



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญา

วิศวกรรมเคมี

สาขา

วิศวกรรมเคมี

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

Development of Effectiveness of Fuel Cell

นามผู้วิจัย นางสาวปรียาภัทร์ แววดิ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์สุนันท์ ลิ้มตระกูล, D.Sc.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์เทอดไทย วัฒนธรรม, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อภิญญา ดวงจันทร์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ _____ เดือน _____ พ.ศ. _____

สิงสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

Development of Effectiveness of Fuel Cell

โดย

นางสาวปรียาภรณ์ แววดี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปริยาภักดิ์ แวดี 2557: การพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ปรินญาวิศวกรรม
ศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์สุรินทร์ ลิ้มตระกูล, D.Sc. 82 หน้า

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนสองวิธี คือ
วิธีแรกพิจารณาชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นหัวใจหลักและมีความสำคัญต่อสมรรถนะของเซลล์
เชื้อเพลิง สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มพื้นที่
การทำปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือแพลทินัมซึ่งมีราคาแพง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้
ศึกษาการลดปริมาณแพลทินัม โดยยังคงมีสมรรถนะสูงอยู่ ซึ่งทั่วไปแล้วความเข้มข้นของสารตั้งต้น
จะลดลงตามความยาวของช่องทางไหลเนื่องจากถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นปริมาณแพลทินัม
ที่ใช้ควรลดลงด้วย งานนี้ได้ออกแบบการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบไล่ระดับ เพื่อลดปริมาณการ
ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการศึกษา พบว่า เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแพลทินัมแบบไล่ระดับจากมาก
ไปน้อยตามความยาวของช่องทางไหลสามารถเพิ่มสมรรถนะได้ แต่เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบ
แบบไล่ระดับจากน้อยไปมากไม่สามารถเพิ่มสมรรถนะได้ โดยทั้งคู่มีปริมาณใช้แพลทินัมที่เท่ากัน
นอกจากนี้ความชื้นเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษา
การเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงวิธีที่สองโดยออกแบบช่องทางไหลเอียงทั้งด้านแคโทดและ
แอโนดเพื่อเพิ่มการจัดการน้ำ โดยได้วัดปริมาณน้ำและเปรียบเทียบกับสมรรถนะของเซลล์ ผล
การศึกษา พบว่า ปริมาณน้ำด้านแคโทดของเซลล์ที่มีช่องทางไหลด้านแอโนดเอียงลงมีน้อยกว่า
เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมมุมฉากปกติ เพราะลักษณะของช่องเอียงลงด้านแอโนดทำให้เกิด
เกรเดียนต์น้ำซึ่งส่งผลให้น้ำที่เกิดขึ้นด้านแคโทดแพร่ย้อนกลับไปที่ด้านแอโนด เป็นผลให้
สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงดีขึ้นเนื่องจากเพิ่มความชื้นและการนำโปรตอนในเมมเบรน และพบว่า
ที่อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อนสูง สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจะลดลง เนื่องจากเกิดการควบแน่น
เป็นหยดน้ำ ส่งผลให้เกิดการอุดตันในชั้นรูพรุนของชั้นแพร่ก๊าซ การแก้ปัญหาสามารถทำได้โดย
การใช้แผ่นทางไหลที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนดแทนแผ่นทางไหลที่มีช่องทางไหลเหลี่ยม
มุมฉากปกติ อย่างไรก็ตามเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแคโทดไม่ช่วยเพิ่มสมรรถนะ
ของเซลล์เชื้อเพลิง เพราะทำให้เมมเบรนแห้งเนื่องจากการไหลออกของน้ำ และเซลล์ที่มีช่องทาง
ไหลเอียงขึ้นทั้งด้านแอโนดและแคโทดทำให้เกิดน้ำท่วมเซลล์ ส่งผลให้สมรรถนะต่ำ

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Preeyaphat Wawdee 2014: Development of Effectiveness of Fuel Cell. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Sunun Limtrakul, D.Sc. 82 pages.

Two methods to improve performance of proton exchange membrane, PEM, fuel cell were studied. The first method focuses on the catalyst layers where the reaction takes place which is the heart and significant to cell performance. The cell performance increases with high cost platinum catalyst loading due to higher surface area for electrochemical reaction. Reduction of expensive platinum consumption is sought. The concentration of reactants decreases along the length of the flow channel due to consumption in reaction. Catalyst gradient distribution loading along with decreasing reactant concentration is proposed to minimize catalyst consumption while maximizing the cell performance. The results showed that the descending gradient catalyst loading pattern from high at the gas inlet to low at the gas outlet can improve the fuel cell performance while the ascending gradient loading cannot improve the fuel cell performance at the same average catalyst loading. Cell humidification is another important factor affecting PEM fuel cell performance. In the second method, a new cell was designed with slanted grooves on both cathode and anode flow channels to improve water management. Water out flow was measured to provide information on flooding, hydration, and back-diffusion. The results showed water amount flowout at the cathode of an anode down-slanted channel was less than that of a rectangular channel, because down-slanting of anode induced a hydration gradient which caused water generated in anode to back-diffuse into the anode. Membrane hydration and conductivity was improved, thus better performance. At high feed gas humidification, performance decreased because of water condensation which blocked the gas diffusion layer. By replacing the rectangular channel with an anode down-slanted channel, performance was improved to match that of a rectangular cell at normal humidification. However, the cathode down-slanted channel showed membrane dehydration effect from water draining away. Moreover, anode or cathode up-slanted channels induced flooding, leading to poor performance.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

___ / ___ / ___

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ รศ.ดร. สุนันท์ ลิ้มตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้กรุณาสั่งสอนให้รู้จักกับการทำงานวิจัย พร้อมทั้งให้คำแนะนำข้อคิดที่มีคุณค่า สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในด้านที่นอกเหนือจากงานวิจัยได้อีกทั้งขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. เทอดไทย วัฒนธรรม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆ รวมทั้งการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนแล้วเสร็จอย่างสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชากรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง และขอขอบคุณบุคลากรและเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและข้อเสนอแนะต่างๆ

ขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อคุณพ่อ คุณแม่ และน้องสาวทั้ง 2 คน ที่เข้าใจและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา รวมไปถึงเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้องทุกคนที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

ปรียาภัทร์ แวดี

ตุลาคม 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	35
อุปกรณ์	35
วิธีการ	35
ผลและวิจารณ์	43
สรุป	60
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	61
ภาคผนวก	64
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	82

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ปฏิกริยาของเซลล์เชื้อเพลิงและความสัมพันธ์กับสมการของเนิร์นสต์	25
2 รูปแบบการกระจายตัวของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงแบบไถ่ระดับ	38
3 สภาวะการทดลอง	39
4 ปริมาณน้ำและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ที่ความต่างศักย์ 0.5 โวลต์	50
5 ปริมาณน้ำและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ที่ความต่างศักย์ 0.7 โวลต์	51
ตารางผนวกที่	
1 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอที่ปริมาณแพลทินัม 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร	65
2 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอที่ปริมาณแพลทินัม 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร	66
3 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอที่ปริมาณแพลทินัม 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร	67
4 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไถ่ระดับจากมากไปน้อยที่ปริมาณแพลทินัมเฉลี่ย 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร	68
5 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไถ่ระดับจากมากไปน้อยที่ปริมาณแพลทินัมเฉลี่ย 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร	69
6 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไถ่ระดับจากน้อยไปมากที่ปริมาณแพลทินัมเฉลี่ย 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร	70
7 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไถ่ระดับจากมากไปน้อยที่ปริมาณแพลทินัมเฉลี่ย 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร	71
8 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP) ที่อุณหภูมิเซลล์ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 80 องศาเซลเซียส	72

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
9 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงแอดโนด (ADS) ที่อุณหภูมิเซลล์ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 80 องศาเซลเซียส	73
10 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงขึ้นแอดโนด (AUS) ที่อุณหภูมิเซลล์ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 80 องศาเซลเซียส	74
11 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงแคโทด (CDS) ที่อุณหภูมิเซลล์ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 80 องศาเซลเซียส	75
12 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงขึ้นแคโทด (CUS) ที่อุณหภูมิเซลล์ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 80 องศาเซลเซียส	76
13 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP) ที่อุณหภูมิเซลล์ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 95 องศาเซลเซียส	77
14 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงแอดโนด (ADS) ที่อุณหภูมิเซลล์ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 95 องศาเซลเซียส	78
15 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงขึ้นแอดโนด (AUS) ที่อุณหภูมิเซลล์ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 95 องศาเซลเซียส	79
16 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงแคโทด (CDS) ที่อุณหภูมิเซลล์ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 95 องศาเซลเซียส	80
17 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงขึ้นแคโทด (CUS) ที่อุณหภูมิเซลล์ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 95 องศาเซลเซียส	81

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ส่วนประกอบหลักและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	7
2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์	8
3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก	9
4 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	10
5 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอนเตเหลว	11
6 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง	12
7 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	14
8 ส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	15
9 โครงสร้างของอิเล็กโทรลิตและเตตระฟลูออโรเอทิลีน	16
10 โครงสร้างของซัลโฟเนตฟลูออโรเอทิลีน (Sulfonatefluoroethylene) หรือแนฟฟิออน	17
11 ตัวอย่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบลงบนเมมเบรน	18
12 การถ่ายโอนก๊าซ โปรตอนและอิเล็กตรอนภายในขั้วอิเล็กโทรดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	21
13 ภาพหน้าตัดด้านข้างของช่องทางไหลทั่วไป	22
14 เส้นโค้งโพลาไรเซชัน (Polarization Curve)	26
15 การเคลื่อนที่ของน้ำภายในอิเล็กโทรไลต์เมมเบรน	32
16 ความเข้มข้นของน้ำผ่านเมมเบรนที่สภาวะปกติ	33
17 ความเข้มข้นของน้ำผ่านเมมเบรนโดยขั้นตอนการกำจัดน้ำออกที่ด้านแอโนด	34
18 ระบบทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง	37
19 รูปแบบการใส่เพลทินัม	38
20 (ก) แผ่นทางไหลแบบเลื่อยขดขนาน (ข) ลักษณะช่องทางไหลเอียง (ค) ภาพหน้าตัดของช่องทางไหลที่มีช่องทางไหลเอียง	40
21 รูปแบบช่องทางไหล (ก) ช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP) (ข) ช่องทางไหลเอียงลงแอโนด (ADS) (ค) ช่องทางไหลเอียงขึ้นแอโนด (AUS) (ง) ช่องทางไหลเอียงลงแคโทด (CDS) (จ) ช่องทางไหลเอียงขึ้นแคโทด (CUS)	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
22 การวัดปริมาณน้ำจากเซลล์เชื้อเพลิง	42
23 การเปรียบเทียบเส้นโค้งโพลาริเซชันและกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับจากมากไปน้อยกับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอที่ปริมาณแพลทินัมเฉลี่ย (ก) 0.3 (ข) 0.4 (ค) 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร	44
24 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับจากมากไปน้อยกับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอที่ปริมาณแพลทินัมเฉลี่ย 0.3, 0.4 และ 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร	45
25 การเปรียบเทียบเส้นโค้งโพลาริเซชันและกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับจากน้อยไปมาก (รูปแบบที่ 3) กับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอที่ปริมาณแพลทินัมเฉลี่ย 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร	47
26 การเปรียบเทียบเส้นโค้งโพลาริเซชันและกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับจากมากไปน้อย (ปริมาณแพลทินัมเฉลี่ย 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร, รูปแบบที่ 1) กับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอที่ปริมาณแพลทินัม 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร	48
27 การเปรียบเทียบเส้นโค้งโพลาริเซชันและกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องการไหลแบบต่างๆ ที่อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน (ก) 80 องศาเซลเซียส (ข) 95 องศาเซลเซียส	52
28 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณน้ำของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ ช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด และช่องทางไหลเอียงลงด้านแคโทด ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (ก) 0.5 โวลต์ (ข) 0.7 โวลต์, ลักษณะช่องทางไหล (ค) ช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP), (ง) ช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS) และ (จ) ช่องทางไหลเอียงลงด้านแคโทด (CDS)	53
29 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณน้ำของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแคโทดและเอียงขึ้นด้านแคโทด ที่ค่าความต่างศักย์ (ก) 0.5 โวลต์ (ข) 0.7 โวลต์, ลักษณะช่องทางไหล (ค) ช่องทางไหลเอียงลงด้านแคโทด (CDS) และ (ง) ช่องทางไหลเอียงขึ้นด้านแคโทด (CUS)	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่

หน้า

- 30 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณน้ำของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหล
เอียงลงด้านแอโนดและเอียงขึ้นด้านแอโนด ที่ค่าความต่างศักย์ (ก) 0.5 โวลต์
(ข) 0.7 โวลต์, ลักษณะช่องทางไหล (ข) ช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS)
และ (ค) ช่องทางไหลเอียงขึ้นด้านแอโนด (AUS)

58

การพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

Development of Effectiveness of Fuel Cell

คำนำ

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) เป็นเครื่องมือที่ให้กำเนิดไฟฟ้าจากกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า โดยใช้ก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง สามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง เป็นพลังงานสะอาดไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง คือ กระแสไฟฟ้า น้ำ และ ความร้อน ไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ออกไซด์ของไนโตรเจน หรือ อนุภาคของเขม่าเช่นที่เกิดกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน นักวิทยาศาสตร์เป็นจำนวนมากหันมาให้ความสนใจกับการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นทางเลือกใหม่ของพลังงานเพื่อทดแทนพลังงานจาก น้ำมันเชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงมีอยู่หลายชนิดซึ่งเดินเครื่องที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ตั้งแต่ 60 - 1,000 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันตามลักษณะการใช้งานและแบ่งตามชนิดของอิเล็กโทรไลต์ แต่ที่ได้รับความสนใจและมีการพัฒนาเป็นอย่างมากคือเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) เพราะเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิที่ใช้งานอยู่ระหว่าง 60 - 90 องศาเซลเซียส (Guvelioglu and Stenger, 2007) มีความสะดวกเดินเครื่องได้โดยง่ายและใช้เวลาในการเริ่มเดินเครื่องน้อย (Hu *et al.*, 2006) เหมาะกับการนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ในชีวิตประจำวัน เช่น คอมพิวเตอร์แบบพกพา โทรศัพท์เคลื่อนที่ และ รถยนต์ เป็นต้น

โดยปกติแล้วปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนจะเกิดซ้ำที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นจึงต้องมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วทั้งสองคือทั้งขั้วแอโนดและแคโทดเพื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Srinivasarao *et al.*, 2010) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้วอิเล็กโทรดที่สูงจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงสูง (Uribe and Zawodzinski, 2002) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำงานได้ดีที่สุดคือแพลทินัม ซึ่งแพลทินัมราคาค่อนข้างสูงและมีแนวโน้มที่จะหมดไป (Xiong and Manthiram, 2004) การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดปริมาณการใช้แพลทินัมโดยที่รักษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงไม่ให้เกิดลดลงจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ

ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ก๊าซป้อนสำหรับทำปฏิกิริยาจะไหลตามช่องทางไหลในแผ่นทางไหล และกระจายตัวผ่านชั้นแพร่ก๊าซไปทำปฏิกิริยาที่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น โดยความเข้มข้นของสารทำปฏิกิริยาจะลดลงตามทิศทางการไหล เนื่องจากถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ความเข้มข้นของสารในก๊าซที่ทางออกจึงน้อยกว่าที่ทางเข้า (Rismanchi and Akbari, 2008) แผ่นทางไหลส่วนใหญ่ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนจะเป็นแผ่นทางไหลแบบเลื้อยซด (Serpentine flow field) ซึ่งความเข้มข้นของสารทำปฏิกิริยาจะลดลงตามความยาวของแผ่นทางไหลนั้น

โดยทั่วไปการเคลื่อนตัวเร่งปฏิกิริยาบนเมมเบรนจะเคลื่อนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะการกระจายตัวของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ (Uniform loading) อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของสารที่ทางออกของเซลล์จะน้อยกว่าความเข้มข้นที่ทางเข้า ดังนั้นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่ต้องการใช้ ควรจะน้อยลงตามทิศทางการไหลของก๊าซด้วย จากแนวคิดนี้ Kaewchada (2009) พัฒนาวิธีการเคลื่อนตัวเร่งปฏิกิริยาบนเมมเบรนโดยการเคลื่อนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะการกระจายตัวแบบไล่ระดับ (Gradient loading) เพื่อลดปริมาณการใส่แพลทินัม โดยที่รักษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงไม่ให้เกิดผล พบว่า ช่วงในการทดสอบเซลล์กระแสต่ำ สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่เคลื่อนตัวเร่งปฏิกิริยาแบบไล่ระดับมีค่าสูงกว่าสมรรถนะเซลล์ที่เคลื่อนแบบสม่ำเสมอ เนื่องจากมีปริมาณแพลทินัมช่วงขาเข้าสูงกว่า แต่ที่ผลทดสอบในช่วงกระแสสูง สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่เคลื่อนแบบไล่ระดับต่ำลงมีค่าต่ำกว่าค่าในเซลล์ที่เคลื่อนแบบสม่ำเสมอ เนื่องจากเกิดการสูญเสียโอห์มมากกว่า ซึ่งคาดว่าเกิดจากการเคลื่อนตัวเร่งแบบไล่ระดับ จึงทำให้ผิวสัมผัสไม่เรียบ การประกอบเซลล์ทำให้การสัมผัสไม่ดี ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่ศึกษาการลดปริมาณการใส่แพลทินัม โดยที่รักษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงไม่ให้เกิดผล และปรับปรุงปัญหาการสูญเสียโอห์มที่เกิดขึ้นจากงานวิจัยของ Kaewchada (2009)

สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการถ่ายโอนโปรตอน ก๊าซเชื้อเพลิงจำเป็นต้องมีความชื้นหรือปริมาณน้ำที่เหมาะสมเพื่อให้กระบวนการนำโปรตอนผ่านเมมเบรนมีสมรรถนะดีที่สุด น้ำที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงมาจาก 2 สาเหตุ คือ น้ำที่ได้รับจากอุปกรณ์ให้ความชื้น (Humidifier) เนื่องจากก๊าซได้รับความชื้นจากอุปกรณ์ให้ความชื้น ทำให้ก๊าซที่เข้ามาทำปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงอยู่ในรูปของก๊าซเปียก โดยปริมาณน้ำที่ได้จากอุปกรณ์ให้ความชื้นนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ป้อนเข้าอุปกรณ์ให้ความชื้น ความชื้นจะมีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอุปกรณ์ให้ความชื้นสูงขึ้น และอีกสาเหตุหนึ่งคือน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ขั้วแคโทด โดยปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานั้นจะขึ้นกับค่าความหนาแน่น

กระแสไฟฟ้า (Current density) ที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตออกมา น้ำที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปตามช่องทางเดินก๊าซและถูกกำจัดออกจากเซลล์ไปพร้อมกับก๊าซขาออก ปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นควรถูกกำจัดออกไปได้เหมาะสม หากเซลล์มีปริมาณน้ำค้างอยู่มากเกินไปจะทำให้เกิดการท่วมภายในรูพรุนของชั้นแพร่ก๊าซ ส่งผลให้เกิดการกีดขวางของก๊าซที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยา ทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำลง เพราะมีการสูญเสียการถ่ายโอนมวล (Mass Transport Losses) (Su *et al.*, 2006) แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าปริมาณน้ำน้อยเกินไป เมมเบรนของเซลล์เชื้อเพลิงจะแห้ง ทำให้การนำโปรตอนผ่านเมมเบรนได้ยากขึ้น จะเห็นว่าการควบคุมปริมาณน้ำมีผลอย่างมากต่อสมรรถนะในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาระยะต้นในเรื่องพฤติกรรมของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงกันอย่างกว้างขวาง การถ่ายโอนน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงค่อนข้างยากที่จะจินตนาการ อย่างไรก็ตามได้มีการพยายามที่จะทำให้เห็นภาพการถ่ายโอนน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง เช่น มีนักวิจัยได้พัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนแบบใสเพื่อที่จะมองเห็นการกระจายตัวของน้ำและน้ำท่วมภายในช่องทางไหลของก๊าซด้านแคโทด (Weng *et al.*, 2006) การออกแบบเส้นทางไหลที่เหมาะสมสามารถเพิ่มการจัดการน้ำได้ โดยทั่วไปเส้นทางไหลจะมีช่องทางไหลของก๊าซเป็นช่องยาวซึ่งแต่ละช่องจะมีผนังกันแยกจากกัน รูปแบบทั่วไปของผนังที่ใช้จะมีมุมเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉาก Bunmark และคณะ (2007) ได้นำเสนองานวิจัยที่มีวิธีการจัดการน้ำโดยใช้เส้นทางไหลที่มีลักษณะช่องทางไหลเอียง ช่องทางไหลที่ใช้มีช่องทางไหลเอียงลงและเอียงขึ้นทั้งด้านแคโทดและแอโนด ซึ่งการประยุกต์ใช้เส้นทางไหลที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนดได้สมรรถนะดีที่สุด เพราะช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนดทำให้เกิดการแพร่กลับของน้ำซึ่งช่วยสมดุลความชื้นให้พอดีเป็ยกทั้งสองด้านของเมมเบรน

เพื่อยืนยันผลงานวิจัยของ Bunmark *et al.* (2007) ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่วัดการเกิดน้ำของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีการปรับปรุงช่องทางไหล โดยการวัดปริมาณน้ำขาออกทั้งด้านแคโทดและด้านแอโนด วิเคราะห์และเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของน้ำในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการพัฒนาเซลล์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงโดยเพิ่มประสิทธิภาพของ

1. ประสิทธิภาพของอิเล็กโทรดในการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ประสิทธิภาพของช่องทางไหลในการจัดการน้ำ

ขอบเขตงานวิจัย

1. เซลล์เชื้อเพลิงที่ศึกษาคือชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)
2. การเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในอิเล็กโทรดจะทำโดยการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแบบไล่ระดับในการเคลือบ
3. การศึกษารูปแบบการกระจายตัวของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ดำเนินการกับเซลล์ที่มีขนาดพื้นที่กัมมันต์ 5 ตารางเซนติเมตร
4. การศึกษาประสิทธิภาพการจัดการน้ำจะศึกษาพฤติกรรมการจัดการน้ำในเซลล์ที่มีช่องทางไหลชนิดต่างๆ
5. การศึกษาปริมาณน้ำที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ดำเนินการกับเซลล์ที่มีขนาดพื้นที่กัมมันต์ 150 ตารางเซนติเมตร
6. การศึกษาปริมาณน้ำทำโดยการควบคุมอุณหภูมิอุปกรณ์ให้ความชื้นที่ 80-95 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิของเซลล์คงที่ 80 องศาเซลเซียส ในทุกๆการทดลอง
7. วิเคราะห์ผลการทดลองเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้เส้นโค้งโพลาริเซชัน (Polarization curve)

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีประโยชน์ในการพัฒนาการออกแบบและการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงที่มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำลง
2. เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นพลังงานทางเลือกใหม่ที่จะใช้ในอนาคต
3. ข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองสามารถนำไปใช้ในการออกแบบ และปรับปรุงสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

การตรวจเอกสาร

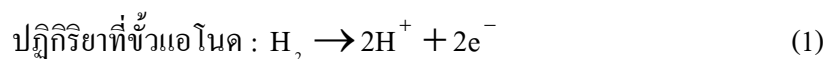
1. เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) คืออุปกรณ์หรือเครื่องมือแปรรูปพลังงานชนิดหนึ่ง โดยจะเปลี่ยนจากพลังที่เก็บอยู่ในรูปเชื้อเพลิงเคมีไปเป็นกระแสไฟฟ้าและความร้อน เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการป้อนเชื้อเพลิงเข้าตลอดเวลาเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical reaction) โดยเกิดจากการรวมกันระหว่างปฏิกิริยาเคมีและการถ่ายโอนประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งสามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง หากยังคงมีการป้อนเชื้อเพลิงอยู่ อุปกรณ์นี้มีหลักการทำงานคล้ายกับแบตเตอรี่ โดยมีข้อแตกต่างคือ แบตเตอรี่ต้องมีการชาร์จไฟใหม่เมื่อหมดแรงดัน ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุและจ่ายประจุไฟฟ้าซึ่งมีอายุการใช้งานแน่นอน ส่วนในเซลล์เชื้อเพลิงนั้นออกแบบมาให้มีการเติมสารตั้งต้นเข้าสู่ระบบตลอดเวลาและเซลล์เชื้อเพลิงจะผลิตกระแสไฟฟ้าได้ตลอดเวลาด้วยการเติมก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน

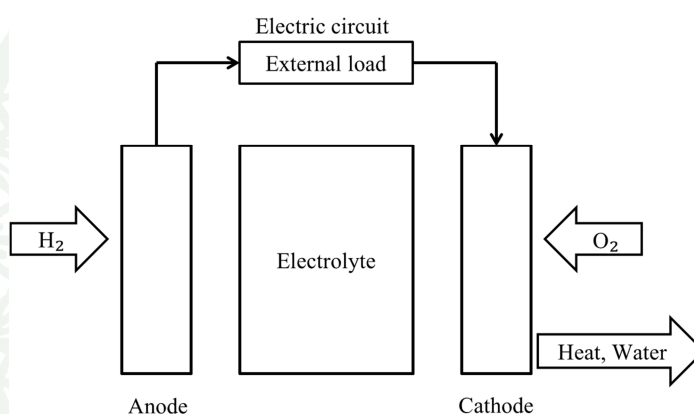
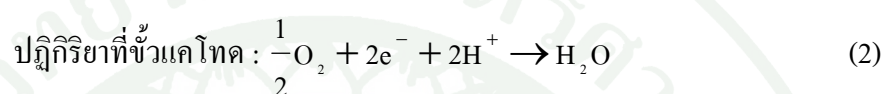
1.1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

ในเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือขั้วแคโทด (Cathode) และขั้วแอโนด (Anode) จุ่มหรือสัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งอาจอยู่ในรูปของเหลวหรือของแข็ง การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเริ่มจากขั้วแอโนดได้รับเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงที่ใช้คือก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจนเมื่อสัมผัสกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) แยกตัวให้โปรตอน (H^+) และอิเล็กตรอน (e^-) ออกมา โดยโปรตอนจะแพร่ผ่านสารอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วแคโทด และอิเล็กตรอนวิ่งผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกเพื่อไปยังขั้วแคโทด ในขณะที่ตัวออกซิแดนท์ (Oxidant) คือก๊าซออกซิเจนจะถูกป้อนเข้ามายังขั้วแคโทด และรวมตัวกับโปรตอนและอิเล็กตรอนที่มาจากขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาคือกระแสไฟฟ้า น้ำ และความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยสามารถแยกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดได้ดังนี้

ไฮโดรเจนที่ป้อนเข้ามาทางขั้วแอโนดจะแตกตัวให้โปรตอน (H^+) และปล่อยอิเล็กตรอน (e^-) ออกมา ดังสมการ



ส่วนที่ขั้วแคโทด ออกซิเจนที่ป้อนเข้ามาจะทำปฏิกิริยากับโปรตรอนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์มาจากขั้วแอโนดและอิเล็กตรอนที่ผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกมายังขั้วแคโทด ดังสมการ



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบหลักและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

1.2 ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิง

ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีอย่างมากมาย ทำให้มีความต้องการใช้พลังงานมากขึ้นเรื่อยๆ แต่พลังงานที่ใช้มีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งแหล่งพลังงานส่วนใหญ่จะเป็นพลังงานจากธรรมชาติ เช่น พลังงานจากถ่านหิน น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ พลังงานเหล่านี้เป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ทำให้เกิดปัญหาการขาดแคลนพลังงานขึ้น อีกทั้งพลังงานจากธรรมชาติเหล่านี้ยังก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อมด้วย โดยเฉพาะมลพิษทางอากาศที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สันดาป สาเหตุดังกล่าวจึงทำให้มีการค้นคว้าและพัฒนาพลังงานทดแทนขึ้น ทางเลือกหนึ่งก็คือการใช้พลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิง

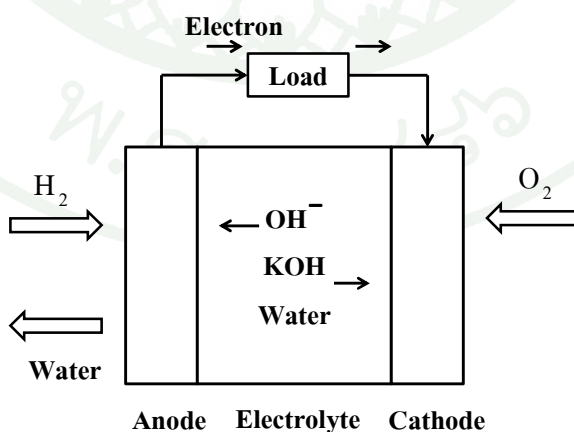
เซลล์เชื้อเพลิงเป็นเครื่องมือที่ให้กำเนิดไฟฟ้าจากกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซออกซิเจนและไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง นักวิทยาศาสตร์จำนวนมากได้หันมาให้ความสนใจกับทางเลือกใหม่ของแหล่งพลังงานที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์และเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ ในชีวิตประจำวัน เช่น การใช้งานด้านคมนาคมแทนเครื่องยนต์สันดาปภายใน หรือการใช้งานแทนแบตเตอรี่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เซลล์เชื้อเพลิงนั้นให้ประสิทธิภาพสูงและไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ เนื่องจากสิ่งที่ปล่อยออกมาจากเซลล์เชื้อเพลิงมีเพียงน้ำและความร้อนเท่านั้น อีกทั้งยังไม่เกิดเสียงรบกวนในระหว่างการเดินระบบเนื่องจากไม่มีอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนใดเคลื่อนที่ เหตุนี้เซลล์เชื้อเพลิงจึงเป็นทางเลือกที่ดีของแหล่งพลังงานสมัยใหม่

1.3 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง

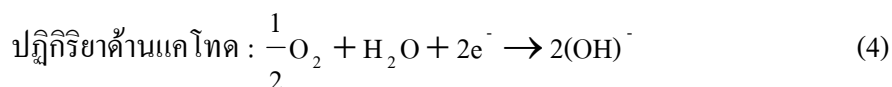
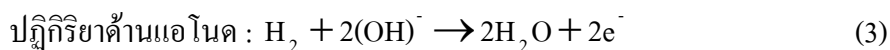
เซลล์เชื้อเพลิงสามารถจำแนกออกได้หลายประเภทโดยแตกต่างกันที่ลักษณะการใช้งาน และแบ่งตามชนิดของอิเล็กโทรไลต์ โดยทั่วไปแล้วจะจำแนกได้ 5 ประเภท ได้แก่

1.3.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cell, AFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์เหลวเป็นอิเล็กโทรไลต์ ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยจะต้องใช้ก๊าซออกซิเจนและไฮโดรเจนบริสุทธิ์เท่านั้น อุณหภูมิที่ใช้งานอยู่ในช่วง 60 - 200 องศาเซลเซียส การใช้งานจำกัดอยู่ในงานทางอวกาศ เช่น ในยานอวกาศ อพอลโล่

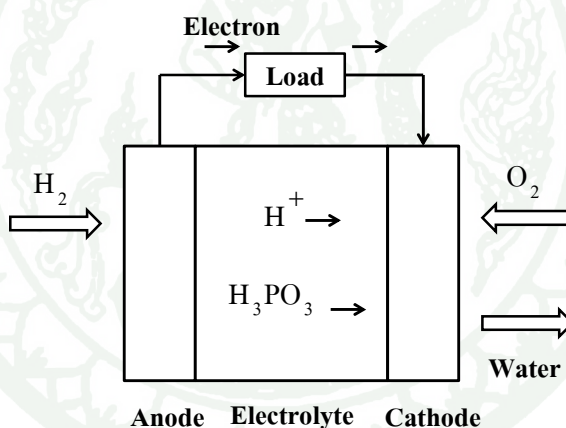


ภาพที่ 2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์

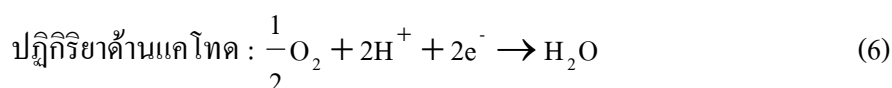
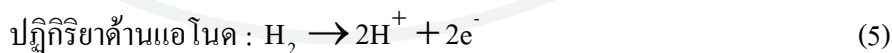


1.3.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้กรดฟอสฟอริกเป็นอิเล็กโทรไลต์ ดังแสดงในภาพที่ 3 อุณหภูมิการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 220 องศาเซลเซียส ใช้เชื้อเพลิงและตัวออกซิแดนที่เช่นเดียวกับ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์ แต่สามารถทนต่อก๊าซเจือปนได้มากกว่า สามารถใช้ก๊าซออกซิเจน หรือก๊าซไฮโดรเจนที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เจือปนอยู่ได้ ปัญหา ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือการกัดกร่อนของกรดที่อุณหภูมิการใช้งาน

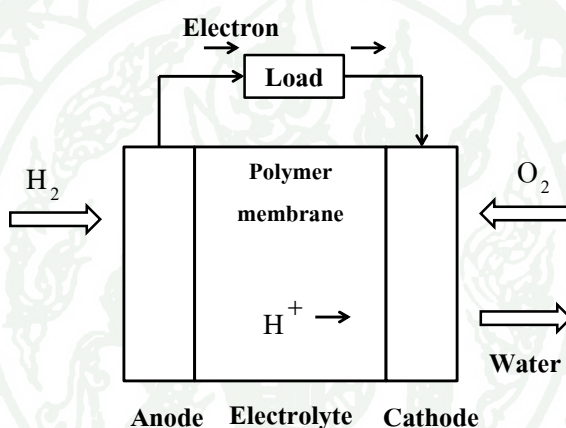


ภาพที่ 3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก

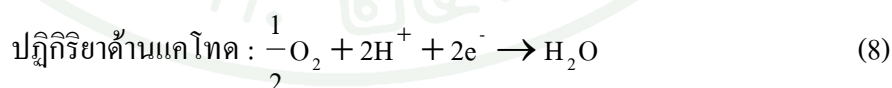
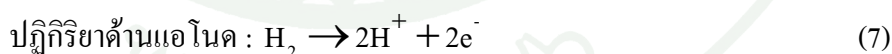


1.3.3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน หรือเรียกอีกชื่อว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิเล็กโทรไลต์พอลิเมอร์ (Polymer Electrolyte Fuel Cell, PEFC) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้เมมเบรนพอลิเมอร์เป็นอิเล็กโทรไลต์ ดังแสดงในภาพที่ 4 อุณหภูมิการทำงานอยู่ในช่วง 60 - 100 องศาเซลเซียส ใช้ก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนในการทำปฏิกิริยา ของเหลวเพียงชนิดเดียวที่ออกจากปฏิกิริยานี้คือ น้ำบริสุทธิ์ จึงไม่เกิดปัญหาเรื่องการกัดกร่อน เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่นำมาใช้กับรถยนต์ ไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



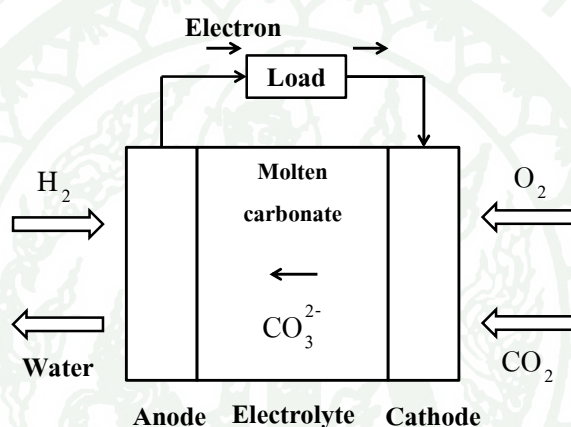
ภาพที่ 4 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน



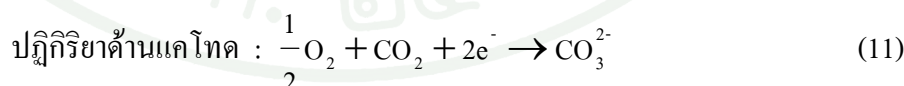
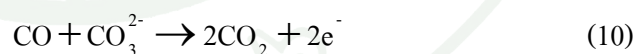
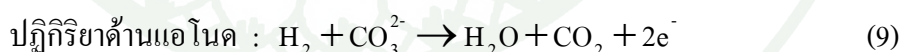
นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเพิ่มเติม เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้จากเชื้อเพลิงเมทานอลโดยตรง ไม่ต้องเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนก่อน จึงเรียกเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใหม่นี้ว่า เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมทานอลตรง (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC)

1.3.4 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอเนตเหลว (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้อิเล็กโทรไลต์เป็นพวกเกลือคาร์บอเนตเหลวของโซเดียมและโปแตสเซียมในเซรามิกส์ เมตริกของลิเทียมอลูมินेट (LiAlO_2) โดยอุณหภูมิที่ใช้งานอยู่ที่ประมาณ 650 องศาเซลเซียส เนื่องจากการใช้งานที่อุณหภูมิค่อนข้างสูงจึงมีปัญหาเรื่องการกัดกร่อนมาก สารไฮโดรคาร์บอนต่างๆสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงได้โดยสะดวก เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้นิยมใช้ในโรงงานไฟฟ้าระดับเมกะวัตต์จึงจะเหมาะสมกับประสิทธิภาพการทำงานเนื่องจากระบบที่ใช้ค่อนข้างซับซ้อน



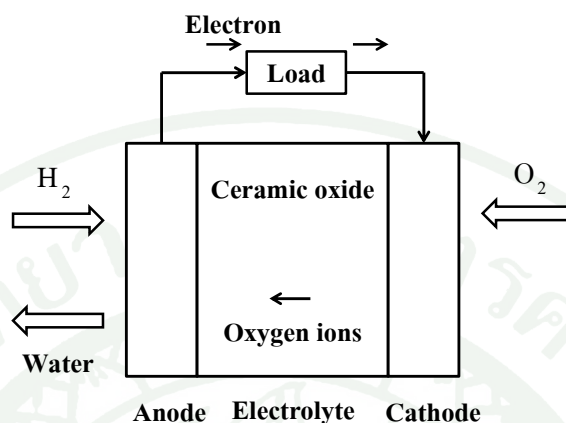
ภาพที่ 5 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอเนตเหลว



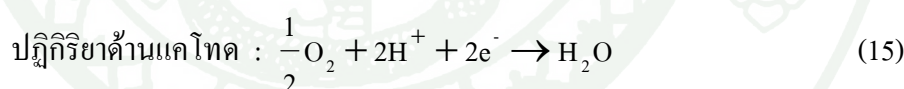
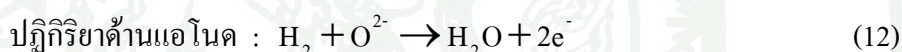
1.3.5 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้สารเซรามิกส์เป็นอิเล็กโทรไลต์ ดังแสดงในภาพที่ 6 ซึ่งสารเซรามิกส์ที่ใช้เป็นส่วนใหญ่คือสารประกอบของเซอร์โคเนีย โดยใช้งานที่อุณหภูมิ 500 - 1,000 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับการออกแบบและสารที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ สารไฮโดรคาร์บอนต่างๆ

สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้เช่นเดียวกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอนเหลว และออกซิเจนในอากาศก็สามารถนำมาเป็นตัวออกซิแดนที่ได้อีก



ภาพที่ 6 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง



ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาและพัฒนาเฉพาะเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ดังนั้นจะกล่าวเฉพาะรายละเอียดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

2. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

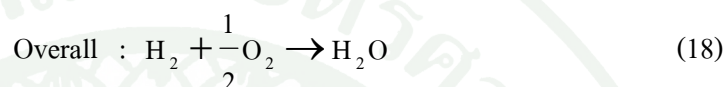
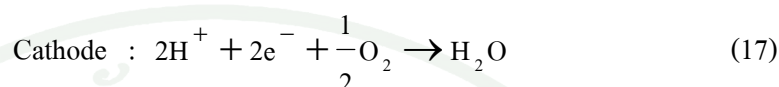
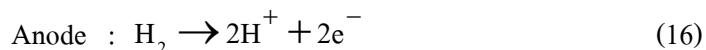
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) เป็นหนึ่งในชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงที่กำลังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีจุดเด่นที่สามารถทำงานที่อุณหภูมิและความดันต่ำ อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 60 - 100 องศาเซลเซียส และความดัน 1 - 2 บรรยากาศ มีความเหมาะสมอย่างมากกับการนำไปใช้งานที่ต้องมีการเคลื่อนที่ เช่น รถยนต์ อีกทั้งยังไม่เกิดการกัดกร่อนกรดหรือเบสในระบบการทำงาน เนื่องมาจากว่าของเหลวเพียงชนิดเดียวที่อยู่ในระบบคือน้ำ

บริสุทธิ์ นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงรูปแบบนี้ยังมีความพิเศษอยู่ที่การใช้เมมเบรนเป็นตัวอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งคุณสมบัติเด่นของเมมเบรนคือความสามารถในการแลกเปลี่ยนโปรตอนซึ่งเป็นหัวใจหลักในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนสามารถให้พลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง มีความสะดวกเดินเครื่องได้โดยง่ายและใช้เวลาในการเดินเครื่องน้อย ทำให้มีการนำเทคโนโลยีมาใช้กับอุปกรณ์พกพา เช่น โทรศัพท์มือถือ หรือคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก เป็นต้น โดยเฉพาะการพัฒนาความเป็นไปได้ที่จะเอาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มาให้พลังงานกับยานพาหนะหรือรถยนต์ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนแตกต่างจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นตรงที่ใช้เมมเบรนซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์บางเป็นอิเล็กโทรไลต์และเป็นตัวแบ่งอิเล็กโทรดออกจากกัน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานที่สภาวะอุณหภูมิและความดันต่ำ การประกอบเซลล์มีความซับซ้อนน้อยกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น อีกทั้งไม่มีปัญหาเรื่องการกัดกร่อน ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นที่น่าสนใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ในชีวิตประจำวัน แต่ยังต้องมีการพัฒนาในเรื่องของประสิทธิภาพให้เหมาะสมกับต้นทุนในการผลิต

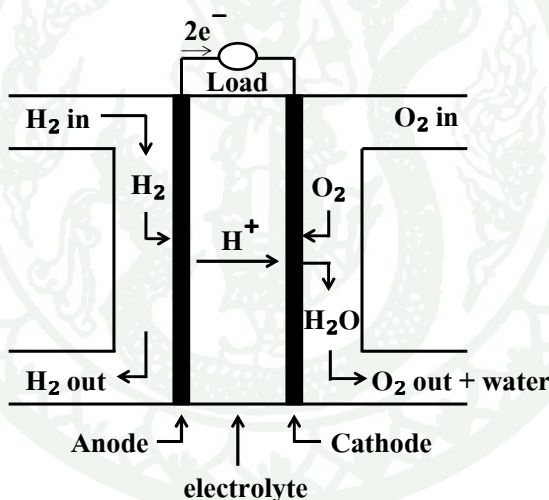
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนจะประกอบไปด้วยอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นแผ่นพอลิเมอร์ของแข็ง (ซัลโฟเนตพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลิน) ซึ่งจะถูกระดมไปด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ ขั้วแอโนด (Anode) และขั้วแคโทด (Cathode) ที่มีความพรุนและมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแพลทินัมเกาะอยู่ด้านในที่ติดกับอิเล็กโทรไลต์ น้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าภายในเซลล์จะถูกกำจัดออกจากเซลล์ไปพร้อมกับก๊าซทางด้านแคโทด ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการถ่ายโอนโปรตอน ดังนั้นก๊าซเชื้อเพลิงที่ใช้จึงจำเป็นต้องมีความชื้นเพื่อให้กระบวนการนำไอออนของเมมเบรนเป็นไปได้อย่างสะดวก อย่างไรก็ตามความชื้นที่ป้อนเข้าต้องพอดีกับความชื้นที่ถ่ายเทออกไป

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน จะอาศัยการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าจากการแตกตัวของก๊าซ โดยอัดก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปทางด้านแอโนด ก๊าซไฮโดรเจนจะถูกออกซิไดซ์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เมื่ออัดก๊าซไฮโดรเจนจำนวน 1 โมเลกุลเข้าไปทางด้านแอโนด ก๊าซจะถูกดันเข้าไปในชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแพลทินัม ทำให้โมเลกุลของไฮโดรเจนแตกตัวออกเป็นโปรตอน 2 ตัว และอิเล็กตรอน 2 ตัว ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกส่งผ่านจากขั้วไฟฟ้าด้านแอโนดผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกไปยังขั้วแคโทด ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ขณะเดียวกันทางด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงจะป้อนก๊าซออกซิเจนเข้ามา ก๊าซออกซิเจน 1/2 โมลจะถูกอัดผ่านไปในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา รวมตัวกับโปรตอน 2 ตัวที่ผ่านเมมเบรนมาจากด้านแอโนด

และอิเล็กตรอน 2 ตัวจากวงจรไฟฟ้าภายนอก เกิดปฏิกิริยารีดักชัน กลายเป็นโมเลกุลของน้ำ 2 โมล โดยมีปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องดังนี้



ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ได้แก่ กระแสไฟฟ้า น้ำ และความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 7

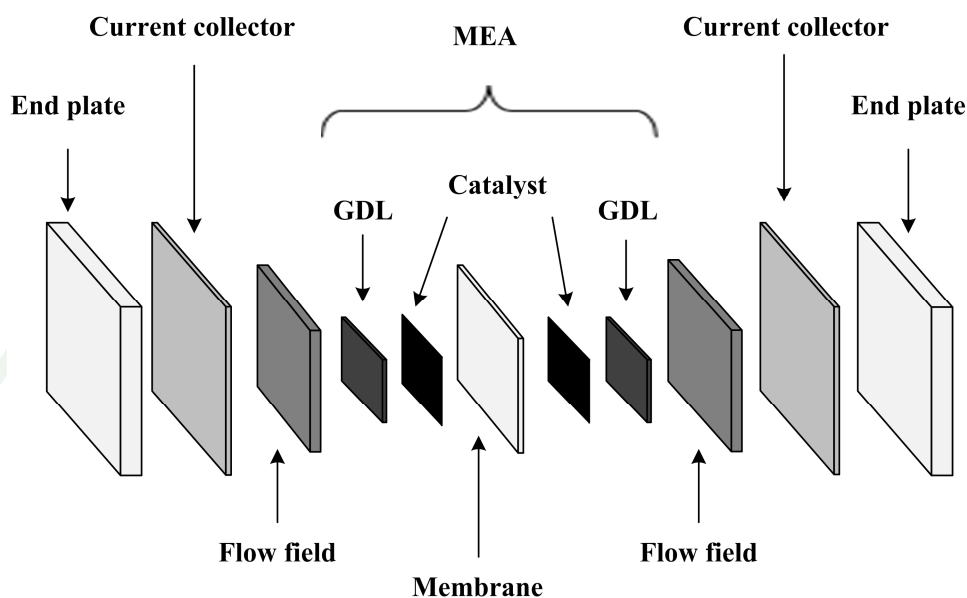


ภาพที่ 7 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

3. ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนหนึ่งเซลล์ ประกอบด้วย เยื่อแผ่นพอลิเมอร์แข็ง ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ ถูกประกบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ ขั้วแคโทด (Cathode) และขั้วแอโนด (Anode) ที่มีความพรุนและมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแพลทินัม เกาะอยู่ที่แผ่นพอลิเมอร์ รวมเรียกว่าส่วนประกอบอิเล็กโทรดเมมเบรน (Membrane Electrode

Assembly, MEA) ถัดไปประกอบด้วยแผ่นช่องทางไหล (Flow field) แผ่นรวมกระแส (Current collector plate) และแผ่นประกบirim (End plate) ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ส่วนประกอบต่างๆของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

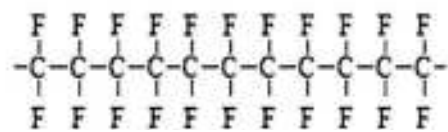
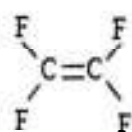
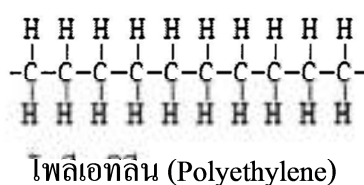
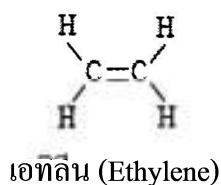
3.1 ส่วนประกอบอิเล็กโทรดเมมเบรน (Membrane Electrode Assembly, MEA)

ส่วนนี้ถือเป็นหัวใจหลักของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นส่วนที่นำเอาเชื้อเพลิงที่มีสารตัวเร่งปฏิกิริยามาประกบตัวอิเล็กโทรไลต์ ในส่วนนี้จะประกอบด้วย เมมเบรน (Membrane) หรือเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer) และชั้นแพร่ก๊าซ (Gas diffusion layer)

3.1.1 เมมเบรน (Membrane)

เมมเบรนคือตัวอิเล็กโทรไลต์ ที่ทำจากวัสดุคล้ายกับแผ่นพลาสติกใสซึ่งเรียกว่า พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน (Polymer electrolyte membrane) เป็นของแข็งออร์แกนิกพอลิเมอร์ของกรดเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิก (Perfluorosulfonic acid) ความสามารถของเมมเบรนนี้คือยอมให้โปรตอนผ่านได้แต่จะไม่ให้อิเล็กตรอนไหลผ่าน คุณสมบัติที่ดีของเมมเบรนคือ ต้องมีค่าการนำโปรตอนสูง มีความต้านทานในการบวมน้ำ และไม่เกิดการแพร่ผ่านของก๊าซ ตัวอย่างเช่นแนฟฟิออน (NafionTM) ที่ผลิตโดยบริษัทดูปองต์ (DuPont) วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1) โครงสร้างแกนฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon backbone) ที่มีลักษณะคล้าย เทฟลอน (Teflon) โดยมีพันธะ $-\text{CF}_2 - \text{CF} - \text{CF}_2 -$ ต่อกันหลายร้อยพันธะ ดังแสดงเปรียบเทียบกับโครงสร้างคาร์บอนในภาพที่ 9



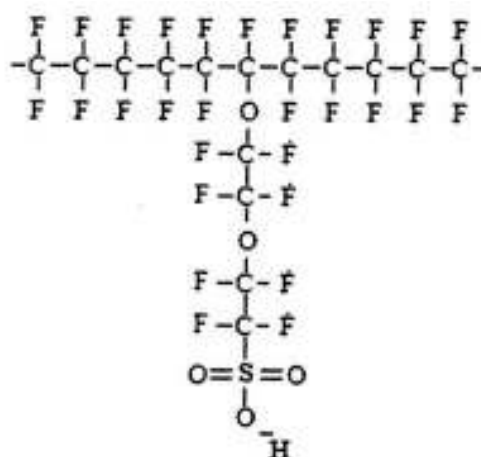
เตตระฟลูออโรเอทิลีน (Tetrafluoroethylene) โพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene)

ภาพที่ 9 โครงสร้างของเอทิลีนและเตตระฟลูออโรเอทิลีน

ที่มา: Larmanie (2000)

2) โซ่กิ่ง $-\text{O} - \text{CF}_2 - \text{CF} - \text{O} - \text{CF}_2 - \text{CF}_2 -$ ที่ต่อกับโมเลกุลของส่วนที่ 1 และส่วนที่ 3 ดังแสดงในภาพที่ 10

3) หมู่ไอออนของกรดซัลโฟนิค $\text{SO}_3^- \text{H}^+$ ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 โครงสร้างของซัลโฟเนตฟลูออโรเอทิลีน (Sulfonatefluoroethylene) หรือเนฟฟิออน

ที่มา: Larmanie (2000)

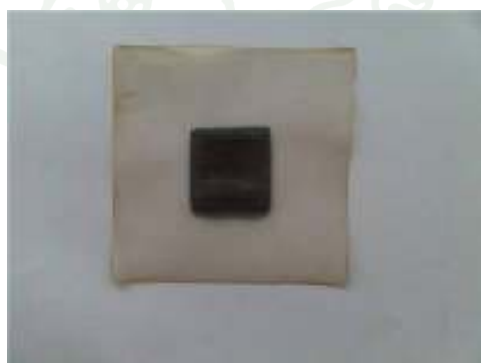
ไอออนลบจะติดอยู่กับโซ่กิ่งตลอดเวลาและเคลื่อนที่ไม่ได้ อย่างไรก็ตามเมื่อแผ่นเมมเบรนเปียกน้ำโดยมีการดูดซับน้ำเข้าไป ไฮโดรเจนไอออนของหมู่กรดซัลโฟนิกจะเคลื่อนที่ได้ และผ่านเยื่อแผ่นไปรวมกับอิเล็กตรอนสร้างพันธะเป็น โมเลกุลของน้ำ ด้วยกลไกนี้ทำให้เมมเบรนที่เปียกน้ำตลอดเวลา มีหน้าที่หรือคุณสมบัติที่สำคัญคือ ขอมให้ประจุบวกหรือโปรตอนเคลื่อนที่ผ่านเท่านั้น แต่ไม่ยอมให้ประจุลบหรือก๊าซเคลื่อนที่ผ่านได้ เนื่องจากโครงสร้างของเมมเบรนมีเทฟลอนเป็นโครงสร้างแกน (Teflon™ backbone) ทำให้เมมเบรนมีความแข็งแรงและเสถียร ถึงแม้ว่าจะมีขนาดบางแต่ก๊าซไม่สามารถผ่านได้ ทำให้แยกก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซออกซิเจนในอากาศได้ ซึ่งมีความสำคัญต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง แม้เมมเบรนจะเปียกน้ำแต่อิเล็กตรอนก็ไม่สามารถผ่านได้ อิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและวิ่งผ่านออกไปนอกเซลล์ ผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกและวิ่งกลับมาที่ขั้วแคโทดอีกฝั่งหนึ่งเพื่อให้ครบวงจร ทำให้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้

ลักษณะทั่วไปของเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงต้องมีสภาพการนำโปรตอนที่สูง มีสมบัติขวางกั้น (Barrier property) ที่ดี มีความแข็งแรงทางกลที่ดี มีความทนทานต่อความร้อนและสารเคมี เป็นฉนวนทางไฟฟ้า เมมเบรนจะต้องไม่ละลายน้ำแต่สามารถดูดซับน้ำได้ และเกิดสภาพนำโปรตอนที่ดีในภาวะไฮเดรชัน ต้องยอมให้มีการส่งผ่านน้ำที่เพียงพอเพื่อป้องกันการเกิดภาวะเมมเบรนแห้งเกินไป ซึ่งเหล่านี้จะมีผลต่อสมรรถนะของการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

สำหรับในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน การส่งผ่านของโปรตอนจะเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยโมเลกุลของน้ำที่ขับเคลื่อนไปในระหว่างสายโซ่ในเมมเบรน ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงาน โมเลกุลของไฮโดรเจนจะถูกทำให้แตกตัวที่ขั้วแอโนดเมื่อสัมผัสกับแพลทินัมและทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้โปรตอนและอิเล็กตรอนออกมา เมื่อโปรตอนไหลผ่านเมมเบรน และอิเล็กตรอนไหลไปตามวงจรไฟฟ้าภายนอกเซลล์ทำให้เกิดความต่างศักย์และนำไปสู่การเกิดกระแสไฟฟ้าในที่สุด ดังนั้นในเมมเบรนต้องมีย่านน้ำเพื่อให้ไฮโดรเจนไอออนจะพาประจุผ่านเมมเบรนไปได้ ข้อจำกัดนี้ทำให้เมมเบรนชนิดนี้ต้องมีความชื้นหรือน้ำตลอดเวลาและไม่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของน้ำได้ เนื่องจากน้ำจะระเหยออกไปทำให้สภาพนำโปรตอนของเมมเบรนลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้ามีปริมาณน้ำมากเกินไปจะทำให้น้ำท่วมเซลล์ เกิดการกีดขวางการเข้าไปทำปฏิกิริยาที่ขั้วตัวเร่งปฏิกิริยาของก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งเหล่านี้จะเป็นปัญหาต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้

3.1.2 ขั้วตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนจะประกอบด้วยสองปฏิกิริยา คือ ครึ่งเซลล์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดและครึ่งเซลล์ของปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด ใช้อิเล็กโทรไลต์เมมเบรนเป็นตัวแยกขั้วแอโนดและแคโทดออกจากกัน ส่วนนี้จะมีหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรเจนเป็นอะตอมไฮโดรเจนและอิเล็กตรอนที่ขั้วแอโนด และเร่งปฏิกิริยาการรวมตัวของอะตอมไฮโดรเจนกับออกซิเจนให้กลายเป็นน้ำที่ขั้วแคโทด โดยใช้ผงแพลทินัม (Platinum) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำเป็นฟิล์มบางเคลือบอยู่บนเมมเบรน มีลักษณะเป็นรูพรุนซึ่งสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาได้ ลักษณะของขั้วตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ตัวอย่างขั้วตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบลงบนเมมเบรน

ปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนจะเกิดซ้ำที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 80 องศาเซลเซียส) ดังนั้นจึงต้องมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ที่จับทั้งสองคือทั้งขั้วแอโนดและแคโทดเพื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้วอิเล็กโทรดที่สูงจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงสูง ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนคือแพลทินัม (Platinum) ที่ขั้วแอโนดก๊าซไฮโดรเจนจะแพร่เข้ามาจนไปเจอกับอนุภาคของแพลทินัม ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมจะทำให้โมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจนแตกตัวออกเป็นไฮโดรเจนอะตอม 2 อะตอมจับกับอะตอมของแพลทินัมและสลายพันธะไฮโดรเจนไอออน (โปรตอน) และอิเล็กตรอนออกมา ปฏิกิริยาเกิดดังสมการ



ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามีผลอย่างมากต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าสูงขึ้น (Raimundo et al., 2006) อย่างไรก็ตาม ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดในการเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนคือแพลทินัม แพลทินัมมีราคาสูง หากใช้ปริมาณแพลทินัมที่สูงอาจมีปัญหาเรื่องต้นทุนที่สูงตามไปด้วย ดังนั้นในการพัฒนาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงในส่วนของอิเล็กโทรดจำเป็นต้องคำนึงถึงต้นทุนด้วยเพื่อให้ได้เซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

3.1.3 ชั้นแพร่ก๊าซ (Gas diffusion layer: GDL)

โดยทั่วไปชั้นแพร่ก๊าซทำขึ้นจากกระดาษคาร์บอนหรือผ้าคาร์บอน มีความหนาประมาณ 100 - 300 ไมครอน โดยจะอยู่ทั้งสองข้างของเซลล์เชื้อเพลิงต่อจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา คุณสมบัติที่ดีของวัสดุที่นำมาทำชั้นแพร่ก๊าซต้องมีความพรุนเพื่อให้ก๊าซสามารถแพร่ผ่านเข้ามาได้ และเกิดการกระจายตัวได้ดีเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาที่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยก๊าซจะแพร่จากที่ความเข้มข้นมากไปที่ความเข้มข้นน้อย เหตุผลที่ต้องทำจากคาร์บอนเพื่อที่จะให้สามารถนำอิเล็กตรอนจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดผ่านไปยังแผ่นรวมกระแสเพื่อส่งผ่านไปยังขั้วแคโทดได้

นอกจากนี้ ชั้นแพร่ก๊าซยังมีส่วนช่วยในการจัดการน้ำที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงขณะทำงานได้ ปริมาณน้ำที่มากเกินไปหรือน้อยเกินไปจะทำให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ชั้นแพร่ก๊าซที่ดีต้องให้ปริมาณไอน้ำผ่านไปที่เมมเบรนพอลิเอทิลีนเพื่อช่วยในการนำโปรตอน แต่ถ้าน้ำที่เกิดขึ้นมากเกินไปจนไม่สามารถระบายออกจากเซลล์ได้จะทำให้เกิดการท่วม (Flooding) ในเซลล์ได้ ซึ่งทำให้การกีดขวางการแพร่ของก๊าซที่จะไปทำปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรด

คุณสมบัติที่ดีของส่วนประกอบอิเล็กโทรดและเมมเบรนมีดังนี้ (Wolf, 2003)

1) ชั้นการแพร่ก๊าซ

- ต้องมีความสามารถในการแพร่ก๊าซสูง
- มีความพรุนสูง
- มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง

2) ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา

- ต้องมีความเป็นเนื้อสม่ำเสมอ
- ต้องเป็นชั้นบางๆ

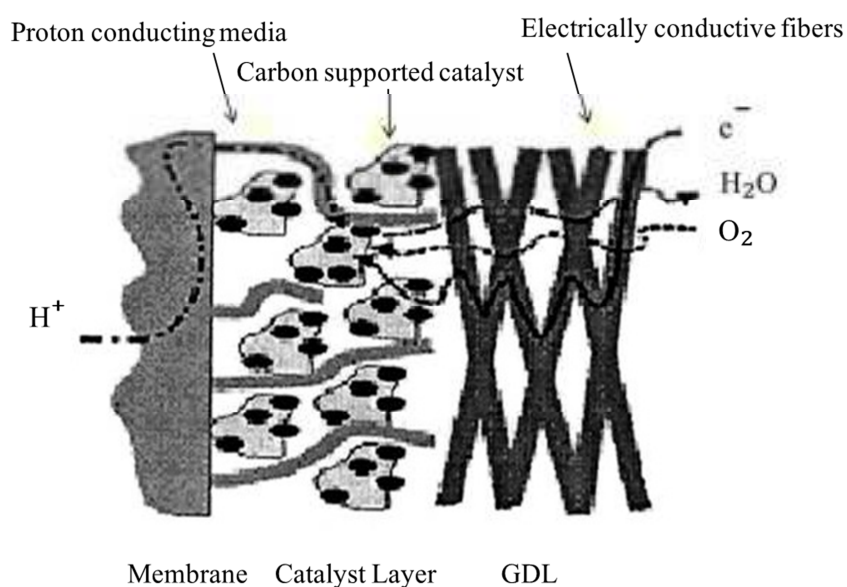
3) เมมเบรน

- มีค่าการนำโปรตอนสูง
- มีความต้านทานในการบวมน้ำ
- ไม่เกิดการแพร่ของก๊าซ

เมื่อประกอบเป็นส่วนประกอบอิเล็กโทรดและเมมเบรนแล้ว ควรมีคุณสมบัติดังนี้

- มีค่าความต้านทานในการสัมผัสน้อย (low contact resistance)
- มีค่าความต้านทานโดยรวมน้อย (low bulk resistance)
- สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี

จากคุณสมบัติที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าขั้วไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของเซลล์เชื้อเพลิง ขั้วไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพดี ควรจะมีกระบวนการถ่ายโอนมวลและประจุที่ดีในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงกำลังทำงาน ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การถ่ายโอนก๊าซ โปรตอนและอิเล็กตรอนภายในขั้วอิเล็กโทรดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

ที่มา: Litster and McLean (2004)

กระบวนการถ่ายโอนที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

- 1) การเคลื่อนที่ของโปรตอนระหว่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านเมมเบรนไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาอีกด้านหนึ่ง
- 2) อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ระหว่างแผ่นรวมกระแสกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านชั้นแพร่ก๊าซ
- 3) ก๊าซตัวทำปฏิกิริยาและก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้เคลื่อนที่เข้าและออกจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา

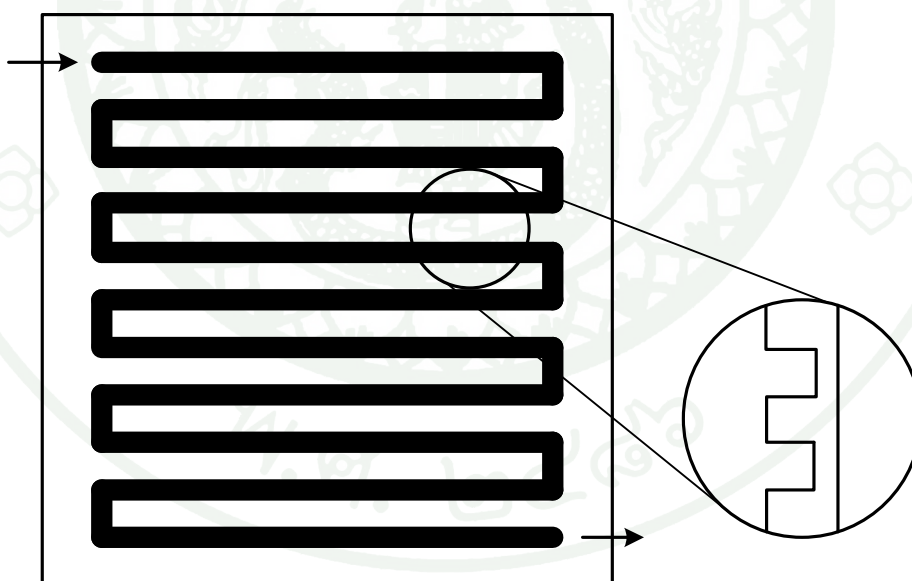
จะเห็นได้ว่า ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามีบทบาทสำคัญมาก ถ้าชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่ได้ดี ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงก็จะดีขึ้น

3.2 เส้นทางไหล (Flow field)

เส้นทางไหลมีลักษณะเป็นแผ่นเซาะร่องเป็นช่องทางไหล (Flow channel) มีหน้าที่กระจายการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงไปยังชั้นการแพร่ก๊าซ และนำอิเล็กตรอนได้ วัสดุที่ใช้ทำส่วน

ใหญ่จึงเป็นพวกโลหะและพวกแกรไฟต์ (Graphite) ด้านในของช่องทางไหลถัดจากชั้นการแพร่ก๊าซจะเป็นร่องให้ก๊าซสามารถผ่านได้ ความกว้างและความลึกของช่องนี้จะส่งผลถึงประสิทธิภาพต่อการกระจายตัวของก๊าซที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยา

โดยทั่วไปแผ่นทางไหลจะมีช่องทางไหลของก๊าซเป็นช่องทางยาวซึ่งแต่ละช่องจะมีผนัง (land) กันแยกออกจากกัน รูปแบบของผนังทั่วไปที่ใช้อยู่จะมีมุมเป็นมุมฉาก โดยแต่ละผนังช่องทางไหลจะทำมุมฉากซึ่งทำให้ช่องทางไหลของก๊าซมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากด้วย ดังแสดงในภาพที่ 13 ช่องทางไหลเหล่านี้ทำหน้าที่กระจายก๊าซไปยังแอโนดหรือแคโทดแต่ละด้าน และในขณะเดียวกันจะเป็นช่องทางระบายน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าและความชื้นที่ป้อนจากการทดลองในระหว่างการเดินเซลล์ผลิตไฟฟ้าเพื่อกำจัดออกไปภายนอกเซลล์ด้วย การกำจัดน้ำออกไปต้องให้พอเพียงที่น้ำจะไม่ปิดกั้นการแพร่ของก๊าซและยังรักษาความชื้นของเมมเบรนให้สามารถถ่ายเทโปรตอนผ่านจากแอโนดไปยังแคโทดได้เต็มประสิทธิภาพ นอกจากนี้แผ่นทางไหลมีหน้าที่นำอิเล็กตรอนเข้าหรือออกจากส่วนประกอบอิเล็กโทรดเมมเบรนหรือเอ็มอีเอได้ วัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่จึงเป็นวัสดุจำพวกโลหะและแกรไฟต์



ภาพที่ 13 ภาพหน้าตัดด้านข้างของช่องทางไหลทั่วไป

แผ่นทางไหลต้องมีการกระจายก๊าซได้ดีและมีประสิทธิภาพในการจัดการน้ำให้ออกจากชั้นแพร่ก๊าซได้ง่าย การจัดการน้ำภายในแผ่นทางไหลนี้เป็นปัญหาสำคัญสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เนื่องจากเมมเบรนภายในเซลล์เชื้อเพลิงต้องมีความชื้นอยู่ตลอดเวลา

เพื่อให้เมมเบรนนำโปรตอนได้ดี น้ำที่ระเหยออกไปจึงควรมีปริมาณเท่ากับน้ำที่ผลิตขึ้นมา ถ้าหากมีการจัดการน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงไม่เหมาะสม เช่น น้ำระเหยออกช้าไป ปริมาณน้ำที่มากเกินไปจะกีดขวางการไหลของก๊าซภายในชั้นแพร่ก๊าซและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ก๊าซที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาได้และทำให้ปฏิกิริยาเกิดลดลง แต่หากน้ำระบายออกเร็วเกินไปจะทำให้เซลล์แห้ง เป็นผลให้การนำโปรตอนของเมมเบรนไม่ดี ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือแผ่นเมมเบรนแตก เกิดการลัดข้าม (Crossover) ของก๊าซ เพราะฉะนั้นการรักษาอุณหภูมิภายในเซลล์จึงมีความสำคัญ

ชนิดของแผ่นทางไหลที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีหลายชนิด ดังนี้

- 1) Pin-type flow field
- 2) Interdigitated flow field
- 3) Integrated flow field
- 4) Parallel flow field
- 5) Serpentine flow field
- 6) Parallel serpentine flow fields

แผ่นทางไหลที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิด คือ แผ่นทางไหลแบบเลื้อยขด (Serpentine flow field) และแผ่นทางไหลแบบเลื้อยขดขนาน (Parallel serpentine flow fields)

3.3 แผ่นรวมกระแส (Current collector plate)

แผ่นรวมกระแสเป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่รับและจ่ายประจุอิเล็กตรอนของเซลล์เชื้อเพลิงผ่านทางวงจรไฟฟ้าภายนอก แบ่งออกเป็นฝั่งแอโนดและแคโทด โดยอิเล็กตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนจากขั้วแอโนดจะผ่านชั้นการแพร่ก๊าซมายังแผ่นรวมกระแสทางแอโนดก่อนจะออกจากเซลล์ จากนั้นอิเล็กตรอนจะวิ่งออกจากเซลล์ผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกและไปเข้าที่แผ่นรวมกระแสอีกฝั่งที่ขั้วแคโทด อิเล็กตรอนที่วิ่งออกจากเซลล์จะต่อกับเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า หลอดไฟ เกิดครบวงจรไฟฟ้าสมบูรณ์

3.4 แผ่นประกบปริม (End plate)

แผ่นประกบปริมเป็นส่วนที่ประกบและอัดชิ้นส่วนต่างๆเข้าด้วยกันเป็นเซลล์เชื้อเพลิง ให้แต่ละชิ้นส่วนสัมผัสกันดีและก๊าซไม่รั่วไหลออกไปภายนอก โดยยึดส่วนต่างๆด้วยน็อต

4. ประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

โดยทั่วไปเซลล์เชื้อเพลิงสามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งประสิทธิภาพนี้ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านเซลล์ หากกระแสถูกดึงไปมาก ประสิทธิภาพก็ลดลงมาก

ในการศึกษาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ก่อนอื่นควรนิยามประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ในอุดมคติ (Ideal performance) เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ในอุดมคติ ต่อมาจะสามารถคำนวณความสูญเสียได้ จากนั้นเมื่อนำความสูญเสียมาลบออกจากประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ในอุดมคติก็จะสามารถทราบค่าประสิทธิภาพในการทำงานจริง (actual performance)

4.1. ประสิทธิภาพในอุดมคติ (Ideal Performance)

ประสิทธิภาพในอุดมคติของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ในอุดมคติของเซลล์เชื้อเพลิง สามารถบ่งบอกได้โดยค่าศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติของเซลล์ (Thermodynamic potential, ideal voltage) ซึ่งสามารถนิยามได้ด้วยสมการของเนิร์นสต์ (Nernst equation) สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่สภาวะมาตรฐานในอุดมคติ (Ideal standard potential, E^0) ของปฏิกิริยาภายในเซลล์กับศักย์ไฟฟ้าที่สภาวะสมดุลในอุดมคติ (Ideal equilibrium potential, E) ที่อุณหภูมิและความดันย่อยต่าง ๆ ของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าอุดมคติได้ดังนี้

$$E_{Nernst} = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \left[\frac{p_{H_2}^*}{p_{O_2}^*} \right] \quad (21)$$

โดยที่ T	คือ อุณหภูมิของเซลล์ (K)
$p_{H_2}^*$	คือ ความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนที่ผิวหน้าตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแอโนด (atm)
$p_{O_2}^*$	คือ ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่ผิวหน้าตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแคโทด (atm)
n	คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายโอน ในที่นี้มีค่าเป็น 2 สำหรับก๊าซไฮโดรเจน
R	คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (J/mol.K)
E^0	คือ ศักย์ไฟฟ้าอุดมคติที่สภาวะมาตรฐาน
F	คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,487 C/equ.)

ที่มา: Ronald *et al.* (2000)

ประสิทธิภาพในอุดมคติของเซลล์เชื้อเพลิงนิยามด้วยสมการของเนิร์นสต์ (Nernst equation) สมการเนิร์นสต์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานในอุดมคติ (Ideal standard potential, E^0) ของปฏิกิริยาภายในเซลล์และศักย์ไฟฟ้าสมดุลในอุดมคติ (Ideal equilibrium potential, E) ความสัมพันธ์ของสมการของเนิร์นสต์สำหรับแต่ละปฏิกิริยาแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงและความสัมพันธ์กับสมการของเนิร์นสต์

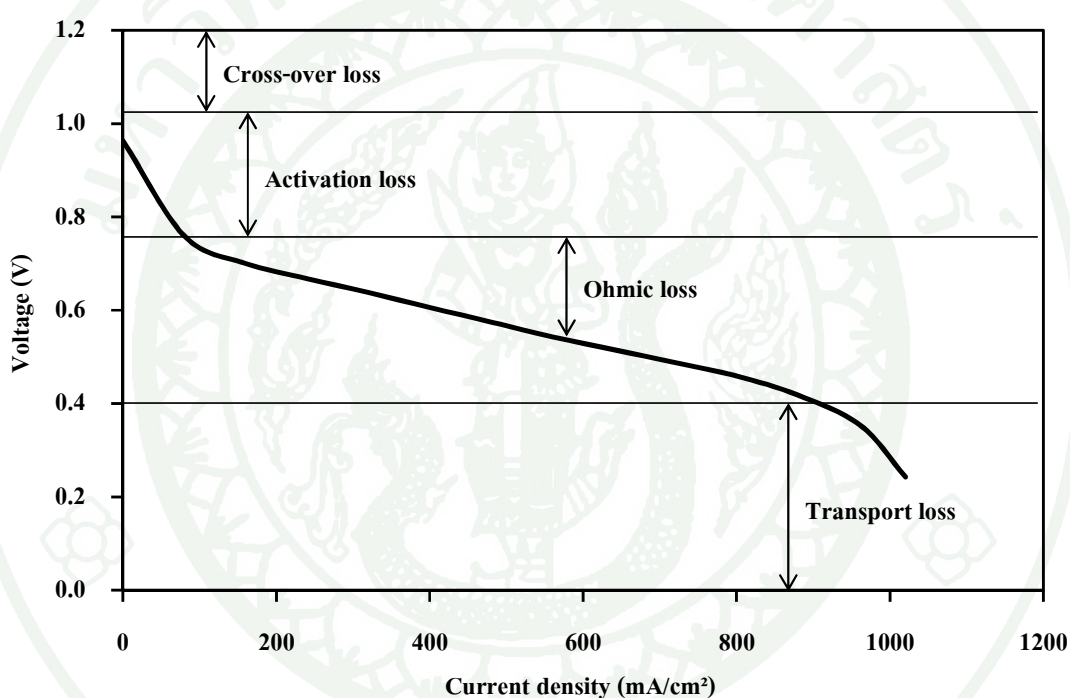
ปฏิกิริยาเซลล์	สมการของเนิร์นสต์
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	$E = E^0 + (RT/2F)\ln\left[P_{H_2}/P_{H_2O}\right] + (RT/2F)\ln\left[P_{O_2}^{1/2}\right]$
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 + CO_{2(a)} \rightarrow H_2O + CO_{2(a)}$	$E = E^0 + (RT/2F)\ln\left[P_{H_2}/P_{H_2O}(P_{CO_2})_{(a)}\right] + (RT/2F)\ln\left[P_{O_2}^{1/2}(P_{CO_2})_{(c)}\right]$
$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	$E = E^0 + (RT/2F)\ln\left[P_{CO}/P_{CO_2}\right] + (RT/2F)\ln\left[P_{O_2}^{1/2}\right]$
$CH_4 + O_2 \rightarrow 2H_2O + CO_2$	$E = E^0 + (RT/8F)\ln\left[P_{CH_4}/P_{H_2O}^2(P_{CO_2})\right] + (RT/8F)\ln\left[P_{O_2}^2\right]$

ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานในอุดมคติ (Ideal standard potential, E^0) ที่ 298 เคลวิน ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนและออกซิเจนคือ 1.229 โวลต์ โดยมีน้ำในสถานะของเหลวเป็นผลิตภัณฑ์ หรือ 1.18 โวลต์ โดยมีน้ำในสถานะก๊าซเป็นผลิตภัณฑ์

4.2 ประสิทธิภาพจริง (Actual Performance)

ในการหาศักย์ไฟฟ้าจริงของเซลล์ (Actual cell potential) ศักย์ไฟฟ้าจริงของเซลล์จะมีค่าลดลงจากศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติ เนื่องจากความสูญเสียที่ไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible losses) ดังแสดงในภาพที่ 14 ซึ่งเรียกว่าเส้นโค้งโพลาไรเซชัน (Polarization curve) โดยค่าศักย์ไฟฟ้าจริงจะมีความสัมพันธ์กับค่าความสูญเสียต่าง ๆ ดังแสดงในสมการ

$$V_{cell} = E_{\text{nernst}} - \eta_{\text{act}} - \eta_{\text{ohm}} - \eta_{\text{conc}} \quad (22)$$



ภาพที่ 14 เส้นโค้งโพลาไรเซชัน

ความสูญเสียที่ไม่สามารถผันกลับได้ ประกอบไปด้วยความสูญเสียหลักๆ 4 รูปแบบ ได้แก่

1) การสูญเสียลดข้าม (Cross-over losses) เป็นการสูญเสียเนื่องจากการเคลื่อนที่ข้ามผ่านเมมเบรนของก๊าซหรือประจุไฟฟ้า เป็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ข้ามผ่านเมมเบรนของก๊าซที่ยังไม่มีการแตกตัว หรือการเคลื่อนที่ข้ามผ่านเมมเบรนของอิเล็กตรอน ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพลดลง

2) การสูญเสียกัมมันต์ (Activation losses) เป็นความสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่วงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่พื้นผิวของอิเล็กโทรดถูกควบคุมด้วยจลพลศาสตร์ของอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่สมบูรณ์ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ความสูญเสียจากปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิง เกี่ยวข้องโดยตรงกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าและปฏิกิริยาเคมีมีความคล้ายคลึงกันมากในเรื่องของพลังงานกระตุ้นขวางกั้น (Activation barriers) ที่สารทำปฏิกิริยาจะต้องมีพลังงานเอาชนะได้ โดยการสูญเสียพลังงานกระตุ้น จะเกิดขึ้นที่ทั้งทางด้านแคโทดและแอโนด

สมการแสดงความสัมพันธ์ของการสูญเสียกัมมันต์ (Activation losses) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha n F} \ln \frac{i}{i_0} \quad (23)$$

โดยที่ α = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทอิเล็กตรอนของปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรด (Electron transfer coefficient of the reaction at the electrode)

i_0 = ค่าการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นของกระแส (Exchange current density)

3) การสูญเสียโอห์ม (Ohmic losses) เกิดจากความต้านทานการไหลของไอออนในอิเล็กโทรไลต์ และความต้านทานการไหลผ่านขั้วอิเล็กโทรด การลดการสูญเสียโอห์มที่ไหลผ่านอิเล็กโทรไลต์ทำได้โดยการลดช่องว่างระหว่างผิวอิเล็กโทรดและเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของไอออนในอิเล็กโทรไลต์ เพราะว่าทั้งอิเล็กโทรไลต์และขั้วอิเล็กโทรดของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นไปตามกฎของโอห์ม การสูญเสียโอห์มอธิบายได้โดยสมการดังนี้

$$\eta_{ohm} = iR \quad (24)$$

โดยที่ i คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเซลล์

R คือ ความต้านทานของเซลล์รวม

$$R = R_{electronic} + R_{ionic} + R_{contact} \quad (25)$$

โดยที่ $R_{electronic}$ คือ ความต้านทานอิเล็กทรอนิกส์
 R_{ionic} คือ ความต้านทานไอออนิก
 $R_{contract}$ คือ ความต้านทานการสัมผัส

4) การสูญเสียการถ่ายโอนมวล (Mass transport losses) เป็นผลมาจากสารตั้งต้นถูกใช้ไปที่ขั้วอิเล็กโทรดด้วยปฏิกิริยาเคมี จึงมีค่าความต่างศักย์ที่สูญเสียจากการที่วัสดุรอบ ๆ เซลล์ไม่สามารถรักษาความเข้มข้นเริ่มต้นของของไหลทั้งหมดไว้ได้ ทำให้เกิดเกรเดียนต์ของความเข้มข้น (Concentration gradient) ขึ้น นอกจากนี้ยังมีกระบวนการอีกหลายอย่างที่ทำให้เกิดเกรเดียนต์ของความเข้มข้น (Concentration gradient) คือการแพร่อย่างช้าๆ ในสถานะก๊าซในรูพรุนของอิเล็กโทรด เพื่อเข้าและออกจากอิเล็กโทรด หรือการแพร่ของสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์เพื่อเข้าหรือออกจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ค่าความหนาแน่นของกระแสค่าหนึ่ง การสูญเสียการถ่ายโอนมวล (mass transport losses) อธิบายได้โดยสมการดังนี้

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{C_s}{C_b} \right) = \frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (26)$$

ในการวิเคราะห์การสูญเสียการถ่ายโอนมวลจะสมมติให้ไม่มีการสูญเสียการกระตุ้นในปฏิกิริยาถ่ายเทประจุ เช่น ความหนาแน่นของกระแสที่เปลี่ยนไปสูงๆ การสูญเสียการกระตุ้นจะถูกตัดทิ้งเมื่อเปรียบเทียบกับ การสูญเสียการถ่ายโอนมวล (ส่วนใหญ่จะเหมาะกับเซลล์อุณหภูมิสูง)

เป้าหมายของการพัฒนาสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงคือการทำให้การสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยที่สุด หมายความว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ต้องมีค่าเข้าใกล้ค่าศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติมากที่สุด สามารถทำได้โดยการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิง เช่น การปรับปรุงโครงสร้างของอิเล็กโทรด การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีกว่าเดิม การทำให้อิเล็กโทรไลต์มีค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น การทำส่วนประกอบของเซลล์ให้มีขนาดที่บางกว่าเดิม การปรับเปลี่ยนปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ การปรับปรุงช่องทางไหล หรือการจัดการน้ำในเซลล์เชื้อเพลิง สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีอยู่แล้วการพัฒนาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจะทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงสถานะที่ใช้ในการเดินระบบ เช่น การเพิ่มอุณหภูมิ เป็นต้น

4.3 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง (Cell Efficiency)

ประสิทธิภาพความร้อน (Thermal efficiency) ของอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงาน นิยามได้ว่าเป็นปริมาณของพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี ΔH

$$\eta = \frac{\text{Useful Energy}}{\Delta H} \quad (27)$$

ประสิทธิภาพจริงของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถอธิบายได้ในเทอมของสัดส่วน ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จริงต่อศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติ ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จริงจะมีค่าน้อยกว่าศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติ เพราะเกิดการสูญเสีย (Loss) ของโพลาไรเซชัน (Polarization) ในเซลล์และการสูญเสียโอห์ม (Ohmic losses)

ประสิทธิภาพความร้อน (Thermal efficiency) ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนและออกซิเจนสามารถเขียนในเทอมของศักย์ไฟฟ้าที่จริงดังนี้

$$\eta = \frac{\text{Useful Energy}}{\Delta H} = \frac{\text{Useful Energy}}{(\Delta G / 0.83)} = \frac{\text{Volts}_{\text{actual}} \times \text{Current}}{\text{Volts}_{\text{ideal}} \times \text{Current} / 0.83} = \frac{(0.83)(V_{\text{actual}})}{E_{\text{ideal}}} \quad (28)$$

ศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติของกระบวนการผันกลับได้ของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ความดัน 1 บรรยากาศและ 25 องศาเซลเซียส คือ 1.229 โวลต์ ดังนั้น ประสิทธิภาพความร้อน (Thermal efficiency) ของเซลล์เชื้อเพลิงจริงที่ความต่างศักย์ V_{cell}

$$\eta = \frac{0.83 \times V_{\text{cell}}}{E_{\text{ideal}}} = \frac{0.83 \times V_{\text{cell}}}{1.229} = 0.675 \times V_{\text{cell}} \quad (29)$$

6. การพัฒนาชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันในเซลล์เชื้อเพลิงจะมีอัตราการเกิดช้ามาก ดังนั้น จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer) ถือเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในส่วนประกอบอิเล็กโทรดเมมเบรน ปริมาณการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อพื้นที่ผิวกัมมันต์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ปริมาณการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สูงจะ

เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวกัมมันต์ไฟฟ้า ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยจะมีผลสำหรับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแคโทด เนื่องจากปฏิกิริยาด้านแคโทดเป็นขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Qi *et al.*, 2002) โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงคือแพลทินัม แพลทินัมเป็นตัวเร่งที่ดีที่สุดในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Thomass, 1999) แต่แพลทินัมมีราคาแพงและมีแนวโน้มที่จะหมดไป (Xiong *et al.*, 2004) ทำให้เป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในระบบ ปริมาณแพลทินัมด้านแคโทดที่สูงมีความสำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง รวมทั้งราคาคด้วย ดังนั้น การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงในส่วนของพัฒนาอิเล็กโทรดโดยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาด้านแคโทดควรคำนึงถึงค่าใช้จ่ายด้วย การลดปริมาณแพลทินัมในส่วนประกอบอิเล็กโทรดเพื่อลดค่าใช้จ่าย โดยยังคงมีสมรรถนะสูงอยู่ เป็นสิ่งที่น่าสนใจ และนำไปพัฒนาต่อไปเพื่อให้ได้เซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพที่สุด

ด้วยข้อจำกัดเรื่องราคาแพลทินัมที่สูง นักวิจัยจำนวนมากได้พัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อลดปริมาณแพลทินัมโดยคำนึงสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงด้วย เช่น การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ แทนแพลทินัม (Paulus *et al.*, 2002) หรือการลดขนาดอนุภาคของแพลทินัมลงให้อยู่ในระดับนาโนเมตร ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มพื้นที่ผิวที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาได้ (Wilson *et al.*, 1992; Zoheir *et al.*, 2004) การพัฒนาการใช้แพลทินัมโดยเติมสารพอลิเมอร์ที่สามารถนำโปรตอน เช่น แนนฟิออน ลงไปในชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา ก็สามารถทำให้ประสิทธิภาพการใช้แพลทินัมเพิ่มขึ้นได้มากกว่า 20% (Rajalakshmi *et al.*, 2004) นอกจากนี้ ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงาน เมมเบรนจะมีความเครียดเชิงกลเกิดมากขึ้นได้ เนื่องจากจากสภาวะของเมมเบรนที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การประกบชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและชั้นเมมเบรนให้แนบสนิทกันมากที่สุดจะทำให้ลดความต้านทานการสูญเสียโอห์มและลดความเครียดเชิงกลที่เกิดขึ้นในเมมเบรนได้ มีการพัฒนาวิธีการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบฟิล์มบาง (thin-film method) บนเมมเบรน เพื่อช่วยลดความต้านทานการสูญเสียโอห์ม ทำให้ได้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสูงและใช้ปริมาณไ้แพลทินัมต่ำ (Wilson *et al.*, 1992a, 1992b, 1995) วิธีนี้เป็นการเตรียมฟิล์มบางที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเกาะเชื่อมกับเทฟลอนโดยมีแนฟฟิออน (Nafion) เกาะติดอยู่ด้วย วิธีการดังกล่าวจะเพิ่มพื้นที่ผิวที่ไวต่อปฏิกิริยาจาก 22% เป็น 45% (Cheng *et al.*, 1999) โดยสรุปแล้ว การพัฒนาประสิทธิภาพการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อลดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานั้น สามารถทำได้โดยการปรับปรุงส่วนผสมกัมมันต์ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst ink) และการพัฒนากรรมวิธีการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาบนเมมเบรน

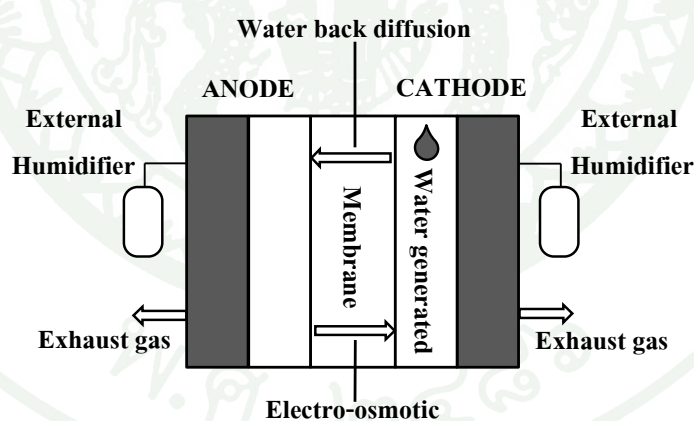
ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน สารตั้งต้นจะไหลตามช่องทางไหลในแผ่นทางไหล และกระจายตัวผ่านชั้นแพร่ก๊าซเข้าไปทำปฏิกิริยาที่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น โดยความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะลดลงตามทิศทางของช่องทางไหล เนื่องจากถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า แผ่นทางไหลส่วนใหญ่ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนจะเป็นแผ่นทางไหลแบบเกลียวขด ซึ่งความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะลดลงตามความยาวของแผ่นทางไหลนั้น ในขั้นตอนการเตรียมส่วนประกอบอิเล็กโทรดที่สามารถที่จะลดปริมาณแพลทินัมได้ ด้วยความรู้ที่ว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ทางออกของเซลล์จะน้อยกว่าที่เข้ามาตอนแรก เนื่องจากการใช้ไปในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องการควรลดลงตามทิศทางการไหลของสารตั้งต้นเหล่านั้นด้วย จากความรู้นี้ Amaporn (2009) ได้ทำการศึกษาการลดปริมาณแพลทินัม โดยที่รักษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงไม่ให้เกิดผล ด้วยการพัฒนากิจกรรมวิธีการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแคโทดที่มีลักษณะการกระจายตัวแบบไล่ระดับ (Gradient loading) เปรียบเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ ผลการทดลองพบว่า เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับให้สมรรถนะสูงกว่าที่ค่าความหนาแน่นกระแสต่ำ (0 – 400 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร) แต่ให้สมรรถนะต่ำกว่าที่ค่าความหนาแน่นสูง เนื่องจากลักษณะการเคลือบของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบไล่ระดับจะทำให้เกิดการสูญเสียโอห์ม ความแตกต่างระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับและเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอคือความแตกต่างของความหนาแน่นของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ในงานวิจัยนี้จึงจะทำการแก้ปัญหาคือการสูญเสียโอห์มที่เกิดขึ้น

7. การจัดการน้ำ

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงคือน้ำบริสุทธิ์ ภายใต้สภาวะปกติ น้ำที่ได้จะอยู่ในรูปของไอ น้ำ แต่ในภายใต้สภาวะกระแสสูงๆ น้ำจะอยู่ในรูปของหยดน้ำที่เกิดจากการควบแน่นจำนวนมาก และเมื่อมีปริมาณหยดน้ำมากขึ้นอาจจะเกิดน้ำท่วมภายในเซลล์ได้ ปริมาณน้ำที่พอเหมาะนั้นจะช่วยให้การนำโปรตอนดีขึ้น แต่ถ้าปริมาณน้ำมากเกินไปจะเกิดน้ำท่วมภายในเซลล์เกิดการกีดขวางการไหลของก๊าซ น้ำในเซลล์เชื้อเพลิงเกิดขึ้นมาจาก 2 สาเหตุ คือ น้ำที่ได้รับจากอุปกรณ์กำเนิดความชื้น (Humidifier) เนื่องจากก๊าซได้รับน้ำหรือความชื้นจากอุปกรณ์กำเนิดความชื้น ทำให้ก๊าซที่เข้ามาทำปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงอยู่ในรูปของก๊าซเปียก โดยปริมาณน้ำที่ได้จากอุปกรณ์กำเนิดความชื้นนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดัน และอัตราการไหลของก๊าซ และอีกสาเหตุหนึ่งคือน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ขั้วแคโทด โดยปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานั้นจะขึ้นกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) ที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตออกมา น้ำที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปตามช่องทาง

เดินก๊าซทำให้เกิดการกีดขวางการทำปฏิกิริยาของก๊าซ จึงจำเป็นต้องมีการจัดการน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง

การจัดการน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง น้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงจะมาจากความชื้นภายนอกจากอุปกรณ์ให้ความชื้นและจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า น้ำที่ได้จากปฏิกิริยาอยู่ในรูปของเหลวจึงจำเป็นต้องมีการระบายน้ำออกจากเซลล์เพื่อไม่ให้เกิดน้ำท่วมเซลล์ แต่เนื่องจากเมมเบรนพอลิเมอร์ต้องมีความชื้นอยู่ตลอดเวลา เพราะค่าการนำไอออนจะสูงกว่าเมื่อเมมเบรนมีความอิ่มตัวสมบูรณ์หรือมีความชื้นในปริมาณที่พอเหมาะนั่นเอง น้ำที่ระเหยออกไปจึงควรมีปริมาณเท่ากับน้ำที่ผลิตขึ้นมา ถ้าหากมีการจัดการน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงไม่เหมาะสม เช่น น้ำระเหยออกไปปริมาณน้ำที่มากเกินไปจะกีดขวางการไหลของก๊าซภายในชั้นแพร่ก๊าซและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้สารตั้งต้นไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาได้และทำให้ปฏิกิริยาเกิดลดลง แต่หากน้ำระบายออกจากเซลล์เร็วเกินไป เซลล์จะอยู่ในลักษณะแห้งทำให้เมมเบรนนำโปรตอนได้ไม่ดี เนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือแผ่นเมมเบรนแตก เกิดการรั่วซึมของก๊าซ (Crossover) เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง

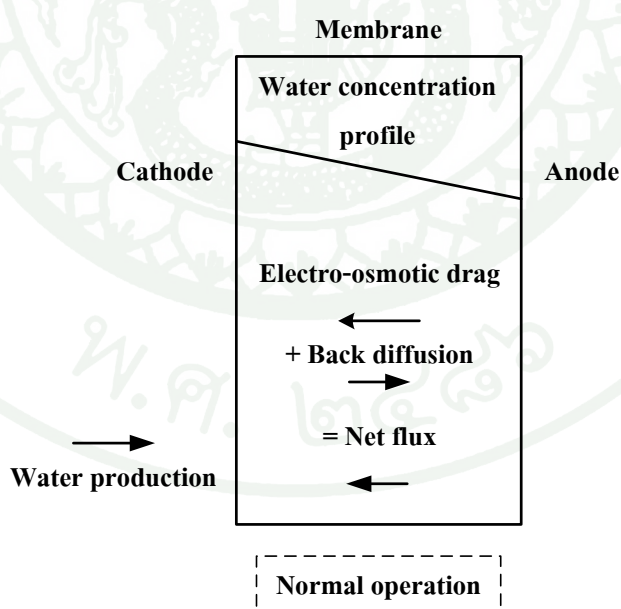


ภาพที่ 15 การเคลื่อนที่ของน้ำภายในจากอิเล็กโทรไลต์เมมเบรน

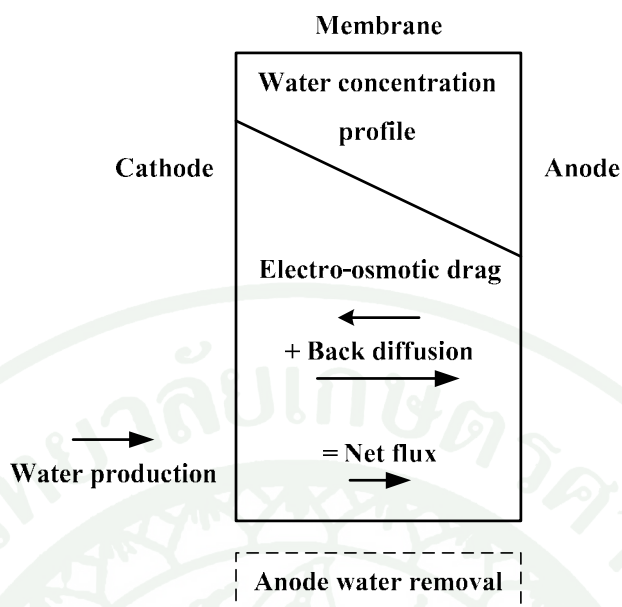
โดยทั่วไปอุณหภูมิความชื้นภายในเซลล์ระหว่างขั้วทั้งสองมีความสัมพันธ์กับการถ่ายโอนน้ำจากด้านแอโนดไปทางด้านแคโทดโดยการลากออสโมซิสไฟฟ้า (Electro-osmotic drag) และการถ่ายโอนน้ำจากด้านแคโทดกลับมายังด้านแอโนดโดยการแพร่กลับ (Water back diffusion) ปริมาณที่น้ำเข้ามาในเซลล์เชื้อเพลิงมาจากความชื้นภายนอกมาจากก๊าซเชื้อเพลิงที่เข้ามาทำปฏิกิริยาในเซลล์

กระบวนการนี้สามารถควบคุมได้ ก๊าซที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาจะพาปริมาณน้ำส่วนเกินออกนอกเซลล์ การเดินระบบในช่วงโวลต์ต่ำหรือกระแสสูง เซลล์เชื้อเพลิงจะผลิตน้ำออกมาในปริมาณมาก ซึ่งทำให้เกิดการท่วมและส่งผลทำให้รูพรุนของขั้วอิเล็กโทรดอุดตัน การถ่ายโอนสารมวลสารของก๊าซไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเกิดได้ยาก อีกทั้งหยดน้ำที่เกิดขึ้นจะกีดขวางการไหลของก๊าซในช่องทางไหล ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์ต่ำลง เพราะมีการสูญเสียการถ่ายโอนมวลก๊าซ (Mass transport losses) และประสิทธิภาพที่ได้ไม่มีความเสถียรเมื่อการไหลของก๊าซถูกกีดขวางมากขึ้น เซลล์เชื้อเพลิงจะจ่ายกระแสได้น้อยลง

Voss *et al.* (1995) ได้พัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้เทคนิคการกำจัดน้ำออกที่ด้านแอโนด เทคนิคนี้อาศัยหลักการเกรเดียนต์ความเข้มข้น (Concentration gradient) ของน้ำระหว่างผิวสัมผัสชั้นแพร่ก๊าซด้านแคโทดและด้านแอโนดโดยใช้ความดันลด (Pressure drop) ระหว่างทางเข้าและทางออกของช่องทางไหลด้านแอโนด เพื่อเพิ่มความสามารถในการกำจัดน้ำออกโดยการไหลของก๊าซเนื่องจากเกรเดียนต์ความดัน (Pressure gradient) ภาพที่ 16 และ 17 แสดงความเข้มข้นของน้ำภายในเมมเบรน อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้มีข้อจำกัดเพราะความดันลดระหว่างผิวสัมผัสชั้นแพร่ก๊าซด้านแอโนดและด้านแคโทดจะทำให้เมมเบรนเสื่อมสภาพได้



ภาพที่ 16 ความเข้มข้นของน้ำผ่านเมมเบรนที่สภาวะปกติ



ภาพที่ 17 ความเข้มข้นของน้ำผ่านเมมเบรนโดยขั้นตอนการกำจัดน้ำออกที่ด้านแอโนด

การออกแบบช่องทางไหลของก๊าซเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาพัฒนาการจัดการน้ำได้ แผ่นทางไหลโดยทั่วไปต้องการให้มีการกระจายก๊าซได้ดี และมีประสิทธิภาพในการจัดการน้ำให้ออกจากชั้นแพร่ก๊าซได้ง่าย มีงานวิจัยที่พัฒนาการจัดการน้ำโดยใช้แผ่นทางไหลเปรียบเทียบระหว่างแผ่นทางไหลแบบขนาน (Parallel flow field) และแผ่นทางไหลแบบเลี้ยวซด (Serpentine flow field) (Li and Sabir, 2007) พบว่าสามารถให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า ช่องทางไหลแบบขนาน นั้นการระบายน้ำไม่เพียงพอและการกระจายตัวของก๊าซไม่ดีเนื่องจากการไหลของน้ำลงสู่ด้านล่างของช่องทางไหลและกักขังอยู่ในช่องทางไหล ทำให้เกิดพื้นที่หยุดไหลขึ้น แต่ช่องทางไหลแบบเลี้ยวซดจะมาช่วยแก้ปัญหา งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการออกแบบช่องทางไหลช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงได้

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุที่ใช้ในการสร้างเซลล์เชื้อเพลิง

วัสดุที่ใช้ในการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนคาร์บอนแบล็ค (10-50% Pt on carbon black, Alfa Aesar) เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Nafion 112, Dupont) แผ่นเทฟลอน (Teflon) และกระดาษคาร์บอน (10 BA, SGL) หนา 0.4 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังประกอบด้วยชิ้นส่วนต่างๆ ที่ประกอบเป็นเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ แผ่นทางไหล (Flow field plate) ของก๊าซ แผ่นรวมกระแส (Current collector plate) และแผ่นประกบริม (End plate)

2. สารเคมีและก๊าซที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีและก๊าซที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยน้ำดีไอออไนซ์ (Deionized Water) สารละลายแนฟฟิออน (Nafion) เมทานอล (Methanol) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) ก๊าซออกซิเจน (O_2) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2)

วิธีการ

1. การปรับปรุงคุณภาพของเมมเบรน

ทำการต้มแผ่นเมมเบรนในน้ำดีไอออไนซ์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการต้มแผ่นเมมเบรนในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์หลายๆ ครั้ง แล้วจึงนำแผ่นไปต้มในกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร แล้วล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์หลายๆ ครั้ง ต้มด้วยน้ำดีไอออไนซ์ นำไปใส่เอาไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2. การเตรียมสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยา

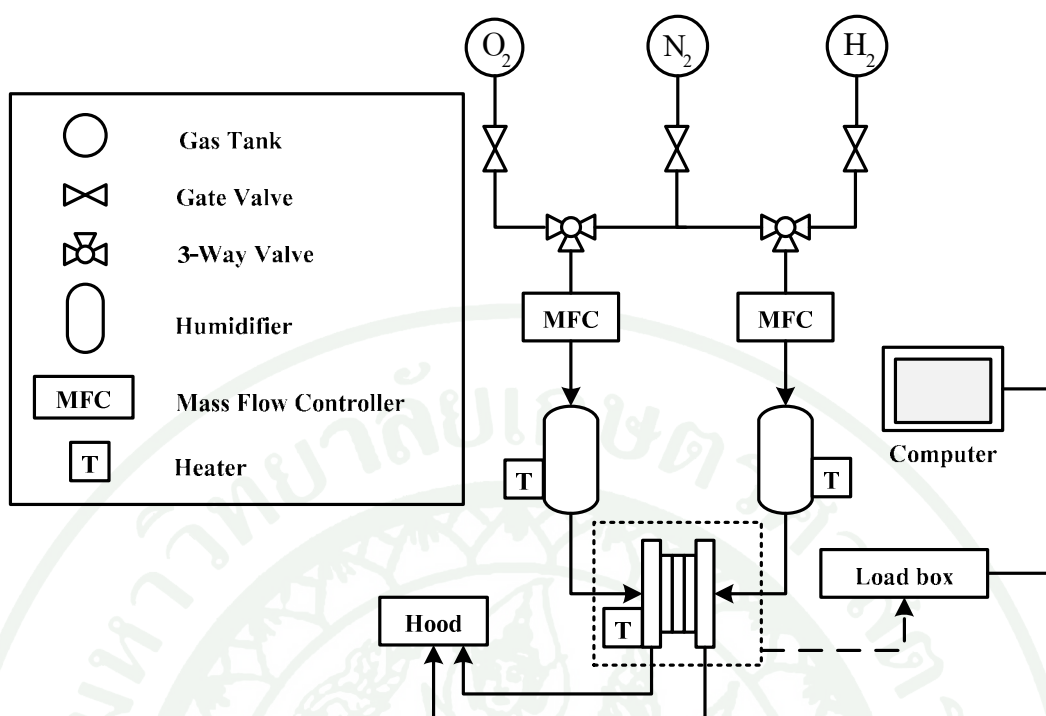
สำหรับการเตรียมสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการเตรียมจากตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนคาร์บอนแบลคผสมกับน้ำดีไอออไนซ์ จากนั้นเติมเมทานอลในปริมาณที่เหมาะสมแล้วกวนด้วยเครื่องแมกเนติกสเตอริโอ (Magnetic stirrer) ในเวลาที่กำหนด แล้วเติมสารละลายแอฟฟิออน 5% จากนั้นกวนด้วยเครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic) ให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3. การเตรียมเซลล์เชื้อเพลิง

การเตรียมเซลล์เชื้อเพลิงเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ทำได้โดยเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาบนเมมเบรนที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนคาร์บอนแบลค ทั้งด้านแคโทดและแอโนดด้วยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องการ ประกอบด้วยชั้นแพร่ก๊าซ รวมเรียกว่า ส่วนประกอบอิเล็กโทรดเมมเบรน (Membrane electrode assembly, MEA) ถัดจากส่วนประกอบอิเล็กโทรดเมมเบรนจะเป็นแผ่นทางไหล (Flow field) ซึ่งทำจากแกรไฟต์ (Graphite) มีลักษณะเป็นร่องไว้เป็นช่องทางไหล (Flow channel) มีหน้าที่กระจายการไหลของก๊าซไปยังชั้นแพร่ก๊าซ และนำอิเล็กตรอนได้ ต่อไปเป็นแผ่นรวมกระแส (Current collector plate) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่รับและจ่ายประจุอิเล็กตรอนของเซลล์เชื้อเพลิงผ่านทางวงจรไฟฟ้าภายนอก แบ่งออกเป็นฝั่งแอโนดและแคโทด และส่วนประกอบสุดท้ายคือแผ่นประกบริม (End plate) เป็นส่วนที่ประกบและอัดชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันโดยยึดด้วยน็อต

4. การเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิง

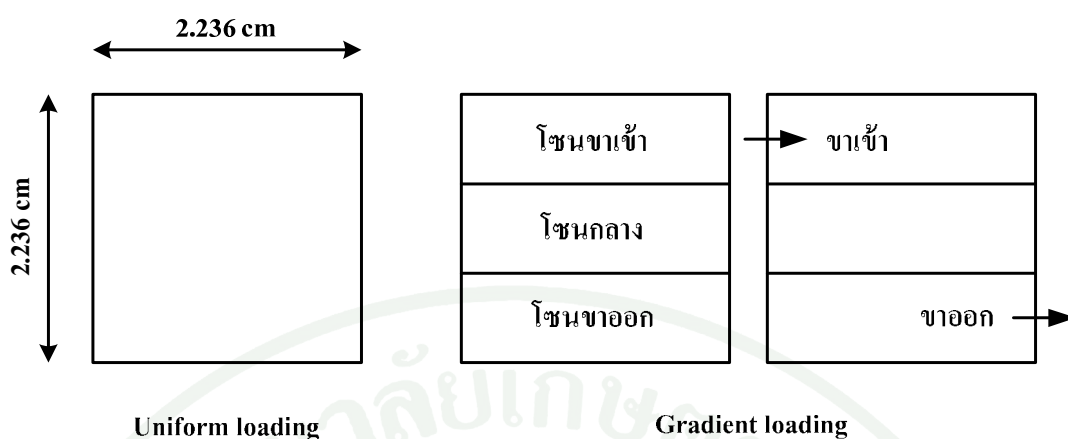
นำเซลล์เชื้อเพลิงต่อเข้ากับระบบทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ควบคุมโหลดไฟฟ้าและวัดค่าทางไฟฟ้า (Load box, Scribner 890 L) แสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์พีซี มีการป้อนก๊าซเชื้อเพลิงผ่านอุปกรณ์ให้ความชื้น (Humidifier) ที่ติดตั้งภายนอกเซลล์ ความชื้นจะควบคุมด้วยอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) อัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงควบคุมโดยอุปกรณ์ควบคุมและวัดอัตราไหล (Mass flow controller, MKS) ซึ่งติดตั้งก่อนเข้าสู่ให้ความชื้น ดังแสดงในภาพที่ 17 เดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงโดยป้อนก๊าซไฮโดรเจนเข้าทางด้านแอโนดและอากาศเข้าทางด้านแคโทดด้วยอัตราการไหลที่กำหนด จากนั้นปรับอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงและอุปกรณ์ให้ความชื้น (Humidifiers) ตามที่ต้องการ ทำการเดินระบบภายใต้ความดันบรรยากาศ



ภาพที่ 18 ระบบทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

4.1 ศึกษารูปแบบการกระจายตัวของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ศึกษาการกระจายตัวของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อที่จะลดปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมโดยรักษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงไม่ให้ลดลง โดยออกแบบการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะการกระจายตัวของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบไล่ระดับ (Gradient loading) เปรียบเทียบกับสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีลักษณะการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ (Uniform loading) โดยเตรียมเซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณไส้แพลทินัมที่แตกต่างกันในอิเล็กโทรดด้านแคโทดเนื่องจากปฏิกิริยาด้านแคโทดเป็นขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงประยุกต์การเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมแบบไล่ระดับเฉพาะอิเล็กโทรดด้านแคโทด ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับจะแบ่งเป็น 3 โซน คือ โซนขาเข้า โซนกลาง และโซนขาออกตามแผ่นช่องการไหล ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 รูปแบบการใส่แพลทินัม

ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาในแต่ละโซนแสดงในตารางที่ 2 สำหรับลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงและสภาวะการทดลองแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 รูปแบบการกระจายตัวของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงแบบไล่ระดับ

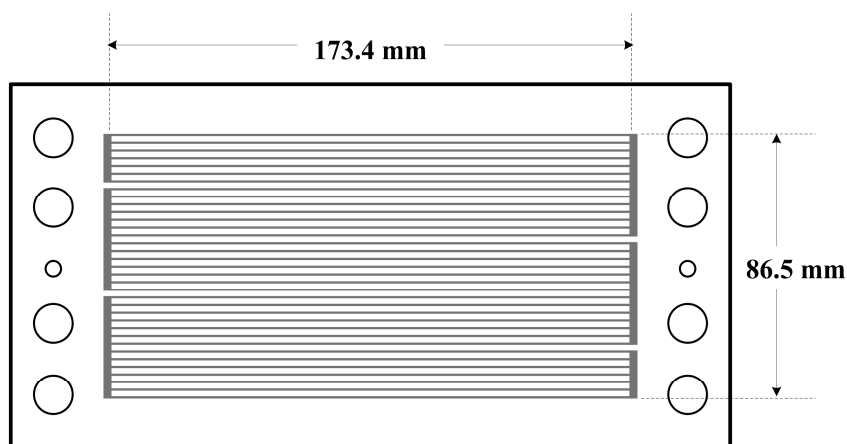
รูปแบบที่	ปริมาณแพลทินัม (mg/cm ²)				
	ปริมาณแพลทินัมด้านแคโทด (ไล่ระดับ)				ปริมาณแพลทินัมด้านแอโนด (สม่ำเสมอ)
	โซนขาเข้า	โซนกลาง	โซนขาออก	เฉลี่ย	
1	0.51	0.26	0.13	0.3	0.3
2	0.69	0.34	0.17	0.4	0.4
3	0.17	0.34	0.69	0.4	0.4
4	0.82	0.65	0.33	0.6	0.6

ตารางที่ 3 สภาวะการทดลอง

สภาวะ	ค่า
พื้นที่กัมมันต์	5
อุณหภูมิเซลล์	80
อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน	80
อัตราการไหลของก๊าซด้านแคโทด	2.0
อัตราการไหลของก๊าซด้านแอโนด	1.5
แผ่นทางไหล	ช่องทางไหลแบบเลื้อยซด

4.2 ศึกษากลไกการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจากการวัดปริมาณน้ำ

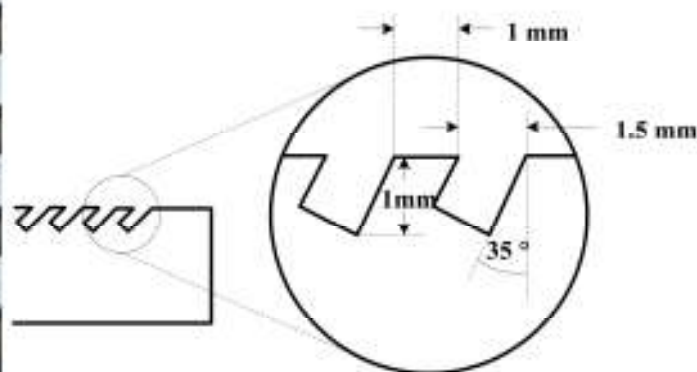
การศึกษากลไกการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการประยุกต์ใช้แผ่นทางไหลที่มีลักษณะช่องทางไหลเอียง ทำโดยการวัดปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นจากขาออกของเซลล์เชื้อเพลิงทั้งด้านแคโทดและแอโนด ทำการเปรียบเทียบกับสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง โดยสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงดูจากเส้นโค้งโพลาริเซชัน การศึกษานี้ทำการเดินเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 150 ตารางเซนติเมตร จำนวน 1 เซลล์ ใช้แผ่นทางไหลแบบเลื้อยซดขนาน (Parallel serpentine flow channel) ที่มีขนาดช่องทางไหลกว้าง 86.5 มิลลิเมตร ยาว 173.4 มิลลิเมตร มีช่องทางไหล 5 ช่องหลัก ในแต่ละช่องหลักแบ่งเป็น 7 ช่องย่อย ดังแสดงในภาพที่ 20(ก) ลักษณะของแผ่นทางไหลที่ประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเอียงจากแนวตั้งฉาก ดังแสดงในภาพที่ 20(ข) หน้าตัดขวางของช่องทางไหลมีความกว้าง 1.5 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร โดยมีมุมเอียง 35° ดังแสดงในภาพที่ 20(ค)



(ก)



(ข)

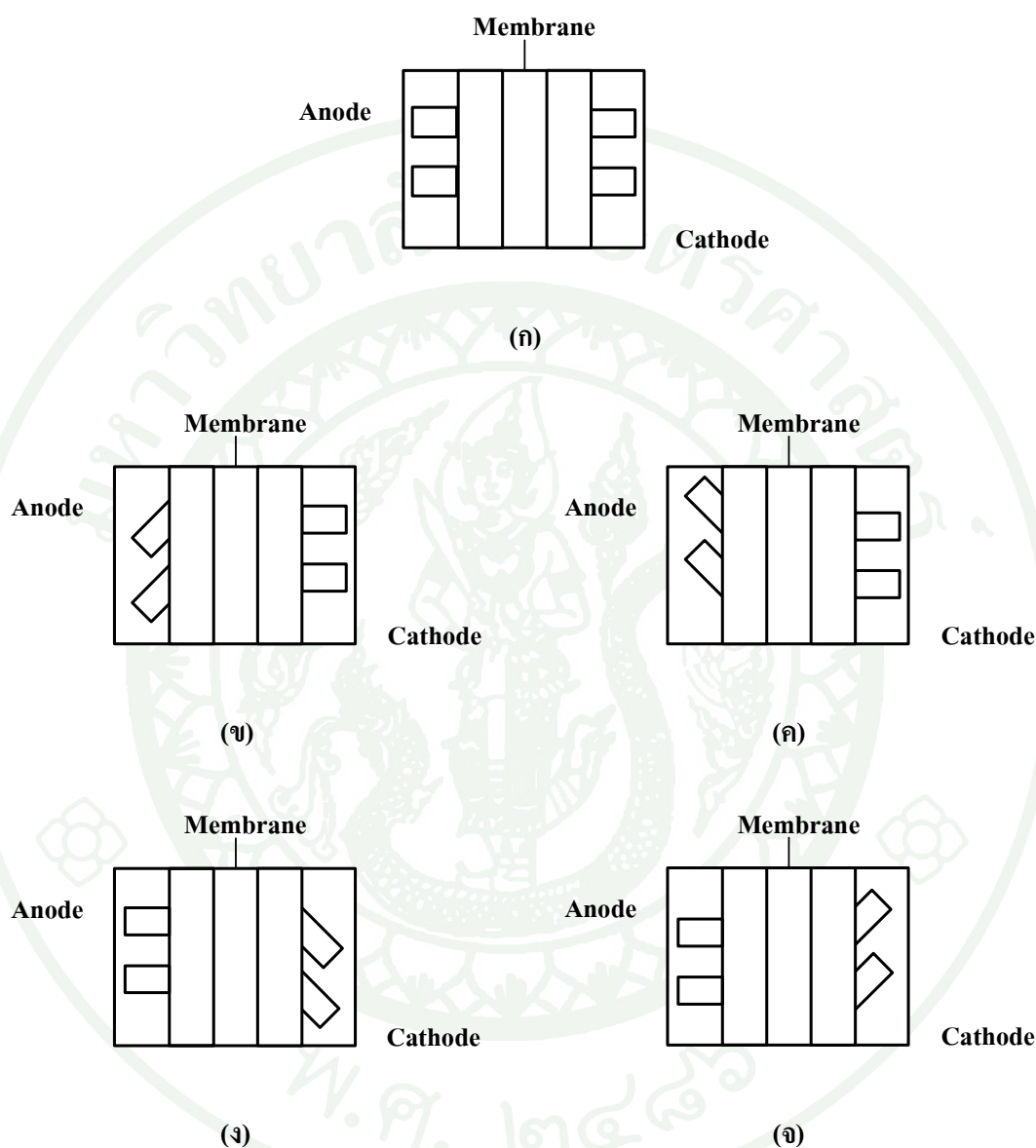


(ค)

ภาพที่ 20 (ก) แผ่นทางไหลแบบเลื่อยขดขนาน (ข) ลักษณะช่องทางไหลเอียง (ค) ภาพหน้าตัดของช่องทางไหลที่มีช่องทางไหลเอียง

รูปแบบแผ่นทางไหลทั้งหมดที่ใช้มีลักษณะช่องทางไหลที่แตกต่างกัน 5 กรณี กรณีแรกจะเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติทั้งคู่ คือ มีช่องทางไหลเหลี่ยมตรงทั้งด้านแคโทดและแอโนด (Rectangular channel cell, RP) ดังแสดงในภาพที่ 21(ก) กรณีที่ 2 ด้านแอโนดเป็นช่องทางไหลเอียงลง ด้านแคโทดเป็นช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (Anode down-slanted channel, ADS) ดังแสดงในภาพที่ 21(ข) กรณีที่ 3 ด้านแอโนดเป็นช่องทางไหลเอียงขึ้น ด้านแคโทดเป็นช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (Anode up-slanted channel, AUS) (ดูภาพที่ 21(ค)) กรณีที่ 4 ด้านแอโนดเป็นช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ ส่วนด้านแคโทดเป็นช่องทางไหลเอียงลง (Cathode down-slanted channel,

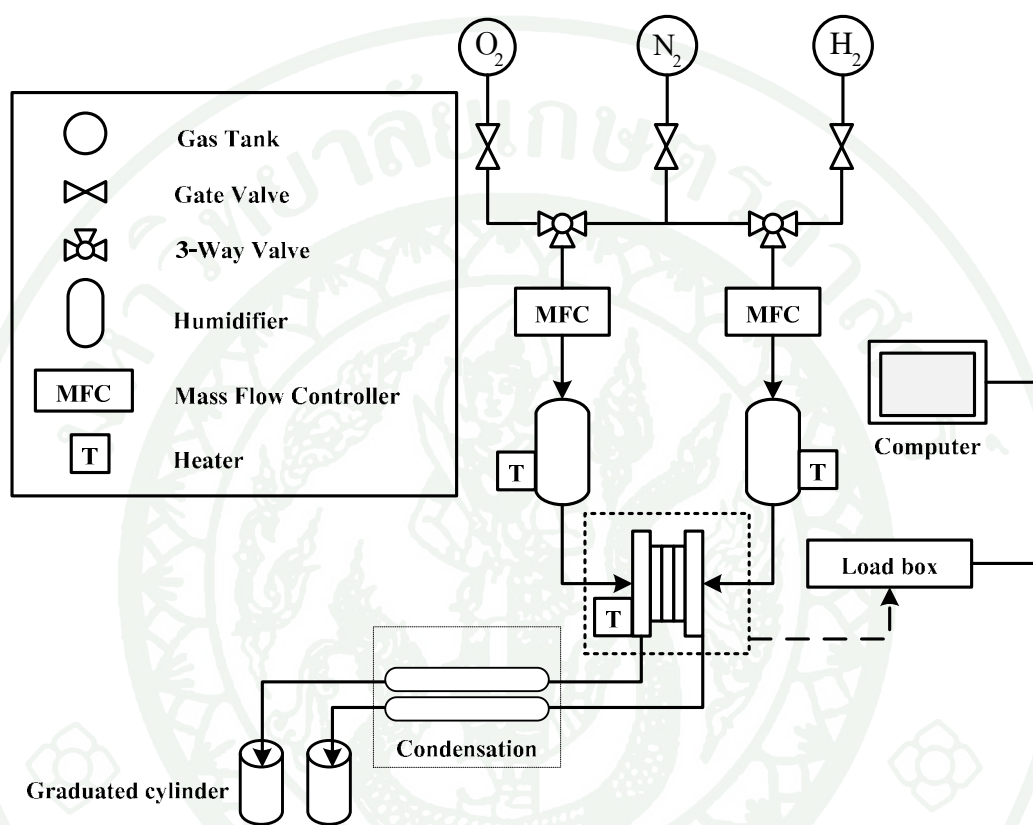
CDS) ดังแสดงในภาพที่ 21(ง) และกรณีสุดท้าย ด้านแอโนดเป็นช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ ด้านแคโทดเป็นช่องทางไหลเอียงขึ้น (Cathode up-slanted channel, CUS) (ภาพที่ 21(จ))



ภาพที่ 21 รูปแบบช่องทางไหล (ก) ช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP) (ข) ช่องทางไหลเอียงลงแอโนด (ADS) (ค) ช่องทางไหลเอียงขึ้นแอโนด (AUS) (ง) ช่องทางไหลเอียงลงแคโทด (CDS) (จ) ช่องทางไหลเอียงขึ้นแคโทด (CUS)

ทำการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงโดยป้อนก๊าซไฮโดรเจนเข้าทางด้านแอโนดและอากาศเข้าทางด้านแคโทดด้วยอัตราการไหลที่กำหนด จากนั้นปรับอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงและอุปกรณ์ให้

ความชื้น (Humidifiers) ตามที่ต้องการ ทำการเดินระบบภายใต้ความดันบรรยากาศ ในการวัดปริมาณน้ำของเซลล์เชื้อเพลิง วัดจากขาออกของเซลล์เชื้อเพลิงทั้งด้านแคโทดและแอโนด โดยปลายขาออกของเซลล์เชื้อเพลิงต่อเข้ากับกระบอกตวง ดังแสดงในภาพที่ 22 บันทึกปริมาณน้ำโดยจับเวลาเวลาทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 100 นาที



ภาพที่ 22 การวัดปริมาณน้ำจากเซลล์เชื้อเพลิง

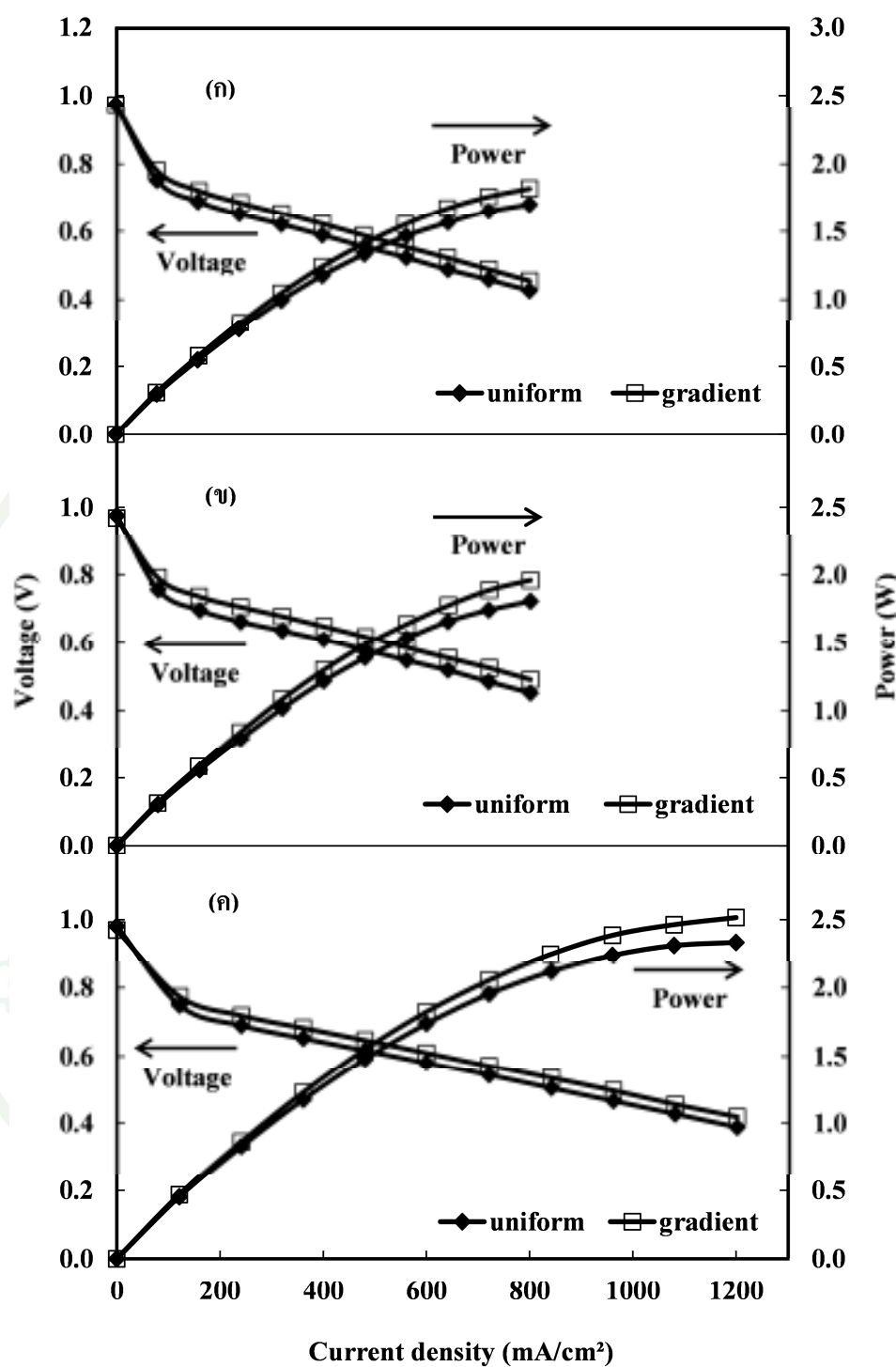
ผลและวิจารณ์

ในงานวิจัยนี้ได้แสดงผลการปรับปรุงสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นผลของการปรับปรุงสมรรถนะโดยใช้รูปแบบการกระจายตัวของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิง โดยออกแบบลักษณะการเคลือบปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแบบไล่ระดับเทียบกับการเคลือบแบบสม่ำเสมอ และส่วนที่สองเป็นผลของการปรับปรุงสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนโดยการปรับปรุงแผ่นทางไหล โดยออกแบบแผ่นทางไหลที่มีช่องทางไหลเอียงเทียบกับแผ่นทางไหลที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ

1. ผลการปรับปรุงสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจากการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกระจายตัวแบบไล่ระดับ (Gradient loading)

โดยปกติความเข้มข้นของสารทำปฏิกิริยาจะลดลงตามความยาวช่องทางไหล เนื่องจากการใช้ไปในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นปริมาณแพลทินัมที่ใช้ควรลดลงด้วย ปริมาณแพลทินัมที่ใช้ควรมีปริมาณมากที่บริเวณทางเข้าและน้อยลงที่บริเวณทางออก ภายใต้นโยบายนี้จึงออกแบบการเคลือบแพลทินัมแบบไล่ระดับเพื่อทดสอบผลของรูปแบบการกระจายตัวต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับเปรียบเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอที่ปริมาณแพลทินัมเฉลี่ยเท่ากัน ความแตกต่างระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับกับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอมีอย่างเดียวยคือรูปแบบการเคลือบของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแคโทดมีการกระจายตัวไล่ระดับ ส่วนด้านแอโนดเคลือบแบบสม่ำเสมอทั้งพื้นที่ในทุกการทดลอง ในการศึกษาผลของรูปแบบการกระจายตัวของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา สมรรถนะของเซลล์จากเส้นโค้งโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิง โดยเปรียบเทียบผลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากันคือ 0.6 โวลต์

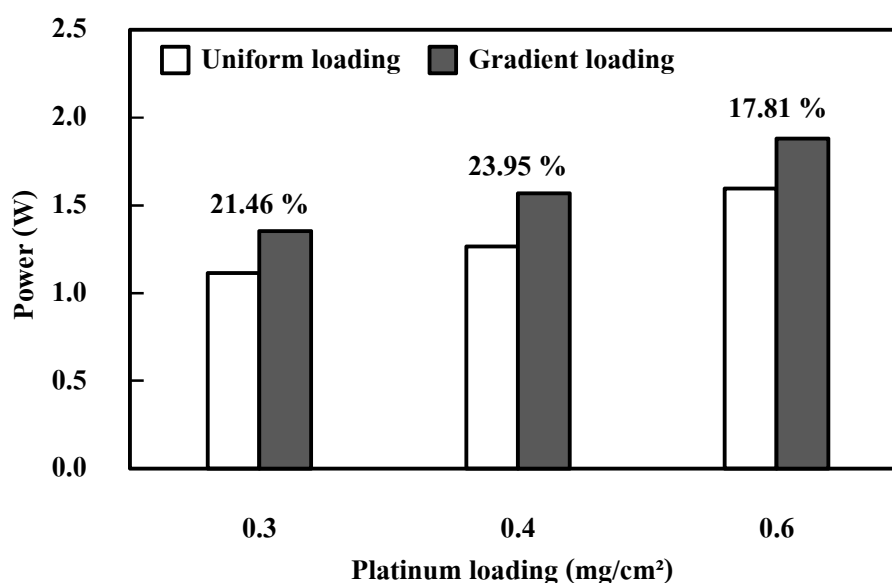
1.1 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอกับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับที่มีปริมาณแพลทินัมจากมากไปน้อย (Descending gradient loading) (รูปแบบที่ 1 ที่มีปริมาณแพลทินัม 0.3 mg/cm^2 , รูปแบบที่ 2 ที่มีปริมาณแพลทินัม 0.4 mg/cm^2 , และรูปแบบที่ 4 ที่มีปริมาณแพลทินัม 0.6 mg/cm^2)



ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบเส้นโคงโพลาริเซชันและกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับจากมากไปน้อยกับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอที่ปริมาณแพลทินัมเฉลี่ย (ก) 0.3 (ข) 0.4 (ค) 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

การเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอกับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับ ดำเนินการโดยมีปริมาณแพลทินัมเฉลี่ยด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับเท่ากับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอ ซึ่งการทำการบรรจุแพลทินัมในปริมาณ 3 ค่าดังแสดงในรูปแบบที่ 1, 2, และ 4 โดยบรรจุปริมาณแพลทินัมด้านแคโทดที่ทางออกจะน้อยกว่าที่ทางเข้าตามการลดลงของสารทำปฏิกิริยา ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะแสดงได้ด้วยเส้นโค้งโพลาริเซชันตามภาพที่ 23

ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับกับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอ ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเฉลี่ยเท่ากัน คือ 0.3, 0.4 และ 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบว่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอในทุกการทดลอง ค่าผลของกำลังไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์แสดงดังภาพที่ 24 ค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับที่ปริมาณแพลทินัมเฉลี่ย 0.3, 0.4 และ 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอ 21.46, 23.95 และ 17.81 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



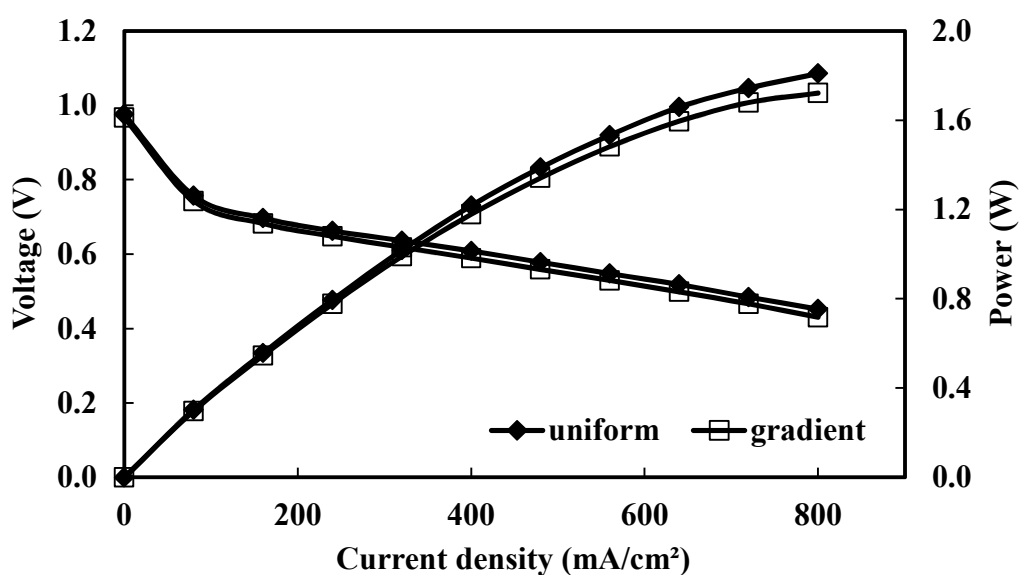
ภาพที่ 24 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับจากมากไปน้อยกับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอที่ปริมาณแพลทินัมเฉลี่ย 0.3, 0.4 และ 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ภาพที่ 24 แสดงการเพิ่มขึ้นของสมรรถนะในเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับที่มีปริมาณแพลทินัมจากมากไปน้อย สามารถอธิบายได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับช่วยเพิ่มพื้นที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของอิเล็กโทรดเนื่องจากมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากกว่าในช่วงขาเข้า การเพิ่มปริมาณแพลทินัมเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวกัมมันต์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง โดยที่บริเวณขาออกของเซลล์เชื้อเพลิงต้องการปริมาณแพลทินัมน้อย เนื่องจากความเข้มข้นของสารทำปฏิกิริยาน้อยลง ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับที่มีปริมาณแพลทินัมน้อยที่บริเวณขาออกจะสามารถให้สมรรถนะที่เท่ากับการเคลือบแบบสม่ำเสมอในขณะที่การใช้ปริมาณแพลทินัมโดยรวมน้อยลง

1.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอกับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับที่มีปริมาณแพลทินัมจากน้อยไปมาก (รูปแบบที่ 3)

โดยทั่วไปอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะค่อยๆ ลดลงจากบริเวณก๊าซขาเข้าไปยังบริเวณก๊าซขาออกเนื่องจากก๊าซที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาลดลง ดังนั้นเพื่อทดแทนอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ลดลงเนื่องจากความเข้มข้น จึงเพิ่มอัตราโดยการเพิ่มปริมาณตัวเร่งทดแทน ดังนั้นจึงทำการเคลือบปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณมากในบริเวณทางเข้าซึ่งมีความเข้มข้นสารมากและลดลงมาในบริเวณทางออกซึ่งมีความเข้มข้นสารน้อย

เพื่อยืนยันแนวคิดนี้ ได้ทำการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบในลักษณะตรงกันข้าม โดยให้ปริมาณแพลทินัมน้อยในบริเวณทางเข้าและเพิ่มขึ้นในบริเวณทางออก ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 25 ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 369.66 และ 422.51 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับที่มีปริมาณแพลทินัมจากน้อยไปมากและเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลของค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับที่มีปริมาณแพลทินัมจากน้อยไปมาก มีค่าต่ำกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอ 12.33 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับที่มีปริมาณแพลทินัมมากในบริเวณทางออกไม่สามารถเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงได้

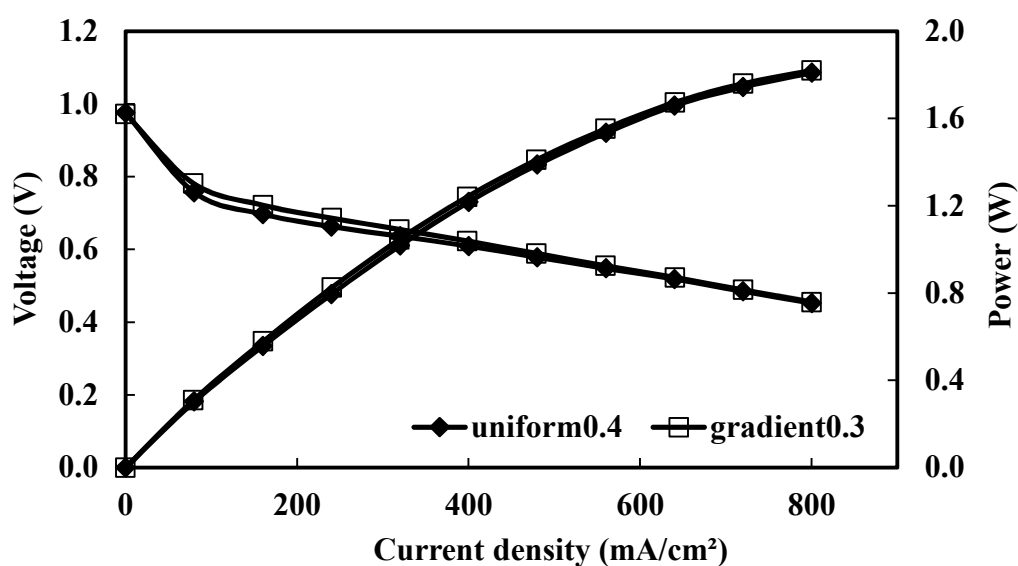


ภาพที่ 25 การเปรียบเทียบเส้นโค้งโวลตาไรเซชันและกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลื่อนแบบไล่ระดับจากน้อยไปมาก (รูปแบบที่ 3) กับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลื่อนแบบสม่ำเสมอที่ปริมาณแพลทินัมเฉลี่ย 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

1.3 ผลของการประหยัควัสดุเร่งปฏิกิริยา

ในการศึกษานี้เปรียบเทียบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการลดปริมาณแพลทินัมจาก 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลื่อนแบบสม่ำเสมอ เป็น 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยเฉลี่ย ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบไล่ระดับจากมากไปน้อย

ผลการเปรียบเทียบเส้นโค้งโวลตาไรเซชันและกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลื่อนแบบไล่ระดับจากมากไปน้อย (รูปแบบที่ 1, ปริมาณแพลทินัมเฉลี่ย 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร) กับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลื่อนแบบสม่ำเสมอ (ปริมาณแพลทินัม 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร) แสดงดังภาพที่ 26 จะเห็นว่า สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลื่อนแบบไล่ระดับจากมากไปน้อยดีกว่าแบบสม่ำเสมอชัดเจนแม้จะใช้แพลทินัมน้อยกว่าในช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงและค่อนข้างลดลงในช่วงปริมาณแพลทินัมต่ำกว่าแต่ยังให้สมรรถนะดีเช่นกัน



ภาพที่ 26 การเปรียบเทียบเส้นโค้งโพลาริเซชันและกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับจากมากไปน้อย (รูปแบบที่ 1, ปริมาณแพลทินัมเฉลี่ย 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร) กับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอที่ปริมาณแพลทินัม 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

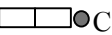
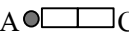
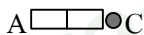
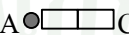
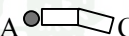
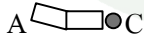
ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับจากมากไปน้อยและเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอ มีค่า 452 และ 423 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลของค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับจากมากไปน้อยที่มีปริมาณแพลทินัมเฉลี่ย 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอที่มีปริมาณแพลทินัม 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร 12.33 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่า ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับมีประสิทธิภาพมากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอแม้จะใช้แพลทินัมน้อยกว่า ซึ่งกรณีนี้สามารถประหยัดปริมาณแพลทินัมได้มากกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ จากการใช้เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับที่ปริมาณแพลทินัมเฉลี่ย 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร แทนเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอที่ปริมาณแพลทินัม 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยที่สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่เคลือบด้วยทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับช่วยเพิ่มพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของอิเล็กโทรด เนื่องจากปริมาณแพลทินัมที่ทางเข้ามีมากกว่า สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจึงดีกว่า ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เทคนิคการเคลือบแบบไล่ระดับจากมากไปน้อยช่วยเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงและสามารถประหยัดปริมาณแพลทินัมได้

2. ผลการปรับปรุงสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นทางไหลช่องเอียง

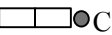
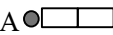
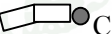
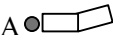
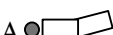
งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาพฤติกรรมการเกิดน้ำและสมรรถนะในเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลชนิดต่างๆ โดยใช้แผ่นทางไหลที่มีรูปแบบช่องทางไหลที่แตกต่างกันในการจัดการน้ำ โดยทำการเปรียบเทียบปริมาณน้ำและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีรูปแบบช่องทางไหลแบบต่างๆ ในการวัดปริมาณน้ำได้วัดน้ำขาออกทั้งด้านแอโนดและแคโทด พฤติกรรมการไหลของน้ำอธิบายได้ด้วยเรื่องความชื้น การท่วม และการแพร่กลับ (Back diffusion)

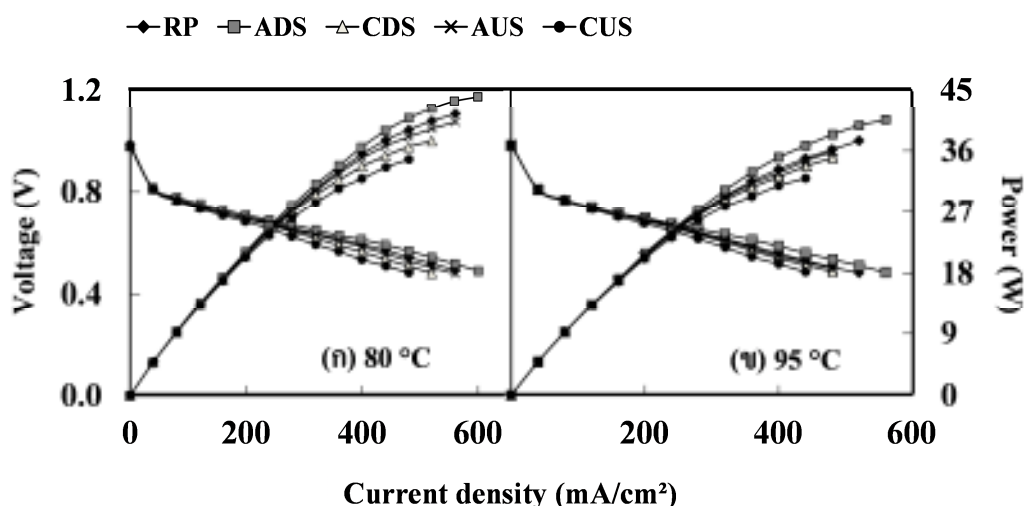
ในงานวิจัยนี้ศึกษาแผ่นทางไหลที่มีลักษณะช่องทางไหลแตกต่างกัน 5 แบบ คือ ช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (Rectangular channel plate, RP) ช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (Anode down-slanted channel, ADS) ช่องทางไหลเอียงลงด้านแคโทด (Cathode down-slanted channel, CDS) ช่องทางไหลเอียงขึ้นด้านแอโนด (Anode up slanted channel, AUS) และช่องทางไหลเอียงขึ้นด้านแคโทด (Cathode up-slanted channel, CUS) อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน (T_H) ที่ศึกษามี 2 ค่า คือ 80 และ 95 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเซลล์คงที่เป็น 80 องศาเซลเซียส ผลสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงและปริมาณน้ำแสดงดังตารางที่ 4 และตารางที่ 5 เปรียบเทียบที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.5 และ 0.7 โวลต์ ตามลำดับ ผลเส้นโค้งโพลาไรเซชันของทุกการทดลองแสดงดังภาพที่ 27

ตารางที่ 4 ปริมาณน้ำและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ที่ความต่างศักย์ 0.5 โวลต์

รูปแบบ ช่องทางไหล	ปริมาณน้ำด้าน แคโทด (mL/min)	ปริมาณน้ำด้าน แอโนด (mL/min)	ปริมาณน้ำรวม (mL/min)	กระแสไฟฟ้า ที่ 0.5 โวลต์
กรณี 1 RP, T_H 80 °C	A  C	A  C	18.33 4.00 22.33	549
กรณี 2 RP, T_H 95 °C	A  C	A  C	21.67 11.56 33.33	484
กรณี 3 ADS, T_H 80 °C	A  C	A  C	18.22 4.44 22.66	584
กรณี 4 ADS, T_H 95 °C	A  C	A  C	21.33 12.44 33.77	523
กรณี 5 CDS, T_H 80 °C	A  C	A  C	18.44 3.56 22.00	492
กรณี 6 CDS, T_H 95 °C	A  C	A  C	21.89 10.89 32.78	457
กรณี 7 AUS, T_H 80 °C	A  C	A  C	18.56 3.67 22.23	525
กรณี 8 AUS, T_H 95 °C	A  C	A  C	22.00 11.06 33.06	476
กรณี 9 CUS, T_H 80 °C	A  C	A  C	17.67 4.11 21.78	453
กรณี 10 CUS, T_H 95 °C	A  C	A  C	19.78 11.67 31.45	419

ตารางที่ 5 ปริมาณน้ำและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ที่ความต่างศักย์ 0.7 โวลต์

รูปแบบ ช่องทางไหล	ปริมาณน้ำด้าน แคโทด (mL/min)	ปริมาณน้ำด้าน แอโนด (mL/min)	ปริมาณน้ำรวม (mL/min)	กระแสไฟฟ้า ที่ 0.7 โวลต์
กรณี 1 RP, T_H 80 °C	A  C 14.67	A  C 1.67	16.34	189
กรณี 2 RP, T_H 95 °C	A  C 18.22	A  C 8.67	26.89	177
กรณี 3 ADS, T_H 80 °C	A  C 14.22	A  C 2.22	16.44	204
กรณี 4 ADS, T_H 95 °C	A  C 17.67	A  C 9.44	27.11	182
กรณี 5 CDS, T_H 80 °C	A  C 15.11	A  C 1.11	16.22	180
กรณี 6 CDS, T_H 95 °C	A  C 18.56	A  C 7.89	26.45	170
กรณี 7 AUS, T_H 80 °C	A  C 15.22	A  C 1.33	16.55	184
กรณี 8 AUS, T_H 95 °C	A  C 18.67	A  C 8.11	26.78	174
กรณี 9 CUS, T_H 80 °C	A  C 14.00	A  C 1.78	15.78	166
กรณี 10 CUS, T_H 95 °C	A  C 17.11	A  C 8.78	25.89	157

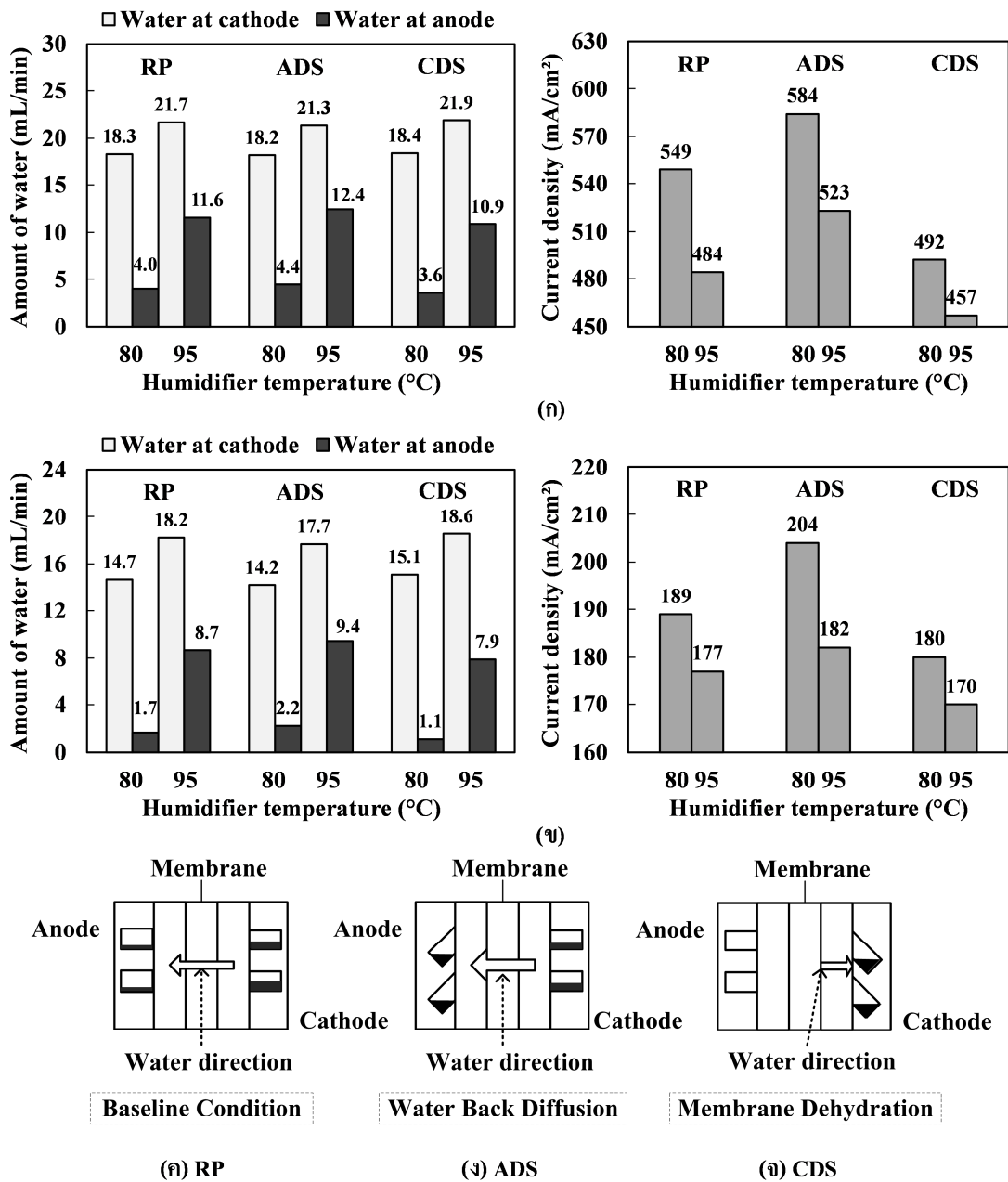


ภาพที่ 27 การเปรียบเทียบเส้นโค้งโวลตาไรซ์และกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลแบบต่างๆ ที่อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน (ก) 80 องศาเซลเซียส (ข) 95 องศาเซลเซียส

2.1 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะและปริมาณน้ำของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP) ช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS) และช่องทางไหลเอียงลงด้านแคโทด (CDS)

ภาพที่ 28 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณน้ำขาออกด้านแคโทดและแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP) ช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS) และช่องทางไหลเอียงลงด้านแคโทด (CDS) ที่อุณหภูมิเซลล์คงที่ ณ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน ที่ 80 และ 95 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบที่ค่าความต่างศักย์เดียวกันที่ 0.5 และ 0.7 โวลต์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง

จากผลการทดลองในตารางที่ 4,5 และภาพที่ 27 พบว่าปริมาณน้ำด้านแคโทดมีมากกว่าปริมาณน้ำด้านแอโนดที่สภาวะอุณหภูมิความชื้นทั้งสอง เนื่องจากน้ำด้านแคโทดเกิดจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าและความชื้นที่ป้อนเข้ามาจากอุปกรณ์ให้ความชื้น แต่น้ำด้านแอโนดเกิดจากความชื้นที่ป้อนเข้ามาจากอุปกรณ์ให้ความชื้นเพียงอย่างเดียว ปริมาณน้ำด้านแคโทดจึงมีมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำขาออกที่ค่าความต่างศักย์ต่างกัน พบว่าที่ค่าความต่างศักย์ 0.5 โวลต์ มีปริมาณน้ำมากกว่าที่ค่าความต่างศักย์ 0.7 โวลต์ เนื่องจากมีอัตราการเกิดปฏิกิริยามากกว่า ปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นจึงมีมากกว่า



ภาพที่ 28 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณน้ำของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ ช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด และช่องทางไหลเอียงลงด้านแคโทด ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (ก) 0.5 โวลต์ (ข) 0.7 โวลต์, ลักษณะช่องทางไหล (ค) ช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP), (ง) ช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS) และ (จ) ช่องทางไหลเอียงลงด้านแคโทด (CDS)

ในการศึกษาผลของช่องทางไหลเฉียงต่อสมรรถนะและการถ่ายโอนน้ำของเซลล์เชื้อเพลิง จะทำการศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเฉียงลงด้านแอโนด (ADS) และเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเฉียงลงด้านแคโทด (CDS) โดยทำการทดสอบและเปรียบเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP) ภาพที่ 28 แสดงผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงทั้งสามที่มีรูปแบบช่องทางไหลที่แตกต่างกัน ที่ค่าความต่างศักย์ 0.5 และ 0.7 โวลต์ ปริมาณน้ำด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเฉียงลงด้านแคโทด (CDS) มีมากที่สุดที่สภาวะอุณหภูมิความชื้นทั้งสอง เนื่องจากลักษณะช่องทางไหลเฉียงลงช่วยผลักดันให้น้ำตกอยู่ที่ด้านล่างของช่องทางไหล และน้ำด้านแอโนดไหลไปด้านแคโทดเนื่องจากเกรเดียนต์ของความเข้มข้นของความชื้น ดังภาพที่ 28(จ) เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง จะพบว่า เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเฉียงลงด้านแอโนด (ADS) มีสมรรถนะดีที่สุดที่สภาวะอุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP) น้อยกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเฉียงลงด้านแอโนด (ADS) แต่มากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเฉียงลงด้านแคโทด (CDS) ทั้งสองค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (ดูภาพที่ 28)

การเปรียบเทียบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเฉียงลงด้านแคโทด (CDS) กับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP) พบว่าปริมาณน้ำด้านแคโทดของเซลล์ที่มีช่องทางไหลเฉียงลงด้านแคโทด (CDS) มีมากกว่า ที่สภาวะอุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อนทั้งสอง เนื่องจากลักษณะช่องทางไหลเฉียงลงช่วยผลักดันน้ำออกจากชั้นแพร่ก๊าซด้านแคโทดและตกลงสู่ด้านล่างของช่องทางไหล ดังแสดงในภาพที่ 28(จ) ด้วยเหตุนี้ปริมาณน้ำขาออกด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเฉียงลงด้านแคโทด (CDS) จึงมีมากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP) น้ำที่ออกจากด้านแคโทดมากเกินไปทำให้เมมเบรนแห้ง เป็นผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเฉียงด้านแคโทด (CDS) น้อยกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเฉียงลงด้านแคโทด (CDS) และเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP) จะเห็นได้ว่าช่องทางไหลเฉียงลงด้านแคโทด (CDS) ไม่ช่วยทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงดีขึ้นเนื่องจากเมมเบรนแห้ง

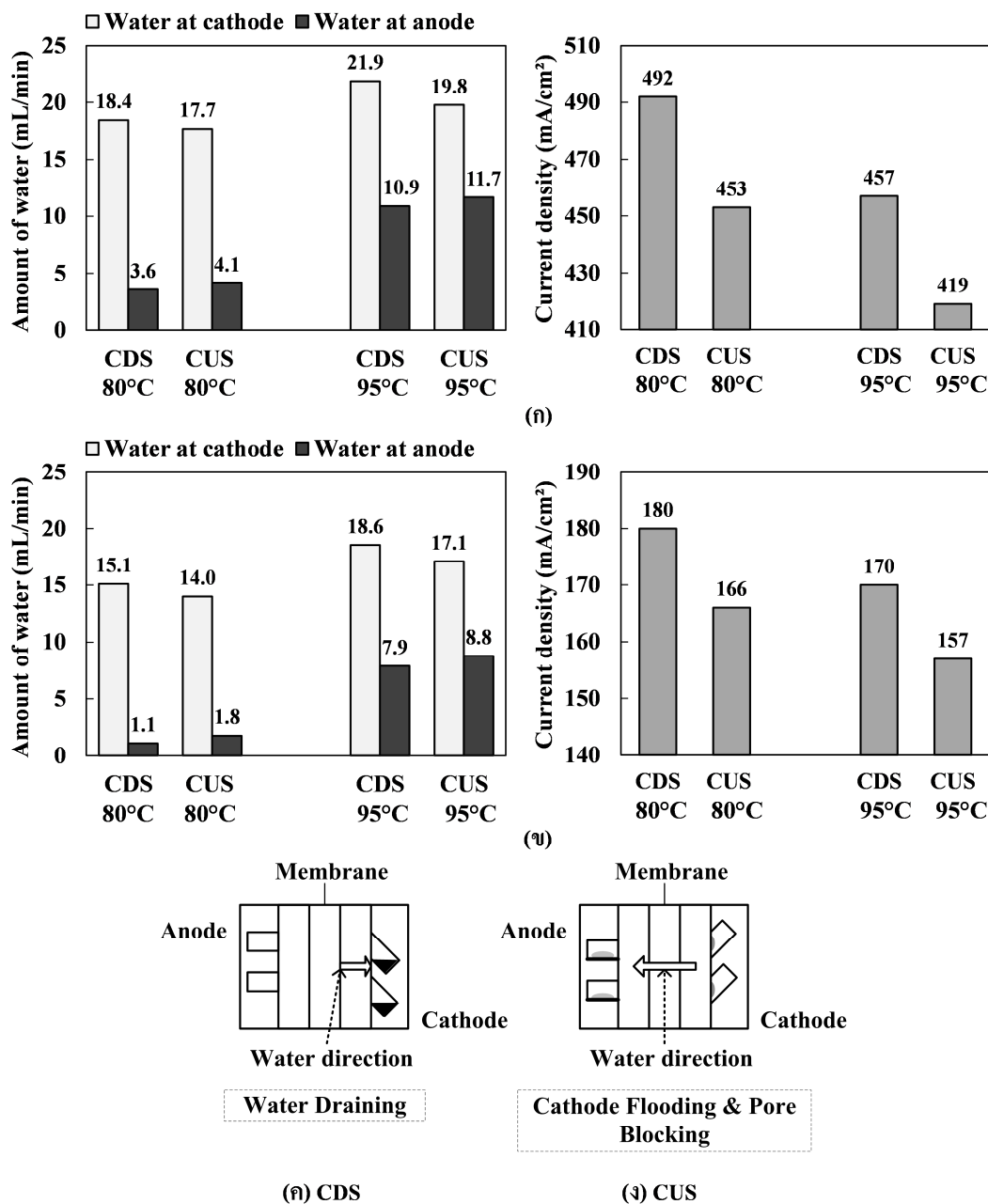
ผลการเปรียบเทียบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเฉียงลงด้านแอโนด (ADS) กับเซลล์ที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP) พบว่าปริมาณน้ำด้านแคโทดของเซลล์ที่มีช่องทางไหลเฉียงลงด้านแอโนด (ADS) น้อยกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP) เนื่องจากน้ำจากปฏิกิริยาด้านแคโทดไหลแพร่กลับ (Water back diffusion) ไปด้านแอโนดและตกอยู่ที่ด้านล่างของช่องทางไหลนั้น ดังแสดงในภาพที่ 28(ง) ด้วยเหตุนี้ปริมาณน้ำด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทาง

ไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS) จึงน้อยกว่าเซลล์ที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP) สามารถยืนยันผลดังกล่าวจากปริมาณน้ำด้านแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS) มีมากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP) ที่สภาวะอุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อนทั้งสอง (ดูภาพที่ 28) การแพร่กลับของน้ำจากด้านแคโทดไปด้านแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS) ช่วยเพิ่มความชื้นของเมมเบรน เป็นผลให้เมมเบรนนำโปรตอนได้ดีขึ้น สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS) จึงมากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP)

จากตารางที่ 4 และ 5 แสดงให้เห็นว่า สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 80 องศาเซลเซียส มีมากกว่าที่อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 95 องศาเซลเซียส ในช่องทางไหลทุกรูปแบบ เนื่องจากอุปกรณ์ให้ความชื้นที่มีอุณหภูมิสูงๆ จะมีความชื้นปริมาณมาก เมื่อเข้าไปในเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะทำให้เกิดการควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำ ทำให้มีปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นมากกว่าเซลล์ที่มีอุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อนต่ำกว่า ปริมาณน้ำที่เกิดจากการควบแน่นที่มากกว่าทำให้เกิดน้ำท่วม น้ำเข้าไปอุดตันในรูพรุนของชั้นแพร่ก๊าซ เกิดการกีดขวางการแพร่ของก๊าซเชื้อเพลิงที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการสูญเสียการถ่ายโอนมวล (Mass Transport Losses) เป็นผลให้ปฏิกิริยาลดลง ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจึงมีค่าน้อยกว่า

ที่สภาวะเปียกมาก (อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 95 องศาเซลเซียส) สามารถเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงได้โดยใช้แผ่นทางไหลที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS) แทนช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.5 โวลต์ สามารถเพิ่มจาก 484 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เป็น 523 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร (เปรียบเทียบกรณี 2 กับ กรณี 4 ในตารางที่ 4) จะเห็นว่าสมรรถนะที่สภาวะเปียกมากของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS) เข้าใกล้สมรรถนะที่สภาวะปกติของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP) ซึ่งมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 459 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ผลที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์ ให้ผลเช่นเดียวกัน (ดูในตารางที่ 5)

2.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะและปริมาณน้ำของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลง
ด้านแคโทด (CDS) และเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงขึ้นด้านแคโทด (CUS)



ภาพที่ 29 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณน้ำของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียง
ลงด้านแคโทดและเอียงขึ้นด้านแคโทด ที่ค่าความต่างศักย์ (ก) 0.5 โวลต์ (ข) 0.7 โวลต์,
ลักษณะช่องทางไหล (ค) ช่องทางไหลเอียงลงด้านแคโทด (CDS) และ (ง) ช่องทางไหล
เอียงขึ้นด้านแคโทด (CUS)

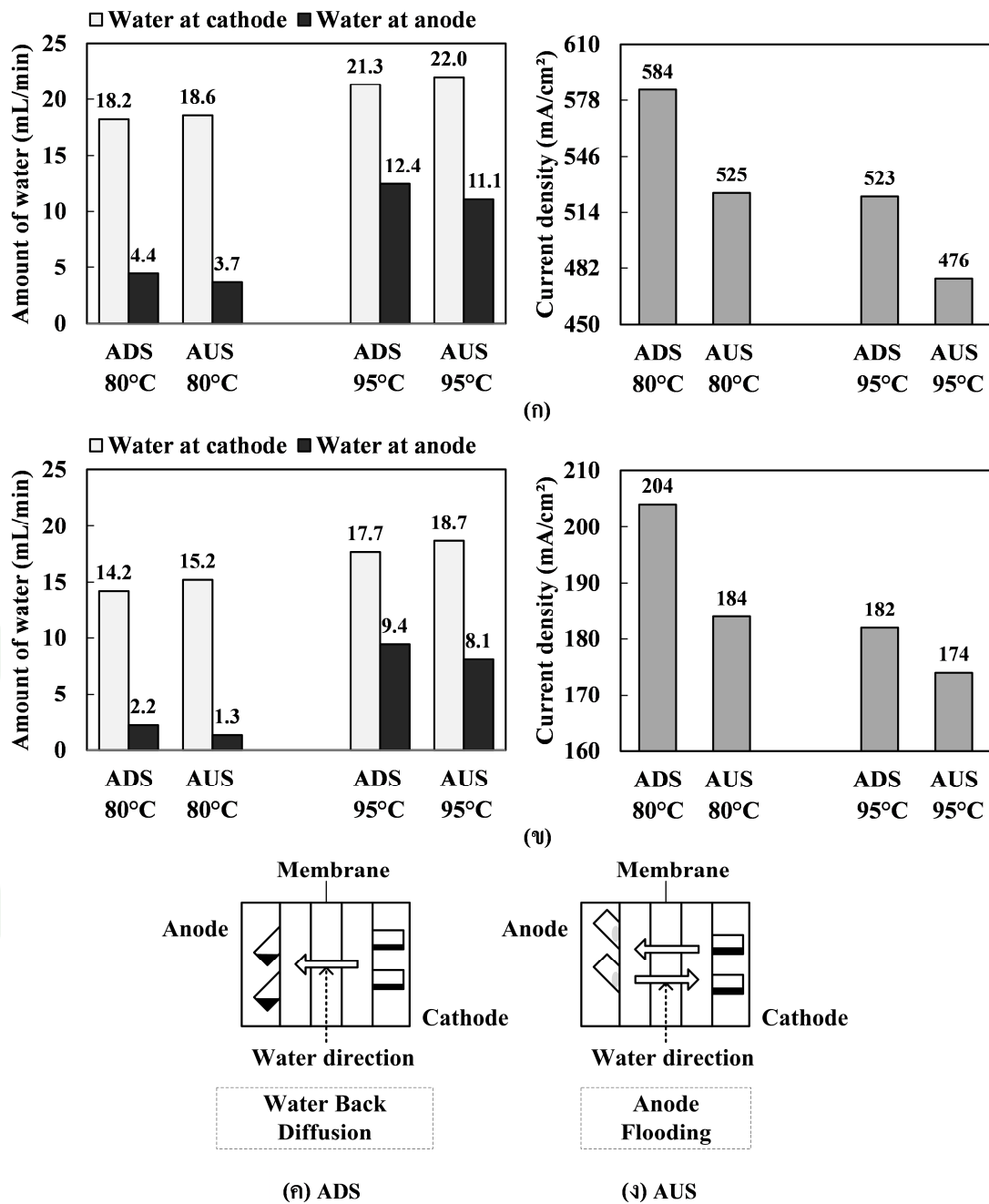
จากภาพที่ 29 (ก, ข) จะเห็นว่า ปริมาณน้ำด้านแคโทดของเซลล์ที่มีช่องทางไหลเอียงลง ด้านแคโทด (CDS) มีมากกว่าเซลล์ที่มีช่องทางไหลเอียงขึ้นด้านแคโทด (CUS) ที่สภาวะอุณหภูมิ ความชื้นทั้งสอง เนื่องจากลักษณะช่องทางไหลเอียงลงช่วยผลักดันให้น้ำตกอยู่ที่ด้านล่างของ ช่องทางไหล และน้ำด้านแอโนดไหลไปด้านแคโทดเนื่องจากเกรเดียนต์ของความชื้น (แรงขับเคลื่อน) ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงขึ้นด้านแคโทดทำให้น้ำไหลกลับเข้าสู่ชั้น แพร่ก๊าซ ด้วยเหตุนี้ปริมาณน้ำด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงขึ้นด้านแคโทด (CUS) จึงน้อยกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแคโทด (CDS)

การใช้แผ่นทางไหลที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแคโทด (CDS) ทำให้ปริมาณน้ำไหล ออกจากชั้นแพร่ก๊าซ ดังแสดงในภาพที่ 29(ค) ช่วยหลีกเลี่ยงการเกิดน้ำที่มากเกินไปจากปฏิกิริยา และระดับความชื้นก๊าซป้อนที่สูงจากการทดลองได้ และป้องกันมิให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ต่ำลงเนื่องจากปริมาณน้ำจากความชื้นก๊าซป้อนที่สูงมากเกินไป เป็นการช่วยลดผลกระทบการเกิด น้ำท่วมภายในรูพรุนของชั้นแพร่ก๊าซ ที่ทำให้เกิดการกีดขวางการถ่ายโอนมวลสารของก๊าซเข้าไปทำ ปฏิกิริยาที่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้น

จากรูปที่ 29(ง) จะเห็นว่าลักษณะของช่องทางไหลเอียงขึ้นด้านแคโทด (CUS) ส่งผลให้ เกิดน้ำท่วมเซลล์ในชั้นแพร่ก๊าซด้านแคโทด เพราะน้ำที่เกิดขึ้นด้านแคโทดไหลออกได้ไม่ดี และมี ทิศทางการไหลเข้าสู่ชั้นแพร่ก๊าซ ทำให้เกิดการอุดตันภายในรูพรุนของชั้นแพร่ก๊าซ เกิดการกีดขวาง การไหลของก๊าซเชื้อเพลิงที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยา ทำให้การถ่ายโอนมวลสารน้อยลง สมรรถนะของ เซลล์เชื้อเพลิงจึงน้อยกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแคโทด (CDS)

2.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะและปริมาณน้ำของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลง ด้านแอโนด (ADS) และช่องทางไหลเอียงขึ้นด้านแอโนด (AUS)

ผลการเปรียบเทียบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS) และเซลล์ เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงขึ้นด้านแอโนด (AUS) พบว่าปริมาณน้ำด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิง ที่มีช่องทางไหลเอียงขึ้นด้านแอโนด (AUS) มีมากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้าน แอโนด (ADS) ทั้งสองระดับอุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน ดังแสดงในภาพที่ 30(ก, ข) ลักษณะ ช่องทางไหลเอียงขึ้นด้านแอโนด (AUS) ป้องกันน้ำจากด้านแคโทดไม่ให้ไหลไปยังด้านแอโนด ในขณะที่ช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS) ทำให้เกิดน้ำแพร่กลับจากด้านแคโทดไป



ภาพที่ 30 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณน้ำของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนดและเอียงขึ้นด้านแอโนด ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (ก) 0.5 โวลต์ (ข) 0.7 โวลต์, ลักษณะช่องทางไหล (ค) ช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS) และ (ง) ช่องทางไหลเอียงขึ้นด้านแอโนด (AUS)

ด้านแอโนดเนื่องจากเกรเดียนต์ความชื้น ซึ่งสามารถยืนยันผลนี้จากปริมาณน้ำด้านแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS) ที่มีมากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียง

ขึ้นด้านแอโนด (AUS) สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS) มีมากกว่าในเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงขึ้นด้านแอโนด (AUS) ที่อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อนทั้งสอง เนื่องจากลักษณะของช่องทางไหลเอียงลง (ADS) ช่วยจัดการน้ำส่วนเกิน ด้วยเหตุนี้เซลล์เชื้อเพลิงยังทำงานได้ดีภายใต้สภาวะความชื้นก๊าซป้อนสูง ในขณะที่ลักษณะของช่องทางไหลเอียงขึ้นด้านแอโนด (AUS) ทำให้เกิดน้ำท่วมภายใต้สภาวะความชื้น จะเห็นว่า ปัญหาน้ำท่วมเซลล์ที่สภาวะอุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อนสูง สามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้แผ่นทางไหลที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS)

ลักษณะของช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS) จะทำให้น้ำไหลไปทางด้านแอโนด ดังแสดงในภาพที่ 30(ค) และทำให้ความชื้นของเมมเบรนสูงขึ้น การใช้แผ่นทางไหลที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS) นี้จะช่วยแก้ปัญหาการเกิดน้ำท่วมเซลล์ด้านแคโทดได้ โดยน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาด้านแคโทดจะไหลแพร่กลับไปยังด้านแอโนดเนื่องจากเกรเดียนต์ความชื้น การแพร่กลับของน้ำจะช่วยป้องกันเมมเบรนแห้ง ทำให้การนำโปรตอนของเมมเบรนดีขึ้น

ลักษณะของช่องทางไหลเอียงขึ้นด้านแอโนด (AUS) จะทำให้น้ำจากด้านแอโนดไหลไปด้านแคโทด ดังแสดงในภาพที่ 30(ง) ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดน้ำท่วมทั้งสองด้านของเซลล์ โดยที่ด้านแคโทดจะเกิดน้ำท่วมเซลล์มากกว่าด้านแอโนด เนื่องจากน้ำจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดที่ด้านแคโทด ดังนั้นสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงขึ้นด้านแอโนด (AUS) จึงน้อยกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS) เนื่องจากเกิดน้ำท่วมเซลล์

ปริมาณน้ำด้านแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS) มีมากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงขึ้นด้านแอโนด (AUS) (ดูภาพที่ 30) ผลยืนยันได้ว่าช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS) ทำให้เกิดการแพร่กลับของน้ำไปด้านแอโนดจริง ซึ่งการแพร่กลับนี้ช่วยเพิ่มความชื้นของเมมเบรนและทำให้เมมเบรนนำโปรตอนได้ดีขึ้น ส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนด (ADS) มีสมรรถนะดีกว่า

สรุป

การศึกษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการออกแบบการเคลือบแบบไล่ระดับเพื่อลดปริมาณการใช้แพลทินัม โดยที่รักษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงไม่ให้ลดลง เปรียบเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ ที่ปริมาณแพลทินัมเฉลี่ยเท่ากัน พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับที่มีปริมาณแพลทินัมจากมากไปน้อยสามารถเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงและประหยัดปริมาณแพลทินัมได้ แต่เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับที่มีปริมาณแพลทินัมจากน้อยไปมากไม่สามารถเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

การวัดปริมาณน้ำและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการปรับปรุงช่องทางไหล พบว่าปริมาณน้ำขาออกด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนดน้อยกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ เพราะช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนดทำให้น้ำด้านแคโทดไหลแพร่กลับไปด้านแอโนดเนื่องจากเกรเดียนต์ความชื้น ทำให้เมมเบรนมีความชื้นและน้ำโปรตอนได้ดีขึ้น สมรรถนะจึงดีกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ ที่อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 95 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเซลล์ 80 องศาเซลเซียส สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงเพราะที่อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อนสูงกว่าเกิดการควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำ ส่งผลให้เกิดการอุดตันของชั้นแพร่ก๊าซ ที่สภาวะนี้สามารถเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงได้โดยการประยุกต์ใช้แผ่นทางไหลที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนดแทนแผ่นทางไหลที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจากการปรับปรุงใช้ช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนดที่สภาวะเปียกมากสามารถเพิ่มขึ้นและใกล้เคียงกับการใช้ช่องทางไหลเหลี่ยมปกติที่สภาวะความชื้นปกติ ผลการวัดน้ำแสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนดที่อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 95 องศาเซลเซียส ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์ที่ไม่มีการประยุกต์ช่องทางไหล จะเห็นว่า ช่องทางไหลเอียงลงด้านแอโนดสามารถเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่สภาวะเปียกมากได้เมื่อเทียบกับช่องทางไหลเหลี่ยมปกติที่สภาวะความชื้นปกติ อย่างไรก็ตาม ช่องทางไหลเอียงลงด้านแคโทด ทำให้น้ำออกจากเซลล์เชื้อเพลิงมากเกินไป ส่งผลให้เมมเบรนแห้ง และเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงขึ้นทั้งด้านแคโทดและแอโนดทำให้เกิดน้ำท่วม ส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงน้อยกว่า

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Barreras, F., A. Lozano, L. Valino, C. Marin and A. Pascau. 2005. Flow distribution in bipolar plate of proton exchange membrane fuel cell: experiments and numerical simulation studies. **Journal of Power Sources** 109: 477-482.
- Baschuck J.J. and X. Li. 2006. Modelling of polymer electrolyte membrane fuel cells with variable degrees of water flooding. **Journal of Power Sources** 86: 181-196.
- Bunmark N, S. Limtrakul, M.W. Fowler, T. Vatanatham and J. Gostick. 2010. Assisted water management in a PEMFC with a modified flow field and its effect on performance. **Journal of Hydrogen Energy** 35: 6887-6896.
- Gasteiger H.A., J.E. Panels and S.G. Yan. 2004. Dependence of PEM fuel cell performance on catalyst loading. **Journal of Power Sources** 127: 162-171.
- Guvelioglu G.H. and H.G. Stenger. 2007. Flow rate and humidification effects on a PEM fuel cell performance and operation. **Journal of Power Sources** 163: 882-891.
- Hental P.L., J.B. Lakeman, G.O. Mepsted, P.L. Adcock and J.M. Moore. 1999. New materials for polymer electrolyte membrane fuel cell current collectors. **Journal of Power Sources** 80: 235-241.
- Hsu C.H. and C.C. Wan. 2003. An innovative process for PEMFC electrodes using the expansion of Nafion film. **Journal of Power Sources** 115: 268-273.
- Hu M., S. Sui, X. Zhu, Q.Yu, G. Cao, X. Hong and H. Tu. 2006. A 10 kW class PEM fuel cell stack based on the catalyst-coated membrane (CCM) method. **Journal of Power Sources** 31: 1010-1018.

- Karnix, A.Y., A.G. Stefanopoulou and J. Sun. 2007. Water equilibria and management using a two-volume model of a polymer electrolyte fuel cell. **Journal of Power Sources** 164: 590-605.
- Karimi, G. and X. Li. 2005. Electroosmotic flow through polymer electrolyte membranes in PEM fuel cells. **Journal of Power Sources** 140: 1-11.
- Kim C.S., Y.G. Chun, D.H. Peck and D.R. Shin. 1998. A novel process to fabricate membrane electrode assemblies for proton exchange membrane fuel cells. **Journal of Hydrogen Energy** 23: 1045-1048.
- Kumar, A. and R.G. Reddy. 2003. Effect of channel dimensions and shape in the flow-field distributor on the performance of polymer electrolyte membrane fuel cells. **Journal of Power Sources** 113: 11-18.
- Li, X. and I. Sabir. 2005. Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs. **International Journal of Hydrogen Energy** 30: 359-371.
- Li, X. and I. Sabir. 2007. A flow channel design procedure for PEM fuel cells with effective water removal. **Journal of Power Sources** 163: 933-942.
- Mehta V., J.S. Cooper. 2003. Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing. **Journal of Power Sources** 114: 32-53.
- Passos R.P., V.A. Paganin and E.A. Ticianelli. 2006. Studies of the performance of PEM fuel cell cathodes with the catalyst layer directly applied on Nafion membranes. **Electrochimica Acta** 51: 5239-5245.
- Prasana M., E.A. Cho, H.J. Kim, T.H. Lim, I.H. Oh and S.A. Hong. 2006. Effects of platinum loading on performance of proton-exchange membrane fuel cells using surface-modified Nafion membranes. **Journal of Power Sources** 160: 90-96.

- Quan, P., B. Zhou, A. Sobiesiak and Z. Liu. 2006. Water behavior in serpentine micro-channel for proton exchange membrane fuel cell cathode. **Journal of Power Sources** 152: 131-145.
- Roshandel, R. and B. Farhanieh. 2007. The effect of non-uniform distribution of catalyst loading on polymer electrolyte membrane fuel performance. **International Journal of Hydrogen Energy** 32: 4424-4437.
- Srinivasarao M., D. Bhattachayya, R. Rengaswamy and S. Narasimhan. 2010. Performance analysis of a PEM fuel cell cathode with multiple catalyst layers. **Journal of Hydrogen Energy** 35: 6356-6365.
- Uribe F.A. and T.A. Zawodzinski. 2002. A study of polymer electrolyte fuel cell performance at high voltages. Dependence on cathode catalyst layer composition and on voltage conditioning. **Electrochimica Acta** 47: 3799-3806.
- Voss, H.H., D.P. Wilkinson, P.G. Pickup, M.C. Johnson and V. Basura. 1995. Anode water removal; a water management and diagnostic technique for solid polymer fuel cells. **Electrochimica Acta**. 40(3): 321-328.
- Weng, F.B., A. SU., C.Y. Hsu and C.Y. Lee. 2006. Study of water-flooding behaviors in cathode channel of a transparent proton-exchange membrane fuel cell. **Journal of Power Sources**. 157: 674-680.
- Xiong L. and A. Manthiram. 2004. High performance membrane-electrode assemblies with ultra-low Pt loading for proton exchange membrane fuel cells. **Electrochim Acta** 50: 3200-3204.



ตารางผนวกที่ 1 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสว่านเสมอที่ปริมาณแพลทินัม 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)
0	0	0.97286	0	0.00000	0.97285	0	0	0.97287	0	0	0.97286
80	0.29960	0.75220	80	0.29960	0.75220	80	0.29960	0.75220	80	0.29960	0.75220
159	0.54751	0.69012	159	0.54750	0.69013	159	0.54749	0.69011	159	0.54750	0.69012
239	0.77797	0.65228	239	0.77797	0.65228	239	0.77797	0.65228	239	0.77797	0.65228
320	0.99252	0.62121	320	0.99251	0.62122	320	0.99252	0.62122	320	0.99252	0.62122
399	1.17476	0.58943	399	1.17476	0.58943	399	1.17476	0.58943	399	1.17476	0.58943
481	1.33361	0.55485	481	1.33361	0.55487	481	1.33362	0.55486	481	1.33361	0.55486
562	1.46805	0.52281	562	1.46805	0.52282	562	1.46805	0.52283	562	1.46805	0.52282
642	1.56573	0.48813	642	1.56572	0.48814	642	1.56573	0.48814	642	1.56573	0.48814
720	1.65146	0.45853	720	1.65146	0.45851	720	1.65147	0.45852	720	1.65147	0.45852
800	1.70443	0.42612	800	1.70444	0.42611	800	1.70446	0.42611	800	1.70444	0.42611

ตารางผนวกที่ 2 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสว่านสมอที่ปริมาณแพลทินัม 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)
0	0	0.97537	0	0	0.97539	0	0	0.97538	0	0	0.97538
80	0.30272	0.75682	80	0.30272	0.75682	80	0.30272	0.75682	80	0.30272	0.75682
160	0.55736	0.69671	160	0.55737	0.69672	160	0.55737	0.69672	160	0.55737	0.69672
240	0.79480	0.66235	240	0.79480	0.66233	240	0.79480	0.66234	240	0.79480	0.66234
320	1.01790	0.63624	320	1.01790	0.63623	320	1.01790	0.63624	320	1.01790	0.63624
400	1.21705	0.60852	400	1.21707	0.60853	400	1.21706	0.60853	400	1.21706	0.60853
480	1.38771	0.57822	480	1.38772	0.57823	480	1.38772	0.57821	480	1.38772	0.57822
560	1.53304	0.54752	560	1.53306	0.54753	560	1.53305	0.54751	560	1.53305	0.54752
640	1.65862	0.51831	640	1.65862	0.51832	640	1.65862	0.51832	640	1.65862	0.51832
720	1.74404	0.48446	720	1.74405	0.48446	720	1.74405	0.48446	720	1.74405	0.48446
800	1.80872	0.45218	800	1.80873	0.45218	800	1.80872	0.45217	800	1.80872	0.45218

ตารางผนวกที่ 3 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบสว่าเสมอที่ปริมาณแพลทินัม 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)
0	0	0.98058	0	0	0.98058	0	0	0.98058	0	0	0.98058
121	0.45299	0.74876	121	0.45299	0.74876	121	0.45299	0.74876	121	0.45299	0.74876
241	0.83070	0.68938	241	0.83070	0.68938	241	0.83070	0.68938	241	0.83070	0.68938
360	1.17391	0.65218	360	1.17392	0.65218	360	1.17392	0.65218	360	1.17392	0.65218
480	1.47902	0.61626	480	1.47902	0.61626	480	1.47902	0.61626	480	1.47902	0.61626
599	1.73776	0.58022	599	1.73776	0.58022	599	1.73776	0.58022	599	1.73776	0.58022
720	1.95451	0.54293	720	1.95451	0.54291	720	1.95451	0.54292	720	1.95451	0.54292
840	2.11817	0.50432	840	2.11818	0.50434	840	2.11818	0.50433	840	2.11818	0.50433
960	2.23813	0.46628	960	2.23814	0.46627	960	2.23814	0.46628	960	2.23814	0.46628
1080	2.31044	0.42785	1080	2.31043	0.42786	1080	2.31044	0.42786	1080	2.31044	0.42786
1200	2.33388	0.38897	1200	2.33388	0.38898	1200	2.33389	0.38898	1200	2.33388	0.38898

ตารางผนวกที่ 4 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเคลือบแบบไล่ระดับจากมากไปน้อยที่ปริมาณแพลทินัม 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)
0	0	0.97229	0	0	0.97229	0	0	0.97229	0	0	0.97229
79	0.30880	0.78128	79	0.30880	0.78128	79	0.30880	0.78128	79	0.30880	0.78128
160	0.57830	0.72112	160	0.57830	0.72112	160	0.57830	0.72112	160	0.57830	0.72112
241	0.82466	0.68568	241	0.82467	0.68568	241	0.82467	0.68568	241	0.82467	0.68568
319	1.04558	0.65482	319	1.04558	0.65482	319	1.04558	0.65482	319	1.04558	0.65482
398	1.24095	0.62289	398	1.24095	0.62289	398	1.24095	0.62289	398	1.24095	0.62289
479	1.41006	0.58842	479	1.41006	0.58842	479	1.41006	0.58842	479	1.41006	0.58842
560	1.55330	0.55486	560	1.55330	0.55486	560	1.55330	0.55486	560	1.55330	0.55486
641	1.67370	0.52245	641	1.67370	0.52245	641	1.67370	0.52245	641	1.67370	0.52245
720	1.75954	0.48862	720	1.75954	0.48862	720	1.75954	0.48862	720	1.75954	0.48862
800	1.81944	0.45481	800	1.81944	0.45481	800	1.81944	0.45481	800	1.81944	0.45481

ตารางผนวกที่ 5 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเปลี่ยนแปลงไประดับจากมากไปน้อยที่ปริมาณแพลทินัม 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)
0	0	0.96842	0	0	0.96842	0	0	0.96842	0	0	0.96842
79	0.31312	0.79288	79	0.31312	0.79288	79	0.31312	0.79288	79	0.31312	0.79288
159	0.58466	0.73723	159	0.58466	0.73723	159	0.58466	0.73723	159	0.58466	0.73723
239	0.84276	0.70628	239	0.84276	0.70628	239	0.84276	0.70628	239	0.84276	0.70628
320	1.08395	0.67849	320	1.08395	0.67849	320	1.08395	0.67849	320	1.08395	0.67849
401	1.29891	0.64842	401	1.29891	0.64842	401	1.29891	0.64842	401	1.29891	0.64842
481	1.48503	0.61803	481	1.48503	0.61803	481	1.48503	0.61803	481	1.48503	0.61803
560	1.63784	0.58486	560	1.63784	0.58486	560	1.63784	0.58486	560	1.63784	0.58486
642	1.77753	0.55405	642	1.77753	0.55405	642	1.77753	0.55405	642	1.77753	0.55405
721	1.89028	0.52462	721	1.89028	0.52462	721	1.89028	0.52462	721	1.89028	0.52462
800	1.96324	0.49081	800	1.96324	0.49081	800	1.96324	0.49081	800	1.96324	0.49081

ตารางผนวกที่ 6 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเปลี่ยนแปลงไประดับจากน้อยไปมากที่ปริมาณแพลทินัม 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)
0	0	0.96682	0	0	0.96682	0	0	0.96682	0	0	0.96682
80	0.29705	0.74264	80	0.29705	0.74264	80	0.29705	0.74264	80	0.29705	0.74264
160	0.54579	0.68224	160	0.54579	0.68224	160	0.54579	0.68224	160	0.54579	0.68224
240	0.77762	0.64802	240	0.77762	0.64802	240	0.77762	0.64802	240	0.77762	0.64802
320	0.98958	0.61849	320	0.98958	0.61849	320	0.98958	0.61849	320	0.98958	0.61849
400	1.17852	0.58926	400	1.17851	0.58926	400	1.17852	0.58926	400	1.17852	0.58926
480	1.34136	0.55890	480	1.34136	0.55890	480	1.34136	0.55890	480	1.34136	0.55890
560	1.48187	0.52924	560	1.48187	0.52924	560	1.48187	0.52924	560	1.48187	0.52924
640	1.59545	0.49858	640	1.59545	0.49858	640	1.59545	0.49858	640	1.59545	0.49858
720	1.67914	0.46643	720	1.67914	0.46643	720	1.67913	0.46643	720	1.67914	0.46643
800	1.72140	0.43035	800	1.72140	0.43035	800	1.72140	0.43035	800	1.72140	0.43035

ตารางผนวกที่ 7 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเปลี่ยนแปลงไประดับจากมากไปน้อยที่ปริมาณแพลทินัม 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)
0	0	0.96958	0	0	0.96958	0	0	0.96958	0	0	0.96958
121	0.46842	0.77426	121	0.46842	0.77426	121	0.46842	0.77426	121	0.46842	0.77426
241	0.86569	0.71842	241	0.86569	0.71842	241	0.86569	0.71842	241	0.86569	0.71842
360	1.22832	0.68240	360	1.22832	0.68240	360	1.22832	0.68240	360	1.22832	0.68240
480	1.55136	0.64640	480	1.55136	0.64640	480	1.55136	0.64640	480	1.55136	0.64640
599	1.82464	0.60923	599	1.82464	0.60923	599	1.82464	0.60923	599	1.82464	0.60923
720	2.05494	0.57082	720	2.05495	0.57082	720	2.05495	0.57082	720	2.05495	0.57082
840	2.24498	0.53452	840	2.24497	0.53452	840	2.24498	0.53452	840	2.24498	0.53452
960	2.38540	0.49696	960	2.38540	0.49696	960	2.38540	0.49695	960	2.38540	0.49696
1080	2.46375	0.45625	1080	2.46375	0.45625	1080	2.46375	0.45625	1080	2.46375	0.45625
1200	2.51532	0.41922	1200	2.51531	0.41922	1200	2.51532	0.41922	1200	2.51532	0.41922

ตารางผนวกที่ 8 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเหลี่ยมปกติ (RP) ที่อุณหภูมิเซลล์ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 80 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)
0	0	0.98660	0	0	0.98660	0	0	0.98660	0	0	0.98660
39	4.71616	0.81258	39	4.71617	0.81258	39	4.71618	0.81258	39	4.71617	0.81258
80	9.29432	0.77147	80	9.29431	0.77147	80	9.29433	0.77147	80	9.29432	0.77147
121	13.54164	0.74272	121	13.54164	0.74273	121	13.54164	0.74271	121	13.54164	0.74272
160	17.18256	0.71733	160	17.18256	0.71733	160	17.18256	0.71733	160	17.18256	0.71733
199	20.71622	0.69611	199	20.71624	0.69611	199	20.71623	0.69611	199	20.71623	0.69611
239	24.32044	0.67865	239	24.32044	0.67865	239	24.32044	0.67865	239	24.32044	0.67865
279	27.38899	0.65549	279	27.38899	0.65549	279	27.38899	0.65549	279	27.38899	0.65549
320	30.40405	0.63431	320	30.40407	0.63431	320	30.40406	0.63431	320	30.40406	0.63431
360	33.10697	0.61403	360	33.10695	0.61403	360	33.10696	0.61403	360	33.10696	0.61403
400	35.50501	0.59214	400	35.50503	0.59216	400	35.50502	0.59215	400	35.50502	0.59215
440	37.60838	0.56839	440	37.60838	0.56839	440	37.60838	0.56839	440	37.60838	0.56839
480	39.09568	0.54224	480	39.09568	0.54225	480	39.09568	0.54226	480	39.09568	0.54225
520	40.40311	0.51768	520	40.40311	0.51768	520	40.40311	0.51768	520	40.40311	0.51768

ตารางผนวกที่ 9 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงแอโนด (ADS) ที่อุณหภูมิเซลล์ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 80 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)
0	0	0.97660	0	0	0.97660	0	0	0.97660	0	0	0.97660
39	4.73939	0.81659	39	4.73939	0.81658	39	4.73939	0.81657	39	4.73939	0.81658
80	9.38320	0.77885	80	9.38320	0.77885	80	9.38320	0.77885	80	9.38320	0.77885
121	13.70573	0.75171	121	13.70573	0.75173	121	13.70573	0.75172	121	13.70573	0.75172
159	17.42210	0.72733	159	17.42210	0.72733	159	17.42210	0.72733	159	17.42210	0.72733
199	21.08984	0.70511	199	21.08984	0.70511	199	21.08984	0.70511	199	21.08984	0.70511
240	24.71012	0.68665	240	24.71014	0.68665	240	24.71013	0.68665	240	24.71013	0.68665
279	27.93219	0.66848	279	27.93219	0.66849	279	27.93219	0.66849	279	27.93219	0.66849
320	31.12427	0.64731	320	31.12429	0.64731	320	31.12428	0.64731	320	31.12428	0.64731
360	33.84789	0.62603	360	33.84787	0.62603	360	33.84788	0.62603	360	33.84788	0.62603
399	36.52266	0.61065	399	36.52267	0.61065	399	36.52268	0.61065	399	36.52267	0.61065
440	38.94247	0.58989	440	38.94247	0.58989	440	38.94247	0.58989	440	38.94247	0.58989
480	40.82606	0.56624	480	40.82606	0.56625	480	40.82606	0.56626	480	40.82606	0.56625
520	42.26810	0.54167	520	42.26810	0.54169	520	42.26810	0.54168	520	42.26810	0.54168

ตารางผนวกที่ 10 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงขึ้นแอโนด (AUS) ที่อุณหภูมิเซลล์ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 80 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)
0	0	0.97560	0	0	0.97560	0	0	0.97560	0	0	0.97560
39	4.86097	0.80828	39	4.86095	0.80828	39	4.86096	0.80828	39	4.86096	0.80828
80	9.20869	0.76626	80	9.20869	0.76627	80	9.20869	0.76628	80	9.20869	0.76627
121	13.46052	0.74132	121	13.46052	0.74132	121	13.46052	0.74132	121	13.46052	0.74132
159	17.04156	0.71322	159	17.04156	0.71324	159	17.04156	0.71323	159	17.04156	0.71323
199	20.76980	0.69441	199	20.76980	0.69441	199	20.76980	0.69441	199	20.76980	0.69441
240	24.16312	0.67144	240	24.16316	0.67146	240	24.16314	0.67145	240	24.16314	0.67145
279	27.08814	0.64829	279	27.08816	0.64829	279	27.08815	0.64829	279	27.08815	0.64829
320	30.10209	0.62801	320	30.10209	0.62801	320	30.10209	0.62801	320	30.10209	0.62801
360	32.66486	0.60583	360	32.66482	0.60583	360	32.66484	0.60583	360	32.66484	0.60583
399	34.94739	0.58284	399	34.94739	0.58286	399	34.94739	0.58285	399	34.94739	0.58285
440	36.71773	0.55619	440	36.71772	0.55619	440	36.71771	0.55619	440	36.71772	0.55619
480	38.05460	0.52826	480	38.05460	0.52825	480	38.05460	0.52824	480	38.05460	0.52825
520	39.23241	0.50267	520	39.23241	0.50269	520	39.23241	0.50268	520	39.23241	0.50268

ตารางผนวกที่ 11 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงแคโทด (CDS) ที่อุณหภูมิเซลล์ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 80 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)
0	0	0.98460	0	0	0.98460	0	0	0.98460	0	0	0.98460
39	4.83805	0.81258	39	4.83806	0.81258	39	4.83807	0.81258	39	4.83806	0.81258
80	9.25869	0.76948	80	9.25869	0.76946	80	9.25869	0.76947	80	9.25869	0.76947
121	13.33983	0.73772	121	13.33982	0.73772	121	13.33981	0.73772	121	13.33982	0.73772
159	17.11296	0.71353	159	17.11294	0.71353	159	17.11295	0.71353	159	17.11295	0.71353
199	20.66212	0.69081	199	20.66213	0.69081	199	20.66214	0.69081	199	20.66213	0.69081
240	24.02639	0.66764	240	24.02639	0.66766	240	24.02639	0.66765	240	24.02639	0.66765
279	26.95017	0.64039	279	26.95018	0.64039	279	26.95016	0.64039	279	26.95017	0.64039
320	29.58083	0.61521	320	29.58083	0.61521	320	29.58083	0.61521	320	29.58083	0.61521
360	31.70511	0.58802	360	31.70511	0.58803	360	31.70511	0.58804	360	31.70511	0.58803
399	33.72310	0.56215	399	33.72310	0.56216	399	33.72310	0.56214	399	33.72310	0.56215
440	35.27856	0.53439	440	35.27856	0.53439	440	35.27856	0.53439	440	35.27856	0.53439
480	36.60620	0.50826	480	36.60620	0.50824	480	36.60620	0.50825	480	36.60620	0.50825
520	37.46256	0.48028	520	37.46257	0.48028	520	37.46255	0.48028	520	37.46256	0.48028

ตารางผนวกที่ 12 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงขึ้นแคโทด (CUS) ที่อุณหภูมิเซลล์ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 80 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)
0	0	0.98260	0	0	0.98260	0	0	0.98260	0	0	0.98260
39	4.93687	0.80880	39	4.93686	0.80880	39	4.93685	0.80880	39	4.93687	0.80880
80	9.20452	0.76497	80	9.20454	0.76497	80	9.20456	0.76497	80	9.20454	0.76497
121	13.20938	0.73172	121	13.20938	0.73173	121	13.20938	0.73171	121	13.20938	0.73172
159	16.89710	0.70453	159	16.89710	0.70455	159	16.89710	0.70451	159	16.89710	0.70453
199	20.30482	0.68082	199	20.30482	0.68081	199	20.30482	0.68081	199	20.30482	0.68081
240	23.48659	0.65264	240	23.48659	0.65266	240	23.48659	0.65265	240	23.48659	0.65265
279	26.00593	0.62239	279	26.00595	0.62239	279	26.00594	0.62239	279	26.00594	0.62239
320	28.37365	0.59121	320	28.37364	0.59121	320	28.37366	0.59121	320	28.37365	0.59121
360	30.46652	0.56443	360	30.46652	0.56442	360	30.46652	0.56444	360	30.46652	0.56443
399	31.94942	0.53283	399	31.94942	0.53286	399	31.94942	0.53285	399	31.94942	0.53285
440	33.63176	0.50829	440	33.63177	0.50829	440	33.63178	0.50829	440	33.63177	0.50829
480	34.76974	0.48225	480	34.76974	0.48226	480	34.76974	0.48225	480	34.76974	0.48225

ตารางผนวกที่ 13 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเฉลี่ยปกติ (RP) ที่อุณหภูมิเซลล์ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 95 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)
0	0	0.98460	0	0	0.98460	0	0	0.98460	0	0	0.98460
39	4.83211	0.81159	39	4.83211	0.81157	39	4.83211	0.81158	39	4.83211	0.81158
80	9.25818	0.76847	80	9.25818	0.76846	80	9.25818	0.76848	80	9.25818	0.76847
121	13.26649	0.73673	121	13.26649	0.73672	121	13.26649	0.73672	121	13.26649	0.73672
159	17.07565	0.71153	159	17.07566	0.71153	159	17.07564	0.71153	159	17.07565	0.71153
199	20.70563	0.68881	199	20.70564	0.68881	199	20.70562	0.68881	199	20.70563	0.68881
240	24.09040	0.66665	240	24.09040	0.66665	240	24.09040	0.66665	240	24.09040	0.66665
279	26.77024	0.63839	279	26.77026	0.63839	279	26.77025	0.63839	279	26.77025	0.63839
320	29.38149	0.61221	320	29.38149	0.61221	320	29.38149	0.61221	320	29.38149	0.61221
360	31.52448	0.58403	360	31.52447	0.58403	360	31.52449	0.58403	360	31.52448	0.58403
399	33.28652	0.55514	399	33.28652	0.55516	399	33.28652	0.55515	399	33.28652	0.55515
440	34.88325	0.52839	440	34.88324	0.52839	440	34.88326	0.52839	440	34.88325	0.52839
480	36.17405	0.50224	480	36.17405	0.50226	480	36.17405	0.50225	480	36.17405	0.50225
520	37.46976	0.48028	520	37.46976	0.48027	520	37.46976	0.48029	520	37.46976	0.48028

ตารางผนวกที่ 14 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงแอนโอด (ADS) ที่อุณหภูมิเซลล์ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 95 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)
0	0	0.97860	0	0	0.97860	0	0	0.97860	0	0	0.97860
39	4.92760	0.80729	39	4.92760	0.80727	39	4.92760	0.80728	39	4.92760	0.80728
80	9.21963	0.76527	80	9.21963	0.76526	80	9.21963	0.76528	80	9.21963	0.76527
121	13.35067	0.73832	121	13.35066	0.73832	121	13.35068	0.73832	121	13.35067	0.73832
159	17.11903	0.71022	159	17.11903	0.71023	159	17.11903	0.71024	159	17.11903	0.71023
199	20.84390	0.69342	199	20.84390	0.69341	199	20.84390	0.69340	199	20.84390	0.69341
240	24.12715	0.67045	240	24.12714	0.67045	240	24.12716	0.67045	240	24.12715	0.67045
279	27.18539	0.64829	279	27.18539	0.64829	279	27.18539	0.64829	279	27.18539	0.64829
320	30.10209	0.62801	320	30.10209	0.62801	320	30.10209	0.62801	320	30.10209	0.62801
360	32.75572	0.60583	360	32.75571	0.60583	360	32.75571	0.60583	360	32.75571	0.60583
399	34.85146	0.58124	399	34.85146	0.58126	399	34.85146	0.58125	399	34.85146	0.58125
440	36.48666	0.55269	440	36.48664	0.55269	440	36.48668	0.55269	440	36.48666	0.55269
480	38.01420	0.52724	480	38.01420	0.52725	480	38.01420	0.52726	480	38.01420	0.52725
520	39.23241	0.50268	520	39.23241	0.50267	520	39.23241	0.50269	520	39.23241	0.50268

ตารางผนวกที่ 15 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงขึ้นแอโนด (AUS) ที่อุณหภูมิเซลล์ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 95 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)
0	0	0.98360	0	0	0.98360	0	0	0.98360	0	0	0.98360
39	4.85916	0.81128	39	4.85915	0.81128	39	4.85917	0.81128	39	4.85916	0.81128
80	9.24011	0.76695	80	9.24011	0.76698	80	9.24011	0.76697	80	9.24011	0.76697
121	13.39578	0.73473	121	13.39578	0.73471	121	13.39578	0.73472	121	13.39578	0.73472
159	16.99573	0.70953	159	16.99572	0.70953	159	16.99574	0.70953	159	16.99573	0.70953
199	20.37994	0.68481	199	20.37995	0.68481	199	20.37995	0.68481	199	20.37995	0.68481
240	23.74706	0.66265	240	23.74706	0.66265	240	23.74705	0.66265	240	23.74706	0.66265
279	26.54915	0.63539	279	26.54914	0.63539	279	26.54914	0.63539	279	26.54914	0.63539
320	29.10509	0.60721	320	29.10509	0.60721	320	29.10509	0.60721	320	29.10509	0.60721
360	31.13357	0.57743	360	31.13358	0.57743	360	31.13359	0.57743	360	31.13358	0.57743
399	32.76487	0.54644	399	32.76487	0.54646	399	32.76487	0.54645	399	32.76487	0.54645
440	34.55810	0.52229	440	34.55810	0.52229	440	34.55810	0.52229	440	34.55810	0.52229
480	35.85123	0.49725	480	35.85123	0.49724	480	35.85123	0.49726	480	35.85123	0.49725

ตารางผนวกที่ 16 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงลงแคโทด (CDS) ที่อุณหภูมิเซลล์ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 95 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)
0	0	0.98360	0	0	0.98360	0	0	0.98360	0	0	0.98360
39	4.83342	0.81180	39	4.83343	0.81180	39	4.83341	0.81180	39	4.83342	0.81180
80	9.24011	0.76699	80	9.24011	0.76697	80	9.24011	0.76695	80	9.24011	0.76697
121	13.23447	0.73371	121	13.23447	0.73373	121	13.23447	0.73372	121	13.23447	0.73372
159	16.97966	0.70753	159	16.97966	0.70754	159	16.97966	0.70752	159	16.97966	0.70753
199	20.32043	0.68281	200	20.32043	0.68282	199	20.32043	0.68281	199	20.32043	0.68281
240	23.63053	0.65665	240	23.63054	0.65665	240	23.63052	0.65665	240	23.63054	0.65665
279	26.35092	0.62839	279	26.35091	0.62839	279	26.35091	0.62839	279	26.35091	0.62839
320	28.76343	0.59822	320	28.76343	0.59821	320	28.76343	0.59821	320	28.76343	0.59821
360	30.62845	0.56743	360	30.62846	0.56743	360	30.62845	0.56743	360	30.62844	0.56743
399	32.18926	0.53687	399	32.18926	0.53685	399	32.18926	0.53684	399	32.18926	0.53685
440	33.76411	0.51029	440	33.76410	0.51029	440	33.76410	0.51029	440	33.76410	0.51029
480	34.98604	0.48523	480	34.98604	0.48525	480	34.98604	0.48526	480	34.98604	0.48525

ตารางผนวกที่ 17 เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางไหลเอียงขึ้นแคโทด (CUS) ที่อุณหภูมิเซลล์ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นก๊าซป้อน 95 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย		
I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)	I (mA/cm ²)	Power (Watts)	E (Volts)
0	0.00000	0.98460	0	0.00000	0.98461	0	0.00000	0.98460	0	0.00000	0.98460
40	4.80961	0.80780	40	4.80960	0.80780	40	4.80960	0.80780	40	4.80960	0.80780
80	9.19192	0.76296	80	9.19192	0.76297	80	9.19192	0.76298	80	9.19192	0.76297
121	13.28639	0.72872	121	13.28639	0.72873	121	13.28639	0.72871	121	13.28639	0.72872
160	16.75319	0.69852	160	16.75319	0.69853	160	16.75319	0.69853	160	16.75319	0.69853
199	20.07329	0.67281	199	20.07329	0.67282	199	20.07329	0.67281	199	20.07329	0.67281
240	23.16271	0.64364	240	23.16271	0.64365	240	23.16271	0.64366	240	23.16271	0.64365
279	25.67997	0.61239	279	25.67995	0.61239	279	25.67996	0.61239	279	25.67996	0.61239
320	27.75843	0.57821	320	27.75843	0.57821	320	27.75840	0.57821	320	27.75842	0.57821
360	29.27902	0.54242	360	29.27902	0.54245	360	29.27902	0.54242	360	29.27902	0.54243
400	30.88559	0.51484	400	30.88559	0.51485	400	30.88559	0.51485	400	30.88559	0.51485
440	31.97187	0.48429	440	31.97184	0.48429	440	31.97186	0.48429	440	31.97186	0.48429

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นางสาวปริญภัทร์ แววดิ
 เกิดวันที่ 4 มีนาคม 2529
 สถานที่เกิด อำเภอแกลง จังหวัดระยอง
 ประวัติการศึกษา วศ.บ. (เคมี) มหาวิทยาลัยบูรพา
 ทุนการศึกษาที่ได้รับ ได้รับทุนผู้ช่วยสอนจากบัณฑิตวิทยาลัย
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

