

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

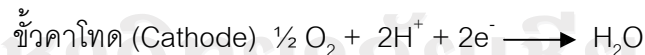
2.1 หลักการและทฤษฎีของเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง คือ เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ซึ่งลักษณะการทำงานคล้ายกับแบตเตอรี่ แต่มีข้อดีกว่าแบตเตอรี่ตรงที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีการป้อนเชื้อเพลิงในรูปของเหลวหรือก๊าซเข้าไปอย่างสม่ำเสมอ และไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากผลที่ได้จากปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงคือ น้ำ และความร้อน

เซลล์เชื้อเพลิงที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีหลายชนิด แต่ละชนิดก็จะมีสภาวะการทำงานที่แตกต่างกันออกไป แล้วแต่โครงสร้างและชนิดของสารทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ผู้ผลิตได้ผลิตออกมา การแบ่งชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงอาจแบ่งโดยใช้ความดันของก๊าซที่เข้าไป หรือใช้อุณหภูมิการทำงาน of เซลล์เชื้อเพลิงเป็นเกณฑ์ แต่สิ่งที่นิยมในการแบ่งประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง คือ ชนิดของอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงชนิด เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC: Proton Exchange Membrane Fuel Cell) ทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำคือประมาณ 50 – 80 °C โดยใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เป็นอิเล็กโทรไลต์ และมีแพลตตินัม (Platinum) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

สมการเคมี (Chemical Equation):

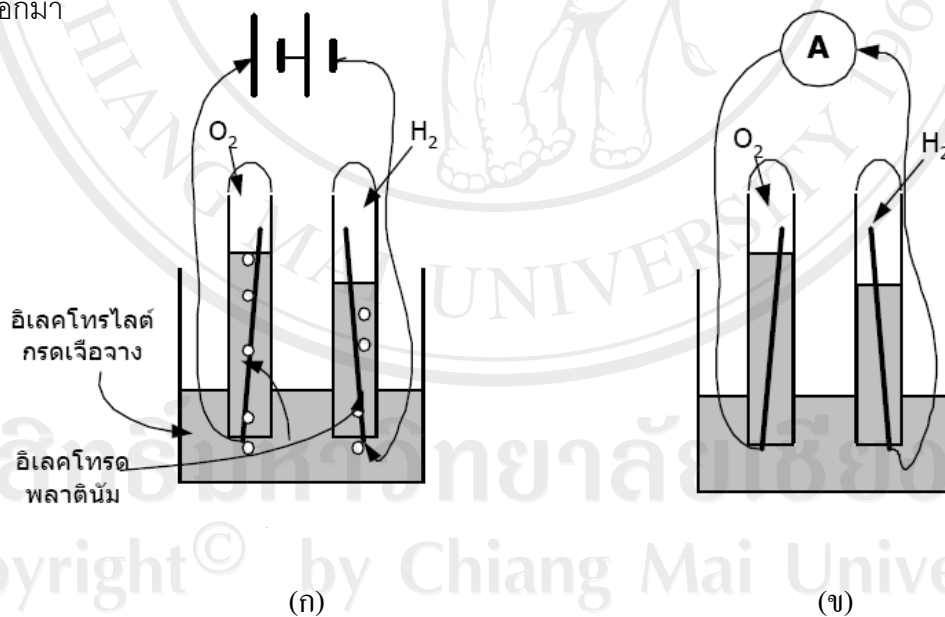


เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำ จึงมีปัญหาน้ำในเครื่องของการจัดการนำน้ำออกจากเซลล์ เพราะน้ำที่เกิดขึ้นภายในเซลล์จะอยู่ในสถานะของเหลวซึ่งอาจจะตกค้างและทำให้พื้นผิวที่จะเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์ลดลงวิธีโดยทั่วไปในการนำน้ำส่วนนี้ออกจากเซลล์ ทำได้โดยการให้อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนมากกว่าความต้องการของเซลล์ ในปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีความนิยมนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับยานยนต์ เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน มีการ

ทำงานที่อุณหภูมิต่ำ มีประสิทธิภาพสูง มี Power density สูง อายุการใช้งานยาวนาน มีขนาดกะทัดรัด เชื้อเพลิงหาได้ง่าย และมีค่าใช้จ่ายต่อกิโลวัตต์ที่ต่ำ อีกทั้งยังนิยมใช้ในการศึกษาวิจัยการผลิตพลังงานและประยุกต์ในการใช้งานจริงกันอย่างแพร่หลาย

2.2 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

หลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮโดรเจนไม่มีความซับซ้อนมากนัก บุคคลแรกที่ผลิตเซลล์เชื้อเพลิงคือ เซอร์วิลเลียม โกรฟ (Sir William Grove) ในปี ค.ศ. 1839 ลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงเครื่องแรก แสดงดังรูป 2.1(ก) และ 2.1(ข) ในรูปที่ 2.1(ก) เป็นกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเพื่อผลิตไฮโดรเจนและออกซิเจนโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไป อุปกรณ์ในรูปที่ 2.1(ข) แตกต่างจาก 2.1(ก) ตรงที่นำเอาแอมมิเตอร์ (Ampmeter) มาแทนที่แหล่งป้อนพลังงานไฟฟ้า (Power Supply) อุปกรณ์ในรูปที่ 2.1(ข) จะทำหน้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงทำหน้าที่กลับกันกับอุปกรณ์ในรูปที่ 2.1(ก) ปฏิกริยาในรูปที่ 2.1(ข) เกิดในลักษณะย้อนกลับทางกับปฏิกริยาการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า นั่นคือ ออกซิเจนทำปฏิกริยากับไฮโดรเจน เกิดเป็นน้ำและผลิตกระแสไฟฟ้าออกมา

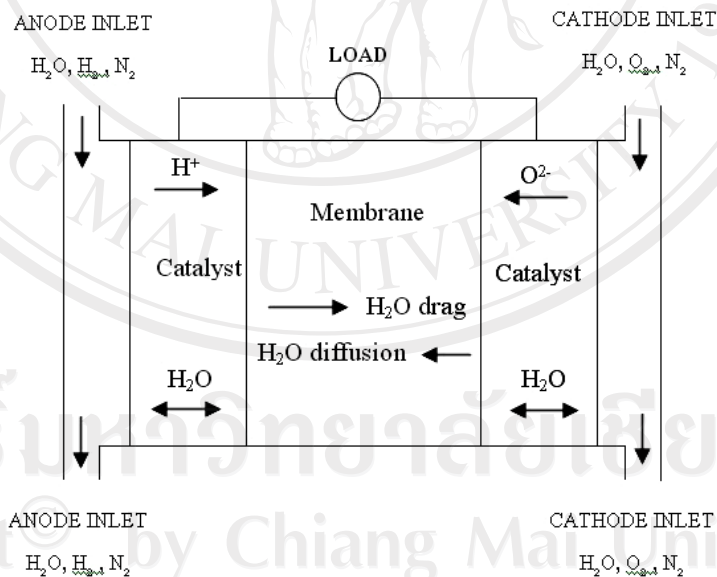


รูปที่ 2.1 (ก) กระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเพื่อผลิตไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยการผ่านกระแสไฟฟ้า

(ข) เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นเมื่อออกซิเจนและไฮโดรเจนเกิดการรวมตัวกันใหม่อีกครั้ง

ข้อสังเกต: หัวลูกศรแสดงถึงทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนที่เป็นลบ (ไหลจาก - ไป +)

เซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีความพรุน คือ อานอดและคาโทด สัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอาจเป็นของแข็งหรือของเหลว โดยการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเริ่มจากขั้วอานอดได้รับเชื้อเพลิง ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจนจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งโมเลกุลก๊าซไฮโดรเจนแตกตัวให้อิเล็กตรอน (e^-) กับโปรตอน (H^+) ดังสมการที่ 2.1 โดยโปรตอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังขั้วคาโทดได้ เนื่องจากสารอิเล็กโทรไลต์มีคุณสมบัติเป็นตัวนำโปรตอน อิเล็กตรอนอิสระจะเคลื่อนที่เป็นกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรภายนอกเพื่อไปยังขั้วคาโทด เมื่อขั้วคาโทดได้รับก๊าซออกซิเจน รวมตัวกับอิเล็กตรอนและโปรตอนแล้วจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ที่ขั้วคาโทด (สมการที่ 2.2) ซึ่งผลจากปฏิกิริยาจะได้โมเลกุลของน้ำรวมทั้งเกิดความร้อนดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในเชิงอุณหพลศาสตร์

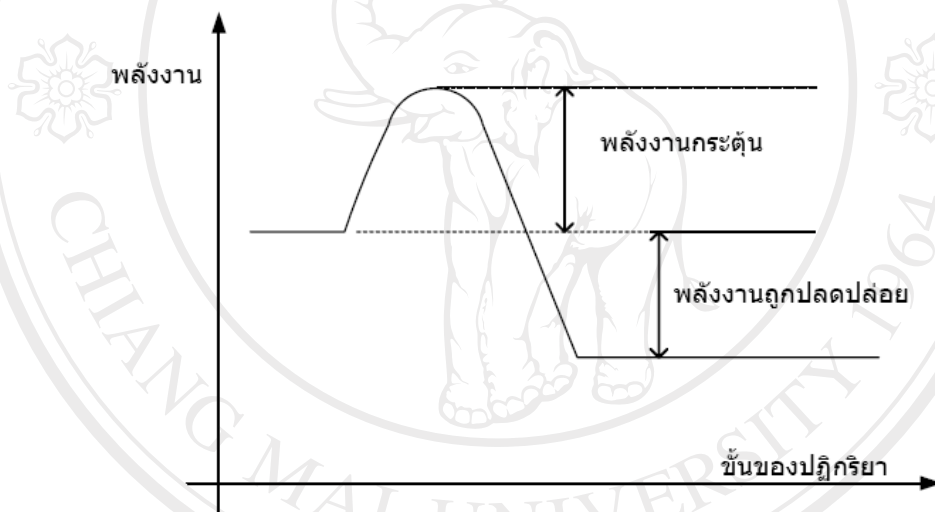
(<http://hyperphysics.phyastr.gsu.edu/hbase/thermo/electro.html>)

ปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนเป็นปฏิกิริยาที่ปล่อยพลังงานออกมา ดังสมการที่ 2.4



2.3 ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาที่ชั่วเลิศโทรด

ไฮโดรเจนทำปฏิกิริยาที่ชั่วเลิศโทรด แล้วปล่อยพลังงานออกมา แต่การปล่อยพลังงานออกมาไม่ได้หมายความว่าปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยอัตราที่ไม่มีขีดจำกัด ทุกปฏิกิริยาเคมีล้วนมีรูปแบบเฉพาะของการปล่อยพลังงานที่คล้ายคลึงกัน ยกตัวอย่างปฏิกิริยาคายความร้อนแสดงดังแผนภาพการปล่อยพลังงานในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพการปล่อยพลังงานสำหรับปฏิกิริยาเคมีแบบคายความร้อน
(Exothermic Chemical Reaction)

ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาข้างต้นเป็นปฏิกิริยาที่ปล่อยพลังงานออกมา แต่ในตอนเริ่มต้นสารตั้งต้นยังคงต้องการพลังงานส่วนหนึ่งก่อนที่ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ พลังงานในส่วนนี้เรียกว่า พลังงานกระตุ้น จากรูปจะเห็นว่า สารตั้งต้นต้องการพลังงานกระตุ้นในส่วนนี้เพื่อขึ้นไปสู่จุดสูงสุดของเส้นกราฟ หลังจากนั้นปฏิกิริยาจึงจะเกิดและมีการปล่อยพลังงานออกมา ถ้าโมเลกุลของสารตั้งต้นโดยส่วนใหญ่มีพลังงานไม่เพียงพอ ปฏิกิริยาจะดำเนินไปด้วยอัตราที่ช้า ยกเว้นว่าอุณหภูมิในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าสูง

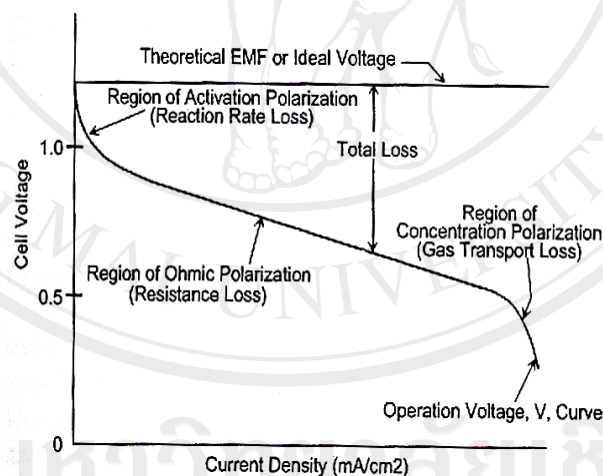
วิธีการหลัก 3 วิธี เพื่อแก้ไขในกรณีที่ปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างเชื่องช้า ได้แก่

- (1) การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
- (2) การเพิ่มอุณหภูมิ
- (3) การเพิ่มพื้นที่ผิวอิเล็กโทรด

สองวิธีแรกสามารถใช้ได้กับปฏิกิริยาเคมีใดๆ แต่สำหรับวิธีที่สามใช้เฉพาะสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงและเป็นส่วนที่มีความสำคัญที่สุด H_2 และ OH^- ต้องทำปฏิกิริยากันที่พื้นผิวอิเล็กโทรดและอิเล็กตรอนที่ผลิตขึ้นต้องถูกดึงออกจากขั้วอิเล็กโทรด

2.4 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน จะวัดออกมาในค่าของความหนาแน่นกระแส (Current density) ในหน่วยของ milliamperes per square centimeter (mA/cm^2) ซึ่งพื้นที่ที่เป็นตัวหารนี้ก็คือ บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิง สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้จาก I-V characteristic curve ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นของกระแส
(Fuel Cell Handbook, 2000)

จากกราฟความต่างศักย์ที่เซลล์ให้ออกมาจะลดลงเมื่อมีกระแสไหลมากขึ้น ซึ่งตามทฤษฎีแล้ว ความสัมพันธ์ของความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสควรจะเป็นเส้นตรงขนานกับแกนนอน แต่เนื่องจากข้อจำกัดในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้ความสามารถในการทำงานลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากสาเหตุสำคัญ ดังนี้ คือ

- (1) ความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาขณะอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงยังไม่เพียงพอ เรียกว่า reaction rate loss
- (2) ความต้านทานของ proton exchange membrane ทำให้ความสามารถในการนำโปรตอนต่ำลง เรียกว่า resistance loss
- (3) ความต้านทานของชั้นการแพร่และตัวสะสมกระแส ทำให้ความสามารถในการนำอิเล็กตรอนต่ำลง เรียกว่า resistance loss
- (4) ความต่างศักย์ลดลงเนื่องจากอัตราการแพร่ ในกรณีที่ก๊าซออกซิเจนไหลผ่านชั้นการแพร่ไปสู่ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา ขณะเดียวกันกับน้ำกำลังไหลสวนทางออกมาทำให้พื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาน้อยลง เรียกว่า gas transport loss

จากข้อจำกัดที่กล่าวมาทั้งหมด มีผลต่อการลดลงของความต่างศักย์ เรียกว่า โพลาริเซชัน (Polarization) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงอธิบายได้จากกราฟโพลาริเซชัน (Polarization curve) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์เชื้อเพลิง โดยประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต่างศักย์คร่อมเซลล์เชื้อเพลิง หรือความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (Power density) ซึ่งหาได้จากผลคูณระหว่างความต่างศักย์กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density)

2.4.1 โพลาริเซชันทางเคมี (Chemical Polarization)

โพลาริเซชันทางเคมีหรือ Activation polarization จะเกิดในช่วงแรกของการลดลงของความต่างศักย์คร่อมเซลล์เชื้อเพลิง โดยเกิดขึ้นเนื่องจากอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา (Reaction rate) มีค่าต่ำ ดังปฏิกิริยาที่ชั่วอาโนดดังต่อไปนี้



ในขณะที่เปิดวงจรจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเซลล์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาตามสมการที่ 2.5 จากซ้ายไปขวาเท่ากับจากขวาไปซ้ายซึ่งอยู่ในสภาวะสมดุล แต่เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลออกจากเซลล์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจากซ้ายไปขวามากกว่าจากขวาไปซ้าย และศักย์ไฟฟ้าจะลดลงจนคงที่ ส่วนจะลดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและกระแสไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากอัตราเร็วของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีขึ้นอยู่กับพลังงานกระตุ้น (Activation energy) โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อโมเลกุลของสารที่เข้าทำปฏิกิริยามีพลังงานสูงกว่าพลังงานกระตุ้น ถ้าพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูง เมื่อเทียบกับพลังงานของ

โมเลกุลของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาแล้วอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีก็จะมีค่าต่ำลง ทำให้เกิดการโพลาไรเซชันทางเคมีมาก

วิธีแก้ไขคือเพิ่มพลังงานของโมเลกุลสารตั้งต้นให้มากขึ้น เช่น เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น หรือในกรณีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนจะอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา คือ แพลตตินัม เพื่อช่วยลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาลง

2.4.2 โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน (Resistance Polarization)

ความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิงเกิดเนื่องมาจากองค์ประกอบของตัวเซลล์เอง ซึ่งประกอบด้วย ความต้านทานของขั้วไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และองค์ประกอบที่เป็นอิเล็กโทรดของเซลล์ โดยเฉพาะกรณีเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน องค์ประกอบที่มีความต้านทานมาก คือ เมมเบรนที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งนำไอออนได้น้อยกว่าสารละลายกรดหรือเบส โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานเกิดในช่วงกลางของกราฟโพลาริเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงกับความหนาแน่นกระแส (Current density)

2.4.3 โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration Polarization)

โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น เกิดในช่วงท้ายสุดของกราฟโพลาริเซชัน ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูง การลดลงของความต่างศักย์เนื่องมาจากข้อจำกัดในการจ่ายเชื้อเพลิงหรือตัวออกซิไดซ์ให้กับเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งจำเป็นต้องใช้เป็นจำนวนมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการแพร่ก๊าซ (Diffusion) ไปยังขั้วไฟฟ้าเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในช่วงที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูง และเมื่อการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้ามีค่าสูง จะเป็นผลให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลงเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากซ้ายไปขวามีค่าสูง ทำให้ความดันของสารตั้งต้นลดลง เป็นผลให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงตามสมการของเนิร์นสต์ (Nernst's equation) ดังสมการที่ 2.6

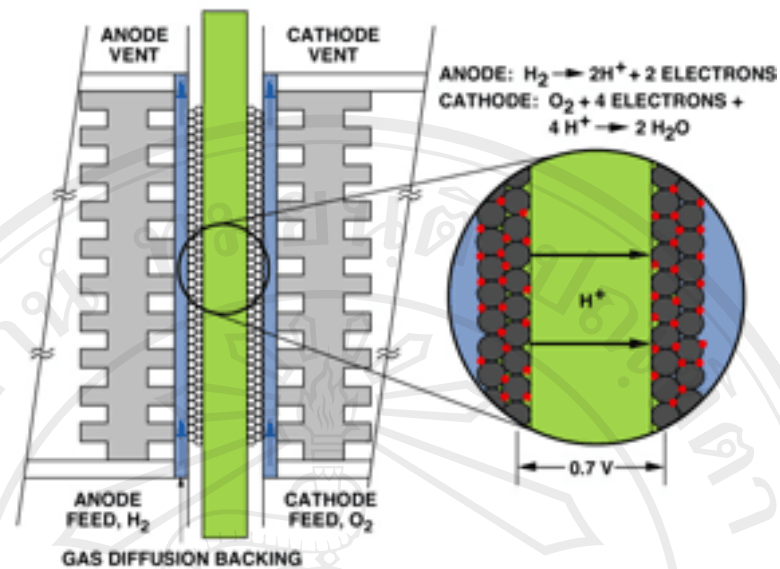
$$E = E^0 + \frac{RT}{n_e F} \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \quad (2.6)$$

โดยที่	$\Delta G \propto P$	ดังนั้น	$E \propto P$
เมื่อ	E	คือ	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Volts)
	E^0	คือ	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (25 °C, 1 atm) (Volts)
	n_e	คือ	จำนวนอิเล็กตรอนต่อโมเลกุล H_2 (เท่ากับ 2 electron/molecule)
	F	คือ	ผลคูณระหว่างเลขอะโวกาโดร กับ ประจุ 1 อิเล็กตรอน 96,485 (Coulombs/electron-mol)
	R	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซจะมีค่าเท่ากับ 8.314 J/(mol.K)
	T	คือ	อุณหภูมิก๊าซ (K)
	P	คือ	Partial Pressure ของ H_2 , O_2 และ H_2O

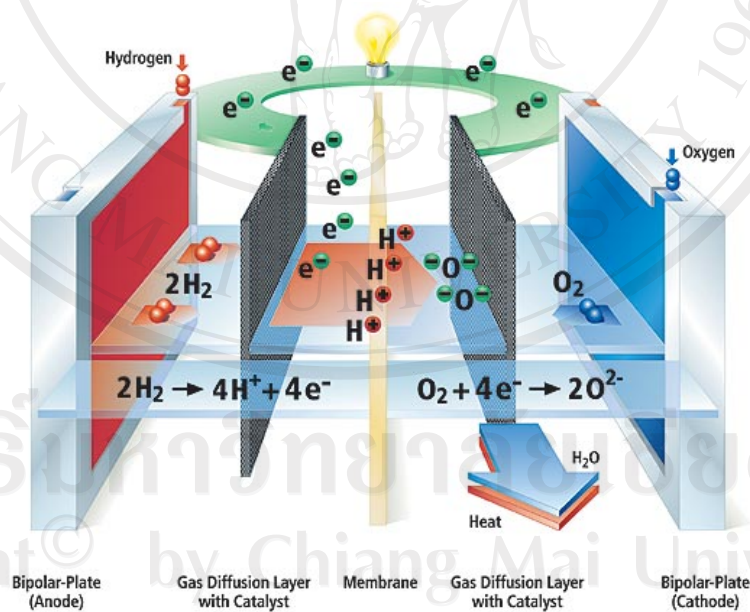
ระบบเซลล์เชื้อเพลิงในทางปฏิบัตินั้น เมื่อความหนาแน่นกระแสมากขึ้นจะเป็นผลทำให้ค่าความต่างศักย์แตกต่างกันมากขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากข้อจำกัดของการแพร่ของก๊าซ โดยในระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความดันสูงกว่า ก๊าซสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากกว่าระบบความดันต่ำ

2.5 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน มีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ คือ Membrane Electrode Assembly (MEAs) แสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งการทำงานคล้ายกับแบตเตอรี่ทั่วไป เป็นอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดหนึ่ง แตกต่างกันตรงที่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนนั้น จะให้กระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องโดยไม่จำเป็นต้องอัดกระแสไฟฟ้าใหม่ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เริ่มพัฒนาขึ้นโดยบริษัท General Electric ในปี ค.ศ. 1960 (Watkins, 1993) เพื่อใช้งานในโครงการอวกาศของสหรัฐอเมริกา หรือ องค์การนาซา ในปัจจุบัน การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ยังคงดำเนินต่อไป เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้น โดยพัฒนาส่วนประกอบเช่น เมมเบรน ขั้วไฟฟ้า และแผ่นสะสมกระแส เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสและให้กำลังไฟฟ้าสูงขึ้น พร้อมทั้งพยายามลดต้นทุนการผลิตลง เพื่อให้สามารถนำเข้าสู่ระบบอุตสาหกรรมการผลิตต่อไป โดยโครงสร้างทั่วไปของเซลล์เดี่ยว แสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางของเซลล์เชื้อเพลิง ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน 1 เซลล์
(www.rpi.edu/polymers/research_fuel_cells.html)



รูปที่ 2.6 รูปแบบโครงสร้างทั่วไปของเซลล์เดี่ยว

(<http://www.princeton.edu/.../Hydrogen/fuelcells.html>)

2.5.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ประกอบด้วยเมมเบรนพอลิเมอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ เพื่อเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนไอออนไฮโดรเจนหรือโปรตอน โดยที่เมมเบรนดังกล่าวจะถูกประกบด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีรูพรุนและมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแพลตตินัมกระจายอย่างสม่ำเสมอ น้ำที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีจะถูกดึงออกจากเซลล์พร้อมกับก๊าซที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมี ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกดึงออกโดยระบบหล่อเย็น (Cooling system)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ต้องอาศัยความชื้นเป็นตัวกลางในการพาไฮโดรเจนไอออนให้เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนจากขั้วแอโนดไปขั้วคาโทด เนื่องจากเมมเบรนมีคุณสมบัติในการนำไอออนได้ดีเมื่อมีความชื้น ดังนั้นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาต้องเป็นก๊าซที่มีความชื้น (Humidified gases)

สำหรับประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน มีปัจจัยหรือตัวแปรหลายอย่างที่เกี่ยวข้อ ดังนี้

- (1) ชนิดและความหนาของเมมเบรน
- (2) ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา
- (3) ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา
- (4) ชนิดและคุณสมบัติของชั้นการแพร่ของก๊าซ (Gas diffusion layer)
- (5) ความต้านทานไฟฟ้าขององค์ประกอบเซลล์เชื้อเพลิง
- (6) ความต้านทานหน้าสัมผัส (Contact resistance)
- (7) รูปแบบของช่องทางเดินก๊าซ (Gas flow field pattern)
- (8) เงื่อนไขในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วย อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล และความชื้นของก๊าซที่เข้าทำปฏิกิริยา เป็นต้น

2.5.2 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

เซลล์เชื้อเพลิงมีองค์ประกอบที่สำคัญ 6 ส่วน คือ

2.5.2.1 เมมเบรน

อิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน จะมีลักษณะเป็นเมมเบรนพอลิเมอร์เหมือนพลาสติก โดยคุณสมบัติของเมมเบรนพอลิเมอร์ที่ถูกใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน มีดังต่อไปนี้

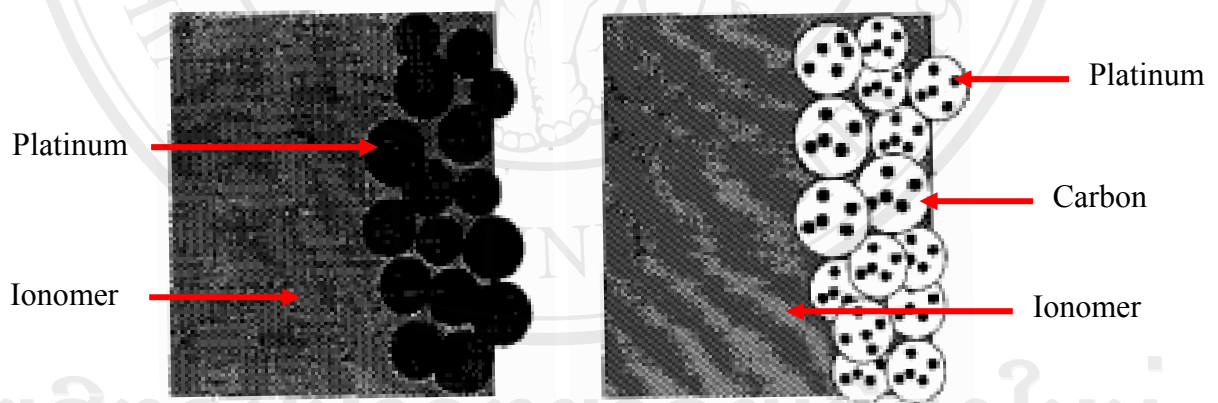
- (1) มีค่าการนำไอออนสูงแต่มีค่าการนำอิเล็กตรอนต่ำ
- (2) มีค่าการแพร่ของก๊าซต่ำ
- (3) มีขนาดที่แน่นอน
- (4) มีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูง
- (5) มีการแพร่ของน้ำต่ำ
- (6) มีความต้านทานต่อการสูญเสียน้ำ (Dehydration)
- (7) มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน รีดักชันและไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)
- (8) มีค่าการถ่ายเทไอออนบวก (Cation) สูง

เมมเบรนพอลิเมอร์มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากมีกลุ่มของซัลโฟนิค (Sulfonic group) ประกอบอยู่ที่ปลายสายโซ่ของโมเลกุลพอลิเมอร์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นโมเลกุลของกรดเปอร์ฟลูออโรซัลโฟนิค (Perfluorosulfonic acid) จึงเรียกพอลิเมอร์ชนิดนี้ว่า เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่สามารถนำไอออนไฮโดรเจนได้ดี โดยเงื่อนไขการนำไอออนต้องอยู่ในสถานะที่มีความชื้นเข้าไปเกี่ยวข้อง เนื่องจากเมมเบรนมีคุณสมบัติความเป็นกรด ซึ่งจำเป็นต้องมีโมเลกุลของน้ำต่อไฮโดรเจนไอออน ที่ทำให้เกิดการนำไอออนได้ดีที่สุดคือประมาณ 3:1 ดังนั้นค่าการนำไอออนของพอลิเมอร์จึงขึ้นอยู่กับค่าความดันน้ำที่ตำแหน่งนั้นๆ ภายในเซลล์ อุณหภูมิเซลล์ และขึ้นอยู่กับความชื้นด้วย

2.5.2.2 ขั้วไฟฟ้า (Electrode)

ขั้วไฟฟ้าเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ประกอบด้วยแพลตตินัมที่เกาะอยู่บนคาร์บอน ซึ่งเสริมความแข็งแรงด้วยผ้าหรือกระดาษคาร์บอน และใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ของเทฟลอน เป็นตัวเชื่อมยึดอนุภาคแพลตตินัมให้ติดอยู่บนคาร์บอน

การสร้างขั้วไฟฟ้าแบบที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเย็ดติดบนเมมเบรนสามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีแรกเป็นการทำขั้วไฟฟ้าแบบเก่าคือการใช้แพลตตินัมดำ (Platinum black) มาอัดโดยใช้ความร้อนให้ติดลงไปโดยตรงบนแผ่นเมมเบรน และอีกวิธีเป็นการทำขั้วไฟฟ้าแบบใหม่หรือแบบชั้นฟิล์มบาง (มีความหนา 4 – 5 μm) โดยการนำแพลตตินัมมาเกาะบนตัวรองรับคาร์บอนก่อน จากนั้นค่อยนำไปเกาะบนเมมเบรน โดยขั้วไฟฟ้าแบบชั้นฟิล์มบางให้สมรรถนะการทำงานที่ดีกว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ใช้แพลตตินัมดำ โดยเปรียบเทียบจากการใช้ไฮโดรเจนกับอากาศเป็นสารตั้งต้น และยังมีปริมาณการใช้แพลตตินัมที่น้อยกว่าถึง 10 เท่า โดยรูปที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบของขั้วไฟฟ้าแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองแบบนี้ (Norbeck และคณะ, 1996)

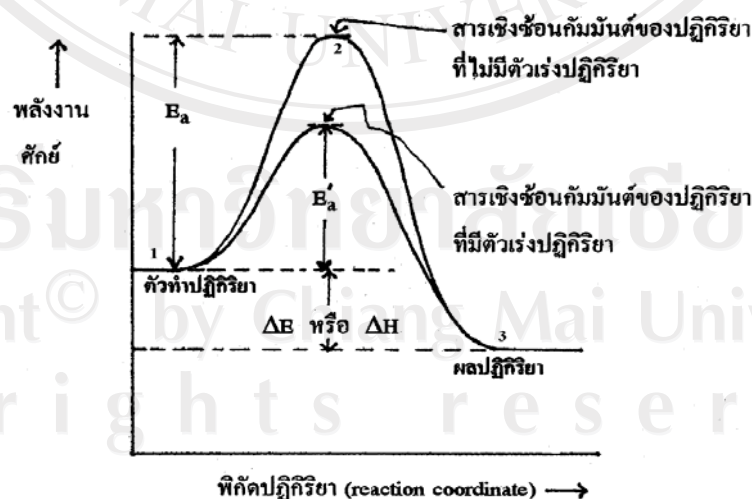


รูปที่ 2.7 การเปรียบเทียบรูปแบบของขั้วไฟฟ้าแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Norbeck และคณะ, 1996)

2.5.2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

ปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงเป็นปฏิกิริยาระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน ซึ่งถ้านำก๊าซทั้งสองมาผสมกันในอุณหภูมิปกติจะไม่เกิดปฏิกิริยาขึ้น เนื่องจากโมเลกุลมีความเสถียรมาก ยกเว้นหากมีบางสิ่งมาทำเป็นตัวกระตุ้นจึงจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ อย่างเช่น การให้ความร้อนระหว่างที่ก๊าซไฮโดรเจนผสมกับออกซิเจน หรือเติมสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น โดยสารที่เติมลงไปนั้นไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปเมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุดลง สารที่ช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้โดยตัวเองไม่เปลี่ยนแปลงเป็นสารอื่นและปริมาณคงเดิมเมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุด เรียกสารนั้นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ การทำให้พลังงานกระตุ้น (Activation energy) E_a น้อยลง

จากรูปที่ 2.8 การที่ $E'_a < E_a$ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วแต่สำหรับความร้อนของปฏิกิริยา จะมีค่าเท่าเดิมเสมอไม่ว่าปฏิกิริยานั้นจะมีตัวเร่งปฏิกิริยาหรือไม่ โดยพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ของอิเล็กตรอนของสารผลิตภัณฑ์ (Product) ซึ่งต่างไปจากการจัดเรียงขณะยังเป็นสารตั้งต้น ซึ่งรูปแบบการจัดเรียงตัวจะเป็นลักษณะที่ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานต่ำกว่าสารตั้งต้นซึ่งผลต่างของพลังงานสารตั้งต้นกับสารผลิตภัณฑ์ก็คือ พลังงานความร้อนที่ได้ออกมาจากปฏิกิริยานั่นเอง โดยจากรูปที่ 2.8 เป็นการอธิบายถึงระดับพลังงานของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ในขณะเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 2.8 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา (วิโรจน์ ปิยวัชรพันธุ์, 2540)

โดยที่ E_a : พลังงานกระตุ้นเมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา
 E'_a : พลังงานกระตุ้นเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา

โดย ณ จุดที่ 1 พลังงานของอิเล็กตรอนอยู่ที่ ground state ไม่มีปฏิกิริยาใด ๆ เกิดขึ้นและเมื่อมีพลังงานกระตุ้นเพิ่มเข้าไปให้สารตั้งต้นทำให้ระดับพลังงานเพิ่มไปสู่ ณ จุดที่ 2 แต่ในกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาก็คจะช่วยลดระดับพลังงานกระตุ้นลงจาก E_a มาเป็น E'_a กระบวนการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น จากนั้นจะได้สารผลิตภัณฑ์ออกมาพร้อมกับปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบต่าง ๆ โดยระดับพลังงานสุดท้ายจะตกมาอยู่ ณ จุดที่ 3 โดยผลรวมของพลังงานที่ปล่อยออกมาเท่ากับผลบวกของพลังงานกระตุ้น (E_a) และพลังงานการเกิดปฏิกิริยา (ΔH) โดยถ้า ΔH เป็นบวก จะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน และถ้า ΔH เป็นลบ จะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาของก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนซึ่งสามารถใช้ แพลตตินัม (Pt) พาลาเดียม (Pd) นิกเกิล (Ni) และ เหล็ก (Fe) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แพลตตินัม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถดูดก๊าซไฮโดรเจนได้ดีมาก ทำให้โมเลกุลของไฮโดรเจนแตกเป็นอะตอม ซึ่งอะตอมของไฮโดรเจนมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยามาก และยิ่งพื้นที่ผิวมากปฏิกิริยาก็ยิ่งเกิดได้เร็วขึ้น

2.5.2.4 Membrane Electrode Assembly

Membrane Electrode Assembly (MEA) ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าประกบเข้ากับเมมเบรนโดยใช้วิธีการกดอัดด้วยความร้อน โดยขั้วไฟฟ้าประกบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีความสำคัญมากเนื่องจากทำให้ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำและมีประสิทธิภาพสูง ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับตำแหน่งการเรียงตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะเรียงตัวแบบ Three-phase boundary ซึ่งหมายถึง พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวทำปฏิกิริยาและเมมเบรน หรืออิเล็กโทรไลต์ โดยพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวเร่งปฏิกิริยาใน Three-phase boundary ต้องมีค่ามากกว่าพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า (Terrance, 2000)

โดยส่วนใหญ่ขั้วไฟฟ้าสำหรับนำมาประกอบเป็น MEA ทำมาจากกระดาษหรือผ้าคาร์บอน ซึ่งนำมาผ่านกระบวนการทำให้ผิวหน้าของผ้าคาร์บอนอิ่มตัว (Impregnating) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบของน้ำหมึก (Ink) ซึ่งน้ำหมึกประกอบไปด้วยแพลตตินัม

และเสริมความแข็งแรงด้วยอนุภาคคาร์บอนผสมกับ Nafion emulsion เรียกผ้าคาร์บอนที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการทำให้มีตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาว่า ชั้นการแพร่ของก๊าซ (Gas diffusion layer) แต่เมื่อผ่านกระบวนการทำให้มีตัวมาแล้วเรียกว่า gas diffusion electrode จากนั้นนำมาประกบเข้ากับเมมเบรน ด้วยกรรมวิธีกดอัดด้วยความร้อนก็จะได้ MEA ตามต้องการ สำหรับนำไปใช้ทดสอบในระบบเซลล์เชื้อเพลิง

2.5.2.5 แผ่นสะสมกระแส (Current Collector Plate)

แผ่นสะสมกระแสเป็นองค์ประกอบในเซลล์ที่มีน้ำหนักมากที่สุด โดยเฉพาะเมื่อประกอบเป็นชั้นเซลล์ แผ่นสะสมกระแสเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แผ่นช่องทางเดินก๊าซ (Gas flow field plate) จะประกอบเป็นโครงสร้างหลักของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง แผ่นสะสมกระแสมี 2 แบบ คือ Bipolar plate และ Unipolar plate โดยที่ Bipolar plate จะคั่นอยู่ระหว่างเซลล์แต่ละเซลล์ที่ประกอบเป็นห่อเซลล์ (Stack cell)

สำหรับ Unipolar plate จะทำหน้าที่เป็นขั้วบวกหรือลบอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น โดยหน้าที่หลักของแผ่นสะสมกระแส มีดังต่อไปนี้

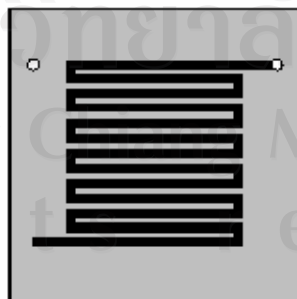
- (1) กระจายก๊าซเชื้อเพลิงและอากาศเข้าไปในพื้นที่ทำปฏิกิริยา
- (2) ระบายความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา
- (3) นำกระแสไฟฟ้าจากเซลล์ต่อเซลล์
- (4) ป้องกันการรั่วของก๊าซข้ามเซลล์

แผ่นสะสมกระแสจะมีช่องทางเดินก๊าซอยู่บนผิวหน้า โดยอาจจะมีลักษณะรูปแบบที่ต่างกันระหว่างขั้วแอโนดและคาโทด และทิศทางการไหลของก๊าซบนขั้วไฟฟ้า ก็จะแตกต่างกันในแต่ละด้านด้วย ซึ่งอาจมีลักษณะการไหลในทิศทางตรงข้ามหรือไหลในทิศทางที่ตัดกันก็ได้ การออกแบบแผ่นสะสมกระแสถือว่ามีความสำคัญอย่างมากต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เพราะเกี่ยวข้องกับความสามารถในการกระจายตัวของก๊าซที่เข้าทำปฏิกิริยา ถ้าเกิดการกระจายตัวของก๊าซไม่ดีภายในพื้นที่ทำปฏิกิริยา มีผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงพร้อมกับกำลังไฟฟ้าที่ให้ออกมาก็ต่ำลงด้วย นอกจากการออกแบบรูปแบบของช่องทางเดินก๊าซจะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแล้วยังมีผลต่อการจัดการน้ำ (Water management) ภายในเซลล์ด้วย

การออกแบบช่องทางเดินก๊าซ เน้นที่การเลือกขนาดความกว้างของช่องทางเดินก๊าซ ความลึกของช่อง และพื้นที่ของครีประหว่างช่องทางเดินก๊าซ ตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อประสิทธิภาพการแพร่ของก๊าซ (Gas diffusion) และการจัดการน้ำ โดยเฉพาะบนข้าวคาโทซึ่งเกิดปฏิกิริยาได้น้ำออกมา และยังเกี่ยวข้องกับความสามารถในการทนต่อความแตกต่างของแรงดันก๊าซระหว่าง ข้าวคาโทและคาโทด้วย โดยรูปแบบพื้นฐานของช่องทางเดินก๊าซได้แก่

ก) Serpentine Channel

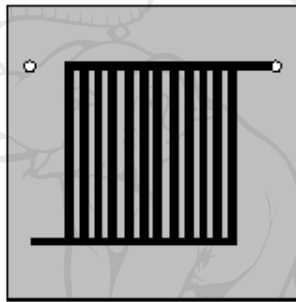
รูปแบบของช่องทางเดินแบบ Serpentine ดังรูปที่ 2.9 จะมีลักษณะทางเดินของช่องเป็นเส้นทางเดียวกันตลอดบนแผ่นสะสมกระแส ซึ่งข้อดีของแบบ Serpentine คือ อัตราการไหลที่สม่ำเสมอทั่วตลอดทั้งแผ่น และมีความดันตกคร่อมค่อนข้างสูง ทำให้มีอัตราการไหลที่สูงตามไปด้วย ซึ่งจะช่วยในการผลักดันน้ำออกจากช่องทางเดินก๊าซ เป็นระบายน้ำออกจากเซลล์ให้ดีขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง (ณัฐวุฒิ, 2548) เมื่อประกอบเซลล์เชื้อเพลิงเป็นห่อเซลล์แล้วช่องทางเดินของก๊าซจะผ่านแต่ละเซลล์เดี่ยวของห่อเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งต่อช่องทางเดินก๊าซกันในลักษณะขนาน ดังนั้นภายในชั้นห่อเซลล์จึงประกอบเซลล์เดี่ยวที่มีช่องทางเดินก๊าซแบบ Serpentine ต่อซ้อนอยู่ด้วยกันจำนวนมากกว่า 1 เซลล์ โดยจากการศึกษาเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของรูปแบบ Serpentine ที่ศึกษาโดย Watkins และคณะ (1991) พบว่าขนาดความกว้างของช่องอยู่ในช่วง 1.14 – 1.40 มิลลิเมตร ความกว้างของสันระหว่างช่องทางเดินก๊าซอยู่ในช่วง 0.89 – 1.40 มิลลิเมตร และสำหรับความลึกของช่องอยู่ในช่วง 1.01 – 2.04 มิลลิเมตร



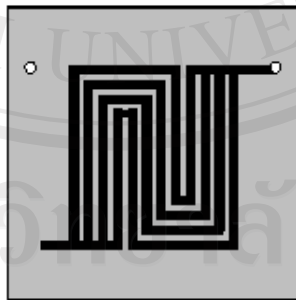
รูปที่ 2.9 รูปแบบของช่องทางเดินก๊าซแบบ Serpentine (Mennola, 2000)

ข) Parallel Channels หรือ Parallel-Serpentine Channel

รูปแบบของช่องทางเดินก๊าซแบบ Parallel แสดงดังรูปที่ 2.10 หรือ Parallel-serpentine ดังรูปที่ 2.11 มีข้อดีกว่าแบบ Serpentine คือ ลดปัญหาเนื่องจากความดันลด (Pressure drop) ภายในเซลล์ได้ดีกว่า แต่จะมีข้อเสียเรื่องการกำจัดน้ำภายในเซลล์ เนื่องจากรูปแบบของช่องทางเดินก๊าซ ที่มีทางเดินหลายเส้นทางตัดผ่านผิวหน้าของแผ่นสะสมกระแส ทำให้บริเวณกลางแผ่นมีการไหลที่เบาบาง แต่บริเวณช่องนำก๊าซด้านนอกสุดจะมีการไหลมาก ทำให้เกิดปัญหาในการระบายน้ำออกจากช่องทางเดินก๊าซ (ณัฐวุฒิ, 2548)



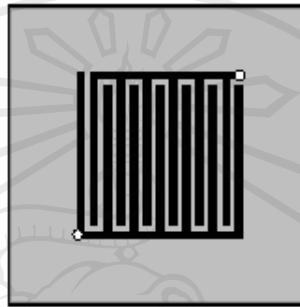
รูปที่ 2.10 รูปแบบของช่องทางเดินก๊าซแบบ parallel (Mennola, 2000)



รูปที่ 2.11 รูปแบบของช่องทางเดินก๊าซแบบ parallel-serpentine (Mennola, 2000)

ค) Discontinuous Channels

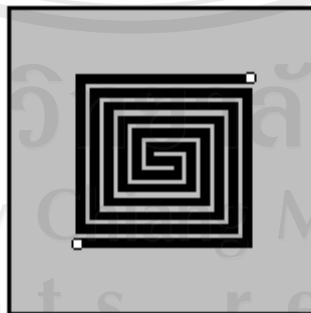
รูปแบบช่องทางเดินก๊าซแบบ Discontinuous ดังรูปที่ 2.12 มีจุดประสงค์เพื่อต้องการบังคับให้ก๊าซแพร่ผ่านเข้าไปในชั้นการแพร่ของก๊าซ (Diffusion layer) บนขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยในการกำจัดน้ำได้ดีขึ้น



รูปที่ 2.12 รูปแบบของช่องทางเดินก๊าซแบบ discontinuous (Mennola, 2000)

ง) Spiral Channel

รูปแบบช่องทางเดินก๊าซแบบ Spiral เป็นอีกรูปแบบหนึ่งที่น่าสนใจ ดังรูปที่ 2.13 โดยมีข้อดีในเรื่องประสิทธิภาพของการกำจัดน้ำเนื่องจากมีลักษณะเป็นช่องทางเดินเดี่ยว (single channel) และเกิดการกระจายตัวของก๊าซออกซิเจนและน้ำได้ดีกว่าแบบ Serpentine



รูปที่ 2.13 รูปแบบของช่องทางเดินก๊าซแบบ spiral (Mennola, 2000)

2.5.2.6 วัสดุสำหรับทำแผ่นสะสมกระแส

คุณสมบัติของวัสดุที่จะมาทำแผ่นสะสมกระแสมีดังต่อไปนี้

- (1) นำไฟฟ้าได้ดี
- (2) นำความร้อนได้ดี
- (3) ก๊าซไม่สามารถซึมผ่านได้
- (4) มีความแข็งแรงต่อการบีบอัด
- (5) ทนต่อปฏิกิริยาเคมีและไม่มีสารเป็นพิษต่อเมมเบรนและตัวเร่งปฏิกิริยา
- (6) ราคาถูกและเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย
- (7) สามารถขึ้นรูปได้ง่าย

ปัจจุบันวัสดุที่มีความเหมาะสมที่สุดคือ แกรไฟต์ที่ผ่านกระบวนการอัดเรซิน (Resin impregnated) เพื่ออุดรูพรุนภายในเนื้อแกรไฟต์ แต่มีข้อเสียคือการขึ้นรูปยากและมีราคาแพง ดังนั้นจึงมีการศึกษาค้นคว้าเพื่อหาวัสดุทดแทนแกรไฟต์ โดยอาศัยคุณสมบัติของแผ่นสะสมกระแสข้างต้นเป็นเกณฑ์ในการเลือกวัสดุ

ในปัจจุบันโลหะได้รับความสนใจที่จะนำมาใช้แทนแกรไฟต์ นอกจากนี้วัสดุอื่นก็ยังได้รับการวิจัยเพื่อที่จะนำมาใช้ทดแทนแกรไฟต์ อาทิเช่น คาร์บอน-พอลิเมอร์ คอมโพสิต แต่ราคาของ Conducting polymer ชนิดนี้ยังแพงอยู่มาก ดังนั้นโลหะจึงได้รับการวิจัยและมีศักยภาพในการนำมาใช้ทดแทนแกรไฟต์ได้ดีกว่า โดยข้อดีของโลหะประกอบด้วย ก๊าซสามารถซึมผ่านเนื้อโลหะได้ยาก มีความนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี สามารถผลิตปริมาณมากในราคาถูก และให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าต่อปริมาตรสูง สำหรับข้อจำกัดของโลหะคือ ในภาวะการทำงานที่มีความเป็นกรดภายในเซลล์เชื้อเพลิงสูง มีผลให้เกิดปรากฏการณ์การป้องกันตัวเองของโลหะโดยจะเกิดฟิล์มบาง ซึ่งจะเคลือบอยู่บนผิวเพื่อลดการกัดกร่อนของตัวมันเอง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าแพสซิเวชัน (Passivation) ตัวอย่างของโลหะที่เกิดแพสซิเวชันได้ง่ายได้แก่ สแตนเลส นิกเกิล ไทเทเนียม อะลูมิเนียมและโลหะผสมของโลหะแต่ละชนิด ตัวอย่างของชั้นป้องกันที่อาจเกิดขึ้น ได้แก่ ออกไซด์ของโลหะ และออกไซด์ของโลหะผสม เป็นต้น ซึ่งมีผลให้ความต้านทานไฟฟ้าของโลหะสูงขึ้นซึ่งจำเป็นต้องแก้ไขเพื่อให้เหมาะสมสำหรับนำมาใช้งานกับเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้วิธีการเคลือบผิวโลหะ (Coating)

โลหะที่ได้รับความสนใจสำหรับนำมาทำเป็นแผ่นสะสมกระแสในเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วย ไทเทเนียม สแตนเลส และอะลูมิเนียม เป็นต้น โลหะดังกล่าวถูกนำมา

ทดลองใช้เพื่อทดแทน แกรไฟต์ โดยไทเทเนียมต้องอาศัยการเคลือบผิวด้วยดีบุก (Tin) ซึ่งราคาค่อนข้างแพงแต่สามารถขึ้นรูปได้ง่าย สำหรับสแตนเลสมีการศึกษาและทดลองใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงทั้งแบบเคลือบผิวและไม่เคลือบผิว

ข้อเสียของสแตนเลสบางชนิดหรือบางเกรด คือมีการปนเปื้อน (Contamination) จากไอออนของโลหะโครเมียม (Cr) เหล็ก และนิกเกิล หลังจากทดสอบใช้งานกับเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งมีผลให้ความสามารถในการนำไอออนของเมมเบรนลดลง

สำหรับอะลูมิเนียมเป็นโลหะผสม (Alloy) ที่มีน้ำหนักเบา นำความร้อนได้ดี ทนต่อการกัดกร่อน และสามารถขึ้นรูปได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือการเกิดฟิล์มบางเคลือบที่ผิวของอะลูมิเนียมหรือเกิดออกไซด์ (Oxide) ของอะลูมิเนียม ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติการนำไฟฟ้า แต่สามารถปรับปรุงผิวหน้าของอะลูมิเนียมได้โดยการชุบทอง เพื่อลดผลจากความต้านทานของออกไซด์อะลูมิเนียม แต่ก็ยังให้ผลที่ไม่ดีเท่าที่ควร

2.5.2.7 ห่อเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Stack)

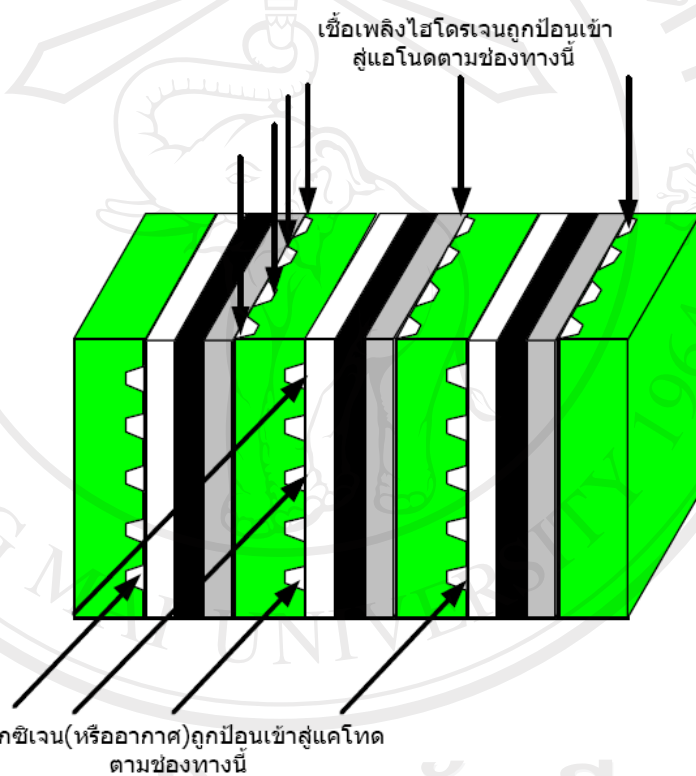
ห่อเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ประกอบด้วยเซลล์เดี่ยว แต่ละเซลล์เรียงซ้อนกันแบบอนุกรม เพื่อให้ได้จำนวนเซลล์ตามที่ต้องการ โดยองค์ประกอบของเซลล์เดี่ยว ประกอบด้วยแผ่น MEA ที่ถูกประกบด้วยแผ่นสะสมกระแส โดยป้องกันการรั่วของก๊าซในแต่ละด้านของแผ่น MEA ด้วยปะเก็น (Gasket) ซึ่งก๊าซที่ให้กับเซลล์เชื้อเพลิงจะกระจายไปทั่วผิวหน้าของ MEA โดยผ่านช่องทางเดินก๊าซบนผิวหน้าของแผ่นสะสมกระแส ซึ่งแผ่นปะเก็นจะประกบในแต่ละด้านของ MEA โดยจะเว้นช่องไว้สำหรับขั้วไฟฟ้าหรือบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา

การป้องกันการรั่วของก๊าซที่มีประสิทธิภาพ จะต้องมียูนิทของเมมเบรนตรงบริเวณขอบของแผ่น MEA เหลือพอสำหรับการประกบกับแผ่นปะเก็น พร้อมกับการยึดตรึงที่แน่นหนาด้วย (Mikkola, 2000) โดยจะมีแผ่นปิดท้าย (End plate) ในแต่ละด้านของตัวเซลล์เชื้อเพลิงช่วยเสริมความแข็งแรงอีกชั้นหนึ่ง

สำหรับการประกอบชิ้นเซลล์ ทำได้โดยการเพิ่มแผ่นสะสมกระแสที่มีหน้าของช่องทางเดินก๊าซทั้งสองหน้าหรือ Bipolar plate แทรกเข้าไปในเซลล์เดี่ยว ซึ่ง Bipolar plate จะทำหน้าที่เป็นทั้งขั้วไฟฟ้าบวกและลบในเวลาเดียวกัน ซึ่งจำนวนชิ้นเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับจำนวนของ Bipolar plate ที่แทรกเข้าไประหว่างเซลล์เดี่ยว การประกอบห่อเซลล์ดังแสดงในรูปที่ 2.14 จะต้องให้ความสำคัญกับวิธีการป้องกันการรั่วซึมของก๊าซ

ไฮโดรเจนและออกซิเจนเข้าหากันในแต่ละด้านของ MEA ซึ่งจะมีผลให้เกิดไฟลุคไหม้บนขั้วไฟฟ้าภายในเซลล์เชื้อเพลิงได้

นอกจากการป้องกันการรั่วซึมของก๊าซแล้ว ยังต้องให้ความสำคัญกับวิธีการยึดตรึงเพื่อให้องค์ประกอบของชั้นเซลล์ประกบกันอย่างสนิทแน่นหนา โดยจะมีผลโดยตรงต่อความต้านทานพื้นผิวสัมผัส (Contact resistance) ขององค์ประกอบภายในเซลล์เชื้อเพลิง ถ้าพื้นผิวสัมผัสไม่แน่นสนิทจะมีผลให้เกิดการลดลงของความต่างศักย์ (Potential drop) อย่างรวดเร็วขณะเกิดการดีังกระแสจากตัวต้านทานภายนอก



รูปที่ 2.14 การต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบอนุกรมโดยใช้แผ่นสองขั้ว

สำหรับปริมาณเชื้อเพลิงที่เซลล์เชื้อเพลิงใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า สามารถคำนวณได้โดยตรงจากปริมาณกระแสไฟฟ้า เนื่องจากปริมาณการใช้เชื้อเพลิงแปรผันโดยตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตออกมา เมื่อเกิดปฏิกิริยาสุดท้ายได้น้ำออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ สามารถทราบปริมาณน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาได้จากการคำนวณปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปโดยตัวต้านทานภายนอกเช่นเดียวกัน

อัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจนในปฏิกิริยาเป็นฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้าที่ให้ออกมา (Output current) ซึ่งกระแสไฟฟ้าในหน่วยแอมแปร์ หมายถึง จำนวนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านวงจรไฟฟ้าต่อวินาที ในแต่ละโมเลกุลของไฮโดรเจน จะประกอบด้วยอิเล็กตรอน 2 ตัว ดังนั้นการวัดกระแสไฟฟ้าก็คือ การวัดจำนวนของโมเลกุลของไฮโดรเจนที่แตกตัวให้อิเล็กตรอนออกมา ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและอัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจนสามารถคำนวณได้ดังนี้

1 ampere of current = 1 coulomb of electron per second

1 coulomb of electron per second = 6.241506×10^{18} electrons per second

จากความรู้พื้นฐานทางเคมีในการคำนวณปริมาณของสารจากสมการเคมี ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารในสมการเคมี มีดังนี้



$$\frac{1}{a} \text{ moles of } A = \frac{1}{b} \text{ moles of } B = \frac{1}{c} \text{ moles of } C = \frac{1}{d} \text{ moles of } D \quad (2.8)$$

จากปฏิกิริยาด้านขวาคาโนดของเซลล์เชื้อเพลิง



จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{mole of } H_2 &= \frac{1}{2} \text{ mole of } e^- \\ &= \frac{6.241506 \times 10^{18} / 6.022136 \times 10^{23}}{2} \\ &= 5.182136 \times 10^{-6} \text{ mole/second} \end{aligned} \quad (2.10)$$

แต่ 1 โมล เท่ากับ ก๊าซ $22.428782 \times 10^3 \text{ cm}^3$

ดังนั้นสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์ อัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจนต่อปริมาณกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ จะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} &= 5.182136 \times 10^{-6} \frac{\text{mole}}{\text{second}} \times 22.428782 \times 10^3 \frac{\text{cm}^3}{\text{mole}} \\ &= 0.116229 \frac{\text{cm}^3}{\text{second}} \\ &= 6.9737 \text{ sccm} \end{aligned}$$

ดังนั้นอัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจนสำหรับเซลล์เดียวคำนวณได้ดังนี้

$$\text{Hydrogen consumption rate} = 0.116229 \times \text{Amps} \times 60 \text{ second} \quad (\text{หน่วย sccm}) \quad (2.11)$$

ในกรณีที่นำเซลล์มาต่ออนุกรมกัน สามารถคำนวณอัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจนได้ดังนี้

$$\text{Hydrogen consumption rate} = 0.116229 \times n_{\text{cell}} \times \text{Amps} \times 60 \text{ second} \text{ (หน่วย sccm)} \quad (2.12)$$

โดยที่ n_{cell} : จำนวนเซลล์เดี่ยวที่นำมาต่ออนุกรมกัน

พิจารณาปฏิกิริยาด้านขั้วคาโทดของเซลล์เชื้อเพลิง



$$\frac{1}{2} \text{ mole of H}_2\text{O} = \frac{1}{4} \text{ moles of e}^- \quad (2.14)$$

$$\text{mole of H}_2\text{O} = 5.182136 \times 10^{-6} \text{ mole/second} \quad (2.15)$$

จะได้ว่าปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นเมื่อเซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์ จ่ายกระแส 1 แอมแปร์ ให้กับวงจรโหลดภายนอกได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} &= 5.182136 \times 10^{-6} \text{ mole} \times 18 \frac{\text{g}}{\text{mole}} \\ &= 93.3576 \frac{\mu\text{g}}{\text{sec}} \end{aligned}$$

ดังนั้นอัตราการเกิดน้ำขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีคือ ผลคูณระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายให้กับวงจรโหลดภายนอกกับอัตราการเกิดน้ำขึ้นภายในเซลล์ ตามสมการ

$$\text{Water production rate} = 93.3576 \times \text{Amps} \frac{\mu\text{g}}{\text{sec}} \quad (2.16)$$

ในกรณีที่นำเซลล์มาต่ออนุกรมกัน สามารถคำนวณอัตราการเกิดน้ำได้ดังนี้

$$\text{Water production rate} = 93.3576 \times n_{\text{cell}} \times \text{Amps} \frac{\mu\text{g}}{\text{sec}} \quad (2.17)$$

ปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงนอกจากน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาภายในเซลล์แล้วยังมีน้ำที่มาจากระบบทำความชื้นให้กับเซลล์เชื้อเพลิงด้วย

2.5.2.8 การไหลข้ามของเชื้อเพลิง (Fuel Crossover) และการไหลข้ามของกระแสภายใน (Internal Current)

แม้ว่าอิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิงมีคุณสมบัติที่นำเฉพาะไอออนเพียงอย่างเดียว แต่มักปรากฏว่าในสภาพเป็นจริงอิเล็กโทรไลต์กลับนำไอออนตรอนได้บ้างเล็กน้อย นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงจริงที่สร้างขึ้นมักพบว่ามีกระแสของไฮโดรเจนบางส่วนจากฝั่งแอโนดผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังฝั่งคาโทด ในขณะที่ไฮโดรเจนแพร่ผ่านมันจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับออกซิเจน เพราะยังสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่ได้ผลดีกระแสให้ไหลออกสู่วงจรภายนอก กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจึงมีชื่อเรียกว่า กระแสภายใน ส่วนปริมาณก๊าซเชื้อเพลิงเพียงเล็กน้อยซึ่งแพร่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ เรียกว่า "การไหลข้ามของเชื้อเพลิง" (Fuel crossover)

การไหลข้ามของเชื้อเพลิงและกระแสภายในสามารถพิจารณาเป็นสิ่งเดียวกันได้ กล่าวคือที่ทุกๆ หนึ่งโมเลกุลของไฮโดรเจนที่ไหลข้ามจากขั้วแอโนดไปยังขั้วคาโทด ไฮโดรเจนดังกล่าวจะทำปฏิกิริยาไป และเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนไปโดยเปล่าประโยชน์ 2 อิเล็กตรอน ปริมาณที่สูญเสียนี้เทียบเท่ากับการที่อิเล็กตรอน 2 ตัววิ่งข้ามภายในจากขั้วแอโนดไปยังขั้วคาโทดแทนที่จะเป็นการไหลผ่านวงจรภายนอก

โดยปกติการไหลข้ามของเชื้อเพลิงและอิเล็กตรอนมีค่าน้อย (ประมาณ $1-2 \text{ mA/cm}^2$) พิจารณาในแง่ของการสูญเสียพลังงาน เทอมผันกลับไม่ได้มีความสำคัญนัก อย่างไรก็ตาม สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีสมรรถนะการทำงานต่ำ เทอมการสูญเสียอันเนื่องจากการไหลข้ามของเชื้อเพลิง มีอิทธิพลมากพอที่จะทำให้สามารถสังเกตการตกลงของความต่างศักย์ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ที่สภาวะวงจรเปิด ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่มีการทำงาน ค่าความต่างศักย์ทั้งสองค่าควรมีค่าเท่ากัน แต่ในทางปฏิบัติค่าทั้งสองกลับไม่เท่ากัน สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ที่ทำงานที่อุณหภูมิต่ำหากมีการใช้อากาศเป็นสารให้ออกซิเจน และมีความดันในการทำงานเท่ากับบรรยากาศ ค่าความต่างศักย์ที่ได้รับมีค่าประมาณ 0.9 V ซึ่งมีค่าต่ำกว่าความต่างศักย์แบบผันกลับไม่ได้ (ประมาณ 1.2 V) ประมาณ 0.3 V เหตุผล ก็เพราะการเกิดกระแสภายในเซลล์เชื้อเพลิงนั่นเอง

การเกิดการไหลข้ามและกระแสภายในเป็นสิ่งที่วัดได้ยาก เพราะไม่สามารถใช้แอมมิเตอร์เสียบเข้าไปทำการวัดได้ ทางเดียวที่จะวัดได้ก็คือปริมาณการใช้ไปของก๊าซตั้งต้นที่สภาวะวงจรเปิดสำหรับเซลล์เดี่ยวหรือห่อเซลล์ขนาดเล็ก อัตราการทำปฏิกิริยาไปของก๊าซจะต่ำมากจนไม่สามารถวัดได้ด้วยมาตรวัดอัตราการไหลของก๊าซแบบปกติทั่วไป แต่

ควรวัดด้วย Bubble counting ปริมาณกระแสภายใน สามารถคำนวณจากปริมาณก๊าซ ดังกล่าวได้จาก

$$\text{ปริมาณการใช้ก๊าซขณะเปิดวงจร} = \frac{I}{2F} \quad \text{โมล/วินาที}$$

ย้ายข้างสมการ

$$I = (\text{ปริมาณการใช้ก๊าซ}) \times 2F \quad (2.18)$$

และสามารถคิดเป็นเทอมของความหนาแน่นกระแสโดยการหารด้วยพื้นที่ของเซลล์ ได้เป็น "ความหนาแน่นกระแสภายใน" (I_n) ค่าความหนาแน่นกระแสนี้มีค่าเท่ากับค่าความหนาแน่นกระแสที่สูญเสียไปอันเนื่องจากการไหลข้ามและกระแสภายใน เมื่อเราคิดผลของกระแสภายในซึ่งมีต่อความต่างศักย์เกินทุกชนิด ค่าความต่างศักย์เกินเนื่องจากพลังงานกระตุ้นควรปรับใหม่เป็น

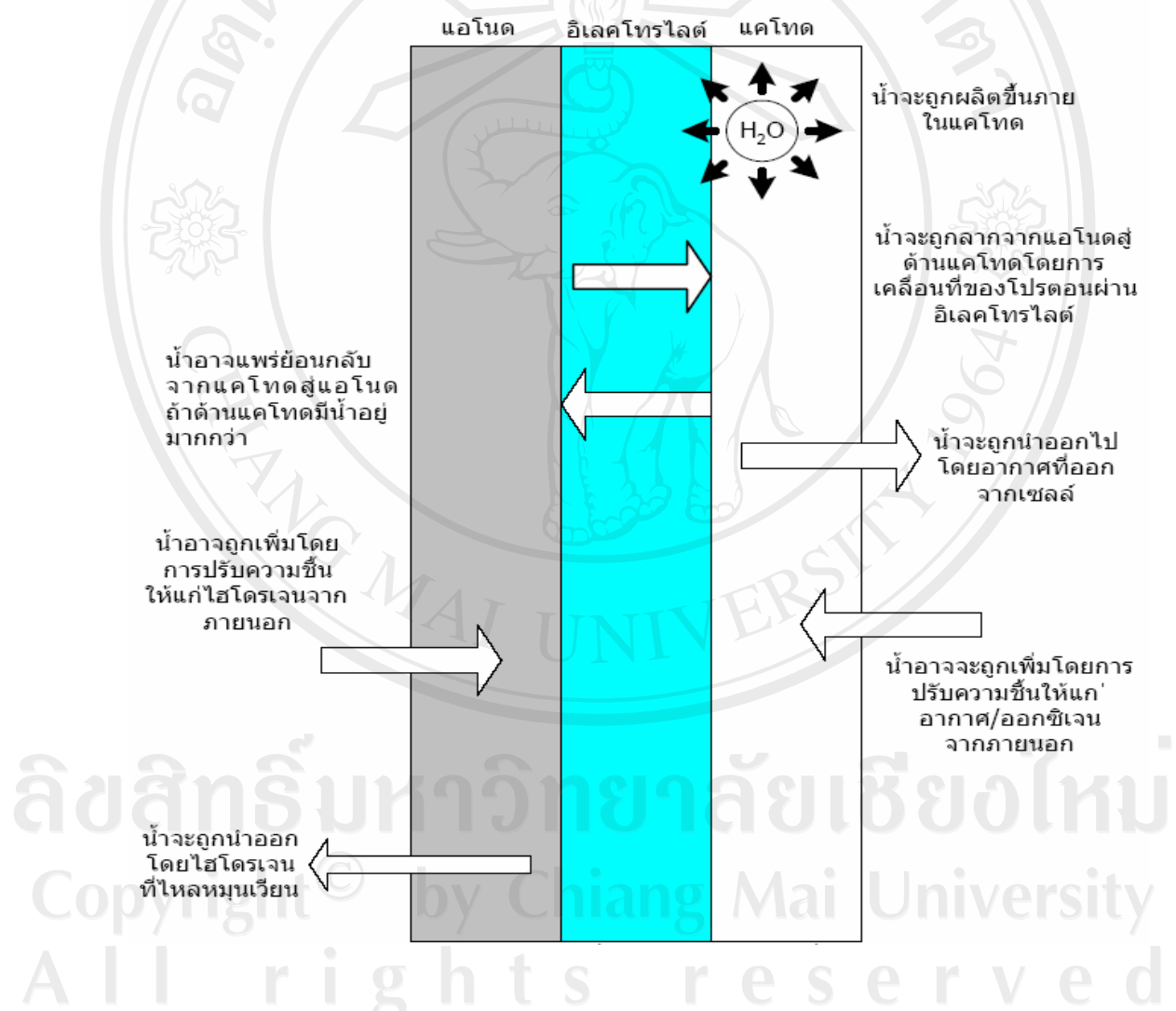
$$V = E - A \ln \left(\frac{i + i_n}{i_o} \right) \quad (2.19)$$

2.5.3 การจัดการน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบโพลีเมอร์ของแข็งจะมีคุณสมบัติในการนำโปรตอน ก็ต่อเมื่อเมมเบรนดังกล่าวต้องมีปริมาณน้ำในตัวเมมเบรนมากพอ ไม่เช่นนั้นแล้วค่าการนำไอออนจะตกลง แต่ในขณะเดียวกันปริมาณน้ำที่อยู่ในขั้วอิเล็กโทรดก็ต้องไม่มีมากเกินไป เพราะไม่เช่นนั้น ขั้วอิเล็กโทรดก็จะท่วมไปด้วยน้ำ และไปอุดรูพรุนจนทำให้ก๊าซไม่สามารถแพร่เข้าไปได้ การทำให้น้ำมีอยู่ในปริมาณที่เหมาะสมไม่มากไม่น้อยจนเกินไปเป็นสิ่งจำเป็น

ปรากฏการณ์ซับซ้อนอันหนึ่งที่มีความสำคัญคือ ในขณะที่โปรตอนเกิดการถ่ายเทจากขั้วแอโนดมายังคาโทด โปรตอนมักลากเอาโมเลกุลน้ำติดกับตัวมันมาด้วย กระบวนการดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า การลากแบบอิเล็กโตรออสโมติก (Electro-osmotic Drag) โดยปกติทุกๆการถ่ายเทโปรตอน 1 ตัว จะมีน้ำติดมาด้วยจำนวน 1 ถึง 2.5 โมเลกุล นี่ย่อมหมายความว่า หากเซลล์ทำงานที่ค่าความหนาแน่นกระแสสูงๆ อิเล็กโทรไลต์ทางด้านแอโนดอาจเกิดการแห้ง ถึงแม้ว่าทางฝั่งคาโทดจะยังคงชื้นอยู่ ปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ เมื่อเซลล์ทำงานที่ค่าความหนาแน่นกระแสสูง ปริมาณความร้อนที่ผลิตขึ้นมีค่าสูง ส่งผลให้อุณหภูมิของเซลล์มีค่าสูง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของทั้งเซลล์และก๊าซก่อให้เกิดปัญหาการแห้งของอิเล็กโทรไลต์มากขึ้น หากอุณหภูมิของอากาศมีค่าสูง

เกิน 60°C อากาศจะทำให้อิเล็กโทรดแห้ง เพราะน้ำที่ระเหยจากอิเล็กโทรดเข้าไปในอากาศมีค่าสูงกว่าปริมาณที่ผลิตได้จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง วิธีการแก้ปัญหาที่นิยมใช้คือ การทำให้อากาศ หรือ ไฮโดรเจนตรงทางเข้า (หรือทั้งสองด้าน) มีความชื้นมากขึ้น โดยอาศัยกระบวนการให้ความชื้น (Humidification) ก่อนเข้าตัวเซลล์ ข้อเสียของการทำแบบนี้คือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าลดลง แต่จากผลการทดลองยืนยันว่าการทำเช่นนี้ยังคงจำเป็น และช่วยให้เซลล์มีสมรรถนะการทำงานที่สูงขึ้น



รูปที่ 2.15 การส่งถ่ายน้ำจากกลไกต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นใน PEMFC

(<http://www.princeton.edu/.../Hydrogen/fuelcells.html>)

ปัญหาเรื่องการจัดการน้ำเป็นปรากฏการณ์ที่ยังซับซ้อนมากขึ้น หากพื้นที่หน้าตัดของเซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีการออกแบบซ้อนกันเป็นหอเซลล์ ยกตัวอย่างเช่น ในขณะที่อากาศเริ่มเข้าตัวเซลล์ อากาศยังคงแห้งอยู่ แต่เมื่อไหลผ่านหัวอิเล็กโทรด อากาศอาจมีความชื้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสม แต่เมื่อไหลถึงทางออกอากาศเริ่มอึดตัวไปด้วยความชื้น และทำให้ไม่สามารถอุ้มน้ำไว้ได้มากกว่านี้ ดังนั้นหากเซลล์มีพื้นที่หน้าตัดที่ใหญ่เกินไปพบว่าบางบริเวณของหัวอิเล็กโทรดอาจมีความแห้งมาก บางบริเวณอาจมีความชื้นที่เหมาะสม และบางบริเวณอาจมีน้ำมากเกินไป

การเคลื่อนที่ของน้ำจากปรากฏการณ์การส่งถ่ายแบบต่างๆ เป็นสิ่งที่สามารถคำนวณและควบคุมได้ เริ่มต้นจากด้านบนสุดของภาพ อัตราการผลิตน้ำและปริมาณการลากน้ำไปกับโปรตอน มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากระแส การคำนวณหาอัตราการระเหยของน้ำสามารถกระทำได้ อัตราการแพร่ของน้ำจากหัวคาโทดไปยังอานอด มีค่าขึ้นกับความหนาของเมมเบรนและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละด้าน หากมีการติดตั้งเครื่องให้ความชื้นต่อก๊าซตรงทางเข้าเซลล์ การควบคุมความชื้นบนเมมเบรนก็จะสามารถกระทำได้

2.5.4 การไหลของอากาศและการระเหยของน้ำ

ในกรณีทั่วไป จะใช้อากาศที่ไหลผ่านเซลล์เป็นตัวพาเอาผลิตภัณฑ์น้ำออกไปจากเซลล์ อากาศจะไหลผ่านเซลล์ในอัตราเร็วกว่าปริมาณที่ต้องให้ออกซิเจนส่วนที่จำเป็นแก่เซลล์ ถ้าหากเราป้อนอากาศในอัตราเร็วเท่ากับอัตราทางทฤษฎี (Stoichiometric rate) ก็เกิดการสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration Loss) ขึ้นอย่างมาก เนื่องจากอากาศบริเวณทางออกจากเซลล์จะมีปริมาณออกซิเจนเหลืออยู่น้อยมาก ในทางปฏิบัติ อัตราเกินกว่าทางทฤษฎีมวลสารสัมพันธ์ (Stoichiometry, λ) จะต้องมีความเท่ากับ 2 เป็นอย่างน้อย (Larminie, 2000) การคำนวณหาปริมาณอัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยาที่สัมพันธ์กับกำลังของเซลล์ และ λ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณน้ำ และความดันไออิ่มตัว

ปริมาณไอน้ำในอากาศ ขึ้นกับอุณหภูมิ สถานที่ สภาพอากาศ และปัจจัยอื่นๆ วิธีการวัดปริมาณไอน้ำในอากาศโดยตรงคือ การหาอัตราส่วนของน้ำต่อก๊าซแห้ง (ในที่นี้คืออากาศ) เรียกสัดส่วนนี้ว่า อัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio) ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute humidity) หรือ ความชื้นจำเพาะ (Specific humidity) ซึ่งมีนิยามดังนี้

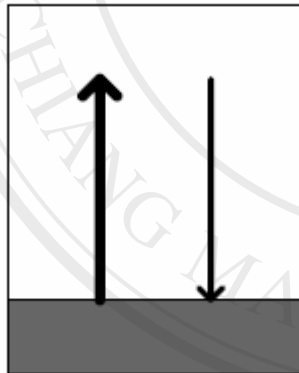
$$\text{อัตราส่วนความชื้น, } \omega = \frac{m_w}{m_a} \quad (2.20)$$

โดย m_w คือ มวลของน้ำที่อยู่ในอากาศตัวอย่าง

m_a คือ มวลของอากาศแห้ง

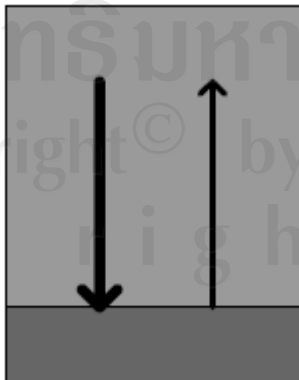
มวลรวมของอากาศ คือ $m_w + m_a$

การบอกความชื้นหรือแห้งของอากาศ ซึ่งมีความสำคัญต่อปรากฏการณ์การแห้ง จะบอก ด้วย “ความชื้นสัมพัทธ์” ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศในขณะนั้น ความดันไออิ่มตัวคือความดันย่อยของน้ำเมื่อของผสมอากาศกับน้ำอยู่ที่ภาวะสมดุล ซึ่ง อัตราการระเหยเท่ากับอัตราการกลั่นตัว อากาศไม่สามารถอุ้มน้ำไอน้ำไว้ได้มากกว่า ปริมาณนี้แล้ว นั่นคือ อากาศเกิดการ “อิ่มตัว”



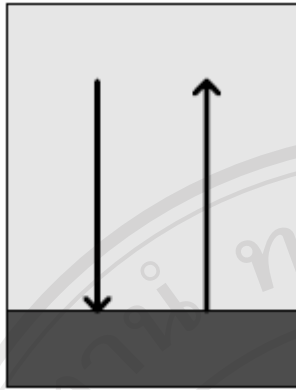
ของผสมน้ำกับอากาศ ความดันย่อยของไอน้ำน้อยกว่าความดันไออิ่มตัว น้ำที่กั้นถึงน้ำจะระเหยเร็วกว่าการกลั่นตัว อัตราของการระเหยเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างระหว่างความดันย่อยของไอน้ำ P_w และความดันไออิ่มตัว P_{sat}

$$\text{อัตราการระเหย} \propto (P_{sat} - P_w)$$



ของผสมน้ำกับอากาศ ความดันย่อยของไอน้ำมากกว่าความดันไออิ่มตัว ในกรณีนี้ อัตราการกลั่นตัวมากกว่าอัตราการระเหย การกลั่นตัวสามารถสังเกตได้ทีผ่นังของถึงน้ำ เวลานี้ อัตราการกลั่นตัวเป็นสัดส่วนกับผลต่างของความดันไอน้ำสองชนิด

$$\text{อัตราการกลั่นตัว} \propto (P_w - P_{sat})$$



ของผสมน้ำกับอากาศ ความดันย่อยของไอน้ำเท่ากับความดันไออิ่มตัว เกิดภาวะสมดุลไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในอากาศ อากาศเกิดการอิ่มตัวไม่สามารถรับน้ำเพิ่มได้อีก

รูปที่ 2.16 แผนภาพอธิบายความดันไอน้ำอิ่มตัว

อากาศชื้นซึ่งไม่สามารถรับไอน้ำเพิ่มได้อีก เรียกว่า “ถูกทำให้ชื้นอย่างเต็มที่” เกิดขึ้นได้เมื่อ $P_w = P_{sat}$ โดย P_w คือ ความดันย่อยของน้ำ และ P_{sat} คือ ความดันไออิ่มตัวของอากาศ นิยามความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) ในเทอมของสัดส่วนของความดันทั้งสอง

$$\text{ความชื้นสัมพัทธ์ } \phi = \frac{P_w}{P_{sat}}$$

สาเหตุของความซับซ้อนสำหรับ PEMFC คือการที่ค่าความดันไออิ่มตัว แปรผันกับอุณหภูมิแบบไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมากซึ่ง P_{sat} เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังแสดงในตาราง 2.1 และสมการ 2.21 โดย P_{sat} อาจประมาณค่าได้จาก สมการของ Antoine (Khalidi, 1994) เช่นกัน

$$P_{sat} = \exp\left(a - \frac{b}{T - c}\right) ; \text{ Pa} \quad (2.21)$$

เมื่อ $a = 23.1961$

$b = 3816.44$

$c = 46.13$

$T = \text{อุณหภูมิ (K)}$

ตารางที่ 2.1 ความดันไออิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ

T (°C)	ความดันไออิ่มตัว(kPa)
15	1.705
20	2.338
30	4.246
40	7.383
50	12.35
60	19.94
70	31.19
80	47.39
90	70.13

การพิจารณาหาจุดเหมาะสมที่จะทำการปรับความชื้นให้แก่ก๊าซก่อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงนั้น ต้องพิจารณาอิทธิพลของน้ำผลิตภัณท์ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานของเซลล์ประกอบด้วย โดยมีแนวทางคำนวณ (ในกรณีที่ใช้อากาศเป็นก๊าซปฏิกิริยา) ดังนี้

อัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจนในปฏิกิริยา

$$\text{อัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจนในปฏิกิริยา } H_{usage} = \frac{In}{2F} = \frac{P_e}{2V_c F} \quad \text{mole.s}^{-1}$$

ดังนั้น อัตราการผลิตน้ำ

$$H_2O_{produced} = \frac{P_e}{2V_c F} \quad \text{mole.s}^{-1}$$

$$\text{มวลโมเลกุลของน้ำ} = 18.02 \times 10^{-3} \quad \text{kg.mole}^{-1}$$

$$\therefore H_2O_{produced} = 9.34 \times 10^{-8} \times \frac{P_e}{V_c} \quad \text{kg.s}^{-1}$$

$$\text{อัตราการไหลของอากาศทางออกจากเซลล์} = (3.57 \times 10^{-7} \lambda - 8.29 \times 10^{-8}) \frac{P_e}{V_c} \quad \text{kg.s}^{-1}$$

ถ้าหากว่าเราไม่คิดปริมาณน้ำในอากาศขาเข้า

ในเวลา 1 วินาที ค่าอัตราส่วนความชื้น ω ของอากาศที่ออกจากเซลล์ คือ

$$\omega = \frac{m_w}{m_a} = \frac{9.34 \times 10^{-8}}{(3.57 \times 10^{-7} \times \lambda) - (8.29 \times 10^{-8})} \quad (2.22)$$

คิดให้น้ำผลิตภัณฑ์ระเหยเป็นไอน้ำ และทั้งไอน้ำและอากาศเป็นก๊าซอุดมคติ

จากมวลโมเลกุลของก๊าซ จะได้ว่า

$$\omega = \frac{18.016}{28.97} \frac{P_w}{P_a} = 0.622 \times \frac{P_w}{P_a} \quad (2.23)$$

เนื่องจากความดันรวมของระบบด้านคาโทด $P_a = P_t - P_w$

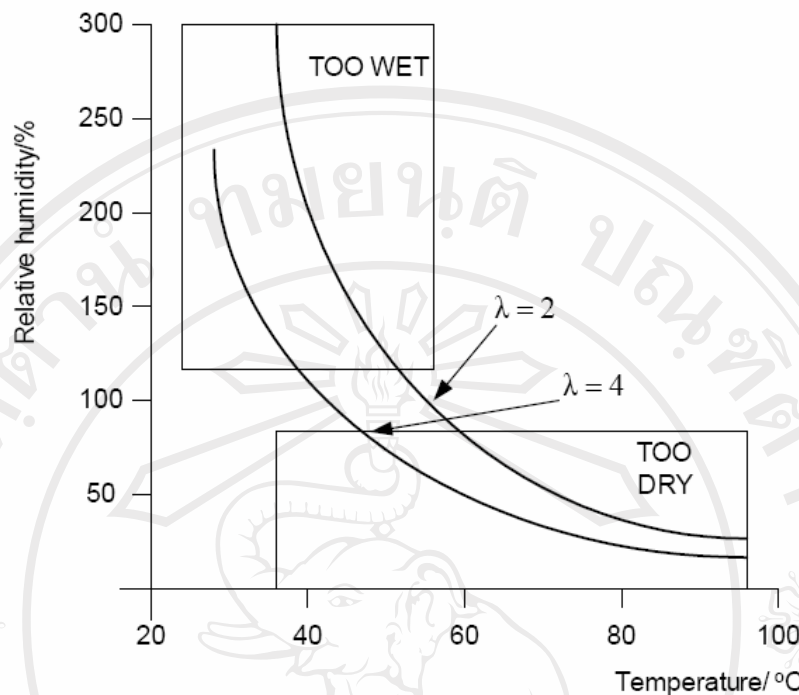
ดังนั้น

$$\omega = 0.622 \times \frac{P_w}{P_t - P_w}$$

$$\therefore P_w = \frac{\omega P_t}{\omega + 0.622} = \frac{0.421}{\lambda + 0.188} P_t \quad (2.24)$$

จากสมการ แสดงว่า P_t และ λ มีความสำคัญต่อความชื้น (P_w) จากกราฟ ในรูปที่ 2.17 เปรียบเทียบย่านความชื้นที่เหมาะสมซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ที่ค่า λ หนึ่งๆจะมีเพียงบางช่วงอุณหภูมิเท่านั้นที่จะทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ ของอากาศขาออก เท่ากับหรือใกล้เคียง 100% และ เมื่อพิจารณาในย่านอุณหภูมิที่ต่ำๆ ก็จำเป็นต้องใช้ค่า λ ที่สูงมาก ถึงจะสามารถรักษาค่าความชื้นสัมพัทธ์ให้เท่ากับ 100% ได้โดยไม่เกิดการท่วมขึ้น

สมมติว่าอากาศทางออกเป็นอากาศแห้ง และความดันรวมเท่ากับบรรยากาศการเลือกค่าอุณหภูมิทำงานที่ดีที่สุดสำหรับ PEMFC มีความสำคัญมากยิ่งขึ้นเพิ่มอุณหภูมิก็จะได้สมรรถนะที่ดี เนื่องจากความต่างศักย์เกินที่คาโทดลดลง ในขณะที่เมื่อเกิน 60 °C ปัญหาความชื้นก็เพิ่มขึ้น และทำให้ต้องเพิ่มน้ำหนักและราคาของอุปกรณ์ปรับความชื้น



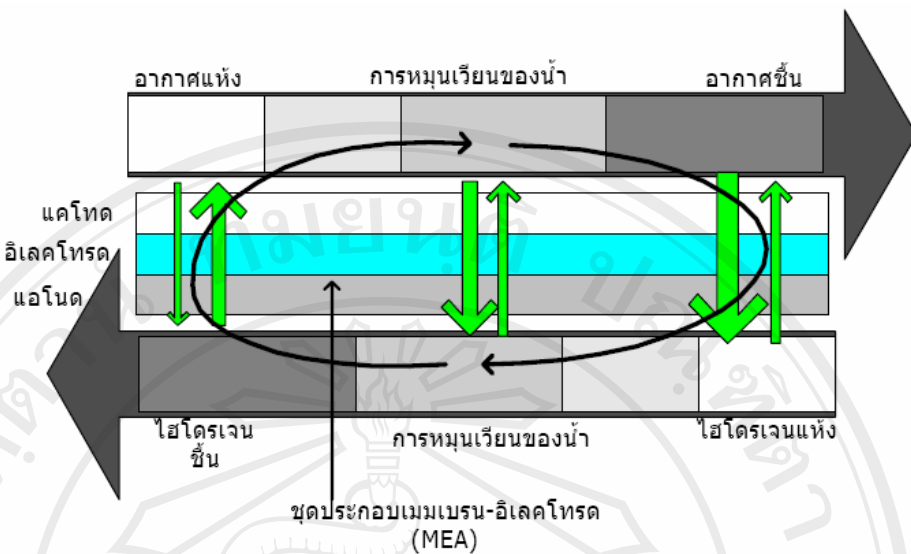
รูปที่ 2.17 กราฟความชื้นสัมพัทธ์- อุณหภูมิ สำหรับอากาศทางออกของ PEMFC ที่ λ ต่างกัน
(<http://www.princeton.edu/.../Hydrogen/fuelcells.html>)

2.5.5 การทำงานของเซลล์โดยไม่มีการปรับความชื้นจากภายนอก

หากเซลล์เชื้อเพลิงทำงานโดยไม่มีแรงดูดน้ำสุทธิจากอากาศไปยังคาโทดได้ ก็ไม่จำเป็นต้องมีการปรับความชื้นให้แก่ก๊าซก่อนป้อนให้แก่เซลล์ และฟลักซ์น้ำสุทธิผ่านเมมเบรนไม่จำเป็นต้องมีทิศทางเดียวกันตลอดทั้งเมมเบรนในเซลล์เชื้อเพลิงก็ได้

Buchi และ Srinivasan (1997) ได้เสนอโมเดลการออกแบบลักษณะการไหลของก๊าซในเซลล์แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ก๊าซทั้งสองจะเข้าเซลล์โดยเป็นก๊าซแห้ง แต่ก็สามารถมีความชื้นเพิ่มขึ้นในระหว่างช่องทางจนกระทั่งถึงทางออกได้

จากภาพที่ 2.18 คือการให้อากาศกับไฮโดรเจนวิ่งสวนทางกันผ่านชุดเมมเบรนกับอิเล็กโทรด (MEA) การเกิดการแพร่ย้อนกลับจากคาโทดไปยังแอโนด แตกต่างไปในแต่ละจุด ในขณะที่แรงดึงน้ำจากแอโนดไปคาโทด จะเกิดขึ้นเท่า ๆ กันตลอดทั้งแนวเซลล์เนื่องจาก Electro-osmotic drag ซึ่งเราก็ดึงดูดด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ช่วยทำให้การกระจายความชื้นบนอิเล็กโทรดเกิดขึ้นเท่า ๆ กัน โดยใช้ขนาดพื้นที่อิเล็กโทรดที่แคบลง ทำให้ Gas diffusion layer หนาขึ้น เพื่อให้ดูดน้ำได้มากขึ้น



รูปที่ 2.18 ก๊าซปฏิกิริยาไหลในทิศทางข้ามกันเพื่อช่วยกระจายความชื้น
(Buchic และ Srinivasan, 1997)

2.5.6 การปรับความชื้นจากภายนอก (External Humidification)

เซลล์เชื้อเพลิงขนาดเล็กสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องปรับความชื้นจากภายนอก แต่ในเซลล์เชื้อเพลิงขนาดใหญ่จะไม่สามารถทำได้ดีนัก อุณหภูมิสูงกว่า 60°C เป็นอุณหภูมิที่ต้องการในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เพราะเป็นการช่วยลดการสูญเสียต่างๆ ได้ โดยเฉพาะการสูญเสียเนื่องจากพลังงานกระตุ้น แม้ว่าน้ำหนักที่เพิ่มราคาที่จะเพิ่มขึ้น และความซับซ้อนของระบบปรับความชื้นจะเป็นประเด็น ปัญหาสำคัญ แต่ก็ยังคุ้มค่าที่จะใช้ระบบปรับความชื้นจากภายนอก หากยังต้องการประสิทธิภาพสูงสุดจากเซลล์เชื้อเพลิง

ปัญหาสำคัญมากอย่างหนึ่งก็คือ ต้องใช้น้ำที่บริสุทธิ์มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ความไม่บริสุทธิ์ของน้ำที่ผ่านเมมเบรนจะมีผลร้ายต่อประสิทธิภาพของเมมเบรน ปกติเราจึงใช้วิธีการควบแน่นน้ำจากปฏิกิริยาในเซลล์แล้วนำกลับไปใช้ใหม่

วิธีการปรับความชื้นที่ทำกันในห้องปฏิบัติการ ทำได้ง่ายๆ โดยการผ่านก๊าซปฏิกิริยาไปในน้ำซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ไม่เหมาะสมนักในการใช้งานจริง ระบบที่ใช้งานในภาคสนามปกติแล้ว จะเป็นระบบที่ดัดแปลงจากระบบที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศทั่วไป คือโดยการฉีดละอองน้ำให้แก่ก๊าซโดยตรง ซึ่งมีข้อดีอีกประการหนึ่งคือ ช่วยทำให้ทำให้ก๊าซเย็น ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในกรณีที่มีการอัดความดันก๊าซ