

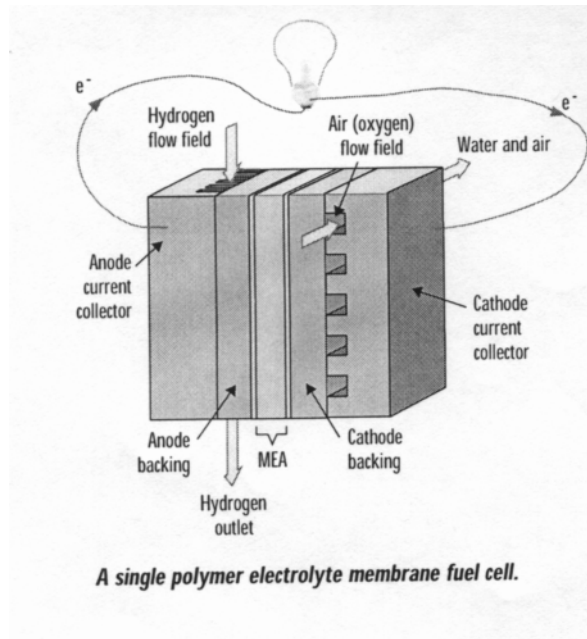
THE POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE FUEL CELL

น.อ.สพสุข ลีละบุตร
รองผู้อำนวยการกองวิชาฟิสิกส์และเคมี

เมื่อประมาณ ๑๐ ปีที่ผ่านมา กำลังของเครื่องยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงดูเหมือนจะเป็นนิยายทางวิทยาศาสตร์เสียมากกว่าจะเป็นความจริง แต่ในปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับการขนส่งมีความเป็นไปได้มาก โดยใช้ The Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell แบบของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีเมมเบรน (Membrane) ของเซลล์เชื้อเพลิงอย่างง่ายนี้เรียกว่า “PEM” (The Polymer Electrolyte Membrane) สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงมีอยู่หลายชนิดขึ้นอยู่กับอิเล็กโตรไลต์ที่ใช้ ดังจะได้อธิบายต่อไป

The Polymer Electrolyte Membrane

โดยปกติสารอิเล็กโตรไลต์คือ สารซึ่งแตกตัวให้ประจุบวกและประจุลบในน้ำทำให้สารละลายเกิดการนำไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโตรไลต์ในโพลีเมอร์อิเล็กโตรไลต์เมมเบรนของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแบบพลาสติก สารอิเล็กโตรไลต์มีอยู่มากมายขึ้นอยู่กับผู้ผลิตแต่ที่ใช้แพร่หลายมากที่สุดคือ Nafion ซึ่งผลิตโดยบริษัท DuPont คล้ายคลึงกับพลาสติกห่อของใช้สำหรับซีลอาหาร วัสดุเมมเบรนมีเนื้อสารมากกว่าพลาสติกที่ใช้ห่อของธรรมดาที่มีความหนาจาก ๕๐ ถึง ๑๗๕ ไมครอน (ขนาดกระดาษ A4 สำหรับเขียนโดยทั่วไป จะมีความหนาเพียง ๒๕ ไมครอน) ดังนั้นความหนาของโพลีเมอร์อิเล็กโตรไลต์คล้ายกับละอองความชื้นเล็ก ๆ บนพลาสติก PEM (บางครั้งไม่ได้อยู่ในสารละลายที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย) ซึ่งพร้อมที่จะดูดซับไอออนลบโดยยึดจับไว้ภายในโครงสร้างของ PEM มีเพียงไอออนบวกที่บรรจุอยู่ในเมมเบรนจะเคลื่อนย้ายผ่านเมมเบรนออกมาเป็นอิสระ PEM ในเซลล์เชื้อเพลิง ประจุบวกคือไฮโดรเจนไอออน หรือโปรตอนซึ่งมีการแลกเปลี่ยนประจุกันที่เมมเบรน โดยโปรตอนจะเคลื่อนที่จากขั้วแอโนด (Anode) ผ่านเมมเบรนไปยังขั้วแคโทด (Cathode) ซึ่งเป็นหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง หากปราศจาก การเคลื่อนที่ของไอออนภายในเซลล์เชื้อเพลิง ก็จะไม่เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า เพราะว่าโครงสร้าง ของ PEM ซึ่งทำด้วย Teflon เป็นวัสดุที่แข็งและคงตัว แม้ว่าจะมีความบางแต่มีประสิทธิภาพในการแยกก๊าซไฮโดรเจนออกจากอากาศ PEM ไม่ได้เหนียวนำอิเล็กตรอนและโครงสร้างของ PEM โดยธรรมชาติแล้วจะเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง อิเล็กตรอนไม่สามารถ วิ่งผ่านเมมเบรนแต่จะวิ่งผ่านลวดภายนอกไปยังอีกด้านหนึ่งของเซลล์ทำให้ครบวงจรเกิดกำลังงานไฟฟ้า สามารถหมุนมอเตอร์ไฟฟ้าหรือทำให้รถยนต์วิ่งได้



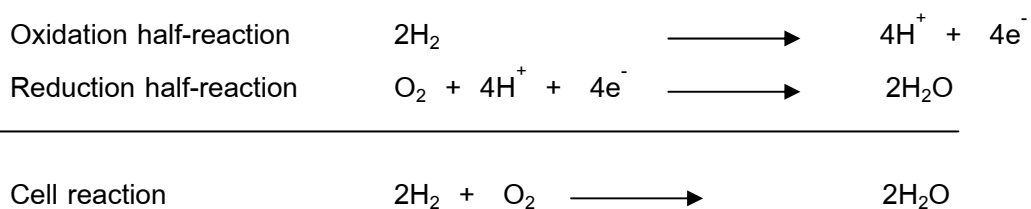
ขั้วไฟฟ้า (The Electrode)

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีประกอบด้วย ปฏิกิริยาครึ่งเซลล์ออกซิเดชัน เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด (Anode) และปฏิกิริยาครึ่งเซลล์รีดักชันเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด (Cathode) ขั้วแอโนด (Anode) และขั้วแคโทด (Cathode) ถูกแยกจากกันโดยเมมเบรนซึ่งอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ในปฏิกิริยาครึ่งเซลล์ออกซิเดชัน จะเกิดไฮโดรเจนไอออนเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไปยังขั้วแคโทด (Cathode) และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วแอโนด (Anode) ไปยังขั้วแคโทด (Cathode) ในวงจรภายนอก (External Circuit) ในปฏิกิริยาครึ่งเซลล์รีดักชันออกซิเจนจากอากาศไหลผ่านจากขั้วแคโทด (Cathode) และรวมตัวกับไฮโดรเจนไอออนและอิเล็กตรอน เกิดเป็นน้ำและความร้อนปฏิกิริยาครึ่งเซลล์ทั้งสองนี้ ปกติจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิต่ำ ประมาณ 80°C ของเซลล์เชื้อเพลิง PEM ดังนั้นจึงใช้ คตะไลส์ (Catalyst) ช่วยเร่งปฏิกิริยาทั้งสองให้เกิดเร็วขึ้น คตะไลส์ (Catalyst) จะมีประสิทธิภาพดีเมื่อใช้ขั้ว Platinum ซึ่งมีราคาแพง

ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะได้กระแสไฟฟ้า น้ำ และความร้อน ฉะนั้นการหล่อเย็น (Cooling) จึงจำเป็นต้องนำมาใช้ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ประมาณ 80°C ณ อุณหภูมินี้ผลิตภัณฑ์น้ำที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด (Cathode) จะเป็นทั้งน้ำและไอน้ำ ซึ่งจะถูกกำจัดออกจากเซลล์โดยการผ่านอากาศ

Electrochemistry of Fuel Cells



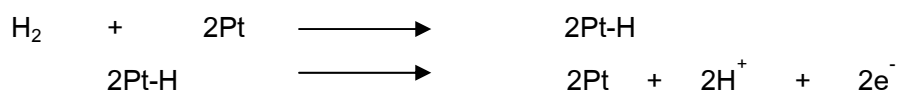
ขบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นแต่ละขั้วจะซับซ้อนทีเดียวที่ขั้วแอโนด (Anode) ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) จะแพร่กระจายไปตามทางจนถึงขั้ว platinum (Pt) พลาตินั่มคะตะไลส์จะแยกโมเลกุลของ H_2 ออกเป็นสองไฮโดรเจนอะตอม (H) จะปล่อยอิเล็กตรอน เกิดเป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) ซึ่งจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไปยังขั้วแคโทด (cathode) ขณะที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านจากขั้วแอโนด (Anode) ตามวงจรภายนอกไปยังขั้วแคโทด (cathode)

ปฏิกิริยาของออกซิเจน (O_2) หนึ่งโมเลกุลที่ขั้วแคโทด (Cathode) จะเกิดสี่อิเล็กตรอนในขบวนการรีดักชัน (ดังสมการข้างต้น) ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นขั้นตอน ที่ขั้วพลาตินั่ม (Pt) จะทำให้ ก๊าซออกซิเจนเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้รวดเร็วขึ้น ที่อุณหภูมิประมาณ $80^\circ C$ เหมาะสำหรับการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง PEM ยังถูกจำกัดด้วยขั้นตอนแรกโดยอัตราการเกิดอย่างช้า ๆ ของครึ่งปฏิกิริยารีดักชันของ O_2 ซึ่งช้ามากกว่าร้อยละเก้าของปฏิกิริยาครึ่งเซลล์ออกซิเดชันของ H_2

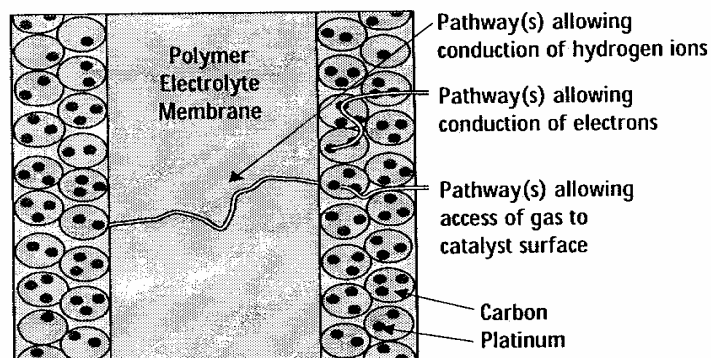
Why a Fuel Cell Goes “Platinum”

ครึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแต่ละขั้ว สามารถเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วที่ผิวของ Pt catalyst เท่านั้น พลาตินั่มมีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่จะเกิดการสร้างพันธะ H และ O ในขั้น Intermediate ได้ตามต้องการ ที่ขั้วของปฏิกิริยาจะสามารถผ่านขั้น Intermediate ไปสู่ผลิตภัณฑ์สุดท้าย (The final product) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากตัวอย่างขบวนการที่ขั้วแอโนดเมื่อโมเลกุล H_2 แตกตัว Pt จะสร้างพันธะกับ H อะตอม และจะปลดปล่อย H อะตอมออกมาเป็น $H^+ + e^-$ ดังสมการ



ความต้องการที่จะสร้างพันธะ (Bonding) กับ H อะตอม จะต้องไม่อ่อนเกินไปและไม่แข็งแรงจนเกินไป ซึ่งคุณลักษณะเฉพาะที่ดีของคะตะไลส์ แต่ความเป็นจริงแล้วคะตะไลส์ที่ดีที่สุดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง PEM จะมีราคาแพง หนทางเลือกที่ดีที่สุดคือพยายามทำโครงสร้างของคะตะไลส์ให้มีชั้น (Layer) ให้มากที่สุดเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการสร้างพันธะ ขั้วอิเล็กโทรดอื่น ๆ ประกอบด้วยแท่งคาร์บอน (C) พรุณ ซึ่งสามารถสร้างพันธะได้น้อยกว่าขั้ว Pt การที่ขั้วอิเล็กโทรดมีพรุณเพื่อที่จะให้ก๊าซแพร่กระจายผ่านไปยังขั้วซึ่งทำหน้าที่เป็นคะตะไลส์ด้วย ทั้งขั้ว Pt และ C จะเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนได้ดี ดังนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านขั้วได้อย่างอิสระ อนุภาคของ Pt มีขนาดเล็ก เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ ๒ นาโนเมตร (nm) ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) ซึ่งมีผลทำให้ Pt มีพื้นที่ผิวเป็นจำนวนมากเพื่อที่จะสัมผัสกับโมเลกุลของก๊าซ ซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะที่ดีของคะตะไลส์ และเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปได้ ดังเช่นกระแสในเซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น



Polymer electrolyte membrane with porous electrodes that are composed of platinum particles uniformly supported on carbon particles.

Water and Fuel Cell Performance

การก่อกำเนิดน้ำเป็นกุญแจสำคัญที่มีผลต่อระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEM แม้ว่าน้ำคือผลพลอยได้ของปฏิกิริยาเซลล์เชื้อเพลิงและถูกกำจัดออกจากเซลล์ระหว่างการทำงาน ซึ่งเป็นสิ่งที่น่าสนใจว่าทั้งเซลล์เชื้อเพลิงและอากาศที่เข้ามาภายในเซลล์เชื้อเพลิง จำเป็นจะต้องมีความชื้น สภาวะเช่นนี้น้ำจะทำให้ PEM เกิดเป็นไฮเดรต ความชื้นของก๊าซจำเป็นจะต้องควบคุมอย่างระมัดระวัง ละอองน้ำที่เล็กเกินไปจะป้องกันเมมเบรนจากการเหนียวน้ำ ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ทำให้กระแสภายในเซลล์ลดต่ำลง

ถ้าอากาศผ่านขั้วแคโทด (Cathode) ซ้ำเกินไป อากาศไม่สามารถพาพาบน้ำทั้งหมดที่ขั้วแคโทด (Cathode) ออกจากเซลล์เชื้อเพลิงได้จะเกิด "Floods" เซลล์อาจจะเกิดอันตรายเพราะ O_2 ไม่เพียงพอที่จะสามารถผ่านทะลุน้ำไปถึงขั้วแคโทด(cathode) ที่คะตะไลส์ได้

The membrane/Electrode Assembly

การประกอบขั้ว Electrode กับ Membrane เข้าด้วยกันมีโครงสร้างมากมายหลายแบบ ขบวนการผลิตหนึ่งในจำนวนนั้นก็คือ Los Alamos National Laboratory เป็นสถาบันวิจัยเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพมาก สารคะตะไลส์ได้ถูกเตรียมขึ้นโดยในขั้นตอนแรกใช้ของเหลวที่เรียกว่า "Ink" เป็นการผสมเข้าด้วยกันตามสัดส่วนที่เหมาะสมของคะตะไลส์ (ผงแพลตินัมกระจายอยู่บนคาร์บอน) ซึ่งสารละลายของสารเมมเบรนจะละลายอยู่ในแอลกอฮอล์ ของเหลว "Ink" ถูกเตรียมขึ้นมาใหม่อีกครั้งและได้นำมาประยุกต์เป็นพื้นผิวของเมมเบรน ซึ่งเป็นของแข็งตามสัดส่วนที่แตกต่างกันไปตามกรรมวิธีวิธีง่าย ๆ ก็คือ การทาคะตะไลส์ "Ink" โดยตรงแล้วปล่อยให้แห้งบนผิวของเมมเบรน ชั้นคะตะไลส์เปียกและเมมเบรนนำไปให้ความร้อนจนกระทั่งชั้นของคะตะไลส์แห้ง ชั้นเมมเบรนจะถูกกลับอีกด้านหนึ่งและทำเช่นเดียวกับครั้งแรก จะทำให้มีชั้นคะตะไลส์บนเมมเบรนทั้งสองด้าน ขั้วเมมเบรนจะถูกรีดน้ำออก

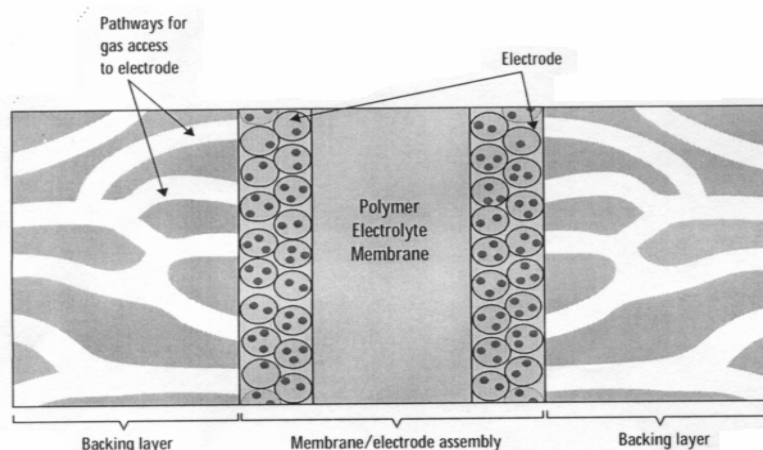
(Rehydrated) โดยการจุ่มลงในสารละลายกรดที่เดือดเบา ๆ เพื่อให้มันใจว่าเมมเบรนสามารถทำให้เกิดไฮโดรเจนอออน ที่ต้องการสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงในการทำงาน ขั้นตอนสุดท้ายผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่น ขั้วเมมเบรนอิเล็กโทรดนี้ สามารถที่จะใส่เข้าไปในโครงสร้างเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป

The backing Layers

ชั้นผนังกันของเซลล์เชื้อเพลิง (Backing Layers) ถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดกระแสมากที่สุดซึ่งได้รับจากเมมเบรนอิเล็กโทรด ด้านหนึ่งจะต่อกับขั้วแอโนด (Anode) อีกขั้วหนึ่งจะต่อกับขั้วแคโทด (Cathode) ซึ่งโดยปกติจะทำด้วยกระดาษคาร์บอนที่มีรูพรุนหรือผ้าคาร์บอนซึ่งมีความหนา ๑๐๐ ถึง ๓๐๐ ไมครอน (ประมาณ ๔ - ๑๒ แผ่นกระดาษ) ชั้นผนังกันที่ทำด้วยวัสดุคาร์บอนสามารถนำอิเล็กตรอนออกจากขั้วแอโนด (Anode) ไปยังขั้วแคโทด (Cathode) รูพรุนของสารที่ใช้ทำผนังกันเซลล์เชื้อเพลิงจะต้องมีประสิทธิภาพในการแพร่กระจายของก๊าซ (Reactant Gas) กับตัวเร่ง (Catalyst) บนเมมเบรนอิเล็กโทรด ในการแพร่กระจายหมายถึงการไหลของโมเลกุลก๊าซจากส่วนที่มีความเข้มข้นสูง (ด้านนอกผนังแผ่นกัน) ซึ่งก๊าซจะไหลไปตามทางที่ได้ออกแบบไว้ ส่วนที่มีความเข้มข้นต่ำ ด้านในของผนังแผ่นกันติดกับชั้นคะตะไลส์ซึ่งก๊าซจะถูกหลอมรวมกันโดยปฏิกิริยา โครงสร้างของชั้นผนังกันจะทำให้ก๊าซแยกตัวออกขณะที่แพร่กระจาย ดังนั้นเมื่อก๊าซไหลทะลุผ่านผนังกันก๊าซจะถูกสัมผัสติดกับผิวของคะตะไลส์เมมเบรนทั้งหมด

ชั้นผนังกันยังช่วยกำจัดน้ำระหว่างการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งน้ำในปริมาณที่น้อยมาก ๆ หรือมากเกินไปจะทำให้เซลล์หยุดทำงาน การแก้ไขโดยเลือกใช้วัสดุที่ทำผนังกันเพื่อควบคุมปริมาณไอน้ำให้มีความชื้นที่เหมาะสมที่ไหลไปยังเมมเบรนอิเล็กโทรด

วัสดุที่ทำผนังกันยังช่วยให้พื้นที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด (Cathode) ออกจากเซลล์โดยไม่ทำให้เกิดการ “Floods” ชั้นผนังกันจะเปื่อยขึ้นอยู่เสมอซึ่งทำด้วย Teflon จะไม่เกิดการ “Clogged” ของน้ำ และจะป้องกันการแพร่ของก๊าซอย่างรวดเร็วซึ่งจำเป็นสำหรับการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่ขั้วอิเล็กโทรด



Enlarged cross-section of a membrane/electrode assembly showing structural details.

อัตราการเกิดความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิง (Rate of heat Generation in an Operating Fuel Cell)

พื้นที่ 100 cm^2 ของเซลล์ ที่ความดัน ๑ บรรยากาศ 80°C , 0.7 Volt และ 0.6 A/cm^2 (total current of 60 A)

ขบวนการเกิดความร้อนของเซลล์สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{Power due to heat} &= \text{Total power generated} - \text{Electrical power} \\
 P_{\text{heat}} &= P_{\text{total}} - P_{\text{electrical}} \\
 &= (V_{\text{ideal}} \times I_{\text{cell}}) - (V_{\text{cell}} \times I_{\text{cell}}) \\
 &= (V_{\text{ideal}} - V_{\text{cell}}) \times I_{\text{cell}} \\
 &= (1.16 \text{ V} - 0.7 \text{ V}) \times 60 \text{ A} \\
 &= 0.46 \text{ V} \times 60 \text{ coulombs / sec} \times 60 \text{ seconds/min.} \\
 &= 1650 \text{ J/min}
 \end{aligned}$$

เซลล์เชื้อเพลิงนี้สามารถผลิตความร้อนประมาณ 1.7 KJ ทุก ๆ นาทีของการทำงาน ขณะที่การผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 2.5 KJ ต่อนาที

เอกสารอ้างอิง

๑. <http://www.cedelftnl>
๒. <http://www.eduction.lanl.gov/resources/fuelcells>
๓. <http://www.ott.doe.gov>
๔. <http://www.ukace.org/>