

ผลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เอ็ม



นางสาว กรกนก หงษ์ทอง

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6036-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF GAS FLOW CHANNEL PATTERN ON THE PERFORMANCE OF PEM FUEL CELL



Miss Kronkanok Hongthong

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6036-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง พีอีเอ็ม
โดย	นางสาวกรรณก หงษ์ทอง
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เก็จวดี พฤกษาทร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร.ไพบุลย์ ศรีภคากกร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เก็จวดี พฤกษาทร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร.ไพบุลย์ ศรีภคากกร)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุต)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ)

กรรณก หงษ์ทอง : ผลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม
(EFFECT OF GAS FLOW CHANNEL PATTERN ON THE PERFORMANCE OF PEM
FUEL CELL) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.เก็จวลี พุกษาท อ. ที่ปรึกษาร่วม : อ.ดร. ไพบูลย์
ศรีรักษากร จำนวนหน้า 102 หน้า. ISBN 974-17-6036-1.

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างแบบจำลองสามมิติ หนึ่งภูมิภาคสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่น
แลกเปลี่ยนโปรตอนขนาด 2.25x2.25 ตารางเซนติเมตร ซึ่งขั้วแอโนดและแคโทดถูกสร้างขึ้นแยกเป็น
อิสระจากกันโดยใช้โปรแกรม FLUENT 4.5 เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่
มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแอโนดและแคโทดตามลำดับ

ผลจากการคำนวณโดยแบบจำลองพบว่า รูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สไม่มีอิทธิพลต่อ
สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแอโนด เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนมีค่าความหนา
แน่นกระแสสมมูลสูง ในขณะที่รูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อ
เพลิงฝั่งขั้วแคโทดเป็นอย่างมาก การพัฒนาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทดสามารถทำได้
โดยการเลือกใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการ
ไหลกว้างๆ ซึ่งในกรณีศึกษานี้พบว่าที่ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวฝั่งขั้วแคโทดมีค่า 0.7 โวลต์ การใช้ช่องทาง
การไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 20.5
มิลลิเมตร สามารถเพิ่มสมรรถนะของเซลล์ได้สูงสุดถึงร้อยละ 150 เมื่อเทียบกับการใช้ช่องทางการ
ไหลของแก๊สแบบ conventional design และ ร้อยละ 43 เมื่อเทียบกับการใช้ช่องทางการไหลของ
แก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 1 มิลลิเมตร

งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบผลที่ได้จากแบบจำลอง โดยทดสอบสมรรถนะของเซลล์เปรียบ
เทียบกับผลจากแบบจำลอง พบว่าผลของแบบจำลองและผลการทดลองมีความสอดคล้องกันเชิง
แนวโน้ม แต่เมื่อใช้ช่องทางการไหลแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหล
ของแก๊ส 20.5 มิลลิเมตร ทางขั้วแคโทดพบว่า เกิดปัญหาน้ำค้างภายในเซลล์ซึ่งแบบจำลองไม่
สามารถทำนายปรากฏการณ์นี้ได้

ภาควิชาเคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา.....2547 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4572206423 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD : PEMFC / FUEL CELL / FLOW CHANNEL PATTERN / FLUENT

KRONKANNOK HONGTHONG : EFFECT OF GAS FLOW CHANNEL PATTERN ON
THE PERFORMANCE OF PEM FUEL CELL. THESIS ADVISOR :

ASSIST.PROF.KEJVALEE PRUKSATHRON, THESIS CO-ADVISOR: DR. PAIBOON
SRIPAKAGORN, 102 pp. ISBN 974-17-6036-1.

To study of the effect of the gas flow channel patterns on the PEM fuel cell performance. Three-dimensional, single phase, compressible and isothermal model for $2.25 \times 2.25 \text{ cm}^2$ of anode and cathode of PEMFC was performed separately by utilizing a commercial Computational Fluid Dynamics (CFD) software, FLUENT 4.5.

The model's results showed that the gas flow channel pattern does not have the effect on the anode cell performance due to the high value of hydrogen oxidation's exchange current density, whereas it plays an important role on the cathode cell performance. The cathode cell performance can be improved by using the large shoulder interdigitated design on the cathode side. As a result, interdigitated design with 20.5 mm. shoulder width can promote the cathode cell performance by 150% and 43% over the conventional design and 1 mm. shoulder width interdigitated design at 0.7 V of cathode cell overpotential, respectively.

Moreover, the consistent check between model's prediction and laboratory testing's result were also investigated by comparison between the result from model and cell performance testing in laboratory. The consistence between them were showed. However, the model could not detect cathode flooding problem when 20.5 mm. shoulder width interdigitated design was used at the cathode side.

Department..... Chemical Technology... Student's signature.....

Field of study ... Chemical Technology... Advisor's signature.....

Academic year.....2004..... Co-Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ถือเป็นงานชิ้นแรกที่ข้าพเจ้าได้ลงมือทำจนสำเร็จเป็นรูปเป็นร่าง ซึ่งตลอดการทำงานข้าพเจ้าได้รับความร่วมมือ และความอนุเคราะห์จากอาจารย์ เพื่อนๆ และรุ่นพี่ โดยเฉพาะ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พฤษชาทร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และผู้ริเริ่มหัวข้อวิทยานิพนธ์นี้ อาจารย์ ดร. ไพบุลย์ ศรีภคกร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญณ์ ซึ่งเป็นแกนหลักของกลุ่ม FUEL CELL และคอยชี้แนะงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบคุณ และรู้สึกเป็นเกียรติที่ได้ร่วมงานกับอาจารย์ทั้งสามท่าน

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสุสัทธิ สำหรับความอนุเคราะห์ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการคำนวณ EXERGY

ขอขอบคุณโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง และศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี ที่ให้การสนับสนุนในด้านทุนทรัพย์จนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณ วิฑิตกร วาสนาเพียรพงศ์ สำหรับคำแนะนำในการใช้โปรแกรม FLUENT4.5

ขอขอบคุณ คุณ มารีนา มงคล และ คุณ ฝนทิพย์ กัมปสุต เพื่อนที่อยู่ข้างๆ ข้าพเจ้าตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณครูทุกท่านที่เคยได้สั่งสอนข้าพเจ้ามาจนกระทั่งมีทุกวันนี้

และขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่หนึ่ง ที่คอยดูแล และอดทนกับความดีของข้าพเจ้าตลอดมา

กรกนก หงษ์ทอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน	3
2.2 เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน	5
2.3 รูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊ส	7
2.4 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	8
2.4.1 แรงดันไฟฟ้าสมดุล	10
2.4.2 ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี (Activation Overpotential)	11
2.4.3 ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic overpotential)	12
2.4.4 โพล่าไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration polarization)	14
2.5 การจัดการน้ำภายในระบบ	15
2.6 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระบวนการด้วยวิธีทาง Exergy.....	17
2.6.1 Order energy	17
2.6.2 Disorder energy.....	17
2.6.3 Physical exergy	18
2.6.4 Chemical exergy	19
2.6.5 ประสิทธิภาพของกระบวนการแปรรูปพลังงานโดยเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อ แผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	20

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.7 โปรแกรม FLUENT 4.5	20
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	24
3.1 การพัฒนาแบบจำลองกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน .24	
3.1.1 ขอบเขตของแบบจำลอง	25
3.1.2 สมการที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง.....	25
3.1.2.1 สมการการไหลแบบต่อเนื่องสำหรับกรณีการไหลแบบราบเรียบ	25
3.1.2.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม	26
3.1.2.3 สมการอนุรักษ์สปีชีส์ (Species conservation equation).....	28
3.1.3 ส่วนการจำลองโดยโปรแกรมFLUENT 4.5	30
3.1.3.1 ลักษณะกรณีศึกษาพื้นฐาน (base case).....	30
3.1.3.2 การศึกษาอิทธิพลของรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อ สมรรถนะของเซลล์ฟุ้งั่วแอโนด	34
3.1.3.3 การศึกษาอิทธิพลของรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อ สมรรถนะของเซลล์ฟุ้งั่วแคโทด	37
3.2 การทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง	38
3.2.1 อุปกรณ์การทดลอง	38
3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	41
3.4 ตัวที่ศึกษา.....	41
3.5 ขั้นตอนการทดลอง.....	42
3.6 ขั้นตอนภายหลังการทดลอง	44
4 อภิปรายผล	45
4.1 ผลและการอภิปรายผลของแบบจำลองกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่น แลกเปลี่ยนโปรตอนบนโปรแกรม FLUENT 4.5.....	45
4.1.1 การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองบนโปรแกรม FLUENT 4.5	45
4.1.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อ สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟุ้งั่วแอโนด	48
4.1.2.1 อิทธิพลของช่องทางการไหลแบบ conventional design	48
4.1.2.2 อิทธิพลของช่องทางการไหลแบบ interdigitated design	49

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.1.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อ สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝังขั้วแคโทด	51
4.1.3.1 อิทธิพลของช่องทางการไหลแบบ conventional design	51
4.1.3.2 อิทธิพลของช่องทางการไหลแบบ interdigitated design	53
4.1.3.3 อิทธิพลของขนาดความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของ แก๊สขาเข้าและขาออก (S) ของช่องทางการไหลแบบ interdigitated design	57
4.2 การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน	
ขนาด 5 ตารางเซนติเมตร	70
4.2.1 อิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝังขั้ว แอโนด.....	71
4.2.2 อิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝังขั้ว แคโทด	74
4.2.3 อิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊ส และแก๊สออกซิเจนที่มีต่อ สมรรถนะของเซลล์ฝังขั้วแคโทด.....	77
5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	80
5.1 ผลของแบบจำลองบนโปรแกรม FLUENT 4.5	80
5.2 ผลการทดลอง	81
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	81
รายการอ้างอิง.....	82
ภาคผนวก.....	84
ภาคผนวก ก.....	85
ภาคผนวก ข	88
ภาคผนวก ค.....	97
ภาคผนวก ง	101
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	102

สารบัญญัตราสาร

ตาราง	หน้า
3.1 ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณกรณีศึกษาพื้นฐาน	33
3.2 ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลองฝั่งขั้วแอโนด.....	36
3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊ส ที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแอโนด	36
3.4 ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลองฝั่งขั้วแคโทด.....	37
3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊ส ที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทด	38
4.1 ผลการทำสมดุข exergy รอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนแบบ เซลล์เดี่ยวขนาด 5 ตารางเซนติเมตร โดยฝั่งแอโนดใช้ช่องทางการไหลแบบ conventional design ที่มี CH = 1 mm., S = 1 mm. ฝั่งแคโทดใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มี S = 1 mm., 2 mm., 20.5mm.	69
4.2 ตารางการทดลอง เพื่อทดสอบอิทธิพลของรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊ส ที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งแอโนด	71
4.3 ตารางการทดลอง เพื่อทดสอบอิทธิพลของรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊ส ที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งแคโทด	74
4.4 ตารางการทดลอง เพื่อทดสอบอิทธิพลของรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊ส และแก๊สออกซิเจนที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งแคโทด	77
ข1 ผลการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะ ของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแอโนด โดยโปรแกรม FLUENT 4.5	88
ข2 ผลการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะ ของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทด โดยโปรแกรม FLUENT 4.5	89
ข3 ผลการคำนวณศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ และ ความหนาแน่นพลังงาน สำหรับคำนวณ ประสิทธิภาพในการแปรรูป	91
ข4 ผลการทดลอง อิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะ ของเซลล์ฝั่งขั้วแอโนด.....	92
ข5 ผลการทดลอง อิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะ ของเซลล์ฝั่ง ขั้วแคโทด.....	95

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ข6 ผลการทดลอง อิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊ส และ ออกซิเจนบริสุทธิ์ ที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฟุ้งข้าวแคโทด.....	96
ค1 การคำนวณ physical exergy ของสารป้อนเข้า.....	99
ค2 การคำนวณ physical exergy ของสารผลิตภัณฑ์.....	100
ค3 การคำนวณ chemical exergy ของสารป้อนเข้า.....	100
ค4 การคำนวณ chemical exergy ของสารผลิตภัณฑ์.....	100
ค5 การคำนวณประสิทธิภาพการแปรรูปพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	100
ง1 สมบัติเชิงกายภาพของแผ่นสะสมกระแสจากบริษัท Schunk United Carbon Co., Ltd.....	101



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว	4
2.2 โครงสร้างของเอทีดีและเตตระฟลูออโรเอทีดี	5
2.3 โครงสร้างของซัลโฟเนตฟลูออโรเอทีดี	6
2.4 โครงสร้างของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีการดูดซับน้ำเอาไว้	6
2.5 (a) ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional (b) ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated (c) ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ serpentine	7
2.6 อิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อกลไกการถ่ายโอนมวลสาร ภายในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุน (a) ช่องทางการไหลแบบ conventional design (b) ช่องทางการไหลแบบ interdigitated design	8
2.7 โพรไฟล์ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเป็นเชื้อเพลิง	9
2.8 กลไกควบคุมการเคลื่อนที่ของน้ำในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน	12
2.9 ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่บริเวณขั้วไฟฟ้า	15
2.10 การไหลของน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากปัจจัยต่างๆ	16
2.11 แผนภาพพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน	19
3.1 ขอบเขตของแบบจำลองสำหรับงานวิจัยนี้	25
3.2 ขอบเขตของแบบจำลองของ He และคณะ และงานวิจัยของ ลูตีกร	30
3.3 ขอบเขตของแบบจำลองในกรณีศึกษาพื้นฐาน	31
3.4 แผนผังการจำลองปรากฏการณ์เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ที่ฝั่งขั้ว แคโทด และฝั่งขั้วแอโนด	35
3.5 แผนผังของหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง	38
3.6 หน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด (Membrane Electrode Assemblies, MEAs)	39
3.7 แผ่นสะสมกระแสที่มีช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional design ผลิตโดยบริษัท ElectroChem, Inc. จากประเทศสหรัฐอเมริกา	40
3.8 แผ่นสะสมกระแสที่มีช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ออกแบบโดยผู้ทำการวิจัย และผลิตโดยบริษัท Schunk United Carbon Co., Ltd. ประเทศไทย	40
3.9 เครื่อง Potentiostat/Galvanostat	41
4.1 เปรียบเทียบผลการจำลองกับงานวิจัยของ He, W. และคณะ และงานวิจัยของ ลูตีกร ...	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.2 การกระจายค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่บริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา	46
4.3 เปรียบเทียบการกระจายค่าความหนาแน่นกระแส (A/cm^2) ที่ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวฝั่ง ขั้วแคโทดมีค่า 0.5 โวลต์ จากกึ่งกลางช่องทางการไหลของแก๊สขาเข้าถึง กึ่งกลางช่องทางการไหลของแก๊สขาออกของแบบจำลอง กับงานวิจัยของ He และคณะ	47
4.4 ตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional design	48
4.5 อิทธิพลของตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional design ต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแอโนด	49
4.6 ตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design	49
4.7 อิทธิพลของตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแอโนด	50
4.8 อิทธิพลของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design และ conventional design ต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแอโนด	50
4.9 ตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional design	51
4.10 อิทธิพลของตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional design ต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด	52
4.11 ตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design	53
4.12 อิทธิพลของตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด	54
4.13 อิทธิพลของตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีต่อการกระจายค่าความหนาแน่นกระแส จากกึ่งกลางช่องทางการไหลของแก๊สขาเข้า ถึงกึ่งกลางช่องทางการไหลของแก๊สขาออก ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจาก ปฏิกิริยาฝั่งขั้วแคโทดมีค่าเท่ากับ 0.7 โวลต์	54
4.14 อิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด	56
4.15 อิทธิพลของขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สต่อสมรรถนะ ของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด	58
4.16 อิทธิพลของขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อการกระจาย ค่าความหนาแน่นกระแส จากกึ่งกลางช่องทางการไหลของแก๊สขาเข้าถึง	

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
กึ่งกลางช่องทางการไหลของแก๊สขาออก ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจาก ปฏิกิริยาฝั่งขั้วแคโทดมีค่าเท่ากับ 0.7 โวลต์	59
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส ที่มีต่อความดันของแก๊สขาเข้า.....	59
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยกับขนาดของสันกั้นระหว่าง ช่องทางการไหลของแก๊ส เมื่อศักย์ไฟฟ้าเกินตัวฝั่งขั้วแคโทดมีค่าเท่ากับ 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 โวลต์	61
4.19 อิทธิพลของความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อ สมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด เมื่อใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ในอัตรา 2.5 A/cm^2 เทียบเท่าเป็นสารป้อนเข้าฝั่งแคโทด	62
4.20 อิทธิพลของความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อ สมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด เมื่อใช้แก๊สผสมระหว่างออกซิเจนและไนโตรเจน ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:11.5 ด้วยอัตรา 2.5 A/cm^2 เทียบเท่า เป็นสารป้อนเข้าฝั่งแคโทด	63
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสกับ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ และค่าความหนาแน่นพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊ส ฝั่งแอโนดแบบ conventional design และใช้ช่องทางการไหลฝั่งแคโทดแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 1 มิลลิเมตร	65
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสกับ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ และค่าความหนาแน่นพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊ส ฝั่งแอโนดแบบ conventional design และใช้ช่องทางการไหลฝั่งแคโทดแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 2 มิลลิเมตร	66
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสกับ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ และค่าความหนาแน่นพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊ส ฝั่งแอโนดแบบ conventional design และใช้ช่องทางการไหลฝั่งแคโทดแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 20.5 มิลลิเมตร	66
4.24 ขอบเขตและภาวะในการทำสมดุล exergy ของเซลล์เชื้อเพลิง แบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนแบบเซลล์เดี่ยวขนาด 5 ตารางเซนติเมตร	67

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.25 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สฝั่งขั้วแคโทดแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกว้าง 1 มิลลิเมตร โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนอิ่มตัวด้วยความชื้นที่ 60 °C ที่อัตราการป้อนเข้า 2.5 A/cm ² เทียบเท่า และอากาศอิ่มตัวด้วยความชื้นที่ 60 °C ที่อัตราการป้อนเข้า 2.5 A/cm ² เทียบเท่า อุณหภูมิเซลล์คงที่ที่ 60 °C	72
4.26 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สฝั่งขั้วแคโทดแบบ interdigitated design ที่มี สันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 2 มิลลิเมตร โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนอิ่มตัวด้วยความชื้นที่ 60 °C ที่อัตราการป้อนเข้า 2.5 A/cm ² เทียบเท่า และอากาศอิ่มตัวด้วยความชื้นที่ 60 °C ที่อัตราการป้อนเข้า 2.5 A/cm ² เทียบเท่า อุณหภูมิเซลล์คงที่ที่ 60 °C	73
4.27 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สฝั่งขั้วแคโทดแบบ interdigitated design ที่มี สันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 20.5 มิลลิเมตร โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนอิ่มตัวด้วยความชื้นที่ 60 °C ที่อัตราการป้อนเข้า 2.5 A/cm ² เทียบเท่า และอากาศอิ่มตัวด้วยความชื้นที่ 60 °C ที่อัตราการป้อนเข้า 2.5 A/cm ² เทียบเท่า อุณหภูมิเซลล์คงที่ที่ 60 °C	73
4.28 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สฝั่งขั้วแอโนดแบบ conventional deign โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนอิ่มตัวด้วยความชื้นที่ 60 °C ที่อัตราการป้อนเข้า 2.5 A/cm ² เทียบเท่า และอากาศอิ่มตัวด้วยความชื้นที่ 60 °C ที่อัตราการป้อนเข้า 2.5 A/cm ² เทียบเท่า อุณหภูมิเซลล์คงที่ที่ 60 °C	75
4.29 ผลการทำนายการกระจายค่าความหนาแน่นกระแสโดยโปรแกรม FLUENT 4.5 จากกึ่งกลางช่องทางการไหลของแก๊สขาเข้าถึง กึ่งกลางช่องทางการไหลของแก๊สขาออก ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากปฏิกิริยาฝั่งขั้วแคโทดมีค่าเท่ากับ 0.5 โวลต์.....	76
4.30 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สฝั่งขั้วแอโนดแบบ conventional design โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนอิ่มตัวด้วยความชื้นที่ 60 °C ที่อัตราการป้อนเข้า 2.5 A/cm ² เทียบเท่า และออกซิเจนอิ่มตัวด้วยความชื้นที่ 60 °C ที่อัตราการป้อนเข้า 2.5 A/cm ² เทียบเท่า อุณหภูมิเซลล์คงที่ที่ 60 °C	78

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ก1 การกำหนดขอบเขตของแบบจำลองในโปรแกรม Fluent	85
ก2 การกำหนดช่วง ขนาด และจำนวนเซลล์ของแบบจำลอง	86
ก3 การกำหนดชนิดของเซลล์ในแบบจำลอง	87
ก4 การกำหนดสมการที่ใช้ในแบบจำลอง	87



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (proton exchange membrane fuel cells, PEMFC) คืออุปกรณ์แปรรูปพลังงานจากพลังงานเคมี (chemical energy) ของเชื้อเพลิงไฮโดรเจน และตัวออกซิไดส์ (oxidant) เช่นแก๊สออกซิเจน ให้อยู่ในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้า (electrical energy) โดยตรงด้วยกลไกปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (electrochemical reaction) ดังนั้นกระบวนการแปรรูปพลังงานด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจึงมีประสิทธิภาพสูงและไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจึงได้รับความสนใจในการศึกษาวิจัยเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ใช้แทนแบตเตอรี่สำหรับอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าแบบพกพา และเป็นอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าตามบ้านเรือน

โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังต่อไปนี้คือขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้วคือขั้วแอโนด (anode) และขั้วแคโทด (cathode) ที่มีความพรุนและมีตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เกาะอยู่กับแผ่นเยื่อพอลิเมอร์ของแข็งซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์โดยทำหน้าที่เป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนโปรตอนที่รวมเรียกว่าหน่วยแผ่นเยื่อและอิเล็กโทรด (membrane electrode assemblies, MEAs) และแผ่นสะสมกระแสแบบสองขั้ว (bipolar current collector plate) [1] ส่วนเชื้อเพลิงที่ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนคือ แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่มีความชื้น (humidified gas) แก๊สไฮโดรเจนได้ถูกป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงทางด้านขั้วแอโนดและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) ได้ผลิตภัณฑ์คือไฮโดรเจนไอออน (hydrogen ion, H^+) และอิเล็กตรอน (electron, e^-) ไฮโดรเจนไอออนจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนมายังขั้วแอโนดแล้วเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด และอิเล็กตรอนจะถูกนำไปใช้กับอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ที่ขั้วแคโทด แก๊สออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) กับไฮโดรเจนไอออนและอิเล็กตรอนได้ผลิตภัณฑ์คือ น้ำ [1]

ค่าความหนาแน่นกระแสจำกัด (limiting current density) ของเซลล์เชื้อเพลิงเกิดจากการถ่ายโอนแก๊สออกซิเจนผ่านชั้นขั้วอิเล็กโทรดที่มีรูพรุนมายังขั้วแอโนด ทั้งนี้เนื่องจากแก๊สออกซิเจนมีสภาพการแพร่ (diffusivity) ที่ต่ำกว่าแก๊สไฮโดรเจนประมาณสี่เท่า [2] และปรากฏการณ์น้ำท่วม (flooding) ที่ขั้วแอโนดที่ขั้วแคโทด การเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสจำกัดและสมรรถนะของเซลล์สามารถทำได้หลายวิธีเช่น การป้อนแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์แทนอากาศ การกำหนดสภาวะการทำงานของเซลล์โดยให้ขั้วแคโทดมีความดันมากกว่าขั้วแอโนดเพื่อแก้ไขปัญหาน้ำท่วม การเลือกใช้แผ่นสะสมกระแสที่มีรูปแบบของช่องทางไหลของแก๊สที่เหมาะสม

เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สมีอิทธิพลโดยตรงต่อกลไกการถ่ายโอนมวลสารภายในห้องวุ้นเชื้อเพลิงที่มีรูพรุนซึ่งมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นเป้าหมายของงานวิจัยนี้คือการศึกษาค่าอิทธิพลของรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงและพัฒนาปรับปรุงสมรรถนะของเซลล์

โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็นสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลสารและการเกิดปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อใช้แผ่นสะสมกระแสที่มีช่องทางการไหลของแก๊สแบบต่างๆ โดยใช้โปรแกรม FLUENT 4.5 ซึ่งเป็นโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงการคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อการถ่ายโอนมวลสารภายในเซลล์เชื้อเพลิง และสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง รูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สที่เหมาะสมจากแบบจำลองจะถูกนำมาทดสอบโดยการทำการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้อง

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อการถ่ายโอนมวลสารภายในเซลล์เชื้อเพลิง โดยใช้โปรแกรม FLUENT 4
2. ทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้รูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่เหมาะสมซึ่งได้จากการศึกษาที่ทำการจำลองสถานการณ์โดยโปรแกรม FLUENT 4

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน
2. สร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม FLUENT 4 เพื่อศึกษาถึงผลของรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลสารภายในห้องวุ้นเชื้อเพลิง
3. สร้างแผ่นสะสมกระแสที่มีรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม FLUENT 4.5 และทดสอบสมรรถนะของเซลล์ที่มีรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สที่ได้จากแบบจำลอง
4. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
5. เขียนรายงานวิจัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจผลกระทบของช่องทางการไหลของแก๊สต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน และทราบถึงรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่เหมาะสม
2. สามารถปรับปรุงและพัฒนาในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

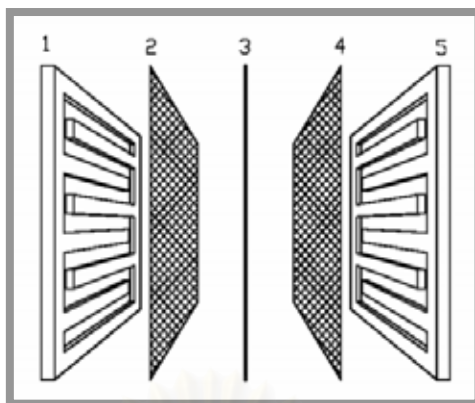
เซลล์เชื้อเพลิงคืออุปกรณ์แปลงพลังงานชนิดหนึ่ง ซึ่งทำหน้าที่แปลงพลังงานเคมีของสารตั้งต้นให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าผ่านกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีซึ่งเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานสูงเมื่อเทียบกับกระบวนการแปลงพลังงานที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน และยังไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ดังนั้นในช่วงเวลาที่ผ่านมาสองศตวรรษที่ผ่านมาเซลล์เชื้อเพลิงจึงได้รับความสนใจในการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาสมรรถนะและลดต้นทุนในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเพื่อให้เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้จริง

2.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน [1]

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (proton exchange membrane fuel cells, PEMFCs) คืออุปกรณ์แปลงพลังงานผ่านการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (electrochemical reaction) ซึ่งเป็นกระบวนการถ่ายโอนประจุที่บริเวณรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้า อิเล็กโทรไลต์ และสารตั้งต้นซึ่งอยู่ในวัฏภาคแก๊ส เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนมีภาวะการทำงานที่อุณหภูมิต่ำคือ 60-100 องศาเซลเซียส ทำให้มีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้เป็นแหล่งให้พลังงานของอุปกรณ์แบบพกพาแทนการใช้พลังงานจากถ่านไฟฉายซึ่งเป็นต้นเหตุของขยะมีพิษที่ยากต่อการจัดเก็บและทำลาย

โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังรูปที่ 2.1 คือ ขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้วคือขั้วแอโนด (anode) และขั้วแคโทด (cathode) ที่มีความพรุนและมีตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เกาะอยู่กับแผ่นเยื่อพอลิเมอร์ของแข็งซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์โดยทำหน้าที่เป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนโปรตอนที่รวมเรียกว่าหน่วยเยื่อและอิเล็กโทรด (membrane electrode assemblies, MEAs) และแผ่นสะสมกระแส (current collector plate) ส่วนเชื้อเพลิงที่ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนคือ แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่มีความชื้น (humidified gas)

แผ่นสะสมกระแสแบบสองขั้วสร้างขึ้นจากของผสมระหว่างแกรไฟต์และโลหะได้แก่ไทเทเนียม (titanium) เซอร์โคเนียม (zirconium) และนิโอเบียม (niobium) ที่ผิวหน้าของแผ่นสะสมกระแสนี้ได้ถูกเจาะเป็นร่องสำหรับใช้เป็นช่องทางไหลของแก๊ส ดังนั้นหน้าที่ของแผ่นสะสมกระแสสำหรับเซลล์เดี่ยวคือทำหน้าที่กระจายสารตั้งต้นเข้าสู่ชั้นที่มีรูพรุน และเป็นส่วนหนึ่งของระบบการจัดการน้ำภายในเซลล์ และเป็นทางผ่านเข้าออกของกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว โดย หมายเลข 1 และ 5 คือแผ่นสะสมกระแส หมายเลข 2 และ 4 คือขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา หมายเลข 3 คือเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน [3]

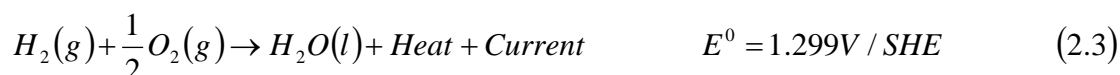
การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเริ่มจากการป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีความชื้นเข้าทางแผ่นสะสมกระแสฝั่งขั้วแอโนดและป้อนแก๊สออกซิเจนที่มีความชื้นเข้าทางแผ่นสะสมกระแสฝั่งขั้วแคโทด ที่ขั้วแอโนดแก๊สไฮโดรเจนจะไหลไปตามช่องทางการไหลของแก๊สและในขณะเดียวกันก็จะมีแก๊สบางส่วนเคลื่อนที่เข้าไปยังชั้นที่มีรูพรุน ซึ่งกลไกการถ่ายโอนมวลสารและการกระจายตัวของแก๊สภายในชั้นที่มีรูพรุนนี้ได้รับอิทธิพลจากรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊ส ความดันและอัตราการไหลของแก๊สรวมถึงสมบัติทางกายภาพของชั้นที่มีรูพรุน ซึ่งเป้าหมายสูงสุดสำหรับกระบวนการนี้คือ การกระจายแก๊สไปยังชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างทั่วถึงด้วยอัตราการถ่ายโอนมวลสารที่สูง เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์จากตัวเร่งปฏิกิริยาและแก๊สไฮโดรเจนให้เกิดประโยชน์สูงสุด เมื่อแก๊สไฮโดรเจนเดินทางมาถึงผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาก็คงเกิดปฏิกิริยาดังสมการต่อไปนี้



ไฮโดรเจนไอออนจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนไปยังขั้วแคโทด ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านออกไปทางชั้นที่มีรูพรุนและแผ่นสะสมกระแส ส่วนแก๊สออกซิเจนจะถูกป้อนทางด้านขั้วแคโทด ออกซิเจนจะรวมกับอิเล็กตรอนที่ได้จากขั้วแอโนดและไฮโดรเจนไอออนที่แพร่ผ่านอิเล็กโทรไลต์สู่ขั้วแคโทด ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือน้ำ ดังสมการแสดงปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นดังนี้



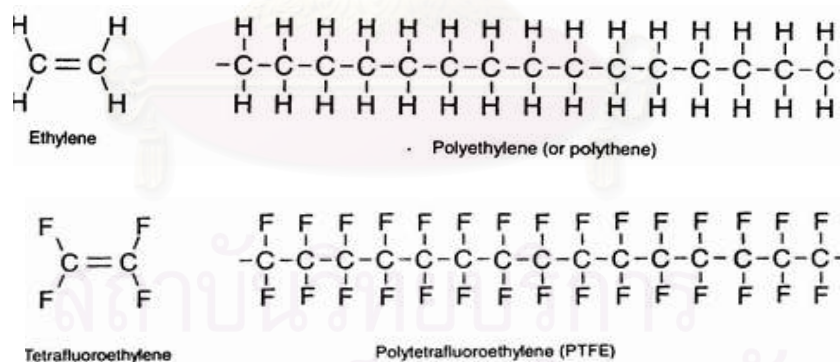
ปฏิกิริยารวมของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน คือ



โดยเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์จะให้ศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎี $E^0 = 1.299$ โวลต์ ที่สภาวะมาตรฐาน (1 บรรยากาศ, 25 องศาเซลเซียส) และน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยามีสถานะเป็นของเหลวเพราะเซลล์เชื้อเพลิงนี้ทำงานภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 100°C และน้ำที่เกิดขึ้นมานี้จะไปปกคลุมช่องว่างภายในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดปัญหาน้ำท่วม (flooding problem) และยังเป็นการทำให้เซลล์สูญเสียพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยายังผลให้เซลล์มีความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าลดลง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการนำผลิตภัณฑ์น้ำจากปฏิกิริยาฝั่งขั้วแคโทดออกจากเซลล์ การใช้แผ่นสะสมกระแสที่มีรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่เหมาะสมร่วมกับการควบคุมตัวแปรที่เกี่ยวกับกระแสแก๊สออกซิเจนเช่น อัตราการไหล ความดัน ระดับความชื้นของแก๊สออกซิเจนเข้าเป็นวิธีการที่สามารถนำมาใช้แก้ไขปัญหานี้ได้เป็นอย่างดี

2.2 เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน [1]

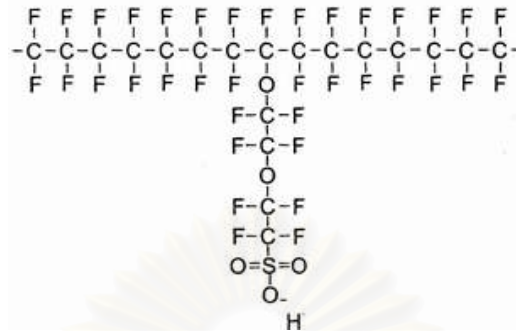
การเตรียมพอลิเมอร์เพื่อใช้สำหรับผลิตเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนนั้น ทำได้โดยการให้อะตอมของฟลูออรีนเข้าแทนที่ตำแหน่งอะตอมไฮโดรเจนบนโมเลกุลของสารเอทิลีน กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการเปอร์ฟลูออรีเนชัน (perfluorination) โครงสร้างที่ได้จะเรียกว่าเตตระฟลูออโรเอทิลีน (tetrafluoroethylene) เมื่อนำโมเลกุลของสารเตตระฟลูออโรเอทิลีนมาเรียงต่อกันทำให้ได้สายโซ่พอลิเมอร์ที่เรียกกันว่าพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (poly tetrafluoroethylene, PTFE) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ความแข็งแรงของพันธะระหว่างฟลูออรีนกับคาร์บอนทำให้พอลิเมอร์มีความทนทานสูง



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเอทิลีนและเตตระฟลูออโรเอทิลีน [1]

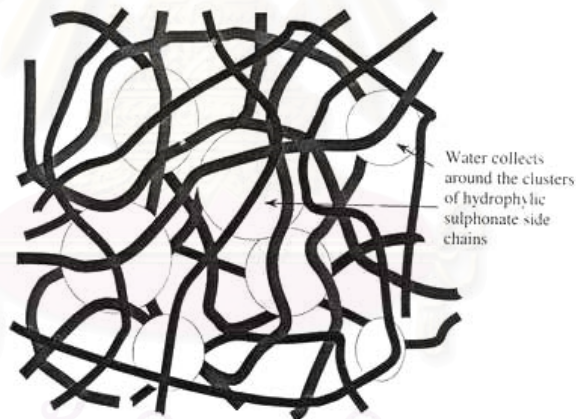
นอกจากนี้การเตรียมเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนยังสามารถเตรียมได้จากการเติมส่วนของซัลโฟเนต (sulfonate, SO_3) ที่ได้มาจากกรดซัลโฟนิก (sulfonic acid) ดังรูปที่ 2.3 กระบวนการนี้เป็นกระบวนการทางเคมีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเช่น กระบวนการผลิตผงซักฟอก หรือสารฟอกย้อมต่างๆ โดยโมเลกุลของกรดซัลโฟนิกจะเข้าไปสร้างพันธะกับส่วนปลายของสายโซ่พอลิเมอร์กลาย

เป็นหมู่ซัลโฟเนต ทำให้ส่วนปลายของโมเลกุลพอลิเมอร์มีสมบัติเป็นส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) พอลิเมอร์ที่ได้จึงมีความสามารถในการดูดซึมโมเลกุลของน้ำเอาไว้ได้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของซัลโฟเนตฟลูออโรเอทิลีน [1]

ในส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic regions) จะทำหน้าที่ดูดซึมน้ำไว้ในอิเล็กทรอนิกส์โครงสร้างที่ 2.4 การที่โครงสร้างส่วนนี้มีการดูดซึมน้ำไว้จะทำให้ความแรงของพันธะระหว่างหมู่ซัลโฟเนต (SO_3^-) กับโปรตอน (H^+) อ่อนลง ทำให้โปรตอนสามารถเคลื่อนที่ไปมาภายในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนได้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีการดูดซึมน้ำเอาไว้ [1]

เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์ที่ดีควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

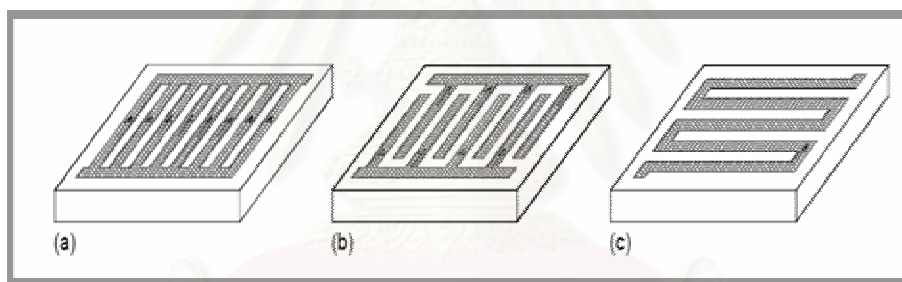
1. มีค่าการนำไอออนที่สูงแต่มีค่าการนำอิเล็กตรอนที่ต่ำ
2. มีค่าการแพร่ของแก๊สต่ำ
3. มีขนาดที่แน่นอน (ไม่มีการบวมตัว)
4. มีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูง
5. มีค่าการแพร่ของน้ำต่ำ

6. มีค่าความต้านทานต่อการสูญเสียน้ำหรือมีความต้านทานต่อการเกิดดีไฮเดรชัน (dehydration)
7. มีค่าความต้านทานต่อการเกิดรีดักชัน ออกซิเดชัน และไฮโดรไลซิส (hydrolysis)
8. มีพื้นผิวของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่เชื่อมตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกาะบนพื้นผิวได้ดีและมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneity)

2.3 รูปแบบของช่องทางไหลของแก๊ส [3]

จากการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนพบว่ารูปแบบของช่องทางไหลเป็นตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากช่องทางไหลของแก๊สทั้งสามแบบนี้จะส่งผลกระทบต่อกลไกการถ่ายโอนมวลสารภายในขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแตกต่างกันออกไป [2]

รูปแบบของช่องทางไหลของแก๊สที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันแบ่งออกเป็นสามรูปแบบใหญ่ๆคือ conventional design, interdigitated design และ serpentine design ดังรูปที่ 2.5

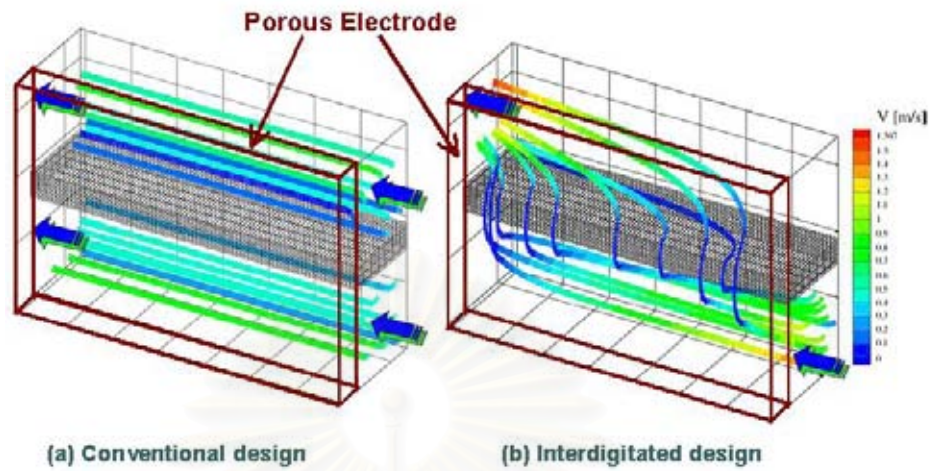


รูปที่ 2.5 (a) ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional design (b) ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design (c) ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ serpentine design

conventional flow field design และ serpentine flow field design เป็นช่องทางไหลของแก๊สที่มีลักษณะเป็นท่อปลายเปิด การถ่ายโอนมวลสารภายในชั้นที่มีรูพรุนเกิดจากกลไกการแพร่ของแก๊สดังรูปที่ 2.6 ทำให้อัตราการถ่ายโอนแก๊สไปยังชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนมวลสารนี้เป็นไปได้อย่างล่าช้า และกลไกการนำน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาฝั่งแคโทดออกจากเซลล์เกิดจากอิทธิพลของแรงดันแคปิลลารี (capillary force) เท่านั้น [5]

interdigitated flow field design เป็นช่องทางไหลของแก๊สที่มีลักษณะเป็นท่อปลายปิดดังนั้นกลไกการถ่ายโอนมวลสารภายในชั้นที่มีรูพรุนจึงถูกควบคุมด้วยกลไกการพา (convection) ดังรูปที่ 2.6 ส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนแก๊สไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นไปได้อย่างรวดเร็วและทั่วถึง

กว่า นอกจากนี้การนำน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาฝั่งขั้วแคโทดออกจากเซลล์ถูกควบคุมโดยกลไก การพาแบบบังคับ

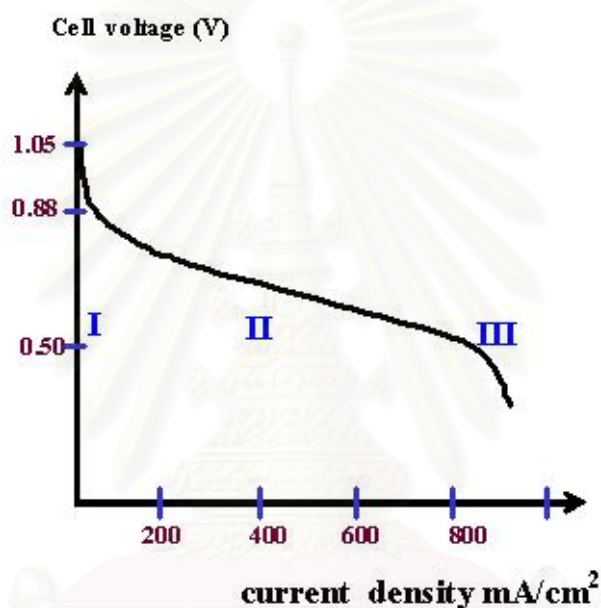


รูปที่ 2.6 อิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สต่อกลไกการถ่ายโอนมวลสารภายในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุน (a) ช่องทางการไหลแบบ conventional design (b) ช่องทางการไหลแบบ interdigitated design

2.4 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน [1]

สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถศึกษาได้จากกราฟโพลาริเซชัน (Polarization curve) ดังรูปที่ 2.7 พบว่าเมื่อเซลล์มีการสร้างกระแสไฟฟ้าค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ (cell potential) จะมีความลดลงจากค่าแรงดันไฟฟ้าขณะที่ยังไม่ได้มีการผลิตกระแสไฟฟ้า (open-circuit cell potential, E_{oc}) ซึ่งการลดลงของค่าแรงดันไฟฟ้านี้เกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานจริงของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นเป็นกระบวนการไม่ผันกลับ และค่าแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงนี้เรียกว่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัว (overpotential) หรือโพลาริเซชัน (polarization) และจากรูปที่ 2.7 พบว่ามีการแบ่งกราฟโพลาริเซชันออกเป็นสามช่วง ช่วงที่หนึ่งเป็นช่วงที่เซลล์สูญเสียแรงดันไฟฟ้าส่วนใหญ่ไปกับการผลักดันให้มีการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ดังนั้นในช่วงที่หนึ่งจึงถูกเรียกว่าช่วงศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี (activation overpotential region) ช่วงที่สองเกิดขึ้นเมื่อเซลล์มีการผลิตกระแสไฟฟ้าในปริมาณค่าความหนาแน่นกระแสที่มากขึ้น ซึ่งในช่วงนี้ภายในเซลล์จะเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในชั้นขั้วอิเล็กโทรดที่มีรูพรุนและภายในแผ่นสะสมกระแส และการเคลื่อนที่ของโปรตอนภายในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นจำนวนมาก ดังนั้นในช่วงนี้ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ส่วนใหญ่จะสูญเสียไปเนื่องจากความต้านทานการเคลื่อนที่ของประจุภายในเซลล์ ดังนั้นช่วงที่สองจึงถูกเรียกว่าช่วงศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic overpotential region) และช่วงที่สามจะเกิดขึ้นเมื่อเซลล์มีการสร้างกระแสที่ค่าความหนาแน่นกระแสที่สูงมากๆ ในช่วงนี้ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

ภายในเซลล์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและสิ่งที่ตามมาคือที่ฝั่งขั้วแคโทดของเซลล์จะมีน้ำในสถานะของเหลวที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเป็นจำนวนมาก และหากระบบการกำจัดภายในเซลล์ไม่ดีพอก็จะทำให้น้ำที่เกิดขึ้นไปบดบังบริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้พื้นผิวการเกิดปฏิกิริยาของเซลล์ลดลง และนอกจากนี้ในช่วงที่สามนี้ปริมาณค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีค่าต่ำมาก ๆ ดังนั้นกระบวนการสร้างกระแสไฟฟ้าในช่วงที่สามนี้จะถูกควบคุมด้วยอัตราการแพร่ของแก๊สด้วยเหตุนี้จึงมีการเรียกช่วงที่สามนี้ว่าช่วงศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากการถ่ายโอนมวล และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงที่สุดที่เซลล์จะสามารถสร้างได้มีชื่อเรียกว่า ค่าความหนาแน่นกระแสจำกัด (limiting current density)



รูปที่ 2.7 โพรไฟล์แรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเป็นเชื้อเพลิง

ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เมื่อเซลล์มีการสร้างกระแสที่ค่าความหนาแน่นกระแสใดๆสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้ [1]

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{op}}(T,P) - \eta_{\text{act}} - \eta_{\text{ohm}} - \eta_{\text{conc}} \quad (2.4)$$

เมื่อ E_{cell} = แรงดันไฟฟ้าของเซลล์ที่ค่าความหนาแน่นกระแสใดๆ
 $E_{\text{op}}(T,P)$ = แรงดันไฟฟ้าสมดุลของเซลล์ที่สภาวะการทำงานของเซลล์
 η_{act} = ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี (activation overpotential)

η_{ohm} = ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic overpotential)

η_{conc} = ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากการถ่ายโอนมวล

2.4.1 แรงดันไฟฟ้าสมดุล [6]

แรงดันไฟฟ้าสมดุลคือค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เมื่อเซลล์ยังไม่มีกระแสไฟฟ้าหรือสามารถกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าเซลล์อยู่ในสถานะสมดุล (equilibrium state) แรงดันไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะสมดุลนี้สามารถอธิบายได้ในเชิงเทอร์โมไดนามิก (Thermodynamic) กล่าวคือ เมื่อเซลล์ไฟฟ้าอยู่ในสภาวะสมดุลที่สภาวะมาตรฐานคือที่อุณหภูมิ 25°C ความดัน 1 atm และสารตั้งต้นทุกตัวมีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 1 mol/L หรือเทียบเท่า แล้วความสามารถในการทำงาน (available work) อันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีซึ่งอธิบายในรูปของความแตกต่างของค่าพลังงานเสรีของกิบส์ระหว่างผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นงานทางไฟฟ้าทั้งหมดดังสมการที่ 5 และงานทางไฟฟ้านี้ก็คือแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะสมดุลนั่นเอง

$$\Delta G^0 = \sum_i G_{f,pi}^0 - \sum_j G_{f,rj}^0 = -nFE_{op}^0 \quad (2.5)$$

เมื่อ $\sum_i G_{f,pi}^0$ = ผลรวมของพลังงานเสรีของกิบส์ (standard Gibbs free energy of formation) ของสารผลิตภัณฑ์ (J/mole)

$\sum_j G_{f,rj}^0$ = ผลรวมของพลังงานเสรีของกิบส์ (standard Gibbs free energy of formation ของสารตั้งต้น) (J/mole)

n = จำนวนโมลของอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยา (equivalent/mole)

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Faraday's constant) = 96,500 C/equivalent

E_{op}^0 = แรงดันไฟฟ้าสมดุลที่สภาวะมาตรฐาน (25 °C, 1 atm) (V)

สำหรับในกรณีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนซึ่งมีปฏิกิริยารวมดังสมการที่ 2.3 ดังนั้นสมการคำนวณค่า E_{op} ที่สภาวะมาตรฐานคือ

$$\Delta G^0 = G_{f,H_2O}^0 - G_{f,H_2}^0 - \frac{1}{2}G_{f,O_2}^0 = -2FE_{op}^0 \quad (2.6)$$

แต่เนื่องจากในความเป็นจริงสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะอยู่นอกเหนือจากสภาวะมาตรฐานดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการคำนวณค่า open-circuit cell potential ที่สภาวะการทำงานของเซลล์โดยอาศัยสมการของเนิร์นสต์ (Nernst's equation) [1] ดังมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$E_{op}(T, P) = E_{op}^0 + \frac{\Delta S}{nF}(T - T^0) + \frac{RT}{nF} \left[\ln p_{H_2} + \frac{1}{2} \ln p_{O_2} \right] \quad (2.7)$$

เมื่อ ΔS = การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของปฏิกิริยา (J/mol-K)

R = ค่าคงที่ของแก๊ส = 8.314 J/mol*K

P_{H_2}, P_{O_2} = ความดันย่อยของแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน ตามลำดับ (atm)

2.4.2 ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี (Activation Overpotential) [4]

คือค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ที่สูญเสียไปในการผลักดันให้มีการถ่ายโอนประจุระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อให้เกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) และปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) โดยสมการที่ใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสที่เซลล์สร้างขึ้นกับค่าความดันไฟฟ้าที่สูญเสียไปเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีคือสมการของ Butler-Volmer

$$i_c = i_0^{ref} \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2}^{ref}} \right) \left[\exp \left(\frac{\alpha_a F}{RT} \eta_{act} \right) - \exp \left(\frac{-\alpha_c F}{RT} \eta_{act} \right) \right] \quad (2.8)$$

$$i_a = i_0^{ref} \left(\frac{C_{H_2}}{C_{H_2}^{ref}} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\exp \left(\frac{\alpha_a F}{RT} \eta_{act} \right) - \exp \left(\frac{-\alpha_c F}{RT} \eta_{act} \right) \right] \quad (2.9)$$

สมการที่ 2.8 คือสมการที่ใช้ในการทำนายค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ณ ตำแหน่งใดๆ (local current density) ที่ขั้วแคโทด สมการที่ 2.9 คือสมการที่ใช้ในการทำนายค่าความหนาแน่นกระแส ณ ตำแหน่งใดๆที่ขั้วแอโนด

เมื่อ i_c = ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ณ จุดใดๆที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด (local current density) (A/cm^2)

i_a = ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ณ จุดใดๆที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด (local current density) (A/cm^2)

η_{act} = activation overpotential (V)

i_0^{ref} = ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสมดุล (exchange current density) ที่สถานะอ้างอิง (reference state) (A/cm^2)

C_i^{ref} = ค่าความเข้มข้นของแก๊ส i ที่บริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่สภาวะอ้างอิง (mol/L)

C_i = ค่าความเข้มข้นของแก๊ส i ที่บริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่สภาวะใดๆ (mol/L)

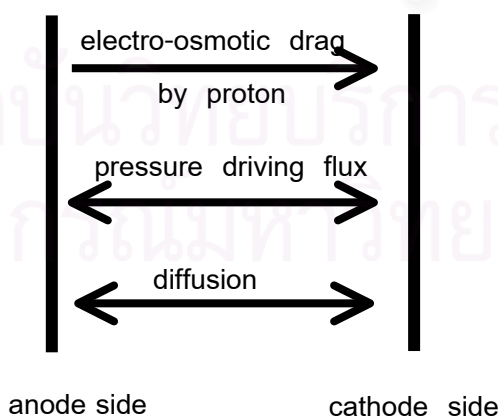
α_a = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนประจุ (transfer coefficient) ที่ฝั่งขั้วแอโนด

α_c = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนประจุ (transfer coefficient) ที่ฝั่งขั้วแคโทด

2.4.3 ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic overpotential) [7]

คือค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ที่สูญเสียไปเนื่องจากความต้านทานในการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าภายในเซลล์ สำหรับในกรณีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าจะเกิดจากความต้านทานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านขั้วอิเล็กโทรดที่มีรูพรุนและแผ่นสะสมกระแส และความต้านทานในการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า ที่เกิดจากความต้านทานในการเคลื่อนที่ของโปรตอนภายในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่อยู่ในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ปฏิกิริยาการถ่ายโอนน้ำภายในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนถูกควบคุมด้วยกลไกหลักสามกลไกคือ การเคลื่อนที่ของน้ำเนื่องจากแรงทางไฟฟ้าระหว่างโปรตอนและประจุไฟฟ้าของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (electro-osmotic drag by proton) การเคลื่อนที่ของน้ำเนื่องจากการขับเคลื่อนจากผลต่างของความดันระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทด (pressure driving flux) และการเคลื่อนที่ของน้ำที่เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของน้ำ (diffusion) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กลไกควบคุมการเคลื่อนที่ของน้ำในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

ในส่วนของการคำนวณการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า จากงานวิจัยของ Springer, et al. [8] ได้เสนอไว้ว่า สามารถคำนวณค่าดังกล่าวได้จากค่าการนำไอออนของชั้นเยื่อแผ่น ($\sigma_m(T)$) ซึ่งขึ้นกับค่าความชื้นของชั้นเยื่อแผ่นและอุณหภูมิของเยื่อแผ่น มีหน่วยเป็น ต่อโห์มต่อเมตร ดังสมการ

$$\sigma_m(T) = \sigma_m^{ref} \exp\left[1,268\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (2.10)$$

เมื่อ σ_m^{ref} คือค่าการนำไอออนของชั้นเยื่อแผ่นที่อุณหภูมิอ้างอิงที่ 303 องศาเซลเซียส และคำนวณจากสมการ

$$\sigma_m^{ref} = 0.005139\lambda - 0.00326 \quad (2.11)$$

เมื่อ $\lambda \geq 1$ ทำให้สามารถคำนวณค่าการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการสมการ

$$\eta_{ohm} = i \frac{L_m}{\sigma_m(T)} \quad (2.12)$$

เมื่อ L_m เป็นค่าความหนาของชั้นเยื่อแผ่น

และ

$$r = \frac{L_m}{\sigma_m(T)} \quad (2.13)$$

และได้มีการนิยามค่าความชื้นภายในเยื่อแผ่น (λ) โดยกำหนดเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณอัตราส่วนของโมเลกุลของน้ำต่อหมู่ฟังก์ชันกรดซัลโฟนิก (SO_3^-) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญภายในโครงสร้างโมเลกุลของชั้นเยื่อแผ่นซึ่งทำให้เยื่อแผ่นมีสมบัติเป็นเยื่อเลือกผ่านโปรตอน

การคำนวณค่าของความชื้นภายในเยื่อแผ่น จะขึ้นกับความชื้นของแก๊สในตำแหน่งพื้นผิวระหว่างชั้นของเยื่อแผ่นและชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสมการ

$$\begin{aligned} \lambda &= 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 + 36.0a^3 \quad \text{สำหรับ } 0 < a \leq 1 \\ \lambda &= 14 + 1.4(a - 1) \quad \text{สำหรับ } 1 \leq a \leq 3 \end{aligned} \quad (2.14)$$

เมื่อ a คือค่า activity ของความชื้นของแก๊สในตำแหน่งพื้นผิวระหว่างชั้นของเยื่อแผ่นและชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$a = \frac{y_w P}{P^{sat}} \quad (2.15)$$

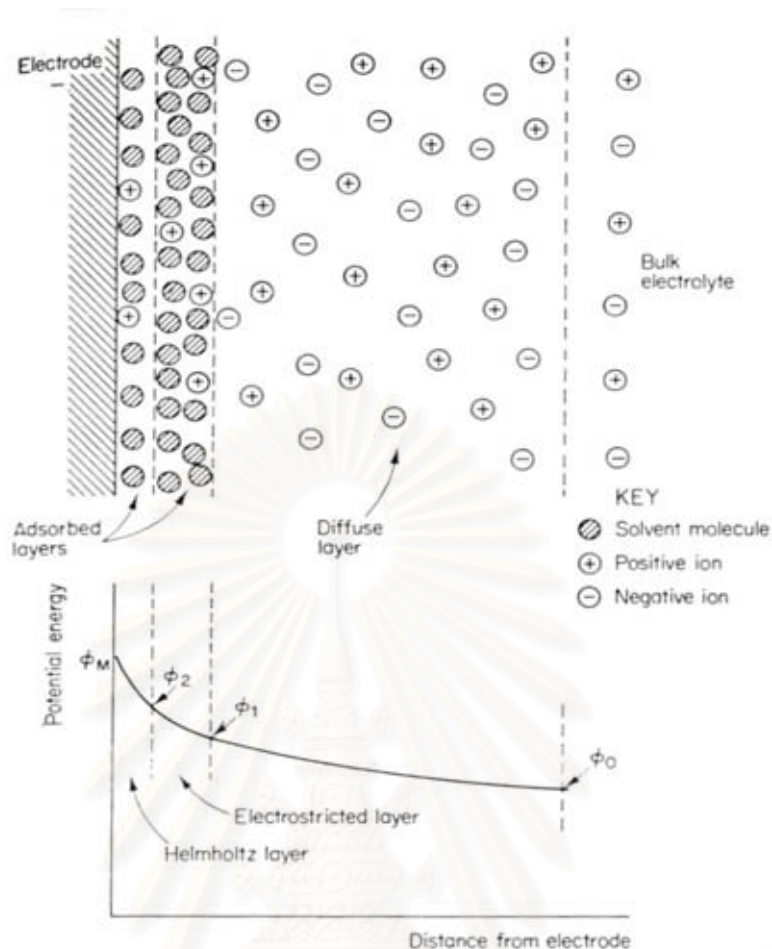
และค่าความดันไออิ่มตัวของน้ำในหน่วย atm (P^{sat}) ที่อุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Log } P^{sat} = -2.0973 + 0.031080T - 1.1288 \times 10^{-4} T^2 + 2.3588 \times 10^{-7} T^3 \quad (2.16)$$

2.4.4 โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration polarization) [6]

การเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น เกิดจากเชื้อเพลิงหรือตัวออกซิไดส์ถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วในการปฏิกิริยาที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้า ทำให้ความเข้มข้นหรือความดันของสารตั้งต้นลดลงเนื่องจากสารไม่สามารถแพร่ผ่านชั้นต่าง ๆ เข้าไปที่ผิวขั้วไฟฟ้าเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เป็นผลทำให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงตามสมการของเนินสต์ ในกรณีที่ใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์มักจะไม่มีปัญหาที่เกิดขึ้น แต่เมื่อใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดส์จะเกิดปัญหานี้ขึ้นเนื่องจากในอากาศมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยกว่า ดังนั้นเมื่อใช้อากาศเป็นสารออกซิไดส์จำเป็นจะต้องมีออกแบบช่องทางเดินแก๊สให้อากาศสามารถสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าได้อย่างเต็มที่ เพื่อให้ออกซิเจนที่อยู่ในอากาศสามารถแพร่เข้าไปยังบริเวณขั้วไฟฟ้าให้มากที่สุด ทางด้านไฮโดรเจนก็มีโอกาสที่ทำให้เกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นได้เช่นกัน เกิดจากในกรณีที่ไฮโดรเจนที่ใช้เป็นไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิง (reforming) ที่ไม่สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนให้กับระบบอย่างต่อเนื่องทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนบริเวณผิวขั้วไฟฟ้าลดลงทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินมากขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

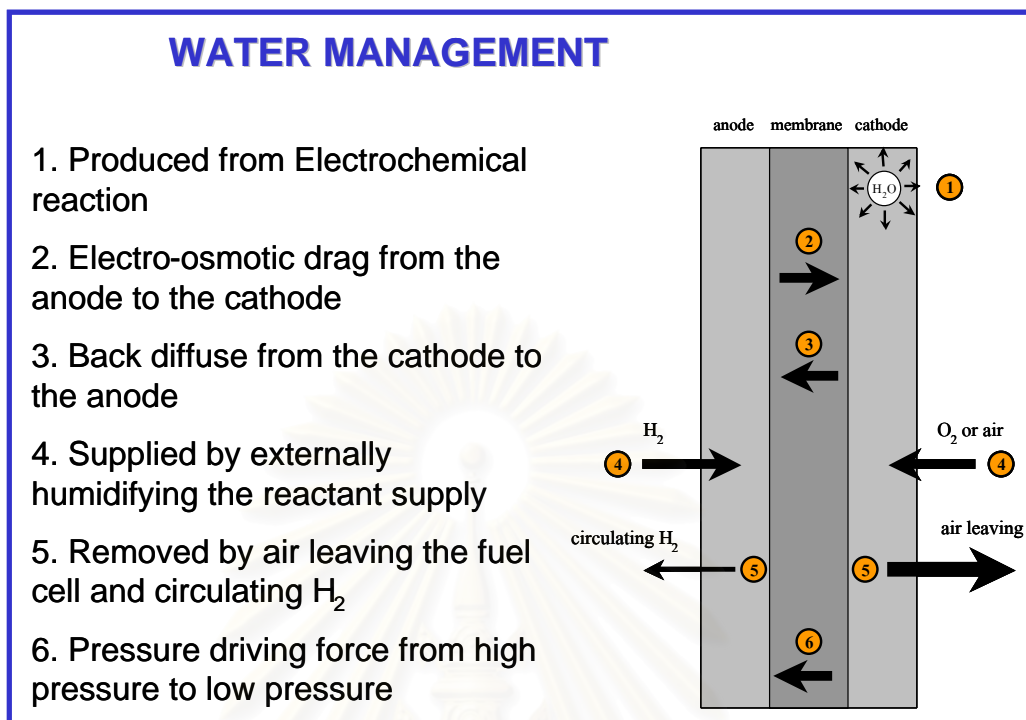


รูปที่ 2.9 ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่บริเวณผิวขั้วไฟฟ้า [6]

2.5 การจัดการน้ำภายในระบบ [1]

น้ำในระบบเซลล์เชื้อเพลิง ถือเป็นตัวแปรสำคัญอย่างยิ่งที่ต้องทำการพิจารณา เพราะถ้าหากในระบบมีปริมาณน้ำมากเกินไป ก็จะทำให้เกิดน้ำส่วนเกินเหลืออยู่ในระบบในรูปแบบของของเหลว ซึ่งจะเข้าไปขัดขวางการเข้าทำปฏิกิริยาของแก๊ส หรือเกิดการท่วมของน้ำ (flooding) ขึ้น ส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าหากในระบบมีปริมาณน้ำน้อยเกินไป ก็จะทำให้เยื่อแผ่นแห้งได้ ส่งผลให้ค่าการนำไอออนของเยื่อแผ่นลดลง ทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงอีกเช่นกัน

เราสามารถจำแนกลักษณะของน้ำที่เกิดและเข้า - ออกระบบได้ 6 ส่วนดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การไหลของน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากปัจจัยต่างๆ [9]

1. น้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ขั้วแคโทด
2. น้ำที่ถูกพาจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด โดยการไหลของโปรตอนในชั้นของเยื่อแผ่น เรียกว่า Electro – osmotic drag
3. ถ้าน้ำที่ขั้วแคโทดมีปริมาณสูง ก็จะทำให้เกิดการแพร่ย้อนกลับ (back diffuse) ไปยังขั้วแอโนดได้เช่นกัน
4. น้ำบางส่วนอาจถูกนำเข้ามาในระบบโดยกระบวนการทำให้ชื้น (Humidification) ของสารตั้งต้นที่ป้อนเข้ามาทำปฏิกิริยา
5. น้ำส่วนเกินภายในระบบ จะถูกกำจัดออกจากระบบด้วยการระเหยของน้ำไปกับสารผลิตภัณฑ์ หรือไปกับสารตั้งต้นที่เหลือจากปฏิกิริยา
6. การไหลของน้ำเนื่องจากผลของความแตกต่างระหว่างความดันทางด้านขั้วแอโนดและแคโทด

2.6 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระบวนการด้วยวิธีทาง Exergy [10]

Exergy คือ การประเมินศักยภาพในการทำงาน หรือ คุณภาพของพลังงานที่อยู่ในรูปแบบต่างๆ เทียบกับภาวะแวดล้อมที่กำหนดขึ้น ซึ่งการคำนวณดุล Exergy รอบกระบวนการใดๆ บ่งบอกถึงความสามารถในการทำงานของระบบจากการใช้สารป้อนเข้าและการสูญเสียไปเนื่องจากการไม่ผันกลับของระบบการทำงาน การศึกษา Exergy ของกระบวนการแปรรูปพลังงานใดๆ จึงเป็นส่วนหนึ่งของการใช้กฎทางอุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ

วิธีทาง Exergy กล่าวถึงคุณภาพของพลังงานซึ่งขึ้นอยู่กับความเป็นระเบียบในการสะสมพลังงานในรูปแบบต่างๆ โดยการจัดกลุ่มพลังงานด้วยวิธีทาง Exergy นี้สามารถแบ่งพลังงานออกเป็นสองกลุ่มคือ order energy และ disorder energy

2.6.1 Order energy

พลังงานที่ถูกจัดไว้ในหมวดหมู่นี้ประกอบด้วย พลังงานศักย์ และพลังงานจลน์ ซึ่งมีลักษณะพิเศษดังต่อไปนี้

1. เป็นพลังงานที่สามารถถูกแปรรูปให้อยู่ในรูปแบบพลังงานอื่นได้อย่างสมบูรณ์โดยผ่านกระบวนการแปรรูปพลังงานแบบผันกลับได้
2. การถ่ายโอนพลังงานในรูปของ order energy ระหว่างระบบสองระบบสามารถทำได้โดยการถ่ายโอนพลังงานในรูปแบบของงานผ่านขอบของระบบเท่านั้น
3. การถ่ายโอนพลังงานในรูปแบบของ order energy เกิดขึ้นโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของระบบ ดังนั้นในการวิเคราะห์ order energy จึงสามารถทำได้โดยอาศัยกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิคเท่านั้น

2.6.2 Disorder energy

ได้แก่พลังงานความร้อน พลังงานเคมี รวมถึงพลังงานที่เกิดจากการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าพลังงานแบบ disorder energy นี้เกิดจากการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานในรูปแบบของ order energy ผ่านกระบวนการผันกลับไม่ได้ ดังนั้นจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างไม่มีแบบแผนในระดับโมเลกุลขึ้น ซึ่งก็คือการเพิ่มเอนโทรปีของระบบนั่นเอง จากกฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์กล่าวว่าเอนโทรปีคือการวัดการสูญเสียพลังงานภายในของสสาร ดังนั้นเมื่อเอนโทรปีของสสารเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการทำงานของสสารนั้นลดลงไป ดังนั้นพลังงานในรูปแบบของ disorder energy จึงไม่สามารถแปรรูปไปเป็นพลังงานในรูปแบบของ order energy ได้อย่างสมบูรณ์ ค่าผลได้สูงสุดในการแปรรูปพลังงานจากพลังงานในรูปแบบของ disorder energy ไปเป็น order energy มีข้อสังเกตดังนี้

1. กระบวนการแปรรูปพลังงานต้องเป็นกระบวนการผันกลับได้อย่างสมบูรณ์
2. ประสิทธิภาพสูงสุดในการแปรรูปพลังงานขึ้นอยู่กับตัวแปรทางอุณหพลวัตของระบบและสิ่งแวดล้อม
3. การวิเคราะห์กระบวนการแปรรูปพลังงานตั้งอยู่บนพื้นฐานของกฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์
4. การแปรรูปพลังงานเกิดควบคู่กับการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของระบบ

สำหรับการวิเคราะห์ exergy ของ disorder energy นั้นจะพิจารณาจากกระแสของสารทำงานที่ภาวะหนึ่งร่วมกับภาวะแวดล้อม (environmental state) ซึ่ง exergy ของ disorder energy แบ่งออกเป็นสองส่วนคือ chemical exergy (\mathcal{E}_{ch}) และ physical exergy (\mathcal{E}_{ph}) ประเมินค่าโดยตรวจสอบความสามารถในการทำงานสูงสุด (maximum of work obtainable) เมื่อสารทำงานผ่านกระบวนการอุดมคติเชิงเคมี (ideal chemical process) เรียกว่า chemical exergy และกระบวนการอุดมคติเชิงฟิสิกส์ (ideal physical process) เรียกว่า physical exergy

2.6.3 Physical Exergy

Physical exergy มีค่าเท่ากับความสามารถในการทำงานสูงสุดที่กระแสของสารตั้งต้นสามารถทำได้ เมื่อกระแสของสารตั้งต้นถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการอุดมคติเชิงฟิสิกส์ที่ภาวะหนึ่งๆ และออกสู่ภาวะแวดล้อมที่ความดัน P_0 และอุณหภูมิ T_0 โดยกระบวนการอุดมคติเชิงฟิสิกส์จะเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์เชิงอุณหพลระหว่างกระบวนการกับสิ่งแวดล้อมเท่านั้น เช่นกระบวนการถ่ายโอนความร้อนแบบผันกลับได้เป็นต้น

การคำนวณ physical exergy เป็นไปตามสมการ 2.17

$$\mathcal{E}_{ph1} = (h_1 - T_0 s_1) - (h_0 - T_0 s_0) \quad (2.17)$$

และสำหรับกรณีแก๊สอุดมคติเป็นไปตามสมการที่ 2.18

$$\mathcal{E}_{ph} = c_p (T_1 - T_0) - T_0 \left(c_p \ln \frac{T_1}{T_0} - R \ln \frac{P_1}{P_0} \right) \quad (2.18)$$

เมื่อ \mathcal{E}_{ph} = exergy ที่ภาวะ 1: J/mol

h_1 = เอนทัลปี ที่ภาวะ 1: J/mol

h_0 = เอนทัลปี ที่ภาวะแวดล้อม: J/mol

T_0 = อุณหภูมิที่ภาวะแวดล้อม: K

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \text{อุณหภูมิ ที่ภาวะ 1: K} \\
 s_1 &= \text{เอนโทรปี ที่ภาวะ 1: J/mol-K} \\
 s_0 &= \text{เอนโทรปี ที่ภาวะแวดล้อม: J/mol-K} \\
 c_p &= \text{ความจุความร้อนของสาร: J/mol-K} \\
 R &= \text{ค่าคงที่ของแก๊ส: J/mol-K} \\
 P_0 &= \text{ความดันที่ภาวะแวดล้อม: atm} \\
 P_1 &= \text{ความดัน ที่ภาวะ 1: atm}
 \end{aligned}$$

2.6.4 Chemical Exergy

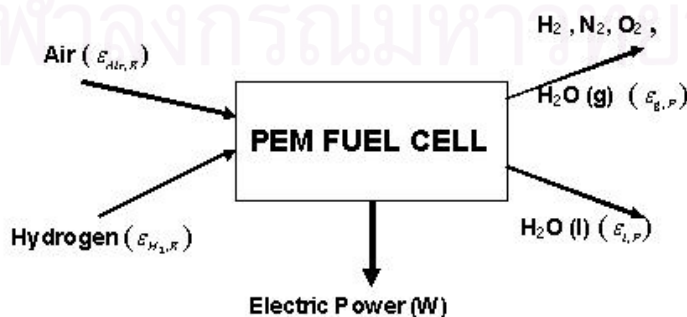
Chemical exergy คือ ความสามารถในการทำงานสูงสุดกระแสของสารตั้งต้นถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการอุดมคติเชิงเคมีที่ภาวะสิ่งแวดล้อม และถูกปล่อยออกมาที่ dead state ซึ่งการคำนวณ chemical exergy ของของผสมสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 2.19

$$\tilde{\varepsilon}_{ch,mix} = \sum_i x_i \varepsilon_{ch,i} + RT_0 \sum_i x_i \ln x_i \quad (2.19)$$

เมื่อ $\tilde{\varepsilon}_{ch,mix}$ = chemical exergy เฉลี่ยของของผสม: J/mol
 $\varepsilon_{ch,i}$ = chemical exergy ของสาร i: J/mol
 x_i = สัดส่วนโดยโมลของสาร i

2.6.5 ประสิทธิภาพของกระบวนการแปรรูปพลังงานโดยเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน [11]

การประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการแปรรูปพลังงานโดยเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์สามารถผลิตได้กับผลต่างระหว่าง exergy ของกระแสแก๊สขาเข้า และ exergy ของกระแสแก๊สขาออก ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนภาพพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 2.20

$$\text{cell efficiency} = \frac{W}{(\mathcal{E}_{Air,R} + \mathcal{E}_{H_2,R}) - (\mathcal{E}_{g,P} + \mathcal{E}_{l,P})} \quad (2.20)$$

เมื่อ W = กำลังงานไฟฟ้าที่ถูกสร้างโดยเซลล์เชื้อเพลิง : J

$\mathcal{E}_{Air,R}$ = ผลรวมของ chemical exergy และ physical exergy ของอากาศขาเข้า: J

$\mathcal{E}_{H_2,R}$ = ผลรวมของ chemical exergy และ physical exergy ของไฮโดรเจนขาเข้า: J

$\mathcal{E}_{g,P}$ = ผลรวมของ chemical exergy และ physical exergy ของผลิตภัณฑ์ในวัฏภาคแก๊ส: J

$\mathcal{E}_{l,P}$ = ผลรวมของ chemical exergy และ physical exergy ของผลิตภัณฑ์น้ำในวัฏภาคของเหลว: J

2.7 โปรแกรม FLUENT 4.5 [12]

โปรแกรม FLUENT 4.5 เป็นโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงการคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ซึ่งใช้ในการศึกษาพลวัตของของไหล การจำลองสภาวะการไหล การถ่ายโอนความร้อน และการเกิดปฏิกิริยาเคมี ความสามารถในการจำลองสภาวะการไหลที่หลากหลายของโปรแกรม FLUENT 4.5 เกิดขึ้นจากการรวบรวมสมการพื้นฐานที่ใช้ในการอธิบายสถานะและสมดุลการไหล การถ่ายโอนความร้อน และการถ่ายโอนมวลสาร ไว้อย่างครบถ้วน และนอกจากนี้โปรแกรม FLUENT 4.5 ยังเปิดโอกาสให้ผู้ใช้สามารถป้อนสมการคำนวณเพิ่มเติมด้วยคำสั่งภาษา Fortran คุณสมบัติเพิ่มเติมนี้เรียกว่า user defined subroutine ขั้นตอนการจำลองสภาวะการไหลโดยโปรแกรม FLUENT 4.5 มีลำดับที่คล้ายคลึงกับการจำลองสภาวะการไหลโดยการคำนวณด้วยมือกล่าวคือ

1. กำหนดวัตถุประสงค์ของการจำลองสภาวะการไหลและตั้งสมมติฐานที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์
2. กำหนดขอบเขตของแบบจำลอง
3. แบ่งขอบเขตของแบบจำลองออกเป็นปริมาตรสี่เหลี่ยมเล็กๆ
4. เลือกสมการที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์ต่างๆให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์
5. ตั้งเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์
6. โปรแกรม FLUENT 4.5 ทำการคำนวณเพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (finite difference method)
7. นำผลที่ได้การคำนวณจากโปรแกรม FLUENT 4.5 ไปทำการวิเคราะห์

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wood และคณะ [13] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของแผ่นสะสมกระแสที่มีช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design และกระบวนการเพิ่มความชื้นให้แก่กระแสแก๊สขาเข้าแบบการฉีดน้ำที่มีสถานะของเหลวเข้าสู่กระแสแก๊สขาเข้าโดยตรง ต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนขนาด 100 ตารางเซนติเมตร ผลการทดลองพบว่าช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ให้ประสิทธิภาพของเซลล์ที่ดีกว่าแบบ conventional design เนื่องจากกลไกการถ่ายโอนมวลสารและปรากฏการณ์การไหลของแก๊สภายในขั้วอิเล็กโทรดแบบมีรูพรุนเป็นการพาแบบบังคับ (force convection) ซึ่งเป็นการบรรเทาปัญหาโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้นที่ขั้วแคโทด และเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาฝั่งขั้วแคโทด นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการป้อนน้ำที่มีสถานะเป็นของเหลวเข้าสู่เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนฝั่งขั้วแอโนด ซึ่งส่งผลให้มีปริมาณน้ำในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนมีปริมาณมาก ถือเป็น การเพิ่มความสามารถในการนำโปรตอนหรือเป็นการลดค่าความต้านทานในการนำโปรตอนภายในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

He และคณะ [5] ได้สร้างแบบจำลองสองมิติ สองภูมิภาค อุณหภูมิคงที่ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนฝั่งขั้วแคโทดซึ่งใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design โดยใช้อากาศแห้งเป็นสารป้อนเข้า เพื่อศึกษากลไกการถ่ายโอนมวลสาร และพฤติกรรม การไหลภายในขั้วอิเล็กโทรดแบบมีรูพรุน โดยมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเป็นความดันที่บริเวณผิวร่วมระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สขาเข้ากับขั้วอิเล็กโทรดที่มีรูพรุนให้มีค่าเท่ากับ 1.007 บรรยากาศ และระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สขาออกกับขั้วอิเล็กโทรดที่มีรูพรุนให้มีค่าเท่ากับ 1 บรรยากาศ จากการจำลองกระบวนการพบว่ากลไกการถ่ายโอนมวลสารและปรากฏการณ์การไหลของแก๊สภายในขั้วอิเล็กโทรดแบบมีรูพรุนเป็นการพา (convection) ทำให้ค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนบริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าสูง จึงทำให้เซลล์สามารถสร้างกระแสไฟฟ้าที่มีค่าความหนาแน่นกระแสที่สูงขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ค่าเดียวกัน นอกจากนี้การเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำได้โดยการลดขนาดความกว้างของ shoulder ควบคู่กับการเพิ่มความกว้างของช่องทางการไหลของแก๊สทั้งขาเข้าและขาออก

Berning และคณะ [4] ได้สร้างแบบจำลองสามมิติ สองภูมิภาค อุณหภูมิไม่คงที่ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional design โดยไม่พิจารณาถึงการเปลี่ยนวัฏภาคของน้ำผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาฝั่งขั้วแคโทดซึ่งมีสถานะเป็นของเหลว เพื่อศึกษาถึงปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลสาร การกระจายตัวของค่าความหนาแน่นกระแสที่เซลล์สามารถผลิตได้ที่ศักย์ไฟฟ้าค่าต่างๆ ของเซลล์ การกระจายอุณหภูมิภายในเซลล์ ผลที่ได้จากแบบจำลองพบว่าสมรรถนะของเซลล์ถูกควบคุมด้วยกลไกการถ่ายโอนมวลสารและอัตราการ

เกิดปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจนฝั่งขั้วแคโทด ค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้บริเวณสั่นกันมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด และพบว่าเมื่อเซลล์มีการสร้างกระแสที่ค่าความหนาแน่นกระแสสูงๆ กระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่จะถูกสร้างขึ้นที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ช่องทางการไหลของแก๊สทั้งนี้เป็นผลมาจากปรากฏการณ์ mass transfer limitation เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดในเซลล์เนื่องจากมีค่าการนำโปรตอนต่ำ แต่เมื่อพิจารณาถึงระดับความแตกต่างของอุณหภูมิภายในเซลล์พบว่า อุณหภูมิภายในเซลล์มีความแตกต่างกันเพียง 3 ดีกรีเซลเซียสเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่าอุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนเซลล์เดียวกันมีอุณหภูมิคงที่และมีค่าเท่ากันทั่วทั้งเซลล์

พัฒนพงษ์ [14] ได้การออกแบบหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ผลการทดลองพบว่าอัตราการไหลของแก๊ส อุณหภูมิ องค์ประกอบของสารออกซิไดส์ ความชื้น และความดัน มีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงโดยเฉพาะในการเกิดโพลาริเซชันซึ่งเกิดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อพิจารณาที่ค่าความต่างศักย์เดียวกัน ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะลดลงเมื่ออัตราการไหลของแก๊สและอุณหภูมิการทำงานเพิ่มขึ้น สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ออกซิเจนเป็นสารออกซิไดส์จะดีกว่าที่ใช้อากาศเป็นสารออกซิไดส์ ในส่วนของความดันมีผลต่อสมมูลของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงคือ อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm อัตราการไหลของสารออกซิไดส์เท่ากับ 80 sccm และเท่ากับ 200 sccm สำหรับออกซิเจนและอากาศตามลำดับอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส สำหรับหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการพัฒนาส่วนเชื่อมต่อระหว่างระบบให้ความชื้นและเซลล์เชื้อเพลิงแล้วนั้น พบว่าประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิในระบบให้ความชื้นควรเท่ากับหรือมากกว่าอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เล็กน้อย จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิการทำงานของเซลล์ที่ 70 องศาเซลเซียสจะให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด และสูงกว่ากรณีที่ก่อนการพัฒนาหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

ฐิติกร [9] ได้สร้างแบบจำลองกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นโปรตอน โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วนคือ การสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม Fluent 4.5 เพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถจำลองภาวะเชิงพลวัตของของไหลภายในเซลล์เชื้อเพลิงได้ ทำให้ทราบถึงการเคลื่อนที่ของแก๊ส และน้ำในวัฏภาคของเหลว ได้จากแบบจำลอง และส่วนที่ 2 คือการนำผลจากแบบจำลองบนโปรแกรม Fluent 4.5 มาประยุกต์สำหรับสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม Aspen Plus ซึ่งเป็นโปรแกรมจำลองกระบวนการทางอุตสาหกรรมเคมีทั่วไป ทำให้ได้แบบจำลองที่มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น กล่าวคือแบบจำลองที่ได้สามารถจำลองกระบวนการได้เหมือนกับแบบจำลองบนโปรแกรม Fluent

4.5 แต่จะมีการคำนวณที่รวดเร็วมากกว่า และสามารถจำลองกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับหน่วยปฏิบัติการอื่นๆ ได้ เช่นหน่วยเพิ่มความชื้น ซึ่งผลที่ได้จากแบบจำลองสามารถนำไปศึกษาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน คือเมื่อมีการเพิ่มความดันทางด้านขั้วแคโทด หรือเพิ่มค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนเข้า จะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสเพิ่มมากขึ้น

Grujicic และคณะ [15] ได้สร้างแบบจำลองสามมิติ หนึ่งภูมิภาค ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนฝั่งขั้วแคโทดที่มีช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design เพื่อศึกษาอิทธิพลของความกว้างของช่องทางการไหลของแก๊ส ความลึกของช่องทางการไหลของแก๊ส และความหนาของขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุน ที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทด โดยทำการศึกษาอิทธิพลของความกว้างของช่องทางการไหลในช่วง 0.025 มิลลิเมตร ถึง 0.175 มิลลิเมตร ความลึกของช่องทางการไหลในช่วง 0.02 มิลลิเมตร ถึง 5 มิลลิเมตร และความหนาของขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนในช่วง 0.02 มิลลิเมตร ถึง 0.05 มิลลิเมตร ด้วยวิธีทาง optimization ผลการศึกษาพบว่าสมรรถนะสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทดเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีช่องทางการไหลกว้าง 0.175 มิลลิเมตร ความลึก 0.05 มิลลิเมตร และใช้ขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนหนา 0.037 มิลลิเมตร

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการวิจัยออกเป็นสองขั้นตอนกล่าวคือ ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อการถ่ายโอนมวลสารภายในเซลล์เชื้อเพลิง โดยจำลองสภาวะการณ และขั้นตอนที่สองเป็นการตรวจสอบความสอดคล้องของผลจากการจำลองสภาวะการณกับปรากฏการณ์จริงในเซลล์เชื้อเพลิง โดยตรวจวัดสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการใช้รูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สที่เหมาะสม ซึ่งได้จากการออกแบบในขั้นตอนที่หนึ่ง

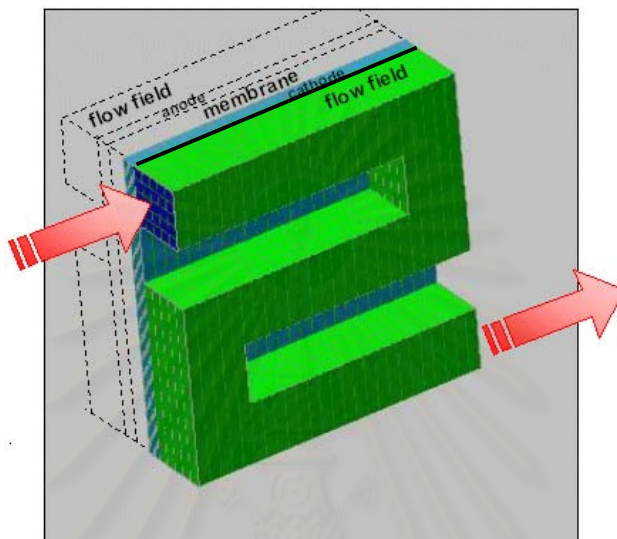
3.1 การพัฒนาแบบจำลองกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

แบบจำลองสามมิติ หนึ่งภูมิภาค ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ฝั่งขั้วแอโนด และขั้วแคโทดถูกพัฒนาขึ้นแบบแยกจากกันโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป FLUENT 4.5 เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ฝั่งขั้วแอโนด และฝั่งขั้วแคโทดโดยมีสมมติฐานในการสร้างแบบจำลองคือ

- แบบจำลองสามมิติ
- เซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่สภาวะคงตัว
- เซลล์เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิคงที่และมีค่าเท่ากันทุกจุด
- น้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่ฝั่งขั้วแคโทดมีลักษณะเป็นละอองน้ำเล็กๆ ซึ่งมีปริมาตรน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาตรของแก๊ส (แบบจำลองหนึ่งภูมิภาค)
- แก๊สทุกชนิดในระบบประพฤติตัวเป็นแก๊สอุดมคติแบบอัดได้
- การไหลของแก๊สทุกชนิดภายในระบบเป็นการไหลแบบราบเรียบ
- ผิวของช่องทางการไหลของแก๊สและ MEA มีลักษณะเป็นผิวเรียบ
- ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นของอากาศบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นสะสมกระแสและ ส่วนประกอบเสริมของชั้นอิเล็กโทรดและเยื่อแผ่น (membrane electrode assembly, MEA) มีค่าน้อยมากจนตัดทิ้งได้
- ขั้วอิเล็กโทรดแบบมีรูพรุนมีสมบัติทางกายภาพที่สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น
- ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยามีความหนาน้อยมาก ดังนั้นจึงพิจารณาเป็นพื้นผิวการเกิดปฏิกิริยา

3.1.1 ขอบเขตของแบบจำลอง

ขอบเขตของแบบจำลองประกอบด้วย ช่องทางการไหลของแก๊ส ชั้นอิเล็กโทรดแบบมีรูพรุนและชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขอบเขตของแบบจำลองสำหรับงานวิจัยนี้

3.1.2 สมการที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

สมการพื้นฐานซึ่งใช้สำหรับการอธิบายปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลสาร การถ่ายโอนพลังงาน และการถ่ายโอนโมเมนตัมได้ถูกรวบรวมไว้อย่างครบถ้วนในโปรแกรมสำเร็จรูป FLUENT 4.5 และนอกจากนี้ผู้ใช้อยังสามารถเขียนพจน์เพิ่มเติม (source term) โดยใช้โปรแกรม Fortran สำหรับทำนายปรากฏการณ์ที่มีความเฉพาะเจาะจงให้กับโปรแกรม FLUENT 4.5 ได้อีกด้วย

3.1.2.1 สมการการไหลแบบต่อเนื่องสำหรับกรณีการไหลแบบราบเรียบ [12]

สมการการไหลแบบราบเรียบ หรือสมการอนุรักษ์มวลในโปรแกรม FLUENT 4.5 มีรูปแบบดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = S_m \quad (3.1)$$

- เมื่อ ρ = ค่าความหนาแน่นของของไหล : kg/m^3
 U_i = ความเร็วของของไหลในทิศทางตามแกน i : m/sec
 x_i = ระยะทางตามทิศทางแกน i : m
 S_m = พจน์เพิ่มเติมกรณีที่มีการถ่ายโอนมวลสารระหว่างวัฏภาค : kg/sec

สมการที่ 3.1 นี้สามารถใช้ได้ทั้งในกรณีของไหลอัดได้ และของไหลอัดไม่ได้ พจน์เพิ่มเติมนี้สามารถเขียนเพิ่มเติมและเรียกใช้ได้เมื่อระบบมีการถ่ายโอนมวลสารระหว่างวัฏภาค โดยพจน์เพิ่มเติมจะมีค่าเป็นบวกเมื่อมีการถ่ายโอนมวลสารเข้าสู่วัฏภาคที่กำลังทำการพิจารณา สำหรับในงานวิจัยนี้ไม่มีการเรียกใช้พจน์เพิ่มเติมเนื่องจากการพิจารณาระบบหนึ่งวัฏภาคจึงไม่มีการถ่ายโอนมวลสารระหว่างวัฏภาค และละเลยพจน์การสะสมมวลเนื่องจากการพิจารณาที่สภาวะคงตัว

3.1.2.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม [12]

การอนุรักษ์โมเมนตัมสำหรับของไหลในทิศทางตามแกน i สำหรับระบบสองมิติสามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i + S_{mo} \quad (3.2)$$

- เมื่อ p = ความดัน : Pa
 τ_{ij} = ความเค้น (stress tensor) ที่ถูกถ่ายโอนในแนวแกน i เนื่องจากของไหลเคลื่อนที่ไปในทิศทางตามแกน j : N/m^2
 g = ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก : m/sec^2
 F_i = แรงภายนอกที่กระทำต่อของไหล (body force) : N
 S_{mo} = พจน์เพิ่มเติมกรณีที่มีการถ่ายโอนโมเมนตัมระหว่างวัฏภาคของของไหล และการถ่ายโอนโมเมนตัมระหว่างของไหลกับตัวกลาง เช่นกรณีตัวกลางที่มีรูพรุน

ในงานวิจัยนี้ได้ละเลยพจน์การสะสมโมเมนตัมเนื่องจากการพิจารณาที่ภาวะคงตัว แรงภายนอกที่กระทำต่อของไหลจะเกิดขึ้นในกรณีระบบที่ประกอบด้วยของไหลสองวัฏภาคขึ้นไป เช่นแรงปฏิกิริยาระหว่างอากาศและละอองน้ำในอากาศ

ค่าความเค้นสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (3.3)$$

เมื่อ τ_{ij} = ความเค้น ที่ถูกถ่ายโอนในแนวแกน i เนื่องจากของไหลเคลื่อนที่ไปในทิศทางตามแกน j : N/m²

μ = ความหนืดของของไหล : kg/m-sec

พจน์ที่สองทางด้านขวามือของสมการที่ 3.3 เป็นอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัฏภาคที่สอง สำหรับสมการอนุรักษ์โมเมนตัม ในชั้นขั้วเล็กโทรดแบบมีรูพรุนนั้นสามารถพิจารณาได้โดยการเพิ่มพจน์เพิ่มเติมเข้าไปในสมการที่ 3.2 ซึ่งพจน์เพิ่มเติมนี้คือ

$$-\frac{\mu}{\alpha} v + C_2 \left(\frac{1}{2} \rho v |v| \right) \quad (3.4)$$

เมื่อ α = ค่าการซึมผ่านของของไหลในตัวกลางที่มีรูพรุน : m²

C_2 = ตัวประกอบความต้านทานความเฉื่อย (inertial resistance factor) : m⁻¹

v = ความเร็วของของไหลภายในตัวกลางที่มีรูพรุน : m/sec

พจน์เพิ่มเติมนี้เป็นการอธิบายการเกิดความดันดลของของไหลที่ไหลภายในตัวกลางที่มีรูพรุน สำหรับกรณีการไหลแบบราบเรียบภายในตัวกลางที่มีรูพรุนความดันดลที่เกิดขึ้นภายในตัวกลางที่มีรูพรุนมีค่าแปรผันตรงกับความเร็วของของไหลภายในตัวกลางที่มีรูพรุน ค่าคงที่ C_2 จะมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อละเลยอิทธิพลของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง การแพร่และความเร่งเนื่องจากการพา (convective acceleration) ทำให้ปรากฏการณ์การถ่ายโอนโมเมนตัมของของไหลภายในตัวกลางที่มีรูพรุนเป็นไปตามกฎของดาร์ซี (Darcy's law) ดังสมการ

$$\nabla p = -\frac{\mu}{\alpha} v \quad (3.5)$$

3.1.2.3 สมการอนุรักษ์สปีชีส์ (Species conservation equation) [12]

สมการการอนุรักษ์สปีชีส์ i' สามารถเขียนได้ในรูป

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i m_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}(J_{i,i}) + S_i \quad (3.6)$$

เมื่อ m_i = สัดส่วนโดยมวลของสปีชีส์ i' : no unit

$J_{i,i}$ = ฟลักซ์การแพร่ของสปีชีส์ i' ในทิศทางแกน i : $\text{kg/m}^2\text{-sec}$

S_i = พจน์เพิ่มเติมอัตราการเกิดขึ้นสุทธิของสปีชีส์ i' ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร :
 $\text{kg/m}^3\text{-sec}$

ในงานวิจัยนี้ได้ละเลยพจน์การสะสมมวลสารของสปีชีส์ i' เนื่องจากพิจารณาที่สภาวะคงตัว พจน์ฟลักซ์การแพร่ในสมการที่ 3.6 เป็นการรวมอิทธิพลจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในระบบ และความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสปีชีส์ i' ณ จุดสองจุดในระบบซึ่งอธิบายได้ดังสมการ

$$J_{i,i} = -\rho D_{i,m} \frac{\partial m_i}{\partial x_i} - D_{i,T}^T \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (3.7)$$

เมื่อ $D_{i,m}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่ของสปีชีส์ i' ในของไหล :

$D_{i,T}^T$ = สัมประสิทธิ์การแพร่เชิงอุณหภูมิของสปีชีส์ i' :

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดพจน์เพิ่มเติมสำหรับแก๊สออกซิเจน แก๊สไฮโดรเจน และน้ำโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างสมการของ Butler-Volmer และกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) จากทฤษฎีทางไฟฟ้าเคมี เมื่อปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ผิวหน้ามีค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากปฏิกิริยาสูง (high surface activation overpotential) สมการของ Butler-Volmer จะอยู่ในรูป [1]

$$i = i_0 \frac{c(0,t)}{c_{ref}} \exp\left(\frac{\alpha \eta_{act} F}{RT}\right) \quad (3.8)$$

- เมื่อ i = ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า : kA/m^2
 i_0 = exchange current density : kA/m^2
 c_{ref} = ค่าความเข้มข้นมาตรฐานของแก๊สที่ความดัน 1 บรรยากาศ : kmol/m^3
 $c(0, t)$ = ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นในสถานะแก๊สที่บริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ณ เวลาใดๆ : kmol/m^3
 α = charge transfer coefficient (มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1)
 η_{act} = ค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากโพลาริเซชันของปฏิกิริยาเคมี : V : J/Coulomb
 F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ = 9.65×10^7 Coulomb/kmole equivalent
 R = ค่าคงที่ของแก๊ส = 8.314×10^3 J/kmol K
 T = อุณหภูมิของระบบ : K

และจากกฎของฟาราเดย์ [6]

$$\text{rate of reaction} = \frac{i}{nF} \quad (3.9)$$

เมื่อ n = จำนวนโมลของอิเล็กตรอนที่ได้ต่อโมลของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา ซึ่งมีค่าเป็น 2 ในกรณีของไฮโดรเจน มีค่าเป็น 4 ในกรณีออกซิเจนและน้ำ ดังนั้นพจน์เพิ่มเติมสำหรับแก๊สไฮโดรเจนคือ

$$S_{H_2} = -\frac{i_0}{2F} \left(\frac{C_{H_2}(0, t)}{C_{ref}} \right) \exp\left(\frac{\alpha \eta_{act, anode} F}{RT} \right) \quad (3.10)$$

พจน์เพิ่มเติมสำหรับแก๊สออกซิเจน

$$S_{O_2} = -\frac{i_0}{4F} \left(\frac{C_{O_2}(0, t)}{C_{ref}} \right) \exp\left(\frac{\alpha \eta_{act, cathode} F}{RT} \right) \quad (3.11)$$

พจน์เพิ่มเติมสำหรับน้ำ

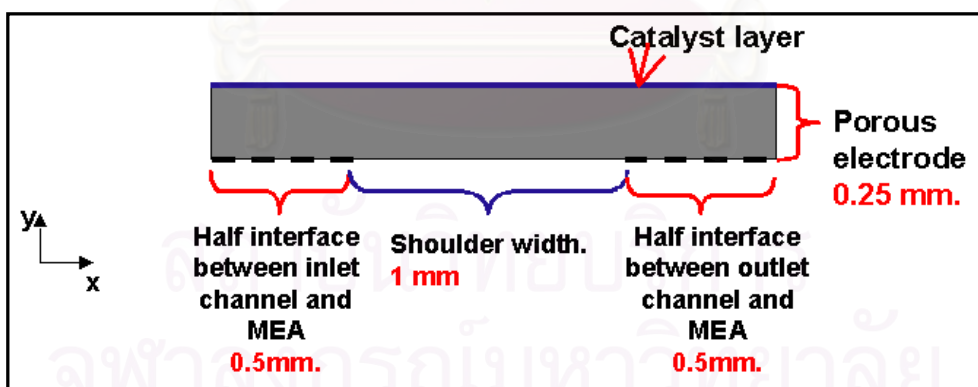
$$S_{H_2O} = \frac{i_0}{2F} \left(\frac{C_{O_2}(0, t)}{C_{ref}} \right) \exp\left(\frac{\alpha \eta_{act, cathode} F}{RT} \right) \quad (3.12)$$

3.1.3 ส่วนการจำลองโดยโปรแกรม FLUENT 4.5

การจำลองกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนโดยโปรแกรม FLUENT4.5 เริ่มต้นจากการกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวที่ฝั่งขั้วแคโทด (cathode overpotential) เพื่อใช้เป็นพจน์เพิ่มเติมสำหรับสมการอนุรักษ์มวลของออกซิเจน และน้ำ ที่ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับสารป้อนเข้า เช่น พลั๊กซ์ของสารป้อนเข้า องค์ประกอบของสารป้อนเข้า กำหนดเงื่อนไขขอบของปัญหา เช่น ความดันขาออกของแก๊ส กำหนดค่าสมบัติทางกายภาพของของไหล และสมบัติทางกายภาพของขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุน

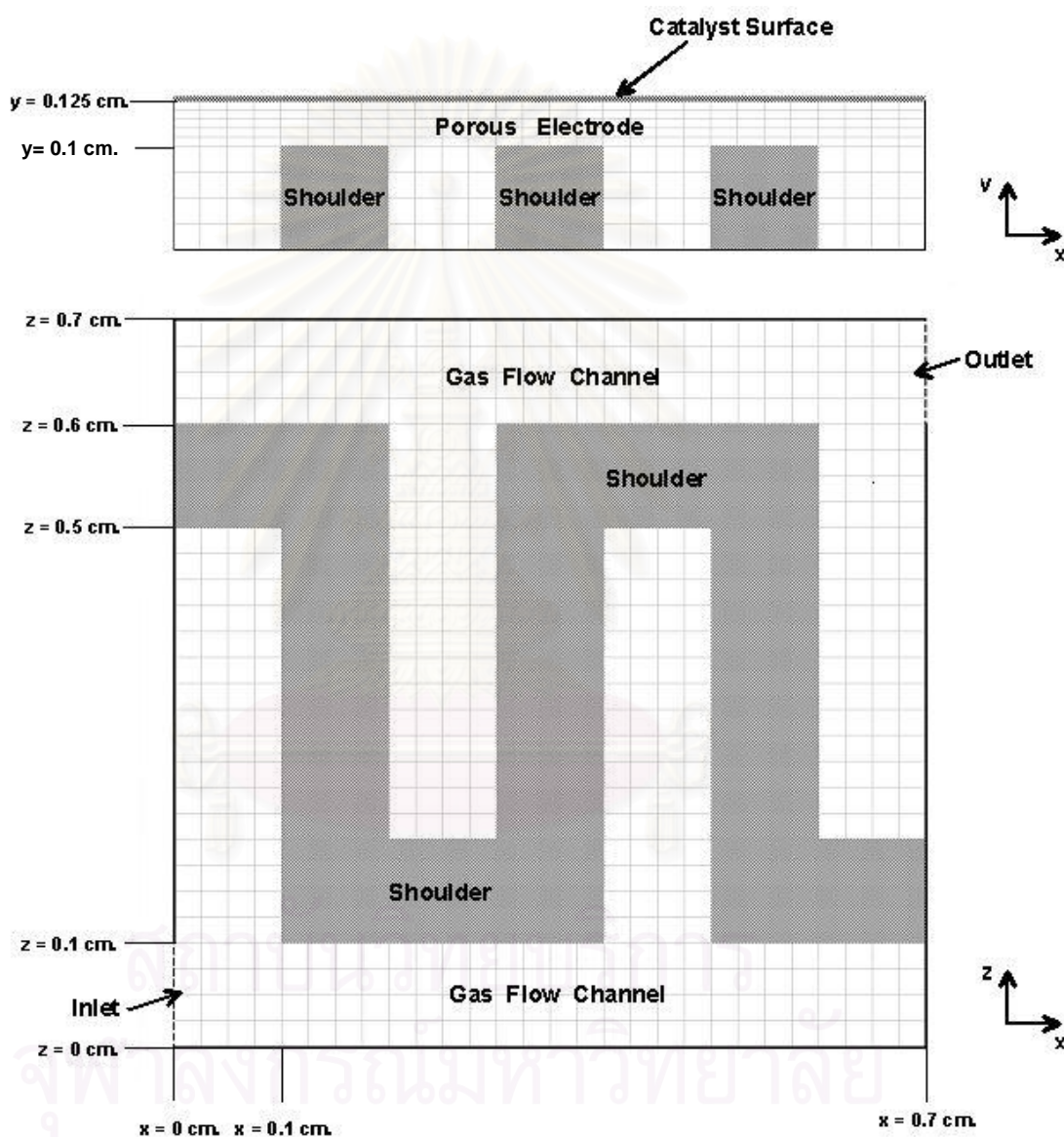
3.1.3.1 ลักษณะกรณีศึกษาพื้นฐาน (base case)

สำหรับในกรณีศึกษาพื้นฐานนี้เป็นการจำลองกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนฝั่งขั้วแคโทด ในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างแบบจำลองในลักษณะ 3 มิติ เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลของของไหลและองค์ประกอบของสาร ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในขอบเขตแบบจำลองที่ศึกษาดังรูปที่ 3.1 เพื่อเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยของ He และคณะ [5] และงานวิจัยของ จูตีกร [9] ซึ่งเป็นแบบจำลองสองมิติ สมองวิภาค ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ที่ฝั่งขั้วแคโทดที่มีการใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated โดยขอบเขตของแบบจำลองของ He และคณะและงานวิจัยของ จูตีกร ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขอบเขตของแบบจำลองของ He และคณะ และงานวิจัยของ จูตีกร

แบบจำลองที่ศึกษามีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขอบเขตครอบคลุมช่องทางการไหลของแก๊ส ขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุน (porous electrode) ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะเป็นพื้นผิวการเกิดปฏิกิริยา ความสูง (y) (หรือคือช่วงความหนาของช่องทางการไหลของแก๊ส และขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุน) ความกว้าง (x) และความยาว (z) ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขอบเขตของแบบจำลองในกรณีศึกษาพื้นฐาน

- ภายในขอบเขตที่ทำการจำลองจะมีเส้นแบ่งเขต (boundary) ทั้งหมด 7 ส่วน คือ
- ส่วนที่ 1 $x = 0 \text{ cm}, 0 < y < 0.1 \text{ cm}, 0 < z < 0.1 \text{ cm}$: เป็นทางเข้าของแก๊สออกซิเจน
- ส่วนที่ 2 $x = 0 \text{ cm}, 0 < y < 0.1 \text{ cm}, 0.6 < z < 0.7 \text{ cm}$: เป็นทางออกของแก๊สผลิตภัณฑ์
- ส่วนที่ 3 $0 < x < 0.1 \text{ cm}, 0 < y < 0.1 \text{ cm}, 0 < z < 0.5 \text{ cm}$ และ $0.4 < x < 0.5 \text{ cm}, 0 < y < 0.1 \text{ cm}, 0 < z < 0.5 \text{ cm}$: เป็นช่องทางเดินแก๊สขาเข้า
- ส่วนที่ 4 $0.2 < x < 0.3 \text{ cm}, 0 < y < 0.1 \text{ cm}, 0.2 < z < 0.7 \text{ cm}$ และ $0.6 < x < 0.7 \text{ cm}, 0 < y < 0.1 \text{ cm}, 0.2 < z < 0.7 \text{ cm}$: เป็นช่องทางเดินแก๊สขาออก
- ส่วนที่ 5 $0 < x < 0.1 \text{ cm}, 0 < y < 0.1 \text{ cm}, 0.5 < z < 0.6 \text{ cm}$ และ $0.1 < x < 0.2 \text{ cm}, 0 < y < 0.1 \text{ cm}, 0.1 < z < 0.6 \text{ cm}$ และ $0.3 < x < 0.4 \text{ cm}, 0 < y < 0.1 \text{ cm}, 0.1 < z < 0.2 \text{ cm}$ และ $0.3 < x < 0.4 \text{ cm}, 0 < y < 0.1, 0.1 < z < 0.6$ และ $0.4 < x < 0.5 \text{ cm}, 0 < y < 0.1 \text{ cm}, 0.5 < z < 0.6 \text{ cm}$ และ $0.6 < x < 0.7 \text{ cm}, 0 < y < 0.1 \text{ cm}, 0.1 < z < 0.2 \text{ cm}$: เป็นฉากกั้นบนแผ่นสะสมกระแส
- ส่วนที่ 6 $0 < x < 0.7 \text{ cm}, y = 0.1 \text{ cm}, 0 < z < 0.7 \text{ cm}$: เป็นเส้นแบ่งเขตระหว่างช่องทางกรไหลของแก๊ส ฉากกั้นบนแผ่นสะสมกระแส กับขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุน
- ส่วนที่ 7 $0 < x < 0.7 \text{ cm}, y = 0.125 \text{ cm}, 0 < z < 0.7 \text{ cm}$: เป็นเส้นแบ่งเขตระหว่างขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุน กับ ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

ภาวะการจำลองที่ใช้คือ อุณหภูมิของระบบคงที่ที่ 60 องศาเซลเซียส สารออกซิโดสที่ป้อนเข้าทางด้านขั้วแคโทดคืออากาศแห้ง ซึ่งประกอบด้วยแก๊สออกซิเจนผสมกับแก๊สไนโตรเจนในอัตราส่วนโดยโมล 0.21 : 0.79 และกำหนดให้ค่าความดันต่างระหว่างขาเข้าและขาออกทางด้านขั้วแคโทดคงที่เท่ากับ 0.007 บรรยากาศ โดยทางด้านขั้วแคโทดมีความดันขาเข้าเท่ากับ 1.007 บรรยากาศ ปล่อยออกที่ความดัน 1 บรรยากาศ สำหรับสาเหตุที่ผู้วิจัยกำหนดค่าความดันต่างระหว่างขาเข้าและขาออกให้เท่ากับ 0.007 บรรยากาศนั้น ก็เพื่อจะได้ทำการจำลองภาวะเสียนแบบงานวิจัยของ He และคณะ [5] เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ส่วนการกำหนดค่าความชื้นเข้ามาในระบบนั้นในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้ไม่มีความชื้นขาเข้า แต่สามารถกำหนดค่าความชื้นขาเข้าได้โดยการกำหนดอัตราส่วนโดยมวลของน้ำที่เข้ามาในระบบได้โดยตรง

สำหรับค่าคงที่ที่สำคัญในการคำนวณแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงกรณีศึกษาพื้นฐานได้สรุปไว้ในตารางที่ 3.1

การคำนวณปรากฏการณ์การไหล และปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าความหนาแน่นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิง เริ่มจากการกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากปฏิกิริยาฝั่งขั้วแคโทด และค่าคงที่ตามตารางที่ 3.1 ให้กับโปรแกรม FLUENT 4.5 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม FLUENT 4.5 คือค่า surface mass flux ของแก๊สออกซิเจนที่บริเวณผิวหน้าของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งก็คือฟลักซ์ของออกซิเจนที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยารีดักชันนั่นเอง ค่า surface mass flux ของแก๊สออกซิเจนนี้สามารถคำนวณให้อยู่ในรูปของค่าความหนาแน่นกระแสได้โดยอาศัยกฎของฟาราเดย์ดังสมการที่ 3.9

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณกรณีศึกษาพื้นฐาน

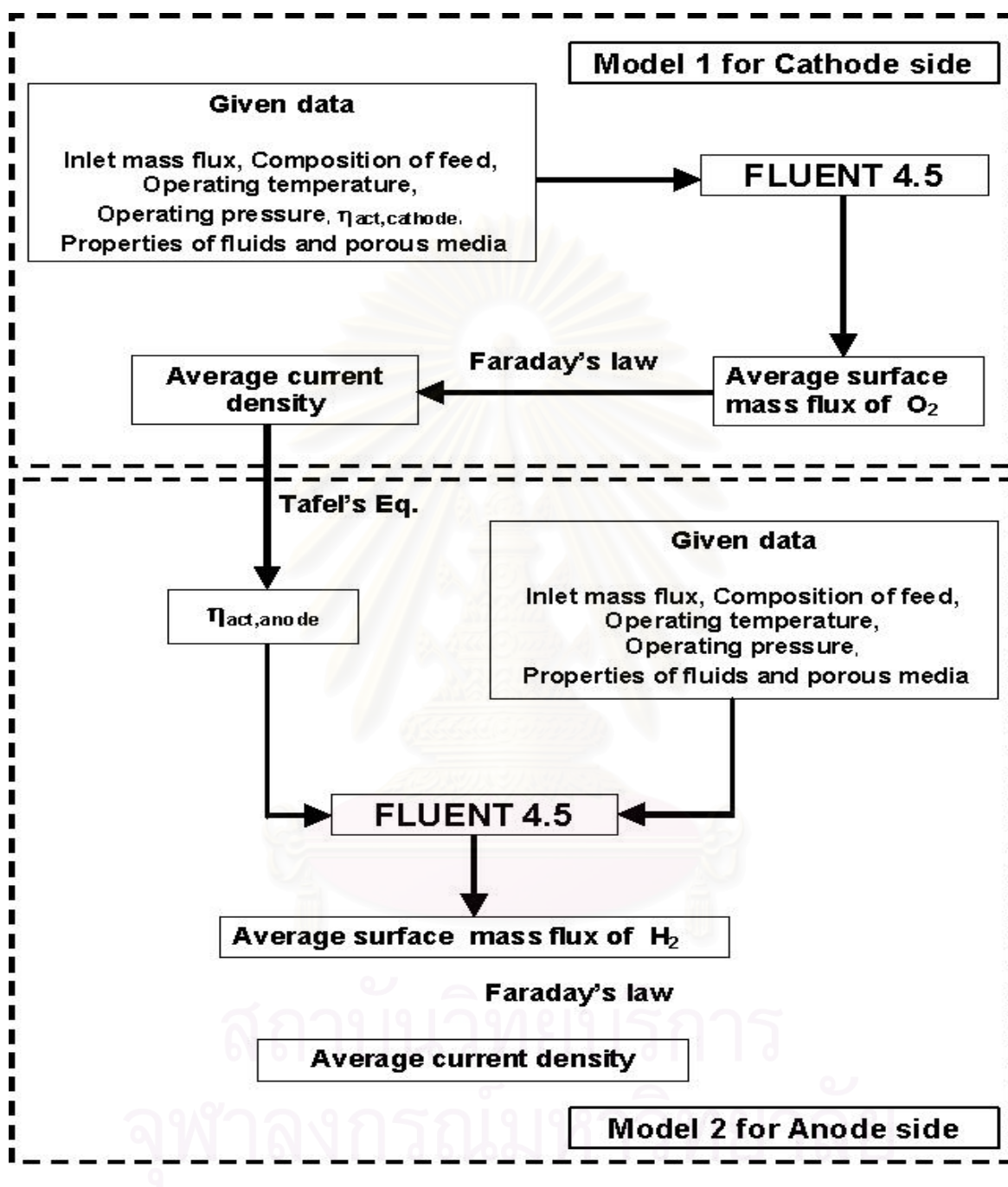
Parameter	Value	Symbol	Unit
Inlet channel width	1	CH_{in}	mm.
Outlet channel width	1	CH_{out}	mm.
Shoulder width	1	S	mm.
MEA area	4.9E-05		m^2
Gas permeability of the electrode [5]	1.20E-12	K_0	m^2
Dry porosity of the electrode	0.3	ϵ	-
Inlet mole fraction of O_2	0.21	-	-
Inlet mole fraction of N_2	0.79	-	-
Inlet mole fraction of H_2O	0.00	-	-
Inlet pressure [5]	1.007	P_{in}	Atm
Outlet pressure	1	P_{out}	Atm
Operating temperature	60	T	$^{\circ}C$
Gas viscosity [5]	2.03E-05	μ^g	Kg/m sec
Transfer coefficient of O_2 reduction reaction [5]	0.5	$\alpha_{cathode}$	-
Exchange current density [5]	100	i_0	A/m^2

3.1.3.2 การศึกษาอิทธิพลของรูปแบบของช่องทางไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฟุ้งั่วแอโนด

สำหรับการจำลองปรากฏการณ์การไหลและปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนฟุ้งั่วแอโนดสามารถทำได้โดยการนำข้อมูลค่าความหนาแน่นกระแสที่ได้จากแบบจำลองฟุ้งั่วแคโทดมาทำการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ฟุ้งั่วแอโนดโดยสมการของ Tafel ซึ่งกล่าวถึงความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากปฏิกิริยากับค่าความหนาแน่นกระแสดังสมการที่ 3.13

$$\eta_{act} = \frac{2RT}{\alpha F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (3.13)$$

แล้วใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวที่คำนวณได้นี้เป็นตัวแปรต้นสำหรับการจำลองปรากฏการณ์ฟุ้งั่วแอโนดเช่นเดียวกับการจำลองปรากฏการณ์ฟุ้งั่วแคโทดซึ่งลำดับขั้นตอนการคำนวณได้ถูกสรุปไว้เป็นแผนผังการคำนวณในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนผังการจำลองปรากฏการณ์เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ฝั่งขั้วแคโทดและฝั่งขั้วแอโนด

สำหรับรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional และ ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated โดยค่าคงที่ที่สำคัญที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงฝังขั้วแอโนดได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 และตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาของช่องทางการไหลทั้งสองแบบนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลองฝังขั้วแอโนด

Parameter	Value	Symbol	Unit
Inlet channel width	1-1.5	CH_{in}	mm.
Outlet channel width	1-1.5	CH_{out}	mm.
Shoulder width	1-1.5	S	mm.
MEA area	5×10^{-4}		m^2
Gas permeability of the electrode [5]	1.20E-12	K_0	m^2
Dry porosity of the electrode	0.3	ϵ	-
Inlet mole fraction of H_2	1	-	-
Inlet mole fraction of H_2O	0.00	-	-
Inlet mass flux	2.5 A/cm ² equivalent	-	Kg/m ² sec
Outlet pressure	1	P_{out}	atm
Operating temperature	60	T	°C
Gas viscosity [5]	2.03E-05	μ^g	Kg/m sec
Transfer coefficient of H_2 reduction reaction [16]	0.5	$\alpha_{cathode}$	-
Exchange current density [16]	5×10^6	i_0	A/m ²

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝังขั้วแอโนด

Flow Channel Pattern	Parameter
Conventional Design	1. Channel width, CH 2. Shoulder width, S
Interdigitated Design	1. Inlet Channel width, CH_{in} 2. Outlet Channel width, CH_{out} 3. Shoulder width, S

3.1.3.3 การศึกษาอิทธิพลของรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด

สำหรับการจำลองปรากฏการณ์การไหลและปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนฝั่งขั้วแคโทดสามารถทำได้โดยการป้อนค่าศักร์ไฟฟ้าส่วนเกินเนื่องจากปฏิกิริยา และค่าคงที่ที่สำคัญที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทดดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.4 และสำหรับรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional และ ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาของช่องทางการไหลทั้งสองแบบนี้แสดงไว้ในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลองฝั่งขั้วแคโทด

Parameter	Value	Symbol	Unit
Inlet channel width	1-1.5	CH_{in}	mm.
Outlet channel width	1-1.5	CH_{out}	mm.
Shoulder width	1-1.5	S	mm.
MEA area	5×10^{-4}		m^2
Gas permeability of the electrode [5]	$1.20E-12$	K_0	m^2
Dry porosity of the electrode	0.3	ϵ	-
Inlet mole fraction of O_2	0.21	-	-
Inlet mole fraction of N_2	0.79	-	-
Inlet mole fraction of H_2O	0.00	-	-
Inlet mass flux	$2.5 A/cm^2$	-	$Kg/m^2 \text{ sec}$
	equivalent		
Outlet pressure	1	P_{out}	atm
Operating temperature	60	T	$^{\circ}C$
Gas viscosity [5]	$2.03E-05$	μ^g	$Kg/m \text{ sec}$
Transfer coefficient of O_2 oxidation reaction [5]	0.5	$\alpha_{cathode}$	-
Exchange current density [5]	100	i_0	A/m^2

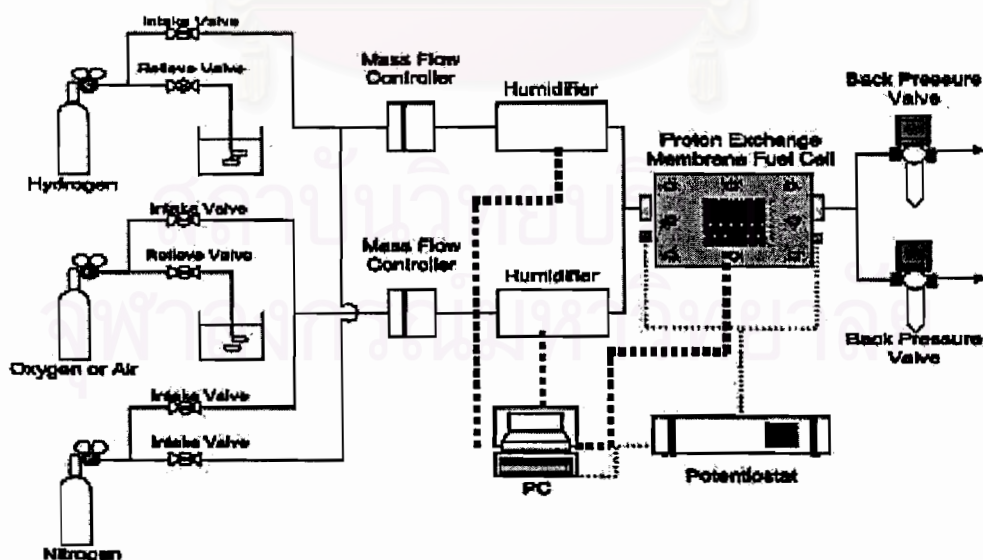
ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบของช่องทางไหลของแก๊ส ที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝังขั้วแคโทด

Flow Channel Pattern	Parameter
Conventional Design	1. Channel width, CH 2. Shoulder width, S
Interdigitated Design	1. Inlet Channel width, CH _{in} 2. Outlet Channel width, CH _{out} 3. Shoulder width, S

3.2 การทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

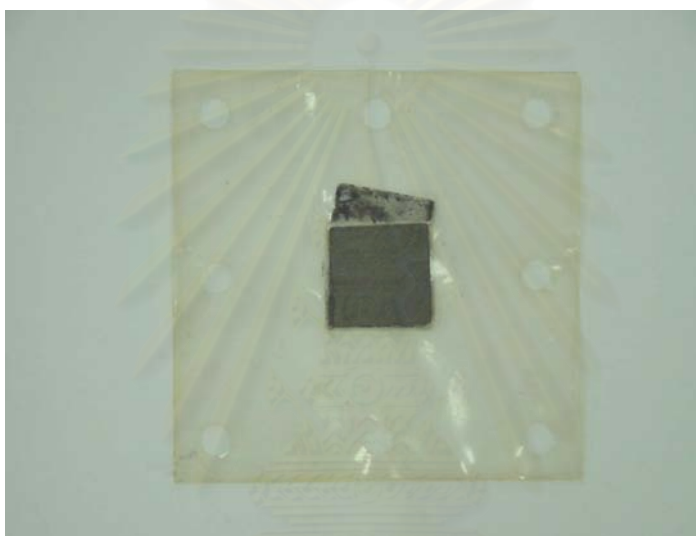
3.2.1 อุปกรณ์การทดลอง

- หน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่น่ามาใช้ในงานวิจัยนี้สร้างและออกแบบโดย พัฒนพงษ์ [14] ซึ่งสามารถแบ่งส่วนประกอบเป็น 5 ส่วนดังรูปที่ 3.5 คือ ระบบควบคุมทิศทางและอัตราการไหลของแก๊ส ระบบให้ความชื้น (Humidifier) กับแก๊ส เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เครื่อง Potentiostat/Galvanostat และวาล์วควบคุมความดันกลับ (Back Pressure Valve)



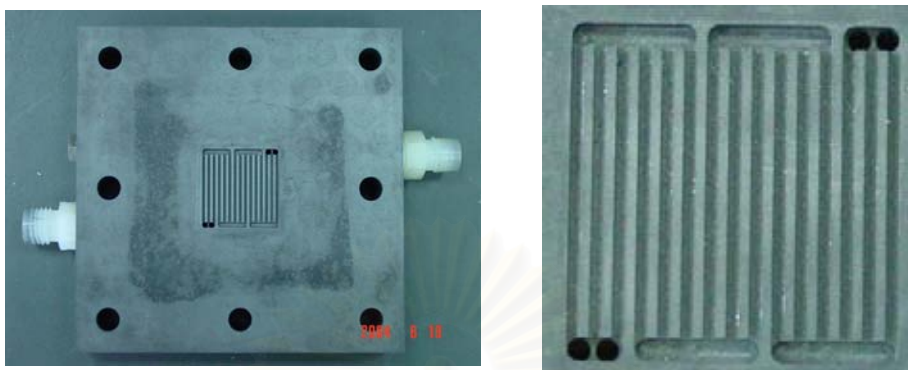
รูปที่ 3.5 แผนผังของหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง [14]

- หน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด (Membrane Electrode Assemblies, MEAs) ส่วนของอิเล็กโทรดจะมีแพลทินัม (Platinum) 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร อยู่บนคาร์บอนในอัตราส่วนระหว่างแพลทินัมกับคาร์บอน 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขั้วอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่ผิว 5 ตารางเซนติเมตร ทั้งสองจะประกบเข้ากับเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเป็นเยื่อแผ่น Nafion 115 ดังรูปที่ 3.6

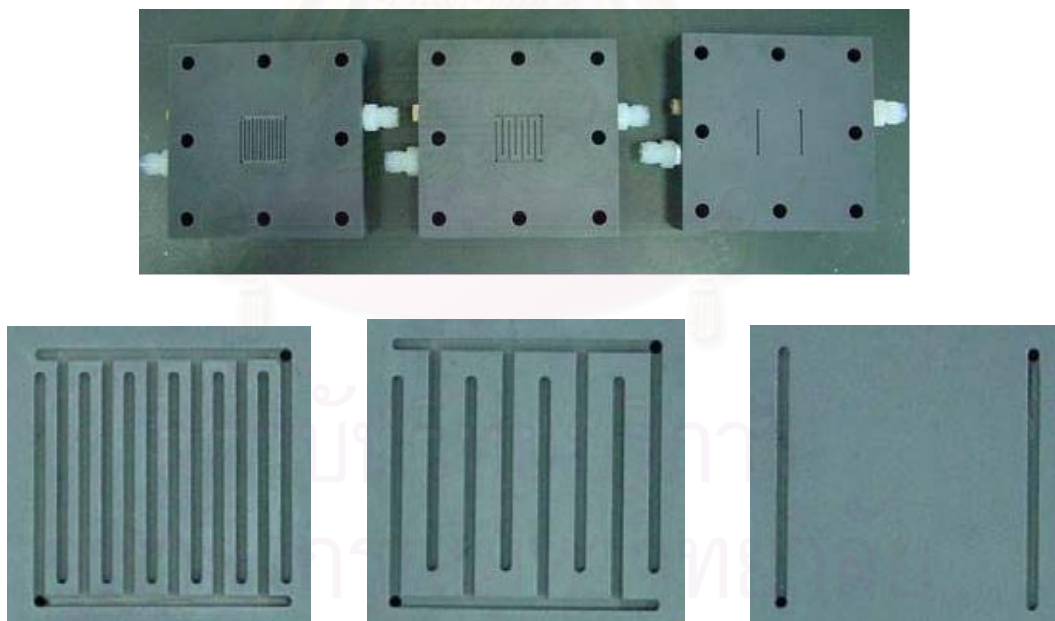


รูปที่ 3.6 หน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด (Membrane Electrode Assemblies, MEAs)

- แผ่นสะสมกระแสแกรไฟต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ แผ่นสะสมกระแสแกรไฟต์ที่มีช่องทางการไหลของแก๊สแบบ hybrid design ผลิตโดย บริษัท ElectroChem, Inc. จากประเทศสหรัฐอเมริกา ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และแผ่นสะสมกระแสที่มีช่องทางการไหลแบบ interdigitated design สำหรับแผ่นสะสมกระแสที่มีรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design นี้จะกำหนดขนาดของช่องทางการไหลของแก๊สและสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สโดยผู้ทำการวิจัย และทำการสร้างแผ่นสะสมกระแสที่มีช่องทางการไหลดังที่ออกแบบไว้ โดยใช้แผ่นแกรไฟต์ที่มีสมบัติต่างๆ ดังแสดงในภาคผนวก ค โดยบริษัท Schunk United Carbon Co., Ltd. ประเทศไทย ดังแสดงในรูปที่ 3.8 สำหรับช่องทางการไหลของแก๊สแบบ hybrid design เป็นรูปแบบผลมระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional design และ serpentine design ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงช่องทางการไหลของแก๊สแบบ hybrid design ในนามของ conventional design



รูปที่ 3.7 แผ่นสะสมกระแสที่มีช่องทางการไหลของแก๊สแบบลูกผสม (hybrid design) ระหว่าง conventional design และ serpentine design ผลิตโดยบริษัท ElectroChem, Inc. จากประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 3.8 แผ่นสะสมกระแสที่มีช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ออกแบบโดยผู้ทำการวิจัย และผลิตโดยบริษัท Schunk United Carbon Co., Ltd. ประเทศไทย

-เครื่อง Potentiostat/Galvanostat เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับในการศึกษาทางเคมีไฟฟ้า สามารถวิเคราะห์ได้หลายวิธีตามความต้องการของงานวิจัยในด้านเคมีไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ในการวัดค่าความต่างศักย์และค่ากระแสที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง โดยเครื่อง Potentiostat/Galvanostat นี้เป็นรุ่น PG STATO 30 ของบริษัท AUTOLAB ควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่อง Potentiostat/Galvanostat

3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. แก๊สไฮโดรเจน ความบริสุทธิ์ 99.99 % ของบริษัท Praxair (ประเทศไทย) จำกัด
2. แก๊สออกซิเจน ความบริสุทธิ์ 99.99 % ของบริษัท Praxair (ประเทศไทย) จำกัด
3. อากาศแห้ง (Air Zero) ของบริษัท Praxair (ประเทศไทย) จำกัด
4. แก๊สไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ 99.5 % ของบริษัท Praxair (ประเทศไทย) จำกัด

3.4 ตัวแปรที่ศึกษา

เนื่องจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในขั้นตอนนี้คือ การทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แผ่นสะสมกระแสที่มีช่องทางการไหลที่เหมาะสมจากแบบจำลอง ดังนั้นตัวแปรที่ศึกษาในการทดลองคือรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สซึ่งประกอบด้วย

1. ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional design ที่มีความกว้างของช่องทางการไหลของแก๊ส 1 mm. และความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 1 mm.

2. ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีความกว้างของช่องทางการไหลของแก๊สขาเข้า 1 mm. ความกว้างของช่องทางการไหลของแก๊สขาออก 1 mm. และมีการแปรค่าความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สดังต่อไปนี้
 - 2.1 ความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 1 mm.
 - 2.2 ความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 2 mm.
 - 2.3 ความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 20.5 mm.

3.5 ขั้นตอนการทดลอง

1. ประกอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน
2. ตรวจสอบวาล์วขาเข้า (Intake Valve) ของแก๊สแต่ละชนิดให้ปิดเปิดอยู่ในทิศทางตามต้องการ เพื่อป้องกันการไหลปนกันของแก๊สต่างชนิด และวาล์วขาออก (Relieve Valve) ให้อยู่ในตำแหน่งปิด
3. ตรวจสอบความเรียบร้อยของข้อต่อต่าง ๆ ในหน่วยทดสอบให้อยู่ในสภาพที่พร้อมทำการทดลอง
4. ตรวจสอบระดับน้ำภายในส่วนระเหยน้ำในระบบให้ความชื้น โดยดูจากส่วนจัดหาน้ำให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม (ให้ปริมาณน้ำภายในส่วนจัดหาน้ำท่วมท่อที่เชื่อมต่อกับด้านล่างของส่วนระเหยน้ำ แต่สูงไม่ถึงท่อที่เชื่อมต่อกับด้านข้างของส่วนระเหยน้ำ)
5. ตรวจสอบเครื่องควบคุมความดันที่หัวถังแก๊สทุกถังให้อยู่ในตำแหน่งปิด
6. ตรวจสอบวาล์วควบคุมความดันกลับให้อยู่ในตำแหน่งเปิด ยกเว้นกรณีที่ทำการศึกษาผลของความดันจะต้องให้วาล์วควบคุมความดันกลับอยู่ในตำแหน่งปิด
7. ตรวจสอบสายไฟที่ต่อจากขั้วไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงทั้ง 2 ขั้วที่ต่อมายังเครื่อง Potentiostat/Galvanostat ว่าให้อยู่ในสภาพที่ต่อเรียบร้อย
8. ตรวจสอบเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงให้อยู่ในช่องวัดอุณหภูมิ
9. เปิดเครื่องตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนเพื่อตรวจวัดความเข้มข้นของแก๊สในกรณีที่เกิดการรั่วของแก๊สไฮโดรเจน
10. เปิดสวิตช์หลักของเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส เพื่ออุ่นเครื่องประมาณ 15 นาทีก่อนทำการทดลอง

11. เปิดสวิตช์เครื่อง Potentiostat/Galvanostat เพื่ออุ่นเครื่องประมาณ 30 นาทีก่อนทำการทดลอง พร้อมเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับทำหน้าที่บันทึกข้อมูลจากเครื่อง Potentiostat/Galvanostat กดปุ่ม Cell Enable ให้อยู่ในตำแหน่งปิด
12. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมอุณหภูมิภายในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง เปิดโปรแกรม Lab-view เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในส่วนระเหยน้ำ ตั้งค่าอุณหภูมิตามต้องการ (60 – 80 องศาเซลเซียส) และกดปุ่ม start ที่โปรแกรม
13. เปิดสวิตช์ที่แผงสวิตช์ควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้าที่สวิตช์หลัก (Main Switch) แล้วจึงเปิดสวิตช์ของเครื่องควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงแล้วจึงตั้งค่าอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงตามต้องการ (30 – 70 องศาเซลเซียส) และเปิดสวิตช์ของตัวให้ความร้อนทุกตัวภายในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง รอจนกระทั่งอุณหภูมิได้ตามค่าที่ตั้งไว้
14. ตั้งค่าอัตราการไหลตามต้องการที่เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส (0 – 500 sccm) ซึ่ง Channel 1 คือ แก๊สออกซิเจนหรืออากาศ และ Channel 2 คือ แก๊สไฮโดรเจน ส่วนของแก๊สไนโตรเจนจะใช้ทั้งสอง Channel โดยสลับทางเดินของแก๊สโดยใช้วาล์วเข้าเป็นตัวควบคุมทิศทางการไหลของแก๊ส
15. เมื่อต้องการจะป้อนแก๊สให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ให้เปิดแก๊สที่ต้องการใช้ที่วาล์วหัวถังของแก๊ส แล้วจึงเปิดเครื่องควบคุมความดันที่หัวถังให้ได้ความดันขาออกตามต้องการ ซึ่งโดยปกติเท่ากับ 20 psi ยกเว้นในกรณีที่ศึกษามลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีความกว้างของสันกันระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 20.5 mm. จึงใช้ความดันเท่ากับ 50 psi แล้วจึงมาเปิดสวิตช์วาล์วที่เครื่องวัดอัตราการไหลแต่ละ Channel เพื่อให้แก๊สไหลเข้าสู่หน่วยทดสอบ
16. ก่อนจะทำการทดลองควรผ่านแก๊สไนโตรเจนกับหน่วยทดสอบประมาณ 20 นาที โดยตั้งอัตราการไหลของแก๊สทั้ง 2 Channel ไว้ที่ 200 sccm ก่อนด้วยสาเหตุดังนี้
 - เพื่อเป็นการไล่สิ่งสกปรกค้างอยู่ในหน่วยทดสอบออกก่อน
 - เพื่อตรวจสอบการรั่วของแก๊สโดยใช้น้ำยาในการตรวจสอบรั่วภายในหน่วยทดสอบ
 - เพื่อใช้วัดค่าความชื้นของแก๊สก่อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงที่ส่วนวัดความชื้น

17. ทำการตั้งค่าเพื่อวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat โดยใช้โปรแกรม GPES เลือกวิธีแบบ Chrono methods (interval time > 0.1 sec) และเลือกวิธีแบบ Amperometry แล้วจึงตั้งค่าความต่างศักย์เพื่อให้เครื่องวัดค่ากระแสจากเซลล์เชื้อเพลิง
18. เมื่อมีการป้อนแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง รอจนกระทั่งค่าความต่างศักย์ในขณะที่ยังไม่มีการจ่ายกระแสไฟของเซลล์เชื้อเพลิง (open circuit voltage) ที่ได้มีค่าคงที่ กดปุ่ม Cell Enable ให้อยู่ในตำแหน่งเปิดที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat จึงกดปุ่ม start ที่โปรแกรม GPES เพื่อเริ่มบันทึกค่ากระแสที่ได้ ณ ที่ค่าความต่างศักย์ต่าง ๆ ที่ตั้งไว้

3.6 ขั้นตอนภายหลังการทดลอง

1. เมื่อเสร็จการสิ้นการวัดค่ากระแสที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat ปิดปุ่ม Cell Enable และทำการบันทึกผลการทดลองที่ได้
2. ปิดสวิตช์วาล์วที่เครื่องวัดอัตราการไหล แล้วจึงปิดวาล์วที่หัวถังแก๊สทุกถัง
3. ปิดวาล์วขาเข้าทุกตัว และค่อย ๆ เปิดวาล์วขาออกทีละตัวเพื่อลดความดันจากแก๊สที่ค้างอยู่ในท่อระหว่างถังแก๊สกับเครื่องวัดอัตราการไหล โดยที่วาล์วขาออกจะต่อท่อลงไปยังขวดที่มีน้ำอยู่เพื่อลดการแพร่กระจายของแก๊ส รอจนกระทั่งเกจที่วัดความดันที่เครื่องควบคุมความดันที่ถังแก๊สลดลงจนถึง 0 ทั้งขาเข้าและขาออก แล้วจึงเปิดวาล์วขาออกของแก๊สอีกถังหนึ่ง ทำในลักษณะเดียวกัน
4. เมื่อลดความดันในท่อแก๊สหมด จึงทำการปิดวาล์วขาออกของแก๊สทุกตัว
5. ปิดสวิตช์ของตัวให้ความร้อนทุกตัวที่แผงสวิตช์ควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้า
6. ปิดสวิตช์ของเครื่องควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงที่แผงสวิตช์ควบคุมแหล่งไฟฟ้า และจึงปิดสวิตช์หลัก
7. กดปุ่ม stop ที่โปรแกรม Lab-View ที่ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิในส่วนระเหยน้ำ แล้วจึงปิดโปรแกรม
8. ปิดโปรแกรม GPES แล้วจึงปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ ต่อจากนั้นจึงปิดสวิตช์ที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat
9. แยกส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

บทที่ 4

ผลและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการวิจัยออกเป็นสองขั้นตอนกล่าวคือ ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของช่องทางไหลของแก๊สที่มีต่อการถ่ายโอนมวลสารภายในเซลล์เชื้อเพลิง และขั้นตอนที่สองเป็นการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการใช้รูปแบบของช่องทางไหลของแก๊สที่เหมาะสม ซึ่งออกแบบมาจากผลของแบบจำลองในขั้นตอนที่หนึ่ง ดังนั้นจึงแบ่งการเสนอผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัยออกเป็นสองส่วน

4.1 ผลและการอภิปรายผลของแบบจำลองกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนบนโปรแกรม FLUENT 4.5

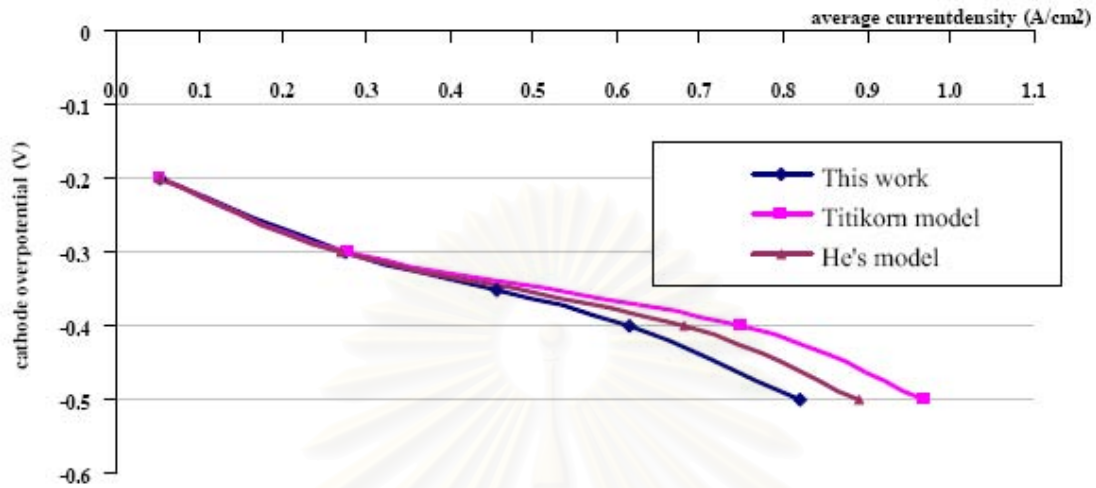
ผลจากการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนสามารถใช้ในการทำนายพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงได้ในระดับหนึ่ง โดยในส่วนของ การวิเคราะห์ผลนั้นเริ่มจากการวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น จากนั้นจึงนำแบบจำลองดังกล่าวไปทำการศึกษาถึงอิทธิพลของรูปแบบของช่องทางไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฟิวเซลล์ และแคโทดตามลำดับ

4.1.1. การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองบนโปรแกรม Fluent 4.5

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น เริ่มโดยการพัฒนาแบบจำลองให้มีลักษณะคล้ายคลึงกับแบบจำลองในงานวิจัยของ He และคณะ [5] ซึ่งเป็นแบบจำลองสองมิติ สองภูมิภาคในภาวะคงตัว ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนฝั่งขั้วแคโทดที่ใช้ช่องทางไหลของแก๊สแบบ interdigitated design สำหรับงานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองสามมิติ หนึ่งภูมิภาคของกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 7×7 ตารางมิลลิเมตร ฝั่งขั้วแคโทดที่ใช้ช่องทางไหลของแก๊สแบบ interdigitated design จากนั้นจึงนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองของ He และคณะเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่งานวิจัยนี้ได้พัฒนาขึ้น เพราะแบบจำลองในงานวิจัยของ He และคณะ [5] ได้ผ่านการยืนยันความถูกต้องโดยเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองมาแล้ว

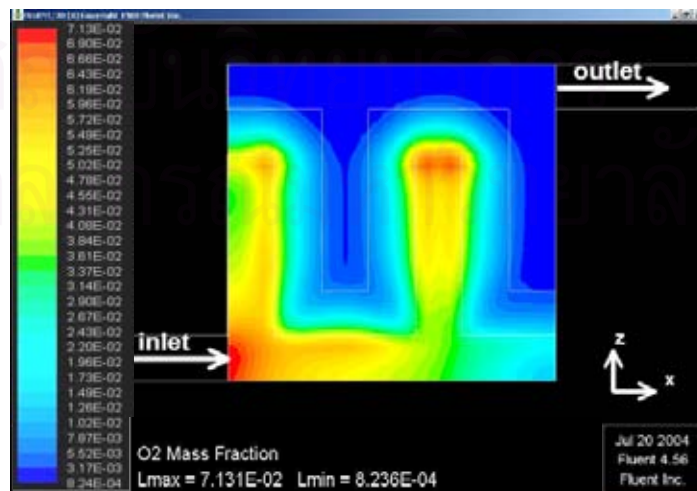
กรณีศึกษาที่นำมาจำลองเปรียบเทียบกันคือ กำหนดภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สารออกซิไดซ์ที่ใช้คืออากาศ ความดันขาเข้าเท่ากับ 1.007 บรรยากาศ และความดันขาออกเท่ากับ 1 บรรยากาศ จากนั้นทำการจำลองโดยปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีทางด้านขั้วแคโทด ($\eta_{act, cath}$) เพื่อหาปริมาณความหนาแน่นกระแสที่ได้

จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับแบบจำลองของ He และคณะ พบว่าแบบจำลองทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสและที่ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวฝั่งขั้วแคโทดต่างๆ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.1



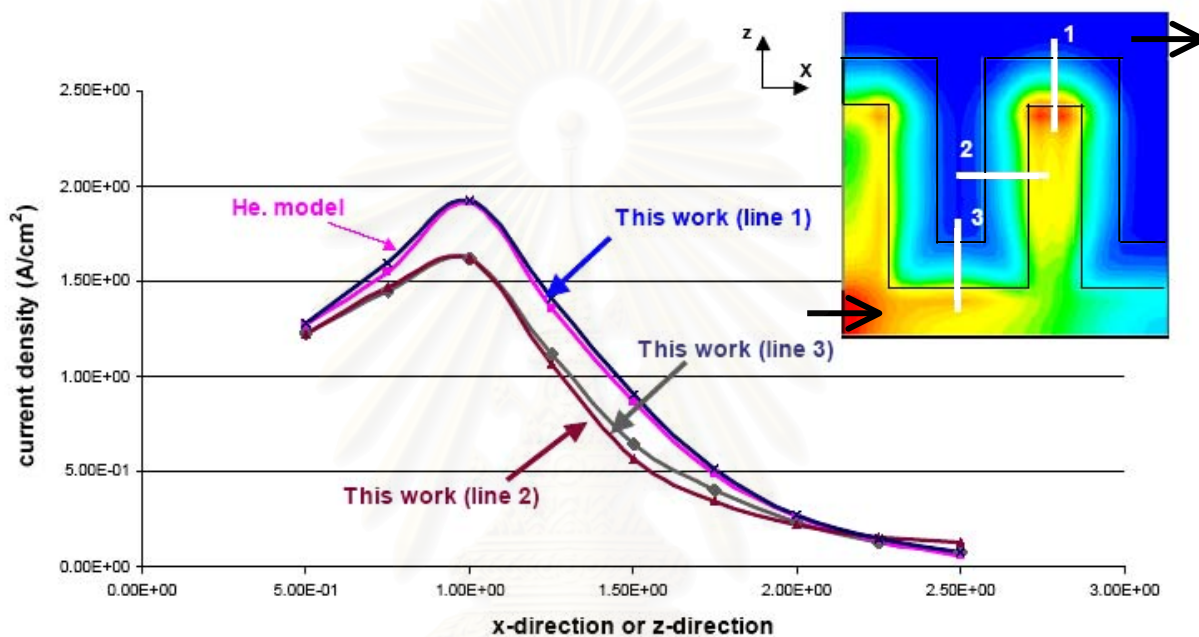
รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบผลการจำลองกับงานวิจัยของ He และคณะ [5] และงานวิจัยของ ลูติกร [9]

แต่พบว่าที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวที่ฝั่งขั้วแคโทดมีค่าสูงๆ ค่าความหนาแน่นกระแสที่ทำนายได้จากแบบจำลองของงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่าค่าความหนาแน่นกระแสที่ทำนายได้จากแบบจำลองในงานวิจัยของ He และคณะ และจากงานวิจัยของ ลูติกร กล่าวคือค่าความหนาแน่นกระแสที่คำนวณได้จากงานวิจัยนี้ที่ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวฝั่งขั้วแคโทดมีค่า 0.5 โวลต์มีค่าต่ำกว่าค่าความหนาแน่นกระแสที่คำนวณได้จากงานวิจัยของ He และคณะ [5] อยู่ร้อยละ 9 และร้อยละ 14 เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ ลูติกร [9] ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงการกระจายค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนซึ่งเป็นสารตั้งต้น ณ บริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่บริเวณช่องทางการไหลของแก๊สขาออกมีค่าต่ำมาก ซึ่งหมายถึงการถูกใช้หมดของแก๊สออกซิเจนในการเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การกระจายค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่บริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา

และเนื่องจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองสามมิติมีการเพิ่มมิติความยาวของช่องทางการไหลของแก๊สเข้ามา และขอบเขตของแบบจำลองที่สร้างขึ้นได้พิจารณา รวมถึงท่อสำหรับช่องทางการไหลของแก๊สขาเข้า และท่อของช่องทางการไหลของแก๊สขาออกซึ่งไม่สามารถทำได้ในแบบจำลองสองมิติ ดังนั้นแบบจำลองสามมิติจึงสามารถทำนายการกระจายค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนได้อย่างสมบูรณ์กว่าแบบจำลองสองมิติ สำหรับผลการทำนายค่าความหนาแน่นกระแสที่ต่ำกว่างานวิจัยของ He และคณะ [5] และวิทยานิพนธ์ของ สุทธิกร [9] เนื่องจากอิทธิพลของความยาวของช่องทางการไหลของแก๊สขาออกดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบการกระจายค่าความหนาแน่นกระแส (A/cm^2) ที่ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวฝั่งขั้ว แคโทดมีค่า 0.5 โวลต์ จากกึ่งกลางช่องทางการไหลของแก๊สขาเข้าถึงกึ่งกลางช่องทางการไหลของแก๊สขาออกของแบบจำลอง กับงานวิจัยของ He และคณะ [5]

จากกราฟรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงการกระจายค่าความหนาแน่นกระแส 3 บริเวณ คือ line 1 line 2 และ line 3 พบว่าผลการทำนายค่าความหนาแน่นกระแสที่บริเวณ line 1 ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทำนายที่ได้จากงานวิจัยของ He และคณะ ส่วนผลการทำนายค่าความหนาแน่นกระแส ณ บริเวณ line 2 และ line 3 มีค่าต่ำกว่าผลการทำนายจากงานวิจัยของ He และคณะ ทั้งนี้เนื่องจากในปรากฏการณ์จริงจะมีแก๊สอยู่ในช่องทางการไหลของแก๊สขาออกทำให้ความดันภายในช่องทางการไหลของแก๊สขาออกมีค่าสูงกว่า 1 บรรยากาศ หรือความดันลดต่ำกว่าในกรณีของ He และคณะ และงานวิจัยของ สุทธิกร ส่งผลให้แรงขับเคลื่อนของไหล ณ บริเวณดังกล่าวลดลงซึ่งเป็นการลดอิทธิพลของกลไกการถ่ายโอนมวลสารด้วยการพาภายในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนทำให้อัตราการถ่ายโอนแก๊สออกซิเจนไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงยังผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ณ บริเวณดังกล่าวลดลง ดังนั้นในงานวิจัยของ He และคณะ และงานวิจัยของ สุทธิกร ที่มีการกำหนดเงื่อนไขขอบที่บริเวณผิวร่วมระหว่างส่วน

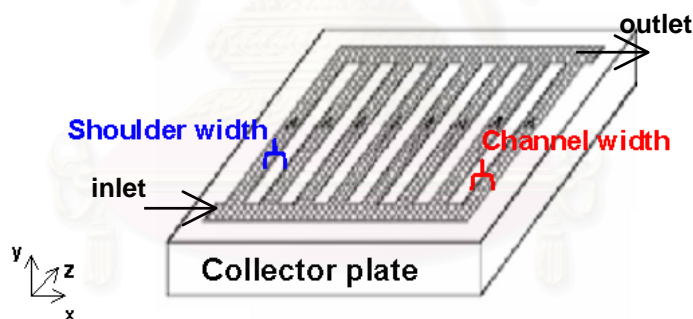
ประกอบเสร็จของชั้นอิเล็กโทรดและเยื่อแผ่นและช่องทางการไหลของแก๊สให้ออกให้มีความดันเท่ากับ 1 บรรยากาศ จึงเป็นสาเหตุของการทำนายค่าความหนาแน่นกระแสได้สูงเกินกว่าผลในงานวิจัยนี้

4.1.2. ผลการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝังขั้วแอโนด

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝังขั้วแอโนดขนาด 2.25×2.25 ตารางเซนติเมตร โดยการกำหนดให้ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เข้ามามีค่าคงที่เท่ากับ 2.5 A/cm^2 เทียบเท่า หรือ $6.4 \times 10^{-5} \text{ mol H}_2/\text{sec}$ และความดันที่บริเวณทางออกเท่ากับ 1 บรรยากาศ จากนั้นจึงทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สและตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สเพื่อทำนายค่าความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีฝังขั้วแอโนด ($\eta_{\text{act,anode}}$) ค่าต่างๆ

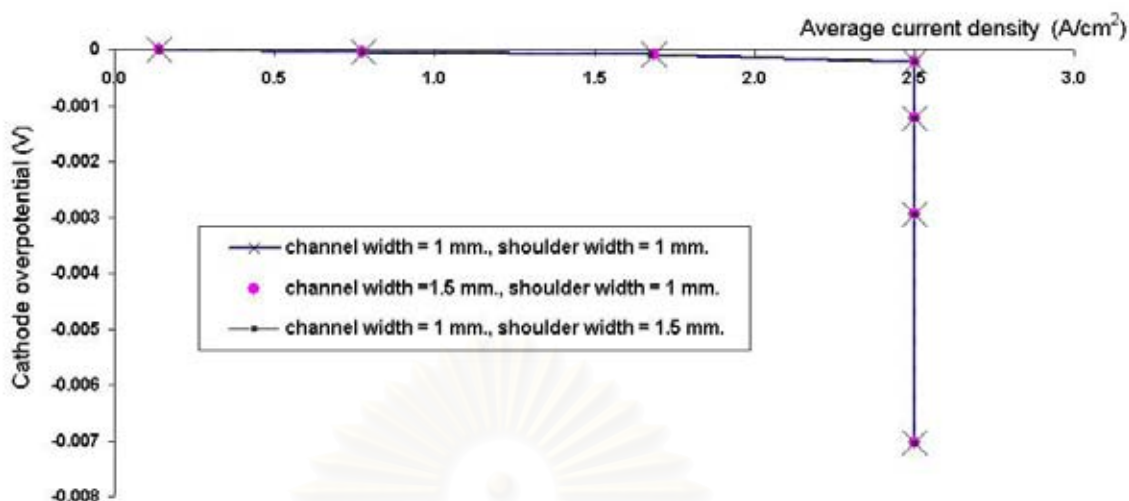
4.1.2.1. อิทธิพลของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional design

สำหรับตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional design ที่ได้ทำการศึกษาประกอบด้วย ความกว้างของช่องทางการไหลของแก๊ส (CH) และความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส (S) ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional design

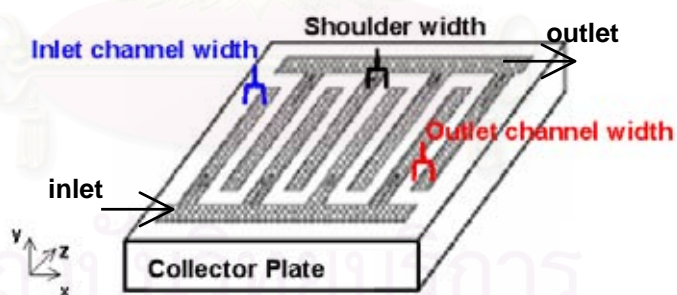
โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝังขั้วแอโนดที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional design ที่มีช่องทางการไหลแตกต่างกัน 3 แบบคือ CH = 1 mm., S = 1 mm.; CH = 1.5 mm., S = 1 mm.; CH = 1 mm., S = 1.5 mm. จากกราฟรูปที่ 4.5 พบว่าขนาดความกว้างของช่องทางการไหลของแก๊ส และขนาดความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สไม่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์ฝังขั้วแอโนด



รูปที่ 4.5 อิทธิพลของตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional design ต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแอโนด

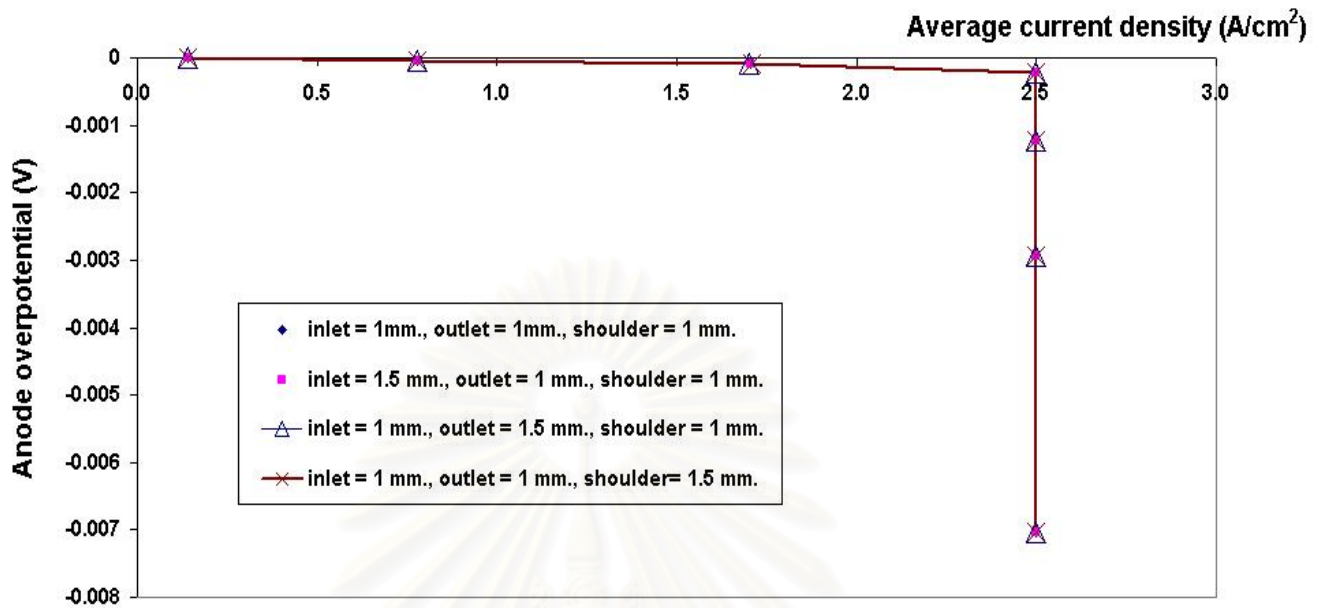
4.1.2.2 อิทธิพลของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design

สำหรับตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่ได้ทำการศึกษาประกอบด้วย ความกว้างของช่องทางการไหลของแก๊สขาเข้า (CH_{in}) ความกว้างของช่องทางการไหลของแก๊สขาออก (CH_{out}) และความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส (S) ดังรูปที่ 4.6

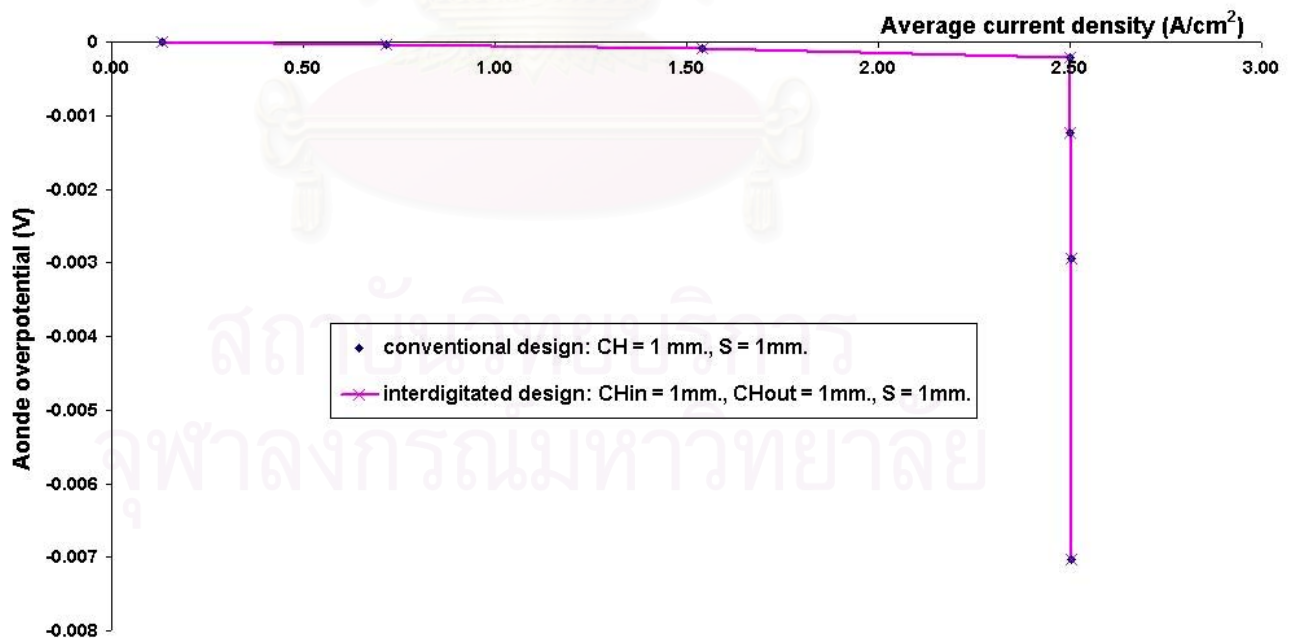


รูปที่ 4.6 ตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design

โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแอโนดที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีช่องทางการไหลแตกต่างกัน 4 แบบคือ $CH_{in} = 1 \text{ mm.}$, $CH_{out} = 1 \text{ mm.}$, $S = 1 \text{ mm.}$; $CH_{in} = 1.5 \text{ mm.}$, $CH_{out} = 1 \text{ mm.}$, $S = 1 \text{ mm.}$; $CH_{in} = 1 \text{ mm.}$, $CH_{out} = 1.5 \text{ mm.}$, $S = 1 \text{ mm.}$; $CH_{in} = 1 \text{ mm.}$, $CH_{out} = 1 \text{ mm.}$, $S = 1.5 \text{ mm.}$ จากกราฟรูปที่ 4.7 พบว่าขนาดความกว้างของช่องทางการไหลของแก๊สขาเข้า ขนาดความกว้างของช่องทางการไหลของแก๊สขาออก และขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สไม่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแอโนด



รูปที่ 4.7 อิทธิพลของตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแอโนด



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design และ conventional design ต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแอโนด

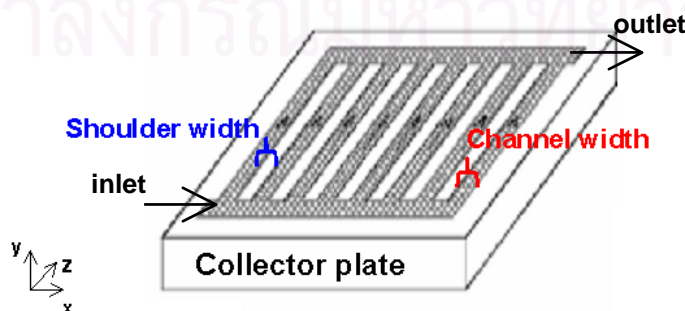
จากรูปที่ 4.5 4.7 และ 4.8 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบช่องทางไหลทั้งสองแบบ พบว่ามีประเด็นที่น่าสนใจคือ รูปแบบช่องทางไหลของแก๊สและขนาดของตัวแปรของช่องทางไหลของแก๊สทั้งสองชนิดไม่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแอโนด ทั้งนี้เนื่องจากสารป้อนเข้าทางฝั่งขั้วแอโนดเป็นแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การแพร่ในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนสูงถึง $1.89 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ [4] ผนวกกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนดำเนินไปด้วยอัตราเร็วที่ไม่สูงนัก ซึ่งทราบได้จากค่าความหนาแน่นกระแสที่เซลล์สามารถสร้างได้มีค่าไม่เกิน 2.5 A/cm^2 ($2.5 \times 10^4 \text{ A/m}^2$) หรือคิดเป็นอัตราการถูกใช้ไปของไฮโดรเจนเนื่องจากปฏิกิริยาเท่ากับ $1.3 \times 10^{-5} \text{ mol/cm}^2\text{-sec}$ ($1.3 \times 10^{-1} \text{ mol/m}^2\text{-sec}$) ดังนั้นปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ฝั่งขั้วแอโนดจึงมิได้ถูกควบคุมด้วยอัตราการถ่ายโอนแก๊สไฮโดรเจนไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งกลไกการถ่ายโอนแก๊สภายในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนถูกจำกัดโดยรูปแบบของช่องทางไหลของแก๊ส ดังนั้นรูปแบบช่องทางไหลของแก๊สไม่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแอโนด

4.1.3. ผลการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบช่องทางไหลของแก๊สต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทด

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบช่องทางไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทดขนาด 2.25×2.25 ตารางเซนติเมตร โดยการกำหนดปริมาณของอากาศขาเข้าให้มีค่าคงที่เท่ากับ 2.5 A/cm^2 เทียบเท่า หรือ $3.2 \times 10^{-5} \text{ mol O}_2/\text{sec}$ และกำหนดความดันที่บริเวณทางออกเท่ากับ 1 บรรยากาศ จากนั้นจึงทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบช่องทางไหลของแก๊สเพื่อทำนายค่าความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีฝั่งขั้วแคโทด ($\eta_{\text{act,cat}}$) ค่าต่างๆ

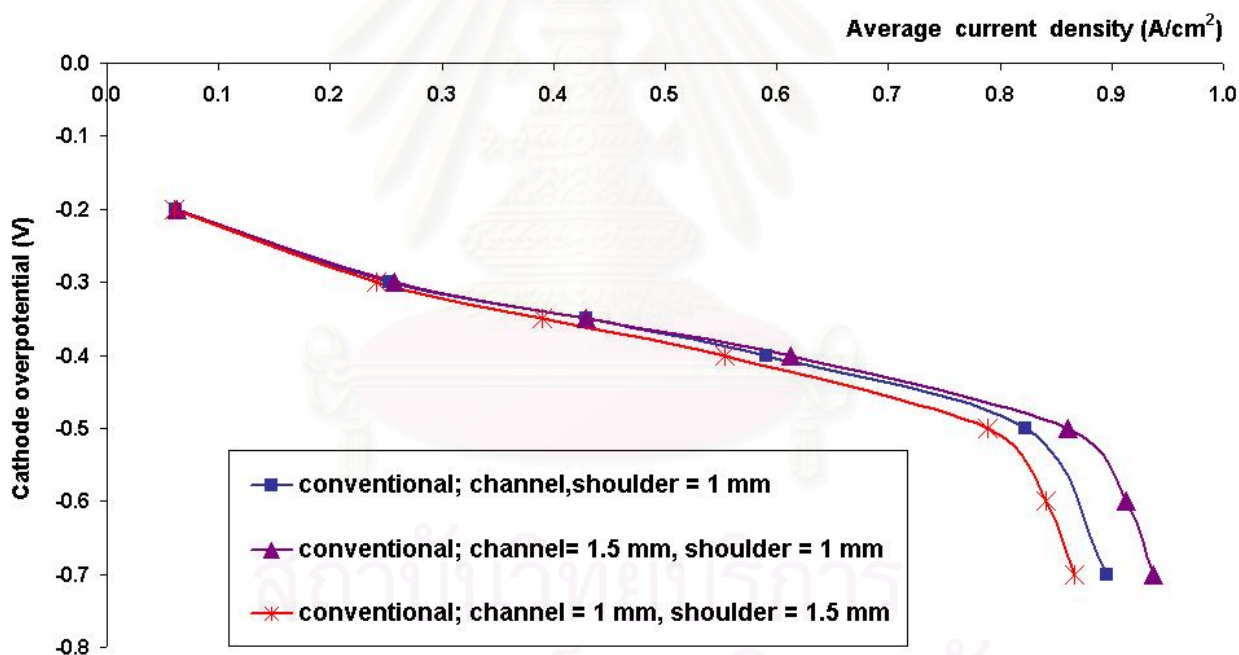
4.1.3.1. อิทธิพลของช่องทางไหลของแก๊สแบบ conventional design

สำหรับตัวแปรของช่องทางไหลของแก๊สแบบ conventional design ที่ได้ทำการศึกษาประกอบด้วย ความกว้างของช่องทางไหลของแก๊ส (CH) และความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางไหลของแก๊ส (S) ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ตัวแปรของช่องทางไหลของแก๊สแบบ conventional design

โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทดที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional design ที่มีช่องทางการไหลแตกต่างกัน 3 แบบคือ CH = 1 mm., S = 1 mm.: CH = 1.5 mm., S = 1 mm.: CH = 1 mm., S = 1.5 mm. จากรูปที่ 4.10 พบว่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทดเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional design ที่มี CH = 1.5 mm., S = 1 mm. และสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทดจะลดลงเมื่อมีการใช้ช่องทางการไหลแบบ conventional design ที่มี CH = 1 mm., S = 1.5 mm. นอกจากนั้นอิทธิพลของความกว้างของช่องทางการไหลของแก๊ส และสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส ต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทดมีความสำคัญมากขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีฝั่งขั้วแคโทดมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการถ่ายโอนมวลสารภายในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนจะถูกควบคุมด้วยกลไกการแพร่ เมื่อมีการใช้ช่องทางการไหลของแก๊สเป็นแบบ conventional design และสารป้อนเข้าทางฝั่งขั้วแคโทดคืออากาศแห้งซึ่งประกอบด้วยแก๊สออกซิเจนเพียงร้อยละ 21 โดยโมล และแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 79 โดยโมล นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊สออกซิเจนในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนมีค่าต่ำคือ $3.28 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$



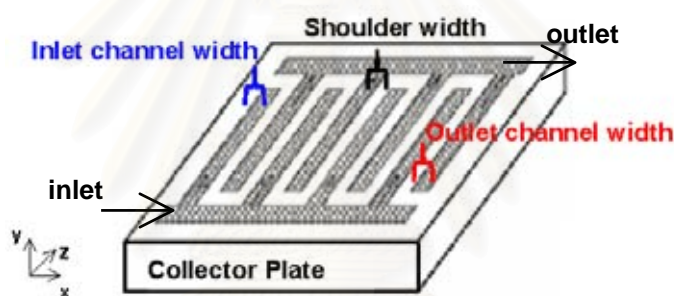
รูปที่ 4.10 อิทธิพลของตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional design ต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด

ดังนั้นอัตราการถ่ายโอนแก๊สออกซิเจนไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาในส่วนที่ถูกปกคลุมด้วยสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สจึงเป็นไปอย่างช้าๆ การเพิ่มความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สจึงเปรียบเสมือนการเพิ่มความต้านทานในการถ่ายโอนแก๊สออกซิเจนไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาดัง Fick's first law ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของขนาดความกว้างของช่องทางการไหลของแก๊สเป็น 1.5 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้ความกว้างของสันมีค่าคงที่เท่ากับ 1 มิลลิเมตร เป็นเสมือน

การลดความต้านทานในการถ่ายโอนแก๊สออกซิเจนไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากการลดพื้นที่ในส่วนของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลด้วยเงื่อนไขในการจัดวางช่องทางการไหลของแก๊สลงในพื้นที่ 2.25×2.25 ตารางเซนติเมตร ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจนที่ฝั่งขั้วแคโทดถูกควบคุมด้วยอัตราการถ่ายโอนแก๊สออกซิเจนไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีค่าหนึ่งๆ เซลล์จะสามารถสร้างกระแสได้มากขึ้นเมื่อมีการใช้ช่องทางการไหลของแก๊สที่สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายโอนแก๊สออกซิเจนไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาได้

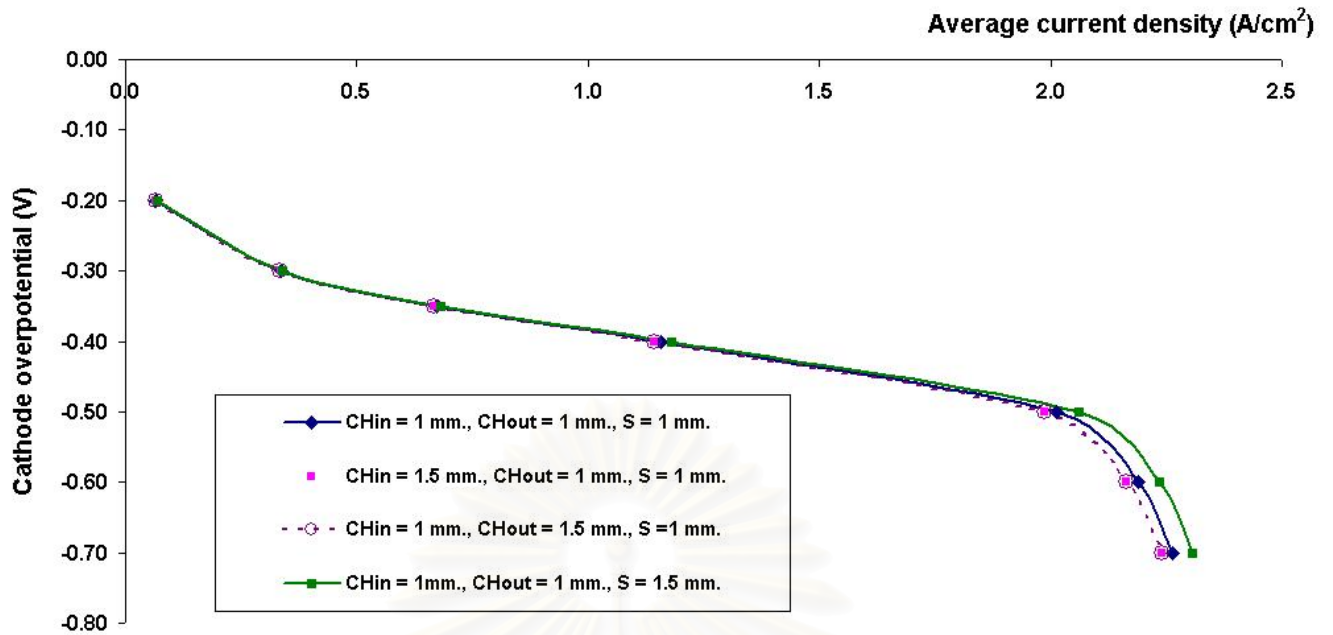
4.1.3.2. อิทธิพลของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design

สำหรับตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่ได้ทำการศึกษาประกอบด้วย ความกว้างของช่องทางการไหลของแก๊สขาเข้า (CH_{in}) ความกว้างของช่องทางการไหลของแก๊สขาออก (CH_{out}) และความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส (S) ดังรูปที่ 4.11

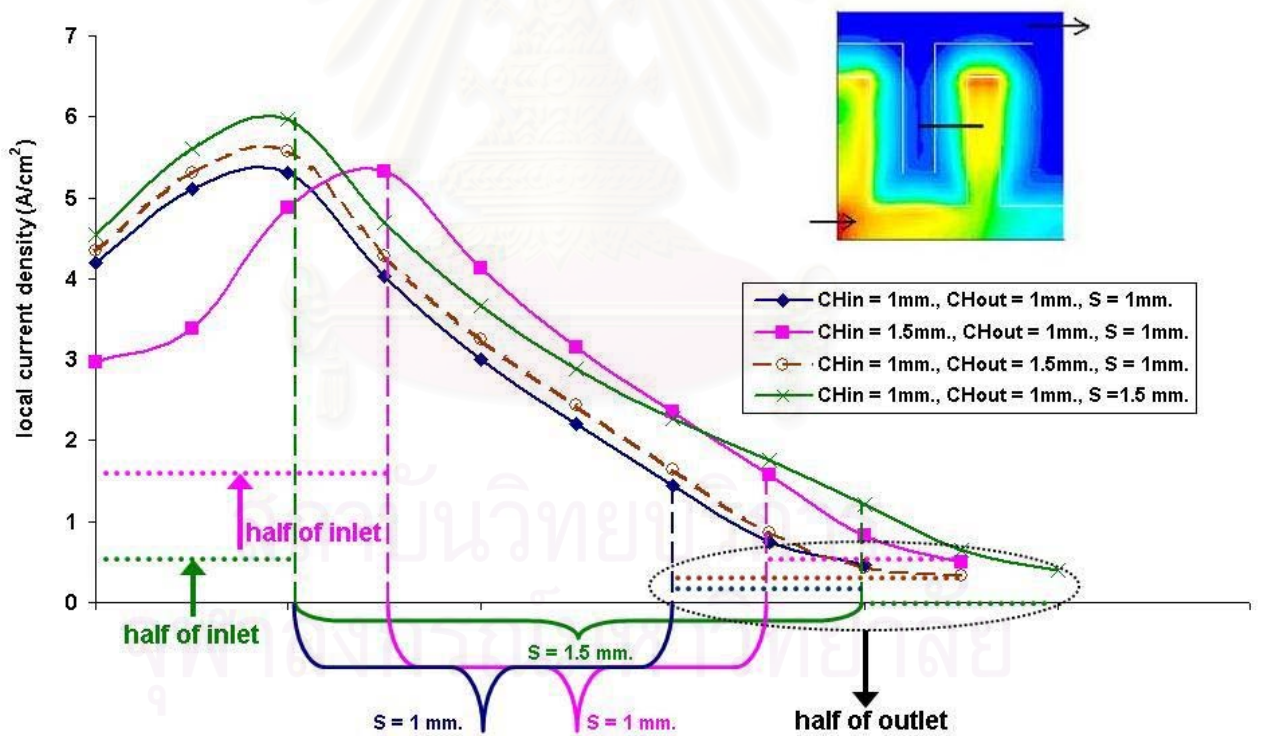


รูปที่ 4.11 ตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design

โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทดที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มี $CH_{in} = 1 \text{ mm.}$, $CH_{out} = 1 \text{ mm.}$, $S = 1 \text{ mm.}$; $CH_{in} = 1.5 \text{ mm.}$, $CH_{out} = 1 \text{ mm.}$, $S = 1 \text{ mm.}$; $CH_{in} = 1 \text{ mm.}$, $CH_{out} = 1.5 \text{ mm.}$, $S = 1 \text{ mm.}$; $CH_{in} = 1 \text{ mm.}$, $CH_{out} = 1 \text{ mm.}$, $S = 1.5 \text{ mm.}$ จากรูปที่ 4.12 พบว่าตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทดคือขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส และตัวแปรนี้จะมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทดมากขึ้นเมื่อเซลล์ทำงานที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวสูงๆ ซึ่งในที่นี้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มี $CH_{in} = 1 \text{ mm.}$, $CH_{out} = 1 \text{ mm.}$, $S = 1.5 \text{ mm.}$ สามารถให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทดที่ดีที่สุด ในขณะที่การเพิ่มขนาดความกว้างของช่องทางการไหลของแก๊สขาเข้า หรือช่องทางการไหลของแก๊สขาออก เป็น 1.5 มิลลิเมตร จะทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทดลดลง



รูปที่ 4.12 อิทธิพลของตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด



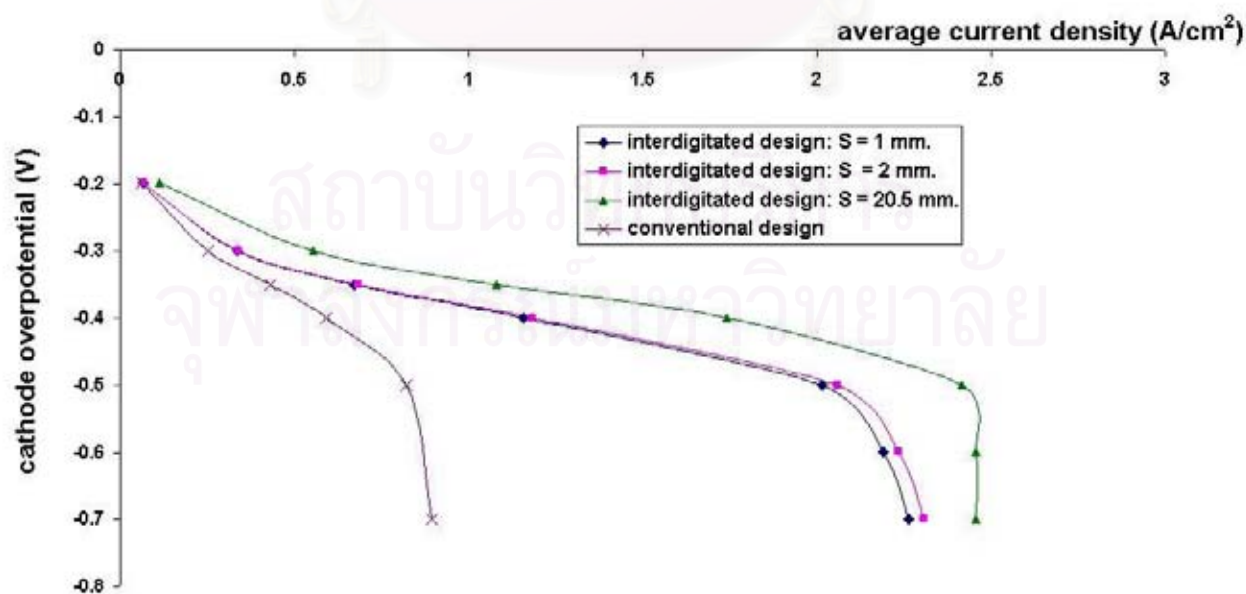
รูปที่ 4.13 อิทธิพลของตัวแปรของช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีต่อการกระจายค่าความหนาแน่นกระแส จากกึ่งกลางช่องทางการไหลของแก๊สขาเข้าถึงกึ่งกลางช่องทางการไหลของแก๊สขาออก ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากปฏิกิริยาฝั่งขั้วแคโทดมีค่าเท่ากับ 0.7 โวลต์

สำหรับปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดยรูปที่ 4.13 ซึ่งแสดงการกระจายค่าความหนาแน่นกระแสจากกึ่งกลางช่องทางกรไหลของแก๊สขาเข้าถึงกึ่งกลางช่องทางกรไหลของแก๊สขาออกที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากปฏิกิริยาฝั่งขั้วแคโทดเท่ากับ 0.7 โวลต์ ซึ่งเป็นช่วงที่สมรรถนะของเซลล์ถูกควบคุมด้วยอัตราการถ่ายโอนแก๊สออกซิเจนไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา จากรูปพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทดสามารถสร้างกระแสไฟฟ้า ณ ตำแหน่งใดๆได้ในระดับค่าความหนาแน่นกระแสที่สูงที่สุดเมื่อใช้ช่องทางกรไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มี $CH_{in} = 1 \text{ mm.}$, $CH_{out} = 1 \text{ mm.}$, $S = 1.5 \text{ mm.}$ ทั้งนี้เนื่องจากขนาดความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางกรไหลของแก๊สที่เพิ่มขึ้นได้ส่งผลให้เกิดค่าความดันลดระหว่างช่องทางกรไหลของแก๊สขาเข้าและขาออกมากขึ้น ซึ่งค่าความดันลดที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดขึ้นจากการที่ระบบต้องการขับเคลื่อนให้แก๊สของสารตั้งต้นในปริมาณที่กำหนดไว้ในเงื่อนไขขอบเคลื่อนที่ข้ามผ่านชั้นของขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนไปยังช่องทางกรไหลของแก๊สขาออก ดังนั้นเมื่อระยะทางระหว่างช่องทางกรไหลของแก๊สขาเข้าและขาออกเพิ่มขึ้นระบบจึงจำเป็นต้องใช้ความดันในการขับเคลื่อนแก๊สเหล่านี้เพิ่มขึ้นดังสมการการไหลของแบร์นูลลี (Bernoulli equation) การที่ระบบมีความดันลดระหว่างช่องทางกรไหลของแก๊สขาเข้าและขาออกมากขึ้นจะส่งผลให้กลไกการถ่ายโอนมวลสารภายในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนถูกควบคุมด้วยกลไกการพามากขึ้น จึงทำให้อัตราการถ่ายโอนแก๊สออกซิเจนไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เซลล์จึงสามารถสร้างกระแสไฟฟ้าได้ในระดับค่าความหนาแน่นกระแสที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับเซลล์ที่ใช้ช่องทางกรไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่ขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางกรไหลของแก๊สขาเข้าและขาออก 1 มิลลิเมตร สำหรับการเพิ่มขึ้นของขนาดของช่องทางกรไหลของแก๊สขาเข้าและขาออกมิได้ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นกระแส ณ ตำแหน่งใดๆอย่างเห็นได้ชัด และการที่เซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทดมีสมรรถนะที่ลดลงเมื่อใช้ช่องทางกรไหลที่มี $CH_{in} = 1.5 \text{ mm.}$, $CH_{out} = 1 \text{ mm.}$, $S = 1 \text{ mm.}$ และ $CH_{in} = 1 \text{ mm.}$, $CH_{out} = 1.5 \text{ mm.}$, $S = 1 \text{ mm.}$ เป็นผลมาจากการลดลงของจำนวนของสันกั้นระหว่างช่องทางกรไหลของแก๊สเนื่องจากเงื่อนไขในการจัดวางช่องทางกรไหลภายในพื้นที่ 2.25×2.25 ตารางเซนติเมตร ซึ่งทำให้พื้นที่รวมของสันกั้นระหว่างช่องทางกรไหลของแก๊สในพื้นที่ 2.25×2.25 ตารางเซนติเมตรลดลง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าตัวแปรของช่องทางกรไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทดคือขนาดความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางกรไหลของแก๊ส

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลจากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ He และคณะ พบว่ามีความขัดแย้งกันเกิดขึ้น กล่าวคือในงานวิจัยของ He และคณะ ได้สรุปไว้ว่าการเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทดสามารถทำได้โดยการเพิ่มความกว้างของช่องทางกรไหลของแก๊สทั้งขาเข้าและขาออก และลดความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางกรไหลของแก๊ส แต่ในงานวิจัยนี้ก็กลับพบว่าการเพิ่มขึ้นของสันกั้นระหว่างช่องทางกรไหลของแก๊สเป็นการพัฒนาสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลองของ He และคณะ ได้มีการกำหนดเงื่อนไขขอบเป็นความดันขาเข้าและขาออกของแก๊สซึ่งมีค่าคงที่เท่ากับ 1.007 และ 1 บรรยากาศ ดังรูปที่ 3.2 ดังนั้นความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางกรไหลของ

แก๊สที่ลดลงจะส่งผลให้มีอากาศไหลผ่านขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากกว่ากรณีของช่องทางการไหลที่มีขนาดสั้นกันที่กว้างกว่า ทั้งนี้สามารถอธิบายได้โดยเปรียบเทียบกับปรากฏการณ์การไหลในท่อตรง ดังนั้นการกำหนดเงื่อนไขขอบเป็นความดันของแก๊สขาเข้าที่คงที่จึงทำให้การทำนายอิทธิพลของสั้นกันระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทดไม่สอดคล้องกับแบบจำลองในงานวิจัยนี้ ซึ่งแบบจำลองในงานวิจัยนี้ได้กำหนดเงื่อนไขขอบเป็นอัตราการป้อนเข้าของอากาศให้มีค่าคงที่ที่ 2.5 A/cm^2 เทียบเท่า ซึ่งการกำหนดเงื่อนไขขอบดังกล่าวในงานวิจัยนี้จะให้ความสอดคล้องกับการทดลองเพื่อทดสอบสมรรถนะของเซลล์มากกว่าการกำหนดเงื่อนไขขอบในงานวิจัยของ He และคณะ

รูปที่ 4.14 เป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทดที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional design และ interdigitated design จากรูปพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทดที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design สามารถให้สมรรถนะของเซลล์ที่ดีกว่าการใช้ช่องทางการไหลแบบ conventional design อยู่ประมาณ 25-100% ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยกลไกการถ่ายโอนแก๊สออกซิเจนภายในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนเมื่อเซลล์มีการใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design จะถูกควบคุมด้วยกลไกการพา และการถ่ายโอนแก๊สออกซิเจนจะถูกควบคุมด้วยกลไกการแพร่เมื่อมีการใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional design กับเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด และด้วยเหตุนี้จึงสามารถกล่าวได้ว่ากลไกการถ่ายโอนแก๊สออกซิเจนเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีอิทธิพลสำคัญต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทด และกลไกการถ่ายโอนมวลสารนี้ได้ถูกกำหนดโดยรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊ส หรืออาจกล่าวได้ว่ารูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลสำคัญต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 4.14 อิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด

นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวที่ฝั่งขั้วแคโทดมีค่าสูงกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวที่ฝั่งขั้วแอโนดมาก ซึ่งปรากฏการณ์นี้ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการของ Butler-Volmer [6]

$$i = i_0 \frac{c(0,t)}{c_{ref}} \exp\left(\frac{\alpha \eta_{act} F}{RT}\right)$$

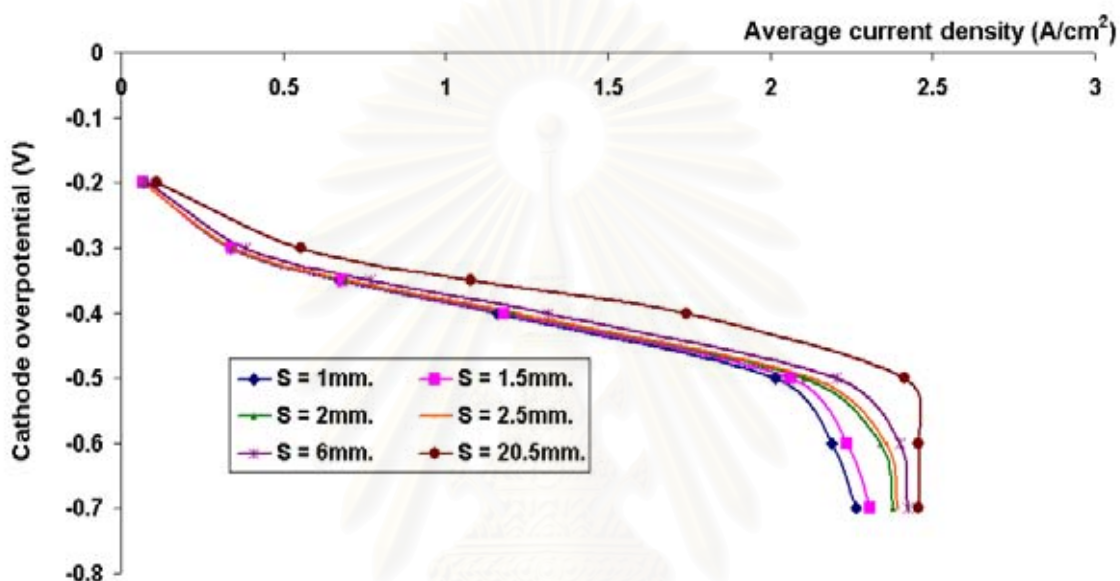
ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของค่าความหนาแน่นกระแสสมมูลของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (i_0) ซึ่งเปรียบได้กับค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาใน Arrhenius's equation (k_0) ในกรณีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนนี้ค่าความหนาแน่นกระแสสมมูลของปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจนที่ฝั่งขั้วแคโทดมีค่าต่ำกว่าค่าความหนาแน่นกระแสสมมูลของปฏิกิริยาออกซิเดชันของแก๊สไฮโดรเจนฝั่งขั้วแอโนดอยู่มาก กล่าวคือค่า i_{0_cath} มีค่าเท่ากับ 100 A/m^2 และค่า i_{0_anod} มีค่าเท่ากับ $5 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงธรรมชาติของความล่าช้าในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ฝั่งขั้วแคโทด ดังนั้นเมื่อปฏิกิริยาทั้งสองฝั่งของเซลล์จำเป็นต้องดำเนินไปด้วยอัตราเร็วที่เท่ากัน ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ฝั่งขั้วแคโทดจึงจำเป็นต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวที่มากกว่าฝั่งขั้วแอโนดเพื่อผลักดันให้มีการเกิดปฏิกิริยาในอัตราเร็วขึ้นๆ

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนถูกควบคุมด้วยปรากฏการณ์ของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด

4.1.3.3 อิทธิพลของขนาดความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สขาเข้าและขาออก (S) ของช่องทางการไหลแบบ interdigitated design

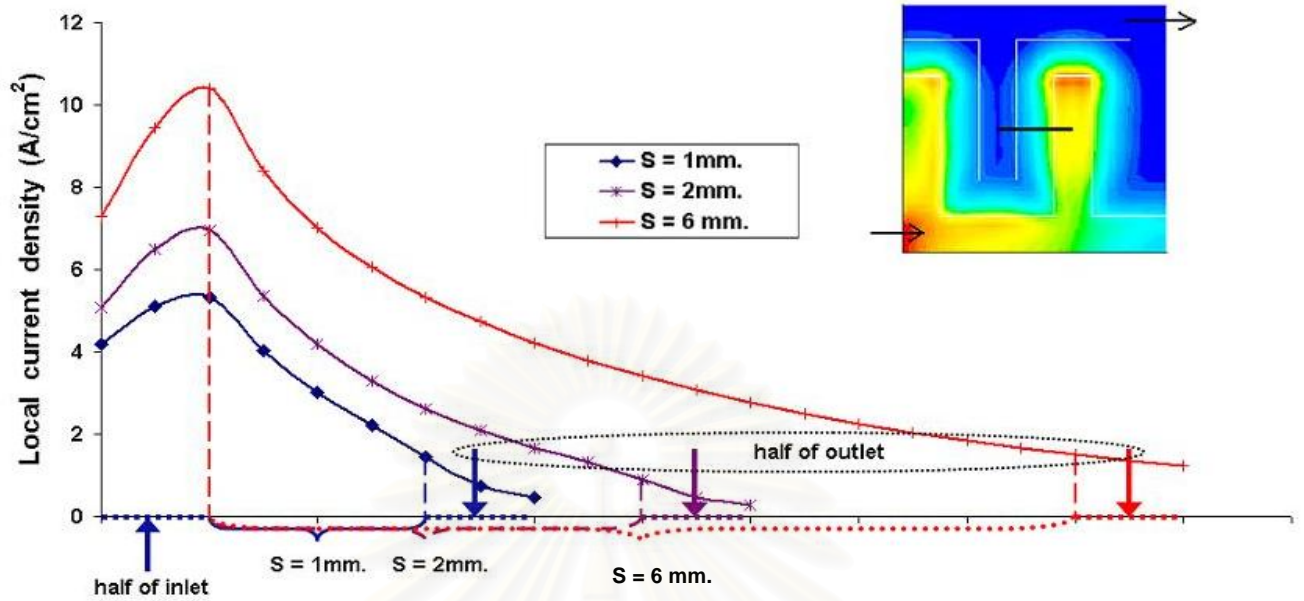
จากผลของแบบจำลองในหัวข้อที่ 4.1.3.1 และ 4.1.3.2 พบว่าการพัฒนาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทดสามารถทำได้โดยการเลือกใช้ช่องทางการไหลของแก๊สที่ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารภายในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนด้วยกลไกการพา ซึ่งก็คือช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design และการเพิ่มอิทธิพลของการถ่ายโอนมวลสารด้วยกลไกการพาสามารถทำได้โดยการเพิ่มขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส เพื่อให้ระบบต้องใช้ความดันของแก๊สขาเข้าที่สูงขึ้นในการขับเคลื่อนแก๊สในปริมาณคงที่ที่กำหนดไว้ในเงื่อนไขขอบให้เคลื่อนที่ข้ามผ่านชั้นของขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนไปยังช่องทางการไหลของแก๊สขาออก ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.1.3.2 แต่เมื่อพิจารณาถึงกฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์ พบว่าระบบที่ต้องใช้ความดันของแก๊สขาเข้าสูงนั้นหมายความว่ากระแสของแก๊สที่ไหลเข้ามาในระบบได้พาเอาพลังงานติดตัว (ในรูปของ physical exergy) เข้ามาในระบบเป็นจำนวนมากกว่าเมื่อเทียบกับกรณีของระบบที่มีความดันของแก๊สขาเข้าที่ต่ำกว่า ซึ่งปรากฏการณ์นี้มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ

ดังนั้นวัตถุประสงค์สำหรับการศึกษาในหัวข้อนี้คือการศึกษถึงอิทธิพลของขนาดของความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สขาเข้าและขาออก ที่มีต่อสมรรถนะและประสิทธิภาพของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทดขนาด 2.25×2.25 ตารางเซนติเมตร ซึ่งทำการศึกษาโดยกำหนดค่า CH_{in} และ CH_{out} ให้มีค่าคงที่คือ 1 มิลลิเมตร แล้วแปรค่า S ให้มีค่าเท่ากับ 1 1.5 2 2.5 6 และ 20.5 มิลลิเมตร เพื่อทำนายค่าความหนาแน่นกระแสและความดันของแก๊สขาเข้าที่ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากปฏิกิริยาฝั่งขั้วแคโทดค่าต่างๆ โดยกำหนดให้สารป้อนเข้าเป็นอากาศแห้งที่ 2.5 A/cm^2 เทียบเท่า หรือ $3.2 \times 10^{-5} \text{ mol O}_2/\text{sec}$ ความดันขาออกเท่ากับ 1 บรรยากาศ อุณหภูมิการทำงานของเซลล์คือ 60 องศาเซลเซียส

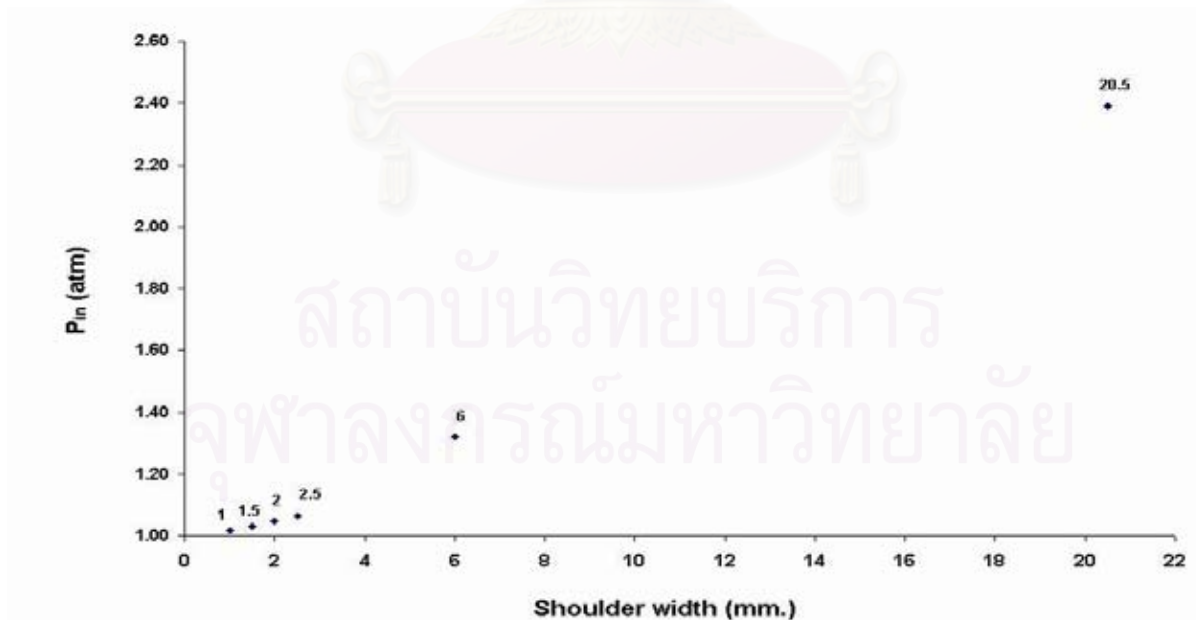


รูปที่ 4.15 อิทธิพลของขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด

จากรูปที่ 4.15 พบว่าการใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีขนาดความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สขาเข้าและขาออกที่เพิ่มขึ้น จะช่วยพัฒนาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทดได้เป็นอย่างดี และรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของอิทธิพลของการถ่ายโอนมวลสารภายในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนด้วยกลไกการพา เมื่อขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้น ดังเหตุผลที่ได้อธิบายไว้ในเบื้องต้น



รูปที่ 4.16 อิทธิพลของขนาดของสันก้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส ที่มีต่อการกระจายค่าความหนาแน่นกระแส จากกึ่งกลางช่องทางการไหลของแก๊สขาเข้าถึงกึ่งกลางช่องทางการไหลของแก๊สขาออก ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากปฏิกิริยาฝั่งขั้วแคโทดมีค่าเท่ากับ 0.7 โวลต์

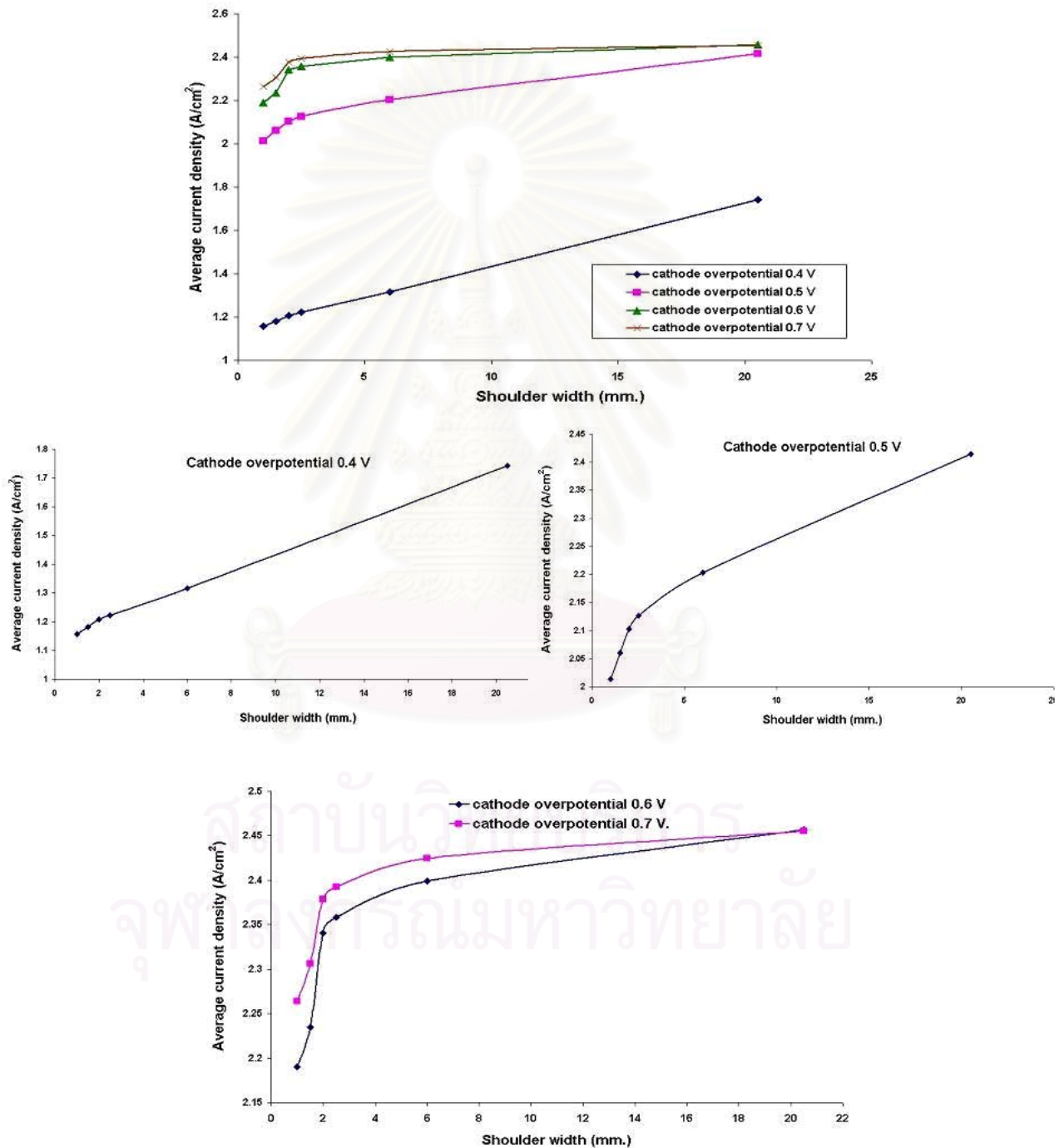


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสันก้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส ที่มีต่อความดันของแก๊สขาเข้า

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความดันของแก๊สขาเข้าและขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.17 และเมื่อพิจารณาประกอบกับรูปที่ 4.18 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยกับขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส เมื่อศักย์ไฟฟ้าเกินตัวฝั่งขั้วแคโทดมีค่าเท่ากับ 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 โวลต์ พบว่า ความดันของแก๊สขาเข้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design มีขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของขนาดสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สส่งผลให้เซลล์สามารถสร้างกระแสได้ที่ระดับค่าความหนาแน่นกระแสที่สูงขึ้นเมื่อพิจารณาที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวค่าเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของการถ่ายโอนมวลสารด้วยกลไกการพา หากทำการพิจารณาอิทธิพลของขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อค่าความหนาแน่นกระแสของเซลล์ที่ศักย์ไฟฟ้าฝั่งขั้วแคโทดมีค่าเท่ากับ 0.4 โวลต์ พบว่าเซลล์สามารถสร้างกระแสได้ 1.16 A/cm^2 เมื่อใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 1 มิลลิเมตร ในขณะที่เซลล์สามารถสร้างกระแสได้ 1.74 A/cm^2 เมื่อใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 20.5 มิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าเซลล์สามารถสร้างกระแสได้เพิ่มขึ้นถึงร้อยละห้าสิบ

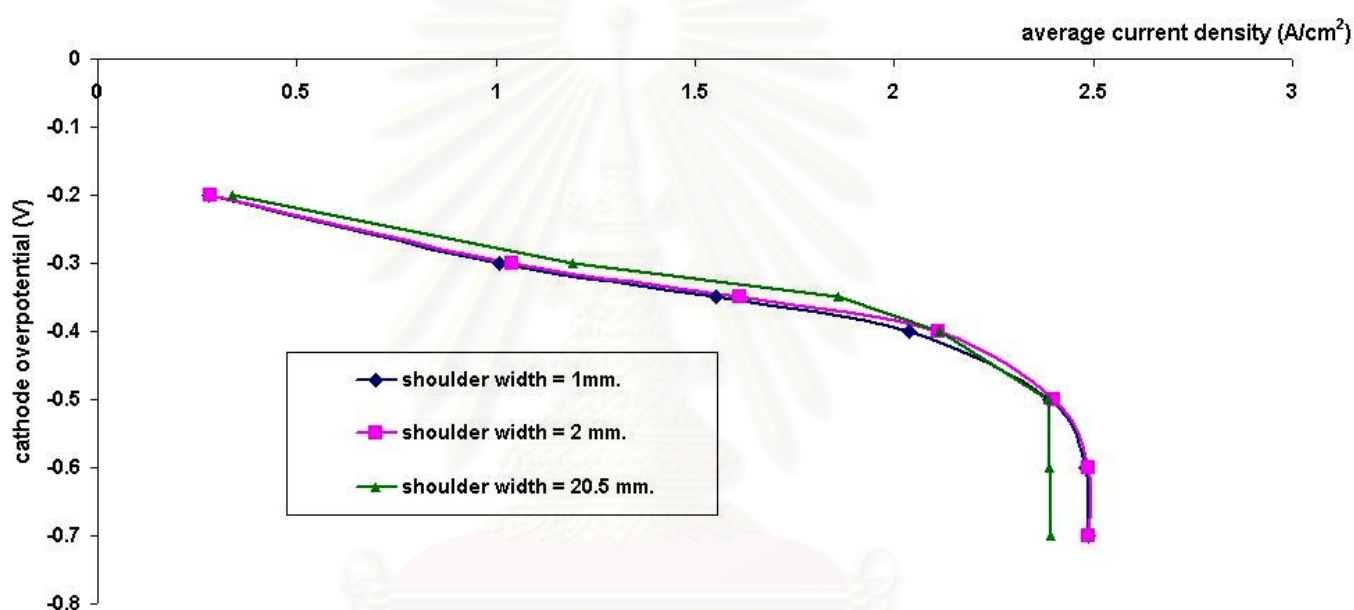
และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อค่าความหนาแน่นกระแสของเซลล์ที่ศักย์ไฟฟ้าฝั่งขั้วแคโทดมีค่าเท่ากับ 0.7 โวลต์ พบว่าเซลล์สามารถสร้างกระแสได้ 2.26 A/cm^2 2.40 A/cm^2 และ 2.46 A/cm^2 เมื่อใช้ช่องทางการไหลแบบ interdigitated design ที่มีขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกว้าง 1 2 และ 20.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเซลล์สามารถสร้างกระแสได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 6.2 เมื่อใช้ช่องทางการไหลของแก๊สที่มีขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 2 มิลลิเมตรเทียบกับกรณีช่องทางการไหลของแก๊สที่มีขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 1 มิลลิเมตร และเซลล์สามารถสร้างกระแสได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 8.85 เมื่อใช้ช่องทางการไหลของแก๊สที่มีขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 20.5 มิลลิเมตรเทียบกับกรณีช่องทางการไหลของแก๊สที่มีขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 1 มิลลิเมตร แต่เมื่อพิจารณาถึงความดันของแก๊สขาเข้าแล้วพบว่า หากใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated ที่มีขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 20.5 มิลลิเมตรจะต้องใช้ความดันขาเข้าของแก๊สถึง 2.4 บรรยากาศ ในขณะที่จะต้องใช้ความดันขาเข้าของแก๊สเพียง 1.05 และ 1.02 บรรยากาศ เมื่อใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกว้าง 2 และ 1 มิลลิเมตรตามลำดับ ซึ่งจากผลดังกล่าวพบว่าขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส จะมีอิทธิพลต่อความสามารถในการสร้างกระแสไฟฟ้าของเซลล์อย่างเห็นได้ชัดเมื่อเซลล์มีการสร้างกระแสที่ระดับค่าความหนาแน่นกระแสต่ำกว่าปริมาณสารป้อนเข้ามาก ๆ ซึ่งในที่นี้สารป้อนเข้าคืออากาศที่ 2.5 A/cm^2 เทียบเท่า และที่ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวฝั่งขั้วแคโทดมีค่าเท่ากับ 0.4 โวลต์สามารถสร้างกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดที่ความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 1.74 A/cm^2 เมื่อใช้ช่องทางการ

ไหลของแก๊สที่มีขนาดของสันก้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 20.5 มิลลิเมตร และอิทธิพลของขนาดของสันก้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อความสามารถในการสร้างกระแสไฟฟ้าของเซลล์จะลดลงเมื่อเซลล์มีการสร้างกระแสไฟฟ้าที่ค่าความหนาแน่นกระแสใกล้เคียงกับปริมาณการป้อนเข้าของสารตั้งต้น ซึ่งในกรณีศึกษานี้คือที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวฝั่งขั้วแคโทดมีค่าเท่ากับ 0.5 0.6 และ 0.7 โวลต์ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณที่จำกัดของแก๊สออกซิเจน

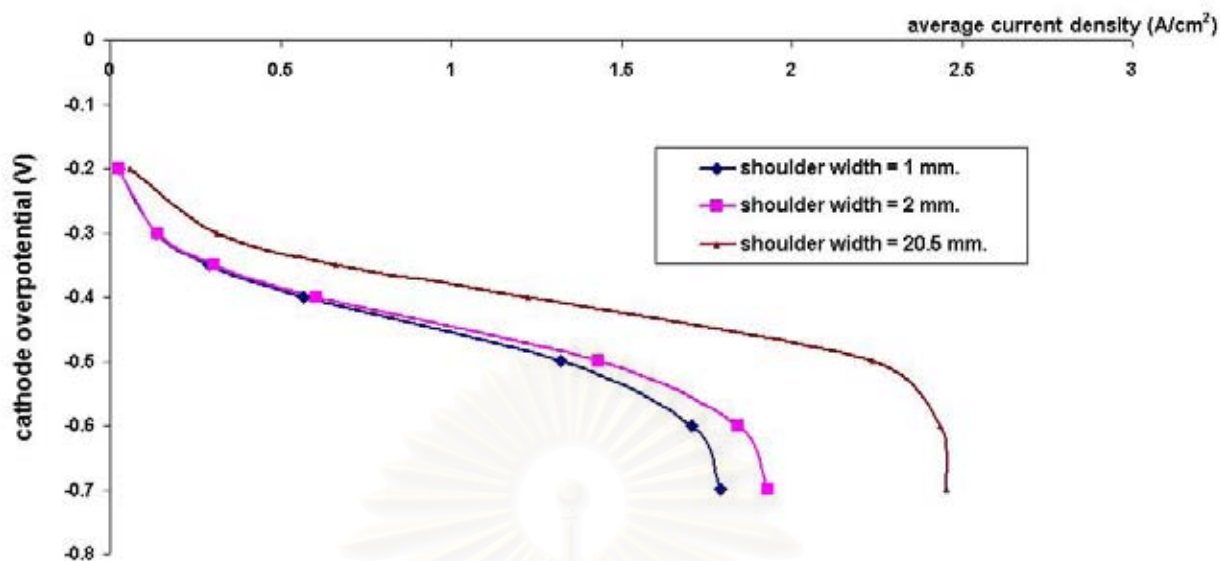


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยกับขนาดของสันก้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส เมื่อศักย์ไฟฟ้าเกินตัวฝั่งขั้วแคโทดมีค่าเท่ากับ 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 โวลต์

ในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการเปลี่ยนสารป้อนเข้าฝั่งขั้วแคโทดจากอากาศ เป็นแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ และแก๊สผสมระหว่าง ออกซิเจนกับไนโตรเจนที่อัตราส่วนโดยโมล 1:11.5 อัตราการป้อนเข้า 2.5 A/cm^2 เทียบเท่า หรือคิดเป็นอัตราการป้อนออกซิเจน 3.2×10^{-5} โมลต่อวินาที เพื่อศึกษาแนวโน้มของอิทธิพลของช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแอโนด ในกรณีที่สารป้อนเข้ามีความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนสูงๆ และกรณีที่สารป้อนเข้ามีความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนเจือจาง ซึ่งช่องทางการไหลของแก๊สที่นำมาศึกษาประกอบด้วย ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกว้าง 1 2 และ 20.5 มิลลิเมตร ซึ่งผลการทำนายสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทดแสดงไว้ในรูปที่ 4.19 และ 4.20



รูปที่ 4.19 อิทธิพลของความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด เมื่อใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ในอัตรา 2.5 A/cm^2 เทียบเท่า เป็นสารป้อนเข้าฝั่งแคโทด



รูปที่ 4.20 อิทธิพลของความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด เมื่อใช้แก๊สผสมระหว่างออกซิเจนและไนโตรเจนที่อัตราส่วนโดยโมล 1:11.5 ด้วยอัตรา 2.5 A/cm² เทียบเท่า เป็นสารป้อนเข้าฝั่งแคโทด

จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 พบว่าความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สที่เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มในการพัฒนาสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด โดยเฉพาะในกรณีที่สารป้อนเข้ามีความเข้มข้นของออกซิเจนเจือจาง โดยความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้นจะทำให้สมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทดเพิ่มขึ้นอย่างมาก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชันถูกควบคุมด้วยอิทธิพลของอัตราการถ่ายโอนออกซิเจนไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นเมื่อสารป้อนเข้ามีความเข้มข้นของออกซิเจนเจือจาง แต่ในกรณีที่สารป้อนเข้าเป็นแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์พบว่าความกว้างของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทดอย่างไม่น่าสำคัญ โดยที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวฝั่งขั้วแคโทดมีค่าสูงคือ ตั้งแต่ 0.5 โวลต์ขึ้นไป ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกว้าง 1 และ 2 มิลลิเมตร สามารถให้สมรรถนะของเซลล์ที่เท่ากัน และมากกว่ากรณีช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหล 20.5 มิลลิเมตร เนื่องจากเมื่อใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์เป็นสารป้อนเข้าทางฝั่งขั้วแคโทด ทำให้ปริมาณรวมของสารป้อนลดลงไปประมาณสี่เท่าเมื่อเทียบกับกรณีที่สารป้อนเข้าเป็นอากาศ เนื่องจากในอากาศมีไนโตรเจนปนอยู่ถึงร้อยละ 79 โดยโมล การที่ปริมาณสารรวมของสารป้อนเข้าลดลงส่งผลให้ความดันที่ใช้ในการป้อนสารเข้าระบบลดลง ซึ่งการลดลงของความดันที่ใช้ในการป้อนสารเข้าสู่ระบบส่งผลให้แรงขับในการไหลของแก๊สข้ามผ่านขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนไปยังช่องทางการไหลของแก๊สขาออกลดลง จึงเป็นการลดอิทธิพลของการถ่ายโอนมวลสารภายในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนด้วยกลไกการพา หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือการเพิ่มอิทธิพลของการถ่ายโอนมวลสารภายในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนด้วยกลไกการพา

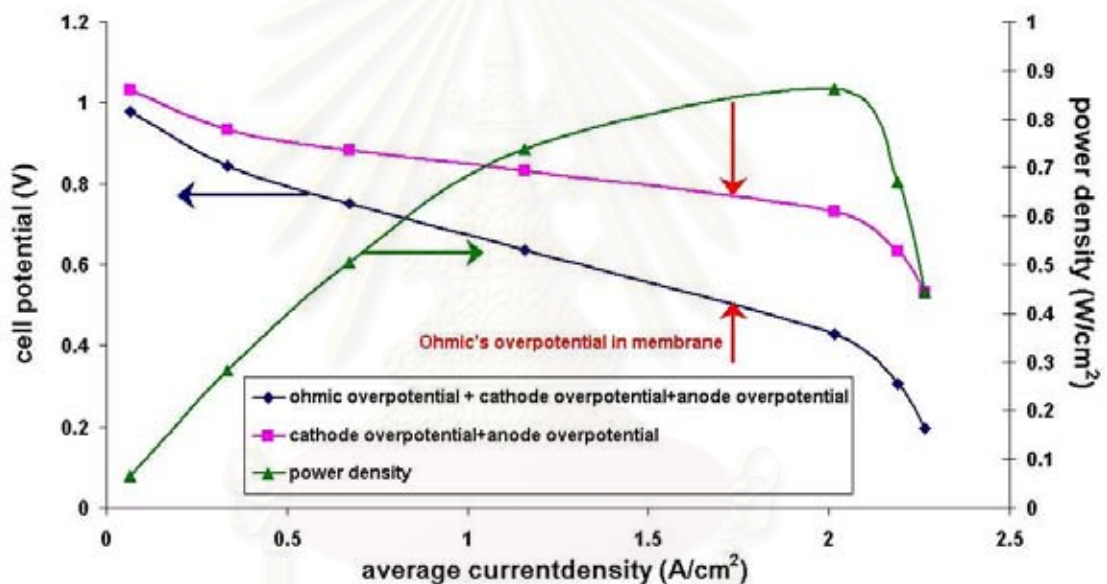
ในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนด้วยกลไกการแพร่ และธรรมชาติของปฏิกิริยารีดักชันที่ฝั่งแคโทดที่เมื่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงๆจะถูกควบคุมด้วยอัตราการถ่ายโอนออกซิเจนไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของสันกั้นระหว่างช่องทางไหลของแก๊สจึงเปรียบเสมือนการเพิ่มความต้านทานในการแพร่ของออกซิเจน ดังนั้นการใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เป็นตัวออกซิไดส์จึงทำให้เซลล์เชื้อเพลิงฝั่งแคโทดที่ใช้ช่องทางไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางไหลของแก๊ส 20.5 มิลลิเมตร มีสมรรถนะที่ต่ำกว่าช่องทางไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางไหลของแก๊สกว้าง 1 และ 2 มิลลิเมตร ที่ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวฝั่งแคโทดมีค่าสูงๆ สำหรับที่ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวฝั่งขั้วแคโทดมีค่าต่ำกว่า 0.5 โวลต์ เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางไหล 20.5 มิลลิเมตร สามารถให้สมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทดที่ดีกว่าช่องทางไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางไหลของแก๊สกว้าง 1 และ 2 มิลลิเมตร

ถึงแม้ว่าการใช้ช่องทางไหลแบบ interdigitated design ที่มีขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางไหลของแก๊สกว้างๆ ถือเป็นการพัฒนาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทด แต่ในขณะเดียวกันก็จำเป็นที่จะต้องป้องกันแก๊สเข้าสู่เซลล์ฝั่งขั้วแคโทดด้วยความดันที่สูงขึ้น ซึ่งการกระทำดังกล่าวมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ตามกฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการประเมินประสิทธิภาพของเซลล์ด้วยวิธีทาง exergy แต่เนื่องจากขอบเขตของแบบจำลองไม่ได้พิจารณาถึงปรากฏการณ์ในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน จึงทำให้ไม่มีข้อมูลความต้านทานภายในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนและไม่สามารถคำนวณศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ค่าความหนาแน่นกระแสค่าต่างๆได้ ปัญหานี้ถูกแก้โดยใช้ค่าความต้านทานภายในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนตามงานวิจัยของ ลูติกร [9] ซึ่งคำนวณค่าการนำไอออน (ion conductivity) ของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนตามงานวิจัยของ Springer และคณะ [8] จากการตรวจสอบค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากความต้านทานภายในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนพบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างคงที่โดยแปรผันตรงกับค่าความหนาแน่นกระแส เนื่องจากค่าการนำไอออนของเยื่อแผ่นมีค่าค่อนข้างคงที่อยู่ที่ประมาณ 10.2-10.3 ต่อโอห์มต่อเมตร ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ค่าการนำไอออนภายในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนเท่ากับ 10.3 ต่อโอห์มต่อเมตร และกำหนดให้เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนมีความหนา 12.5 ไมโครเมตร ซึ่งทำให้สามารถคำนวณค่าความต้านทานภายในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนได้เท่ากับ 1.28×10^{-5} โอห์ม ตารางเมตร [8] (ค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการคำนวณศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากความต้านทานภายในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนตั้งอยู่ในหน่วย A/m^2)

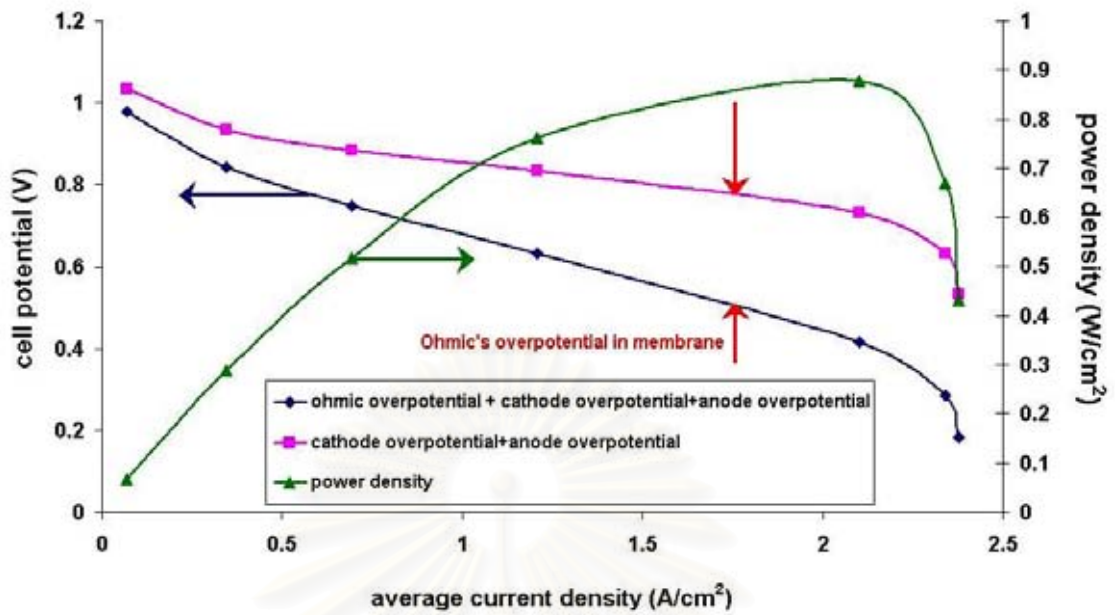
สำหรับค่าศักย์ไฟฟ้าสมดุลของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ($E_{op}(T,P)$) ในกรณีศึกษามีค่า 1.186 โวลต์ การคำนวณศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เป็นไปดังสมการที่ 2.4 คือ

$$E_{cell} = E_{op}(T,P) - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc} \quad (2.4)$$

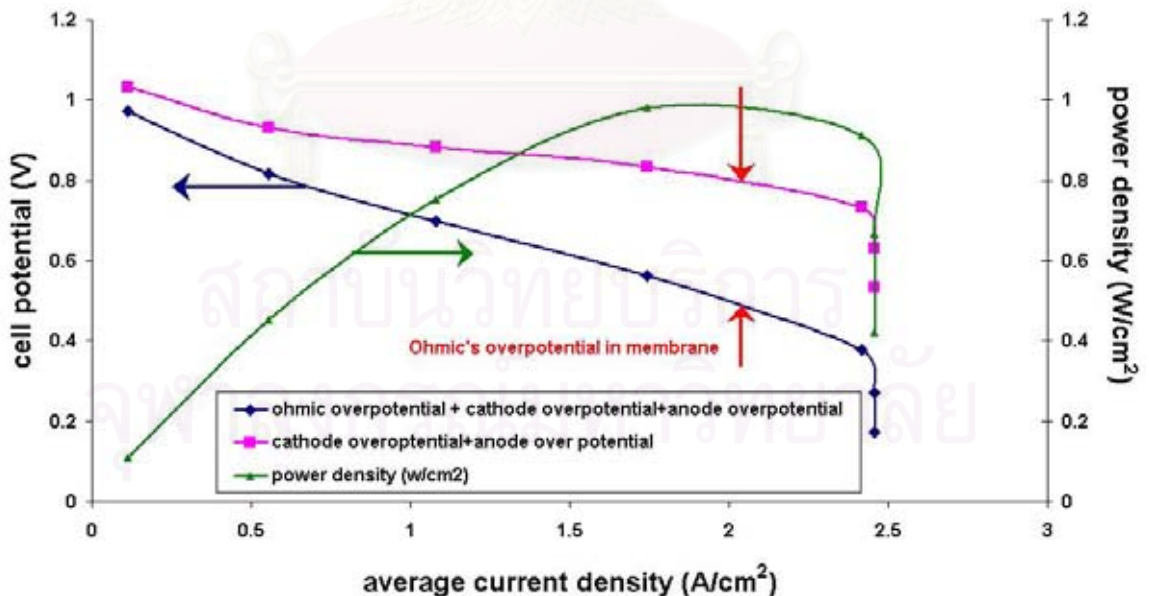
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสของกับศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ และค่าความหนาแน่นกำลังงาน (power density, W/cm^2) ของเซลล์ที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สฝั่งขั้วแอโนดแบบ conventional design ที่มี $CH = 1 \text{ mm.}$, $S = 1 \text{ mm.}$ และใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกว้าง 1 2 และ 20.5 มิลลิเมตร แสดงไว้ในรูปที่ 4.21 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสกับ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์และค่าความหนาแน่นพลังงาน ของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สฝั่งแอโนดแบบ conventional design และใช้ช่องทางการไหลฝั่งแคโทดแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 1 มิลลิเมตร

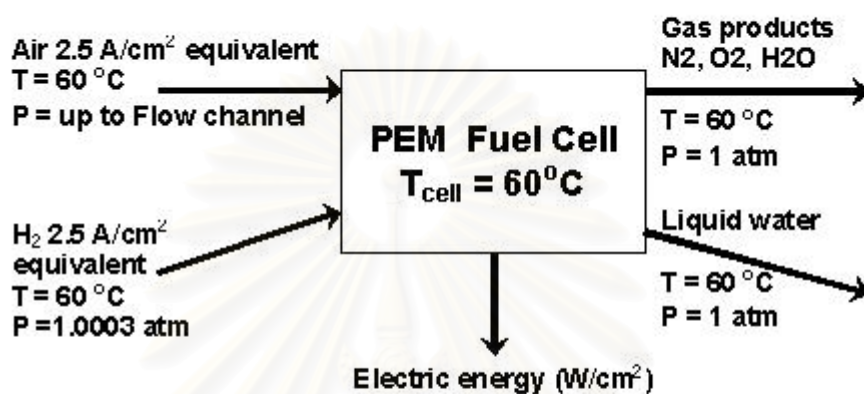


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสกับ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์และค่าความหนาแน่นพลังงาน ของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สฝั่งแอโนดแบบ conventional design และใช้ช่องทางการไหลฝั่งแคโทดแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 2 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสกับ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์และค่าความหนาแน่นพลังงาน ของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สฝั่งแอโนดแบบ conventional design และใช้ช่องทางการไหลฝั่งแคโทดแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 20.5 มิลลิเมตร

ข้อมูลความหนาแน่นกำลังงานในรูปที่ 4.21 4.22 และ 4.23 สามารถนำไปใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของเซลล์ตามวิธีทาง exergy สำหรับการทำสมดุล exergy ทำการพิจารณารอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนเท่านั้น เนื่องจากในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงจะอาศัยแรงดันหัวถังแก๊สในการป้อนสารเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นจึงไม่มีการใช้พลังงานในการขับเคลื่อน ซึ่งขอบเขตและภาวะการทำงานต่างๆของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงไว้ในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ขอบเขตและภาวะในการทำสมดุล exergy ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนแบบเซลล์เดี่ยวขนาด 5 ตารางเซนติเมตร

สำหรับสมมติฐานที่ใช้ในการทำสมดุล exergy มีดังต่อไปนี้

- ช่องทางการไหลของแก๊สฝั่งขั้วแอโนดเป็นแบบ conventional design ที่มี $CH = 1 \text{ mm.}$, $S = 1 \text{ mm.}$
- ระบบวางอยู่บนเส้นอ้างอิงดังนั้นจึงละเลยพลังงานศักย์โน้มถ่วง
- ละเลยพลังงานจลน์ของกระแสแก๊สป้อนเข้า และผลิตภัณฑ์
- น้ำที่เกิดจากปฏิกิริยามีสถานะเป็นของเหลว และมีการระเหยที่อุณหภูมิ 60°C
- ละเลยความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา ดังนั้นเซลล์จึงมีอุณหภูมิคงที่ 60°C
- ภาวะสิ่งแวดล้อม (environmental state) คือที่ 25 องศาเซลเซียส 1 บรรยากาศ
- ที่ dead state คือที่ 25 องศาเซลเซียส 1 บรรยากาศ และประกอบด้วย $\text{N}_2:\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}(\text{g}) = 24:9.5:1$
- Reference substance ของ H_2 คือ $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$

จากการทำสมดุล exergy รอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนโดยเลือกพิจารณาที่ค่าความหนาแน่นกระแสที่เซลล์สามารถสร้างได้เท่ากันที่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 A/cm² ทั้งนี้เนื่องจากเป็นการประเมินประสิทธิภาพในการแปรรูปพลังงานที่เข้ามากับกระแสของสารป้อนเข้า ให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องทำการพิจารณาที่ปริมาณการถูกใช้ไปของสารตั้งต้นที่เท่ากัน จากผลการคำนวณพบว่าพลังงานที่เข้ามากับกระแสของสารป้อนเข้าส่วนใหญ่เป็นพลังงานที่อยู่ในรูปแบบของ chemical exergy (\mathcal{E}_{ch}) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสาร ส่วนพลังงานในรูปแบบของ physical exergy (\mathcal{E}_{ph}) มีสัดส่วนน้อยมากประมาณร้อยละ 0.1 ของพลังงานทั้งหมดที่เข้ามากับกระแสของสารป้อนเข้า ซึ่งค่าของ physical exergy ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารป้อนเข้าและภาวะของสารป้อนเข้า คือ อุณหภูมิและความดัน ดังสมการที่ 2.18

$$\mathcal{E}_{ph} = c_p (T - T_0) - T_0 \left(c_p \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{P}{P_0} \right) \quad (2.18)$$

ดังนั้นความดันที่ใช้ในการป้อนแก๊สเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงจึงส่งอิทธิพลถึงพลังงานของสารป้อนเข้า ในรูปของ physical exergy ซึ่งเป็นพลังงานในสัดส่วนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงสรุปได้ว่าสำหรับกรณีเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนเซลล์เดี่ยวขนาด 5 ตารางเซนติเมตร การเพิ่มขึ้นของความดันที่ใช้ในการป้อนสารตั้งต้นเข้าสู่เซลล์เนื่องจากช่องทางการไหลของแก๊สมีขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส ที่เพิ่มขึ้นไม่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชิงอุณหพลศาสตร์ แต่หากเป็นเซลล์เชื้อเพลิงหลายเซลล์ที่นำมาต่อกันก็จะต้องมีการทำสมดุล exergy ใหม่ และขอบเขตของการทำสมดุล exergy อาจต้องมีการเปลี่ยนแปลงจากกรณีศึกษา

ตารางที่ 4.1 ผลการทำสมดุล exergy รอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนแบบเซลล์เดี่ยวขนาด 5 ตารางเซนติเมตร โดยฝั่งแอโนดใช้ช่องทางการไหลแบบ conventional design ที่มี CH = 1 mm., S = 1 mm. ฝั่งแคโทดใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มี S = 1 mm., 2 mm., 20.5mm.

Average current density 0.5 A/cm ²											
Cathode feed = dry air at 2.5 A/cm ² equivalent, 60 °C											
Anode feed = pure H ₂ at 2.5 A/cm ² equivalent, 60 °C, 1 atm											
Shoulder width (mm.)	inlet pressure(atm)	$\dot{E}_{ph(in)}$ (kJ)	$\dot{E}_{ch(in)}$ (kJ)	$\dot{E}_{total(in)}$ (kJ)	$\dot{E}_{ph(out)}$ (kJ)	$\dot{E}_{ch(out)}$ (kJ)	$\dot{E}_{total(out)}$ (kJ)	$\dot{E}_{total(in)} - \dot{E}_{total(out)}$ (kJ)	electrical power output (kW)	Cell efficiency	
20.5	2.391354	1.243E-05	1.480E-02	1.481E-02	1.115E-05	1.200E-02	1.201E-02	2.8015E-03	2.081E-03	74.29%	
2	1.045672	1.142E-05	1.480E-02	1.481E-02	1.115E-05	1.200E-02	1.201E-02	2.8005E-03	1.901E-03	67.90%	
1	1.017737	1.139E-05	1.480E-02	1.481E-02	1.115E-05	1.200E-02	1.201E-02	2.8004E-03	1.902E-03	67.90%	
Average current density 1.0 A/cm ²											
Cathode feed = dry air at 2.5 A/cm ² equivalent, 60 °C											
Anode feed = pure H ₂ at 2.5 A/cm ² equivalent, 60 °C, 1 atm											
Shoulder width (mm.)	inlet pressure(atm)	$\dot{E}_{ph(in)}$ (kJ)	$\dot{E}_{ch(in)}$ (kJ)	$\dot{E}_{total(in)}$ (kJ)	$\dot{E}_{ph(out)}$ (kJ)	$\dot{E}_{ch(out)}$ (kJ)	$\dot{E}_{total(out)}$ (kJ)	$\dot{E}_{total(in)} - \dot{E}_{total(out)}$ (kJ)	electrical power output (kW)	Cell efficiency	
20.5	2.391354	1.2425E-05	1.4801E-02	1.4814E-02	1.0936E-05	9.2010E-03	9.2120E-03	5.60188E-03	3.6421E-03	65.02%	
2	1.045672	1.1422E-05	1.4801E-02	1.4813E-02	1.0936E-05	9.2010E-03	9.2120E-03	5.60088E-03	3.5002E-03	62.49%	
1	1.017737	1.1389E-05	1.4801E-02	1.4813E-02	1.0936E-05	9.2010E-03	9.2120E-03	5.60085E-03	3.4529E-03	61.65%	
Average current density 1.5 A/cm ²											
Cathode feed = dry air at 2.5 A/cm ² equivalent, 60 °C											
Anode feed = pure H ₂ at 2.5 A/cm ² equivalent, 60 °C, 1 atm											
Shoulder width (mm.)	inlet pressure(atm)	$\dot{E}_{ph(in)}$ (kJ)	$\dot{E}_{ch(in)}$ (kJ)	$\dot{E}_{total(in)}$ (kJ)	$\dot{E}_{ph(out)}$ (kJ)	$\dot{E}_{ch(out)}$ (kJ)	$\dot{E}_{total(out)}$ (kJ)	$\dot{E}_{total(in)} - \dot{E}_{total(out)}$ (kJ)	electrical power output (kW)	Cell efficiency	
20.5	2.391354	1.2425E-05	1.4801E-02	1.4814E-02	1.1087E-05	6.3589E-03	6.3699E-03	8.44391E-03	4.7300E-03	56.02%	
2	1.045672	1.1422E-05	1.4801E-02	1.4813E-02	1.1087E-05	6.3589E-03	6.3699E-03	8.44290E-03	4.2097E-03	49.86%	
1	1.017737	1.1389E-05	1.4801E-02	1.4813E-02	1.1087E-05	6.3589E-03	6.3699E-03	8.44287E-03	4.1624E-03	49.30%	
Average current density 2.0 A/cm ²											
Cathode feed = dry air at 2.5 A/cm ² equivalent, 60 °C											
Anode feed = pure H ₂ at 2.5 A/cm ² equivalent, 60 °C, 1 atm											
Shoulder width (mm.)	inlet pressure(atm)	$\dot{E}_{ph(in)}$ (kJ)	$\dot{E}_{ch(in)}$ (kJ)	$\dot{E}_{total(in)}$ (kJ)	$\dot{E}_{ph(out)}$ (kJ)	$\dot{E}_{ch(out)}$ (kJ)	$\dot{E}_{total(out)}$ (kJ)	$\dot{E}_{total(in)} - \dot{E}_{total(out)}$ (kJ)	electrical power output (kW)	Cell efficiency	
20.5	2.391354	1.2425E-05	1.4801E-02	1.4814E-02	1.1904E-05	3.4402E-03	3.4521E-03	1.13617E-02	5.1557E-03	45.38%	
2	1.045672	1.1422E-05	1.4801E-02	1.4813E-02	1.1904E-05	3.4402E-03	3.4521E-03	1.13607E-02	4.5881E-03	40.39%	
1	1.017737	1.1389E-05	1.4801E-02	1.4813E-02	1.1904E-05	3.4402E-03	3.4521E-03	1.13607E-02	4.5408E-03	39.97%	

จากตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการแปรรูปพลังงานของเซลล์ที่ค่าความหนาแน่นกระแสค่าเดียวกันพบว่า เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สที่ฝั่งแคโทดแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 20.5 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพการแปรรูปพลังงานที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สฝั่งแคโทดแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกว้าง 1 และ 2 มิลลิเมตร ที่ทุกๆค่าความหนาแน่นกระแส เนื่องจากช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 20.5 มิลลิเมตร จะสามารถถ่ายโอนแก๊สออกซิเจนไปยังผิวหน้าของตัว

เร่งปฏิกิริยาได้ในอัตราเร็วที่มากกว่าช่องทางการไหลแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกว้าง 1 และ 2 มิลลิเมตร ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจนที่ฝั่งขั้วแคโทดเกิดขึ้นด้วยอัตราเร็วที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นการลดศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากการถ่ายโอนมวลสาร ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 20.5 มิลลิเมตรจึงสามารถสร้างกระแสไฟฟ้าในปริมาณที่เท่ากับเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกว้าง 1 และ 2 มิลลิเมตร ที่ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่สูงกว่า ทำให้เซลล์สามารถสร้างกำลังงานได้มากกว่า และมีประสิทธิภาพการแปรรูปพลังงานที่สูงกว่า

นอกจากนี้ประสิทธิภาพการแปรรูปพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนลดลง เมื่อเซลล์ผลิตกระแสไฟฟ้าที่ค่าความหนาแน่นกระแสสูงๆ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากความต้านทานภายในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ซึ่งค่าดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น [9] ดังแสดงในรูปที่ 4.21 4.22 และ 4.23

4.2. การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนขนาด 5 ตารางเซนติเมตร

ผลจากแบบจำลองปรากฏการณ์เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนในหัวข้อที่ 4.1 พบว่ารูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สไม่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแอโนด แต่ในทางกลับกันรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สมีอิทธิพลอย่างเด่นชัดต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด โดยเซลล์ฝั่งขั้วแคโทดที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 20.5 มิลลิเมตร สามารถให้สมรรถนะของเซลล์ที่ดีที่สุด และยังมีประสิทธิภาพการแปรรูปพลังงานที่สูงที่สุดอีกด้วย

ดังนั้นจึงได้มีการสร้างแผ่นสะสมกระแสที่มีช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกว้าง 1 2 และ 20.5 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สดังกล่าว การทดสอบสมรรถนะของเซลล์นี้เป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มของสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงกับผลที่ได้จากแบบจำลอง การทดสอบเชิงแนวโน้มเนื่องจากค่าคงที่ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลองเป็นค่าที่นำมาจากงานวิจัยต่างๆ มิใช่มาจากค่าที่แท้จริงของระบบ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะทำการทดสอบเชิงปริมาณเพื่อเทียบกับแบบจำลอง

4.2.1 อิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแอโนด

ผลจากแบบจำลองพบว่ารูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สไม่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแอโนด ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดลองในหัวข้อนี้คือ ทดสอบอิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแอโนด ซึ่งทำการทดลองโดยใช้ช่องทางการไหลของแก๊สที่ฝั่งขั้วแคโทดมีรูปแบบเดียวกัน เพื่อเป็นการกำจัดอิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่ฝั่งขั้วแอโนด ซึ่งมีการออกแบบการทดลองดังตารางที่ 4.2

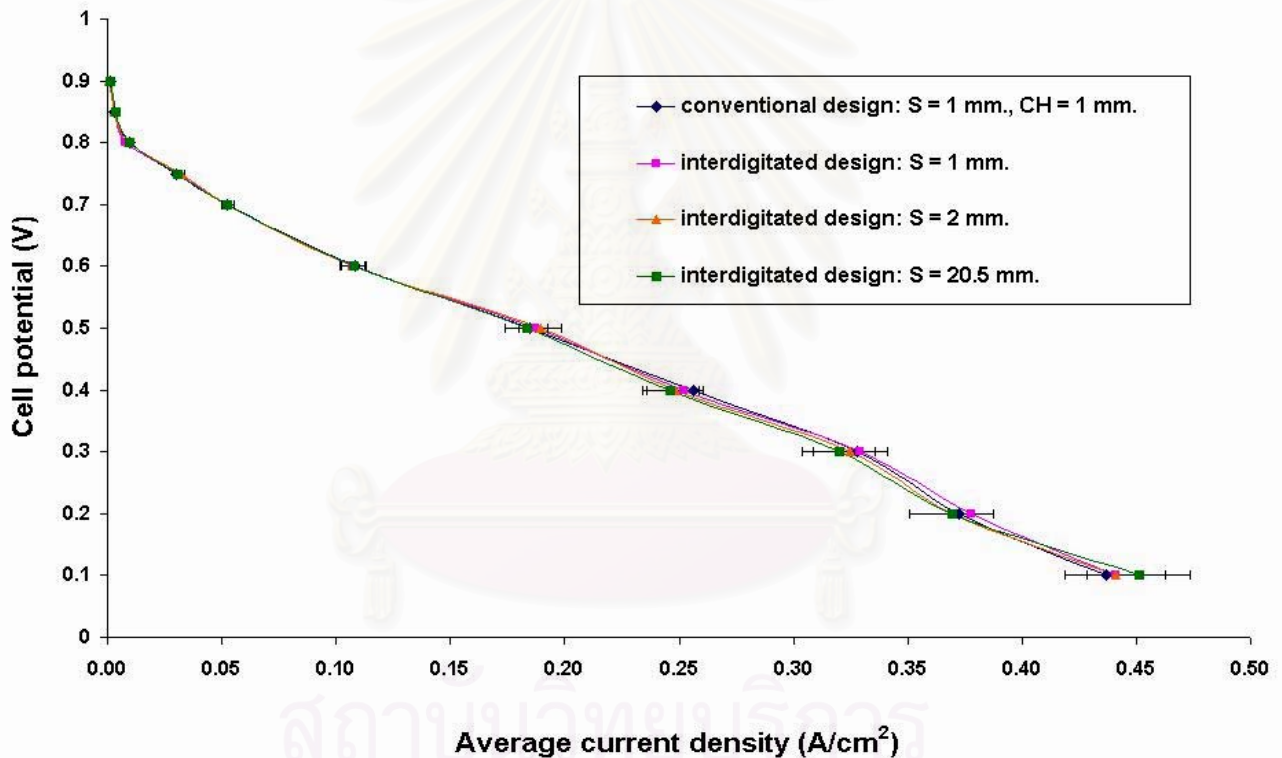
ตารางที่ 4.2 ตารางการทดลอง เพื่อทดสอบอิทธิพลของรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งแอโนด

Cathode's flow channel pattern	Anode's flow channel pattern
Interdigitated design: S = 1 mm.	Conventional design Interdigitated design: S = 1 mm. Interdigitated design: S = 2 mm. Interdigitated design: S = 20.5 mm.
Interdigitated design: S = 2 mm.	Conventional design Interdigitated design: S = 1 mm. Interdigitated design: S = 2 mm. Interdigitated design: S = 20.5 mm.
Interdigitated design: S = 20.5 mm.	Conventional design Interdigitated design: S = 1 mm. Interdigitated design: S = 2 mm. Interdigitated design: S = 20.5 mm.

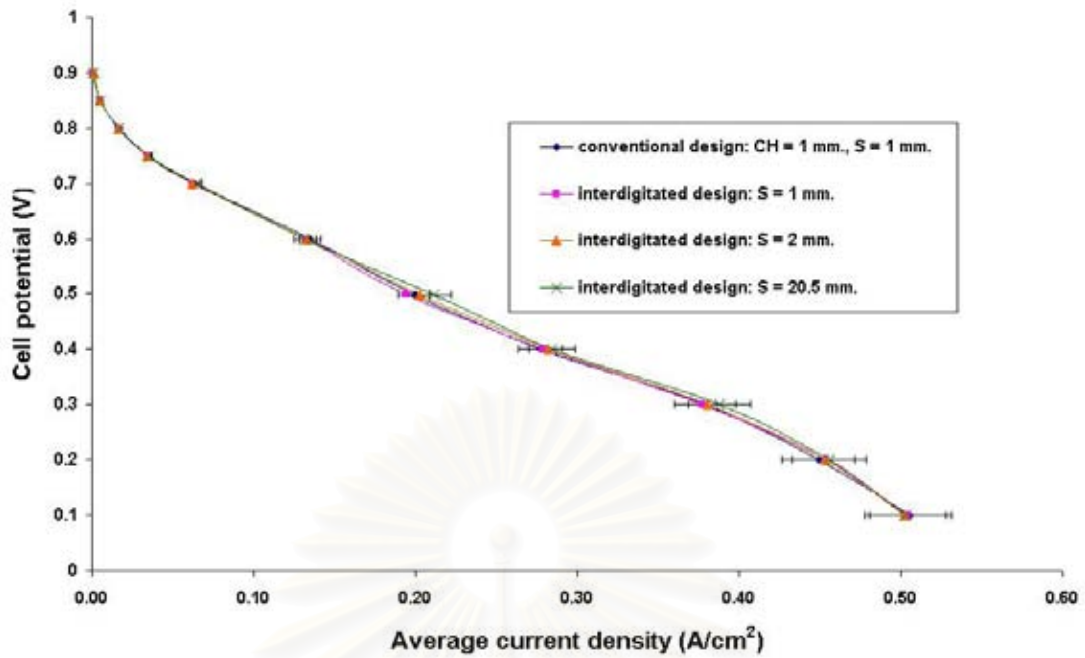
ทำการทดลองโดยการป้อนอากาศเป็นสารป้อนเข้าทางฝั่งขั้วแคโทดที่อัตรา 2.5 A/cm^2 เทียบเท่า หรือ 207 sccm อ้างอิงที่ภาวะมาตรฐาน (1 บรรยากาศ 25 องศาเซลเซียส) ป้อนแก๊สไฮโดรเจนเป็นสารป้อนเข้าฝั่งขั้วแอโนดที่อัตรา 2.5 A/cm^2 เทียบเท่า หรือ 87 sccm อ้างอิงที่ภาวะมาตรฐาน อุณหภูมิของเซลล์ และอุณหภูมิความชื้น 60 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ถูกปล่อยออกมาที่ความดันบรรยากาศ ผลการทดลองแสดงไว้ในกราฟรูปที่ 4.25 4.26 และ 4.27

จากกราฟรูปที่ 4.25 4.26 และ 4.27 ให้ผลที่สอดคล้องกับผลจากแบบจำลองกล่าวคือ รูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สไม่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแอโนดแม้ว่าสารป้อนเข้าฝั่งแอโนดที่ใช้ในการทดลองจะเป็นแก๊สไฮโดรเจนที่อิ่มตัวด้วยความชื้นก็ตาม ดังจะเห็นได้จากเส้นกราฟที่ทับกันเกือบสนิท และแถบค่าความผิดพลาด 5 % ที่ครอบคลุมข้อมูลค่าความหนาแน่นกระแสที่ศักย์ไฟฟ้าค่าเดียวกัน ซึ่งเป็นการแสดงว่าค่าความหนาแน่นกระแสที่ศักย์ไฟฟ้าหนึ่งๆเป็นค่าเดียวกัน

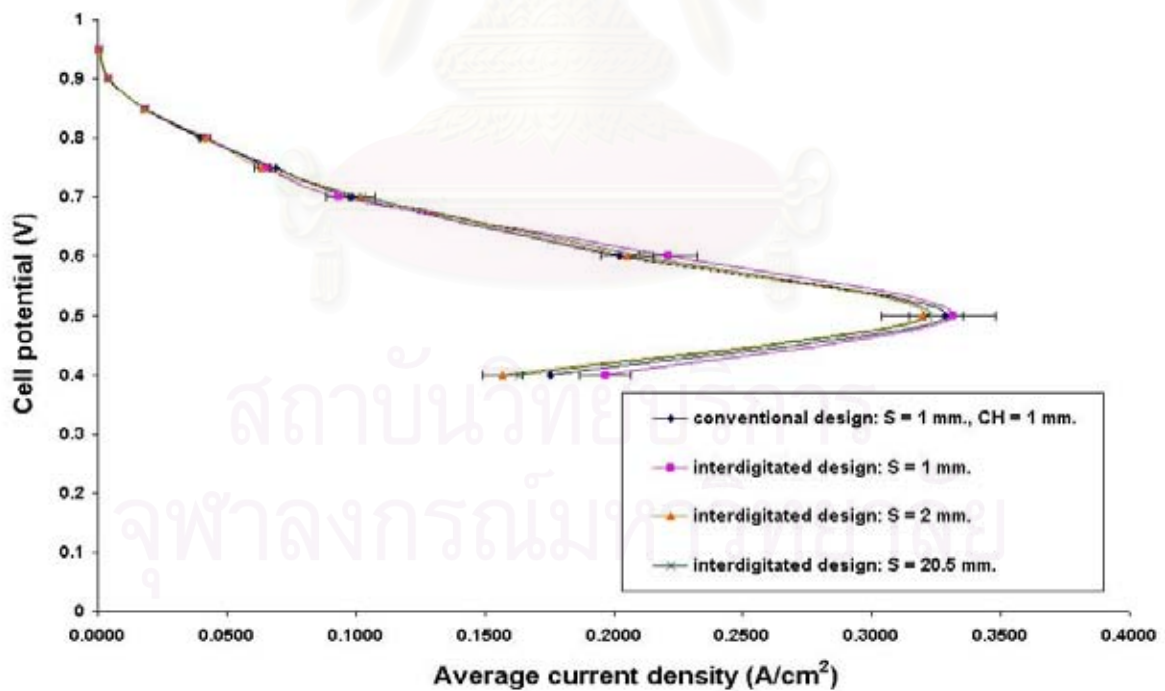
ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ว่า แก๊สไฮโดรเจนและไอน้ำมีความสามารถในการแพร่ภายใน ขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนได้สูง และค่าความหนาแน่นกระแสสมมูลของปฏิกิริยาออกซิเดชันฝั่งขั้วแอโนดมีค่า สูงเช่นกัน และเมื่อพิจารณาตาม Faraday's Law พบว่าปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงดำเนินไปในอัตราเร็ว ที่ต่ำซึ่งทราบได้จากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เซลล์สร้างได้มีค่าต่ำคือ มีค่าไม่เกิน 0.5 A/cm^2 จึง ทำให้ปฏิกิริยาฝั่งขั้วแอโนดไม่ถูกควบคุมด้วยอัตราการถ่ายโอนแก๊สออกซิเจนไปยังผิวหน้าของตัวเร่ง ปฏิกิริยา ดังนั้นรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สจึงไม่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแอโนด ใน กรณีที่ฝั่งขั้วแคโทดใช้ช่องทางการไหลแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหล ของแก๊ส 20.5 มิลลิเมตร พบว่าได้เกิดปรากฏการณ์น้ำท่วมขึ้นที่ฝั่งขั้วแคโทด ซึ่งทราบได้จากค่าความ หนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ลดลงเมื่อเซลล์ทำงานที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า 0.5 โวลต์ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.25 โพลารไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สฝั่งขั้วแคโทดแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกว้าง 1 มิลลิเมตร โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนอิ่มตัวด้วยความชื้นที่ 60°C ที่อัตราการป้อนเข้า 2.5 A/cm^2 เทียบเท่า และอากาศอิ่มตัวด้วยความชื้นที่ 60°C ที่อัตราการป้อนเข้า 2.5 A/cm^2 เทียบเท่า อุณหภูมิเซลล์คงที่ที่ 60°C



รูปที่ 4.26 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สฝั่งขั้วแคโทดแบบ interdigitated design ที่มี สันกันระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 2 มิลลิเมตร โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนอิ่มตัวด้วยความชื้นที่ 60 °C ที่อัตราการป้อนเข้า 2.5 A/cm² เทียบเท่า และอากาศอิ่มตัวด้วยความชื้นที่ 60 °C ที่อัตราการป้อนเข้า 2.5 A/cm² เทียบเท่า อุณหภูมิเซลล์คงที่ที่ 60 °C



รูปที่ 4.27 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สฝั่งขั้วแคโทดแบบ interdigitated design ที่มีสันกันระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สเท่า 20.5 มิลลิเมตร โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนอิ่มตัวด้วยความชื้นที่ 60 °C ที่อัตราการป้อนเข้า 2.5 A/cm² เทียบเท่า และอากาศอิ่มตัวด้วยความชื้นที่ 60 °C ที่อัตราการป้อนเข้า 2.5 A/cm² เทียบเท่า อุณหภูมิเซลล์คงที่ที่ 60 °C

4.2.2 อิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด

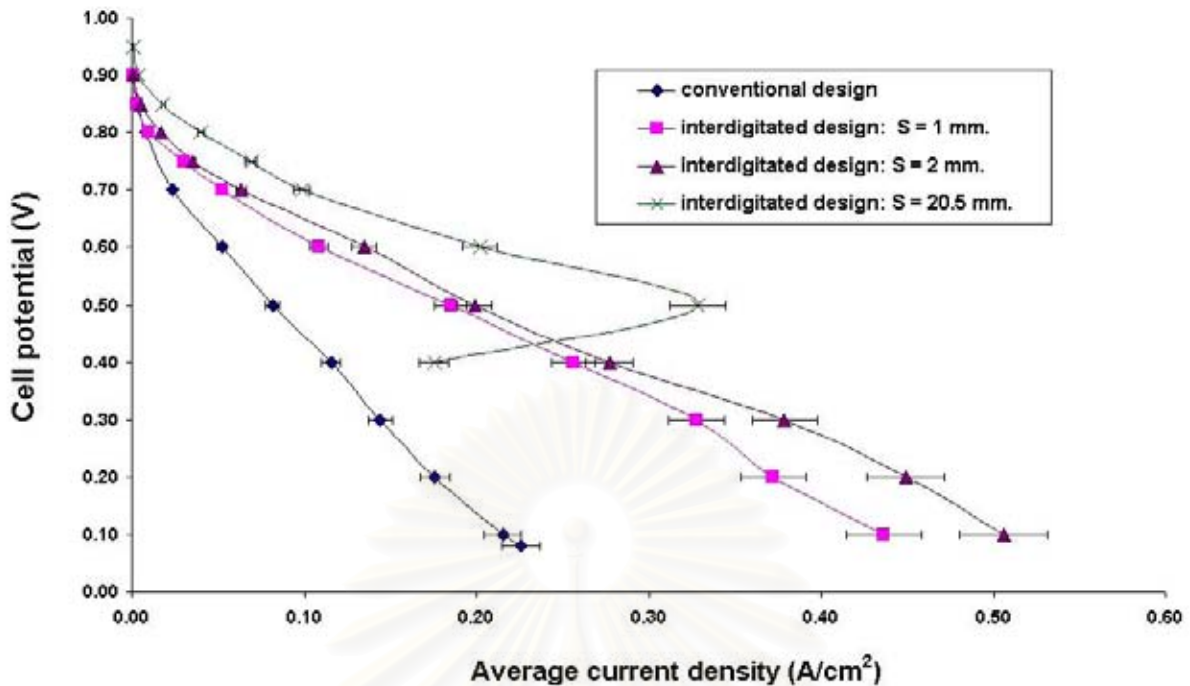
ผลจากแบบจำลองพบว่ารูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทดเป็นอย่างมาก ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดลองในหัวข้อนี้คือ ทดสอบอิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด ซึ่งทำการทดลองโดยใช้ช่องทางการไหลของแก๊สที่ฝั่งขั้วแอโนดแบบ conventional design จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่ฝั่งขั้วแคโทด ซึ่งมีการออกแบบการทดลองดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตารางการทดลอง เพื่อทดสอบอิทธิพลของรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งแคโทด

Anode's flow channel pattern	Cathode's flow channel pattern
Conventional design	Conventional design
	Interdigitated design: S = 1 mm.
	Interdigitated design: S = 20.5 mm.

ทำการทดลองโดยการป้อนอากาศเป็นสารป้อนเข้าทางฝั่งขั้วแคโทดที่อัตรา 2.5 A/cm^2 เทียบเท่า หรือ 207 sccm อ้างอิงที่ภาวะมาตรฐาน (1 บรรยากาศ 25 องศาเซลเซียส) ป้อนแก๊สไฮโดรเจนเป็นสารป้อนเข้าฝั่งขั้วแอโนดที่อัตรา 2.5 A/cm^2 เทียบเท่า หรือ 87 sccm อ้างอิงที่ภาวะมาตรฐาน อุณหภูมิของเซลล์ และอุณหภูมิความชื้น 60 องศาเซลเซียส ผลลัพธ์ถูกป้อนออกมาที่ความดันบรรยากาศ ผลการทดลองแสดงไว้ในกราฟรูปที่ 4.28

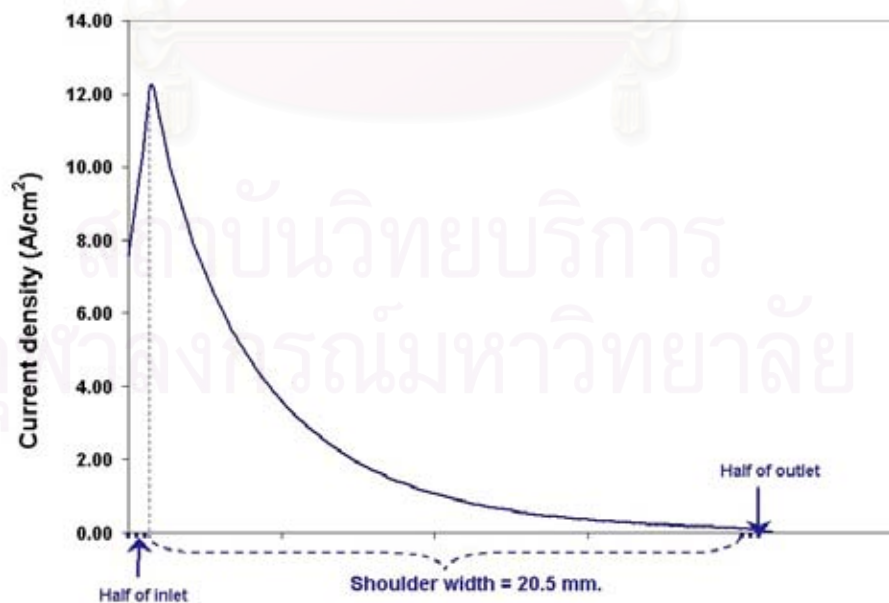
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.28 โพลารไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สฝั่งขั้วแคโทดแบบ conventional design โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนอิ่มตัวด้วยความชื้นที่ 60 °C ที่อัตราการป้อนเข้า 2.5 A/cm² เทียบเท่า และอากาศอิ่มตัวด้วยความชื้นที่ 60 °C ที่อัตราการป้อนเข้า 2.5 A/cm² เทียบเท่า อุณหภูมิเซลล์คงที่ที่ 60 °C

จากผลการทดลองพบว่ารูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด โดยสมรรถนะของเซลล์สูงขึ้นเมื่อเซลล์ฝั่งขั้วแคโทดใช้ช่องทางการไหลแบบ interdigitated design ที่มีขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกว้างขึ้น การใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกว้าง 1 และ 2 มิลลิเมตร กับเซลล์ฝั่งขั้วแคโทดจะสามารถเพิ่มสมรรถนะของเซลล์ได้สูงสุดร้อยละ 93 และ 124 ตามลำดับที่ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวฝั่งขั้วแคโทดมีค่า 0.7 โวลต์ เมื่อเทียบกับการใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional design สำหรับการให้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 20.5 มิลลิเมตร ในเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด พบว่าเซลล์จะมีสมรรถนะดีที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบอื่นๆ ในช่วงที่เซลล์มีศักย์ไฟฟ้าไม่ต่ำกว่า 0.5 โวลต์ แต่เมื่อเซลล์มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า 0.5 จะเกิดปรากฏการณ์น้ำท่วมในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนฝั่งขั้วแคโทดในบริเวณใกล้กับช่องทางการไหลของแก๊สขาเข้า โดยปรากฏให้เห็นเป็นชั้นบางๆของน้ำในบริเวณสันกั้นของช่องทางการไหลของแก๊ส ณ บริเวณดังกล่าว ซึ่งปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อเซลล์มีการสร้างกระแสไฟฟ้าที่ค่าความหนาแน่นกระแสสูงๆ จะมีน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาเป็นจำนวนมาก โดยน้ำจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับกลไกการนำน้ำออกจากผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย กลไกการระเหยของน้ำในกรณีที่สารป้อนเข้ามีความชื้นที่ยังไม่อิ่มตัว กลไกการแพร่ภายในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนโดยอาศัยแรงแคปิลารีซึ่งเป็นอิทธิพลของสาร PTFE และในกรณีที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ

interdigitated design กับเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด กลไกการนำน้ำออกจากขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนจะได้รับอิทธิพลจากแรงเฉือนที่เกิดจากการถ่ายโอนมวลสารแบบการพา สำหรับกรณีที่ใช้ช่องทางการไหลแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 20.5 มิลลิเมตร กลไกในการนำน้ำออกจากขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนจะควบคุมด้วยกลไกการพา และกลไกการแพร่ แต่ไม่มีอิทธิพลของกระบวนการระเหยของน้ำ เพราะเนื่องจากแก๊สป้อนเข้าอิมิตัวด้วยไอน้ำแล้ว ความสามารถในการนำน้ำออกจากขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของแก๊สในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุน ถึงแม้ว่าช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 20.5 มิลลิเมตร จะส่งผลให้เกิดอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของแก๊สภายในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนสูงซึ่งน่าจะเป็นการเพิ่มความสามารถในการนำน้ำออกจากขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุน แต่ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาผลของแบบจำลองพบว่า การเคลื่อนที่ของแก๊สภายในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนด้วยอัตราเร็วที่สูง ส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนออกซิเจนไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาสูง ดังนั้นปฏิกิริยาฝั่งขั้วแคโทดซึ่งถูกควบคุมด้วยอัตราการถ่ายโอนมวลสารไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงดำเนินไปในอัตราเร็วที่สูง ดังรูปที่ 4.29 ซึ่งแสดงผลการทำนายค่าความหนาแน่นกระแส ณ ตำแหน่งใดๆ จากกึ่งกลางช่องทางการไหลของแก๊สขาเข้าถึงกึ่งกลางช่องทางการไหลของแก๊สขาออก ของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทดที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 20.5 มิลลิเมตร ที่ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวฝั่งขั้วแคโทดมีค่า 0.5 โวลต์ ซึ่งส่งผลให้เกิดน้ำขึ้นในบริเวณดังกล่าวเป็นจำนวนมาก น้ำที่เกิดขึ้นนี้มีปริมาณที่มากกว่าที่จะนำออกจากขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนด้วยกลไกการพา ดังนั้นจึงเกิดปรากฏการณ์น้ำท่วมขึ้นภายในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุน ณ บริเวณดังกล่าว



รูปที่ 4.29 ผลการทำนายการกระจายค่าความหนาแน่นกระแสโดยโปรแกรม FLUENT 4.5 จากกึ่งกลางช่องทางการไหลของแก๊สขาเข้าถึงกึ่งกลางช่องทางการไหลของแก๊สขาออก ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากปฏิกิริยาฝั่งขั้วแคโทดมีค่าเท่ากับ 0.5 โวลต์

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 4.28 เปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองรูปที่ 4.14 (หน้า 56) พบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลองในเชิงแนวโน้มเป็นอย่างดี สำหรับปรากฏการณ์น้ำท่วมที่เกิดขึ้นในการทดลองนั้นไม่สามารถทำนายได้จากแบบจำลองเนื่องจากแบบจำลองเป็นแบบจำลองหนึ่งภูมิภาค ดังนั้นน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจึงมีสถานะเป็นแก๊ส และถูกกระแสของสารตั้งต้นพัดพาออกไปจากขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนทำให้แบบจำลองไม่สามารถทำนายการเกิดปรากฏการณ์น้ำท่วมได้

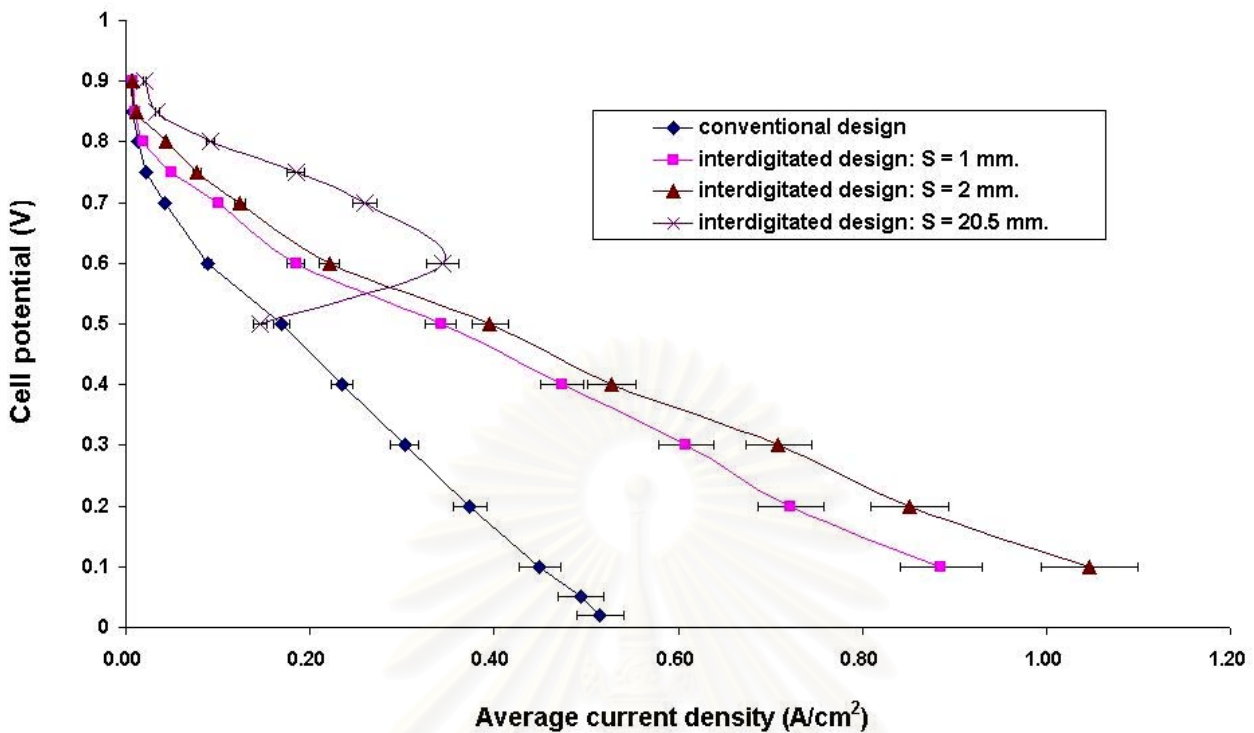
4.2.3 อิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สและแก๊สออกซิเจนที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด

วัตถุประสงค์ของการทดลองในหัวข้อนี้คือ ทดสอบแนวโน้มของอิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทดเมื่อมีการใช้แก๊สออกซิเจนเป็นสารป้อนเข้าฝั่งขั้วแคโทด

ตารางที่ 4.4 ตารางการทดลอง เพื่อทดสอบอิทธิพลของรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สและแก๊สออกซิเจนที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งแคโทด

Anode's flow channel pattern	Cathode's flow channel pattern
Conventional design	Conventional design Interdigitated design: $S = 1$ mm. Interdigitated design: $S = 2$ mm. Interdigitated design: $S = 20.5$ mm.

ซึ่งทำการทดลองโดยใช้ช่องทางการไหลของแก๊สที่ฝั่งขั้วแอโนดแบบ conventional design จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่ฝั่งขั้วแคโทด ซึ่งมีการออกแบบการทดลองดังตารางที่ 4.4 และป้อนแก๊สออกซิเจนเป็นสารป้อนเข้าทางฝั่งขั้วแคโทดที่อัตรา 2.5 A/cm^2 เทียบเท่า หรือ 44 sccm อ้างอิงที่ภาวะมาตรฐาน (1 บรรยากาศ 25 องศาเซลเซียส) ป้อนแก๊สไฮโดรเจนเป็นสารป้อนเข้าฝั่งขั้วแอโนดที่อัตรา 2.5 A/cm^2 เทียบเท่า หรือ 87 sccm อ้างอิงที่ภาวะมาตรฐาน คุณสมบัติของเซลล์และอุณหภูมิความชื้น 60 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ถูกปล่อยออกมาที่ความดันบรรยากาศ ผลการทดลองแสดงไว้ในกราฟรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 โพลาร์ไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สฝั่งขั้วแอโนดแบบ conventional design โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนอิ่มตัวด้วยความชื้นที่ 60 °C ที่อัตราการป้อนเข้า 2.5 A/cm² เทียบเท่า และ ออกซิเจนอิ่มตัวด้วยความชื้นที่ 60 °C ที่อัตราการป้อนเข้า 2.5 A/cm² เทียบเท่า อุณหภูมิเซลล์คงที่ที่ 60 °C

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้แก๊สออกซิเจนเป็นสารป้อนเข้าทางขั้วแคโทด รูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด โดยสมรรถนะของเซลล์สูงขึ้นเมื่อเซลล์ฝั่งขั้วแคโทดใช้ช่องทางการไหลแบบ interdigitated design ที่มีขนาดของสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สที่เพิ่มขึ้น การใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สกว้าง 1 และ 2 มิลลิเมตร กับเซลล์ฝั่งขั้วแคโทดจะสามารถเพิ่มสมรรถนะของเซลล์ได้สูง สู้ร้อยละ 50 และ 133 ตามลำดับ ที่ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวฝั่งขั้วแคโทดมีค่า 0.7 โวลต์เมื่อเทียบกับการใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ conventional design สำหรับการนำช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 20.5 มิลลิเมตร กับเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด พบว่าเซลล์จะมีสมรรถนะดีที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบอื่นๆ ในช่วงที่เซลล์มีศักย์ไฟฟ้าไม่ต่ำกว่า 0.6 โวลต์ แต่เมื่อเซลล์มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า 0.6 จะเกิดปรากฏการณ์น้ำท่วมในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนฝั่งขั้วแคโทดในบริเวณใกล้กับช่องทางการไหลของแก๊สขาเข้า โดยปรากฏให้เห็นเป็นชั้นบางๆของน้ำในบริเวณสันกั้นของช่องทางการไหลของแก๊ส ณ บริเวณดังกล่าว

เมื่อพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 4.30 เปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองรูปที่ 4.19 (หน้า 62) พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับผลจากแบบจำลองในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวฝังขั้วแคโทดมีค่าต่ำในเชิงแนวโน้ม เนื่องจากค่าความหนาแน่นกระแสที่เซลล์สร้างได้จริงจากการทดลองมีค่าไม่เกิน 1.1 A/cm^2 ในขณะที่กระแสของสารป้อนเข้าเป็นแก๊สออกซิเจนที่อัตรา 2.5 A/cm^2 ซึ่งในแบบจำลองที่ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวฝังขั้วแคโทดมีค่าตั้งแต่ 0.5 โวลต์ขึ้นไปจะพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงฝังขั้วแคโทดที่ใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สขนาด 1 และ 2 มิลลิเมตร สามารถสร้างกระแสได้เท่ากับที่ 2.5 A/cm^2 ซึ่งหมายถึงแก๊สออกซิเจนถูกใช้หมดไปในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาแบบจำลองสามมิติหนึ่งภูมิภาคของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 2.25x2.25 ตารางเซนติเมตร ฝั่งขั้วแอโนด และ แคโทดที่แยกจากกันโดยอิสระ ด้วยโปรแกรม FLUENT 4.5 เพื่อศึกษาอิทธิพลของช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแอโนด และแคโทด ซึ่งแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความน่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง เนื่องจากผลที่ได้จากแบบจำลองมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลอง แต่แบบจำลองไม่สามารถทำนายปรากฏการณ์น้ำท่วมที่เกิดขึ้นทางฝั่งขั้วแคโทดได้ เนื่องจากเป็นแบบจำลองหนึ่งภูมิภาค

5.1 ผลของแบบจำลองบนโปรแกรม FLUENT 4.5

- 1) แบบจำลองปรากฏการณ์เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่พัฒนาขึ้นโดยโปรแกรม FLUENT 4.5 มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้ในการทำนายอิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ได้ โดยยืนยันผลกับงานวิจัยของ He และคณะ [5]
- 2) รูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สมีอิทธิพลต่อกลไกการถ่ายโอนมวลสารภายในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุน โดยการถ่ายโอนมวลสารภายในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนจะถูกควบคุมด้วยกลไกการพาเมื่อใช้ช่องทางการไหลแบบ interdigitated design และจะถูกควบคุมด้วยกลไกการแพร่เมื่อใช้ช่องทางการไหลแบบ conventional design
- 3) รูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สไม่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะต่อเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแอโนด เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนมีค่าความหนาแน่นกระแสสมมูลสูง
- 4) รูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทดเป็นอย่างมาก เนื่องจากปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนมีค่าความหนาแน่นกระแสสมมูลต่ำ และออกซิเจนมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนที่ต่ำ
- 5) ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหล 20.5 มิลลิเมตร จะให้สมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทดที่ดีที่สุด และยังสามารถให้เซลล์มีประสิทธิภาพการแปรรูปพลังงานสูงสุด เมื่อเทียบกับช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊สที่

แคบกว่า และช่องทางการไหลแบบ conventional design เนื่องจากกลไกการถ่ายโอนออกซิเจนภายในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนถูกควบคุมด้วยกลไกการพามากขึ้น

5.2 ผลการทดลอง

- 1) รูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สไม่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด
- 2) รูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด โดยช่องทางการไหลแบบ interdigitated design สามารถให้สมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทดที่ดีกว่าช่องทางการไหลแบบ conventional design นอกจากนี้ ช่องทางการไหลแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหล 2 มิลลิเมตร สามารถให้สมรรถนะของเซลล์ที่ดีกว่ากรณีช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหล 1 มิลลิเมตร สำหรับช่องทางการไหลแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหล 20.5 มิลลิเมตร จะให้สมรรถนะของเซลล์ที่ดีที่สุดที่ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์สูงๆ แต่เมื่อเซลล์ทำงานที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ จะเกิดปรากฏการณ์น้ำท่วมที่ฝั่งขั้วแคโทด เนื่องจากเซลล์ผลิตกระแสที่ระดับค่าความหนาแน่นกระแสสูง จึงมีน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเป็นจำนวนมาก และมากเกินไปที่จะถูกพาออกจากขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุนด้วยแรงเฉือนเนื่องจากการไหลของแก๊สในขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุน

5.3 ข้อเสนอแนะ

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยโปรแกรม FLUENT 4.5 สามารถทำนายอิทธิพลของช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ได้เป็นอย่างดี ซึ่งยืนยันโดยผลการทดลอง แต่ถึงกระนั้นยังพบจุดอ่อนของแบบจำลอง กล่าวคือจากการเปรียบเทียบเชิงแนวโน้มระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลอง และผลการทดลอง พบว่ามีความไม่สอดคล้องกันเกิดขึ้นในกรณีที่เซลล์ฝั่งขั้วแคโทดใช้ช่องทางการไหลของแก๊สแบบ interdigitated design ที่มีสันกั้นระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส 20.5 มิลลิเมตร กล่าวคือแบบจำลองไม่สามารถทำนายปรากฏการณ์น้ำท่วมที่ฝั่งขั้วแคโทดได้ เนื่องจากเป็นแบบจำลองหนึ่งภูมิภาค ดังนั้นจึงควรมีการพัฒนาแบบจำลองให้เป็นระบบสองภูมิภาค ซึ่งน่าจะทำนายปรากฏการณ์น้ำท่วมที่เซลล์ฝั่งขั้วแคโทดได้ ซึ่งโปรแกรม FLUENT 4.5 มีข้อจำกัดในการหาผลเฉลยของระบบสามมิติ สองภูมิภาค จึงทำให้ไม่สามารถพัฒนาแบบจำลองให้เป็นระบบสองภูมิภาคได้

รายการอ้างอิง

1. Larminie, j., and Dick, A. Fuel Cell systems explained. Chichester: John Wiley & Sons , 2000.
2. Um, S., and Wang, C.Y. Three-dimensional analysis of transport and electrochemical reactions in polymer electrolyte fuel cells. Journal of Power Source 125 (2004): 40-51
3. Dohle, H., Jung, R., Kimiaie, N., Mergle, J., and Muller, M. Interaction between the diffusion layer and flow field of polymer electrolyte fuel cells-experiments and simulation study. Journal of Power Source 124(2003): 371-384
4. Berning, T., Lu, D.M., and Djilali, N. Three-dimensional computational analysis of transport phenomena in PEM fuel cell. Journal of Power Source 106 (2002): 284-294.
5. He, W., Yi, J., and Nguyen, T.V. Two- Phase Flow Model of the Cathode of PEM Fuel Cells Using Interdigitated Flow Fields. AIChE Journal 46 (2000): 2053-2064.
6. Bard, A.J., and Faulkner, L.R. Electrochemical Methods: Fundamental and Application. New York: John Wiley & Sons , 2000.
7. Bernardi, D.M., and Verbrugge, M.W. Mathematical model of the solid-polymer-electrolyte fuel cell. AIChE Journal 37 (1992): 1151-1163.
8. Springer, T.E., Zawodzinski, T.A., and Gottesfeld, S. Polymer electrolyte fuel cell model. Journal of Electrochemical Society 138 (1991): 2334-2341.
9. รัฐติกร วาสนาเพียรพงศ์. การจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
10. Kotas, T.J. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. Britain: Butterworths., 1985.
11. Kazim, A. Exergy analysis of a PEM fuel cell at variable operating conditions. Energy Conversion & Management 45 (2004): 1941-1961
12. Wood, D.L., III, Yi. J.S., and Nguyen, T.V. Effect of direct liquid water injection and interdigitated flow field on the performance of proton exchange membrane fuel cells. Electrochimica Acta 43 (1998): 3795-3809.

13. พัฒนพงษ์ สงวนรัช. การออกแบบหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมศาสตร ุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
14. Grujicic, M., Zhao, C.L., Chittajallu, K.M., and Ochterbeck, J.M. Cathode and Interdigitated air distributor geometry optimization in polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells Materials Science & Engineering 108 (2004): 241-252.
15. Pasaogullari, U., and Wang, C.Y. Computational fluid dynamics modeling for proton exchange membrane fuel cells using fluent [Online]. Available from: [http://university.fluent.com/2002contest/results/STD0013144 peper.pdf](http://university.fluent.com/2002contest/results/STD0013144%20paper.pdf)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก คู่มือการใช้งานโปรแกรม

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม Fluent 4.5

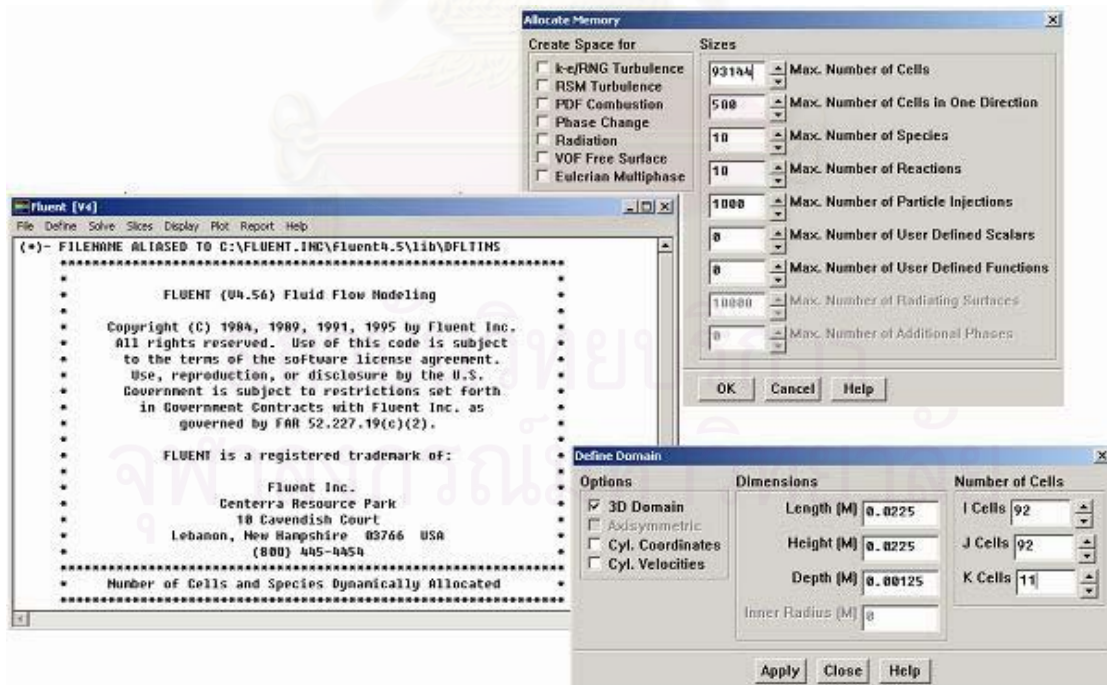
จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ

1) ขั้นตอนการสร้างรูปแบบจำลองเชิงเรขาคณิต (Geometric Modeling)

เริ่มต้นจาก เปิดโปรแกรม Fluent 4.5 ขึ้นมา หน้าต่างที่พบจะเป็นหน้าต่างรับคำสั่งแบบตัวอักษร (Text editor) ดังแสดงในรูปที่ ก1

เลือกเมนูคำสั่ง Define / Allocate... เพื่อทำการกำหนดหน่วยความจำที่ใช้งานสำหรับแบบจำลองที่จะสร้างขึ้น กดปุ่มตกลง ดังแสดงในรูปที่ ก1

จากนั้นเลือกเมนูคำสั่ง Define / Domain... เพื่อกำหนดขนาดขอบเขตของแบบจำลองในที่นี่จะจำลองกระบวนการในลักษณะ 3 มิติ ความยาวเท่ากับ 0.0225 เมตร จำนวนเซลล์ที่ใช้สำหรับคำนวณเท่ากับ 90 เซลล์ และต้องบวกเพิ่มเซลล์ที่อยู่บริเวณขอบของแบบจำลองอีก 2 เซลล์ จึงเท่ากับ 92 เซลล์ ความกว้างเท่ากับ 0.0225 เมตร จำนวนเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 90 เซลล์ เพิ่มบริเวณขอบจะเท่ากับ 92 เซลล์ ความสูงเท่ากับ 0.00125 เมตร จำนวนเซลล์ที่ใช้สำหรับคำนวณเท่ากับ 9 เซลล์ เพิ่มบริเวณขอบจะเท่ากับ 11 เซลล์ ดังแสดงในรูปที่ ก1



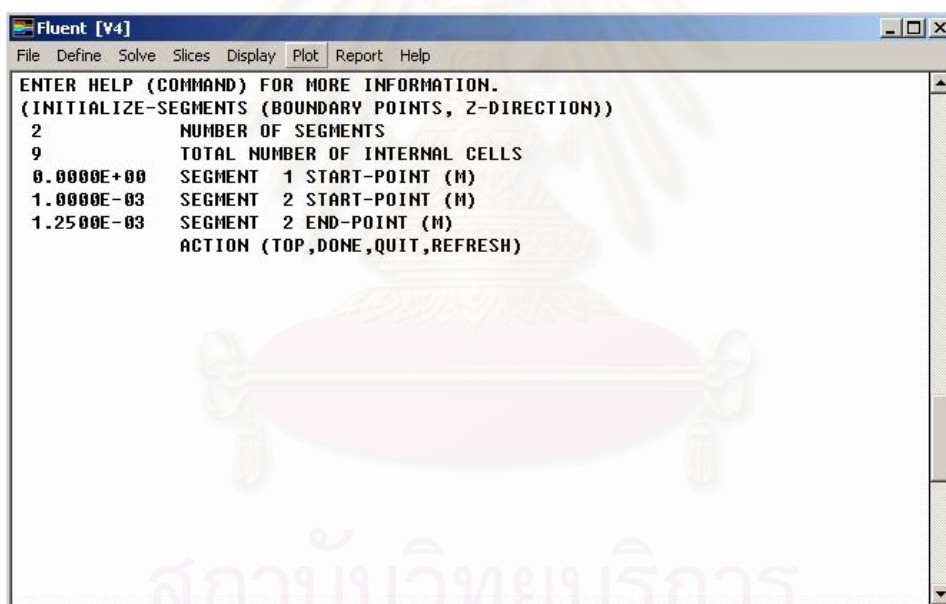
รูปที่ ก1 การกำหนดขอบเขตของแบบจำลองในโปรแกรม Fluent

จากนั้นทำการกำหนดขนาดของเซลล์ที่ใช้สำหรับการคำนวณในชั้นขั้วอิเล็กโทรด ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา และชั้นเยื่อแผ่น โดยมาที่หน้าต่าง Text editor แล้วเข้าไปที่คำสั่ง setup - 1 / generate - grid (ด้วยการพิมพ์คำสั่ง "s1 gg") เลือกทิศทางแกน z (พิมพ์ "3") สำหรับกำหนดขนาดของเซลล์ เลือกคำสั่ง initialize - segment (พิมพ์ "is") กำหนดช่วงเซลล์ที่ต้องการเป็น 2 ช่วง คือ

ช่วงที่ 1 เริ่มต้นที่ 0 เมตร ถึง 1.00E-3 เมตร

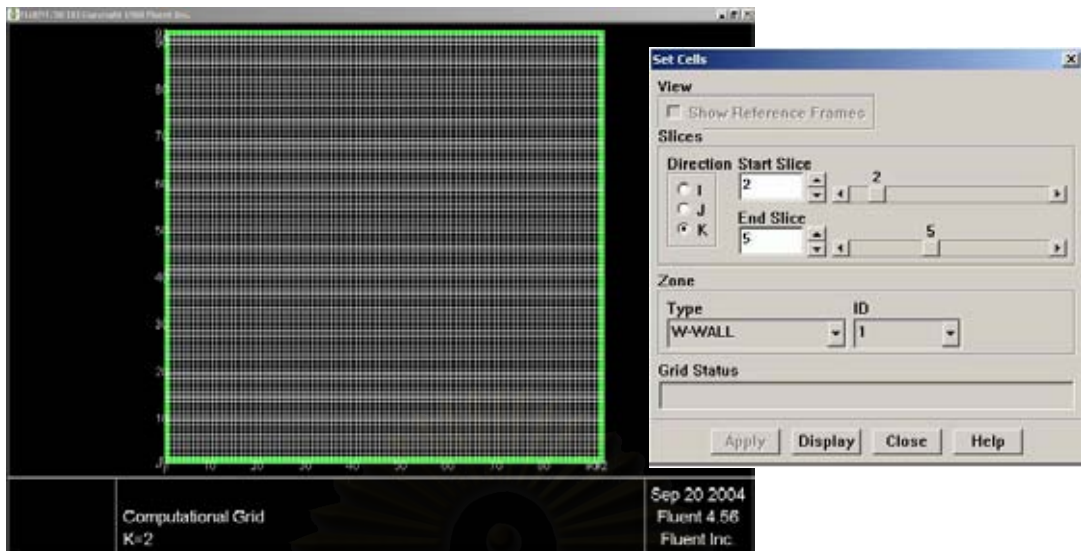
ช่วงที่ 2 เริ่มต้นที่ 1.00E-3 เมตร ถึง 1.25E-3 เมตร

พิมพ์คำสั่ง Done เพื่อไปขั้นตอนกำหนดจำนวนเซลล์ในแต่ละช่วง โดยช่วงที่ 1 เป็นช่องทางการไหลของแก๊สและสันกันระหว่างช่องทางการไหลของแก๊ส กำหนดให้มีอัตราส่วน 4 เซลล์ต่อความยาวจริง 1.00E-3 เมตร ช่วงที่ 2 เป็นขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุน กำหนดให้มีอัตราส่วน 1 เซลล์ต่อความยาวจริง 5.00E-5 เมตร ดังแสดงในรูปที่ ก2



รูปที่ ก2 การกำหนดช่วง ขนาด และจำนวนเซลล์ของแบบจำลอง

ขั้นตอนต่อไป ทำการกำหนดชนิดของเซลล์ที่ตำแหน่งต่างๆ โดยไปที่เมนูคำสั่ง Define / Cells... เลือกทิศทาง K (แกน z) กดปุ่ม Display จะแสดงรูปแบบจำลองแบ่งเป็นเซลล์เล็กดังรูปที่ ก3

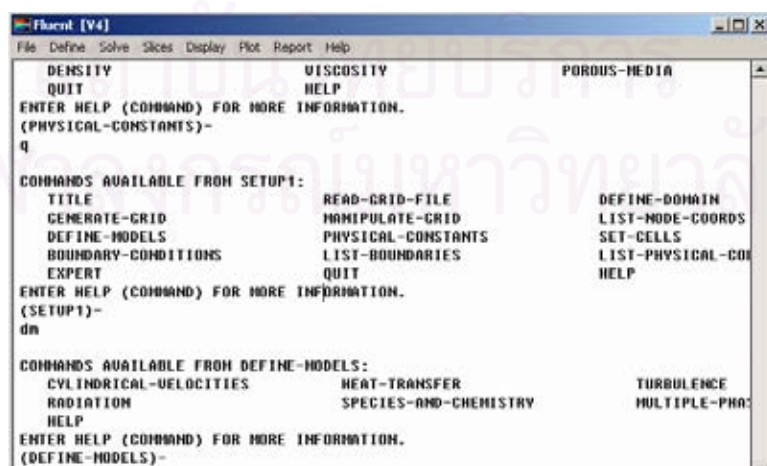


รูปที่ ก3 การกำหนดชนิดของเซลล์ในแบบจำลอง

กำหนดชนิดของเซลล์โดยลากเมาส์ไปบนเซลล์ที่ต้องการ และกลับมาที่หน้าต่าง Set Cells เลือกชนิดและหมายเลขของช่วงเซลล์ที่ช่อง Zone : Type, ID เป็นอันเสร็จขั้นตอนการสร้างรูปแบบจำลองเชิงเรขาคณิต

2) ขั้นตอนการกำหนดสมการที่ใช้ในแบบจำลอง

การกำหนดสมการที่ใช้ในแบบจำลองเริ่มจากเข้าไปที่ Text editor แล้วเข้าไปที่คำสั่ง setup - 1 / DEFINE-MODELS จากนั้นจึงทำการเลือกสมการที่สอดคล้องกับแบบจำลอง ดังรูปที่ ก4 และทำการกำหนดสมบัติเชิงกายภาพของของไหล และตัวกลางแบบมีรูพรุนโดยเข้าไปที่ Text editor แล้วเข้าไปที่คำสั่ง setup-1 / PHYSICAL-CONSTANTS แล้วจึงทำการกำหนดสมบัติเชิงกายภาพของของไหลและตัวกลางแบบมีรูพรุน ขั้นตอนสุดท้ายคือการกำหนดเงื่อนไขขอบโดยเข้าไปที่ setup-1 / BOUNDARY-CONDITIONS



รูปที่ ก4 การกำหนดสมการที่ใช้ในแบบจำลอง

ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลของแบบจำลอง

ตารางที่ ข1 ผลการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแอโนด โดยโปรแกรม FLUENT 4.5

สารป้อนเข้าฝั่งขั้วแอโนด: แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ ที่อัตรา 2.5 A/cm² เทียบเท่า หรือ 6.4x10⁻⁵ mol H₂/sec

Flow channel pattern	Anode Overpotential (V)	Average Current Density (A/cm ²)	Flow channel pattern	Anode Overpotential (V)	Average Current Density (A/cm ²)	Flow channel pattern	Anode Overpotential (V)	Average Current Density (A/cm ²)
conventional design: CH = 1 mm., S = 1 mm.	6.605E-06	0.1402	conventional design: CH = 1.5 mm., S = 1 mm.	6.605E-06	0.1402	conventional design: CH = 1.5 mm., S = 1.5 mm.	6.605E-06	0.1402
	3.774E-05	0.7753		3.774E-05	0.7753		3.774E-05	0.7753
	9.020E-05	1.6850		9.020E-05	1.6850		9.020E-05	1.6850
	2.156E-04	2.4734		2.156E-04	2.4734		2.156E-04	2.4734
	1.232E-03	2.5744		1.232E-03	2.5744		1.232E-03	2.5744
	2.944E-03	2.5744		2.944E-03	2.5744		2.944E-03	2.5744
	7.038E-03	2.5744		7.038E-03	2.5744		7.038E-03	2.5744
Flow channel pattern	Anode Overpotential (V)	Average Current Density (A/cm ²)	Flow channel pattern	Anode Overpotential (V)	Average Current Density (A/cm ²)	Flow channel pattern	Anode Overpotential (V)	Average Current Density (A/cm ²)
interdigitated design: CH _{in} = 1 mm., CH _{out} = 1 mm., S = 1 mm.	6.605E-06	0.1402	interdigitated design: CH _{in} = 1.5 mm., CH _{out} = 1 mm., S = 1 mm.	6.605E-06	0.1402	interdigitated design: CH _{in} = 1 mm., CH _{out} = 1.5 mm., S = 1 mm.	6.605E-06	0.1402
	3.774E-05	0.7753		3.774E-05	0.7753		3.774E-05	0.7753
	9.020E-05	1.6850		9.020E-05	1.6850		9.020E-05	1.6850
	2.156E-04	2.4734		2.156E-04	2.4734		2.156E-04	2.4734
	1.232E-03	2.5744		1.232E-03	2.5744		1.232E-03	2.5744
	2.944E-03	2.5744		2.944E-03	2.5744		2.944E-03	2.5744
	7.038E-03	2.5744		7.038E-03	2.5744		7.038E-03	2.5744

ตารางที่ 2 ผลการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทด โดยโปรแกรม FLUENT 4.5

สารป้อนเข้าฝั่งขั้วแคโทด: อากาศ ที่อัตรา 2.5 A/cm^2 เทียบเท่า หรือ $3.2 \times 10^{-5} \text{ mol O}_2/\text{sec}$

Flow channel pattern	Cathode Overpotential (V)	Average Current Density (A/cm^2)	Flow channel pattern	Cathode Overpotential (V)	Average Current Density (A/cm^2)	Flow channel pattern	Cathode Overpotential (V)	Average Current Density (A/cm^2)
Pconventional design: CH = 1 mm., S = 1 mm.	0.2	0.1402	conventional design: CH = 1.5 mm., S = 1 mm.	0.2	0.1402	conventional design: CH = 1.5 mm., S = 1.5 mm.	0.2	0.1402
	0.3	0.7753		0.3	0.7753		0.3	0.7753
	0.35	1.6850		0.35	1.6850		0.35	1.6850
	0.4	2.4734		0.4	2.4734		0.4	2.4734
	0.5	2.5744		0.5	2.5744		0.5	2.5744
	0.6	2.5744		0.6	2.5744		0.6	2.5744
	0.7	2.5744		0.7	2.5744		0.7	2.5744
Flow channel pattern	Cathode Overpotential (V)	Average Current Density (A/cm^2)	Flow channel pattern	Cathode Overpotential (V)	Average Current Density (A/cm^2)	Flow channel pattern	Cathode Overpotential (V)	Average Current Density (A/cm^2)
interdigitated design: CH _{in} = 1 mm., CH _{out} = 1 mm., S = 1 mm.	0.2	0.0668	interdigitated design: CH _{in} = 1.5 mm., CH _{out} = 1 mm., S = 1 mm.	0.2	0.0668	interdigitated design: CH _{in} = 1 mm., CH _{out} = 1.5 mm., S = 1 mm.	0.2	0.0667
	0.3	0.3361		0.3	0.3350		0.3	0.3346
	0.35	0.6716		0.35	0.6666		0.35	0.6662
	0.4	1.1581		0.4	1.1440		0.4	1.1442
	0.5	2.0138		0.5	1.9863		0.5	1.9867
	0.6	2.1899		0.6	2.1646		0.6	2.1646
	0.7	2.2639		0.7	2.2406		0.7	2.2407

ตารางที่ ข 2 (ต่อ) ผลการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฝั่งขั้วแคโทด โดยโปรแกรม FLUENT 4.5

สารป้อนเข้าฝั่งขั้วแคโทด: อากาศ ที่อัตรา 2.5 A/cm^2 เทียบเท่า หรือ $3.2 \times 10^{-5} \text{ mol O}_2/\text{sec}$

Flow channel pattern	Cathode Overpotential (V)	Average Current Density (A/cm^2)	Flow channel pattern	Cathode Overpotential (V)	Average Current Density (A/cm^2)
interdigitated design: $\text{CH}_{\text{in}} = 1 \text{ mm.}, \text{CH}_{\text{out}} = 1 \text{ mm.}, S = 2 \text{ mm.}$	0.2	0.0678	interdigitated design: $\text{CH}_{\text{in}} = 1 \text{ mm.}, \text{CH}_{\text{out}} = 1 \text{ mm.}, S = 2.5 \text{ mm.}$	0.2	0.0683
	0.3	0.3439		0.3	0.3478
	0.35	0.6933		0.35	0.7008
	0.4	1.2075		0.4	1.2219
	0.5	2.1031		0.5	2.1260
	0.6	2.3406		0.6	2.3583
	0.7	2.3784		0.7	2.3924
Flow channel pattern	Cathode Overpotential (V)	Average Current Density (A/cm^2)	Flow channel pattern	Cathode Overpotential (V)	Average Current Density (A/cm^2)
interdigitated design: $\text{CH}_{\text{in}} = 1 \text{ mm.}, \text{CH}_{\text{out}} = 1 \text{ mm.}, S = 6 \text{ mm.}$	0.2	0.0835	interdigitated design: $\text{CH}_{\text{in}} = 1 \text{ mm.}, \text{CH}_{\text{out}} = 1 \text{ mm.}, S = 20.5 \text{ mm.}$	0.2	0.1117
	0.3	0.3838		0.3	0.5545
	0.35	0.7670		0.35	1.0787
	0.4	1.3164		0.4	1.7423
	0.5	2.2036		0.5	2.4150
	0.6	2.3991		0.6	2.4565
	0.7	2.4246		0.7	2.4553

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๓3 ผลการคำนวณศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ และ ความหนาแน่นพลังงาน สำหรับคำนวณประสิทธิภาพ
 ในการแปรรูปพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน
 สารป้อนเข้าฝั่งขั้วแอโนด: แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ ที่ 2.5 A/cm^2 เทียบเท่า
 สารป้อนเข้าฝั่งขั้วแคโทด: อากาศ ที่ 2.5 A/cm^2 เทียบเท่า
 ช่องทางการไหลของแก๊สฝั่งขั้วแอโนด : conventional design

Flow channel pattern	average current density (A/cm^2)	cathode overpotential (V)	Ohmic overpotential(V)	cell potential (V)	power density (W/cm^2)	inlet pressure (Pa)
interdigitated design: $\text{CH}_{\text{in}} = 1 \text{ mm.}, \text{CH}_{\text{out}} = 1 \text{ mm.}, S = 1 \text{ mm.}$	0.067	-0.2	-0.0086	0.9774	0.0653	1810
	0.336	-0.3	-0.0430	0.8430	0.2833	1810
	0.672	-0.35	-0.0860	0.7500	0.5037	1810
	1.158	-0.4	-0.1482	0.6378	0.7386	1810
	2.014	-0.5	-0.2578	0.4282	0.8624	1810
	2.190	-0.6	-0.2803	0.3057	0.6694	1810
	2.264	-0.7	-0.2898	0.1962	0.4442	1810
interdigitated design: $\text{CH}_{\text{in}} = 1 \text{ mm.}, \text{CH}_{\text{out}} = 1 \text{ mm.}, S = 2 \text{ mm.}$	0.068	-0.2	-0.0087	0.9773	0.0662	4654
	0.344	-0.3	-0.0440	0.8420	0.2895	4654
	0.693	-0.35	-0.0887	0.7473	0.5181	4654
	1.207	-0.4	-0.1546	0.6314	0.7624	4654
	2.103	-0.5	-0.2692	0.4168	0.8766	4654
	2.341	-0.6	-0.2996	0.2864	0.6704	4654
	2.378	-0.7	-0.3044	0.1816	0.4318	4654
interdigitated design: $\text{CH}_{\text{in}} = 1 \text{ mm.}, \text{CH}_{\text{out}} = 1 \text{ mm.}, S = 20.5 \text{ mm.}$	0.112	-0.2	0.0143	0.9717	0.1085	140979
	0.555	-0.3	0.0710	0.8150	0.4520	140979
	1.079	-0.35	0.1381	0.6979	0.7528	140979
	1.742	-0.4	0.2230	0.5630	0.9809	140979
	2.415	-0.5	0.3091	0.3769	0.9102	140979
	2.457	-0.6	0.3144	0.2716	0.6671	140979
	2.455	-0.7	0.3143	0.1717	0.4216	140979

ตารางที่ ข 4 ผลการทดลอง อิทธิพลของรูปแบบช่องทางไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฟุ้งขั้วแอโนด

Flow Rate of Hydrogen = 2.5 A/cm^2 equivqlent (87 sccm) Temperature of Humidifier = $60 \text{ }^\circ\text{C}$

Flow Rate of Air = 2.5 A/cm^2 equivqlent (207 sccm) Operating Temperature = $60 \text{ }^\circ\text{C}$

Flow channel pattern at cathode side = interdigitated design shoulder width 1 mm.

Cell potential (V)	Flow Channel Pattern at anode side = conventional design			Flow Channel Pattern at anode side = interdigitated design shoulder width 1 mm,			Flow Channel Pattern at anode side = interdigitated design shoulder width 2 mm.			Flow Channel Pattern at anode side = interdigitated design shoulder width 20.5 mm.		
	Current (A)	Current density (A/cm ²)	Power density (W/cm ²)	Current (A)	Current density (A/cm ²)	Power density (W/cm ²)	Current (A)	Current density (A/cm ²)	Power density (W/cm ²)	Current (A)	Current density (A/cm ²)	Power density (W/cm ²)
0.9	0.0050	0.0010	0.00091	0.0051	0.0010	0.00092	0.0035	0.0007	0.00063	0.0051	0.0010	0.000920736
0.85	0.0165	0.0033	0.00281	0.0176	0.0035	0.00300	0.0162	0.0032	0.00275	0.0173	0.0035	0.002941368
0.8	0.0476	0.0095	0.00762	0.0378	0.0076	0.00605	0.0452	0.0090	0.00723	0.0491	0.0098	0.007861133
0.75	0.1515	0.0303	0.02272	0.1567	0.0313	0.02351	0.1613	0.0323	0.02420	0.1527	0.0305	0.022906667
0.7	0.2621	0.0524	0.03670	0.2602	0.0520	0.03643	0.2630	0.0526	0.03683	0.2631	0.0526	0.036840222
0.6	0.5428	0.1086	0.06513	0.5364	0.1073	0.06437	0.5365	0.1073	0.06438	0.5393	0.1079	0.064719333
0.5	0.9251	0.1850	0.09251	0.9356	0.1871	0.09356	0.9467	0.1893	0.09467	0.9162	0.1832	0.091618889
0.4	1.2809	0.2562	0.10248	1.2607	0.2521	0.10085	1.2417	0.2483	0.09933	1.2307	0.2461	0.098453333
0.3	1.6384	0.3277	0.09831	1.6444	0.3289	0.09866	1.6248	0.3250	0.09749	1.5998	0.3200	0.095986667
0.2	1.8611	0.3722	0.07444	1.8898	0.3780	0.07559	1.8459	0.3692	0.07384	1.8459	0.3692	0.073835556
0.1	2.1826	0.4365	0.04365	2.2055	0.4411	0.04411	2.2045	0.4409	0.04409	2.2549	0.4510	0.045097778

ตารางที่ ข 4 (ต่อ) ผลการทดลอง อิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแอโนด

Flow Rate of Hydrogen = 2.5 A/cm^2 equivqlent (87 sccm) Temperature of Humidifier = $60 \text{ }^\circ\text{C}$

Flow Rate of Air = 2.5 A/cm^2 equivqlent (207 sccm) Operating Temperature = $60 \text{ }^\circ\text{C}$

Flow channel pattern at cathode side = interdigitated design shoulder width 2 mm.

Cell potential (V)	Flow Channel Pattern at anode side = conventional design			Flow Channel Pattern at anode side = interdigitated design shoulder width 1 mm,			Flow Channel Pattern at anode side = interdigitated design shoulder width 2 mm.			Flow Channel Pattern at anode side = interdigitated design shoulder width 20.5 mm.		
	Current (A)	Current density (A/cm ²)	Power density (W/cm ²)	Current (A)	Current density (A/cm ²)	Power density (W/cm ²)	Current (A)	Current density (A/cm ²)	Power density (W/cm ²)	Current (A)	Current density (A/cm ²)	Power density (W/cm ²)
0.9	0.0026	0.0005	0.00047	0.0050	0.0010	0.00090	0.0056	0.0011	0.00100	0.0026	0.0005	0.00047
0.85	0.0252	0.0050	0.00429	0.0250	0.0050	0.00425	0.0264	0.0053	0.00449	0.0255	0.0051	0.00434
0.8	0.0843	0.0169	0.01349	0.0827	0.0165	0.01324	0.0825	0.0165	0.01320	0.0838	0.0168	0.01341
0.75	0.1757	0.0351	0.02636	0.1702	0.0340	0.02552	0.1718	0.0344	0.02578	0.1739	0.0348	0.02609
0.7	0.3174	0.0635	0.04444	0.3118	0.0624	0.04365	0.3098	0.0620	0.04337	0.3240	0.0648	0.04536
0.6	0.6738	0.1348	0.08086	0.6599	0.1320	0.07919	0.6634	0.1327	0.07961	0.6585	0.1317	0.07902
0.5	0.9947	0.1989	0.09947	0.9720	0.1944	0.09720	1.0151	0.2030	0.10151	1.0565	0.2113	0.10565
0.4	1.3857	0.2771	0.11086	1.3926	0.2785	0.11141	1.4115	0.2823	0.11292	1.4207	0.2841	0.11366
0.3	1.8942	0.3788	0.11365	1.8850	0.3770	0.11310	1.9044	0.3809	0.11426	1.9391	0.3878	0.11634
0.2	2.2462	0.4492	0.08985	2.2684	0.4537	0.09074	2.2679	0.4536	0.09072	2.2784	0.4557	0.09114
0.1	2.5296	0.5059	0.05059	2.5215	0.5043	0.05043	2.5121	0.5024	0.05024	2.5141	0.5028	0.05028

ตารางที่ 5 ผลการทดลอง อิทธิพลของรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ฝั่งขั้วแคโทด

Flow Rate of Hydrogen = 2.5 A/cm² equivqlent (87 sccm) Temperature of Humidifier = 60 °C

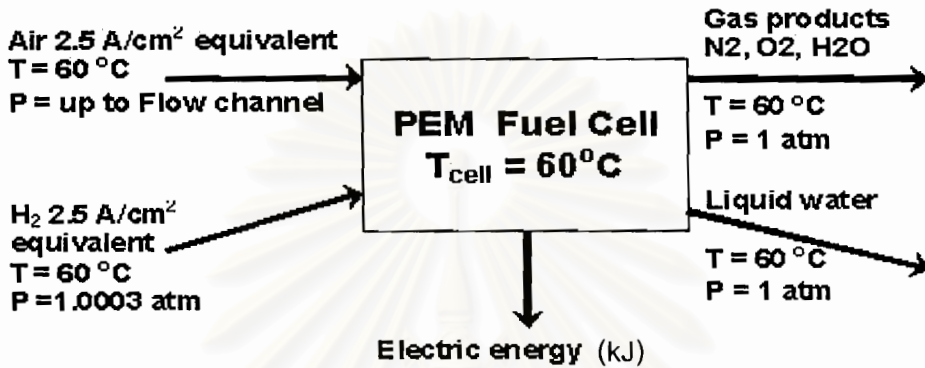
Flow Rate of Air = 2.5 A/cm² equivqlent (207 sccm) Operating Temperature = 60 °C

Flow channel pattern at anode side = conventional design

Cell potential (V)	Flow Channel Pattern at anode side = conventional design			Flow Channel Pattern at cathode side = interdigitated design shoulder width 1 mm,			Flow Channel Pattern at cathode side = interdigitated design shoulder width 2 mm.			Flow Channel Pattern at cathode side = interdigitated design shoulder width 20.5 mm.		
	Current (A)	Current density (A/cm ²)	Power density (W/cm ²)	Current (A)	Current density (A/cm ²)	Power density (W/cm ²)	Current (A)	Current density (A/cm ²)	Power density (W/cm ²)	Current (A)	Current density (A/cm ²)	Power density (W/cm ²)
0.95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.002611478	0.000522296	0.000496181
0.9	0.0055	0.0011	0.00099	0.0050	0.0010	0.00091	0.0026	0.0005	0.00047	0.0189	0.0038	0.00341
0.85	0.0178	0.0036	0.00302	0.0165	0.0033	0.00281	0.0252	0.0050	0.00429	0.0902	0.0180	0.01534
0.8	0.0414	0.0083	0.00663	0.0476	0.0095	0.00762	0.0843	0.0169	0.01349	0.2001	0.0400	0.03201
0.75	0.1183	0.0237	0.01657	0.1515	0.0303	0.02272	0.1757	0.0351	0.02636	0.3461	0.0692	0.05192
0.7	0.2610	0.0522	0.03132	0.2621	0.0524	0.03670	0.3174	0.0635	0.04444	0.4928	0.0986	0.06899
0.6	0.4080	0.0816	0.04080	0.5428	0.1086	0.06513	0.6738	0.1348	0.08086	1.0098	0.2020	0.12117
0.5	0.5775	0.1155	0.04620	0.9251	0.1850	0.09251	0.9947	0.1989	0.09947	1.6417	0.3283	0.16417
0.4	0.7211	0.1442	0.04327	1.2809	0.2562	0.10248	1.3857	0.2771	0.11086	0.8764	0.1753	0.07011
0.3	0.8801	0.1760	0.03520	1.6384	0.3277	0.09831	1.8942	0.3788	0.11365	-	-	-
0.2	1.0761	0.2152	0.02152	1.8611	0.3722	0.07444	2.2462	0.4492	0.08985	-	-	-
0.1	1.1292	0.2258	0.01807	2.1826	0.4365	0.04365	2.5296	0.5059	0.05059	-	-	-

ภาคผนวก ค

การคำนวณประสิทธิภาพการแปรรูปพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงด้วยวิธีทาง exergy



รูปที่ 4.24 ขอบเขตและภาวะในการทำสมดุล exergy ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนแบบเซลล์เดี่ยว ขนาด 5 ตารางเซนติเมตร

หมายเหตุ

ช่องทางการไหลของแก๊สฝั่งขั้วแคโทด: 20.5 mm. shoulder width interdigitated design, $P_{cath,in} = 2.391 \text{ atm}$

ช่องทางการไหลของแก๊สฝั่งขั้วแอโนด: conventional design, $P_{anode,in} \sim 1 \text{ atm}$

ทำการคำนวณที่ ความหนาแน่นกระแส 1 A/cm^2

Electric energy output = $3.553 \times 10^{-3} \text{ kJ}$

1. คำนวณจำนวนโมลของสารป้อนเข้าฝั่งแอโนด

แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ ที่อัตรา 2.5 A/cm^2

จาก Faraday's Law

$$rate = \frac{i}{nF}$$

$$\begin{aligned}
 \text{rate of H}_2 \text{ consumption} &= \frac{(2.5 \text{ A/cm}^2) (5 \text{ cm}^2)}{2 (96500) (1000)} \\
 &= 6.412 \text{E-}08 \text{ kmol/sec}
 \end{aligned}$$

2. คำนวณจำนวนโมลของสารป้อนเข้าฝั่งแคโทด

อากาศ ที่อัตรา 2.5 A/cm^2

$$\begin{aligned}
 & \frac{(2.5 \text{ A/cm}^2) (5 \text{ cm}^2)}{4(96500) (1000)} \\
 = & 3.206\text{E-}08 \text{ kmol/sec} \\
 = & \text{mole } O_2 \times \frac{0.79}{0.21} \\
 = & 1.206\text{E-}07 \text{ kmol/sec}
 \end{aligned}$$

3. คำนวณมวลสารขาออก

$$\begin{aligned}
 O_2 \text{ consumed} &= \frac{(1 \text{ A/cm}^2) (5 \text{ cm}^2)}{4 (96500) (1000)} \\
 &= 1.295\text{E-}08 \text{ kmol/sec}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_2 \text{ consumed} &= \frac{(1 \text{ A/cm}^2) (5 \text{ cm}^2)}{2 (96500) (1000)} \\
 &= 2.591\text{E-}08 \text{ kmol/sec}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_2O \text{ generate} &= (1/2) O_2 \text{ consume} \\
 &= 6.477\text{E-}09 \text{ mol/sec}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น	O_2 outlet	=	$1.911\text{E-}08 \text{ kmol/sec}$
	N_2 outlet	=	$1.206\text{E-}07 \text{ kmol/sec}$
	H_2 outlet	=	$3.821\text{E-}08 \text{ kmol/sec}$
	H_2O outlet	=	$6.477\text{E-}09 \text{ kmol/sec}$
	total mole of outlet	=	$1.844\text{E-}07 \text{ kmol/sec}$

4. คำนวณปริมาณระเหยเป็นไอ

ที่ 60°C 1 บรรยากาศ น้ำมีความดันไออิ่มตัว 152mm.Hg

$$\text{จาก } \frac{n_{H_2O}}{n_{total}} = \frac{P_{H_2O}^{sat}}{P_{total}}$$

$$\frac{n_{H_2O}}{n_{total}} = 0.20$$

$$\text{ดังนั้นปริมาณของน้ำในวัฏภาคไอที่สูงที่สุดคือ } = \frac{(N_2 \text{ ขาออก} + O_2 \text{ ขาออก}) \times 0.2}{0.8}$$

$$= 3.49E-08 \text{ kmol/sec}$$

ดังนั้นในกรณีนี้ น้ำผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา จึงกลายเป็นไอทั้งหมด

5. คำนวณ physical exergy

$$\text{จาก } \varepsilon_{ph} = c_p (T_1 - T_0) - T_0 \left(c_p \ln \frac{T_1}{T_0} - R \ln \frac{P_1}{P_0} \right)$$

$$T_0 = 273 \text{ K} \quad T_1 = 333 \text{ K}$$

$$P_0 = 1 \text{ atm} \quad P_{1,cathode} = 2.391 \text{ atm}$$

$$P_{1,anode} = 1 \text{ atm}$$

ตารางที่ ค1 การคำนวณ physical exergy ของสารป้อนเข้า

	composition	kmol	h_0 (kJ/kmol)	s_0 (kJ/kmol)	h (kJ/kmol)	s (kJ/kmol)	c_p (kJ/kmol K)	ε_{ph} (kJ)
Anode	H ₂	6.412E-08	8468	130.574	8897.7	133.768	28.79	3.4E-06
Cathode	O ₂	3.206E-08	8682	205.033	9708.8	208.301	27.21	1.8E-06
	N ₂	1.206E-07	8668	191.502	9684.3	194.7197	29.2	7.3E-06
Total		2.168E-07						1.2E-05

ตารางที่ ค2 การคำนวณ physical exergy ของสารผลิตภัณฑ์

	composition	kmol	h_0 (kJ/kmol)	s_0 (kJ/kmol)	h (kJ/kmol)	s (kJ/kmol)	c_p (kJ/kmol K)	\mathcal{E}_{ph} (kJ)
Anode	H ₂	3.821E-08	8468	130.574	8897.7	133.768	28.79	2E-06
	O ₂	1.911E-08	8682	205.033	9708.8	208.301	27.21	9.5E-07
Cathode	N ₂	1.206E-07	8668	191.502	9684.3	194.7197	29.2	6.4E-06
	H ₂ O	6.4767E-09	9904	188.72	11077.4	192.4384	33.16	7.3E-09
Total		1.844E-07						9.4E-06

6. คำนวณ chemical exergy

ตารางที่ ค3 การคำนวณ chemical exergy ของสารป้อนเข้า

	composition	kmol	\mathcal{E}_0 (kJ/kmol)	\mathcal{E}_{ch} (kJ)
Anode	H ₂	6.412E-08	238490	1.475E-02
Cathode	O ₂	3.206E-08	3470	9.618E-05
	N ₂	1.206E-07	720	8.684E-05
Total		2.168E-07		1.493E-02

ตารางที่ ค4 การคำนวณ chemical exergy ของสารผลิตภัณฑ์

	composition	kmol	\mathcal{E}_0 (kJ/kmol)	\mathcal{E}_{ch} (kJ)
Anode	H ₂	3.821E-08	238490	8.961E-03
Cathode	O ₂	1.911E-08	3470	6.630E-05
	N ₂	1.206E-07	720	8.684E-05
	H ₂ O	6.47668E-09	11710	7.584E-05
Total		1.844E-07		9.190E-03

7. คำนวณประสิทธิภาพการแปรรูปพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิง

ตารางที่ ค5 การคำนวณประสิทธิภาพการแปรรูปพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิง

$\mathcal{E}_{ph(in)}$ (kJ)	$\mathcal{E}_{ch(in)}$ (kJ)	$\mathcal{E}_{total(in)}$ (kJ)	$\mathcal{E}_{ph(out)}$ (kJ)	$\mathcal{E}_{ch(out)}$ (kJ)	$\mathcal{E}_{total(out)}$ (kJ)	$\mathcal{E}_{total(in)} - \mathcal{E}_{total(out)}$ (kJ)	electrical power output (KJ)	Cell efficiency
1.24E-05	1.49E-02	1.50E-02	9.39E-06	9.19E-03	9.20E-03	5.61E-03	3.64E-03	65%

ภาคผนวก ง

สมบัติเชิงกายภาพของแผ่นสะสมกระแสจากบริษัท Schunk United Carbon Co., Ltd.

ตาราง ง1 สมบัติเชิงกายภาพของแผ่นสะสมกระแสจากบริษัท Schunk United Carbon Co., Ltd.

Property	Value	unit
Apparent density	1.85	g/cm ³
Porosity	10	%
Hardness	70	Shore
Flexural strength	70	N/mm ²
Compressive strength	130	N/mm ²
Tensile strength	50	N/mm ²
Specific resistivity	15	$\mu\Omega\text{m}$
Thermal conductivity	80	W/mK
Coefficient of thermal exp.	6	10 ⁻⁶ /K

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว กรรณก หงษ์ทอง เกิดเมื่อวันที่ 3 มิถุนายน 2522 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อ พ.ศ. 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย