลังงานการกระตุ้น (Activation Energy, E_a) ลง จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ได้รวดเร็วขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ส่วนมากเป็นโลหะมีตระกูล (Noble metal) เช่น แพลทินัม (Pt) นิกเกิล (Ni) เป็นต้น โดยเฉพาะแพลทินัมเป็นที่นิยมใช้มากในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ เพราะว่าแพลทินัมมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาและทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าโลหะชนิดอื่น แพลทินัมจะถูกเตรียมด้วยการถูกทำให้เป็นอนุภาคเล็กๆ เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา และนำไปวางไว้บนอนุภาคขนาดใหญ่ของผงคาร์บอน โดยส่วนใหญ่จะใช้เป็นผงคาร์บอน Vulcan XC72 (Cabot)

ขั้วอิเล็กโทรดที่ดีต้องมีความต้านทานต่ำ (Low resistance) หรือมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่สูง (high conductivity) ต้องมีส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic pathways) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic pathways) เพื่อจะได้กำจัดน้ำออกจากเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ ส่วนอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาต้องนำอิเล็กตรอนเพื่อใช้ในการเชื่อมกับวงจรไฟฟ้าภายนอก และต้องมีความเป็นรูพรุนสูงเพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมี และยังช่วยในการแพร่ผ่านของแก๊สเชื้อเพลิงหรือสารตั้งต้นและตัวออกซิแดนต์ไปยังบริเวณตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีมากขึ้น จากรูปที่ 2.7 แสดงการแพร่ผ่านของแก๊สเชื้อเพลิง โปรตอน และอิเล็กตรอน ผ่านขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งถูกแบบเป็น 3 ชั้นตอน ดังนี้

- โมเลกุลของแก๊สเชื้อเพลิงเคลื่อนที่จากชั้นแพร่แก๊สไปยังบริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและอิเล็กโทรไลต์
- เกิดการดูดซับบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการดูดซับขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Specific surface area)

- โมเลกุลของแก๊สเชื้อเพลิงจะเกิดปฏิกิริยาเคมีแตกตัวให้โปรตอนและอิเล็กตรอนออกมา โปรตอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์และชั้นเมมเบรนไปยังด้านแคโทดได้ ซึ่งการเคลื่อนที่ของโปรตอนขึ้นอยู่กับความหนาของอิเล็กโทรไลต์ และค่าการนำโปรตอนของอิเล็กโทรไลต์

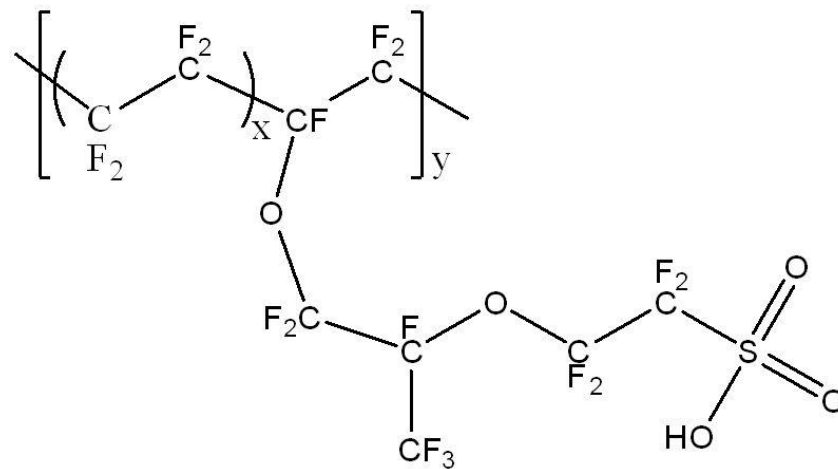


รูปที่ 2.7 การถ่ายโอนของแก๊ส โปรตอน และอิเล็กตรอนในขั้วอิเล็กโทรด [5]

2.4.2.2 อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

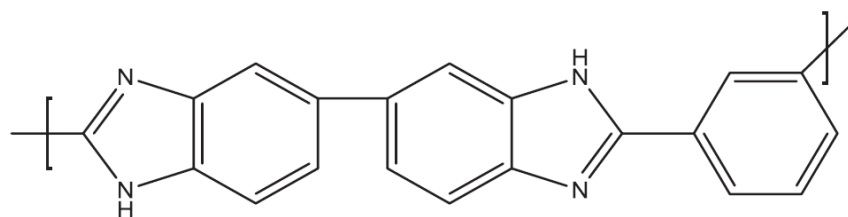
อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มเป็น พอลิเมอร์เมมเบรนทำหน้าที่ในการป้องกันไม่ให้ไฮโดรเจนและออกซิเจนผสมรวมกันและเกิดปฏิกิริยากันโดยตรง ซึ่งเมมเบรนพอลิเมอร์ยังทำหน้าที่ยอมให้โปรตอนเคลื่อนที่ผ่านจากด้านแอโนดไปยังแคโทดได้เท่านั้น [5]

เมมเบรนที่ได้รับความนิยมสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิต่ำ (มีอุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส) คือ เนฟลอนเมมเบรน โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของวัลโฟเนต ฟลูออโรเอทีลีน [www.intechopen.com]

เมมเบรนที่ได้รับความนิยมของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดสูง คือ พอลิเบนซิมิดาโซล (Polybenzimidazole) สามารถเตรียมได้ด้วยวิธีพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ของไดเอมีน (Diamine) และกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) ในกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) ที่ 180-200 องศาเซลเซียส การนำไฟฟ้าของพอลิเบนซิมิดาโซลชนิด ABPBI ได้ถูกรายงานไว้คือ 0.08 S cm^{-1} ที่ 140 องศาเซลเซียสและไม่มี ความชื้น และ 0.2 S cm^{-1} ที่มีความชื้นร้อยละ 20 นอกจากนี้ พอลิเบนซิมิดาโซลยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์อีกด้วย โครงสร้างของพอลิเบนซิมิดาโซลถูกแสดงในรูปที่ 2.9 [6]

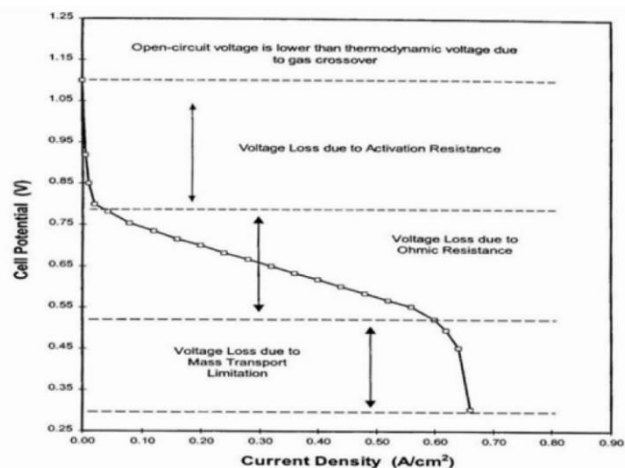


รูปที่ 2. 9 โครงสร้างของพอลิเบนซิมิดาโซล (PBI) [6]

2.5 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์

สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถศึกษาได้จากกราฟโพลาริเซชัน (Polarization curve) ดังรูปที่ 2.10 เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ได้ผลิตกระแสไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้า (Cell potential) ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์จะมีค่าลดลงจากค่าศักย์ไฟฟ้าเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ยังไม่ได้ผลิตกระแสไฟฟ้า (Open circuit potential) การลดลงของศักย์ไฟฟ้านี้เป็นการลดลงเนื่องมาจากการทำงานงานจริง

ของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นเป็นกระบวนการแบบผันกลับไม่ได้ และค่าศักย์ไฟฟ้าที่มีการลดลงนี้เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าเกินตัว (Overpotential) [5]



รูปที่ 2.10 กราฟโพลาริเซชันของเซลล์เอเพลิงฟิวเซลล์ [www.fuelcell.co.th]

เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ถูกต่อเข้ากับวงจรภายนอกและมีการป้อนแก๊สเชื้อเพลิงและตัวออกซิแดนต์เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์จะผลิตกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นๆ ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สออกซิเจนจะมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎีประมาณ 1.299 โวลต์

เมื่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 2.10 พบว่าเกิดการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้า เนื่องจากกลไกต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งกราฟโพลาริเซชันออกได้เป็น 4 ช่วง และสามารถอธิบายช่วงต่างๆได้ดังนี้

1. ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (Open-circuit potential) ซึ่งเกิดจากการแพร่ข้ามชั้นเมมเบรนของแก๊สเชื้อเพลิงและตัวออกซิแดนต์ (Crossover) ระหว่างด้านแคโทดและด้านแอโนด เมื่อแก๊สเชื้อเพลิงและตัวออกซิแดนต์แพร่ข้ามไปอีกด้านจะทำปฏิกิริยากับผิวของขั้วอิเล็กโทรด จะเกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแอโนด จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง
2. โพลาริเซชันทางเคมี (Activation Polarization) คือค่าการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีของแก๊สเชื้อเพลิงและตัวออกซิแดนต์บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงเนื่องจากการต้องสูญเสียพลังงานในการชนะพลังงานกระตุ้นของ

การเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ซึ่งมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น อุณหภูมิ ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี และความดัน

3. โพลาริเซชันจากความต้านทาน (Resistance Polarization) เกิดจากความต้านทานของแต่ละส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ เช่น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน บริเวณขั้วอิเล็กโทรดและบริเวณแผ่นนำกระแสไฟฟ้า ความต้านทานในการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านชั้นเมมเบรนไปยังด้านแคโทด และบริเวณการเชื่อมต่อระหว่างส่วนประกอบแต่ละชิ้น โดยเฉพาะการประกอบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีจำนวนหลายชิ้น
4. โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นของเชื้อเพลิงและตัวออกซิแดนต์ (Concentration Polarization) เกิดจากปริมาณของเชื้อเพลิงและตัวออกซิแดนต์ที่ถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วจนไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรด

การลดลงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นในกระบวนการที่เรียกว่า โพลาริเซชัน ซึ่งการเกิดโพลาริเซชันนั้นสามารถเกิดได้ทั้งด้านแคโทดและด้านแอโนดจึงทำให้ค่าความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าที่ได้ลดลง โดยศักย์ไฟฟ้าที่ได้จริงของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ (E_{cell}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$E_{cell} = E_{cell}^0 - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc} \quad (2.1)$$

โดยที่ E_{cell}^0 = ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์ทางเทอร์โมไดนามิกส์เมื่อเทียบกับขั้วอิเล็กโทรดมาตรฐานไฮโดรเจน (โวลต์)

η_{act} = ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินเนื่องจากการสูญเสียเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเป็นผลจากอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา (โวลต์)

η_{ohm} = ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินเนื่องจากความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ (โวลต์)

η_{conc} = ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินเนื่องจากการถ่ายเทมวล (โวลต์)

2.6 แผ่นช่องทางการไหลของแก๊ส

แผ่นช่องทางการไหลของแก๊สทำหน้าที่นำแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนเข้ามาที่ขั้วไฟฟ้าโดย Barbir (1999) ได้ระบุว่าหน้าที่สำคัญของแผ่นช่องทางการไหลของแก๊สคือเชื่อมต่อเซลล์แบบอนุกรมกันแก๊สเชื้อเพลิงระหว่างเซลล์ เป็นตัวรองรับโครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิง นำความร้อนจากเซลล์ที่เกิดปฏิกิริยาไปสู่เซลล์ทำความเย็น (Cooling cell) ดังนั้น แผ่นช่องทางการไหลของแก๊สจะต้องมีสภาพนำกระแสไฟฟ้าและความร้อนสูง ไม่ยอมให้แก๊สซึมผ่าน มีความแข็งแรง และน้ำหนักที่ถูกผลิตขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าออกจากเซลล์ รูปแบบของเส้นทางการไหลของแก๊สบนแผ่นช่องทางการไหลของแก๊สที่เหมาะสมจะช่วยลดการสะสมของน้ำที่ถูกผลิตขึ้นในเซลล์ แผ่นช่องทางการไหลของแก๊สที่ดีควรมีสสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.2 [4]

เส้นทางการไหลของแก๊สบนแผ่นช่องทางการไหลมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ (Hooger, 2003) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยช่องทางการไหลแบบช่องขนานตรง (Straight parallel channel) (รูปที่ 2.11(ก)) มีการไหลของแก๊สผ่านทุกช่องทางการไหลเหมือนกัน ส่งผลให้ความแตกต่างของความดันระหว่างแก๊สขาเข้าและขาออกต่ำ พลังงานในการป้อนแก๊สเข้าสู่บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาต่ำ แต่ช่องทางการไหลประเภทนี้จะทำให้เกิดการสะสมของน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาและขัดขวางการถ่ายโอนของแก๊สเข้าสู่บริเวณที่เกิดปฏิกิริยา [4]

ช่องทางการไหลแบบเลื้อยขด (Serpentine flow field) (รูปที่ 2.11(ข)) ถูกพัฒนาโดยนักวิจัยของ Ballard ใน ค.ศ. 1992 ช่องทางการไหลแบบดังกล่าวสามารถช่วยลดการอุดตัน (Block) ของน้ำในช่องทางการไหลของแก๊ส เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความดันขาเข้าและความดันขาออกในช่องทางการไหลของแก๊สจะช่วยผลักดันให้น้ำที่ถูกผลิตในระบบไหลออกจากเซลล์

ช่องทางการไหลแบบกระจกเงา (Mirrored flow field) (รูปที่ 2.11(ค)) ถูกพัฒนาโดย General Motors มีลักษณะผสมระหว่างช่องทางการไหลแบบช่องขนานตรงและแบบเลื้อยขด

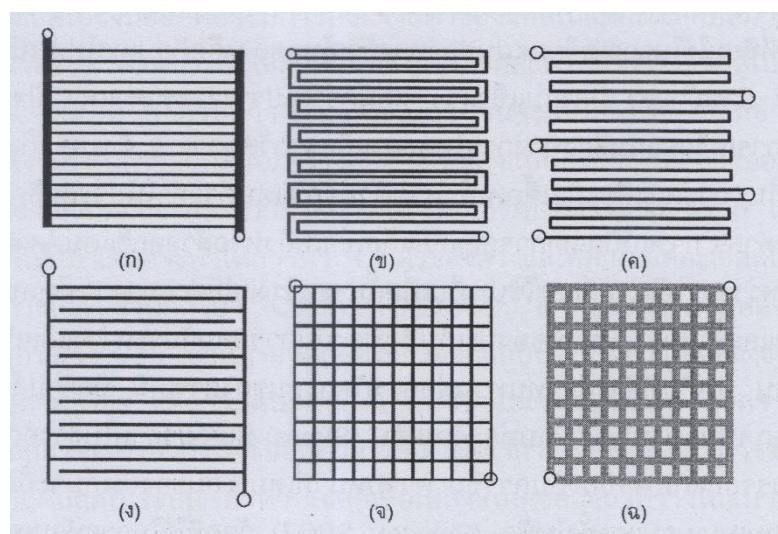
ตารางที่ 2.2 สมบัติของแผ่นช่องทางการไหลของแก๊ส [4]

สมบัติ	ค่าเป้าหมาย	เหตุผล
การซึมผ่านของแก๊ส	น้อยกว่า 10^{-7} มิลลิบาร์-ลิตรต่อวินาที-ตารางเซนติเมตร	แยกชั้นแอโนดและแคโทด
การนำกระแสไฟฟ้า	มากกว่า 10 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร หรือ ทำให้เกิดการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าน้อยกว่า 1 มิลลิโวลต์ต่อแผ่น	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่า 4 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร
ความหนาแน่นสภาพนำความร้อน	น้อยกว่า 1 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์สูงกว่า 20 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน เมื่อระบบมีสารทำความเย็น และมีค่าสูงกว่า 100 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน เมื่อการระบายความร้อนเกิดขึ้นจากบริเวณขอบของแผ่น	เพื่อให้เซลล์มีน้ำหนักเบา ระบายความร้อนจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา
ความต้านทานการกัดกร่อน	สูงเทียบเท่ากับกัมมันตภาพ (Activity) ของโปรตอนในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร	เนื่องจากภาวะการทำงานเป็นกรด
เสถียรภาพด้านความร้อนและแบบ	อายุการใช้งาน 50,000 ชั่วโมง สำหรับเซลล์ในยานยนต์ และ 50,000 ชั่วโมง สำหรับเซลล์แบบประจำที่ (Stationary)	
ราคาในการผลิตแผ่น	15 เหรียญสหรัฐต่อกิโลวัตต์ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์แถว	
ความต้านแรงดัด	มากกว่า 25 เมกะปาสกาล	

ช่องทางการไหลแบบช่องระหว่างนิ้ว (Interdigitated floe field) (รูปที่ 2.11(ง)) มีลักษณะเป็นช่องยาวไม่ต่อเนื่องและมีปลายปิด เมื่อแก๊สไหลมาถึงบริเวณปลายปิดจะถูกบังคับให้ซึมผ่านชั้น

แพร์แก๊ส ช่องทางการไหลแบบนี้จะช่วยลดแรงหนึ่ยวนำในการแยกน้ำจากชั้นแพร์แก๊ส แต่จะทำให้เกิดความดันลด (Pressure drop) ระหว่างแก๊สขาเข้าและขาออกสูง

ช่องทางการไหลแบบตะแกรงโลหะ (Metal mesh flow field) (รูปที่ 2.11(จ)) จะมีความพรุนของแต่ละช่องเท่ากันทำให้เกิดความต้านทานการไหลระหว่างเซลล์โดยเฉพาะที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง หรืออาจมีน้ำสะสมในบางเซลล์จนทำให้ไม่สามารถทำงานได้



รูปที่ 2.11 ช่องทางการไหลของแก๊สในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (ก) แบบช่องขนานตรง (ข) แบบเลี้ยวขด (ค) แบบกระจกเงา (ง) แบบช่องระหว่างนิ้ว (จ) แบบตะแกรงโลหะ และ (ฉ) แบบไม่มีช่องทางการไหล [4]

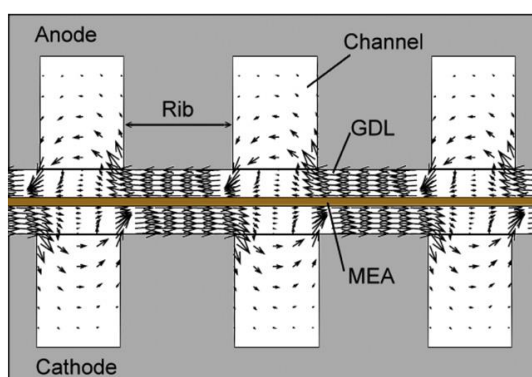
อีกทางเลือกในการป้อนแก๊สเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงคือการใช้ช่องทางการไหลแต่จะออกแบบให้มีรอยบุ๋มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสบนชั้นแพร์แก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 2.11(ฉ) โดยเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการออกแบบช่องทางการไหลของแก๊สแบบนี้จะทำงานได้ดีในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่จำกัด เช่น ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยวหรือเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์แถวสั้นๆ แต่เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ กำลังไฟฟ้าสูงขึ้น แก๊สจะไหลไปรวมตัวกันที่บริเวณส่วนกลางของเซลล์ ส่งผลให้บริเวณที่ติดกับขอบไม่เกิดปฏิกิริยา วัสดุที่นิยมใช้ในการเตรียมแผ่นช่องทางการไหลของแก๊สคือ แกรไฟต์ เนื่องจากมีสภาพนำกระแสไฟฟ้าสูง น้ำหนักเบา มีความแข็งแรง แต่มีความเปราะและราคาแพง

2.7 การใช้แผ่นกั้นในทิศทางการไหลของแก๊ส

การไหลของสารตั้งต้นหรือเชื้อเพลิงและตัวออกซิแดนต์ตามช่องทางการไหลของแก๊สไปสู่ชั้นแพร์แก๊สและจากชั้นแพร์แก๊สไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นพื้นที่ที่ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดขึ้น ในทางกลับกัน

ยังมีสารตั้งต้นบางส่วนไหลผ่านชั้นแพร่แก๊สไปและไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ส่งผลให้การสูญเสียความเข้มข้นและปริมาณของแก๊สที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ช่องการไหลของแก๊สออกของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่ม [2]

เนื่องจากพื้นผิวของช่องการไหลของแก๊สติดกับชั้นแพร่แก๊สน้อยกว่าร้อยละ 60 ของพื้นที่ทำปฏิกิริยาทั้งหมดของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่ม มันเป็นเรื่องที่สำคัญมากในการเพิ่มการไหลแบบพา (รูปที่ 2.17) ดังนั้นสัดส่วนของแก๊สทำปฏิกิริยาที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน และสามารถกำจัดน้ำออกจากเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มได้ดีขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 2.12 การไหลแบบพาผ่านชั้นแพร่แก๊สภายใต้สัน (Rib)

การไหลแบบพาภายใต้สันหรือพื้นที่ระหว่างช่องการไหลของแก๊สสามารถเพิ่มขึ้นได้ โดยการเพิ่มความดันด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงช่องทางของโครงสร้างแผ่นช่องทางการไหลของแก๊สแบบสองขั้ว โดยการเปลี่ยนแปลงช่องการไหลของแก๊สด้วยการติดตั้งแผ่นกั้น (Baffle) ใสเข้าไปในช่องการไหลของแก๊สเป็นวิธีการเพิ่มปริมาณของแก๊สที่ไหลไปสู่ชั้นแพร่แก๊สและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา

นอกจากนี้ยังมีการกล่าวถึงการออกแบบสนามการไหล มีบางการศึกษาแสดงโครงสร้างสนามการไหลแบบใหม่ๆ ยกตัวอย่างเช่น สนามการไหลแบบบล็อกแผ่นกั้น (baffle-blocked flow fields) ถูกออกแบบโดยการบังคับสารตั้งต้นหรือเชื้อเพลิงในช่องการไหลของแก๊สเข้าไปยังชั้นแพร่แก๊สและชั้นแพร่แก๊ส การศึกษาประสิทธิภาพพร้อมกับการออกแบบสนามการไหลแบบมีแผ่นกั้นโดยมีพารามิเตอร์อื่นๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงจำนวนของช่องการไหลของแก๊ส ผลแสดงให้เห็นว่าการใช้แผ่นกั้นบังคับเชื้อเพลิงไหลผ่านชั้นแพร่แก๊สไปยังชั้นแพร่แก๊ส ทำให้พื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามระดับของความหนาแน่นกระแสที่เพิ่มขึ้นที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำลดลงในขณะที่จำนวนแผ่นกั้นเพิ่มมากขึ้น

นั้น หมายความว่าต้องมีการหาจำนวนที่เหมาะสมของแผ่นกันสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์

2.8 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์วอลุ่ม

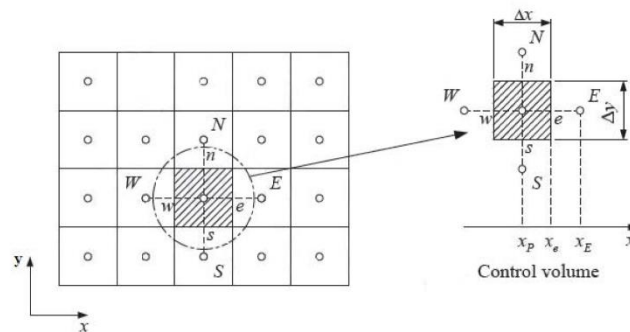
พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นแขนงวิชาหนึ่งของกลศาสตร์ของไหล สำหรับวิเคราะห์การไหล การถ่ายโอนความร้อนและเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการไหล โดยอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์เข้ามาคำนวณ [7, 8]

เหตุการณ์ของการไหล การถ่ายโอนความร้อน และปฏิกิริยาเคมีต่างๆ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) แบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งระบบสมการเหล่านี้สามารถแก้ได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ (Analytical analysis) เพื่อหาผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution) ได้เพียงบางกรณีพิเศษเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องอาศัยหลักการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical analysis) ในการกระจายพจน์ต่างๆ สำหรับการหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate solution) เพื่อประมาณสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยด้วยระบบสมการพีชคณิต (System of algebraic equations) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณหาผลเฉลยของระบบสมการนี้

หลังจากนี้จะเป็นการอธิบายขั้นตอนและวิธีการต่างๆ ของระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม ยกตัวอย่างเช่น การประมาณพจน์ของการแพร่และการพา เป็นต้น จากระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method) กับสมการการไหลพื้นฐานและสมการการถ่ายโอนความร้อน

2.8.1 สมการควบคุมพื้นฐาน

ระเบียบวิธีการไฟไนต์วอลุ่ม เป็นระเบียบวิธีการเชิงตัวเลขที่แบ่งขอบเขตหรือปริมาตรของปัญหาที่สนใจออกเป็นพื้นที่หรือปริมาตรเล็กๆ หลังจากนั้นหาปริพันธ์ (Integrate) สมการอนุรักษ์บนพื้นที่ควบคุม (Control area) หรือปริมาตรควบคุม (Control volume) ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.13 การแบ่งขอบเขตของปัญหาที่สนใจด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มออกเป็นพื้นที่ควบคุมเล็กๆ [7]

การแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มของปัญหาการพาและการแพร่ ซึ่งเป็นสมการของการไหลแบบพื้นฐานที่ภาวะคงตัวในรูปของตัวแปร ϕ สามารถแสดงสมการควบคุมพื้นฐานในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y}}_{\text{Convective terms}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)}_{\text{Diffusion terms}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{Source term}} \quad (2.2)$$

พจน์แรกทางด้านซ้ายมือของสมการ (2.2) คือ พจน์ของการพา (Convective term) ตามแกน x และพจน์ที่สองทางด้านซ้ายมือของสมการ (2.2) คือ ส่วนพจน์ของการพาตามแนวแกน y พจน์แรกทางด้านขวามือของสมการ (2.2) คือ พจน์ของการแพร่ (Diffusion term) ตามแนวแกน x พจน์ที่สองทางด้านขวามือของสมการ (2.2) คือ พจน์ของการแพร่ตามแนวแกน y และพจน์ที่สามทางด้านขวามือของสมการ (2.2) คือ พจน์เพิ่มเติม (Source term) ต่อไปจะเป็นการแสดงขั้นตอนระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)

โดยรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในสมการ (2.2) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์พื้นฐานที่สามารถนำมาเปลี่ยนให้เป็นสมการพีชคณิตโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มเพื่อการคำนวณที่ง่ายขึ้น โดยการหาปริพันธ์ตลอดพื้นที่ควบคุมที่ได้แบ่งเป็นพื้นที่เล็กๆ จะได้สมการออกมาใหม่เป็น

$$\int_{CV} \frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} dV + \int_{CV} \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} dV = \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dV + \int_{CV} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (2.3)$$

รูปทั่วไปของสมการพื้นฐานที่เขียนอยู่ในรูปปริพันธ์ (Integral) แสดงในสมการ (2.3)

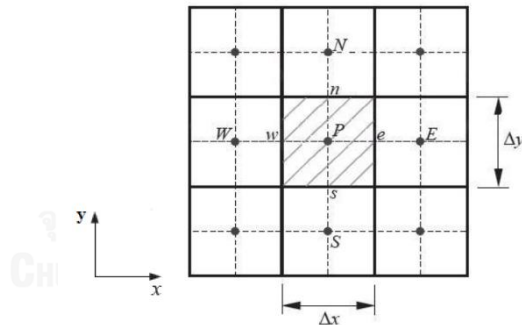
2.8.2 การแก้ไขปัญหาคารพและการแพร่

ปัญหาในรูปแบบนี้จะมีการพิจารณาร่วมกันระหว่างผลคารพและการแพร่ ซึ่งพจน์การพเกิดจากการไหลของของไหล เพื่อให้ทราบถึงค่าของตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารเนื่องจากการไหลของของไหล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบลักษณะการไหลของของไหลที่เกิดขึ้นเพื่อจะได้ทราบตัวแปรดังกล่าว จากสมการ (2.2) สามารถเขียนสมการในรูปตัวแปร ϕ ในระบบสองมิติสำหรับการแก้ไขปัญหาคารพและการแพร่ที่ภาวะคงตัว

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi \quad (2.4)$$

ทำการหาปริพันธ์ของสมการ (2.4) ตลอดทั้งพื้นที่ควบคุมตามรูปที่ 2.12 เพื่อเปลี่ยนสมการอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปสมการพีชคณิตโดยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม จากสมการ (2.2) ซึ่งเป็นสมการตั้งต้นให้เป็นสมการ (2.5) ซึ่งเป็นสมการปริพันธ์

$$\int_{\Delta V} \left[\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} \right] dV = \int_{\Delta V} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi \right] dV \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.14 พื้นที่ควบคุมในระบบสองมิติของปัญหาคารพและการแพร่ [7]

เมื่อพิจารณาดูสมการ (2.5) ที่ละพจน์ โดยกำหนดให้ $A_e = A_w = 1 \times \Delta y$ และ $A_n = A_s = \Delta x \times 1$ จะได้พจน์ของการพ (Convective term) ในแนวแกน x และ y

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) dV = (\rho u A)_e \phi_e - (\rho u A)_w \phi_w = F_e \phi_e - F_w \phi_w \quad (2.6 ก)$$

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) dV = (\rho v A)_n \phi_n - (\rho v A)_s \phi_s = F_n \phi_n - F_s \phi_s \quad (2.6 ข)$$

โดยพจน์การแพร่ (Diffusion term) คือ

$$\int_{\Delta V} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right] dV = \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_w = D_e(\phi_E - \phi_P) - D_w(\phi_P - \phi_W) \quad (2.7 \text{ ก})$$

$$\int_{\Delta V} \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right] dV = \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} A \right)_n - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} A \right)_s = D_n(\phi_N - \phi_P) - D_s(\phi_P - \phi_S) \quad (2.7 \text{ ข})$$

และพจน์เพิ่มเติม (Source term) คือ

$$\int_{\Delta V} S_\phi dV = S_\phi V \quad (2.8)$$

กำหนดให้ F เป็น สัมประสิทธิ์การพา หรือมีค่าเท่ากับ $\rho u A$

และ D เป็น สัมประสิทธิ์การแพร่ หรือมีค่าเท่ากับ $\frac{\Gamma A}{\delta}$

จากสมการที่ (2.6)-(2.8) สามารถหาค่าของ ϕ บนพื้นที่ควบคุมในพจน์การพาที่อยู่ในสมการได้ โดยใช้การประมาณค่าด้วยหลักการตามระเบียบวิธี (Scheme) ต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น Central differencing, Upwind differencing, Hybrid differencing เป็นต้น

1. ระเบียบวิธี Central differencing

เป็นระเบียบวิธีการที่เป็นการประมาณเชิงเส้นของค่า ϕ เป็นการหาค่าเฉลี่ยทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัส (Interface) ของพื้นที่ควบคุม ดังนี้

$$\phi_e = \frac{1}{2}(\phi_E + \phi_P) \quad (2.9 \text{ ก})$$

$$\phi_w = \frac{1}{2}(\phi_P + \phi_W) \quad (2.9 \text{ ข})$$

$$\phi_n = \frac{1}{2}(\phi_N + \phi_P) \quad (2.9 \text{ ค})$$

$$\phi_s = \frac{1}{2}(\phi_P + \phi_S) \quad (2.9 \text{ ง})$$

เมื่อนำค่าเฉลี่ยที่ได้ของค่า ϕ ที่ผิวสัมผัส (Interface) ต่างๆ จากสมการที่ (2.9 ก-ง) แทนค่าลงในสมการที่ (2.6)-(2.8) และนำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ (2.5) จะได้รูปสมการดังสมการที่ (2.10)

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}(\rho u)_e(\phi_E + \phi_P) - \frac{1}{2}(\rho u)_w(\phi_P + \phi_W) + \frac{1}{2}(\rho v)_n(\phi_N + \phi_P) - \frac{1}{2}(\rho v)_s(\phi_P + \phi_S) &= \frac{\Gamma_e(\phi_E - \phi_P)}{(\delta x)_e} - \frac{\Gamma_w(\phi_P - \phi_W)}{(\delta x)_w} + \\ &\frac{\Gamma_n(\phi_N - \phi_P)}{(\delta y)_n} - \frac{\Gamma_s(\phi_P - \phi_S)}{(\delta y)_s} + S_\phi V \end{aligned} \quad (2.10)$$

โดย $F = \rho uA$ และ $D = \frac{\Gamma A}{\delta x}$ ซึ่งสามารถเขียนสมการในรูปทั่วไปของสมการที่ (2.10) ได้ดังนี้

$$a_P \phi_P = a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_E \phi_E + a_W \phi_W + S_\phi V \quad (2.11)$$

$$\text{โดย} \quad a_N = D_n - \frac{F_n}{2}$$

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

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

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

$$\text{และ} \quad a_P = a_N + a_S + a_E + a_W + (F_n - F_s + F_e - F_w)$$

เมื่อใช้กฎของการอนุรักษ์มวล $F_n - F_s + F_e - F_w = 0$ จะได้

$$a_P = a_N + a_S + a_E + a_W$$

จากสมการ (2.11) การใช้ระเบียบวิธี Central-differencing อาจส่งผลให้ค่าของสัมประสิทธิ์ a_N, a_S, a_E หรือ a_W มีค่าติดลบได้ ซึ่งเป็นการละเมิดกฎพื้นฐาน (Basic rule) ที่ว่าถ้าหากสัมประสิทธิ์ติดลบจะทำให้ $a_P \neq \sum |a_{nb}|$ ไม่เป็นไปตาม Scarborough criterion ส่งผลต่อค่าของผลเฉลยของการแก้ไขปัญหาที่ไม่สามารถเข้าสู่ค่าใดๆ ดังนั้นจึงทำให้ระเบียบวิธี Central-difference ไม่เป็นที่นิยมใช้สำหรับแก้ไขปัญหาในระบบการพาและการแพร่ที่มีค่าเพกเลตน์เบอร์ (Peclet number, Pe) สูง

เพกเลตน์เบอร์ (Peclet number, Pe) คือ ประเภทของตัวเลขไร้หน่วยที่ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายโอนแบบต่อเนื่อง เพกเลตน์เบอร์เป็นสัดส่วนของอัตราการพาของการไหลต่ออัตราการแพร่ในหน่วยทางฟิสิกส์เดียวกัน

$$Pe = \frac{\text{advection transport rate}}{\text{diffusive transport rate}}$$

2. ระเบียบวิธี Upwind differencing

จุดประสงค์ของการคิดค้นระเบียบวิธี Upwind differencing คือ เพื่อแก้ไขปัญหาเรื่องการสมมติค่าตัวแปรการพาที่บริเวณผิวสัมผัส (Interface) ค่าของตัวแปร ϕ_e ได้จากการเฉลี่ยค่าระหว่าง ϕ_E และ ϕ_P โดยกำหนดให้พจน์ของการแพร่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรืออยู่ในภาวะคงตัวนั่นเอง ส่วนพจน์ของการพาสามารถกำหนดค่าของ ϕ ที่ผิวสัมผัส (Interface) มีค่าเท่ากับค่าของ ϕ ที่ Grid point ของผิวสัมผัสพื้นที่ควบคุมด้านต้นของกระแสการไหล (Upstream) คือ

$$\phi_e = \phi_P \quad \text{เมื่อ} \quad F_e > 0 \quad (2.12 \text{ ก})$$

$$\phi_e = \phi_E \quad \text{เมื่อ} \quad F_e < 0 \quad (2.12 \text{ ข})$$

$$\phi_w = \phi_W \quad \text{เมื่อ} \quad F_w > 0 \quad (2.12 \text{ ค})$$

$$\phi_w = \phi_P \quad \text{เมื่อ} \quad F_w < 0 \quad (2.12 \text{ ง})$$

ค่าของ ϕ_n และ ϕ_s สามารถหาค่าได้โดยใช้วิธีคำนวณแบบเดียวกัน ดังนั้นค่าทั่วไปของสมการพีชคณิตในรูปแบบทั่วไปสามารถเขียนได้ดังสมการ (2.13)

$$a_P \phi_P = a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_E \phi_E + a_W \phi_W + S_\phi V \quad (2.13)$$

โดย $a_N = \max[-F_n, 0]$

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

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

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

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

กำหนดให้ค่า $\max[A, B]$ เป็นค่าสูงสุดที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าระหว่าง A และ B

จากสมการข้างต้นจะสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ a_N , a_S , a_E หรือ a_W ไม่สามารถมีค่าติดลบได้ จึงสามารถแก้ไขปัญหาเพื่อหาผลเฉลยที่ลู่ออกค่าใดค่าหนึ่งได้แล้วผลเฉลยที่ได้เป็นไปตามสภาพลักษณะของการไหลจริงที่เกิดขึ้น

3. ระเบียบวิธี Hybrid differencing

ระเบียบวิธีนี้เป็นการรวมข้อดีของระเบียบวิธี Central differencing และ ระเบียบวิธี Upwind differencing เข้าไว้ด้วยกัน โดยอาศัยการเลือกภาวะด้วยใช้เพกเลตน์มเบอร์เป็นเกณฑ์ $Pe = \frac{F}{D}$ ซึ่งระเบียบวิธี Central differencing จะมีผลต่อการแกว่งของผลลัพธ์ที่ได้จากการ

คำนวณเมื่อค่าของเพกเลตน์มเบอร์มีค่ามากกว่า 2 และน้อยกว่า -2 ดังนั้นระเบียบวิธี Hybrid differencing จะเลือกใช้ระเบียบวิธี Central differencing ก็ต่อเมื่อค่าของเพกเลตน์มเบอร์อยู่ในช่วงระหว่าง 2 ถึง -2 และถ้าค่าของเพกเลตน์มเบอร์อยู่นอกช่วงนี้ระเบียบวิธี Hybrid differencing จะเลือกใช้ระเบียบวิธี Upwind differencing ที่มีความแม่นยำในอันดับที่ 1 (1st-order accuracy) ที่มีความเสถียรต่อการคำนวณที่ดีกว่าระเบียบวิธี Central differencing ระเบียบวิธี Hybrid differencing สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการพีชคณิตได้ดังนี้

$$a_P \phi_P = a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_E \phi_E + a_W \phi_W + S_\phi V \quad (2.14)$$

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

$$\text{และ} \quad a_P = a_N + a_S + a_E + a_W + (F_n - F_s + F_e - F_w)$$

4. ระเบียบวิธี Power-Law

ระเบียบวิธี Power-Law พัฒนามาจากการหาค่าตอบเชิงวิเคราะห์ในระบบหนึ่งมิติ ทำให้ระเบียบวิธี Power-Law สามารถคำนวณหาผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงสำหรับปัญหาในระบบหนึ่งมิติมากกว่าระเบียบวิธี Hybrid differencing โดยระเบียบวิธี Power-Law จะทำการกำหนดค่าของพจน์การแพร่โดยการประมาณแบบพหุนาม (Polynomial) และเมื่อค่าเพกเลตน์มเบอร์มีค่ามากกว่า 10 จะให้พจน์ของการแพร่มีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งสามารถเขียนสมการพีชคณิตได้อย่างง่ายได้ดังสมการ (2.15)

$$a_P \phi_P = a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_E \phi_E + a_W \phi_W + S_\phi V \quad (2.15)$$

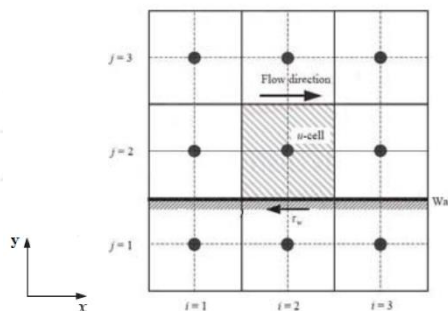
$$\begin{aligned} \text{โดย} \quad a_N &= D_n \max \left[0, (1 - 0.1 |Pe_n|)^5 \right] + \max \left[-F_n, 0 \right] \\ a_S &= D_s \max \left[0, (1 - 0.1 |Pe_s|)^5 \right] + \max \left[F_s, 0 \right] \\ a_E &= D_e \max \left[0, (1 - 0.1 |Pe_e|)^5 \right] + \max \left[-F_e, 0 \right] \\ a_W &= D_w \max \left[0, (1 - 0.1 |Pe_w|)^5 \right] + \max \left[F_w, 0 \right] \\ \text{และ} \quad a_P &= a_N + a_S + a_E + a_W - (F_n - F_s + F_e - F_w) \end{aligned}$$

2.8.3 ภาวะขอบเขต (Boundary conditions)

การคำนวณของระเบียบวิธีการจำเป็นต้องมีการกำหนดภาวะขอบเขต และภาวะเริ่มต้น (Initial condition) ก่อนการคำนวณในการแก้ไขปัญห เพราะปรากฏการณ์ต่างๆ ทางกายภาพของระบบที่คำนวณได้จะขึ้นอยู่กับภาวะขอบเขตและภาวะเริ่มต้น สามารถแบ่งการกำหนดภาวะขอบเขตโดยทั่วไปที่ใช้แก้ไขปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มออกเป็นสองประเภทที่สำคัญได้ดังนี้

1. ภาวะขอบเขตที่ผนัง (Wall boundary condition)

การกำหนดภาวะขอบเขตที่ผนังสามารถพบได้ในการแก้ไขปัญหการไหลทั่วไป การกำหนดภาวะขอบเขตที่ผนังสามารถแบ่งออกเป็นภาวะย่อยอื่นๆ ได้หลายประเภท ในรูปที่ 2.13 ใช้ผนังที่ขนานกับแกน x ในการกำหนดภาวะขอบเขตที่ผนัง



รูปที่ 2.15 พื้นที่ควบคุมที่ผนัง [7]

ภาวะขอบเขตที่ไม่มีการลื่นไถล (No-slip condition) เป็นภาวะในการประมาณค่าของความเร็วที่พื้นผิวของของแข็งโดยให้ความเร็วที่ขอบ ($j=1$) มีค่าเท่ากับศูนย์ คือมีความเร็วในทิศทางแกน x และ y มีค่าเท่ากับศูนย์ ($u=0, v=0$) พื้นที่ควบคุมที่อยู่ติดกับผนังมีค่าเท่ากับ $a_s=0$ เพราะว่าการคำนวณค่า Pressure correction ไม่มีการคำนวณตำแหน่งนี้

ภาวะของของการคำนวณการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) บริเวณผนังจะมีค่าความเค้นเฉือนในแนวแกน x เท่ากับ

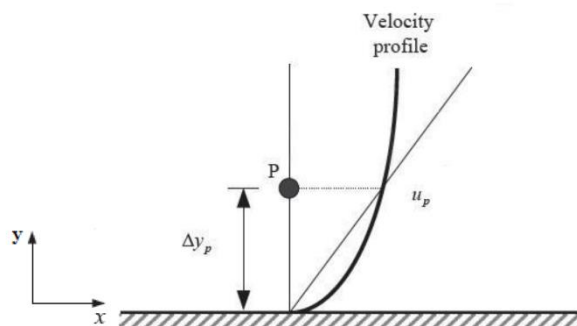
$$\tau_w = \mu \frac{u_p}{\Delta y_p} \quad (2.16)$$

จากรูปที่ 2.14 แสดงรูปแบบความเร็ว ถ้ากำหนดให้ u_p เป็นค่าความเร็วที่ Node ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการประมาณค่าจากพื้นผิวบริเวณใกล้เคียงและการเปลี่ยนแปลงความเร็วเป็นเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นตรงเมื่อเปรียบเทียบกับระยะทาง สามารถคำนวณแรงเฉือนได้ดังสมการที่ (2.17)

$$F_S = -\tau_w A_{cell} = -\mu \frac{u_p}{\Delta y_p} A_{cell} \quad (2.17)$$

โดย A_{cell} เป็นพื้นที่ของผนังพื้นที่ควบคุม
เมื่อใส่พจน์ของแรงเฉือนเข้าไปในพจน์เพิ่มเติม (Source term) ของ u จะสามารถเขียนพจน์เพิ่มเติม
ใหม่ได้ดังสมการที่ (2.18)

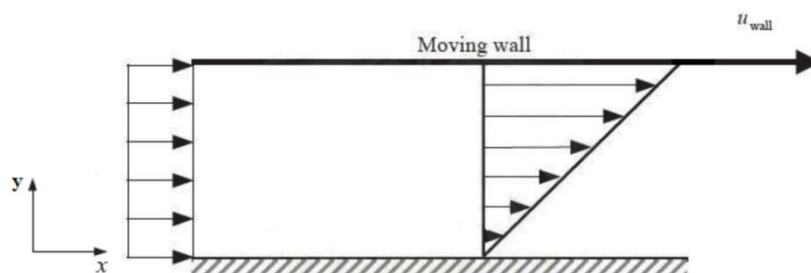
$$S_P = -\frac{\mu}{\Delta y_P} A_{cell} \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.16 การกระจายตัวของความเร็วที่ผนัง [7]

ภาวะขอบเขตในกรณีที่ผนังมีการเคลื่อนที่ เป็นการแก้ไขปัญหาที่สมมติให้ผนังมีการเคลื่อนที่
(Moving walls) ในรูปที่ 2.15 จะแสดงการเคลื่อนที่ของผนังไปในทิศทางแกน x ทำให้ของไหลมีการ
เคลื่อนที่ เนื่องจากแรงเค้นเฉือนที่ผนังกระทำกับของไหล ซึ่งแรงเค้นเฉือนเกิดจากความแตกต่างกัน
ของความเร็วของตำแหน่ง Node ไปในทิศทางแกน y ก่อนถึงผนังกับความเร็วของผนังเคลื่อนที่แสดง
ดังสมการที่ (2.19)

$$F_S = -\mu \frac{(u_P - u_{wall})}{\Delta y_P} A_{cell} \quad (2.19)$$

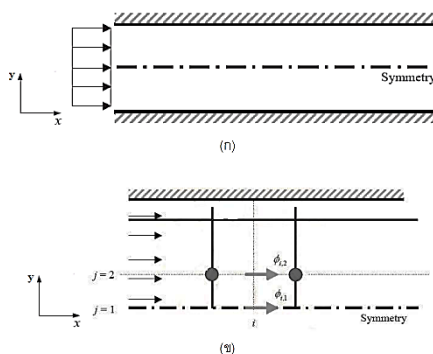


รูปที่ 2.17 ลักษณะของผนังเคลื่อนที่ [7]

2. ภาวะขอบเขตแบบสมมาตร (Symmetric boundary condition)

การแก้ไขปัญหามีลักษณะรูปร่างที่สมมาตร การคำนวณโดยใช้ขอบเขตของปัญหาทั้งหมด
มาคำนวณจะทำให้สิ้นเปลืองหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์โดยไม่จำเป็น และเพื่อเป็นประหยัด

หน่วยความจำและประสิทธิภาพการคำนวณที่ดีขึ้นของคอมพิวเตอร์จึงใช้ภาวะขอบเขตแบบสมมาตร การกำหนดขอบเขตในลักษณะสมมาตรนี้สามารถทำได้โดยภาวะที่ว่าไม่มีการไหลและฟลักซ์ผ่านขอบเขต กำหนดค่าความเร็วในแนวตั้งฉากกับขอบเขตที่สมมาตรให้มีค่าเป็นศูนย์และค่าของตัวแปรที่ขอบผนังมีค่าเท่ากับตัวแปรนั้นบน Cell ถัดขึ้นมาจากผนัง ($\phi_{i,1} = \phi_{i,2}$) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ข)



รูปที่ 2.18 (ก) ช่องการไหลที่สมมาตร (ข) โดเมนของช่องการไหลที่ใช้ภาวะสมมาตร [7]

ผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณภาวะแบบสมมาตรจะเท่ากับค่าของผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณขอบเขตทั้งหมด และยิ่งไปกว่านั้นการใช้ภาวะแบบสมมาตรในการคำนวณยังสามารถเพิ่มความละเอียดในการคำนวณให้เพิ่มมากขึ้นได้อีกด้วย

2.9 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Perng และ Wu [9] ศึกษาการจำลองเชิงตัวเลขในรูปแบบสามมิติเพื่อสังเกตผลกระทบของแผ่นกั้นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีมุมทู่ไม่คงที่ของการขนส่งสารตั้งต้นและกำลังไฟฟ้าสุทธิของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ที่มีห้องแผ่นกั้นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตถูกติดตั้งในช่องการไหลของแก๊ส จากนั้น ทำการศึกษาองศาและความสูงโดยมีภาวะการแพร่กระจายของแก๊สและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมือนกันเพื่อพิจารณาถึงกำลังสุทธิของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ ผลที่ได้แสดงการเปรียบเทียบระหว่างช่องการไหลของแก๊สที่มีแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้น ช่องการไหลของแก๊สรูปแบบใหม่ที่มีแผ่นกั้น 60 องศา และความสูง 1.125 มิลลิเมตร ช่วยเพิ่มกำลังสุทธิของเซลล์เชื้อเพลิงได้ดีที่สุดเพราะความชันและความสูงของแผ่นกั้นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีองศาและความสูงมากกว่าค่านี้จะทำให้เกิดความดันลดเพิ่มขึ้นในช่องการไหลของแก๊สทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ที่ดำเนินการที่อุณหภูมิห้องมีค่าลดลง

Shimpalee และคณะ [10] ศึกษาประสิทธิภาพและการกระจายตัวของสารในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอมในห้องปฏิบัติการพื้นฐานที่ผลิตด้วยวิธีการใช้เครื่องจักรที่มีความแม่นยำสูงเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตทางเลือกอื่นๆ (เช่น stamping electrochemical etching hydroforming เป็นต้น) ทำการตรวจสอบความกว้างของช่อง ความสูง และการเซาะช่องการไหล ที่ผลิตจากกระบวนการผลิตแผ่นโลหะทางเลือกอื่นและเปรียบเทียบความแตกต่างของชิ้นตัวอย่างชิ้นต่อชิ้น งานนี้ให้พื้นฐานความรู้ที่สามารถใช้พัฒนาความทนทานและหลักการออกแบบสำหรับกระบวนการผลิตแผ่นช่องทางการไหลของแก๊สแบบสองขั้วในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอม เมื่อการผลิตแผ่นช่องทางการไหลของแก๊สแบบสองขั้วโดยสารเคมีหรือการแกะสลักไฟฟ้ามีผลต่อ draft angle หรือ etch factor แสดงให้เห็นถึงผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเอม การถ่ายเทความร้อน รูปแบบการกระจายตัวของสารภายในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอม และความดันลด ได้ผลการทดลองดังนี้ เมื่อค่า draft angle มีค่าสูง (etch factor มีค่าต่ำ) ทำให้ได้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอมที่ต่ำเนื่องจากการจัดการความร้อนที่แย่ง และยังทำให้ความดันลดต่ำลงในช่องการไหล

Owejan และคณะ [11] ศึกษาเกี่ยวกับน้ำหรือผลผลิตหลักของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอม บริเวณที่น้ำถูกผลิตคือทั่วพื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอมและเกิดการรวมตัวกันภายในสนามการไหลและชั้นแพร่แก๊สซึ่งเป็นผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอมและยังมีอิทธิพลต่อการพิจารณาการดำเนินงาน ในงานนี้วิธีการถ่ายภาพรังสีนิวตรอนถูกนำมาใช้เพื่อที่จะได้การกระจายตัวแบบ 2 มิติของน้ำในการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอม 50 ตารางเซนติเมตร ซึ่งช่องการไหลที่มีรูปร่างสามเหลี่ยมมีการรักษาน้ำไว้ได้น้อยกว่าช่องการไหลรูปร่างสี่เหลี่ยมเนื่องจากน้ำส่วนมากติดอยู่ที่มุมทั้งสองที่อยู่ติดกับชั้นตัวกลางการแพร่ผ่านของแก๊ส โดยมีขนาดของพื้นที่ตัดขวางของช่องการไหลเท่ากัน นอกจากนั้น ยังพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอมที่ใช้ตัวกลางการแพร่ผ่านที่มีแนวโน้มการซึมผ่านที่ต่ำจะรักษาน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอมได้น้อย ซึ่งในบางกรณีความแตกต่างของประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงที่มากอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอมเพียงเล็กน้อย และข้อแนะนำสำหรับการเกิดน้ำท่วมภายในบริเวณขั้วนำไฟฟ้า (electrode) หรือที่รอยต่อระหว่างขั้วนำไฟฟ้าและตัวกลางการแพร่ผ่านเป็นสาเหตุแรกของการเกิดการสูญเสียแรงดันไฟฟ้าจากการถ่ายเทมวลอย่างมีนัยสำคัญ

Manso และคณะ [2] วิจารณ์อิทธิพลของพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตของสนามการไหลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอม ตลอดการวิจารณ์นี้ได้แสดงให้เห็นถึงพารามิเตอร์เกี่ยวกับรูปทรงทางเรขาคณิตของสนามการไหลมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมโดยรวมของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอม

ข้อบกพร่องของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอาจจะแก้ปัญหาก็ได้โดยการออกแบบสนามการไหลที่เหมาะสม ดังนั้นปัญหาในการถ่ายเทมวล การจัดการน้ำ และการกระจายตัวของสารตั้งต้น สามารถแก้ปัญหาก็ได้ โดยการออกแบบสนามการไหลของแผ่นช่องทางการไหลของแก๊สแบบสองขั้วและส่วนอื่นๆ อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มเพิ่มมากขึ้น เช่น การกระจายตัวของแก๊สเนื้อเดียวในช่องการไหลของแก๊สสามารถให้ความหนาแน่นของกระแสที่มีรูปแบบคงที่ทั่วทั้งพื้นที่ เกิดปฏิกิริยาและมีการกระจายของอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ ก่อให้เกิดความเครียดเพียงเล็กน้อยในชิ้นงานชั้นประกอบเมมเบรนและขั้วไฟฟ้า และยืดอายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม ดังนั้นการออกแบบสนามการไหลเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากสำหรับความสำเร็จของประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม ผลการทดลองส่วนใหญ่แสดงให้เห็นว่าการขัดขวางของแผ่นกั้นในช่องการไหลทำให้เกิดการไหลของแก๊สจำนวนมากที่มีแรงในการไหลผ่านชั้นแพร่แก๊สไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและจากผลของการพาที่เพิ่มขึ้นนี้มีผลต่อพื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยา

Chandan และคณะ [6] ประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่มีอุณหภูมิในการดำเนินงานอยู่ในช่วง 100-200 องศาเซลเซียส พบว่า ช่วยให้ความร้อนและพลังงานทำงานร่วมกันและมีความทนทานสูงต่อเชื้อเพลิงที่มีความสกปรกและมีการออกแบบระบบที่เรียบง่าย ความสำเร็จในทิศทางของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่ดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงขึ้นอยู่กับการพัฒนาวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรนเป็นอย่างมาก การหาความเหมาะสมของเทคนิคการประดิษฐ์ชั้นประกอบเมมเบรนและขั้วไฟฟ้า ปัจจุบันวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรนของ Department of Energy (DOE) ทนอุณหภูมิสูง (ไม่สนใจความทนทาน) คือ poly(2,2'-(*m*-phenylene-0-5,5'-bibenzimidazole) (PBI) เจือกรดเนื่องจากสามารถนำไฟฟ้าได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่อย่างไรก็ตามการทำงานที่อุณหภูมิสูงยังคงไม่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ที่เคลื่อนที่เพราะความเป็นกรดในเมมเบรนเกิดการกัดกร่อนเซลล์เชื้อเพลิงเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนทำให้อายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มสั้นลง ซึ่งในปัจจุบันยังไม่พบวัสดุที่ทำงานที่อุณหภูมิสูงแล้วปราศจากความตึงเครียดนอกเหนือจาก PBI เจือกรด หรือ วัสดุเจือไอออน-ของเหลว สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ที่เคลื่อนที่ปรากฏว่ามีแนวโน้มให้ความสนใจไปยังเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่ดำเนินงานที่อุณหภูมิมกลางและมีความชื้นเล็กน้อย

Aili และคณะ [12] ศึกษาเมมเบรนคอมโพสิตระหว่าง poly(2,2'-(*m*-phenylene-0-5,5'-bibenzimidazole) (PBI) และ sulfonated polyhedral oligosilsesquioxane (S-POSS) ที่มีปริมาณ S-POSS 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ถูกเตรียมโดยวิธีการหล่อสำหรับใช้เป็นเมมเบรนเซลล์เชื้อเพลิงนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูง เมมเบรนเนื้อเดียวถูกขึ้นรูปโดยเกลือแอมโมเนียมของ S-POSS

แต่สำหรับการก่อตัวขึ้นต้องใช้ S-POSS ที่เป็นโดเมนขนาดใหญ่ในระหว่างการหล่อขึ้นรูปของเมมเบรน การเพิ่ม S-POSS ให้ผลในการปรับตัวดีขึ้นของ *ex situ* proton conductivity ภายใต้ภาวะไม่มีน้ำตลอดจนภายใต้ภาวะที่มีความชื้นเต็มที่ในช่วงอุณหภูมิ 120-180 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนที่ทำจาก PBI บริสุทธิ์เจือด้วยกรดฟอสฟอริก การปรับตัวดีขึ้นของการนำไฟฟ้าผ่านการรวมตัวกันของ S-POSS ในเนื้อของพอลิเมอร์ยังถูกยืนยันโดยผลการทดสอบ *in situ* proton conductivity ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จากข้อมูลโพลาไรซ์ (polarization) และสเปกโทรสโคปีความต้านทานไฟฟ้า (electrochemical impedance spectroscopy)

Chippar และคณะ [3] ศึกษาารูปแบบการข้ามผ่านชั้นเมมเบรน (membrane) ของแก๊สโดยพิจารณาการละลายของไฮโดรเจนหรือออกซิเจนที่กลายเป็นสถานะนำไฟฟ้าและเกิดการแพร่ผ่านชั้นเมมเบรนพอลิเมอร์เบนซิมิดาโซล (polybenzimidazoles) เจือกรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) หรือ poly(2,2'(*m*-phenylene)-5,5'bibenzimidazole) (PBI) และรวมเข้าไปอยู่ในแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่ดำเนินงานที่อุณหภูมิสูง ความสนใจหลักของการศึกษานี้คือการประเมินเชิงตัวเลขของผลกระทบของแก๊สที่ข้ามผ่านชั้นเมมเบรนต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่ดำเนินงานที่อุณหภูมิสูง ผลเชิงตัวเลขแสดงให้เห็นว่าแก๊สที่ข้ามผ่านชั้นเมมเบรนไม่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่ดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงที่มีชั้นเมมเบรน PBI ใหม่ และชั้นเมมเบรนที่ถูกย่อยสลายไปแล้วพอประมาณ โดยมีการสมมติให้มีขนาดของสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของชั้นเมมเบรนมากกว่าชั้นเมมเบรน PBI ใหม่ 1 เท่า อย่างไรก็ตาม ผลกระทบของแก๊สที่ข้ามผ่านชั้นเมมเบรนเริ่มมีปรากฏการณ์การย่อยสลายของเมมเบรนแพร่ผ่านที่รุนแรงมากขึ้นโดยสมมติให้มีขนาดของสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของชั้นเมมเบรนมากกว่าชั้นเมมเบรน PBI ใหม่ 2 เท่า การเปรียบเทียบผลของสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของชั้นเมมเบรน แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าผลกระทบที่เพิ่มขึ้นของแก๊สที่ข้ามผ่านชั้นเมมเบรนเพิ่มระดับความไม่สม่ำเสมอของการกระจายตัวของไฮโดรเจน ออกซิเจน และ ความหนาแน่นของกระแส นอกเหนือจากนี้ ผลของการจำลองเมมเบรนที่มีสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านมากกว่าชั้นเมมเบรน PBI ใหม่ 2 เท่า ยังบ่งบอกว่าแก๊สที่ข้ามผ่านชั้นเมมเบรนเป็นสาเหตุของการย่อยสลายที่เพิ่มมากขึ้นจากการดำเนินงานที่อุณหภูมิสูง และความหนาแน่นของกระแสที่ต่ำ เนื่องจากการข้ามผ่านชั้นเมมเบรนที่ง่ายมากขึ้นของไฮโดรเจนและออกซิเจนเมื่อมีอุณหภูมิการดำเนินงานที่เพิ่มสูงขึ้น และความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เพิ่มขึ้นในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความหนาแน่นของกระแสที่ต่ำ สุดท้ายการวิเคราะห์ทางความร้อนที่ได้ดำเนินงาน

ในการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ของไฮโดรเจนหรือออกซิเจนที่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้านขั้วแอโนดไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากมีความร้อนเพียง 3.5 เปอร์เซ็นต์ของความร้อนที่สูญเสียไปเท่านั้น ที่ถูกปล่อยออกมาจากกรณีของแก๊สที่ข้ามผ่านชั้นเมมเบรนที่แย่ที่สุดในการศึกษานี้ งานวิจัยนี้ได้สนับสนุนให้มีความเข้าใจพื้นฐานของปรากฏการณ์ของแก๊สที่ข้ามผ่านชั้นเมมเบรนที่เกิดขึ้นในระหว่างการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่ดำเนินงานที่อุณหภูมิสูง



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

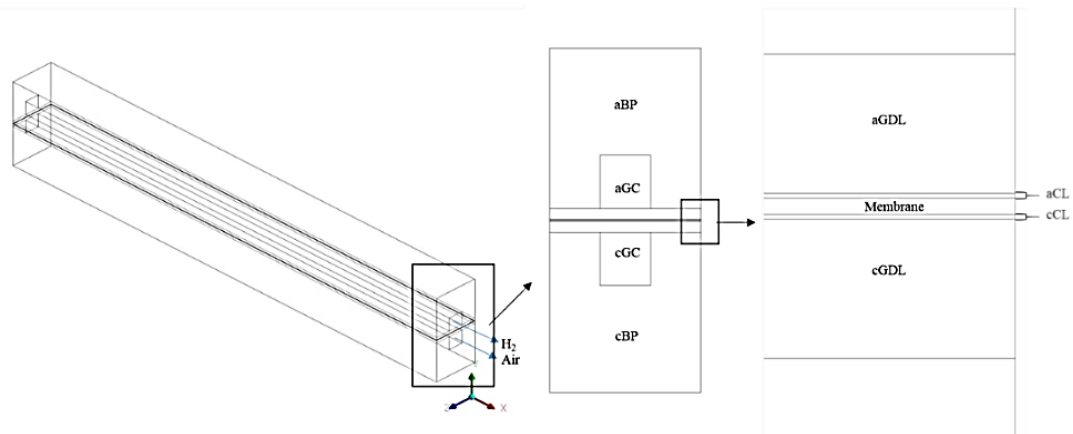
ความหลากหลายและความซับซ้อนของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าและปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลเกิดขึ้นที่ความยาวและขนาดที่แตกต่างกันของโครงสร้างที่สมมาตรและรหัสการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของของไหล (Computational fluid dynamics, CFD) ในการแก้ไขปัญหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบครบวงจร การคำนวณเชิงพลศาสตร์เกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. การสร้างแบบจำลองทางกายภาพและทางเคมี
2. การเขียนรหัสขั้นตอนเชิงตัวเลขขั้นสูงในการแก้ไขปัญหาของแบบจำลอง
3. กำหนดลักษณะของชั้นต่างๆ และกำหนดภาวะขอบเขตของแบบจำลอง
4. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยทำการพัฒนาแบบจำลองสามมิติของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดอุณหภูมิสูงที่ภาวะคงตัว (steady state) การแก้ไขปัญหาของแบบจำลองจะพิจารณาการถ่ายโอนมวล ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า และใช้รหัสการคำนวณเชิงพลศาสตร์ที่เหมาะสมในการหาผลเฉลย

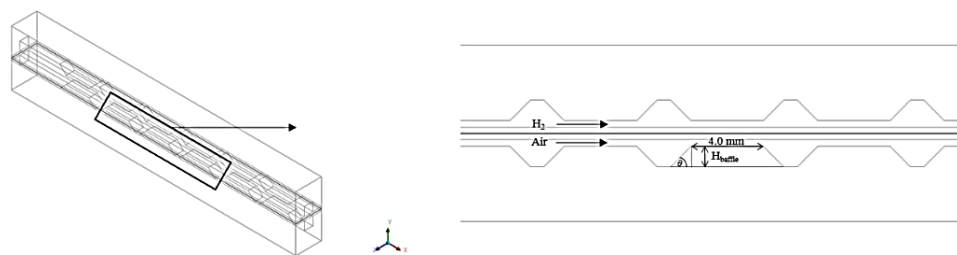
3.1 การพัฒนาแบบจำลองการไหลทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดอุณหภูมิสูง (HT-PEMFC)

แผนภาพสามมิติของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ 1 ช่องการไหลถูกแสดงในรูปที่ 3.1 แบบจำลองด้านแอโนดและแคโทดประกอบด้วย ช่องการไหลของแก๊ส ชั้นแพร่แก๊ส (GDL) และ ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (CL) ช่องการไหลของแก๊สเป็นช่องการขนส่งสารตั้งต้น (ไฮโดรเจน) และตัวออกซิแดนต์ออกซิเจน และผลิตภัณฑ์ (น้ำ) หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ แก๊สไฮโดรเจนจะถูกป้อนเข้าที่ขั้วแอโนด เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ แพลทินัม ได้โปรตอน อิเล็กตรอน และความร้อน โปรตอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์คือ แผ่นเมมเบรน ซึ่งมีสมบัติในการนำโปรตอนสูง แต่ไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่าน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกได้เป็นกระแสไฟฟ้า จากนั้นทั้งโปรตอนและอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดเพื่อทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนที่ถูกป้อนเข้ามายังขั้วแคโทด เกิดปฏิกิริยารีดักชันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ แพลทินัม ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือน้ำ



รูปที่ 3.1 แผนภาพจำลองสามมิติของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์

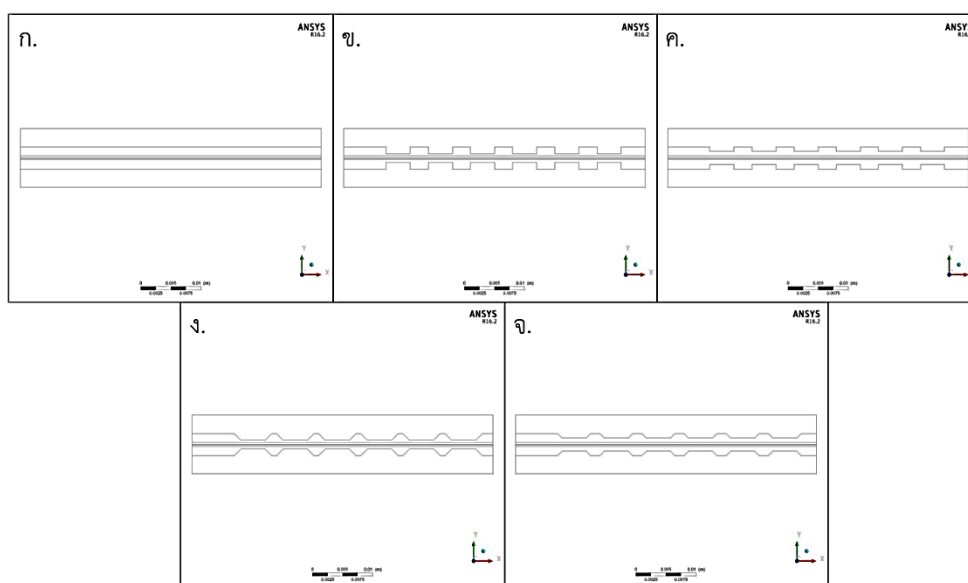
งานวิจัยชิ้นนี้ได้เพิ่มแผ่นกั้น (Baffle) ในช่องการไหลของแก๊สเพื่อศึกษาผลกระทบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดอนุกรมสูง เมื่อมีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สจะทำให้ปริมาณเชื้อเพลิงหรือสารตั้งต้นไหลเข้าไปยังขอบเขตรูพรุนเพิ่มมากขึ้น (ชั้นแพร่แก๊สและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา) แผนภาพสามมิติของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สแสดงในรูปที่ 3.2 การปรับเปลี่ยนรูปร่างของแผ่นกั้นทำได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าด้วยกันสองค่าคือ ค่ามุมความเอียงของแผ่นกั้น (องศา (θ) ของแผ่นกั้น) มีด้วยกัน 3 ค่า คือ 0° , 45° และ 90° และความสูง (H_{baffle}) ของแผ่นกั้น มีด้วยกัน 3 ค่าเช่นกัน คือ 0, 0.75 และ 1.125 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 แผนภาพจำลองสามมิติของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ที่มีแผ่นกั้นในช่องทางไหล

รูปที่ 3.3 แสดงโดเมนการคำนวณทั้งหมดที่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างของช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดอนุกรมสูง ซึ่งมีด้วยกันทั้งหมด 5 รูปแบบ คือ ก. ช่องการไหลของแก๊สที่ไม่แผ่นกั้น ข. ช่องการไหลของแก๊สที่มีแผ่นกั้นทำมุม 90° องศา และสูง 1.125 มิลลิเมตร ค. ช่องการไหลของแก๊สที่มีแผ่นกั้นทำมุม 90° องศา และสูง 0.75 มิลลิเมตร ง. ช่องการไหลของแก๊สที่มีแผ่นกั้นทำมุมเอียง 45° องศา และสูง 1.125 มิลลิเมตร และ จ. ช่องการไหลของแก๊สที่มีแผ่นกั้นทำมุม 90° องศา และสูง 0.75 มิลลิเมตร การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของช่องการไหลของแก๊สจากรูปที่ 3.3 ข.

ไปเป็นรูปที่ 3.3 ค. และการเปลี่ยนจากรูปที่ 3.3 ง. ไปเป็นรูปที่ 3.3 จ. เพื่อทำการตรวจสอบผลกระทบของความสูงของแผ่นกั้นที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูง และการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของช่องการไหลของแก๊สจากรูปที่ 3.3 ข. ไปเป็นรูปที่ 3.3 ง. และการเปลี่ยนจากรูปที่ 3.3 ค. ไปเป็นรูปที่ 3.3 จ. เพื่อทำการตรวจสอบผลกระทบขององศาของแผ่นกั้นที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูง



รูปที่ 3.3 โดเมนคำนวณของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่มีแผ่นกั้นในช่องทางไหล ก. ไม่มีแผ่นกั้น ข. 90 องศา 1.125 มิลลิเมตร ค. 90 องศา 0.75 มิลลิเมตร ง. 45 องศา 1.125 มิลลิเมตร จ. 45 องศา 0.75 มิลลิเมตร

3.2 สมมติฐานในการสร้างแบบจำลองการไหลทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูง

การศึกษาแบบจำลองสามมิติ หนึ่งสถานะของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูงทำโดยแยกฝั่งขั้วแอโนดและขั้วแคโทด เพื่อศึกษาผลของความเอียงแผ่นกั้นและความสูงของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูง โดยมีสมมติฐานในการสร้างแบบจำลองดังนี้

1. มีการไหลแบบราบเรียบ (ความเร็วของการไหลต่ำ) และของไหลไม่มีการบีบอัดตัว (สมบัติทางฟิสิกส์คงที่)

2. แก๊สผสมมีสมบัติเป็นแก๊สผสมในอุดมคติ (Ideal gas mixture) เพราะดำเนินการที่ความดันต่ำและอุณหภูมิสูง
3. ชั้นรูพรุน (ชั้นแพร่แก๊สและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา) มีการแพร่ผ่านได้เท่ากันในทุกทิศทาง (Isotropic) และเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous media)
4. ความต้านทานต่างศักย์ไฟฟ้าโอห์มมิก (Ohmic potential resistance) ระหว่างพื้นผิวหน้าสัมผัสของส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์กำหนดให้เป็นค่าคงที่
5. ผลลัพธ์ที่ได้จากด้านแคโทดคือ น้ำอยู่ในสถานะแก๊ส เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ดำเนินการที่อุณหภูมิสูง
6. อิเล็กตรอนและแก๊สไม่เดินทางข้ามผ่านชั้นเมมเบรน

3.3 สมการการควบคุม (Governing equations)

สมการการควบคุมสำหรับภาวะคงตัวของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ประกอบด้วย สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) สมการการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum) และ สมการการถ่ายโอนมวล (Species transport equation) ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการการควบคุมถูกแทนลงในสมการปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า และพจน์เพิ่มเติม (Source term) ถูกประยุกต์ใช้ในสมการของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งด้านแคโทดและด้านแอโนด

สมการอนุรักษ์มวล (Continuity equation) [13]

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S_m \quad (3.1)$$

เมื่อ ρ เป็นความหนาแน่นของของเหลว และ \vec{u} เป็นเวกเตอร์ความเร็ว และ S_m เป็นพจน์เพิ่มเติมมีค่าเท่ากับศูนย์ยกเว้นในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม [13]

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla \cdot \vec{u}) + S_u \quad (3.2)$$

เมื่อ P เป็นความดัน และ S_u เป็นพจน์เพิ่มเติม

ในขอบเขตของรูพรุน พจน์กฎของ Darcy ถูกใส่ลงไปในการโมเมนตัมแทนค่าในโมเมนตัมที่เกี่ยวข้องกับแรงที่ผิวหน้า พจน์เพิ่มเติมถูกให้ความหมายดังสมการที่ (3.3) [13]

$$S_u = -\frac{\mu \vec{u}}{\beta} \quad (3.3)$$

เมื่อ β เป็นสภาพให้ซึมผ่านได้

สมการอนุรักษ์องค์ประกอบ [13]

$$\nabla \cdot (\vec{u}C_i) = \nabla \cdot (D_i^{eff} \nabla C_i) + S_i \quad (3.4)$$

เมื่อ ดัชนี i หมายถึงชนิดของสารแต่ละชนิด C_i เป็นความเข้มข้นของสารชนิด i และ D_i^{eff} เป็นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มวลจริงของสาร i สมการอนุรักษ์สารสำหรับไฮโดรเจน ถูกคำนวณในด้านแอโนด [13]

$$\nabla \cdot (\vec{u}C_{H_2}) = \nabla \cdot (D_{H_2}^{eff} \nabla C_{H_2}) + S_{H_2} \quad (3.4 ก)$$

สมการอนุรักษ์สารสำหรับออกซิเจนและไอน้ำเป็นการคำนวณในด้านแคโทด [13]

$$\nabla \cdot (\vec{u}C_{O_2}) = \nabla \cdot (D_{O_2}^{eff} \nabla C_{O_2}) + S_{O_2} \quad (3.4 ข)$$

$$\nabla \cdot (\vec{u}C_{H_2O}) = \nabla \cdot (D_{H_2O}^{eff} \nabla C_{H_2O}) + S_{H_2O} \quad (3.4 ก)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน [13]

$$\nabla \cdot (\rho C_p \vec{u}T) = \nabla \cdot (k_i^{eff} \nabla T) + S_T \quad (3.5)$$

เมื่อ C_p เป็นความจุความร้อนจำเพาะ T เป็นอุณหภูมิ และ k_i^{eff} เป็นค่าการนำความร้อนของสาร i

ผลกระทบของขอบเขตที่มีรูพรุนในการขนส่งแก๊สถูกพิจารณาโดยเพิ่มพจน์เพิ่มเติมลงในสมการโมเมนตัม และสัมประสิทธิ์การแพร่มวลจริง ในสมการการถ่ายโอนสารถูกปรับปรุงโดยการพิจารณาความเป็นรูพรุนและความคดเคี้ยวบนพื้นฐานของความสัมพันธ์ Bruggeman ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารในขอบเขตรูพรุนถูกอธิบายโดยการแก้ไข Bruggeman [13]

$$D_i^{eff} = \epsilon^{1.5} D_i \quad (3.6)$$

เมื่อ D_i ($m^2 s^{-1}$) เป็นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มวลขนาดใหญ่สำหรับสาร i การคำนวณมีพื้นฐานความสัมพันธ์ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์การถ่ายโอน [14]

พารามิเตอร์	ความสัมพันธ์/มูลค่า (อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน, ความดันในหน่วยปาสคาล)	หน่วย
สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในด้านแอโนด	$D_{H_2}^a = 1.055 \times 10^{-4} \left(\frac{T}{333.15} \right)^{1.5} \left(\frac{101325}{p} \right)$	เมตร ² วินาที ⁻¹
สัมประสิทธิ์การแพร่ของออกซิเจนในด้านแคโทด	$D_{O_2}^c = 2.652 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{333.15} \right)^{1.5} \left(\frac{101325}{p} \right)$	เมตร ² วินาที ⁻¹
สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอน้ำในด้านแคโทด	$D_{H_2O}^c = 2.982 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{333.15} \right)^{1.5} \left(\frac{101325}{p} \right)$	เมตร ² วินาที ⁻¹
ค่าความร้อนจำเพาะของสาร	$C_{PH_2} = 14430; C_{PO_2} = 929; C_{PH_2O} = 1968; C_{PN_2} = 1042$	จูล กิโลกรัม ⁻¹ เคลวิน ⁻¹
ค่าการนำความร้อนของสาร	$k_{H_2} = 0.2040; k_{O_2} = 0.0296; k_{H_2O} = 0.02378; k_{N_2} = 0.0293$	วัตต์ เมตร ⁻¹ เคลวิน ⁻¹

พจน์เพิ่มเติม (S_i) ในสมการอนุรักษ์มวลจะกำหนดให้เป็นศูนย์สำหรับทุกส่วนประกอบของแบบจำลองสามมิติเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มยกเว้นชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา พจน์เพิ่มเติมสำหรับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแอโนดและแคโทดแสดงไว้ดังนี้

- ปริมาณการใช้ของไฮโดรเจนเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาทางด้านแอโนด [3]

$$S_{H_2} = -\frac{j_a}{2F} M_{H_2} \quad (3.7)$$

- ปริมาณการใช้ของออกซิเจนเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาทางด้านแคโทด [3]

$$S_{O_2} = \frac{j_c}{4F} M_{O_2} \quad (3.8)$$

- การผลิตน้ำและการไหลของน้ำเนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาทางด้านแคโทด [3]

$$S_{H_2O} = -\frac{j_c}{2F} M_{H_2O} \quad (3.9)$$

ความหนาแน่นกระแสถ่ายโอน (Transfer current density, j) และน้ำหนักรวมของสาร (M) ถูกใช้คำนวณในพจน์เพิ่มเติม (Source term) มีหลายสมการเสริม (Auxiliary equation) ที่จำเป็นในการแก้ไขปัญหาแบบจำลองปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าและการกำหนดความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ พจน์เพิ่มเติมที่ใช้สำหรับแบบจำลองหนึ่งภูมิภาคถูกสรุปลงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พจน์เพิ่มเติมสำหรับแบบจำลองหนึ่งวัฏภาค [3]

พจน์เพิ่มเติม (Source term)		Unit
$S_u = -\frac{\mu}{K} \bar{u}$ (ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีและชั้นแพร่แก๊ส)		กิโลกรัม เมตร ⁻² วินาที ⁻¹
$S_m = \begin{cases} -M_{H_2} \frac{j_a}{2F} & \text{(ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแอโนด)} \\ M_{O_2} \frac{j_c}{4F} - M_{H_2O} \frac{j_c}{2F} & \text{(ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแคโทด)} \end{cases}$	$S_{O_2} = -\frac{j_c}{4F} M_{O_2}$ (ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแคโทด)	กิโลกรัม เมตร ⁻³ วินาที ⁻¹
$S_{H_2} = -\frac{j_a}{2F} M_{H_2}$ (ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแอโนด)	$S_{H_2O} = \frac{j_c}{2F} M_{H_2O}$ (ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแคโทด)	กิโลกรัม เมตร ⁻³ วินาที ⁻¹
$S_T = \begin{cases} ja\eta + \frac{I^2}{\kappa^{eff}} & \text{(ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแอโนด)} \\ jc\eta + \frac{I^2}{\kappa^{eff}} + jc \frac{dU_o}{dT} T & \text{(ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแคโทด)} \end{cases}$		วัตต์ เมตร ⁻³

ค่าสภาพนำโปรตอน (K) ของเมมเบรนพอลิเบนซิลไมตาโซลเจลด้วยกรดฟอสฟอริกเป็นความสัมพันธ์ระหว่างระดับของการเจือกรดฟอสฟอริก (X) และอุณหภูมิ (T) ดังต่อไปนี้ [3]

$$\kappa = \frac{100}{T} \exp \left[8.0219 - \left(\frac{2605.6 - 70.1X}{T} \right) \right] \quad (3.10)$$

ค่าสภาพนำโปรตอนจริง (κ^{eff}) ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้รับจากการรวมกันของผลที่เกิดจากสัดส่วนปริมาตรของเมมเบรน (ϵ_{mc}) และความคดเคี้ยวของตัวกลางที่เป็นรูพรุนด้วยโดยใช้ความสัมพันธ์ของ Bruggemann [3]

$$\kappa^{eff} = \epsilon_{mc}^{1.5} \kappa \quad (3.11)$$

3.4 สมการเสริม (Auxiliary Equation)

สมการเสริมของแบบจำลองที่จำเป็นต้องใช้ในการแก้ไขปัญหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ที่ความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยสรุปไว้ในส่วนถัดไป

ลักษณะโพลาริเซชัน (Polarization characteristics)

ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ลดลงเนื่องจากการสูญเสียผันกลับไม่ได้ (Polarization Overpotential and Overvoltage losses) ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.12) [13]

$$V_{cell} = E - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc} \quad (3.12)$$

เมื่อ E เป็นศักย์ไฟฟ้าที่ภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ Nernst [14]

$$E = 1.185 - 23 \times 10^{-4}(T - 298.15) + \frac{RT}{2F} \times (\ln p_{H_2}^{in} + \frac{1}{2} \ln p_{O_2}^{in}) \quad (3.13)$$

ในสมการนี้ ความดันย่อยขาเข้าของไฮโดรเจนและออกซิเจน (atm) และอุณหภูมิการดำเนินการ (T, K) ถูกใช้ในการคำนวณ ในแบบจำลองนี้

η_{act} เป็นศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของการก่อกัมมันต์ (Activation overpotential) η_{ohm} เป็นศักย์ที่ตกคร่อมความต้านทาน (Ohmic overpotential) ของอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิง และ η_{conc} เป็นศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของความเข้มข้น (Concentration overpotential)

- ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของการก่อกัมมันต์ (η_{act})

ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของการก่อกัมมันต์เป็นฟังก์ชันของการถ่ายโอนความหนาแน่นกระแส (Transfer current density, j) การเปลี่ยนแปลงกระแส (exchange current density, i_0^{ref}) และความเข้มข้นของออกซิเจน (C_{O_2}) ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของการก่อกัมมันต์แสดงได้โดยสมการ Butler-Volmer [3]

$$j_a = ai_{0,a}^{ref} \left(\frac{C_{H_2}}{C_{H_2,ref}} \right)^{0.5} \left(\frac{\alpha_a + \alpha_c}{RT} F\eta \right) \quad (3.14)$$

$$j_c = -ai_{0,a}^{ref} \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2,ref}} \right)^{0.75} \exp \left(-\frac{\alpha_c}{RT} F\eta \right) \quad (3.15)$$

ค่าของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของสมการที่ (3.14) และสมการที่ (3.15) ถูกระบุไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ไฮโดรเจนสูง (HT-PEMFC) [3]

พารามิเตอร์	ความสัมพันธ์/มูลค่า (อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน)		หน่วย
	แอโนด	แคโทด	
ปริมาณอ้างอิงของความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยน	$a_{i_{0,a}}^{ref} = 10^9 \exp \left[-1400 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{353.15} \right) \right]$	$a_{i_{0,c}}^{ref} = 10^4 \exp \left[-7900 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{353.15} \right) \right]$	แอมแปร์ เมตร ³
ความเข้มข้นอ้างอิงของไฮโดรเจนและออกซิเจน	$C_{H_2,ref} = 40.88$	$C_{O_2,ref} = 40.88$	โมล เมตร ³
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท	$\alpha_a = 0.5$	$\alpha_c = 0.5$	ไร้มิติ
ความต่างศักย์ไฟฟ้าของพื้นผิว	$\eta_a = \phi_{s,a} - \phi_{e,a} - U_{o,a}$ (with $\phi_s = 0$)	$\eta_c = \phi_{s,c} - \phi_{e,c} - U_{o,c}$ (with $\phi_s = V_{cell}$)	โวลต์
ศักย์ไฟฟ้าความสมดุลทางอุณหพลศาสตร์	$U_{o,a} = 0$	$U_{o,c} = 1.185 - 2.3 \times 10^{-4} (T_{opt} - 298.15)$	โวลต์
ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจน (HOR) ที่ด้านแอโนด: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$			
ปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน (ORR) ที่ด้านแคโทด: $2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$			

- ศักย์ที่ตกคร่อมความต้านทาน (η_{ohm})

ศักย์ที่ตกคร่อมความต้านทานของอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิงเกิดเนื่องจากความต้านทานการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและไอออน

- ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของความเข้มข้น (η_{conc})

ที่ความหนาแน่นกระแสสูง การลดลงของศักย์ไฟฟ้าของกราฟโพลาร์ไรเซชันการสูญเสียส่วนมากเกิดจากศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของความเข้มข้น มีสาเหตุเกิดจากการแพร่ผ่านที่ช้าของแก๊สผ่านขอบเขตรูพรุน การสูญเสียนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.16) [13]

$$\eta_{conc} = -\frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (3.16)$$

เมื่อ i_L ความหนาแน่นกระแสจำกัด (Limiting current density) [13]

$$i_L = \frac{nFD_i C_{i,0}}{H_d} \quad (3.17)$$

3.5 ภาวะขอบเขต

การกำหนดภาวะขอบเขต กำหนดที่ทางเข้าของแก๊สด้านแอโนดและแคโทด ความเร็วขาเข้าเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนการไหลของทฤษฎี (ξ) พื้นที่เรขาคณิตของเมมเบรน (A_m) และพื้นที่

ตัดขวางของช่องการไหลของแก๊ส (A_{ch}) ความหนาแน่นกระแสอ้างอิง (I_{ref}) และความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือเชื้อเพลิงและตัวออกซิแดนต์ [13]

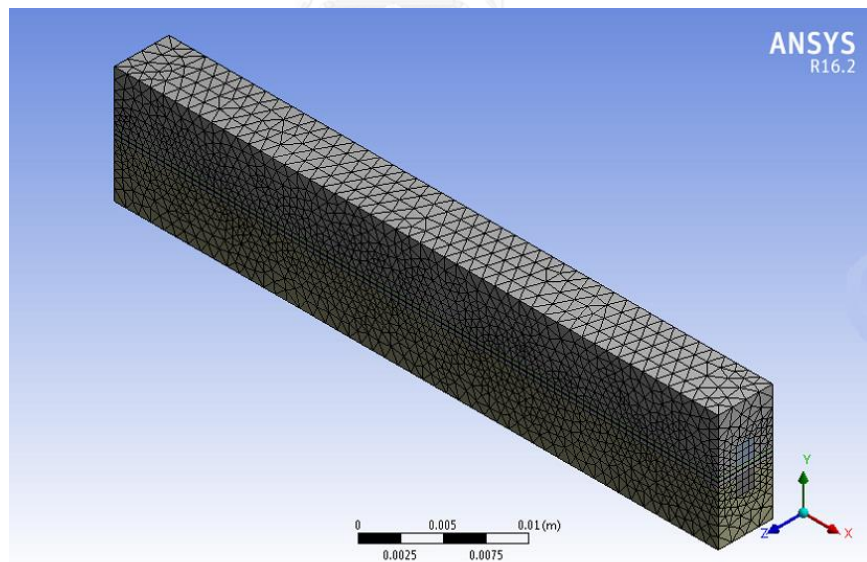
$$u_{a,in} = \xi_a \frac{I_{ref}}{2F} \frac{1}{x_{H_2,in}} \frac{RT}{P} \frac{A_m}{A_{ch}} \quad (3.18)$$

$$u_{c,in} = \xi_c \frac{I_{ref}}{4F} \frac{1}{x_{O_2,in}} \frac{RT}{P} \frac{A_m}{A_{ch}} \quad (3.19)$$

กำหนดภาวะขอบเขตความดันขาออกของแก๊สเป็นค่าสมมติค่าหนึ่ง กำหนดภาวะขอบเขตสมมาตรให้กับพื้นผิวด้านข้างของขอบเขตรูพรุน (รูปที่ 3.1) และกำหนดภาวะไม่มีการเลื่อนไหลของผนังให้กับผนังด้านนอกของแบบจำลองสามมิติเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

3.6 ขั้นตอนการคำนวณ

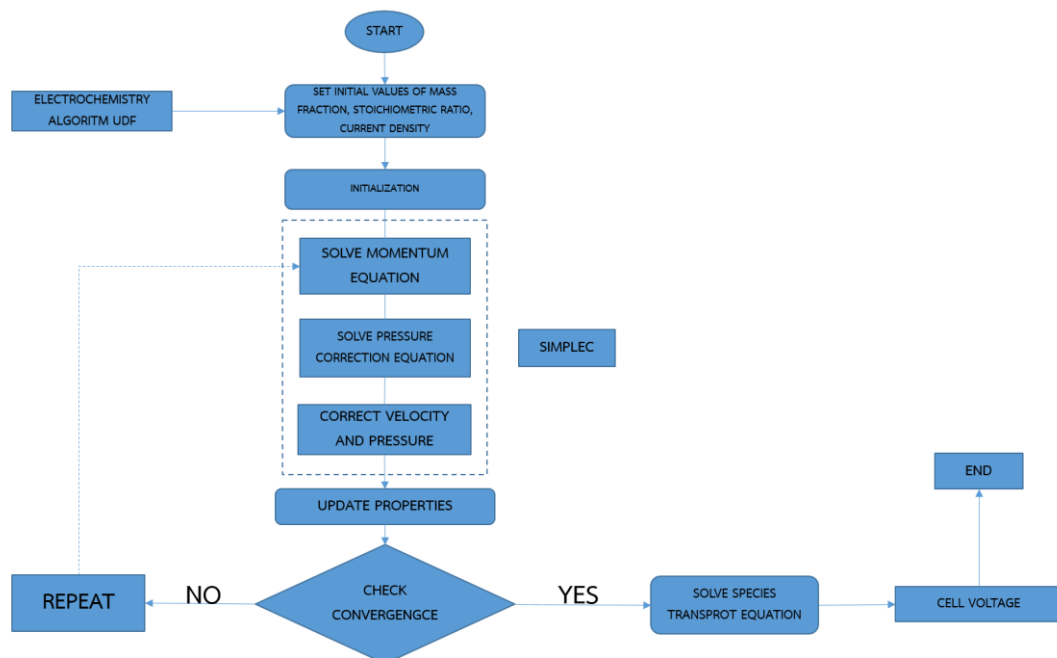
โดเมนคำนวณถูกแบ่งออกเป็นช่องเล็กๆ ประมาณ 100,000 เซลล์ การทดสอบความอ่อนไหวของการแบ่งโดเมนเป็นช่องเล็กทำตั้งแต่ 60,000 เซลล์ขึ้นไป เพื่อเป็นการพิสูจน์ขนาดของช่องเล็กๆ ที่เพียงพอต่อความเป็นอิสระของการแบ่งช่อง (Grid independency)



รูปที่ 3.4 การแบ่งช่องเล็กๆ ที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลอง (Numerical grid of the model)

โดเมนการคำนวณของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูงถูกแบ่งเป็นเซลล์เล็กๆ ในจำนวนที่เหมาะสมต่อการจำลองกระบวนการโดยโปรแกรม ANSYS FLUENT 16.2 ดังรูปที่ 3.4 จากนั้นกำหนดสมการการควบคุม (Governing equations) และสมการเสริม (Auxiliary equations) ให้กับ

เซลล์เล็กๆ เหล่านั้น โดยสมการควบคุมที่มีพจน์เพิ่มเติมอันได้แก่ สมการพลังงาน สมการโมเมนตัม และสมการมวลสารของแต่ละสารประกอบ ผู้วิจัยต้องเขียนรหัสคอมพิวเตอร์ลงในฟังก์ชันที่ผู้ใช้กำหนดเอง (User defined functions, UDFs) ซึ่งถูกเขียนโดยใช้ภาษา C++ เพื่อคำนวณและทำนายปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม สำหรับพจน์การพาและการแพร่ใช้การดิสครีไทส์แบบ second order upwind และแก้สมการด้วยวิธีการ SIMPLEC ซึ่งผลการคำนวณจะได้ ความดัน ความเร็ว ความเข้มข้น และอุณหภูมิของของไหล ซึ่งค่าดังกล่าวจะถูกนำไปคำนวณหา ค่าศักย์ไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในการป้อนสารตั้งต้นและตัวออกซิแดนต์เข้ามาในระบบ และ กำลังไฟฟ้าสุทธิที่เซลล์สามารถผลิตได้ ขั้นตอนการดำเนินการการแก้ไขปัญหามถูกแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนภาพขั้นตอนของกระบวนการเชิงตัวเลข [13]

งานวิจัยนี้ต้องการตรวจสอบผลกระทบของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์อุณหภูมิสูง ซึ่งค่าที่ใช้ในการแสดงถึงสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์อุณหภูมิสูงคือ กราฟลาไรเซชัน (Polarization curve) สนามความเร็ว (Velocity field) การถ่ายโอนสารตั้งต้นหรือเชื้อเพลิง (Reactant transport) การกำจัดน้ำ (Removal of liquid water) ความดันลดลง (Pressure drop) และ กำลังไฟฟ้าสุทธิของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์อุณหภูมิสูง

3.7 พารามิเตอร์การสร้างแบบจำลอง

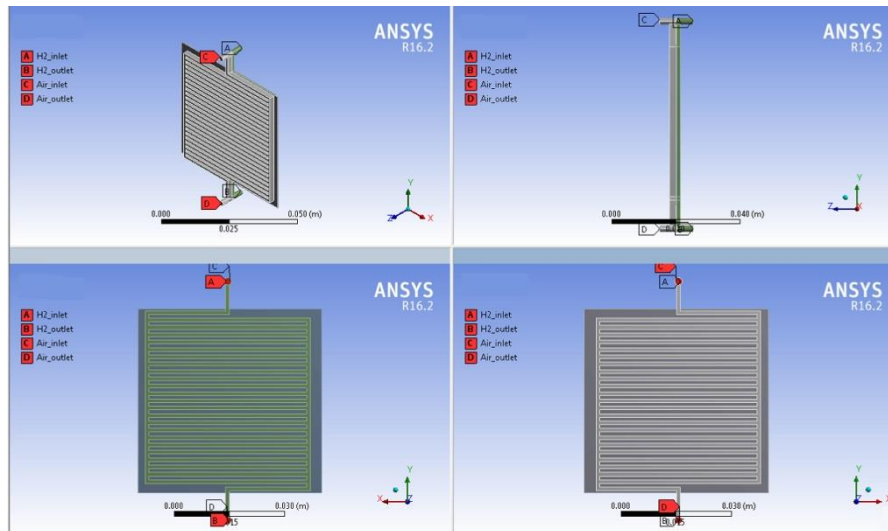
หน่วยทางฟิสิกส์ของโดเมนคำนวณรวมทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่ม อุณหภูมิสูงถูกแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่ม และภาวะการดำเนินการ [3]

พารามิเตอร์	ขนาด
ความยาว; ความกว้าง และความลึกช่องการไหลของแก๊ส	50; 1.5; 1.5 มิลลิเมตร
ความหนาของชั้น เมมเบรน; ตัวเร่งปฏิกิริยา และการแพร่ผ่านแก๊ส	0.035; 0.01; 0.3 มิลลิเมตร
สัดส่วนโดยปริมาตรของอิเล็กโทรไลต์ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา	$\omega = 0.4$
ค่าความเป็นรูพรุนของชั้น ตัวเร่งปฏิกิริยา และการแพร่ผ่านแก๊ส	$\varepsilon_{CL,GDL} = 0.3; 0.6$
ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของชั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี และการแพร่ผ่านแก๊ส	$\beta_{CL,GDL} = 1 \times 10^{-13}; 1 \times 10^{-12}$
ค่าความหนาแน่นของชั้น เมมเบรน; ตัวเร่งปฏิกิริยา และการแพร่ผ่านแก๊ส	$\rho_{mem,CL,GDL,BP} = 1000$ กิโลกรัม เมตร ⁻³
ค่าความร้อนจำเพาะของชั้น เมมเบรน; ตัวเร่งปฏิกิริยา และการแพร่ผ่านแก๊ส	$C_{P,mem,CL,GDL,BP} = 1650; 3300; 568; 2930$ จูล กิโลกรัม ⁻¹ เคลวิน ⁻¹
ค่าการนำความร้อนของชั้น เมมเบรน; ตัวเร่งปฏิกิริยา, การแพร่ผ่านแก๊ส และ แผ่นช่องการไหลของแก๊สแบบสองซิว	$k_{mem,CL,GDL,BP} = 0.95; 1.5; 1.2; 20$ วัตต์ เมตร ⁻¹ เคลวิน ⁻¹
ปริมาณสารสัมพันธ์ของ ด้านแอโนดและด้านแคโทด	$\xi_{a,c} = 2$ (ไฮโดรเจนบริสุทธิ์; อากาศ)
ความชื้นสัมพัทธ์ของแก๊สขาเข้า	$RH_{a,c}^{in} = 0.0\%$
ความดันขาเข้าด้านแอโนดและด้านแคโทด	$P_{a,c}^{in} = 101325$ ปาสคาล
อุณหภูมิดำเนินการ	$T = 373; 453$ เคลวิน
ระดับการเดือดของฟอสฟอริก	$X = 6.2$

3.8 การเปลี่ยนโดเมนคำนวณที่มีการขยายขนาดขึ้น

ในส่วนแรกของการทดลองเป็นการทดสอบกับแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มที่มีช่องการไหลของแก๊สเป็นแบบช่องเดี่ยว (Single channel) เพื่อหาขนาดขององศาและความสูงของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่ส่งผลทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงอุณหภูมิสูงมีค่ามากที่สุด ต่อจากนั้นจึงนำค่าองศาและความสูงที่ทำให้ได้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มที่ดีที่สุดจำลองลงในช่องทางการไหลของแก๊สในโดเมนคำนวณของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มอุณหภูมิสูงที่มีช่องการไหลของแก๊สเป็นแบบขนานและมีขนาดใหญ่ขึ้นคือ มีขนาดของพื้นที่ตัดขวางของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 25 ตารางเซนติเมตร โดเมนการคำนวณของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มที่มีช่องการไหลของแก๊สแบบขนานแสดงดังในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่มีช่องการไหลของแก๊สแบบขนานและมีพื้นที่ตัดขวางชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 25 ตารางเซนติเมตร

ในการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 25 ตารางเซนติเมตร มีภาวะขอบเขตเป็นค่าคงที่ และพารามิเตอร์ต่างๆ เหมือนกับการจำลองกรณีของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่มีช่องการไหลของแก๊สแบบช่องเดี่ยวจะแตกต่างกันแค่สมบัติของโดเมนคำนวณ ซึ่งสมบัติของโดเมนคำนวณของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่มีช่องการไหลของแก๊สแบบขนานที่มีขนาดพื้นที่ตัดขวางของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 25 ตารางเซนติเมตรแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลมีช่องการไหลของแก๊สแบบขนานที่มีขนาดพื้นที่ตัดขวางของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 25 ตารางเซนติเมตร [15]

สมบัติทางกายภาพ	ขนาด
ความหนาของชั้นแพร่แก๊ส ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา และชั้นเมมเบรน	0.1, 0.01 และ 0.0508 มิลลิเมตร
ความลึกของช่องการไหลของแก๊สในด้านแอโนด และแคโทด	1 และ 2 มิลลิเมตร
ความกว้างของช่องการไหลของแก๊ส	1 มิลลิเมตร
ความหนาของสันที่กั้นระหว่างช่องการไหลของแก๊ส	1 มิลลิเมตร

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของรูปร่างแผ่นกั้นต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจน งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาผลกระทบของรูปร่างแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สแบบช่องเดี่ยว (Single channel) เพื่อตรวจสอบว่ารูปร่างแผ่นกั้นส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์มากน้อยเพียงไร ส่วนที่สองคือการนำรูปร่างของแผ่นกั้นที่ให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์สูงที่สุดจากการจำลองช่องการไหลของแก๊สแบบเดี่ยวมาประยุกต์เพื่อสร้างช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจน ที่มีรูปแบบช่องการไหลของแก๊สแบบขนาน (Parallel channel) ขนาดพื้นที่ตัดขวางของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา 25 ตารางเซนติเมตร การศึกษาผลกระทบของรูปร่างแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจนทำโดยการวิเคราะห์ผลการทดลองดังนี้

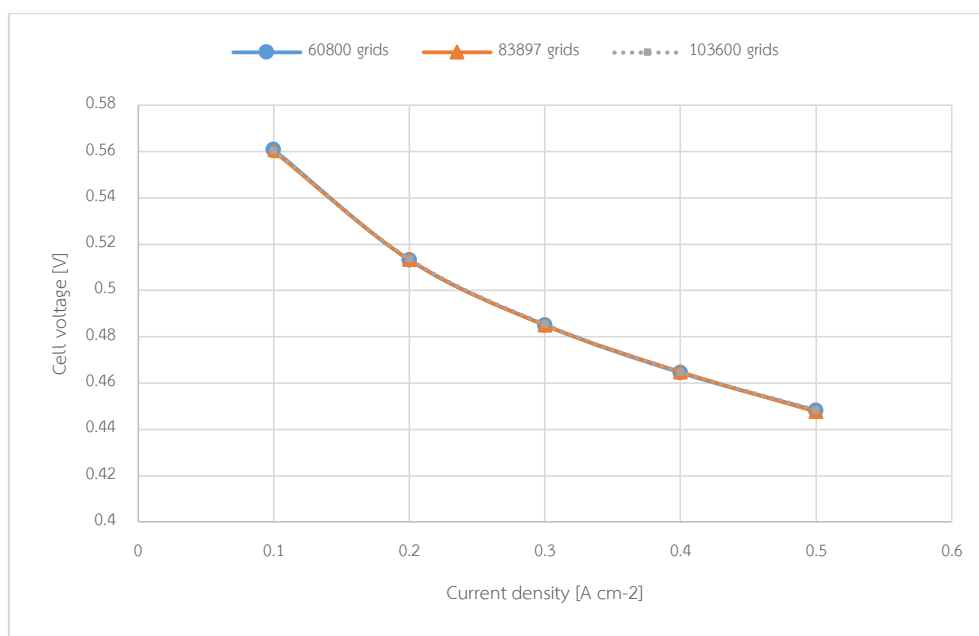
4.1 การตรวจสอบความเหมาะสมของโดเมนคำนวณ

การจำลองภาวะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจน โดยจำลองการไหลเป็นแบบราบเรียบในภูมิภาคเดียว เพื่อตรวจสอบศักยภาพและความเหมาะสมของโดเมนการคำนวณที่ได้พัฒนาขึ้นมาว่าเหมาะสมในการทำนายสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจนหรือไม่นั้น ต้องทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณที่พัฒนาขึ้นกับผลการทดลองจริง ก่อนจะเปรียบเทียบผลของการคำนวณที่พัฒนาขึ้นกับผลการทดลองจริงต้องทำการตรวจสอบความเป็นอิสระของการแบ่งเป็นช่องเล็กๆ (Grid independency) เพื่อให้ผลที่ได้ไม่ขึ้นอยู่กับกรังการแบ่งช่องการคำนวณ

4.1.1 ผลของความอิสระของการแบ่งช่อง (Grid independency)

โดเมนการคำนวณถูกแบ่งออกเป็นช่องเล็กๆ ประมาณ 100,000 เซลล์ จึงเพียงพอต่อความเป็นอิสระของการแบ่งเป็นช่อง สาเหตุที่ค่าเป็นเพียงค่าประมาณเนื่องจากงานวิจัยนี้มีการเพิ่มแผ่นกั้นเข้าไปในช่องการไหลของแก๊สทำให้ต้องทำการแบ่งเป็นช่องเล็กๆ ใหม่ทุกครั้งที่เปลี่ยนโดเมนการคำนวณ การทดสอบความอ่อนไหวของการแบ่งโดเมนเป็นช่องเล็กๆ ทำตั้งแต่ 60,000 เซลล์ขึ้นไป เพื่อพิสูจน์ความเป็นอิสระจากขนาดของช่องเล็กๆ ที่ใช้ในการคำนวณ ผลของความอิสระของการแบ่งช่องถูกแสดงในรูปที่ 4.1 จะสังเกตเห็นว่าการแบ่งโดเมนการคำนวณเป็นช่องเล็กๆ ที่มากกว่า 60,000 ช่อง

จะไม่ส่งผลต่อคำตอบที่ได้จากการคำนวณ ดังนั้นเพื่อความรวดเร็วในการคำนวณจึงใช้การแบ่งช่องประมาณ 60,000 ช่อง ก็เพียงพอต่อการคำนวณแล้ว

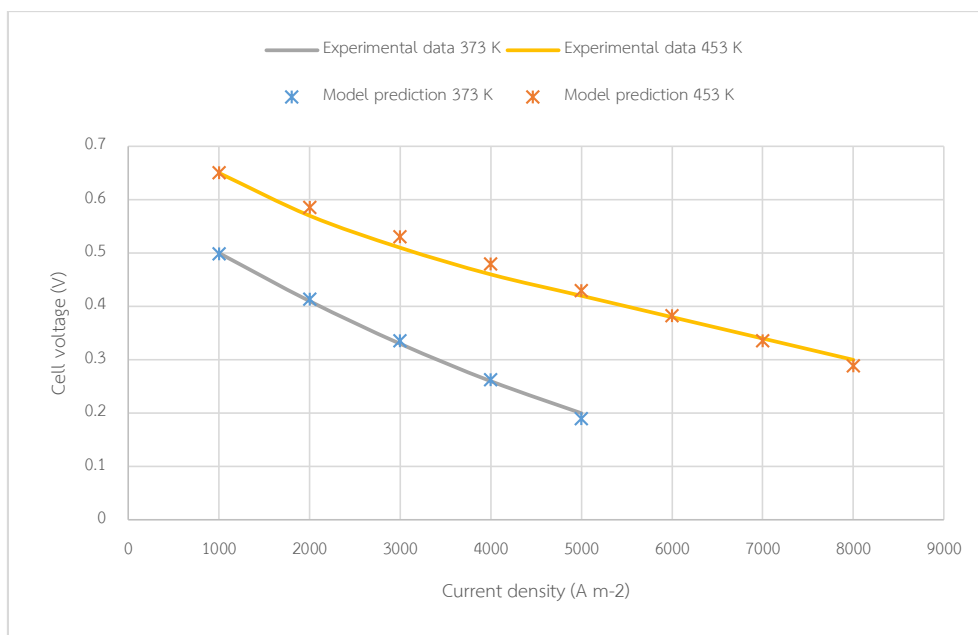


รูปที่ 4.1 กราฟโพลาริเซชันแสดงความเป็นอิสระของการแบ่งช่องของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวีเอ็มอุณหภูมิสูงที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส

4.1.2 การเปรียบเทียบผลจากการคำนวณเทียบกับผลการทดลองจริง

รูปที่ 4.2 แสดงผลการคำนวณจากแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวีเอ็มอุณหภูมิสูงที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลแบบช่องเดี่ยว (Single channel) เทียบกับผลการทดลองของ P. Chippar และ H. Ju [3] จะเห็นว่าผลที่ได้จากการคำนวณให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงมากทั้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และ 180 องศาเซลเซียส ดังนั้นแบบจำลองการคำนวณที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการตรวจสอบผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นกั้นต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวีเอ็มอุณหภูมิสูง

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลองจริงของ P. Chippar และ H. Ju [3] และ ผลที่ได้จากแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวีเอ็มอุณหภูมิ 100 และ 180 องศาเซลเซียส ค่าความคลาดเคลื่อนที่มากที่สุดคือ 4.88 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ต่ำ ดังนั้นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมในการทำนายผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นกั้นต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวีเอ็มอุณหภูมิสูง



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบกราฟโพลาริเซชันระหว่างผลการทดลองจริงของ P. Chippar และ H. Ju [3] และ ผลที่ได้จากแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดอุณหภูมิ 100 และ 180 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.1 เปรอ์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลองจริงของ P. Chippar และ H. Ju [3] และ ผลที่ได้จากแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

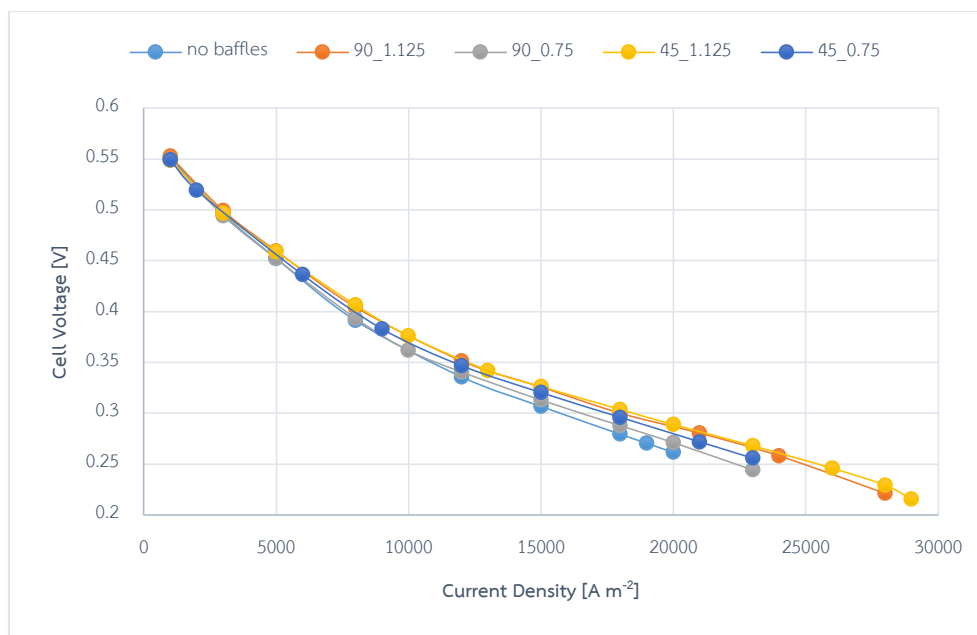
ความหนาแน่นกระแส (A/m ²)	แรงดันไฟฟ้า (V)		ความคลาด เคลื่อน (%)
	ผลที่ได้จากการทดลอง จริง	ผลที่ได้จาก แบบจำลอง	
1000	0.5	0.49814	0.372
2000	0.41	0.41317	0.77
3000	0.33	0.33612	1.85
4000	0.26	0.2623	0.88
5000	0.20	0.19025	4.88

ตารางที่ 4.2 เปรอ์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลองจริงของ P. Chippar และ H. Ju [3] และ ผลที่ได้จากแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

ความหนาแน่นกระแส (A/m ²)	แรงดันไฟฟ้า (V)		ความคลาด เคลื่อน (%)
	ผลที่ได้จากการทดลอง จริง	ผลที่ได้จาก แบบจำลอง	
1000	0.65	0.650	0.06
2000	0.57	0.586	2.76
3000	0.51	0.530	4.03
4000	0.46	0.479	4.17
5000	0.42	0.430	2.40
6000	0.38	0.382	0.59
7000	0.34	0.335	1.38
8000	0.30	0.289	3.63

4.2 การศึกษาอุทกพลศาสตร์และการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มอุณหภูมิสูงที่มีช่องการไหลของแก๊สแบบเดี่ยว (Single channel)

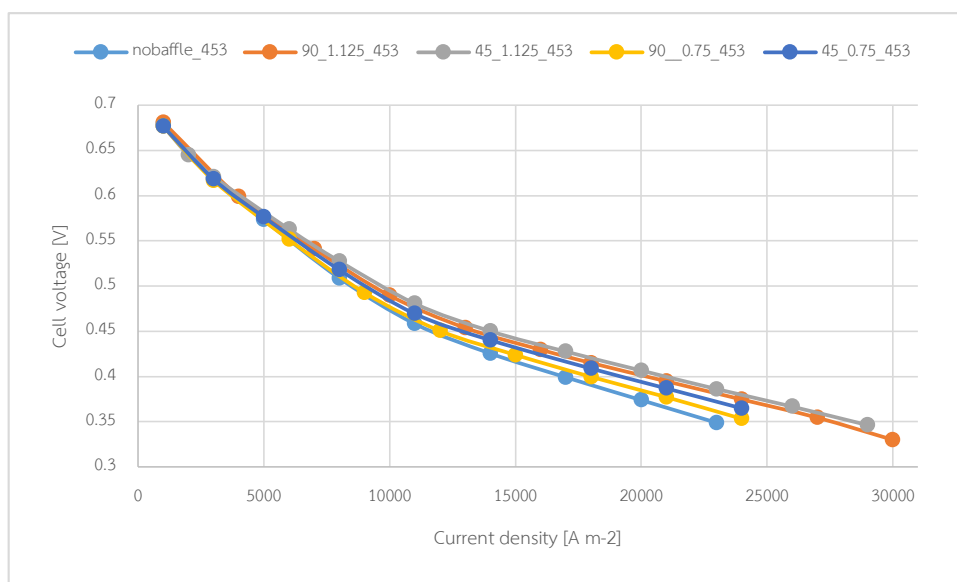
จากรูปที่ 4.3 แสดงกราฟโพลารไรเซชันของผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงองศาและความสูงของแผ่นกั้นต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่ม ที่อุณหภูมิดำเนินการ 100 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองจะสังเกตเห็นว่า เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่ม ที่อุณหภูมิดำเนินการ 100 องศาเซลเซียส และไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส ให้เส้นกราฟโพลารไรเซชันต่ำที่สุด สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มอุณหภูมิสูงที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สให้ผลที่ดีขึ้นตามลำดับ โดยมีการปรับเปลี่ยนมุมเอียงและความสูงของแผ่นกั้นดังนี้ แผ่นกั้นทำมุม 90 องศาและสูง 0.75 มิลลิเมตร, แผ่นกั้นทำมุม 45 องศาและสูง 0.75 มิลลิเมตร, แผ่นกั้นทำมุม 90 องศาและสูง 1.125 มิลลิเมตร และแผ่นกั้นทำมุม 45 องศาและสูง 1.125 มิลลิเมตร ผลจากการจำลองพบว่าแผ่นกั้นทำมุม 45 องศาและสูง 1.125 มิลลิเมตร ให้เส้นกราฟโพลารไรเซชันที่สูงที่สุด เนื่องจากแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่ทำมุม 45 องศาและสูง 1.125 มิลลิเมตร จะบังคับให้สารตั้งต้นหรือเชื้อเพลิงแพร่เข้าไปยังชั้นรูพรุนได้มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Wu Perng และคณะ [9] ที่พบว่าเมื่อติดตั้งแผ่นกั้นลงไปช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มอุณหภูมิสูงแล้วจะทำให้เส้นกราฟโพลารไรเซชันมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.3 กราฟโพลาริเซชันของผลกระทบบของการเปลี่ยนแปลงองศาและความสูงของแผ่นกั้นต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพื้อเอ็มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.4 เป็นกราฟโพลาริเซชันแสดงผลกระทบบของการเปลี่ยนแปลงมุมและความสูงของแผ่นกั้นต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพื้อเอ็มที่อุณหภูมิดำเนินการ 180 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ผลการคำนวณเช่นเดียวกันกับการทดลองที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส คือ แผ่นกั้นในช่องการไหลที่ทำมุม 45 องศา สูง 1.125 มิลลิเมตร ให้เส้นกราฟโพลาริเซชันที่สูงที่สุด รองลงมาก็เป็นแผ่นกั้นที่ทำมุม 90 องศาและสูง 0.75 มิลลิเมตร แผ่นกั้นที่ทำมุม 45 องศาและสูง 0.75 มิลลิเมตร และแผ่นกั้นที่ทำมุม 90 องศาและสูง 0.75 มิลลิเมตร ตามลำดับ สาเหตุที่เซลล์เชื้อเพลิงพื้อเอ็ม ดำเนินการที่อุณหภูมิ 100 และ 180 องศาเซลเซียส โดยที่แผ่นกั้นทำมุม 45 องศาและสูง 1.125 มิลลิเมตร ให้เส้นกราฟโพลาริเซชันที่สูงที่สุด เนื่องจากแผ่นกั้นทำมุม 45 องศาและสูง 1.125 มิลลิเมตร ทำให้ปริมาตรในช่องการไหลของแก๊สน้อยลงได้มากที่สุด และยังทำให้มีเชื้อเพลิงอยู่บริเวณส่วนบนของแผ่นกั้นเพื่อเข้าใกล้ชั้นขอบเขตรูพรุน ส่งผลให้เชื้อเพลิงแพร่เข้าไปยังชั้นแพร่แก๊สและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้มากที่สุด แสดงว่าไม่ว่าอุณหภูมิในการดำเนินการจะเปลี่ยนไปผลกระทบบของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพื้อเอ็มอุณหภูมิสูงยังคงได้ผลเช่นเดิมเพราะอุณหภูมิดำเนินการที่เพิ่มจาก 100 เป็น 180 องศาเซลเซียส ไม่ได้ทำให้สมบัติของแก๊สในเซลล์เชื้อเพลิงเปลี่ยนไปมากนักจึงทำให้มีปรากฏการณ์ของการไหลเหมือนกัน เมื่อเปรียบเทียบกราฟโพลาริเซชันของผลกระทบบจากการเปลี่ยนแปลงขนาดมุมและความสูงของแผ่นกั้นต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพื้อเอ็มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และ 180 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าเส้นกราฟโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงพื้อเอ็ม

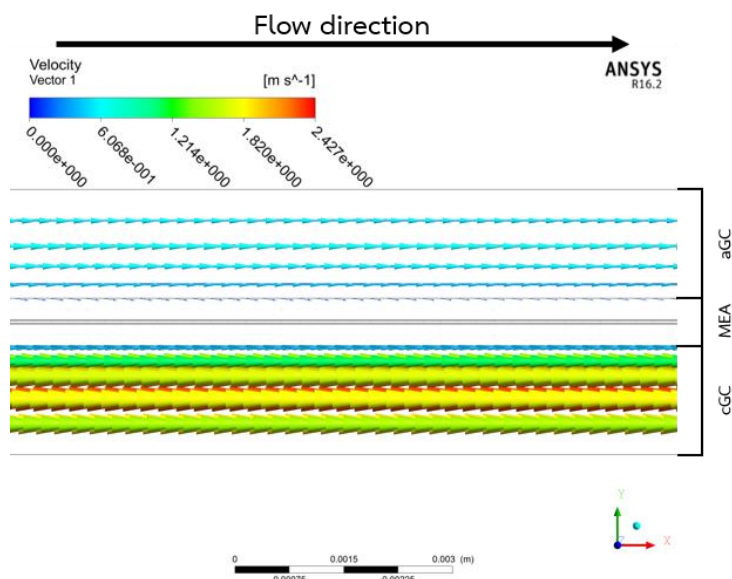
อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสจะให้ค่าที่สูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากปฏิกิริยาของไฮโดรเจนออกซิเดชันและปฏิกิริยาออกซิเจนรีดักชัน (oxygen reduction reaction ORR) จะเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูงโดยเฉพาะปฏิกิริยาออกซิเจนรีดักชัน



รูปที่ 4.4 กราฟโพลาริเซชันของผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงองศาและความสูงของแผ่นกั้นต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

4.2.1 การศึกษาเวกเตอร์ความเร็ว (Velocity vector) ของสารตั้งต้นหรือเชื้อเพลิงในส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์อุณหภูมิสูง

รูปที่ 4.5 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์อุณหภูมิสูงที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m⁻² แสดงให้เห็นว่าความเร็วของสารตั้งต้นทางด้านแคโทดมีค่าที่มากกว่าทางด้านแอโนดซึ่งเป็นผลมาจากเงื่อนไขขอบเขตของโดเมนการคำนวณที่แสดงไว้ในบทที่ 3 เวกเตอร์ความเร็วของสารตั้งต้นส่วนใหญ่แสดงทิศทางการไหลตรงไปยังทางออกของช่องการไหลของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งมีเวกเตอร์ความเร็วจำนวนน้อยที่จะชี้เข้าไปยังชั้นขอบเขตรูพรุน (ชั้นแพร่แก๊ส และชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา) ดังนั้นเมื่อเชื้อเพลิงแพร่เข้าไปยังชั้นขอบเขตรูพรุนได้น้อยส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงอุณหภูมิสูงที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สต่ำด้วยเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลของเส้นกราฟโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์อุณหภูมิสูงที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่มีความสูงของเส้นกราฟต่ำที่สุด



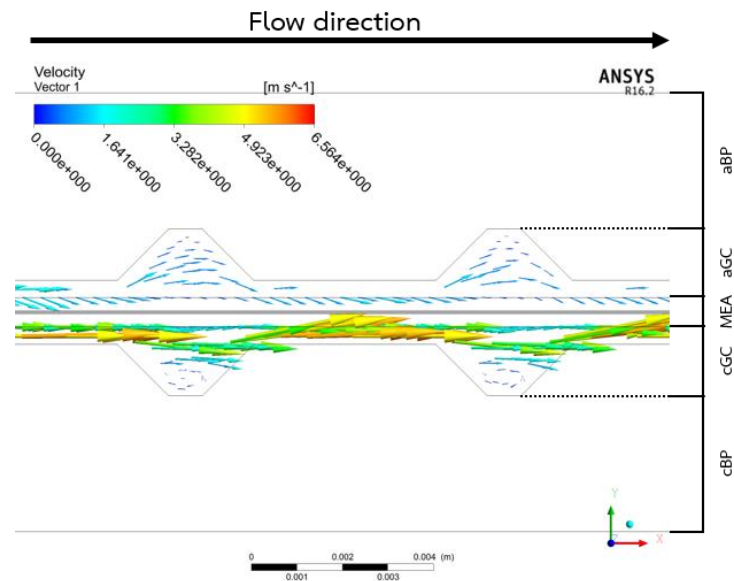
รูปที่ 4.5 เวกเตอร์ความเร็วของสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส $18000\ A\ m^{-2}$

จากรูปที่ 4.6 ถึง รูปที่ 4.9 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่มีแผ่นกั้นรูปร่างต่างๆ ดำเนินการที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส $18000\ A\ m^{-2}$ แสดงให้เห็นว่า แผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สทำให้ทิศทางและเวกเตอร์ความเร็วมีการเปลี่ยนแปลง เวกเตอร์ความเร็วของเชื้อเพลิงมีทิศทางที่ชี้ไปยังชั้นแพร่แก๊สและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น และเวกเตอร์ความเร็วของเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยในรูปที่ 4.6 ถึง รูปที่ 4.9 จะสังเกตเห็นว่ามีรูปลูกศรของเวกเตอร์ความเร็วทะลุเข้าชั้นขอบเขตรูพรุน ในความเป็นจริงแล้ว กระแสของแก๊สดังกล่าวเกิดขึ้นที่บริเวณต้นของลูกศรของเวกเตอร์ความเร็วไม่ได้วิ่งทะลุชั้นขอบเขตรูพรุนและเมมเบรน รูปเวกเตอร์เพียงแสดงขนาดและทิศทางของความเร็วเท่านั้น

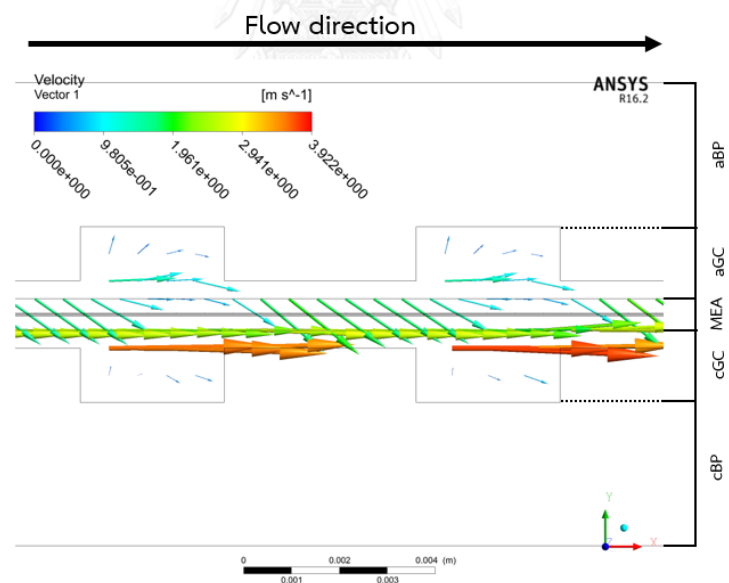
เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความสูงโดยไม่เปลี่ยนแปลงมุมของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.8 หรือจากรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าเวกเตอร์ความเร็วของเชื้อเพลิงในช่องการไหลของแก๊สที่แผ่นกั้นมีความสูง 1.125 มิลลิเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 75 ของความสูงของช่องการไหลของแก๊ส มีเวกเตอร์ความเร็วของเชื้อเพลิงที่เร็วกว่าเวกเตอร์ความเร็วแผ่นกั้นมีความสูง 0.75 มิลลิเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 50 ของความสูงของช่องการไหลของแก๊ส เนื่องจากแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลอุณหภูมิสูงที่มีความสูงมากกว่าจะบังคับให้เชื้อเพลิงไหลเข้าไปยังช่องที่แคบกว่าระหว่างส่วนบนของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สกับชั้นแพร่แก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ล

อุณหภูมิสูง ทำให้เชื้อเพลิงที่ไหลอยู่บริเวณส่วนบนของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่สูง 1.125 มิลลิเมตร แพร่เข้าไปยังชั้นแพร่แก๊สได้มากกว่า

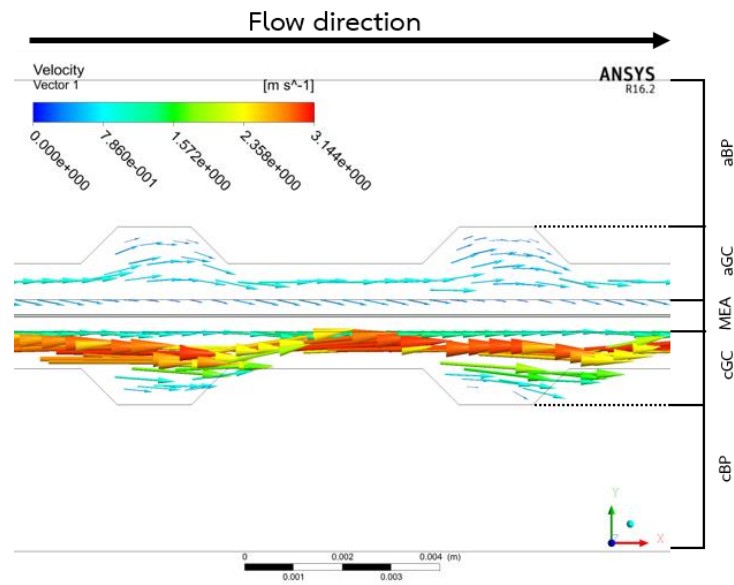
เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงมุมโดยไม่มี การเปลี่ยนแปลงความสูงของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 หรือ พิจารณาจากรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 หรือ พิจารณาจากรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงมุมของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูงจาก 90 องศา เป็น 45 องศา ทำให้ความเร็วของเชื้อเพลิงในช่องการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้น และทิศทางของเชื้อเพลิงที่ถูกแสดงด้วยเวกเตอร์ความเร็วแสดงให้เห็นว่า แผ่นกั้นที่ทำมุม 45 องศา ทำให้เชื้อเพลิงมีทิศทางชี้เข้าหาชั้นแพร่แก๊สและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้ามากกว่าแผ่นกั้นที่ทำมุม 90 องศา เพราะปริมาตรในช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูงที่มีขนาดของมุมของแผ่นกั้นเท่ากับ 45 องศา มีปริมาตรที่น้อยกว่าปริมาตรในช่องการไหลของแก๊สของแผ่นกั้นที่ทำมุม 90 องศา จึงทำให้ความดันในช่องการไหลของแก๊สที่มีปริมาตรที่น้อยกว่ามีมากกว่าทำให้มีความเร็วของเชื้อเพลิงในช่องการไหลของแก๊สสูงกว่า ประกอบกับมีทิศทางของเวกเตอร์ความเร็วของเชื้อเพลิงที่ชี้เข้าไปยังชั้นขอบเขตรูพรุน ดังนั้นจึงทำให้เชื้อเพลิงแพร่เข้าไปยังชั้นขอบเขตรูพรุนได้มากกว่าเช่นกัน ซึ่งผลสอดคล้องกับกราฟโพลารไรเซชันที่กราฟของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูงที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่มีขนาดของมุม 45 องศา จะมีเส้นกราฟโพลารไรเซชันที่สูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูงที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่มีขนาดของมุม 90 องศา



รูปที่ 4.6 เวกเตอร์ความเร็วของสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ิมที่แผ่นกั้น 45 องศา สูง 1.125 มิลลิเมตร ในช่องการไหลของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m⁻²

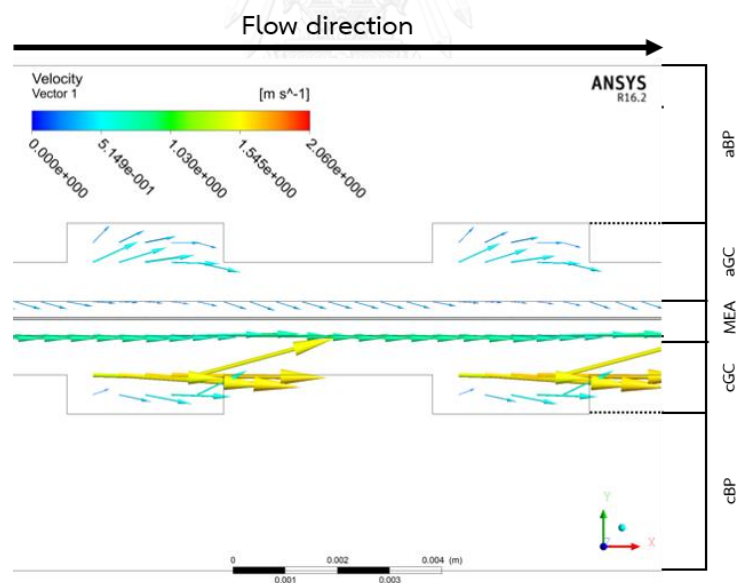


รูปที่ 4.7 เวกเตอร์ความเร็วของสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ิมที่แผ่นกั้น 90 องศา สูง 1.125 มิลลิเมตร ในช่องการไหลของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m⁻²



รูปที่ 4.8 เวกเตอร์ความเร็วของสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่แผ่นกัน 45 องศา สูง 0.75 มิลลิเมตร ในช่องการไหลของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A

m^2

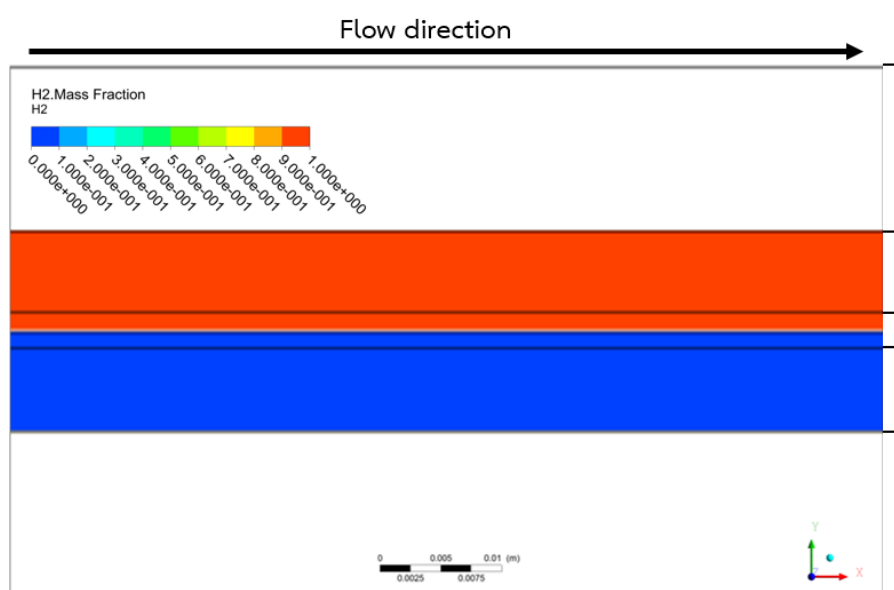


รูปที่ 4.9 เวกเตอร์ความเร็วของสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่แผ่นกัน 90 องศา สูง 0.75 มิลลิเมตร ในช่องการไหลของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A

m^2

4.2.2 การศึกษาสัดส่วนโดยมวล (Mass fraction) ของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจนที่ความหนาแน่นกระแสต่างๆ

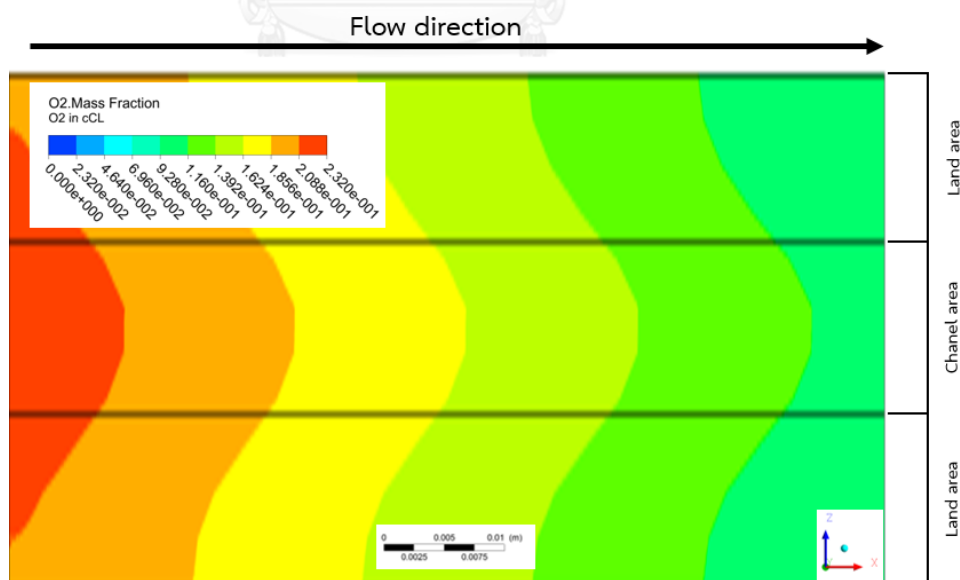
ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนเท่านั้น โดยจะไม่พิจารณาสัดส่วนด้วยมวลของไฮโดรเจนเนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สที่ป้อนในปริมาณเกินพอ ดังนั้นเมื่อพิจารณารูปเส้นแสดงรูปร่าง (Contour) สัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนจึงไม่เห็นความแตกต่างของสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนได้ดังรูปที่ 4.10



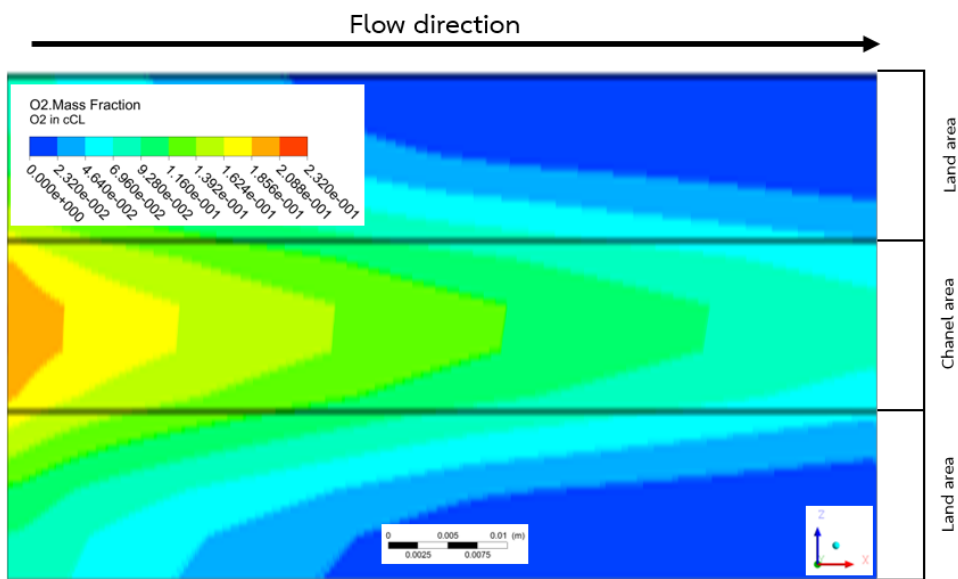
รูปที่ 4.10 สัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนในส่วนต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจน 100 อกศาเซลเซียส ที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส และที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2}

จากเงื่อนไขขอบเขตที่ได้กำหนดไว้ของโดเมนคำนวณในสมการที่ (3.18) และสมการที่ (3.19) จะสังเกตเห็นว่าพจน์ของความเร็วขาเข้าของสารตั้งต้นหรือเชื้อเพลิงแปรผันตรงกับค่าความหนาแน่นกระแส ดังนั้นเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสเพิ่มมากขึ้นค่าความเร็วขาเข้าของเชื้อเพลิงก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน จากรูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.14 แสดงสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจนที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลที่ความหนาแน่นกระแส $1,000$ $8,000$ $15,000$ และ $20,000 \text{ A m}^{-2}$ จากรูปจะสังเกตเห็นว่า เมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสหรืออีกนัยหนึ่งคือเมื่อเพิ่มความเร็วขาเข้าของเชื้อเพลิงจะทำให้สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนที่แพร่เข้ามาถึงชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจนที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สมีค่าลดลงตามแนวแกน x เนื่องจากเมื่อความเร็วของเชื้อเพลิงขาเข้าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เชื้อเพลิงแพร่เข้าไปยังชั้น

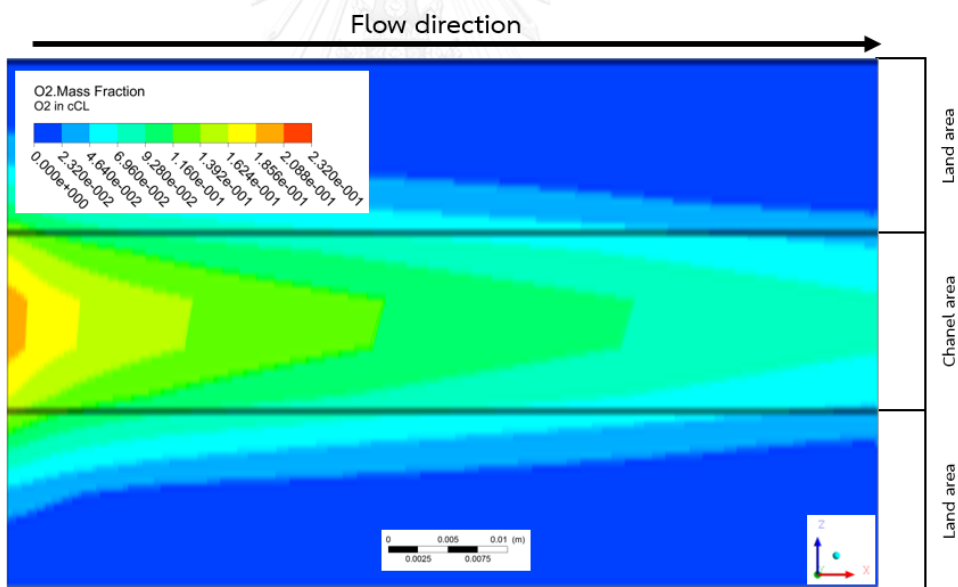
แพร่แก๊สไปจนถึงชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ต่ำลงและไหลออกไปจากเซลล์เชื้อเพลิงได้มากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่งานวิจัยนี้สนใจพิจารณาใส่แผ่นกั้นเข้าไปยังช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อสังเกตเส้นกราฟโพลาริเซชันในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ เส้นกราฟโพลาริเซชันจะมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากที่ความหนาแน่นกระแสต่ำจะมีความเร็วขาเข้าของสารตั้งต้นมีค่าน้อย จึงทำให้การแพร่ของสารตั้งต้นเข้าไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ความเร็วขาเข้าของเชื้อเพลิงจะเพิ่มมากขึ้นจนทำให้สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนที่แพร่เข้าไปในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลมีค่าน้อยลง ดังนั้นเมื่อใส่แผ่นกั้นลงไปช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลอุณหภูมิสูงจึงส่งผลให้สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เส้นกราฟโพลาริเซชันที่ความหนาแน่นกระแสที่สูงในรูปที่ 4.3 กราฟโพลาริเซชันของผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงองศาและความสูงของแผ่นกั้นต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และรูปที่ 4.4 กราฟโพลาริเซชันของผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงองศาและความสูงของแผ่นกั้นต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันของเส้นกราฟโพลาริเซชันที่ชัดเจนกว่าที่ความหนาแน่นกระแสต่ำ



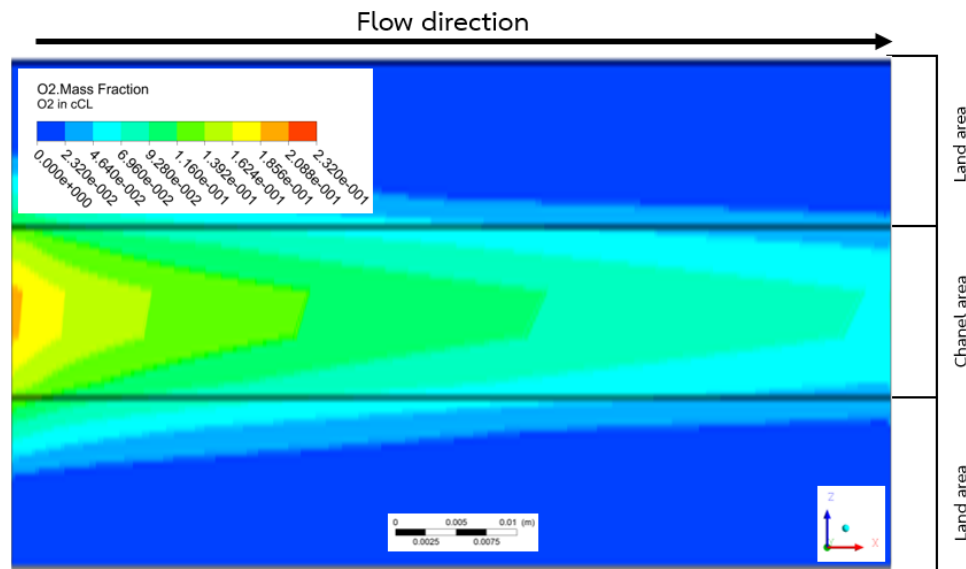
รูปที่ 4.11 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 1000 A m^{-2}



รูปที่ 4.12 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิด 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 8000 A m⁻²

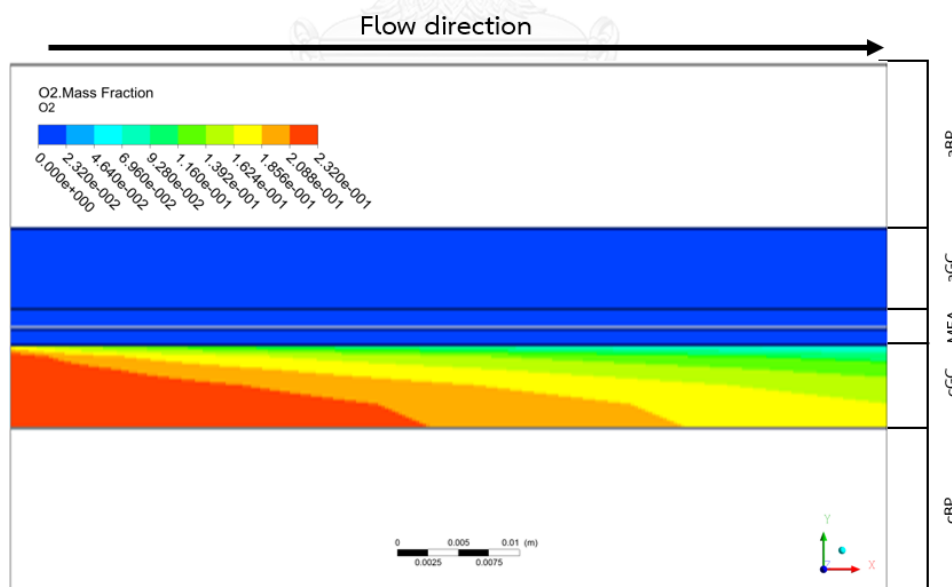


รูปที่ 4.13 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิด 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 15000 A m⁻²



รูปที่ 4.14 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์ไฮโดรเจน 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 20000 A m⁻²

4.2.3 การศึกษาสัดส่วนโดยมวล (Mass fraction) ของออกซิเจนในช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์ไฮโดรเจนสูง



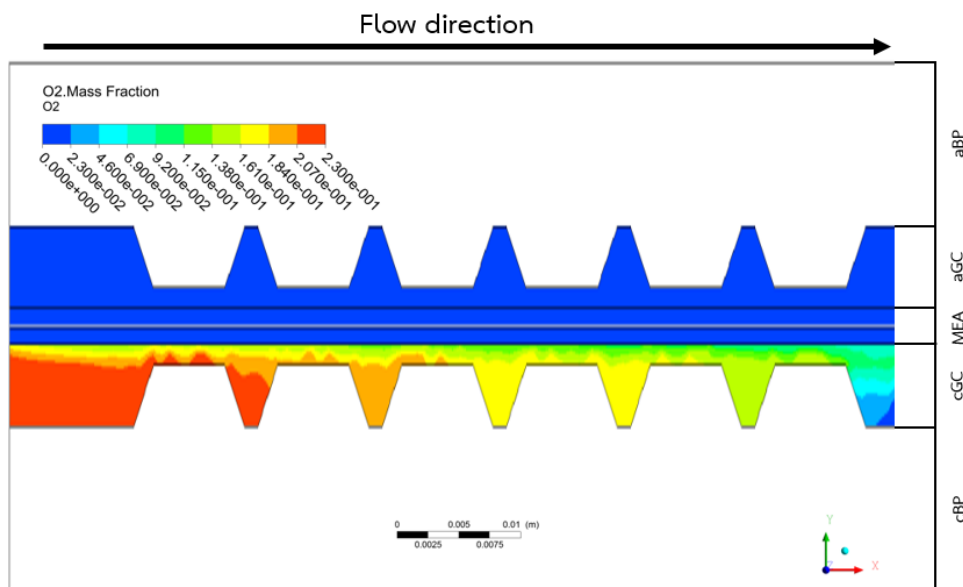
รูปที่ 4.15 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในช่องการไหลของแก๊สที่ไม่มีแผ่นกั้นของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์ไฮโดรเจน 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m⁻²

จากรูปที่ 4.16 ถึงรูปที่ 4.19 เป็นการแสดงสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจน (Mass fraction) ในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจนที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส แผ่นกั้นทำมุม 45 และ 90 องศา สูง 0.75 และ 1.125 มิลลิเมตร เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ดำเนินการที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 18000 A m^{-2} แผ่นกั้นจะทำให้สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในช่องการไหลของแก๊สเปลี่ยนแปลงไปจากเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจนที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส

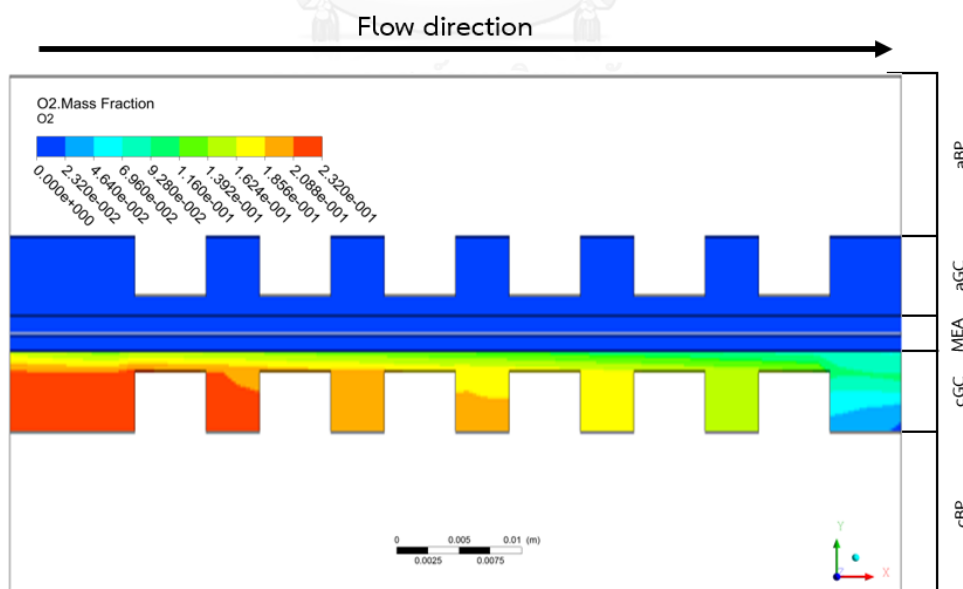
การเปรียบเทียบสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจนที่มีมุมของแผ่นกั้นเท่ากันแต่มีการเปลี่ยนแปลงความสูงจาก 0.75 มิลลิเมตร เป็น 1.125 มิลลิเมตร สามารถเปรียบเทียบได้ระหว่างรูปที่ 4.16 และ รูปที่ 4.18 หรือ พิจารณาจากรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.19 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นสูง 0.75 มิลลิเมตร มีสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนบริเวณส่วนบนของแผ่นกั้นที่มากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความสูงของแผ่นกั้นเท่ากับ 1.125 มิลลิเมตร แสดงว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นสูง 1.125 มิลลิเมตร สามารถทำให้ออกซิเจนเข้าใกล้ชั้นแพร่แก๊สแล้วแพร่เข้าไปยังชั้นแพร่แก๊สและแพร่ผ่านไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าได้มากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นสูง 0.75 มิลลิเมตร จึงทำให้เส้นกราฟโพลารไรเซชันและสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นสูง 1.125 มิลลิเมตร มีค่าสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นสูง 0.75 มิลลิเมตร

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจนและมีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่มีความสูงเท่ากันแต่มีมุมที่แตกต่างกันคือ 45 องศา และ 90 องศา จะเห็นได้จากการเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.16 และ รูปที่ 4.17 หรือจากรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19 จะสังเกตเห็นว่าปริมาณสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นทำมุม 45 องศา จะมีปริมาณสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนที่บริเวณส่วนบนของแผ่นกั้นที่มากกว่าของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นทำมุม 90 องศา เพราะว่าพื้นที่ระหว่างแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่มีแผ่นกั้นทำมุม 45 องศา มีพื้นที่น้อยกว่าพื้นที่ระหว่างแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่มีแผ่นกั้นทำมุม 90 องศา จึงทำให้ออกซิเจนที่ไหลอยู่ในช่องการไหลที่มีแผ่นกั้นทำมุม 45 องศา ถูกบังคับให้ไหลอยู่บนส่วนบนของแผ่นกั้นมากกว่าออกซิเจนที่ไหลอยู่ในช่องการไหลที่มีแผ่นกั้นทำมุม 90 องศา การที่มีออกซิเจนไหลอยู่บนส่วนบนของแผ่นกั้นมากกว่าทำให้ออกซิเจนสามารถแพร่ผ่านชั้นแพร่แก๊สไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วเกิดปฏิกิริยา

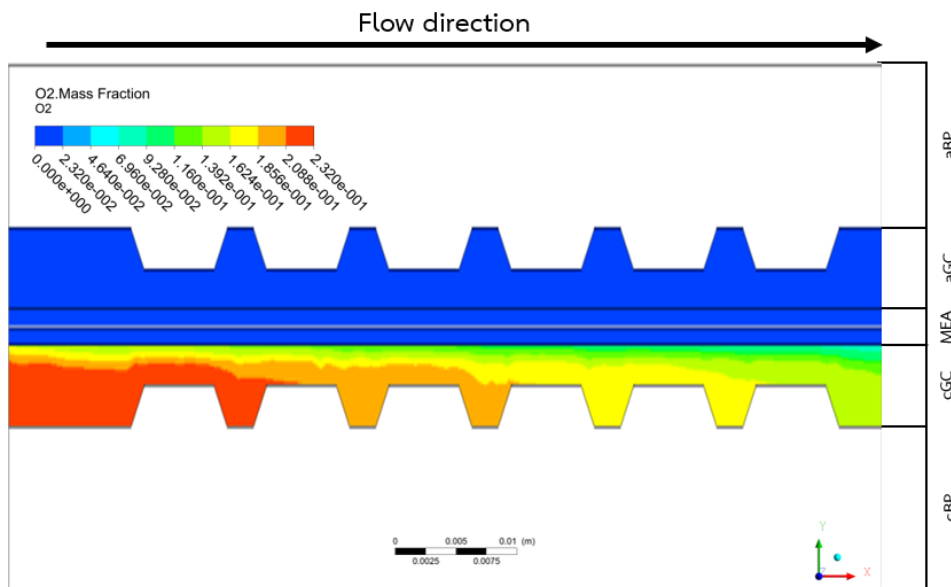
เคมีไฟฟ้าทำให้เส้นกราฟโพลาริเซชันและสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่แผ่นกั้นทำมุม 45 องศา สูงกว่าเซลล์ที่แผ่นกั้นทำมุม 90 องศา ที่ความสูงของแผ่นกั้นเท่ากัน



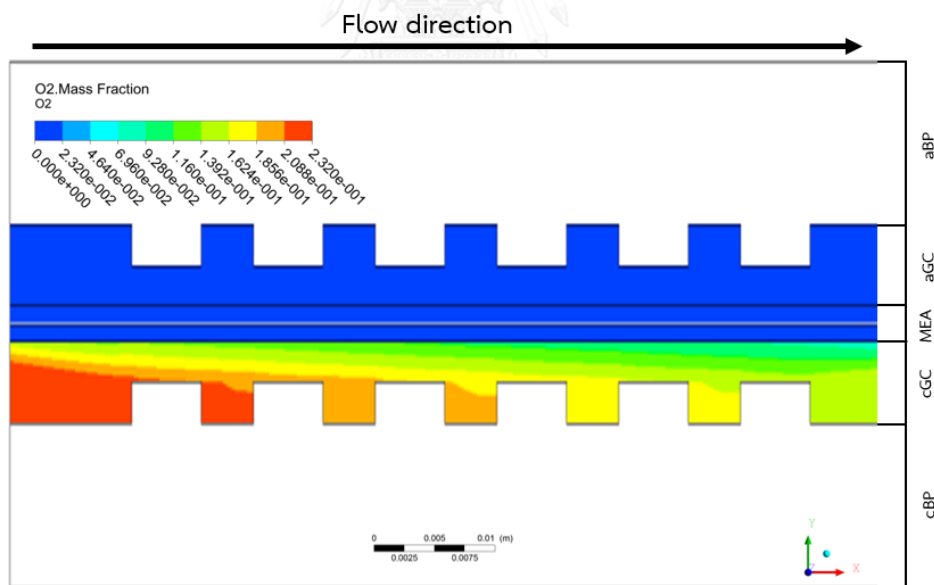
รูปที่ 4.16 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในช่องการไหลของแก๊สที่มีมุมของแผ่นกั้นขนาด 45 องศา สูง 1.125 มิลลิเมตร ของเซลล์เชื้อเพลิงพอลิเอมีนอุนทรมุมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m⁻²



รูปที่ 4.17 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในช่องการไหลของแก๊สที่มีมุมของแผ่นกั้นขนาด 90 องศา สูง 1.125 มิลลิเมตร ของเซลล์เชื้อเพลิงพอลิเอมีนอุนทรมุมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m⁻²



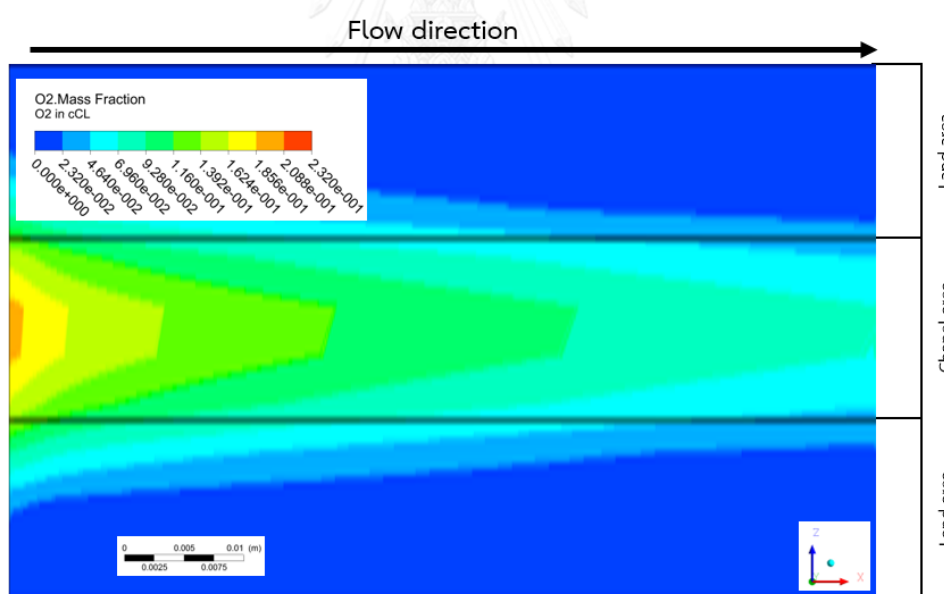
รูปที่ 4.18 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในช่องการไหลของแก๊สที่มีมุมของแผ่นกั้นขนาด 45 องศา สูง 0.75 มิลลิเมตร ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์ไฮโดรเจนที่มีพื้นที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2}



รูปที่ 4.19 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในช่องการไหลของแก๊สที่มีมุมของแผ่นกั้นขนาด 90 องศา สูง 0.75 มิลลิเมตร ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์ไฮโดรเจนที่มีพื้นที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2}

4.2.4 การศึกษาสัดส่วนโดยมวล (Mass fraction) ของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาทางด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจนที่มีรูปร่างของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.20 แสดงสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจนที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2} สังเกตเห็นว่าปริมาณสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีแผ่นกั้นจะมีปริมาณน้อยกว่าสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีแผ่นกั้น ปริมาณสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีแผ่นกั้นที่เป็นสีเหลืองหรือมีค่าของสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนอยู่ในช่วง 0.16 ถึง 0.18 จะมีขนาดที่สั้นกว่าของสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีแผ่นกั้น และยังมีสีของสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนส่วนมากเป็นสีฟ้าหรือมีค่าของสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนอยู่ในช่วง 0.04 ถึง 0.06 เนื่องจากความเร็วเข้าของออกซิเจนที่มีความเร็วมากเกินไปจะทำให้ออกซิเจนแพร่เข้ามายังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้น้อย



รูปที่ 4.20 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาทางด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจนที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2}

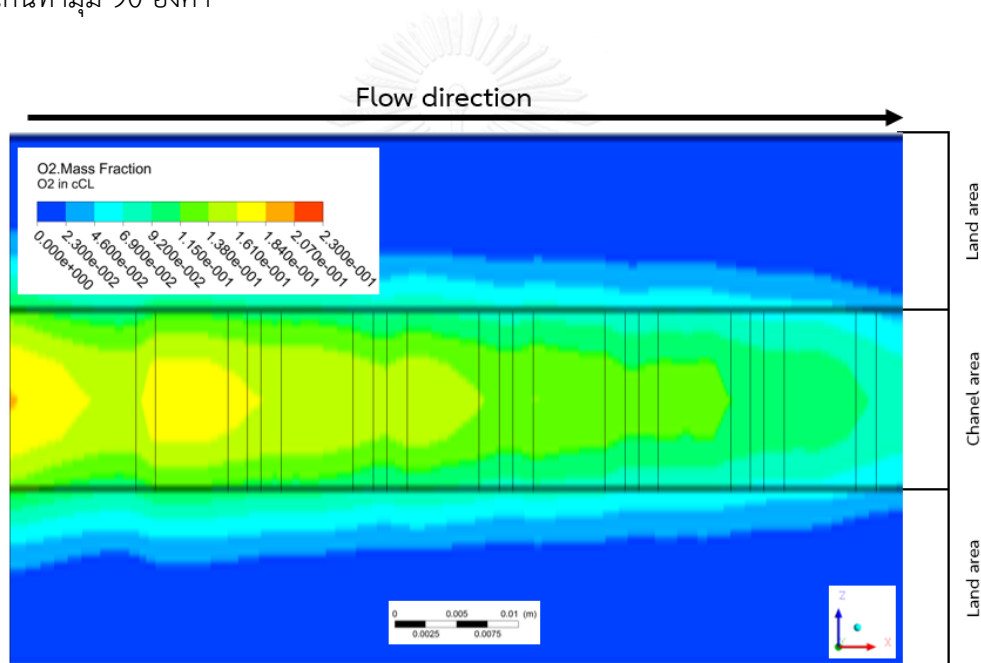
สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจนที่มีแผ่นกั้นทำมุม 45 และ 90 องศา และสูง 0.75 และ 1.125 มิลลิเมตร ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2} ในรูปที่ 4.21 ถึงรูปที่ 4.24 ความแตกต่างของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้นจะ

สังเกตเห็นว่าตัวของแผ่นกั้นช่วยเพิ่มปริมาณของสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อสังเกตบริเวณชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ตรงกับแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สจะสังเกตเห็นสัดส่วน โดยมวลของออกซิเจนที่มีปริมาณมากกว่าบริเวณใกล้เคียงของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นแสดงว่าแผ่นกั้นส่งผลให้ปริมาณสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นจะมีสีของขอบทั้งบนและล่างของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าของสัดส่วนโดยมวลอยู่ในช่วง 0 ถึง 0.023 ซึ่งมีค่าน้อย แสดงว่าออกซิเจนสามารถแพร่ไปถึงบริเวณขอบของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้น้อย และมีค่า สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนมากขึ้นตรงบริเวณกลางชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตรงบริเวณที่ตรงกับช่อง การไหลของแก๊สด้วยมีสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนมีค่าอยู่ในช่วง 0.16 ถึง 0.18

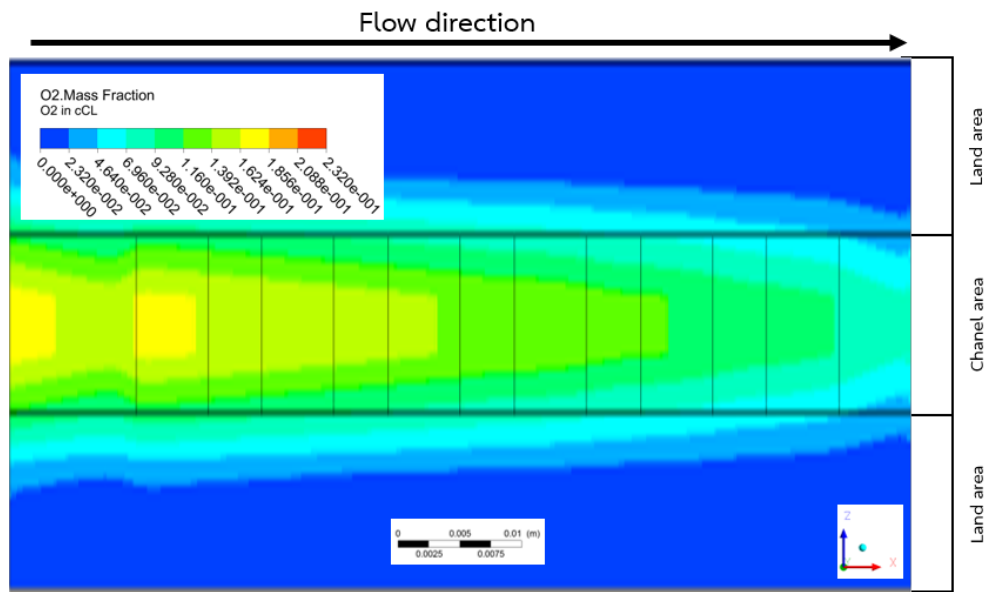
เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.23 หรือรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.24 เป็นการ เปรียบเทียบผลของปริมาณสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิง พีอีเอ็มอุณหภูมิสูงที่มีมุมของแผ่นกั้นเท่ากันแต่มีความสูงของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่ แตกต่างกัน ด้วยรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 แสดงสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ แผ่นกั้นทำมุม 45 องศา และสูง 1.125 และ 0.75 มิลลิเมตร และรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24 แสดง สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่แผ่นกั้นทำมุม 90 องศา และสูง 1.125 และ 0.75 มิลลิเมตร จะสังเกตเห็นว่าสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าอยู่ในช่วง 0.16 ถึง 0.18 โดยเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความสูงของแผ่นกั้น 1.125 มิลลิเมตร มีสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนใน ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความสูงของแผ่นกั้น 0.75 มิลลิเมตร เนื่องจากแผ่นกั้นที่ มีความสูง 1.125 มิลลิเมตร บังคับให้ออกซิเจนเข้าใกล้ชั้นแพร่แก๊สมากกว่าแผ่นกั้นที่มีความสูง 0.75 มิลลิเมตร ส่งผลให้ออกซิเจนสามารถแพร่เข้าไปยังชั้นแพร่แก๊สและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้มากกว่า ทำ ให้สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสูงของแผ่นกั้น 1.125 มิลลิเมตร มี มากกว่าสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสูงของแผ่นกั้น 0.75 มิลลิเมตร ผลที่ได้สอดคล้องกับผลของเส้นกราฟโพลาริเซชันที่เส้นกราฟโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่มี ความสูงของแผ่นกั้น 1.125 มิลลิเมตร มีค่าสูงกว่าเส้นกราฟโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความ สูงของแผ่นกั้น 0.75 มิลลิเมตร

และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 หรือพิจารณาจากรูปที่ 4.23 และรูป ที่ 4.24 เป็นการเปรียบเทียบผลของปริมาณสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของ เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูงที่มีมุมของแผ่นกั้นแตกต่างกันแต่มีความสูงที่เท่ากัน จะสังเกตเห็น

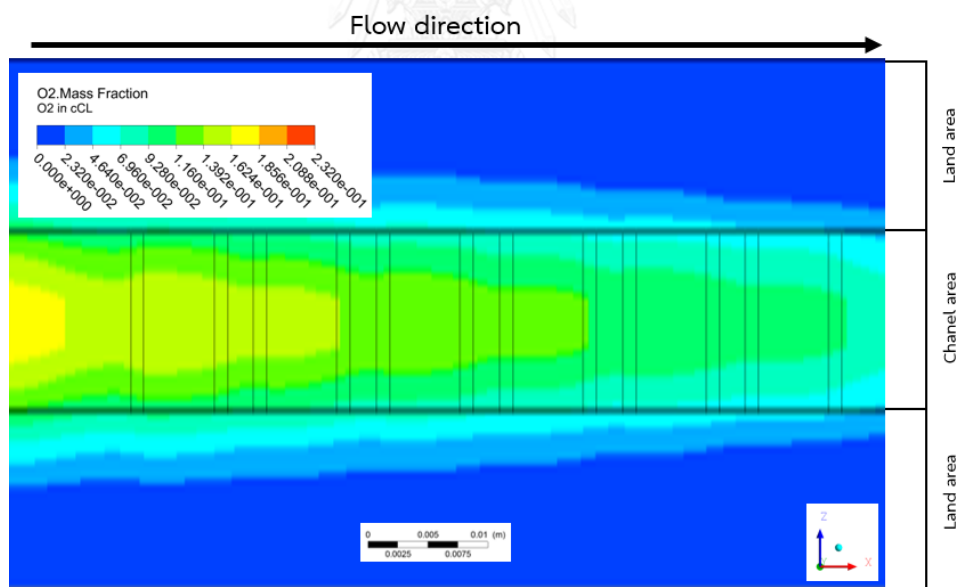
สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่แผ่นกั้นทำมุม 45 องศา มีค่าอยู่ในช่วง 0.16 ถึง 0.18 เซลล์เชื้อเพลิงที่แผ่นกั้นทำมุม 45 องศา จะมีสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนที่มากกว่าของเซลล์เชื้อเพลิงที่แผ่นกั้นทำมุม 90 องศา เนื่องจากปริมาตรช่องว่างในช่องการไหลของแก๊สที่แผ่นกั้นทำมุม 45 องศา มีน้อยกว่าปริมาตรช่องว่างในช่องการไหลของแก๊สที่แผ่นกั้นทำมุม 90 องศา ดังนั้นออกซิเจนที่ไหลเข้าไปยังช่องการไหลของแก๊สที่แผ่นกั้นทำมุม 45 องศา จะถูกบังคับให้แพร่เข้าไปยังชั้นแพร่แก๊สแล้วแพร่ต่อไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าได้มากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่แผ่นกั้นทำมุม 90 องศา ผลที่ได้สอดคล้องกับผลของเส้นกราฟโพลาริเซชันที่เส้นกราฟโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่แผ่นกั้นทำมุม 45 องศา มีค่าสูงกว่าเส้นกราฟโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่แผ่นกั้นทำมุม 90 องศา



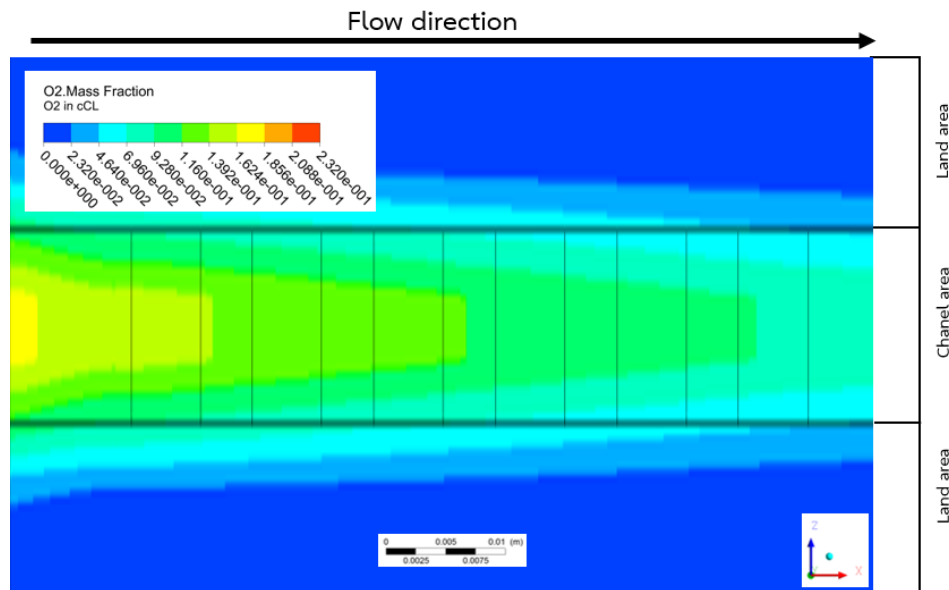
รูปที่ 4.21 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาทางด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดที่มีมุมของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สเท่ากับ 45 องศา สูง 1.125 มิลลิเมตร ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2}



รูปที่ 4.22 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาทางด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิง
 พิธีเอ็มอุณหภูมิสูงที่มีมุมของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สเท่ากับ 90 องศา สูง 1.125 มิลลิเมตร ที่
 ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2}



รูปที่ 4.23 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาทางด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิง
 พิธีเอ็มอุณหภูมิสูงที่มีมุมของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สเท่ากับ 45 องศา สูง 0.75 มิลลิเมตร ที่
 ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2}



รูปที่ 4.24 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาทางด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิง
ฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจนที่มีมุมของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สเท่ากับ 90 องศา สูง 0.75 มิลลิเมตร ที่
ความหนาแน่นกระแส 18000 A m⁻²

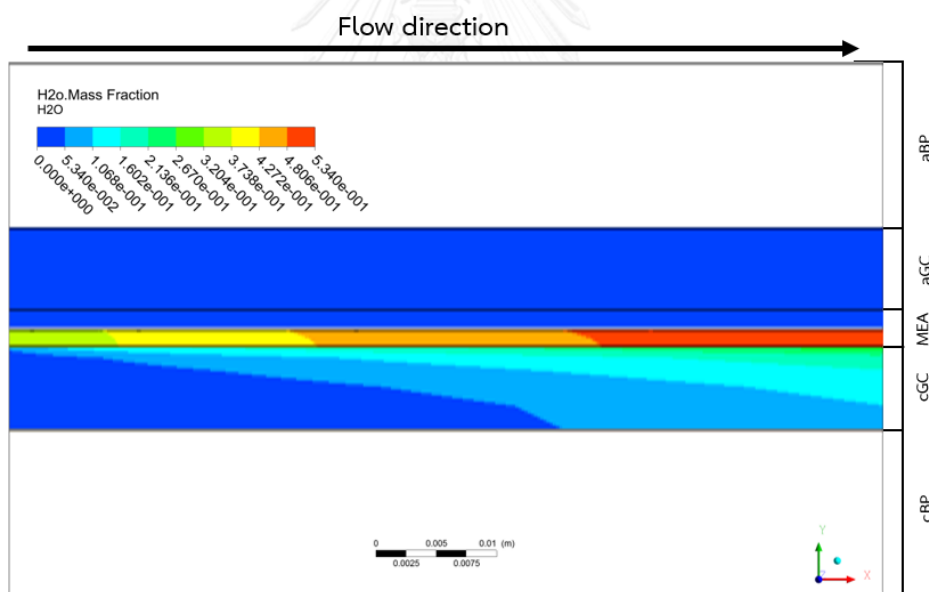
จากตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์
เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจน จะเห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้นมีปริมาณสัดส่วนโดยมวลของ
ออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยที่สุด และเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นทำมุม 45 องศา และสูง 1.125
มิลลิเมตร มีปริมาณสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผล
ของเส้นแสดงรูปร่างที่แสดงในรูปที่ 4.20 ถึงรูปที่ 4.24

ตารางที่ 4.3 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจน
ดำเนินการ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18,000 A m⁻²

รูปร่างของแผ่นกั้น	สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา
ไม่มีแผ่นกั้น	0.0418
90_0.75	0.0457
45_0.75	0.0495
90_1.125	0.0515
45_1.125	0.0533

4.2.5 การศึกษาสัดส่วนโดยมวล (Mass fraction) ของสารผลิตภัณฑ์หรือไอน้ำในส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดอุณหภูมิสูง

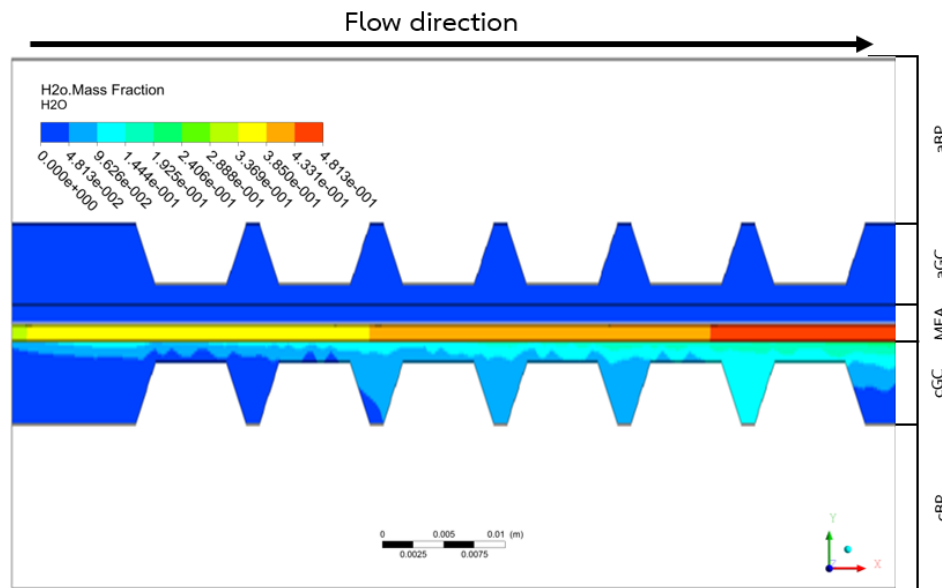
จากรูปที่ 4.25 แสดงสัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดอุณหภูมิสูงดำเนินการ 100 องศาเซลเซียส ที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2} สัดส่วนโดยมวลของไอน้ำอยู่เฉพาะด้านแคโทดเท่านั้น เนื่องจากปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นที่ด้านแคโทด และเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าไปไม่มีความชื้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นน้ำในสถานะแก๊สเพราะว่าเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง จะเห็นว่าไอน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าจะมีมากในชั้นขอบเขตพรุน (ชั้นแพร่แก๊ส และชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา) เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเกิดขึ้นที่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา สัดส่วนโดยมวลของไอน้ำจะมีมากในส่วนท้ายของเซลล์เชื้อเพลิงตามแนวแกน x ในชั้นขอบเขตพรุน เนื่องจากการป้อนออกซิเจนเข้ามาตามแนวแกน x ด้วยความเร็วทำให้ออกซิเจนแพร่และไหลพาเอาไอน้ำไปอยู่บริเวณส่วนท้ายของเซลล์เชื้อเพลิง



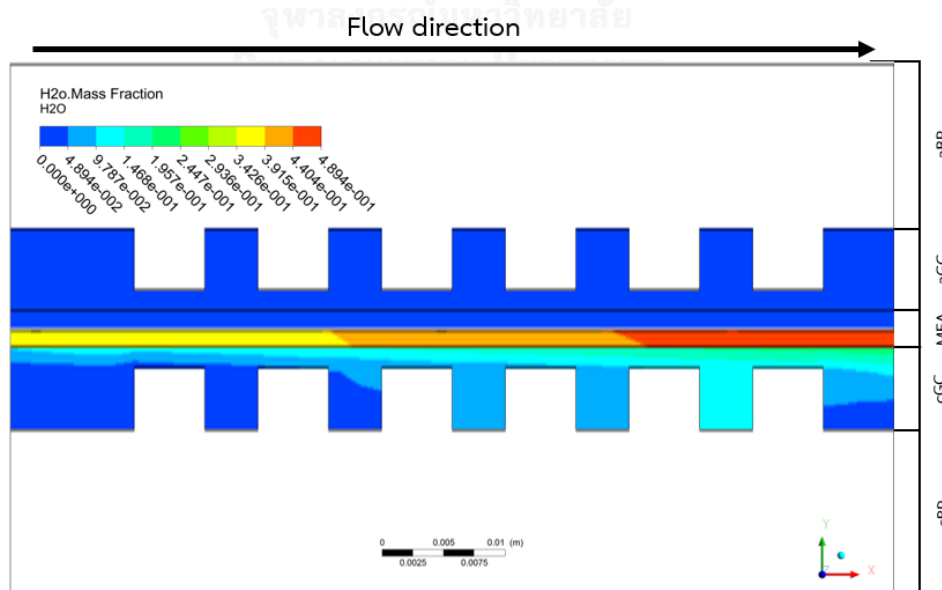
รูปที่ 4.25 สัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดอุณหภูมิสูงที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2}

จากรูปที่ 4.25 ถึงรูปที่ 4.29 แสดงสัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ที่มีขนาดมุมของแผ่นกั้นขนาด 45 และ 90 องศา สูง 0.75 และ 1.125 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2} เมื่อสังเกตเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้นกับที่มีแผ่นกั้นในช่องทางการไหลจะพบว่า เซลล์เชื้อเพลิงทั้งสองลักษณะมีไอน้ำมากที่บริเวณชั้นการแพร่ผ่าน

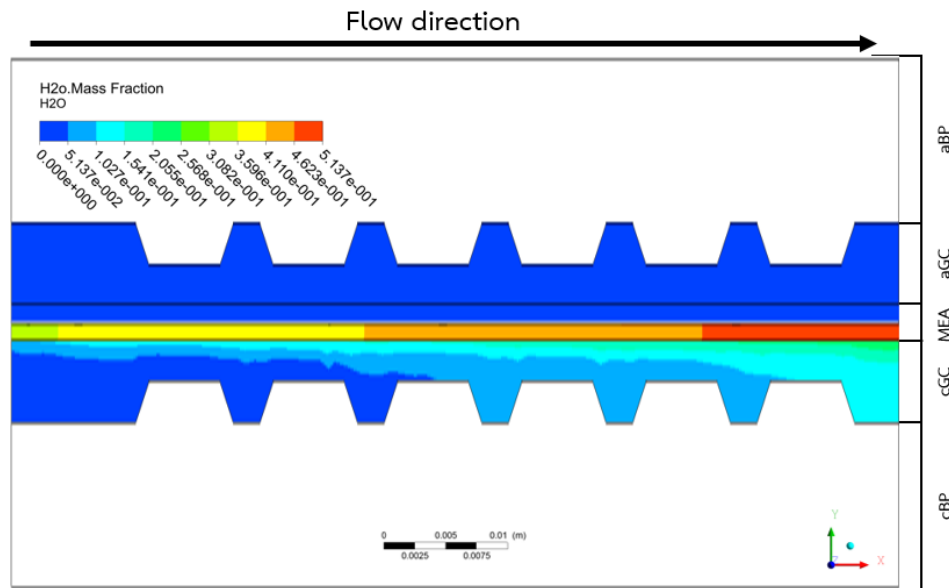
และชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี และเมื่อสังเกตสัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นในช่องทางการไหลจะมีปริมาณของไอน้ำมากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกันในช่องทางการไหล ทั้งนี้เนื่องจากแผ่นกันในช่องทางการไหลได้เพิ่มความดันทางด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงทำให้มีแรงดันในการพาไอน้ำออกไปจากเซลล์เชื้อเพลิงได้มากขึ้น น้ำจึงเหลืออยู่ในระบบน้อยลง



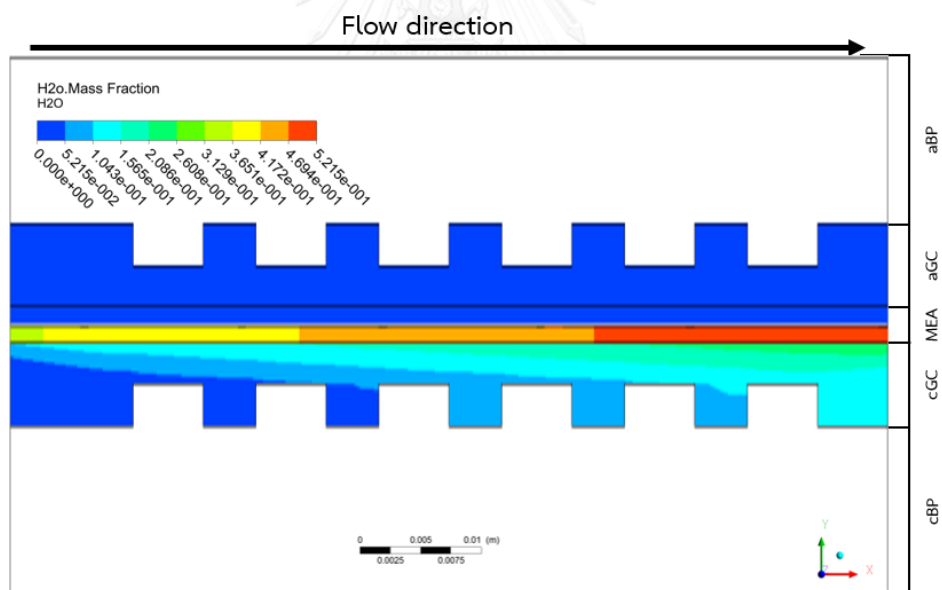
รูปที่ 4.26 สัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่มีมุมของแผ่นกันขนาด 45 องศา สูง 1.125 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2}



รูปที่ 4.27 สัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่มีมุมของแผ่นกันขนาด 90 องศา สูง 1.125 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2}



รูปที่ 4.28 สัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงพอลิเมอร์ที่มีมุมของแผ่นกั้นขนาด 45 องศา สูง 1.125 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2}



รูปที่ 4.29 สัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงพอลิเมอร์ที่มีมุมของแผ่นกั้นขนาด 90 องศา สูง 0.75 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2}

จากตารางที่ 4.3 แสดงสัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในส่วนประกอบต่างๆ ทางด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงพอลิเมอร์อุณหภูมิดำเนินการ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2} แสดงให้เห็นว่าส่วนประกอบภายในเซลล์เชื้อเพลิงที่มีค่าสัดส่วนโดยมวลของไอน้ำจากมากที่สุดไปหาน้อยสุดสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ชั้นแพร่แก๊ส และช่องการไหลของแก๊ส สาเหตุที่

เรียงได้เช่นนี้ เนื่องจากส่วนประกอบภายในเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าและได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นไอน้ำคือ ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีส่วนโดยมวลของไอน้ำอยู่มาก และส่วนประกอบที่หลุดออกไปของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาก็คือชั้นแพร่แก๊ส และช่องการไหลของแก๊ส ตามลำดับ จึงทำให้มีส่วนโดยมวลของไอน้ำน้อยลงตามลำดับ และจะเห็นว่ามีส่วนโดยมวลของไอน้ำในแต่ละส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สมีค่ามากที่สุด รองลงมาเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส ทำมุม 90 องศาและสูง 0.75 มิลลิเมตร ตามมาด้วยเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นทำมุม 45 องศาและสูง 0.75 มิลลิเมตร เซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นทำมุม 90 องศาและสูง 1.125 มิลลิเมตร และเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นทำมุม 45 องศาและสูง 1.125 มิลลิเมตร ตามลำดับ สาเหตุที่เซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สมีส่วนโดยมวลของไอน้ำมากที่สุดและเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส มุม 45 องศาและสูง 1.125 มิลลิเมตร มีค่าสัดส่วนโดยมวลของไอน้ำน้อยที่สุดก็เพราะว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สทำมุม 45 องศาและสูง 1.125 มิลลิเมตร มีค่าความดันลด (Pressure drop) ภายในเซลล์เชื้อเพลิงมากที่สุดจึงทำให้มีส่วนโดยมวลของไอน้ำน้อยที่สุด ผลของความดันลดระหว่างความดันขาเข้าและขาออกของอากาศในเซลล์เชื้อเพลิง สามารถดูได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในส่วนประกอบต่างๆ ทางด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิง พีโอเอ็มอุณหภูมิดำเนินการ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m⁻²

ตำแหน่ง	สัดส่วนโดยมวลของไอน้ำ				
	ไม่มีแผ่นกั้น	90_0.75	45_0.75	90_1.125	45_1.125
ช่องการไหลของแก๊ส	0.069	0.063	0.061	0.054	0.055
ชั้นแพร่แก๊ส	0.304	0.302	0.283	0.272	0.261
ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา	0.313	0.311	0.293	0.281	0.270

ตารางที่ 4.5 ความดันลระหว่างความดันขาเข้าและขาออกของอากาศในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ทางด้านแคโทด ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m⁻²

ตำแหน่ง	ความดัน [Pa]				
	ไม่มีแผ่นกั้น	90_0.75	45_0.75	90_1.125	45_1.125
ขาเข้า	12.518	28.15	33.19	129.29	163.90
ขาออก	0	0	0	0	0
ความดันลด	12.518	28.15	33.19	129.29	163.90

จากตารางที่ 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม อุณหภูมิดำเนินการ 100 องศาเซลเซียส ที่เกิดจากความดันลดด้านแคโทด (p_c^{drop}) ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m⁻² โดยการคำนวณนี้ใช้สมการ Nernst ในสมการที่ 3.13 ในการคำนวณ แต่คิดเฉพาะค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่เกิดจากความดันย่อยของออกซิเจนจะสามารถสรุปสมการได้ดังนี้

$$\Delta E = \frac{RT}{2F} \times \left(\frac{1}{2} \ln(0.21 * (1 - p_c^{drop})) \right) \quad (4.1)$$

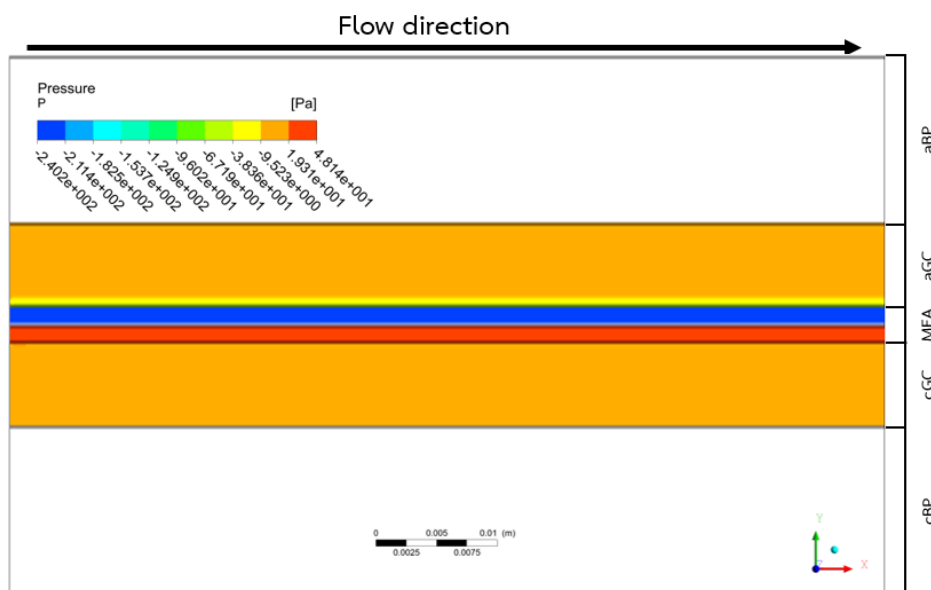
โดยค่านี้แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าของศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากความดันลดด้านแคโทด จะเห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปจากศักย์ไฟฟ้าสมดุลที่เกิดจากความดันลดของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากค่าความดันลดที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สมีค่าที่เพิ่มขึ้นไม่มาก

ตารางที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวีเอ็มอุณหภูมิดำเนินการ 100 องศาเซลเซียส ที่เกิดจากความดันลดด้านแคโทด ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m⁻²

รูปร่างของแผ่น กัน	ความดันลด [Pa]	การเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ที่เกิดจากความดันลด [V]
45_1.125	163.9	-1.255 X 10 ⁻²
90_1.125	129.294	-1.255 X 10 ⁻²
45_0.75	33.19	-1.254 X 10 ⁻²
90_0.75	28.15	-1.254 X 10 ⁻²
ไม่มีแผ่นกัน	12.518	-1.254 X 10 ⁻²

4.2.6 การศึกษาความดัน (Pressure) ในส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวีเอ็มอุณหภูมิสูง

จากรูปที่ 4.30 แสดงความดันในส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวีเอ็มอุณหภูมิสูงที่ไม่มีแผ่นกันในช่องการไหลของแก๊ส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m⁻² ความดันในช่องการไหลของแก๊สที่ไม่มีแผ่นกันทั้งทางด้านแคโทดและทางด้านแอโนดมีความดันที่สม่ำเสมออยู่ในช่วง - 9.5 ปาสคาล ถึง 19.3 ปาสคาล



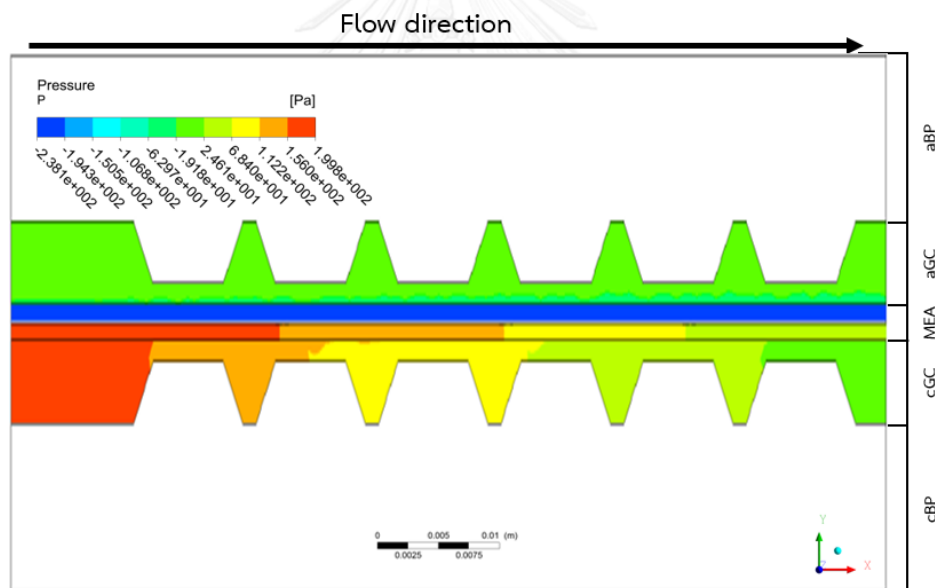
รูปที่ 4.30 ความดันในส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ไฮโดรเจนที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่อง
การไหลของแก๊ส ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2}

จากรูปที่ 4.31 ถึง รูปที่ 4.34 แสดงความดันในส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สแบบต่างๆ อันได้แก่ แผ่นกั้นทำมุม 45 องศาและสูง 1.125 มิลลิเมตร แผ่นกั้นทำมุม 90 องศาและสูง 1.125 มิลลิเมตร แผ่นกั้นทำมุม 45 องศาและสูง 0.75 มิลลิเมตร และแผ่นกั้นทำมุม 90 องศาและสูง 0.75 มิลลิเมตร ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2} ความดันในเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สจะมีค่าสูงกว่าความดันในเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส จากรูปจะเห็นว่าความดันในช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นไม่มีความสม่ำเสมอ โดยจะพบความดันสูงที่บริเวณใกล้ช่องทางเข้าของเชื้อเพลิงแล้วความดันค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ ตามแนวแกน x และความดันในช่องการไหลของแก๊สทางด้านแคโทดจะมากกว่าความดันในช่องการไหลของแก๊สทางด้านแอโนดเนื่องจากความเร็วขาเข้าของสารตั้งต้นทางด้านแคโทดมีค่ามากกว่าความเร็วทางด้านแอโนดและเมื่อมีการใส่แผ่นกั้นลงไปในช่องการไหลของแก๊สจึงทำให้ด้านที่มีความเร็วในการป้อนสารตั้งต้นขาเข้าสูงกว่า มีความดันเพิ่มมากขึ้นยิ่งกว่าด้านที่มีความเร็วการป้อนสารตั้งต้นต่ำกว่า

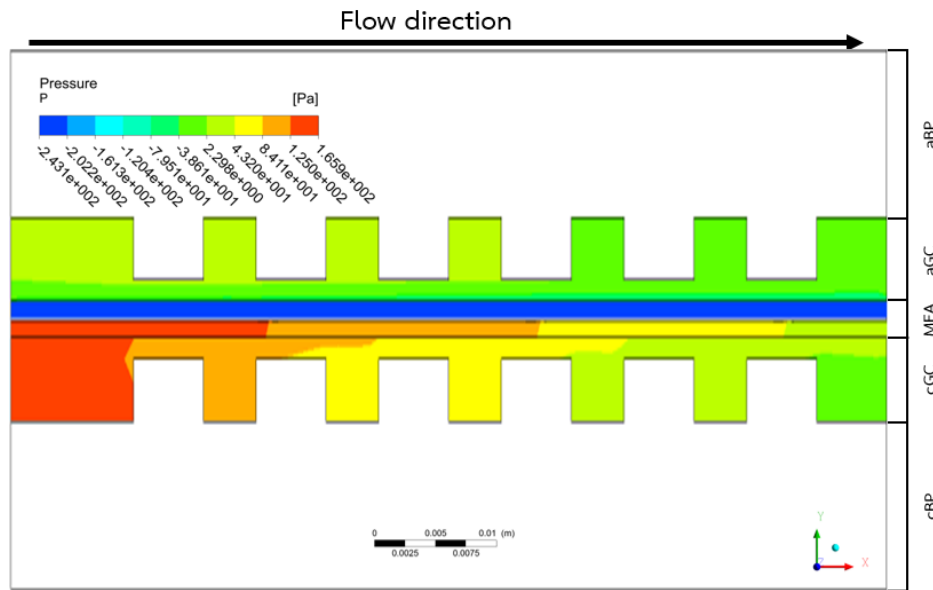
เมื่อเปรียบเทียบความดันในส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นทำมุมต่างกัน แต่มีความสูงเท่ากัน ดังการเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.31 และรูปที่ 4.32 และการเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.33 และรูปที่ 4.34 ดำเนินการที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2} จะเห็นว่าความดันในเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นทำมุม 45 องศา จะมีความดันในส่วนประกอบต่างๆ ที่สูงกว่าความ

ดันในเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นทำมุม 90 องศา เนื่องจากปริมาตรของช่องการไหลของแก๊สในเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นทำมุม 45 องศา มีปริมาตรของช่องการไหลของแก๊สที่น้อยกว่าปริมาตรช่องการไหลในเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นทำมุม 90 องศา

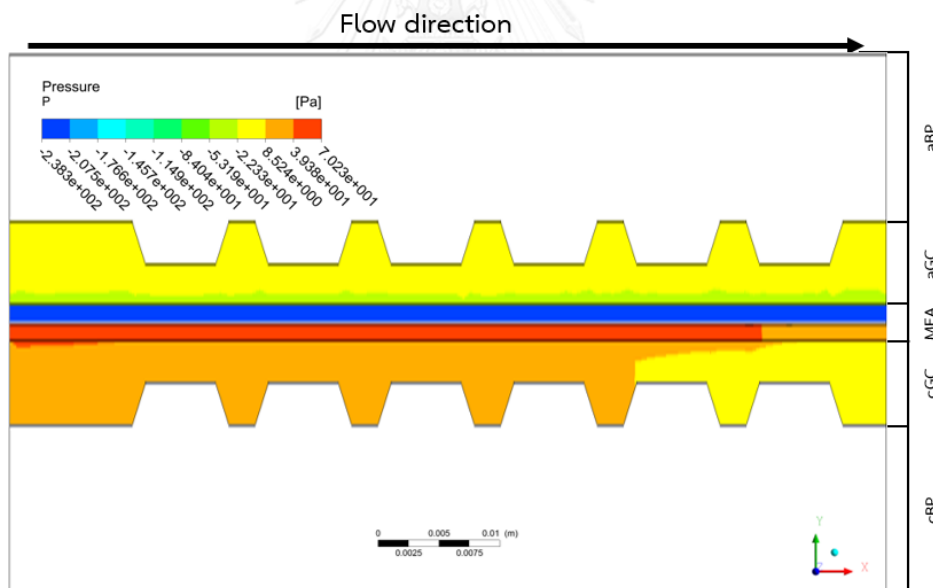
และเปรียบเทียบความดันในส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นที่มีความสูงเท่ากันแต่ทำมุมต่างกัน ดังการเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.31 และรูปที่ 4.33 และการเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.32 และรูปที่ 4.34 เซลล์ดำเนินการที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2} จะเห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส สูง 1.125 มิลลิเมตร จะมีความดันในส่วนประกอบต่างๆ ที่สูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นสูง 0.75 มิลลิเมตร ดังเห็นได้จากผลของความดันลดระหว่างความดันขาเข้าและขาออกของอากาศในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดอนุกรมสูงทางด้านแคโทด ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2} ซึ่งถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.4



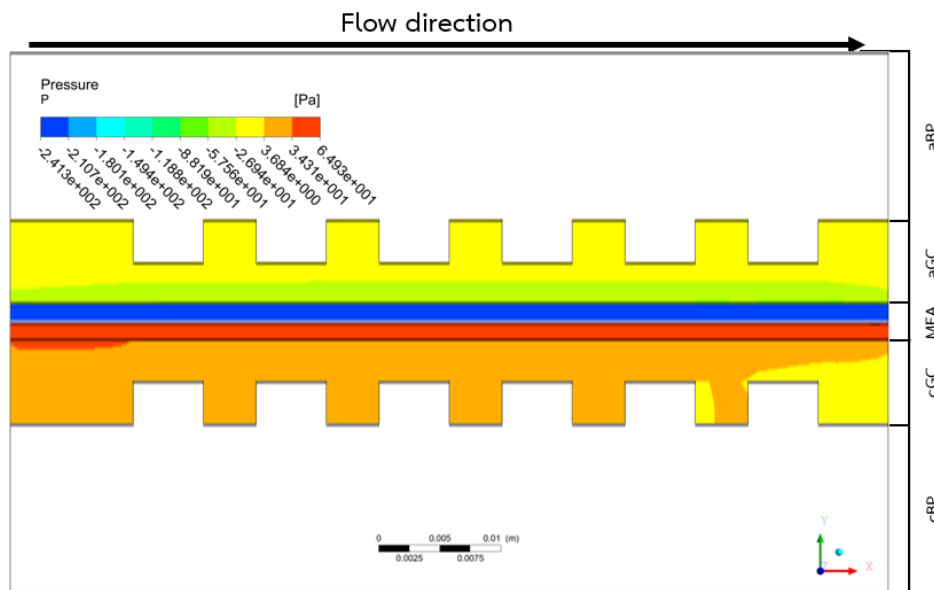
รูปที่ 4.31 ความดันในส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดอนุกรมสูงที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส มุม 45 องศา สูง 1.125 มิลลิเมตร ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2}



รูปที่ 4.32 ความดันในส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวอีเอ็มอุณหภูมิสูงที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส มุม 90 องศา สูง 1.125 มิลลิเมตร ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2}

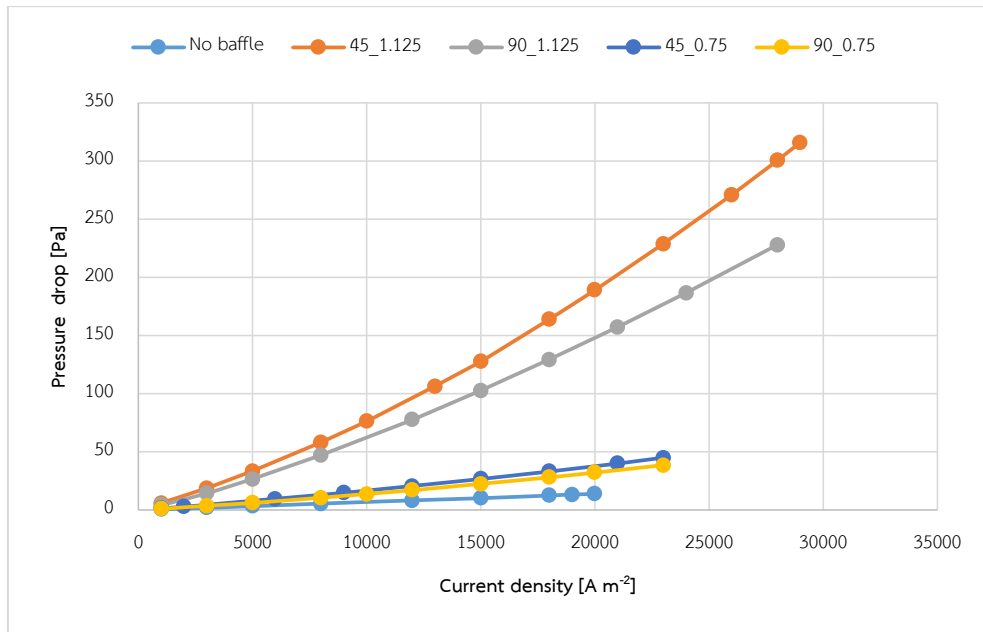


รูปที่ 4.33 ความดันในส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวอีเอ็มอุณหภูมิสูงที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส มุม 45 องศา สูง 0.75 มิลลิเมตร ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2}

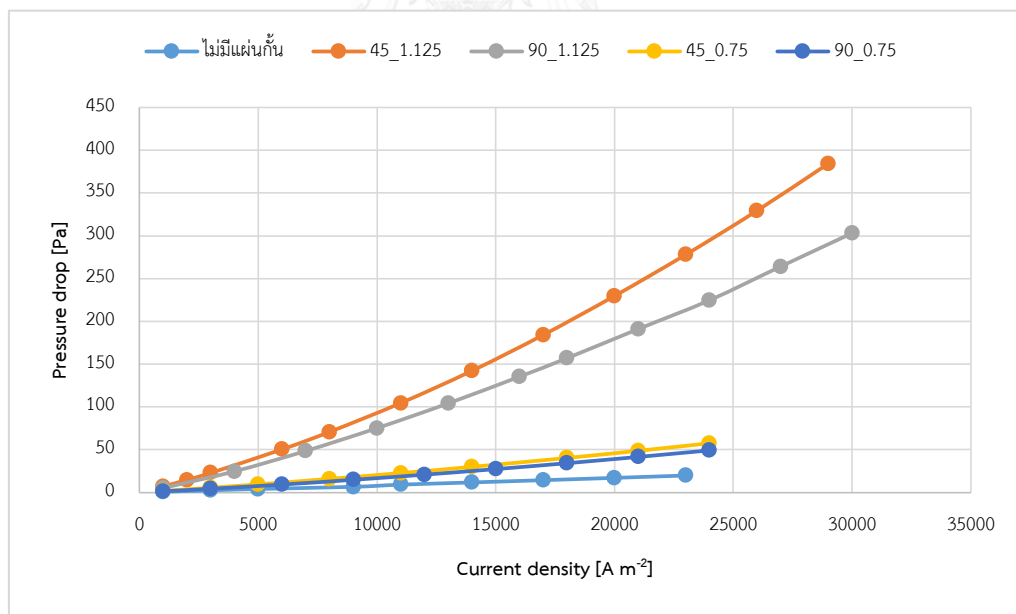


รูปที่ 4.34 ความดันในส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส มุม 90 องศา สูง 0.75 มิลลิเมตร ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2}

รูปที่ 4.35 และรูปที่ 4.36 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและความดันลดระหว่างเชื้อเพลิงขาเข้าและเชื้อเพลิงขาออกทางด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีรูปร่างของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่แตกต่างกัน ดำเนินการที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และ 180 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับผลที่กล่าวมาข้างต้นเรื่องผลของเส้นแสดงรูปร่าง (Contour) ของความดันในส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิง ที่ความหนาแน่นกระแส 18000 A m^{-2} และผลของความดันลดระหว่างความดันขาเข้าและขาออกทางด้านแคโทดในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ที่มีรูปร่างของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สแบบต่างๆ ตามความดันลดระหว่างความดันขาเข้าและความดันขาออกทางด้านแคโทดจากมากไปน้อยได้ดังนี้ เซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สทำมุม 45 องศาและสูง 1.125 มิลลิเมตร เซลล์ที่มีแผ่นกั้นทำมุม 90 องศาและสูง 1.125 มิลลิเมตร เซลล์ที่มีแผ่นกั้นทำมุม 45 องศาและสูง 0.75 มิลลิเมตร เซลล์ที่มีแผ่นกั้นทำมุม 90 องศาและสูง 0.75 มิลลิเมตร และเซลล์ที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส



รูปที่ 4.35 กราฟความดันลระหว่างสารตั้งต้นขาเข้าและสารตั้งต้นขาออกทางด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงพอลิเมอร์ 100 อนุภาคเซลเซียส ที่มีรูปร่างของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่แตกต่างกัน



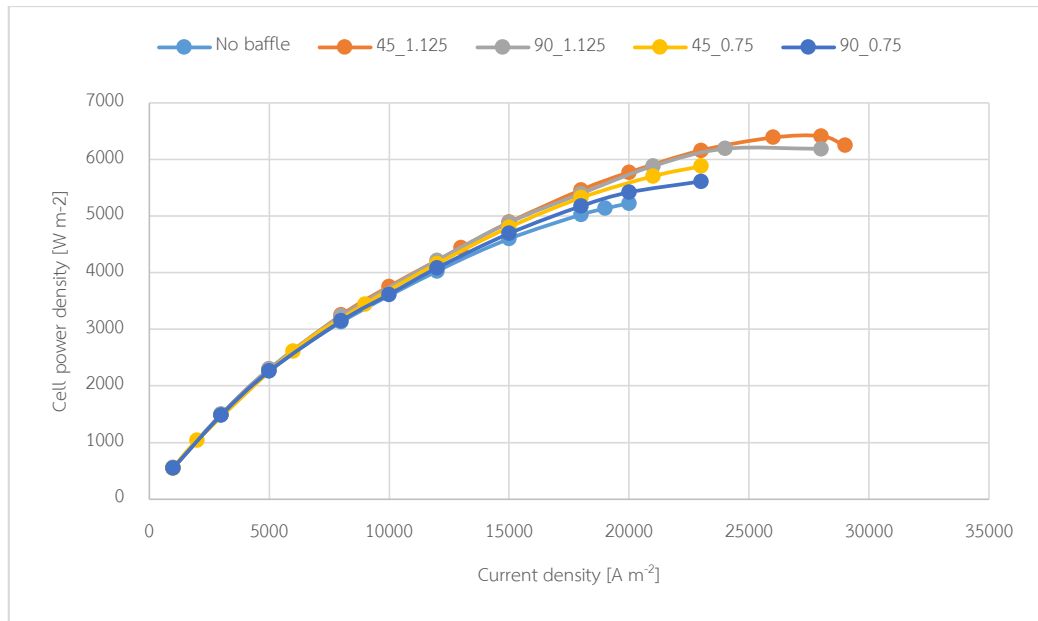
รูปที่ 4.36 กราฟความดันลระหว่างสารตั้งต้นขาเข้าและสารตั้งต้นขาออกทางด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงพอลิเมอร์ 180 อนุภาคเซลเซียส ที่มีรูปร่างของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่แตกต่างกัน

4.2.7 การศึกษาความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (Cell power density) และกำลังไฟฟ้าสุทธิ (Net power) ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจนที่มีรูปร่างแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สแบบต่างๆ

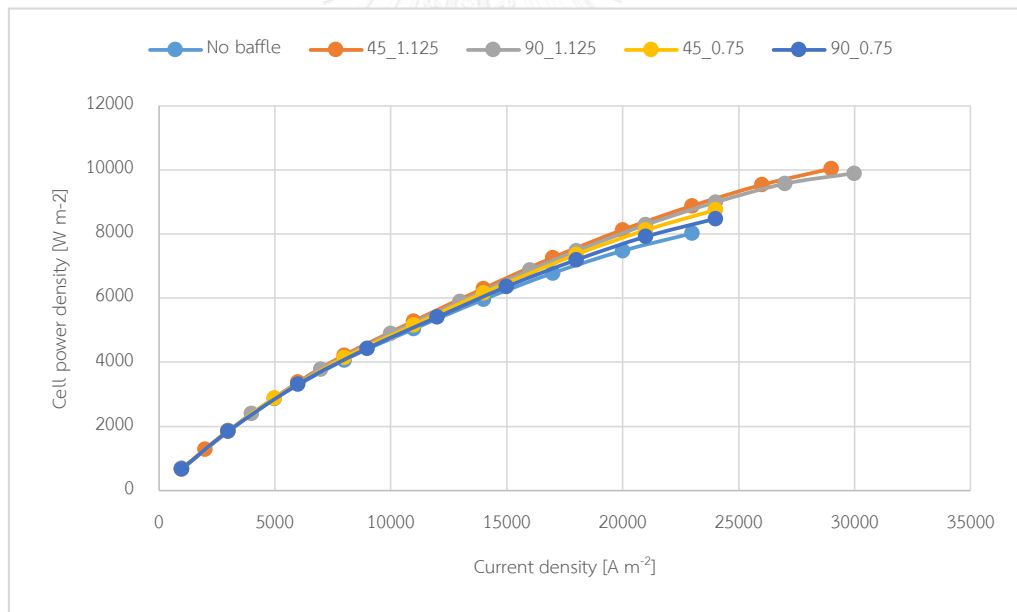
การศึกษาความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสามารถคำนวณจากสมการที่ (4.2) เมื่อ P เป็นความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า มีหน่วยเป็น $W m^{-2}$ i เป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีหน่วยเป็น $A m^{-2}$ และ V เป็นแรงดันไฟฟ้ามีหน่วยเป็น V ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าบอกถึงความสามารถในการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจนต่อหน่วยของพื้นที่ตัดขวางของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.2) [4]

$$P = iV \quad (4.2)$$

รูปที่ 4.37 แสดงความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นรูปร่างแบบต่างๆ ติดตั้งในช่องการไหลของแก๊สและดำเนินการที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสและ ซึ่งผลจากการคำนวณสามารถเรียงค่าของความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าจากมากที่สุดไปน้อยที่สุดได้ดังนี้ เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดไฮโดรเจนที่มีแผ่นกั้นทำมุม 45 องศาและสูง 1.125 มิลลิเมตร เซลล์ที่มีแผ่นกั้นทำมุม 90 องศาและสูง 1.125 มิลลิเมตร เซลล์ที่มีแผ่นกั้นทำมุม 45 องศาและสูง 0.75 มิลลิเมตร เซลล์ที่มีแผ่นกั้นทำมุม 90 องศาและสูง 0.75 มิลลิเมตร และเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส และรูปที่ 4.38 แสดงความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อดำเนินการที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ผลของความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ได้ ไม่แตกต่างจากผลของเซลล์เชื้อเพลิงที่ดำเนินการที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.37 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่มีรูปร่างแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สแบบต่างๆ



รูปที่ 4.38 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ที่มีรูปร่างแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สแบบต่างๆ

กำลังไฟฟ้าสุทธิของเซลล์เชื้อเพลิง (W_{net}) คือผลต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง (W_{FC}) กับ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการป้อนสารตั้งต้นหรือเชื้อเพลิงเข้าไปในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูง (W_P) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 4.3 [9]

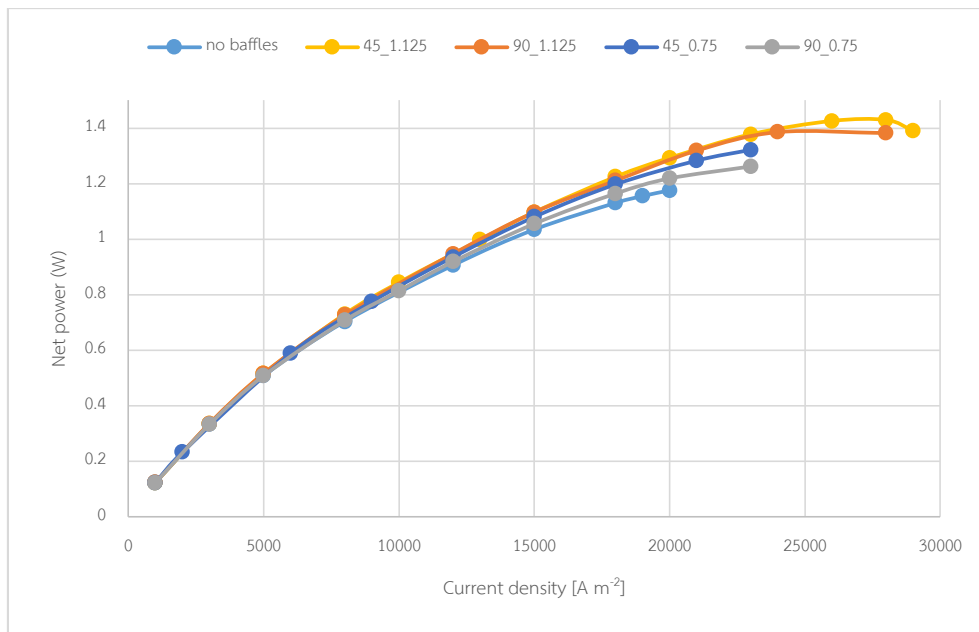
$$W_{net} = W_{FC} - W_P \quad (4.3)$$

และกำลังที่ใช้ในการป้อนสารตั้งต้นหรือเชื้อเพลิงเข้าไปในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ไฮโดรเจนสูง (W_P) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.4

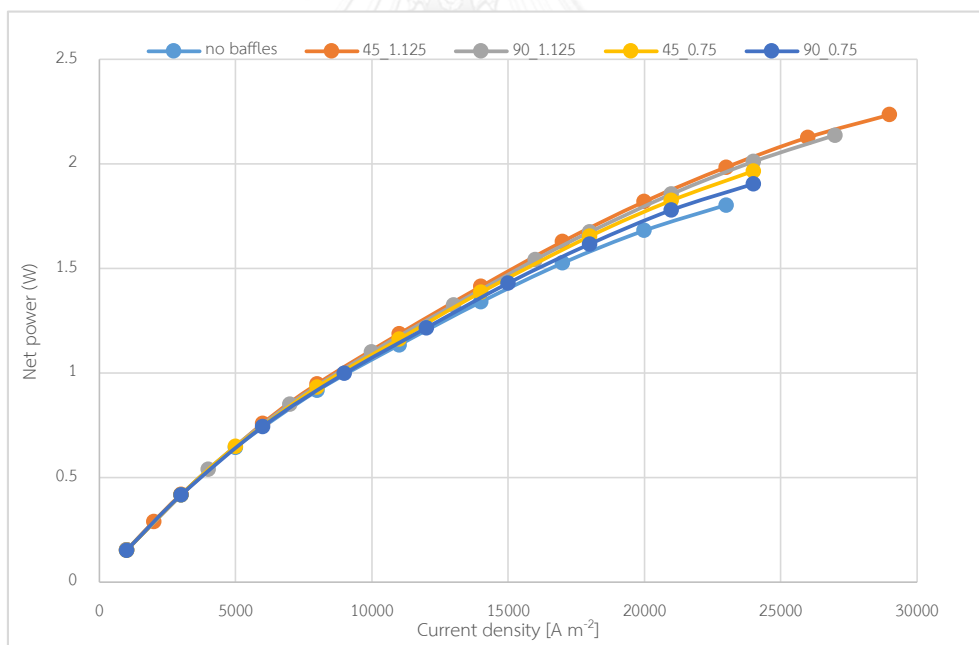
$$W_P = \Delta P \times A_{ch} \times u_{in} \quad (4.4)$$

เมื่อ ΔP เป็นความดันลดระหว่างความดันขาเข้าและขาออกของเชื้อเพลิงในเซลล์เชื้อเพลิง A_{ch} เป็นพื้นที่ตัดขวางของช่องการไหลของแก๊สในเซลล์เชื้อเพลิง และ u_{in} เป็นความเร็วของเชื้อเพลิงที่ทำการป้อนเข้าไปในเซลล์เชื้อเพลิง ค่ากำลังไฟฟ้าสุทธิสามารถบอกถึงสมรรถนะที่แท้จริงเซลล์เชื้อเพลิง

รูปที่ 4.39 และรูปที่ 4.40 แสดงกำลังไฟฟ้าสุทธิของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ไฮโดรเจนที่มีแผ่นกั้นรูปแบบต่างๆ ติดตั้งในช่องการไหลของแก๊ส ดำเนินการที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และ 180 องศาเซลเซียส จากรูปพบว่า เซลล์เชื้อเพลิง ดำเนินการที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ให้กำลังไฟฟ้าสุทธิที่มากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิที่สูงกว่าทำให้อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาของไฮโดรเจนออกซิเดชันและปฏิกิริยาออกซิเจนรีดักชัน (oxygen reduction reaction ORR) เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะปฏิกิริยาออกซิเจนรีดักชัน เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ไฮโดรเจน 100 องศาเซลเซียส และ 180 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส ส่งผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าสุทธิที่เหมือนกันทั้งต่อการดำเนินการที่อุณหภูมิ 100 หรือ 180 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถเรียงสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ไฮโดรเจนสูงจากมากที่สุดไปน้อยสุดได้ดังนี้ เซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นทำมุม 45 องศาและสูง 1.125 มิลลิเมตร เซลล์ที่มีแผ่นกั้นทำมุม 90 องศาและสูง 1.125 มิลลิเมตร เซลล์ที่มีแผ่นกั้นทำมุม 45 องศาและสูง 0.75 มิลลิเมตร เซลล์ที่มีแผ่นกั้นทำมุม 90 องศาและสูง 0.75 มิลลิเมตร และเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าสุทธิจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส ดำเนินการที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส สามารถเพิ่มได้มากที่สุดที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $20,000 \text{ A m}^{-2}$ หรือเพิ่มขึ้น 9.96 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการดำเนินการที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าสุทธิสูงสุดเกิดจากเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นทำมุม 45 องศาและสูง 1.125 มิลลิเมตร ได้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ $23,000 \text{ A m}^{-2}$ หรือมีค่าเพิ่มขึ้น 10.01 เปอร์เซ็นต์



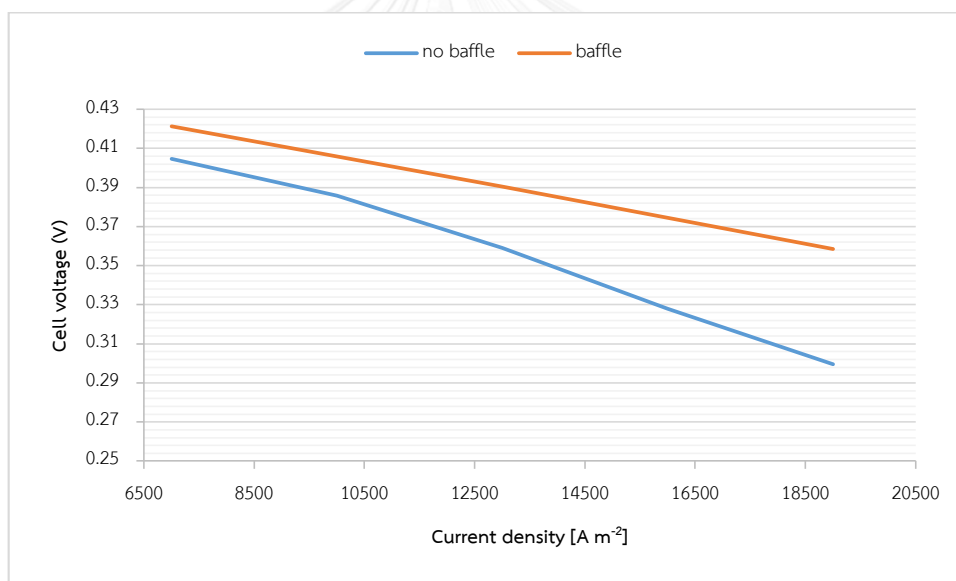
รูปที่ 4.39 กำลังไฟฟ้าสุทธิของเซลล์เชื้อเพลิงพืไอเอ็มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่มีรูปร่างแผ่นกั้น
ในช่องการไหลของแก๊สแบบต่างๆ



รูปที่ 4.40 กำลังไฟฟ้าสุทธิของเซลล์เชื้อเพลิงพืไอเอ็มอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ที่มีรูปร่างแผ่นกั้น
ในช่องการไหลของแก๊สแบบต่างๆ

4.3 การศึกษาอุทกพลศาสตร์และการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์สูงที่มีช่องการไหลของแก๊สแบบขนาน (Parallel channel) และมีพื้นที่ตัดขวางในการทำปฏิกิริยา 25 ตารางเซนติเมตร

รูปที่ 4.41 แสดงกราฟโพลารไรเซชันผลกระทบของการมีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ที่อุณหภูมิดำเนินการ 100 องศาเซลเซียส แผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่มีช่องการไหลแบบขนาน มีพื้นที่ตัดขวางในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา 25 ตารางเซนติเมตร แผ่นกั้นทำมุม 45 องศาและสูง 1.125 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นรูปร่างของแผ่นกั้นที่ให้ผลของสมรรถนะที่ดีที่สุด ในเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องการไหลของแก๊สแบบเดี่ยว (Single channel) จะสังเกตเห็นว่าเส้นกราฟโพลารไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นมีเส้นกราฟโพลารไรเซชันที่สูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้น โดยความหนาแน่นกระแสที่ทำให้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มมากที่สุดคือที่ 19000 A m^{-2} เพิ่มจาก 0.30 V เป็น 0.36 V

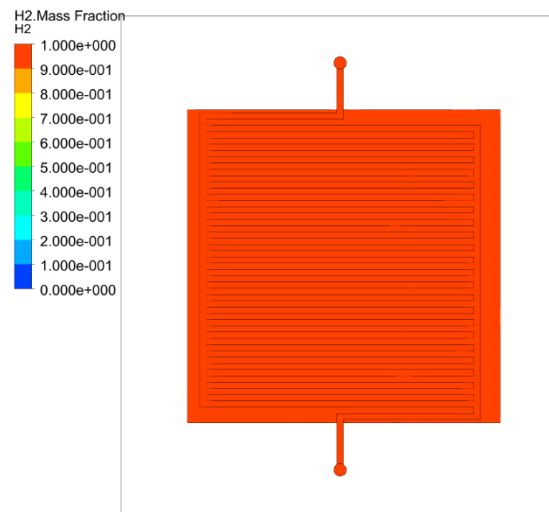


รูปที่ 4.41 กราฟโพลารไรเซชันผลกระทบของการมีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์สูงที่มีอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

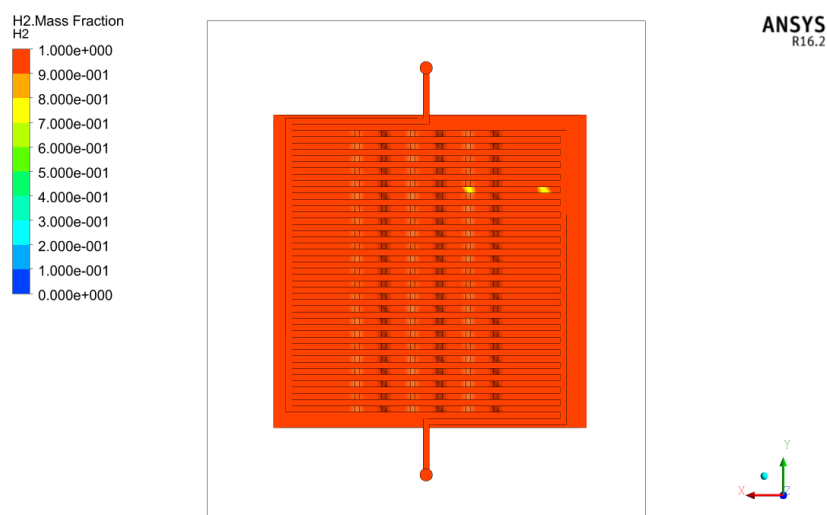
4.3.1 การศึกษาสัดส่วนโดยมวล (Mass fraction) ของไฮโดรเจนในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์สูง

จากรูปที่ 4.42 และรูปที่ 4.43 แสดงสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ที่ไม่มีแผ่นกั้นและมีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่น

กระแส 19000 A m^{-2} แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนไม่สามารถบอกปรากฏการณ์ของการไหลของของไหลในช่องการไหลของเซลล์เชื้อเพลิงได้ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ทำการป้อนไฮโดรเจนบริสุทธิ์เข้าไปในเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งมีสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนเท่ากับ 1 จึงไม่สามารถสังเกตปรากฏการณ์ไหลในช่องการไหลของแก๊สภายในเซลล์เชื้อเพลิงได้



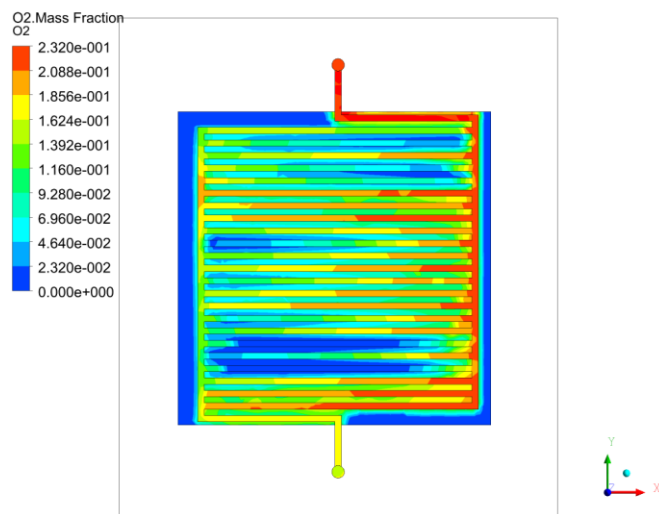
รูปที่ 4.42 สัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 19000 A m^{-2}



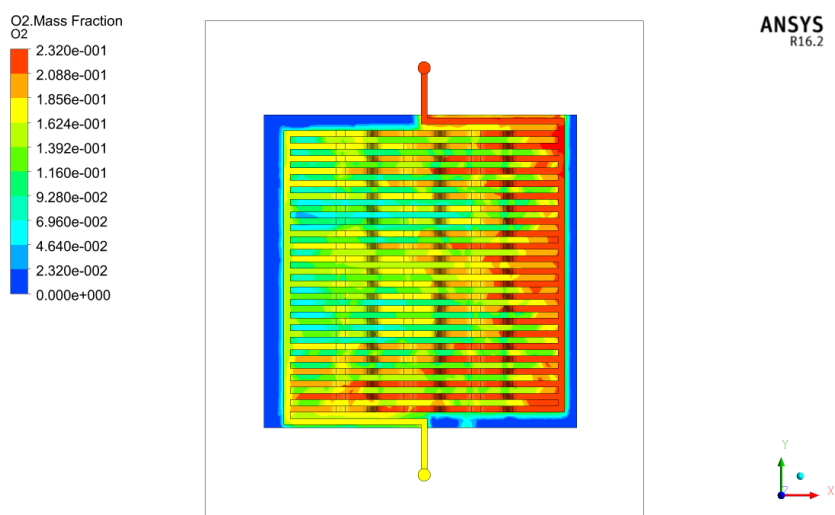
รูปที่ 4.43 สัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 19000 A m^{-2}

4.3.2 การศึกษาสัดส่วนโดยมวล (Mass fraction) ของออกซิเจนในเซลล์เชื้อเพลิง ฟิวเอ็่มอุณหภูมิสูง

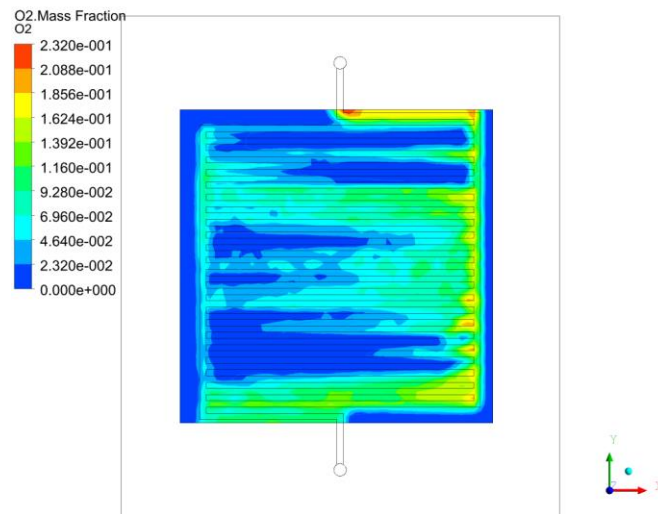
จากรูปที่ 4.44 และรูปที่ 4.45 แสดงสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มอุณหภูมิสูงที่ไม่มีแผ่นกั้นและมีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่าในช่องการไหลของแก๊สบ้างช่องของเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้นมีปริมาณของสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนอยู่น้อยมากนั้นหมายความว่าต้องมีสิ่งขัดขวางบ้างอย่างไรขวางการไหลของออกซิเจนในช่องการไหลของแก๊ส และสิ่งขัดขวางที่ไปขวางทางการไหลของออกซิเจนนั้นก็คือน้ำ ทำให้ออกซิเจนไม่สามารถไหลภายในช่องการไหลของแก๊สได้อย่างเต็มที่ ดังนั้น เมื่อมีการไหลของออกซิเจนในช่องการไหลของแก๊สที่น้อยส่งผลให้ปริมาณการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปยังชั้นแพร่แก๊สเกิดได้น้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลของเส้นแสดงรูปร่างของสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้นที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.46 ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นจะสังเกตเห็นว่าสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในช่องการไหลของแก๊สมีปริมาณที่มากและสม่ำเสมอมากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้นเนื่องจากความดันลดในช่องการไหลของแก๊สที่มากกว่าทำให้เมื่อป้อนออกซิเจนเข้ามายังช่องการไหลของแก๊สจึงช่วยไล่ไอน้ำที่มีอยู่ในช่องการไหลของแก๊สให้ออกไปจากเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้ออกซิเจนสามารถไหลเข้าไปยังช่องการไหลของแก๊สแล้วเกิดการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ สังเกตได้จากรูปที่ 4.47 แสดงสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นมีสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนที่มากกว่าสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้นในรูปที่ 4.46



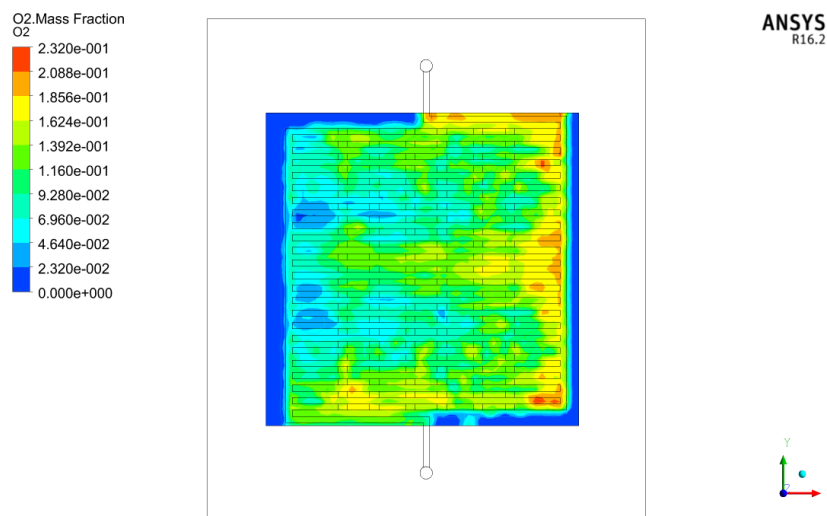
รูปที่ 4.44 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 19000 A m^{-2}



รูปที่ 4.45 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 19000 A m^{-2}



รูปที่ 4.46 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่มีแผ่นกั้น
ในช่องการไหลของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 19000 A m⁻²

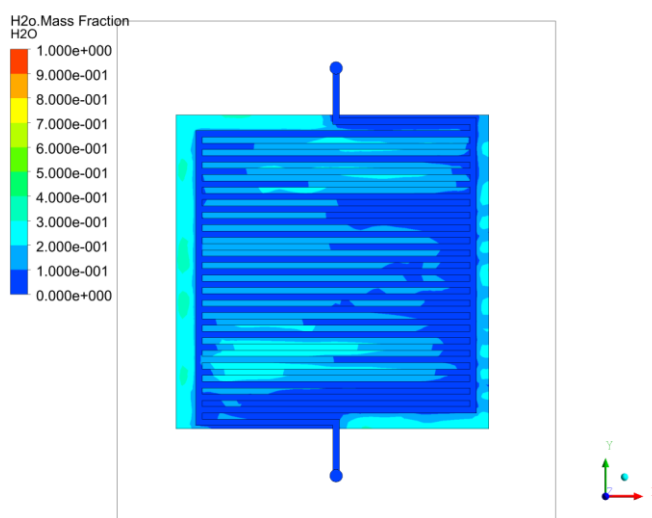


รูปที่ 4.47 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่มีแผ่นกั้นใน
ช่องการไหลของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 19000 A m⁻²

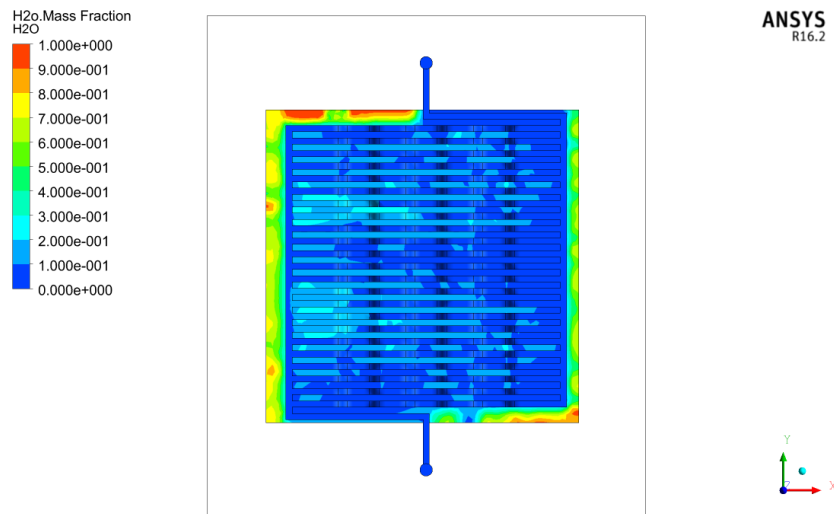
4.3.3 การศึกษาสัดส่วนโดยมวล (Mass fraction) ของไอน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ล อุณหภูมิสูง

จากรูปที่ 4.48 และรูปที่ 4.49 จะสังเกตเห็นปริมาณสัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในช่องการไหล
ของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลอุณหภูมิสูงที่ไม่มีแผ่นกั้นและมีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส
ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่าสัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นมีปริมาณสัดส่วนโดย

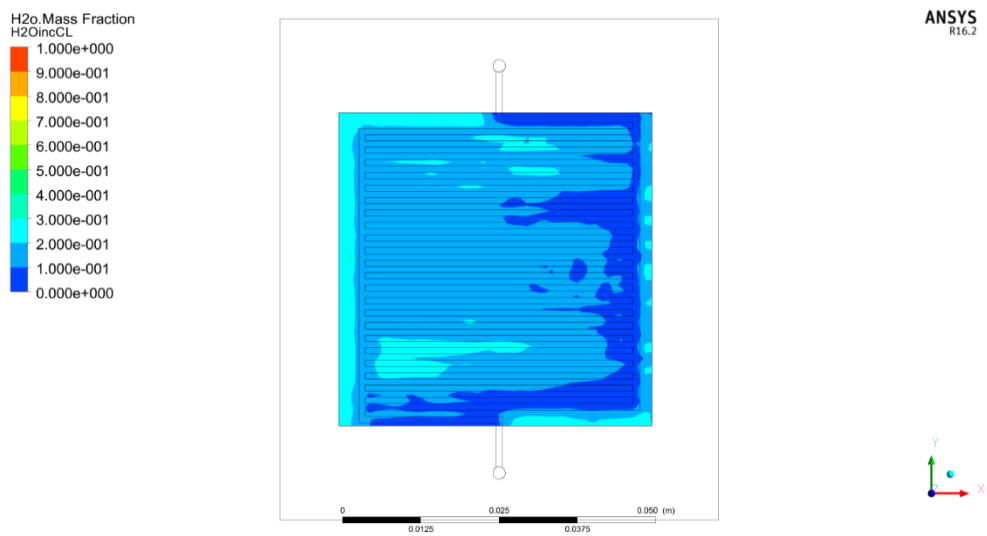
มวลของไอน้ำที่มากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้น เนื่องจากในเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นมีการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่มากกว่าทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นไอน้ำที่มากกว่า และสัดส่วนโดยมวลของไอน้ำส่วนมากอยู่ตรงบริเวณขอบของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้น การที่เซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นมีปริมาณสัดส่วนโดยมวลของไอน้ำมากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้นสอดคล้องกับผลของกราฟโพลาริเซชันที่เส้นกราฟของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นมีเส้นกราฟโพลาริเซชันที่สูงกว่าเส้นกราฟของเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้น และจากรูปที่ 4.50 และรูปที่ 4.51 แสดงสัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีแผ่นกั้นและมีแผ่นกั้นของเซลล์เชื้อเพลิง จะสังเกตเห็นว่าให้ผลของเส้นแสดงรูปร่างของสัดส่วนโดยมวลของไอน้ำเช่นเดียวกับรูปที่ 4.48 และรูปที่ 4.49



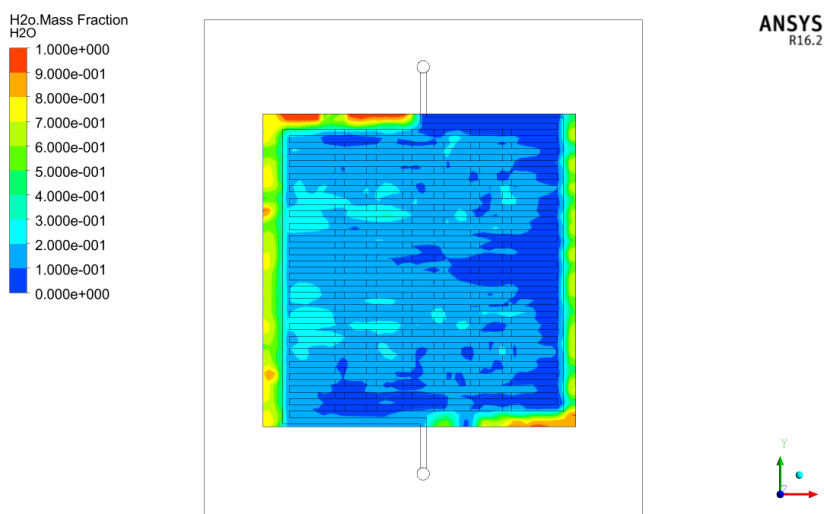
รูปที่ 4.48 สัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในช่องการไหลของแก๊สที่ไม่มีแผ่นกั้นของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม
อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 19000 A m⁻²



รูปที่ 4.49 สัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในช่องการไหลของแก๊สที่มีแผ่นกั้นของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม
 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 19000 A m⁻²



รูปที่ 4.50 สัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่มีช่องการไหล
 ของแก๊สที่ไม่มีแผ่นกั้นอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 19000 A m⁻²



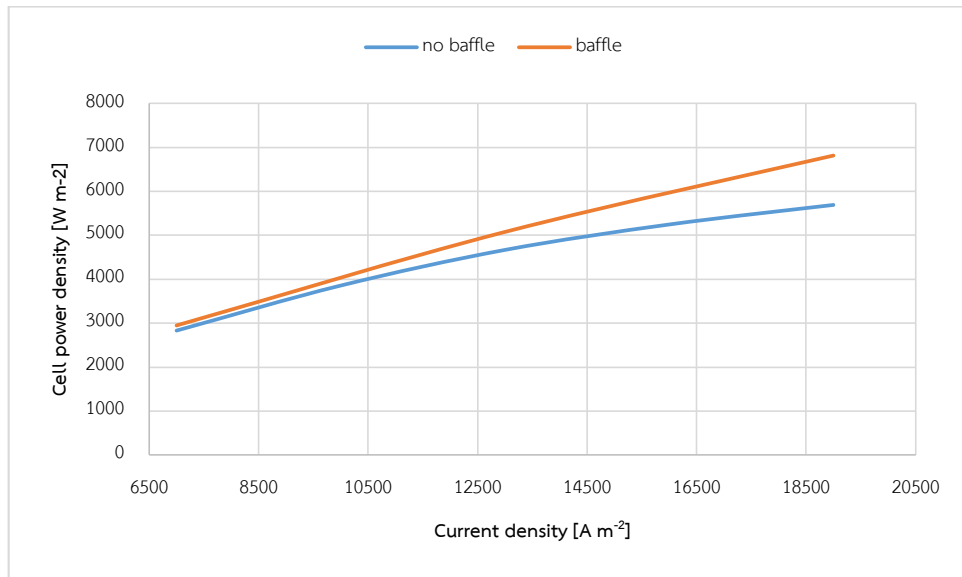
รูปที่ 4.51 สัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่มีช่องการไหลของแก๊สที่มีแผ่นกั้นอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความหนาแน่นกระแส 19000 A m^{-2}

4.3.4 การศึกษาความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (Cell power density) และกำลังไฟฟ้าสุทธิ (Net power) ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลอุณหภูมิสูงที่มีและไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส

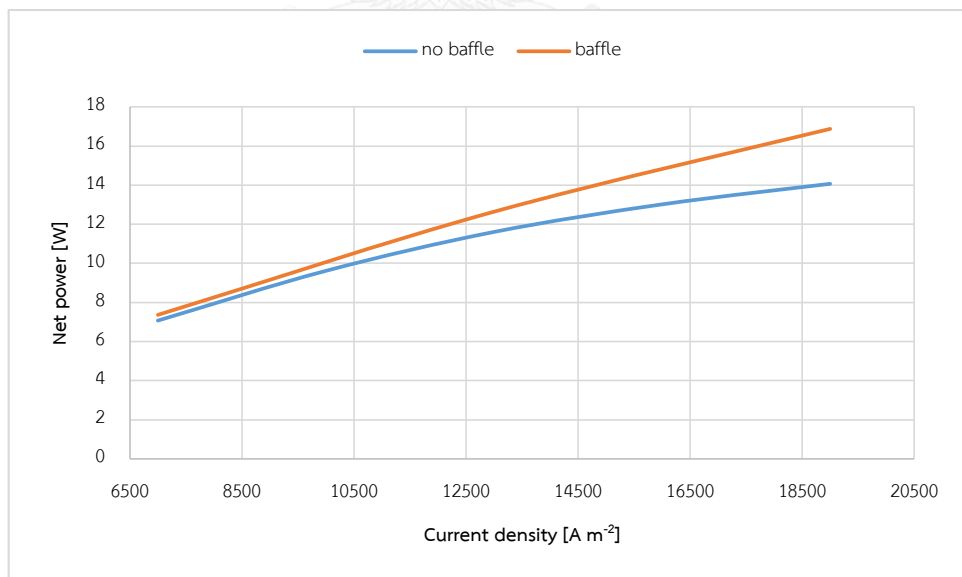
จากรูปที่ 4.52 แสดงความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่มีแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สอุณหภูมิดำเนินการ 100 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1 จะเห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่สูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้น เนื่องจากการไล่แผ่นกั้นลงไปในช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงทำให้เชื้อเพลิงและตัวออกซิแดนต์สามารถแพร่เข้าไปยังชั้นแพร่แก๊สและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เพิ่มมากขึ้นทำให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้น

การที่เราจะบอกได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลอุณหภูมิสูงที่มีแผ่นกั้นหรือไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบไหนจะให้สมรรถนะที่ดีกว่ากันนั้น ต้องดูจากกำลังไฟฟ้าสุทธิที่สามารถผลิตออกมาได้ ซึ่งสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าสุทธิของเซลล์เชื้อเพลิงจากสมการที่ 4.2 และสมการที่ 4.3 ถ้าเซลล์เชื้อเพลิงแบบไหนที่มีกำลังไฟฟ้าสุทธิที่สูงกว่าแสดงว่ามีสมรรถนะที่สูงกว่าเช่นกัน จากรูปที่ 4.53 แสดงกำลังไฟฟ้าสุทธิของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สอุณหภูมิดำเนินการ 100 องศาเซลเซียส จะสังเกตเห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นให้กำลังไฟฟ้าสุทธิที่สูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้น โดยเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าสุทธิ

จากเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้นสามารถเพิ่มได้มากที่สุดที่ความหนาแน่นกระแส 19000 A m^{-2} เพิ่มขึ้น 19.97 เปอร์เซ็นต์ จากเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้น แสดงว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส



รูปที่ 4.52 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่มีแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.53 กำลังไฟฟ้าสุทธิของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่มีแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาแบบจำลองสามมิติหนึ่งภูมิภาคของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดอุณหภูมิสูง ขนาด 2.25 ตารางเซนติเมตร และ 25 ตารางเซนติเมตร ด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT 16.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดอุณหภูมิสูง ซึ่งแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความน่าเชื่อถือ เนื่องจากผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลองจริง

5.1.1 การศึกษาอุทกพลศาสตร์และการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดอุณหภูมิสูงที่มีช่องการไหลของแก๊สแบบเดี่ยว (Single channel)

5.1.1.1 ผลจากการใส่แผ่นกั้นลงในช่องการไหลของแก๊ส

เมื่อใส่แผ่นกั้นลงในช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดอุณหภูมิสูง ทำให้เชื้อเพลิงสามารถแพร่เข้าไปยังชั้นแพร่แก๊สแล้วแพร่ต่อไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าได้มากขึ้น เนื่องจากการใส่แผ่นกั้นลงในช่องการไหลของแก๊สแผ่นกั้นจะทำให้ปริมาตรในช่องการไหลของแก๊สลดลง ทำให้เหลือปริมาตรให้กับเชื้อเพลิงน้อยลง เชื้อเพลิงจึงถูกบังคับให้แพร่เข้าไปยังชั้นรูพรุน ซึ่งทำให้เชื้อเพลิงเข้าถึงชั้นเร่งปฏิกิริยาเคมีได้มากขึ้น สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจึงเพิ่มมากขึ้น ผลของความสูงของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สมีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงมากกว่าผลของมุมของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส

5.1.1.1.1 ผลจากมุมของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส

การเปลี่ยนแปลงมุมของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ชนิดอุณหภูมิสูง แต่รักษาระดับความสูงไว้เท่ากัน ทำให้ปริมาตรของช่องการไหลของแก๊สเปลี่ยนแปลงไป โดยขนาดมุมของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส 45 องศาทำให้ปริมาตรของช่องการไหลของแก๊สในเซลล์เชื้อเพลิงลดลงมากกว่าแผ่นกั้นที่มีมุมเท่ากับ 90 องศา จึงทำให้ปริมาตรในช่องการไหลของแก๊สเหลือน้อยกว่าเชื้อเพลิงจึงถูกบังคับให้แพร่เข้าไปยังชั้นแพร่แก๊สและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า ส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สทำมุมเท่ากับ 45 องศา มีสมรรถนะของสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สทำมุม 90 องศา

5.1.1.1.2 ผลจากความสูงของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส

การเปลี่ยนแปลงความสูงของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูง แต่ให้มุมเอียงของแผ่นกั้นเท่ากัน ทำให้ปริมาตรของช่องการไหลของแก๊สเปลี่ยนแปลงไป และทำให้เชื้อเพลิงเข้าใกล้กับชั้นแพร่แก๊สมากขึ้น โดยความสูงของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส 1.125 มิลลิเมตร ทำให้ปริมาตรของช่องการไหลของแก๊สลดลงมากกว่าและทำให้เชื้อเพลิงเข้าใกล้ชั้นแพร่แก๊สมากกว่าเมื่อแผ่นกั้นมีความสูงเท่ากับ 0.75 มิลลิเมตร จึงทำให้ปริมาตรในช่องการไหลของแก๊สเหลือน้อยกว่าและเชื้อเพลิงเข้าใกล้ชั้นแพร่แก๊สมากกว่า เชื้อเพลิงจึงถูกบังคับให้แพร่เข้าไปยังชั้นแพร่แก๊สและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงที่แผ่นกั้นมีความสูงเท่ากับ 1.125 มิลลิเมตร มีสมรรถนะสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่แผ่นกั้นมีความสูงของเท่ากับ 0.75 มิลลิเมตร

5.1.1.2 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดำเนินการ

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูง เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่มีอุณหภูมิดำเนินการที่ 180 องศาเซลเซียส จะมีสมรรถนะที่สูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่มีอุณหภูมิดำเนินการที่ 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากปฏิกิริยาพลังงานจลน์ของไฮโดรเจนออกซิเดชันและปฏิกิริยาออกซิเจนรีดักชัน (oxygen reduction reaction ORR) จะเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูงโดยเฉพาะปฏิกิริยาออกซิเจนรีดักชัน

5.1.2 การศึกษาอุทกพลศาสตร์และการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูงที่มีช่องการไหลของแก๊สแบบขนาน (Parallel channel)

5.1.2.1 ผลจากการใส่แผ่นกั้นลงไปช่องการไหลของแก๊ส

ผลของการใส่แผ่นกั้นลงไปช่องการไหลของแก๊สของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูงคือทำให้เชื้อเพลิงและตัวออกซิเดนต์สามารถแพร่เข้าไปยังชั้นแพร่แก๊สมากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้น ด้านการกำจัดไอน้ำออกจากช่องการไหลของแก๊สในเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นสามารถกำจัดน้ำออกจากช่องการไหลของแก๊สได้ดีกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้น และด้านกำลังไฟฟ้าสุทธิที่สามารถผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นกั้นสามารถให้กำลังไฟฟ้าสุทธิที่สูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้น สรุปเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูงที่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สมีสมรรถนะที่ดีกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่มีแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊ส

5.2 ข้อเสนอแนะ

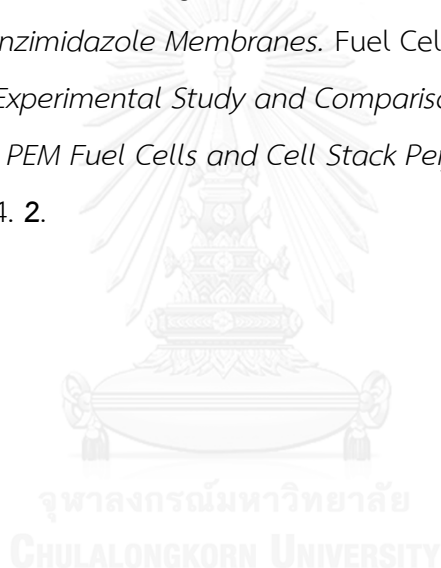
งานวิจัยนี้ ต้องการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม อุณหภูมิสูงเพื่อใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์และพฤติกรรมของมวลสารภายในเซลล์ เพื่อสามารถนำไปประยุกต์สำหรับการทำนายผลที่น่าจะเกิดขึ้นในกระบวนการ แต่แบบจำลองก็ยังคงมีจุดที่ต้องปรับปรุงเพิ่มเติมคือ ในโดเมนคำนวณ ไม่มีการคำนวณประจุ ไม่มีการไหลผ่านของไอออนและน้ำผ่านชั้นเมมเบรน การคำนวณแรงดันไฟฟ้ายังต้องนำมาคำนวณภายนอกโปรแกรม และไม่มีการคำนวณความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงควรมีการพัฒนาแบบจำลองต่อไป ดังนี้

1. พัฒนาแบบจำลองและรหัสฟังก์ชันที่ผู้ใช้กำหนดเอง (UFDs) ให้มีการคำนวณประจุภายในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูง
2. เพื่อให้ผลของการจำลองมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นควรตั้งค่าให้มีการไหลผ่านของโปรตอนและน้ำผ่านชั้นเมมเบรน
3. เพื่อความสะดวกและถูกต้องแม่นยำต้องเขียนรหัสฟังก์ชันที่ผู้ใช้กำหนดเอง (UFDs) ให้คำนวณแรงดันไฟฟ้าที่ได้ออกมาเลยจากโปรแกรม ANSYS FLUENT
4. เพื่อให้ผลของการจำลองมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นควรคำนวณความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูง

รายการอ้างอิง

1. Shao, Y., et al., *Proton exchange membrane fuel cell from low temperature to high temperature: Material challenges*. Journal of Power Sources, 2007. **167**(2): p. 235-242.
2. Manso, A.P., et al., *Influence of geometric parameters of the flow fields on the performance of a PEM fuel cell. A review*. International Journal of Hydrogen Energy, 2012. **37**(20): p. 15256-15287.
3. Chippar, P. and H. Ju, *Numerical modeling and investigation of gas crossover effects in high temperature proton exchange membrane (PEM) fuel cells*. International Journal of Hydrogen Energy, 2013. **38**(18): p. 7704-7714.
4. มะลิ หุ่นสม, เซลล์เชื้อเพลิงพื้อเอ็มและการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า, ed. 1. 2012: แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 336.
5. สุदारัตน์ สายยีนยงค์, การสร้างหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพื้อเอ็ม, in เทคโนโลยีเคมี. 2009, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. p. 103.
6. Chandan, A., et al., *High temperature (HT) polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC) – A review*. Journal of Power Sources, 2013. **231**: p. 264-278.
7. Patankar, S.V. and D.B. Spalding, *PAPER 5 - A CALCULATION PROCEDURE FOR HEAT, MASS AND MOMENTUM TRANSFER IN THREE-DIMENSIONAL PARABOLIC FLOWS*, in *Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion*. 1983, Pergamon. p. 54-73.
8. WMALALASEKERA, H.K.V., *An introduction to Computational Fluid Dynamics*. 2 ed. 1995: Copyright Licensing Agency Ltd. 257.
9. Perng, S.-W. and H.-W. Wu, *A three-dimensional numerical investigation of trapezoid baffles effect on non-isothermal reactant transport and cell net power in a PEMFC*. Applied Energy, 2015. **143**: p. 81-95.
10. Shimpalee, S., et al., *Understanding the effect of channel tolerances on performance of PEMFCs*. International Journal of Hydrogen Energy, 2011. **36**(19): p. 12512-12523.

11. Owejan, J., et al., *Effects of flow field and diffusion layer properties on water accumulation in a PEM fuel cell*. International Journal of Hydrogen Energy, 2007. **32**(17): p. 4489-4502.
12. Aili, D., et al., *Polybenzimidazole and sulfonated polyhedral oligosilsesquioxane composite membranes for high temperature polymer electrolyte membrane fuel cells*. Electrochimica Acta, 2014. **140**: p. 182-190.
13. Islam, S.Z., *Computational Fluid Dynamics Modelling of PEM Fuel Cells to Investigate Transport Limitations*. 2012, Robert Gordon University.
14. Jiao, K. and X. Li, *A Three-Dimensional Non-isothermal Model of High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells with Phosphoric Acid Doped Polybenzimidazole Membranes*. Fuel Cells, 2010. **10**(3): p. 351-362.
15. Liu, H., et al., *Experimental Study and Comparison of Various Designs of Gas Flow Fields to PEM Fuel Cells and Cell Stack Performance*. Frontiers in Energy Research, 2014. **2**.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ฟังก์ชันที่ผู้ใช้กำหนด (User defined functions, UDFs)

```

#include "udf.h"

/*****

/* Oxygen source term at cathode CL */

*****/

DEFINE_SOURCE(ox_con,c,t,dS,eqn)
{
    real x[ND_ND];
    real source;
    real jc=C_UDMI(c,t,2);
    real F =96487;          /* [c mol-1] */
    if (THREAD_ID(t)==27) /***** Cathode CL *****/
    {
        source = (jc*0.032) / (4 * F);
        dS[eqn] = 0;
    }
    else
    {
        source = dS[eqn] = 0;
    }

    return source;
}

*****/

/* Hydrogen source term at anode CL */

*****/

DEFINE_SOURCE(H2_con,c,t,dS,eqn)
{

```

```

real x[ND_ND];
real source;
real ja=C_UDMI(c,t,4);
real H2_conc;
real R=8.314;          /*[j mol-1 K-1]*/
real F =96487;        /* [c mol-1] */
if (THREAD_ID(t)==25) /***** anode CL *****/
{
    source = -( ja*0.002) / (2 * F);
    dS[eqn] = 0;
}
else
{
    source = dS[eqn] = 0;
}
return source;
}
/*****/
/* Water vapour source term at cathode CL */
/*****/
DEFINE_SOURCE(CCL_water,c,t,dS,eqn)
{
real x[ND_ND];
real source;
real F =96485.3;
real M_H2O = 18.0/1000;
if (THREAD_ID(t) == 27)
{

```

```

source = -C_UDMI(c,t,2) * M_H2O / (2 * F);
dS[eqn] = 0;
}
else
{
source = dS[eqn] = 0;
}
return source;
}
/*****
/***** Mass Source Term at anode CL *****/
/*****/
DEFINE_SOURCE(mass_sourceA,c,t,dS,eqn)
{
    real x[ND_ND];
    real source;          /*****/
    real ja=C_UDMI(c,t,4); /*****/
    real M_H2=0.002;
    real F=96487;        /*****/

    if (THREAD_ID(t)==25) /*****/
    {
        source=(-ja*M_H2)/(2*F);
        dS[eqn]=0;
    }
    else
    {
        source=0;
    }
}

```

```

        dS[eqn]=0;
    }
    return source;
}

/*****
/***** Mass Source Term at cathode cl *****/
/*****/

DEFINE_SOURCE(mass_sourceC,c,t,dS,eqn)
{
    real x[ND_ND];
    real source;          /*****/
    real F=96487;        /*****/
    real m_o2=0.032;     /*****/
    real m_w=0.018;
    real jc=C_UDMI(c,t,2);
    if (THREAD_ID(t)==27) /*****/
    {
        source=(-(jc*m_w)/(2*F))+((jc*m_o2)/(4*F));
        dS[eqn]=0;
    }
    else
    {
        source=0;
        dS[eqn]=0;
    }
    return source;
}

```

```

/*****
/***** Heat Source Term at anode cl *****/
*****/

DEFINE_SOURCE(Heat_sourceA,c,t,dS,eqn)
{
    real x[ND_ND];
    real source;          /**** kg*m-2*s-1 *****/
    real F=96487;        /**** C*mol-1 *****/
    real M_H2=0.002;    /**** kg*mol-1 *****/
    real m_w=0.018;
    real I=C_UDSI(c,t,0);
    real ja=C_UDMI(c,t,4);
    real R=8.314;        /*[j mol-1 K-1]*/
    real na=C_UDMI(c,t,6);
    real keff;
    real k;
    k=(100/C_T(c,t))*exp(8.0219-(2170.98/C_T(c,t)));
    keff=0.25298221*k;
    if (THREAD_ID(t)==25) /**** anode CL *****/
    {
        source=(ja*na)+(pow(I,2)/keff);
        dS[eqn]=0;
    }
    else
    {
        source=0;
        dS[eqn]=0;
    }
}

```

```

    }
return source;
}
/*****
/***** Heat Source Term at cathode cl *****/
/*****/
DEFINE_SOURCE(Heat_sourceC,c,t,dS,eqn)
{
    real x[ND_ND];
    real source;          /*****/
    real F=96487;        /*****/
    real jc=C_UDMI(c,t,2);
    real I=C_UDSI(c,t,0);
    real nc=-C_UDMI(c,t,7);
    real keff;
    real k;
    k=(100/C_T(c,t))*exp(8.0219-(2170.98/C_T(c,t)));
    keff=0.25298221*k;
if (THREAD_ID(t)==27) /*****/
    {
        source=(jc*nc)+(pow(I,2)/keff)+(jc*(-0.24e-3)*C_T(c,t));
        dS[eqn]=0;
    }
else
    {
        source=0;
        dS[eqn]=0;
    }
}

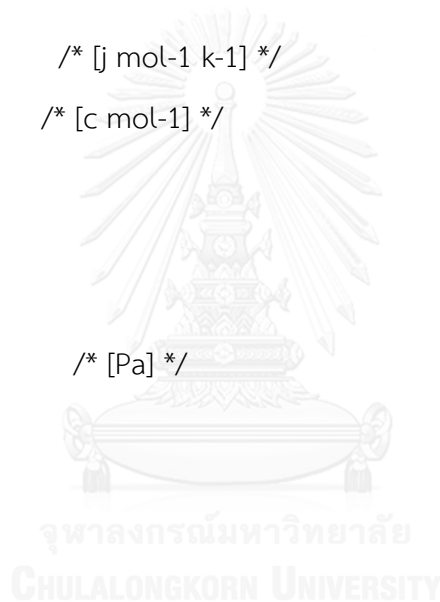
```

```

return source;
}
/*****
/* Electrochemistry at cathode side: Activation overpotential */
*****/

DEFINE_ADJUST(voltagecathode,d)
{
Thread *t;
cell_t c;
real R = 8.3144;      /* [j mol-1 k-1] */
real F = 96487;      /* [c mol-1] */
real P_o2;
real mas_o2;
real mas_h2o;
real P0 = 101325;    /* [Pa] */
real wat_acv;
real wat_acva;
real dif;
real P_ext;
real P_sat;
real wat_conc;
real M_O2 = 32.0/1000; /* [kg mol-1] */
real conc;
real conc_c;
real div;
real I_Lc;
real n_concc;
real diffo;

```




```

real diff_O2 = 0.22e-4;    /* O2 diffusion coefficient at 293.2 K [m2 s-1] */
real T10 = 293.2;        /* [K] */
real P = 101325;        /* [Pa] */

real hm;
real volume;
real watcnc;
real vol_tot;
real watcncav;
real airef_0;
real l=1000;            /*[A m-2]*/
thread_loop_c(t,d)
{
  if (THREAD_ID(t)== 27) /* cathode CL */
  {
    begin_c_loop(c,t)
    {
      airef_0=1e4*exp(-7900*((1/C_T(c,t))-(1/373.15)));
      /* partial pressure of oxygen in cathode catalyst layer*/
      P_o2 = C_Yl(c,t,1) * C_R(c,t)* R * C_T(c,t)/0.032;
      C_UDMI(c,t,11)= P_o2;
      /* concentration cathode */
      concc = C_Yl(c,t,1) * C_R(c,t) /M_O2;
      if (concc < 0)
      {
        concc = 0.0;
      }
      /* reaction overpotential on cathode side */

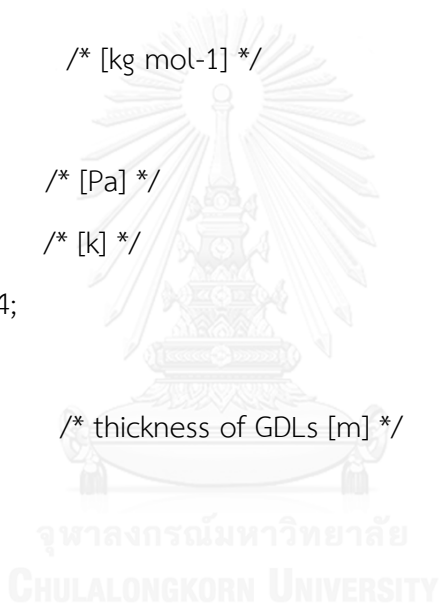
```

```

div = 1/(airef_0*1e-5*pow(((concc+0.00001)/40.88),(3/4))); /* 2.87e-5 is thickness of CL
[m] */
C_UDMI(c,t,7) =R*C_T(c,t)*log(div)/(-0.5*F);
C_UDMI(c,t,2)=-airef_0*pow(((concc+0.00001)/40.88),(3/4))*exp((-
0.5*F*C_UDMI(c,t,7))/(R*C_T(c,t)));
}
end_c_loop(c,t)
}
}
}
/*****
/* Electrochemistry at anode side: Ohmic overpotential */
/*****
DEFINE_ADJUST(voltageanode,d)
{
Thread *t;
cell_t c;
real mcona;
real R = 8.3144; /* [j mol-1 k-1] */
real F = 964857; /* [c mol-1] */
real P_h2; /* C_UDMI(c,t,10) */
real mas_h2o;
real mas_h2;
real P0 = 101325; /* [Pa] */
real wat_acva;
real dif;
real P_ext;
real P_sat;

```

```
real wat_conc_ano;
real ee;
real nd;
real ndav;
real ex;
real Dw;
real alpha;
real wat_conc;
real div;
real Mh2 = 2.0/1000; /* [kg mol-1] */
real conca;
real P = 101325; /* [Pa] */
real T20 = 307.1; /* [K] */
real diff_H2 = 0.915e-4;
real diffh;
real Hd = 0.000250; /* thickness of GDLs [m] */
real hm;
real conc_a;
real n_conca;
real I_La;
real volume;
real watcha;
real vol_tot;
real watchaav;
real R_el = 0.1/(100 * 100); /* [ohm m2] */
real Hm = 0.00007;
real Km;
real Dwav;
```



```

real Qe;
real airef_0;
thread_loop_c(t,d)
{
if (THREAD_ID(t)== 25) /* Anode CL */
{
begin_c_loop(c,t)
{
airef_0=1e9*exp(-1400*((1/C_T(c,t))-(1/373.15)));
/* partial pressure of hydrogen in anode catalyst layer*/
P_h2 = C_YI(c,t,0) * C_R(c,t)* R * C_T(c,t)/0.002;
C_UDMI(c,t,10)= P_h2;
/* concentration anode */
conca = C_YI(c,t,0) * C_R(c,t)/ Mh2 ;
if (conca < 0)
{
conca = 0.0;
}
/* reaction overpotential on anode side */
div = C_UDSI(c,t,0) /( airef_0 * 10e-6 * pow((conca/40.88),(1/2))); /* 2.87e-5 is
thickness of the catalyst layer */
C_UDMI(c,t,6) = (R*C_T(c,t)*div)/F; /* May be C_UDMI(c,t,5) is reaction overpotential
on anode side */
if (C_UDMI(c,t,6) < 0)
{
C_UDMI(c,t,6) = 0;
}
C_UDMI(c,t,4)=airef_0*pow((conca/40.88),(1/2))*((0.5+0.5)/(R*C_T(c,t))*F*C_UDMI(c,t,6));

```

```

}
end_c_loop(c,t)
}
}
thread_loop_c(t,d)
{
if (THREAD_ID(t) == 25)          /* Anode CL */
{
begin_c_loop(c,t)
{
/* Ohmic overpotential */
/*C_UDMI(c,t,9) = C_UDSI(c,t,0) * (5.72e-5)*;/
}
end_c_loop(c,t)
}
}
}

/*****/
/* UDF for specifying an momentum source term in a GDL and CL */
/*****/
DEFINE_SOURCE(xmom_sourceC,c,t,dS,eqn) /* cathode x momentum source */
{
real x[ND_ND];
real source;
real mu = C_MU_L(c,t);
real K;
if (THREAD_ID(t) == 28) /* cathode GDL */
{

```

```

K = 1.00e-12;
}
else if (THREAD_ID(t) == 27) /* cathode CL */
{
K = 1.00e-13;
}
C_CENTROID(x,c,t);
source = - mu * C_U(c,t) / K;      /* C_U(c,t) = U velocity */
dS[eqn] = - mu / K;
return source;
}
DEFINE_SOURCE(xmom_sourceA,c,t,dS,eqn) /* anode x momentum source */
{
real x[ND_ND];
real source;
real mu = C_MU_L(c,t);
real K;
if (THREAD_ID(t) == 24) /* anode GDL */
{
K = 1.00e-12;
}
else if (THREAD_ID(t) == 25) /* anode CL */
{
K = 1.00e-13;
}
C_CENTROID(x,c,t);
source = - mu * C_U(c,t) / K;      /* C_U(c,t) = U velocity */
dS[eqn] = - mu / K;

```

```

return source;
}
DEFINE_SOURCE(ymom_sourceC,c,t,dS,eqn) /* cathode y momentum source */
{
real x[ND_ND];
real source;
real mu = C_MU_L(c,t);
real K;
if (THREAD_ID(t) == 28) /* cathode GDL */
{
K = 1.00e-12;
}
else if (THREAD_ID(t) == 27) /* cathode CL */
{
K = 1.00e-13;
}
C_CENTROID(x,c,t);
source = - mu * C_V(c,t) / K;
dS[eqn] = - mu / K;
return source;
}
DEFINE_SOURCE(ymom_sourceA,c,t,dS,eqn) /* anode y momentum source */
{
real x[ND_ND];
real source;
real mu = C_MU_L(c,t);
real K;
if (THREAD_ID(t) == 24) /* anode GDL */

```

```

{
K = 1.00e-12;
}
else if (THREAD_ID(t) == 25) /* anode CL */
{
K = 1.00e-13;
}
C_CENTROID(x,c,t);
source = - mu * C_V(c,t) / K;
dS[eqn] = - mu / K;
return source;
}
DEFINE_SOURCE(zmom_sourceC,c,t,dS,eqn) /* cathode z momentum source */
{
real x[ND_ND];
real source;
real mu = C_MU_L(c,t); /* laminar viscosity */
real K;
if (THREAD_ID(t) == 28) /* cathode GDL */
{
K = 1.00e-12;
}
else if (THREAD_ID(t) == 27) /* cathode CL */
{
K = 1.00e-13;
}
C_CENTROID(x,c,t);
source = - mu * C_W(c,t) / K; /* C_W(c,t) = W velocity */

```



```

dS[eqn] = - mu / K;
return source;
}
DEFINE_SOURCE(zmom_sourceA,c,t,dS,eqn) /* anode z momentum source */
{
real x[ND_ND];
real source;
real mu = C_MU_L(c,t);
real K;
if (THREAD_ID(t) == 24) /* anode GDL */
{
K = 1.00e-12;
}
else if (THREAD_ID(t) == 25) /* anode CL */
{
K = 1.00e-13;
}
C_CENTROID(x,c,t);
source = - mu * C_W(c,t) / K; /* C_W(c,t) = W velocity */
dS[eqn] = - mu / K;
return source;
}
/*****/
/* UDF for specifying velocity at cathode and anode inlet */
/*****/
DEFINE_PROFILE(cathode_velocity,t,i)
{
cell_t c;

```

```

real x[ND_ND];
real zeta = 2.0;
real I_ref = C_UDSI(c,t,0);          /*[A m-2]*/
real F = 96487;                      /*[c mol-1]*/
real R=8.314;                        /*[J mol-1 k-1]*/
real P = 101325.0;                   /*[Pa]*/
real x_o2 = 0.21;
real Am = 4.5 * 50;                  /*[mm2]*/
real Ach = 1.5*1.5;                  /*[mm2]*/
begin_c_loop(c,t)
{
  C_CENTROID(x,c,t);
  F_PROFILE(c,t,i) = (zeta * I_ref * R * C_T(c,t) * Am) / (4 * F * P * Ach * x_o2);
}
end_c_loop(c,t)
}
DEFINE_PROFILE(anode_velocity,t,i)
{
  cell_t c;
  real x[ND_ND];
  real zeta = 2.0;
  real I_ref = C_UDSI(c,t,0);
  real F = 96487;
  real R =8.314;
  real P = 101325.0;
  real x_h2 = 1.00;
  real Am = 4.5 * 50;                  /*[mm2]*/
  real Ach = 1.5*1.5;                  /*[mm2]*/

```

```

begin_c_loop(c,t)
{
C_CENTROID(x,c,t);
F_PROFILE(c,t,i) = (zeta * I_ref * R * C_T(c,t) * Am )/ (2 * F * P * Ach * x_h2);
}
end_c_loop(c,t)
}

/*****
/* UDF for diffusivity in the porous zones */
*****/

#define por_cl 0.3
#define por_gdl 0.6
#define diff_o2 2.652e-5 /* mass diffusivity of oxygen */
#define diff_h2o 2.982e-5 /* mass diffusivity of water */
#define diff_n2 2.88e-5 /* mass diffusivity of nitrogen */
#define diff_h2 1.055e-4 /* mass diffusivity of hydrogen */
#define i_h2 0
#define i_o2 1
#define i_h2o 2
#define i_n2 3
DEFINE_DIFFUSIVITY(mix_diff, c, t, i)
{
    real diff;
    real p=101325;
    real p0=101325.0;
    real T=C_T(c,t);
    real T0_h2o=333.15;
    real T0_o2=333.15;

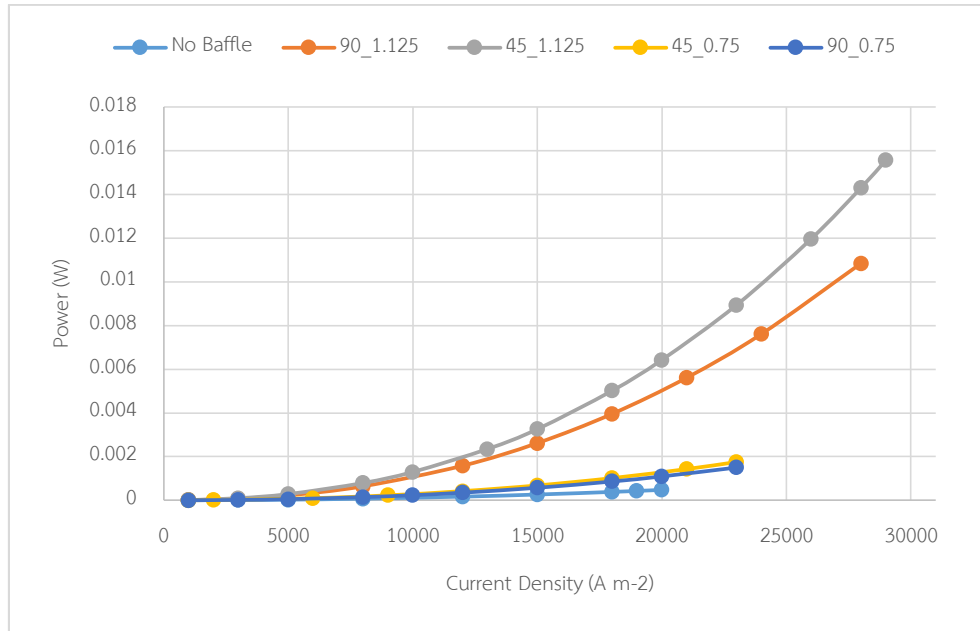
```

```
real T0_h2=333.15;
switch (i)
{
    case 0:diff=diff_h2*(p0/p)*pow((T/T0_h2),1.5);
    break;
    case 1:diff=diff_o2*(p0/p)*pow((T/T0_o2),1.5);
    break;
    case 2:diff=diff_h2o*(p0/p)*pow((T/T0_h2o),1.5);
    break;
    case 3:diff=diff_n2*por_cl*sqrt(por_cl);
    break;
    default:diff=0.0;
}
return diff;
}
```

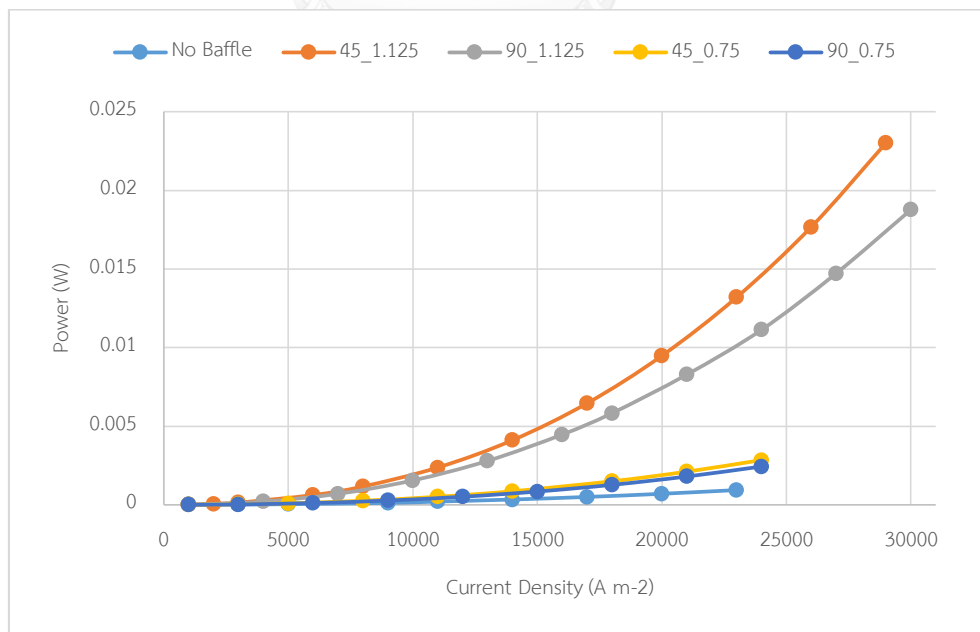


ภาคผนวก ข

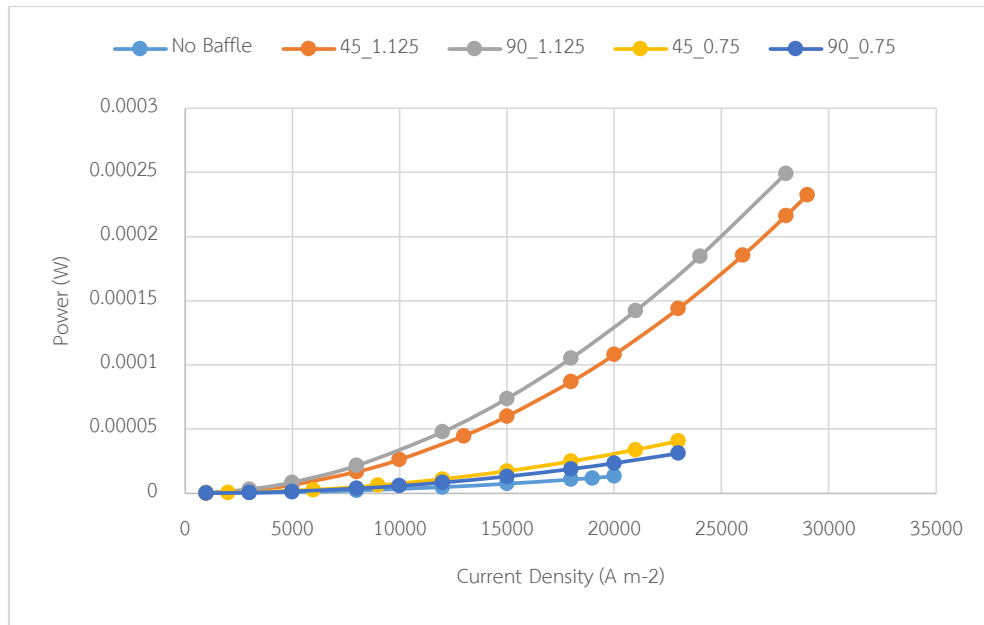
กราฟเปรียบเทียบความดันที่เกิดจากความเร็วของสารตั้งต้นขาเข้าทางด้านแอโนดและแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มอุณหภูมิสูงที่มีรูปร่างของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่แตกต่างกัน



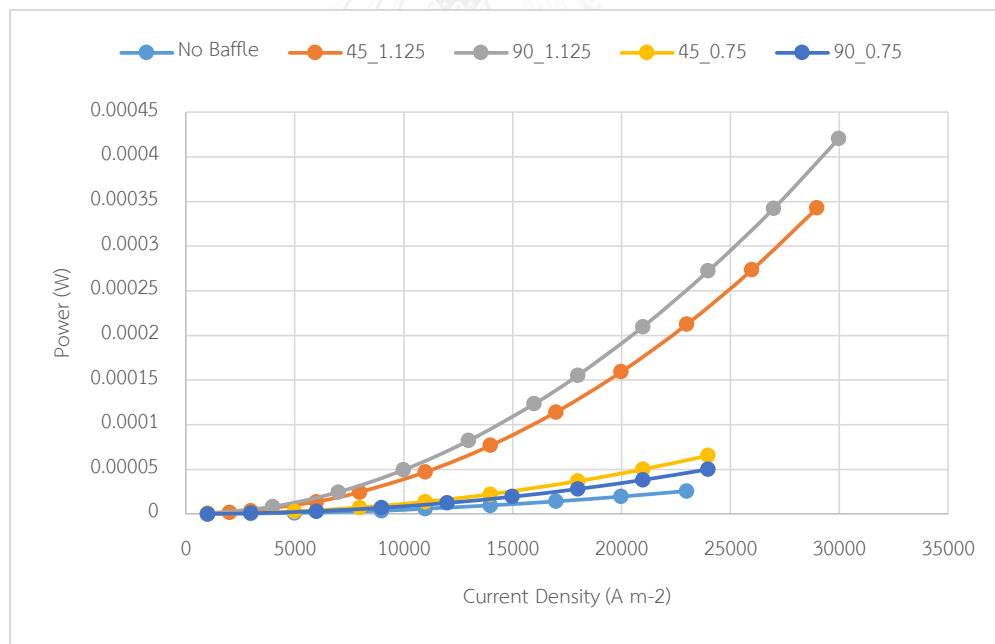
รูปที่ ข.1 กราฟความดันที่เกิดจากความเร็วของสารตั้งต้นขาเข้าทางด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่มีรูปร่างของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่แตกต่างกัน



รูปที่ ข.2 กราฟความดันที่เกิดจากความเร็วขาเข้าของสารตั้งต้นทางด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ที่มีรูปร่างของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่แตกต่างกัน



รูปที่ ข.3 กราฟความดันที่เกิดจากความเร็วขาเข้าของสารตั้งต้นทางด้านแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิง
พื้ไอเอ็มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่มีรูปร่างของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่แตกต่างกัน



รูปที่ ข.4 กราฟความดันที่เกิดจากความเร็วขาเข้าของสารตั้งต้นทางด้านแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิง
พื้ไอเอ็มอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ที่มีรูปร่างของแผ่นกั้นในช่องการไหลของแก๊สที่แตกต่างกัน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวุฒิศักดิ์ กิติปัญญา เกิดวันที่ 30 มิถุนายน 2534 ที่จังหวัดน่าน สำเร็จการศึกษา ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคาร จังหวัดน่าน สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยปีการศึกษา 2557 และได้นำเสนอโปสเตอร์ในหัวข้อเรื่อง การจำลองเชิงตัวเลขสามมิติของผลจากแผ่นกั้นต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มอุณหภูมิสูง ในงานประชุมวิชาการ PETROMAT & Symposium 2016

