



2.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบพื้อเอ็ม (Proton exchange membrane fuel cell) [1]

เซลล์เชื้อเพลิงแบบพื้อเอ็ม มีลักษณะการทำงานคล้ายกับแบตเตอรี่ แตกต่างกันตรงที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตและให้กระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตลอดเวลาที่มีการป้อนเชื้อเพลิงเข้าไปอย่างสม่ำเสมอ อันได้แก่การป้อนแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน โดยเซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตเป็นหน่วยย่อย ๆ แล้วนำมาต่อเข้าด้วยกันแบบอนุกรมหรือแบบขนาน เกิดเป็นชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel - cell stack) ทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

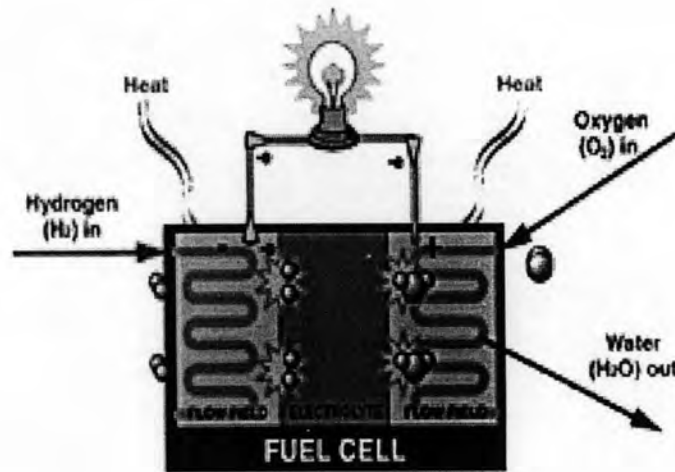
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพื้อเอ็ม คือ ไฟฟ้า น้ำและความร้อน โดยไม่เกิดแก๊สที่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ภาวะการทำงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิตัวระหว่าง 60 – 100 องศาเซลเซียสและให้กระแสไฟฟ้าที่มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง จึงเหมาะสมกับการนำไปใช้ในงานที่ต้องมีการเคลื่อนที่ เช่น ยานพาหนะ ส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ ขั้วลบหรือแคโทด ขั้วบวกหรือแอโนด สารละลายอิเล็กโทรไลต์ แผ่นนำกระแสไฟฟ้าเชื้อเพลิงซึ่งได้แก่ แก๊สไฮโดรเจน จะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนผ่านกระบวนการปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าอันประกอบด้วย (i) ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดจะสลายแก๊สไฮโดรเจนกลายเป็นโปรตอน (H^+) โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาและอิเล็กตรอนอิสระที่ได้จะถ่ายเทไปยังขั้วแคโทดผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอก ในขณะที่ (ii) ปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดจะรวมแก๊สออกซิเจนและโปรตอนที่เคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์มายังขั้วแคโทดเพื่อทำปฏิกิริยาให้กลายเป็นน้ำ ดังนั้น เซลล์เชื้อเพลิงจึงสามารถให้กระแสไฟฟ้าโดยตรง และให้น้ำเป็นผลผลิตของระบบ โดยไม่มีการปลดปล่อยสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

2.2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพื้อเอ็ม [2]

เซลล์เชื้อเพลิงแบบพื้อเอ็มประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ 3 ส่วน ได้แก่ ขั้วไฟฟ้า 1 คู่ (แคโทดและแอโนด) อิเล็กโทรไลต์และตัวเร่งปฏิกิริยา เชื้อเพลิงซึ่งถูกนำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน จากรูป 2.1 แก๊สไฮโดรเจนจะถูกป้อนเข้าไปที่ขั้วแอโนด ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นโดยมีแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นโปรตอนอิเล็กตรอนและความร้อนจะถูกผลิตออกมาตามสมการ (2.1)



โปรตอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีความสามารถในการนำโปรตอนสูง (High proton conductivity) แต่ไม่ยอมให้นำอิเล็กตรอนผ่านได้ (Electron barrier) ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกเพื่อใช้เป็นกระแสไฟฟ้า จากนั้นทั้งโปรตอนและอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดเพื่อทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนที่ถูกป้อนเข้ามายังขั้วดังกล่าว ปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นจากการที่มีแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้นำเป็นผลิตภัณฑ์ตามสมการ (2.2)



รูปที่ 2.1 กลไกการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ [2]

เซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้มีอิเล็กโทรไลต์และขั้วไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญและมีลักษณะพิเศษเฉพาะ ดังนั้นจึงขอกล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

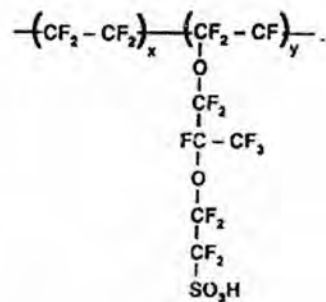
2.2.1 อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) [3]

องค์ประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ในการขับเคลื่อนให้เซลล์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพคือส่วนของพอลิเมอร์เมมเบรนที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ซึ่งยึดติดกับขั้วไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โมเลกุลไฮโดรเจนสัมผัสกับออกซิเจนเพื่อป้องกันการเกิด

ปฏิกิริยาขึ้นโดยตรง และยอมให้ประจุบวก (ไฮโดรเจนไอออนหรือโปรตอน) เคลื่อนที่ผ่านจาก แอโนดไปยังแคโทดเท่านั้น นอกจากนี้อิเล็กโทรไลต์จะแสดงสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าเนื่องจากเป็น พอลิเมอร์อินทรีย์ ดังนั้น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านเส้นลวดโลหะไปยังอีกด้านหนึ่งของ เซลล์เพื่อให้ครบวงจรนั่นเอง สิ่งเจือปนโดยเฉพาะพวกประจุของโลหะมักจะมีผลต่อการนำไฟฟ้า ของเมมเบรน ถ้าประจุของโลหะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไปได้ ประจุดังกล่าวจะเคลื่อนที่แทน โปรตอนส่งผลทำให้สภาพการนำไฟฟ้าของเมมเบรนลดลง

การส่งผ่านของโปรตอนจะเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยโมเลกุลของน้ำที่เคลื่อนที่ไป ในระหว่างสายโซ่ในเมมเบรน ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงานโมเลกุลของไฮโดรเจนจะถูกทำให้ แตกตัวออกที่ขั้วแอโนดและเกิดเป็นโปรตอนและอิเล็กตรอน (ปฏิกิริยาออกซิเดชัน) เมื่อโปรตอน เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนและอิเล็กตรอนไหลไปตามวงจรทำให้เกิดความต่างศักย์และนำไปสู่กระแส ไฟฟ้าในที่สุด ดังนั้นในเมมเบรนต้องมีน้ำเพื่อที่จะทำให้โปรตอนเคลื่อนที่ผ่านไปได้ ข้อจำกัดนี้ทำให้ เมมเบรนชนิดนี้ไม่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของน้ำได้ เนื่องจากน้ำจะระเหยออก ไปทำให้สภาพนำของโปรตอนลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้ามีน้ำมากเกินไปจะทำให้น้ำท่วมเซลล์

เมมเบรนที่รู้จักกันดีและได้รับความนิยมคือแนฟิออนที่ผลิตจากบริษัทดูปองต์ (Dupont) โดยจะเตรียมจากเปอฟลูออโรอีทิลโพรพิลไวนิลอีเทอร์ (Perfluoro-sulfonylfluoride ethyl-propyl-vinyl ether) มีโครงสร้างทางเคมีแสดงในรูป 2.2



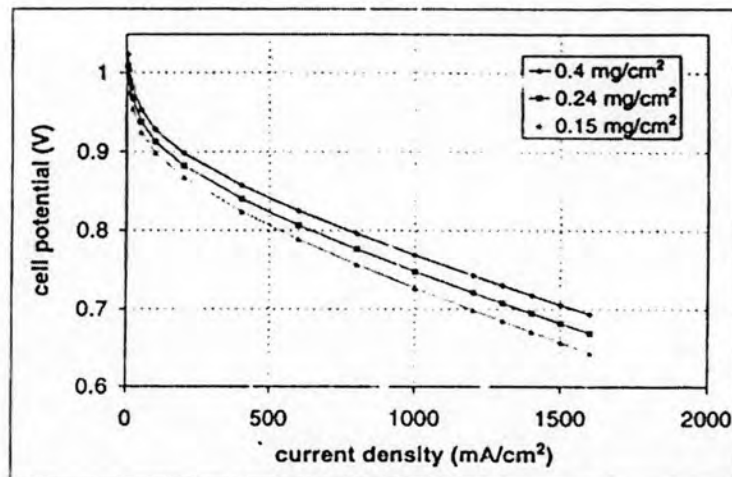
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของ PFSA polymer (Nafion™) [3]

แนฟิออนมีหลายขนาดและความหนาที่แตกต่างกัน จะใช้สัญลักษณ์ตัว N ตามด้วยเลข 3 หรือ 4 ตัว ตัวเลข 2 ตัวแรกจะหมายถึงน้ำหนักที่ถูกลดด้วย 100 และตัวเลข 2 ตัวหลังจะแทน ความหนาของเมมเบรนในหน่วยมิล (1 มิล = 1/1000 นิ้ว = 0.0254 มิลลิเมตร) โดยทั่วไป แนฟิออนจะหนาอยู่ที่ 2 3.5 5 7 10 มิล (50 89 127 178 254 ไมโครเมตรตามลำดับ) ตัวอย่างเช่น แนฟิออน117 จะหมายถึงมีน้ำหนัก 1100 และความหนา 7 มิล (0.178 มิลลิเมตร)

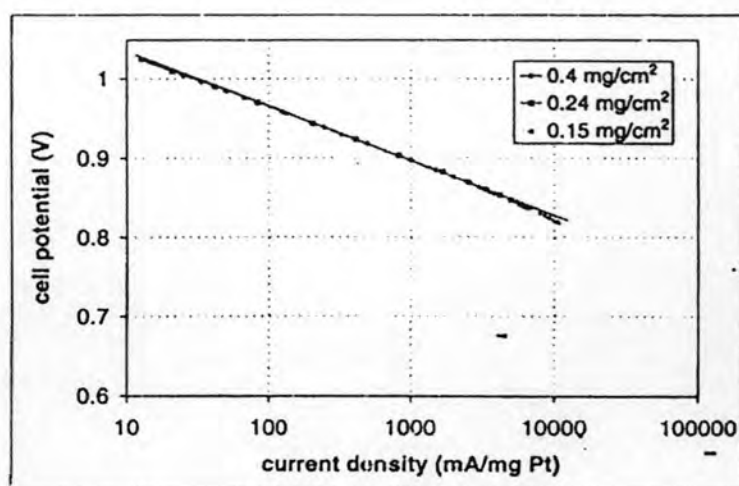
2.2.2 ขั้วไฟฟ้า (Electrode) [3]

ขั้วไฟฟ้าควรมีความต้านทานต่ำหรือความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงและมีความพรุนสูง ความพรุนของขั้วไฟฟ้าจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าและช่วยให้การเคลื่อนที่ของสารไปยังบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา [1]

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์คือแพลทินัม การสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากการเคลื่อนที่ของโปรตอนและจากการแพร่ผ่านของแก๊สเข้าไปในชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถแก้ไขได้โดยการทำให้ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาบางลง ผลจากการเพิ่มปริมาณของแพลทินัมต่อพื้นที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ความต่างศักย์เพิ่มขึ้นที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเดียวกัน ดังรูปที่ 2.3 โดยอยู่บนสมมติฐานที่ว่าการใช้ไปของแพลทินัมมีค่าเท่ากับความหนาแน่นของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่คิดต่อน้ำหนักการเกิดปฏิกิริยาของแพลทินัมจะพบว่าไม่มีความแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.4 วิธีที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานจึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มปริมาณของแพลทินัมหากแต่เป็นการเพิ่มการใช้ไปของแพลทินัมในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาให้มากขึ้น



รูปที่ 2.3 ผลของปริมาณแพลทินัมต่อของกราฟโพลาร์ไรเซชัน (H_2/O_2 fuel cell) [3]



รูปที่ 2.4 ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ณ ภาวะการใช้ปริมาณแพลทินัมที่แตกต่างกัน [3]

2.2.3 ชั้นแก๊สแพร่ (Gas diffusion layers) [3]

คือชั้นที่อยู่ระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว ถึงแม้ว่าจะไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีโดยตรงแต่ก็มีหน้าที่สำคัญดังนี้

1. ทำหน้าที่ส่งผ่านแก๊สจากช่องทางการไหลไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ทำหน้าที่เป็นเส้นทางส่งน้ำจากบริเวณชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังช่องทางการไหล
3. เป็นตัวเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยากับแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว โดยจะยอมให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังวงจรภายนอก
4. เป็นตัวช่วยเพิ่มแรงเชิงกลให้กับหน่วยประกอบขั้วไฟฟ้าเมมเบรน (MEAs) โดยป้องกันไม่ให้หน่วยประกอบขั้วไฟฟ้าเมมเบรนจมลงไปในช่องทางการไหล

สมบัติของชั้นแก๊สแพร่ที่จำเป็นต่อการนำมาใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลประกอบด้วย

1. ต้องมีความพรุนเพียงพอต่อการยอมให้แก๊สเข้าไปทำปฏิกิริยารวมถึงการไหลของน้ำที่ได้มาจากปฏิกิริยาด้วย โดยขึ้นอยู่กับการออกแบบช่องทางการไหล ลักษณะการกระจายตัวของแก๊ส
2. มีค่าการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนที่ดี
3. ขนาดของรูพรุนชั้นแก๊สแพร่จะต้องไม่ใหญ่เกินไปเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีขนาดเล็กมาก
4. มีความแข็งแรงเชิงกลอย่างเพียงพอ รวมถึงมีความยืดหยุ่นเป็นอย่างดี

2.2.4 แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว (Bipolar plates) [3]

แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ประกอบด้วยสมบัติดังต่อไปนี้

1. นำไฟฟ้าได้เป็นอย่างดีเนื่องจากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะถูกต่อเข้าด้วยกันในรูปอนุกรมทางไฟฟ้า
2. แก๊สไม่สามารถแพร่ผ่านได้
3. เนื่องจากนำไปใช้งานในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจึงต้องมีความแข็งแรงอย่างเพียงพอและมีน้ำหนักเบา
4. นำความร้อนได้เป็นอย่างดีกรณีใช้ในการนำความร้อนออกจากเซลล์เชื้อเพลิงไปยังส่วนที่ใช้หล่อเย็น

2.3 ชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (Stack) [3]

จากทฤษฎีทราบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของไฮโดรเจนและออกซิเจนจะเท่ากับ 1.23 โวลต์ แต่ในการทำงานจริงค่าที่ได้จะน้อยกว่าค่าทางทฤษฎี โดยค่าจะอยู่ที่ประมาณ 1 โวลต์ ถ้าเซลล์เดี่ยวหนึ่งเซลล์ต้องการค่ากำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์ จำเป็นต้องมีเซลล์ที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากกว่า 1000 แอมแปร์ โดยใช้พื้นที่เกิดปฏิกิริยามากกว่า 1000 ตารางเซนติเมตร และนอกจากนี้ยังต้องใช้สายไฟที่มีความหนามากในการที่จะดึงกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงผ่านตัวดึงกระแสไฟฟ้า (Load) ภายนอกเพื่อที่จะลดความสูญเสียจากความต้านทานลง วิธีการแก้ปัญหาในประเด็นดังกล่าววิธีหนึ่งก็คือการนำเอาเซลล์เดี่ยวหลาย ๆ เซลล์มาต่อเข้าด้วยกันแบบอนุกรมเป็นชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell stack)

2.3.1 ขนาดของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

ขั้นแรกในการออกแบบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงคือการคำนวณหาพื้นที่ผิวที่ต้องการเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา (Active area) และจำนวนของเซลล์ที่จะใช้ในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง แล้วจึงดูว่านำไปใช้งานในลักษณะใดเช่นในงานที่ต้องการค่ากำลังไฟฟ้า งานที่ต้องการค่าศักย์ไฟฟ้าหรือช่วงของศักย์ไฟฟ้า งานที่ต้องการค่าประสิทธิภาพ และข้อจำกัดทางด้านขนาดและน้ำหนัก ซึ่งความต้องการเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดการออกแบบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

การบอกประสิทธิภาพการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงอธิบายโดยใช้กราฟโพลาริเซชัน เช่นกัน นอกจากนี้ยังอาจดูประสิทธิภาพการทำงานได้จากภาวะที่ใช้งานเช่น ความดัน อุณหภูมิ ความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิง

ค่ากำลังไฟฟ้า (W) ที่ได้จากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงหาได้จาก

$$W = V_{st} \cdot I \quad (2.3)$$

โดยที่ V_{st} = ความต่างศักย์ไฟฟ้ารวมของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (volt)
 I = ค่ากระแสไฟฟ้า (A)

ค่าความต่างศักย์ของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเกิดจากการนำความต่างศักย์ของเซลล์เดี่ยวแต่ละเซลล์มารวมกัน

$$V_{st} = \sum_{i=1}^{N_{cell}} V_i = \bar{V}_{cell} \cdot N_{cell} \quad (2.4)$$

โดยที่ V_i = ความต่างศักย์ไฟฟ้าของแต่ละเซลล์เดี่ยว (volt)
 \bar{V}_{cell} = ความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของแต่ละเซลล์เดี่ยว (volt)
 N_{cell} = จำนวนเซลล์ในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

ค่ากระแสไฟฟ้าหาได้จากค่าความหนาแน่นกระแสและพื้นที่ผิวเกิดปฏิกิริยาของเซลล์

$$I = i \cdot A_{cell} \quad (2.5)$$

โดยที่ i = ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A/cm^2)
 A_{cell} = พื้นที่ผิวเกิดปฏิกิริยาของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (cm^2)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นกระแสในรูปของกราฟโพลาริเซชัน

$$V_{cell} = f(i) \quad (2.6)$$

ประสิทธิภาพเชิงศักย์ไฟฟ้า (η) ของเซลล์เชื้อเพลิงหาได้จาก

$$\eta = \frac{W_{el}}{W_{H_2}} \quad (2.7)$$

โดยที่ W_{el} = ค่าพลังงานที่ผลิตได้ (A)
 W_{H_2} = ค่าพลังงานที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาของไฮโดรเจน (J/s)

$$W_{el} = I \cdot V_{cell} \quad (2.8)$$

โดยที่ I = กระแสไฟฟ้า (A)
 V_{cell} = ความต่างศักย์ไฟฟ้า (volt)

ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยา

$$N_{H_2} = \frac{I}{nF} \quad (2.9)$$

จะได้

$$W_{H_2} = \Delta H \frac{I}{nF} \quad (2.10)$$

โดยที่ N_{H_2} = ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา (mol/s)
 ΔH = ค่าความร้อนของการทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเป็นน้ำสถานะของเหลวมีค่า 286 kJ/mol

ดังนั้นสมการที่ 2.7 เขียนใหม่ได้เป็น

$$\eta = \frac{V_{cell}}{1.482} \quad (2.11)$$

กรณีคิดจากค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเป็นน้ำสถานะแก๊ส, $\Delta H = 241$ kJ/mol จะได้เป็น

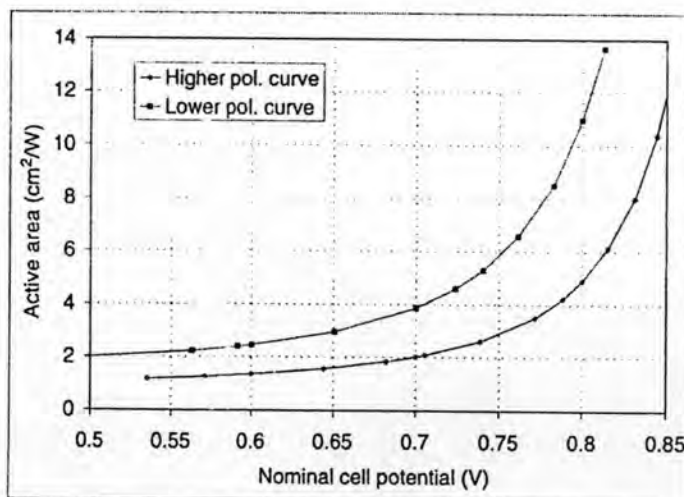
$$\eta = \frac{V_{cell}}{1.254} \quad (2.12)$$

โดยที่ V_{cell} = ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง (volt)

1.482, 1.254 = Thermoneutral potential, $\frac{\Delta H}{nF}$ (volt)

โดยปกติแล้วจำนวนของเซลล์ในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะถูกกำหนดด้วยความต่างศักย์ที่ต้องการ พื้นผิวเกิดปฏิกิริยาจะอยู่ระหว่าง 50 ถึง 300 ตารางเซนติเมตรขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน และค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการ ในงานที่ใช้พื้นผิวเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะเป็นการยากที่จะให้ภาวะในการทำงานให้สม่ำเสมอ และจำนวนของเซลล์มากที่สุดที่ใช้ในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจำกัดด้วยแรงที่ใช้ในการอัด ความแข็งแรงของโครงสร้างและความดันตกคร่อมในเซลล์

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เท่ากับ 0.7 โวลต์จะต้องใช้พื้นผิวเกิดปฏิกิริยามากกว่าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ถึง 40 % หรือการเลือกที่ 0.8 โวลต์/เซลล์นั้นจะต้องใช้ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีพื้นผิวเกิดปฏิกิริยามากกว่าเลือกที่ 0.7 โวลต์ถึงสองเท่า อย่างไรก็ตามการเลือกความต่างศักย์เซลล์ที่สูงขึ้นก็หมายถึงจะช่วยให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและลดการสิ้นเปลืองในการใช้เชื้อเพลิง ในการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงส่วนมากจึงเลือกใช้ที่ 0.6 – 0.7 โวลต์ แต่ในบางงานเช่นนำไปใช้ในทางด้านอวกาศอาจต้องการสูงถึง 0.8 โวลต์

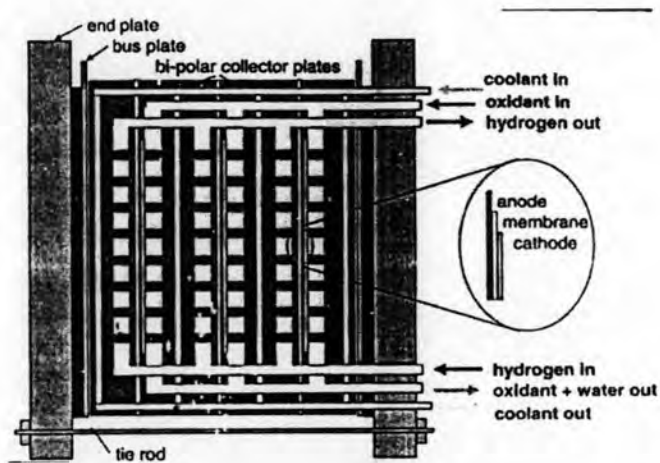


รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงกับศักย์ไฟฟ้าที่ต้องการ [3]

2.3.2 ลักษณะของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (Stack Configuration)

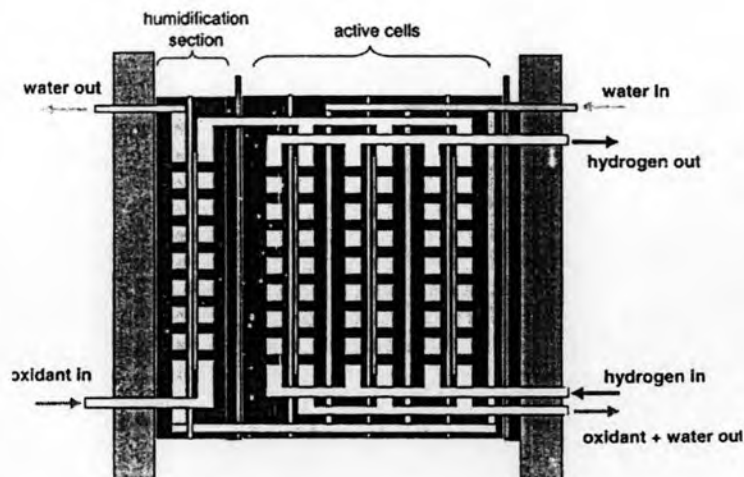
ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยเซลล์เดี่ยวหลายเซลล์ต่อเข้าด้วยกันแบบอนุกรม คือขั้วแคโทดของเซลล์หนึ่งจะต่อกันเข้ากับขั้วแอโนดของอีกเซลล์หนึ่งแบบอนุกรมไฟฟ้า อิเล็กตรอนจะผ่านส่วนที่เป็นของแข็งของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงออกไปยังวงจรภายนอกและโปรตอนจากขั้วแอโนดจะวิ่งผ่านอิเล็กโทรไลต์มายังขั้วแคโทดและเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีขึ้นที่บริเวณพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยากับสารออกซิไดส์

ส่วนประกอบหลัก ๆ ของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงคือหน่วยประกอบขั้วไฟฟ้าเมมเบรน (MEAs) แผ่นปะเก็น (Gasket) แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว (Bipolar plate) แผ่นเก็บกระแสไฟฟ้า (Current collector) และแผ่นประกบ (End plate) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างโดยรวมของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง [3]

บางครั้งชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะประกอบด้วยหน่วยให้ความร้อนขึ้นกับแก๊สก่อนที่จะเข้ามาในเซลล์เชื้อเพลิงโดยอาจจะอยู่ภายในตัวชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเลยหรืออาจจะอยู่แยกออกมาอีกส่วนหนึ่งในทั้ง 2 กรณีจะใช้น้ำสำหรับการหล่อเย็นและการให้ความร้อน รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่แก๊สผ่านหน่วยให้ความร้อนก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์ ในขณะที่น้ำเข้าสู่บริเวณ Active portion ของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะได้รับการให้ความร้อนจากนั้นค่อยเข้าสู่หน่วยให้ความร้อนต่อไป การถ่ายโอนความร้อนและน้ำระหว่างน้ำและแก๊สที่เข้ามาจะเกิดขึ้นในเมมเบรน ข้อดีของการใช้ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงลักษณะนี้คือทางด้านความอึดตัวของระบบการให้ความร้อนกับแก๊สและลดการเกิดกระจายตัวของความร้อน (Heat dissipation)

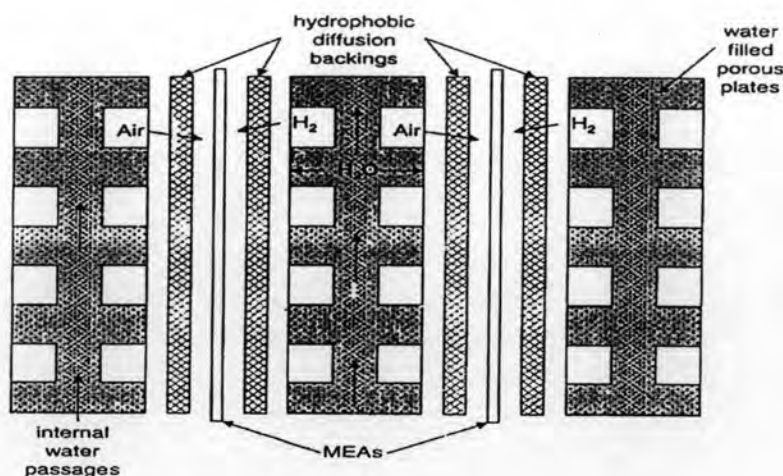


รูปที่ 2.7 โครงสร้างของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีระบบการให้ความชื้นอยู่ภายใน [3]

ลักษณะการทำงานจากรูปที่ 2.8 พบว่าน้ำจะผ่านเข้ามาในแต่ละเซลล์ โดยที่แต่ละเซลล์จะถูกแยกออกจากกันด้วยแผ่นแกรไฟต์ที่มีความพรุน (Porous plate) แผ่นแกรไฟต์นี้จะยอมให้น้ำเคลื่อนที่ผ่าน อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน อากาศและความดันในระบบเป็นสิ่งที่ต้องควบคุมให้ดีเพราะจะส่งผลต่อการเกิดน้ำภายในเซลล์ ขนาดของรูพรุนในแผ่นแกรไฟต์จะเป็นตัวควบคุมจุดฟองอากาศ (Bubble point) เพื่อป้องกันแก๊สที่ใช้เป็นสารตั้งต้นจะได้ไม่เกิดการผสมกัน ข้อเสียของแนวคิดแบบนี้คือจะไม่สามารถแยกความร้อนออกจากระบบการจัดการกับน้ำและทำงานได้กับระบบที่ใช้ความดันต่ำเท่านั้น

สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงคือ

1. การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของแก๊สที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง
2. การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของแก๊สเชื้อเพลิงในแต่ละเซลล์
3. การรักษาอุณหภูมิในแต่ละเซลล์ให้คงที่
4. ลดการสูญเสียจากความต้านทานให้น้อยที่สุด (วัสดุที่ใช้ การประกอบ แรงดันที่ใช้ในการอัด)
5. แก๊สที่เข้ามาต้องไม่เกิดการรั่วไหล (จากภายในเซลล์ไปยังภายนอกเซลล์)



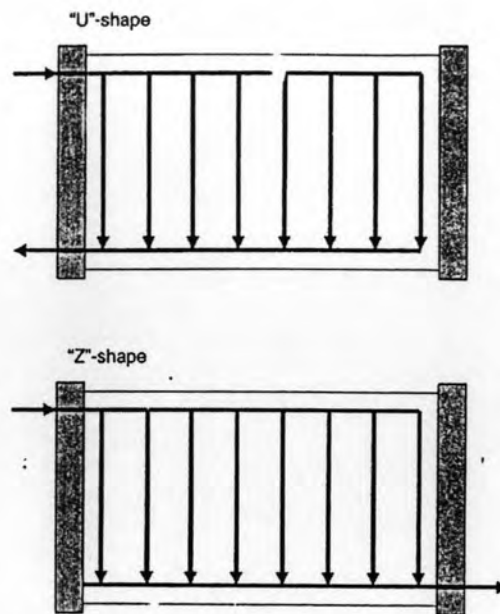
รูปที่ 2.8 ลักษณะของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีระบบการจัดการกับน้ำภายในเซลล์โดยใช้

Porous plate [3]

2.3.3 การกระจายตัวแบบสม่ำเสมอของแก๊สเชื้อเพลิงไปยังแต่ละเซลล์ (Uniform distribution of reactant to each cell)

เนื่องจากประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของแก๊สที่เข้ามา จึงจำเป็นต้องให้แต่ละเซลล์ได้รับแก๊สเข้าไปในปริมาณที่เท่ากัน การให้แก๊สเข้าไปไม่เท่ากันจะทำให้เกิดปัญหาด้านประสิทธิภาพ การจะให้แก๊สกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทำได้โดยการป้อนแก๊สเข้าไปในเซลล์ในรูปแบบการไหลแบบขนาน อาจจะเป็นทางด้านภายนอกหรือภายใน ช่องทางการไหลภายนอกสามารถทำได้แต่ต้องให้มีขนาดใหญ่พอเพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอ แต่จะสามารถนำมาใช้ได้เฉพาะกับลักษณะการไหลแบบตัดขวาง (Cross-flow) และมักมีปัญหาด้านการรั่วไหล ช่องทางการไหลแบบภายในนิยมนำมาใช้กันมากในเซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็มเพราะไม่เพียงแต่แก้ปัญหาด้านการรั่วไหลได้ยังสามารถใช้ประโยชน์ได้มากกว่า

รูปแบบช่องทางการไหลผ่านชั้นเซลล์เชื้อเพลิงมักจะเป็นในลักษณะตัวยู (U-shape) คือขาเข้าและขาออกจะอยู่ในด้านเดียวกันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง การไหลของแก๊สขาเข้าและขาออกจะอยู่ในทิศทางตรงกันข้าม ส่วนในช่องทางการไหลลักษณะตัวแซด (Z-shape) คือขาเข้าและขาออกจะอยู่ด้านตรงกันข้ามของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง การไหลของแก๊สขาเข้าและขาออกจะขนานซึ่งกันและกัน จากรูป 2.9 ด้วยการออกแบบขนาดให้เหมาะสมทั้งคู่จะให้ผลด้านการกระจายตัวด้านอัตราการไหลอย่างสม่ำเสมอในแต่ละเซลล์



รูปที่ 2.9 ลักษณะการไหลของแก๊สภายในชั้นเซลล์เชื่อมเพลิง [3]

ขั้นตอนการคำนวณความดันตกในช่องทางการไหลและในชั้นเซลล์เชื่อมเพลิงทั้งหมดและผลของการกระจายตัวของอัตราการไหล (Q) จะเกี่ยวข้องกับ $N-1$ รอบ ซึ่ง N คือจำนวนของเซลล์ในชั้นเซลล์เชื่อมเพลิง การไหลในเครือข่ายใด ๆ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์พื้นฐานของความต่อเนื่องและการอนุรักษ์พลังงานดังต่อไปนี้

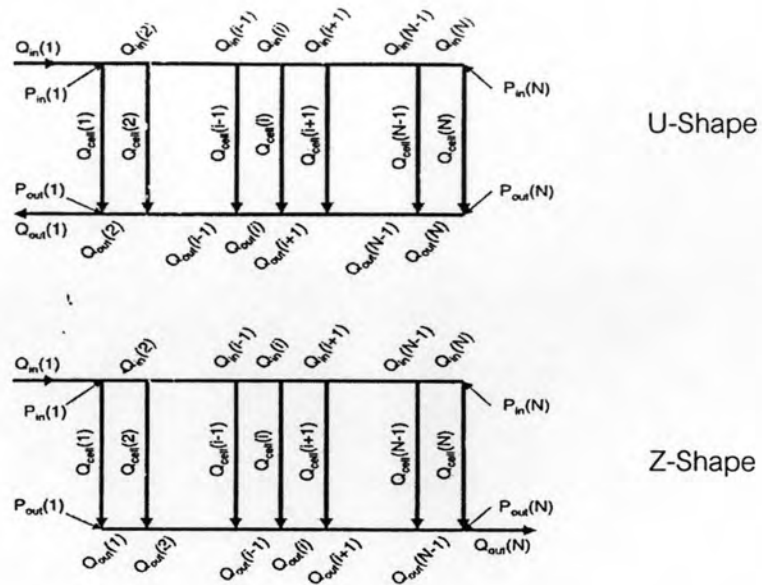
1. การไหลเข้าในช่องทางใด ๆ จะต้องเท่ากับการไหลออกจากช่องทางนั้น ๆ
2. การไหลในสวนใด ๆ จะเกิดความดันตกซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอัตราการไหลผ่านสวนนั้น ๆ
3. ผลรวมของความดันตกในบริเวณวงจรถัดไป (Closed loop) จะต้องมีค่าเป็นศูนย์

จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$Q_{in}(i) = Q_{cell}(i) + Q_{in}(i+1) \quad \text{in inlet manifold}$$

$$Q_{out}(i) = Q_{cell}(i) + Q_{out}(i+1) \quad \text{in inlet manifold สำหรับการไหลลักษณะตัวยู}$$

$$Q_{out}(i) = Q_{cell}(i) + Q_{out}(i-1) \quad \text{in outlet manifold สำหรับการไหลในลักษณะตัวแซด}$$



รูปที่ 2.10 การออกแบบของความดันและการไหลรวมไปถึงตัวแปรที่มีผลต่อการไหล สำหรับช่องทางการไหลแบบตัวยู (U-shape) และสำหรับตัวแซด (Z-shape) ภายในชั้นเซลล์ เชื้อเพลิง [3]

พิจารณารูปที่ 2.10 จะได้

$$Q_{out}(1) = Q_{stack} \tag{2.13}$$

ในกรณีที่ไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง ไม่มีส่วนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาหรือเกิดขึ้นมา การไหลที่ขาออกของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะเท่ากับการไหลที่ขาเข้ามา

$$Q_{out}(1) = Q_{in}(1) \quad \text{สำหรับการไหลลักษณะตัวยู}$$

$$Q_{out}(N) = Q_{in}(1) \quad \text{สำหรับการไหลในลักษณะตัวแซด}$$

ความดันตกหาได้โดยตรงจากสมการเบอร์นูลลี (Bernoulli equation)

$$\Delta P(i) = -\rho \frac{[u(i)]^2 - [u(i-1)]^2}{2} - f\rho \frac{L}{D_H} \frac{[u(i)]^2}{2} + K_f \rho \frac{[u(i-1)]^2}{2} \tag{2.14}$$

โดยที่	ρ	=	ความหนาแน่นของแก๊ส (kg/m^3)
	u	=	ความเร็ว (m/s)
	f	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
	L	=	ความยาวของชิ้นส่วน (m)
	D_H	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นส่วนช่องทางการไหล (m)
	K_f	=	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน

พจน์แรกของการสมการทางด้านขวามือแทนพลังงานที่ลดลงทั้งเส้นทางการไหลเนื่องจากการสูญเสียความเร็วลง พจน์ที่สองคือความดันตกเนื่องจากแรงเสียดทานกับผนังและพจน์สุดท้ายจะแทนการสูญเสียความดันเนื่องจากการรบกวนทั่ว ๆ ไป (Local disturbance)

การสูญเสียความดันเนื่องจากการรบกวนทั่ว ๆ ไป เช่นการแยกการไหลของแก๊สหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลอย่างกะทันหัน เกิดการสะสมไปเรื่อย ๆ โดยทั่วไปในทางกลศาสตร์การสูญเสียแบบนี้จะเรียกว่า "Minor losses" อย่างไรก็ตามการไหลในเซลล์เชื้อเพลิงอาจจะไม่นำมาคิดได้ Kordesch และคณะ [4] แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของการไหลแก๊สขึ้นอยู่กับความดัน ถึงแม้ว่าสัมประสิทธิ์ความดันตกทางเรขาคณิตจะหาได้จากข้อมูลของข้อต่อทั่วไปแต่ก็มีบางส่วนที่ไม่อาจนำมาใช้ได้กับเซลล์เชื้อเพลิง จึงได้สรุปว่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันตกทางเรขาคณิตหาได้จากข้อมูลการทดลอง

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ($Re < 2000$) สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน f สำหรับท่อกลมคือ

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.15)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะเป็นฟังก์ชันกับความขรุขระของผิวผนัง ผนังของช่องทางการไหลในเซลล์เชื้อเพลิงจะพิจารณาในรูปของความขรุขระเนื่องจากไม่ได้ใช้ท่อที่เป็นผนังเรียบแต่ประกอบด้วยแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วยึดติดเข้าด้วยกัน ความขรุขระสัมพัทธ์ (ϵ/D) จะมีค่า 0.1 พิจารณาในเทอมของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะได้

$$f = \frac{1}{\left[1.14 - 2 \log \frac{\epsilon}{D}\right]^2} \quad (2.16)$$

ความดันตกในเซลล์, ΔP_{cell} ความดันตกในช่องทางการไหลโดยส่วนมากจะเป็นฟังก์ชันเส้นตรงกับอัตราการไหลผ่านแต่ละเซลล์

ต่อมาพิจารณาผลรวมของความดันตกในวงจรมปิด (closed loop) ทั้งหมดต้องเท่ากับศูนย์ สำหรับกรณี $i = 1$ to $(N-1)$

$$\Delta P_{in}(i+1) + \Delta P_{cell}(i+1) + \Delta P_{cell}(i+1) - \Delta P_{cell}(i) = 0 \quad \text{U configuration}$$

$$\Delta P_{in}(i+1) + \Delta P_{cell}(i+1) + \Delta P_{cell}(i) - \Delta P_{cell}(i) = 0 \quad \text{Z configuration}$$

สำหรับภาวะอัตราการไหลที่กำหนด ณ ทางเข้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงและความดันที่ขาเข้าและขาออกของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง จะสามารถคำนวณหาค่าอัตราการไหลที่ผ่านแต่ละเซลล์ได้โดยใช้วิธีการประมาณค่าของ Hardy-Cross ที่ใช้สำหรับท่อทั่ว ๆ ไปหรือวิธีของ Koh et al [5] ดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. เริ่มต้นด้วยการประมาณค่าอัตราการไหลในแต่ละเซลล์โดย $Q_{cell} = \frac{Q_{stack}}{N_{cell}}$
2. คำนวณค่าความดันตกในแต่ละชั้นส่วนของช่องทางการไหลและในเซลล์
3. ตรวจสอบค่าผลรวมของความดันตกในแต่ละรูป (ควรมีค่ารวมเป็นศูนย์)
4. ปรับค่าอัตราการไหลในแต่ละรูปโดยให้ ΔQ เป็นสัดส่วนกับค่าความผิดพลาดของผลรวมของความดันตก

พิจารณาในท่อขนาดเดียวกันช่องทางการไหลลักษณะตัวแซดจะให้ผลการไหลแบบสม่ำเสมอดีกว่าการไหลแบบลักษณะตัวยูและยังพบอีกว่าลักษณะการไหลแบบตัวยูจะมีการกระจายตัวของการไหลได้ดีเมื่อความดันตกในเซลล์มีค่ามากกว่าความดันตกในช่องแก๊สขาออกของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง ในบางครั้งถ้ามีมากกว่าหนึ่งช่องทางการไหลสำหรับแก๊สหนึ่งชนิดโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีพื้นที่เกิดปฏิกิริยาขนาดใหญ่ ในกรณีที่ความดันตกในแต่ละช่องทางการไหลจะต้องมีค่าใกล้เคียงกันเพื่อให้เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของแก๊ส เมื่อทำการทดลองการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหล ความหนาแน่นของแก๊ส และความหนืดเนื่องจากการใช้ไปหรือจากการเกิดขึ้น จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความดันตก (<5%)

2.3.4 การกระจายตัวของแก๊สเชื้อเพลิงภายในแต่ละเซลล์ (Uniform distribution of reactants inside each cell)

เมื่อแก๊สที่เป็นสารตั้งต้นเข้าไปในแต่ละเซลล์ จะต้องให้เกิดการกระจายตัวอย่างทั่วถึงทั้งพื้นผิวเกิดปฏิกิริยาเพื่อที่จะให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปแล้วจะอาศัยแผ่นช่องทางไหลช่วยในการกระจายตัวของแก๊สและปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบช่องทางไหลประกอบด้วย

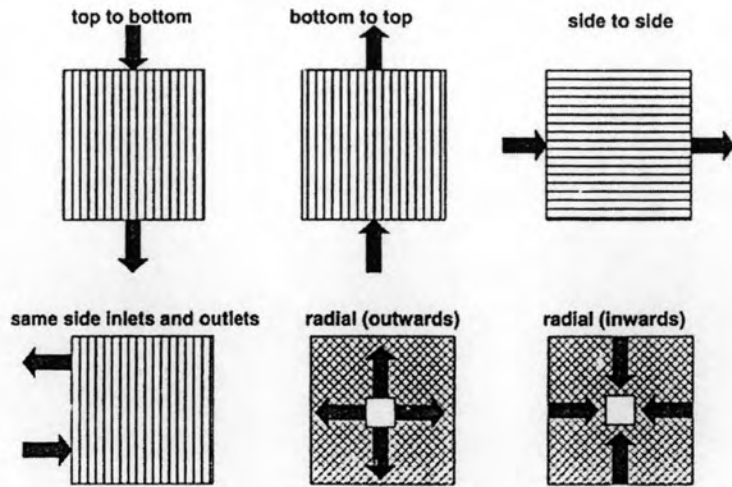
- ลักษณะช่องทางไหล

ช่องทางไหลของแก๊สจะมีหลายรูปแบบ หลายขนาด ซึ่งขนาดที่จะใช้พิจารณาจากค่ากำลังไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ที่ต้องการจะได้ ลักษณะของช่องทางไหลจะดูจากตำแหน่งของช่องทางแก๊สขาเข้าและขาออก รวมไปถึงการจัดการกับความร้อนที่เกิดขึ้น โดยรูปร่างที่นิยมมากสุดในการออกแบบคือรูปทรงสี่เหลี่ยมจตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่บางครั้งก็อาจเป็นแบบทรงกลม หกเหลี่ยม แปดเหลี่ยม

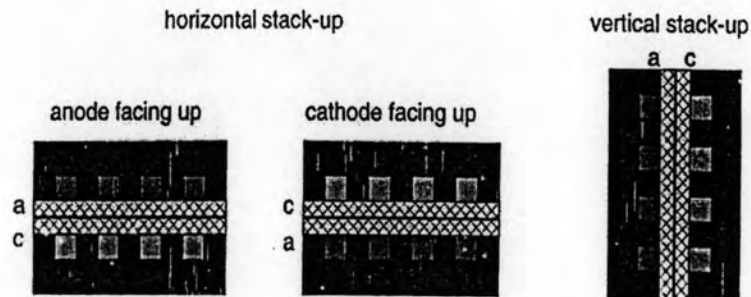
- ทิศทางในช่องทางไหล

จากรูปที่ 2.11 ทิศทางการไหลและตำแหน่งของช่องทางแก๊สเข้าและออกมีความสำคัญมากเนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วงต่อน้ำที่อยู่ในเซลล์ซึ่งจะอาจเกิดการควบแน่นขึ้นภายในเซลล์ (ไม่คำนึงถึงผลของแรงโน้มถ่วงต่อแก๊ส) ปรากฏการณ์ควบแน่นจะเกิดขึ้นในระหว่างทำการทดลอง หรืออาจขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ในการทดลองหรือหลังจากปิดเครื่อง

ทิศทางการไหลของแก๊สผ่านขั้วแอโนดและแคโทดอาจเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ตรงกันข้ามหรือตัดขวางกันได้ ทิศทางการไหลมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเช่นกันเนื่องมาจากเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊สและน้ำขึ้นภายในเซลล์ นอกจากนี้ทิศทางการวางชั้นเซลล์เชื้อเพลิงและทิศทางของแผ่นช่องทางไหลไม่ว่าจะวางในแนวตั้งหรือแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ก็ล้วนแล้วแต่มีผลต่อการกำจัดน้ำออกจากเซลล์โดยเฉพาะเมื่อปิดเครื่องหรือขณะทำการหล่อเย็น



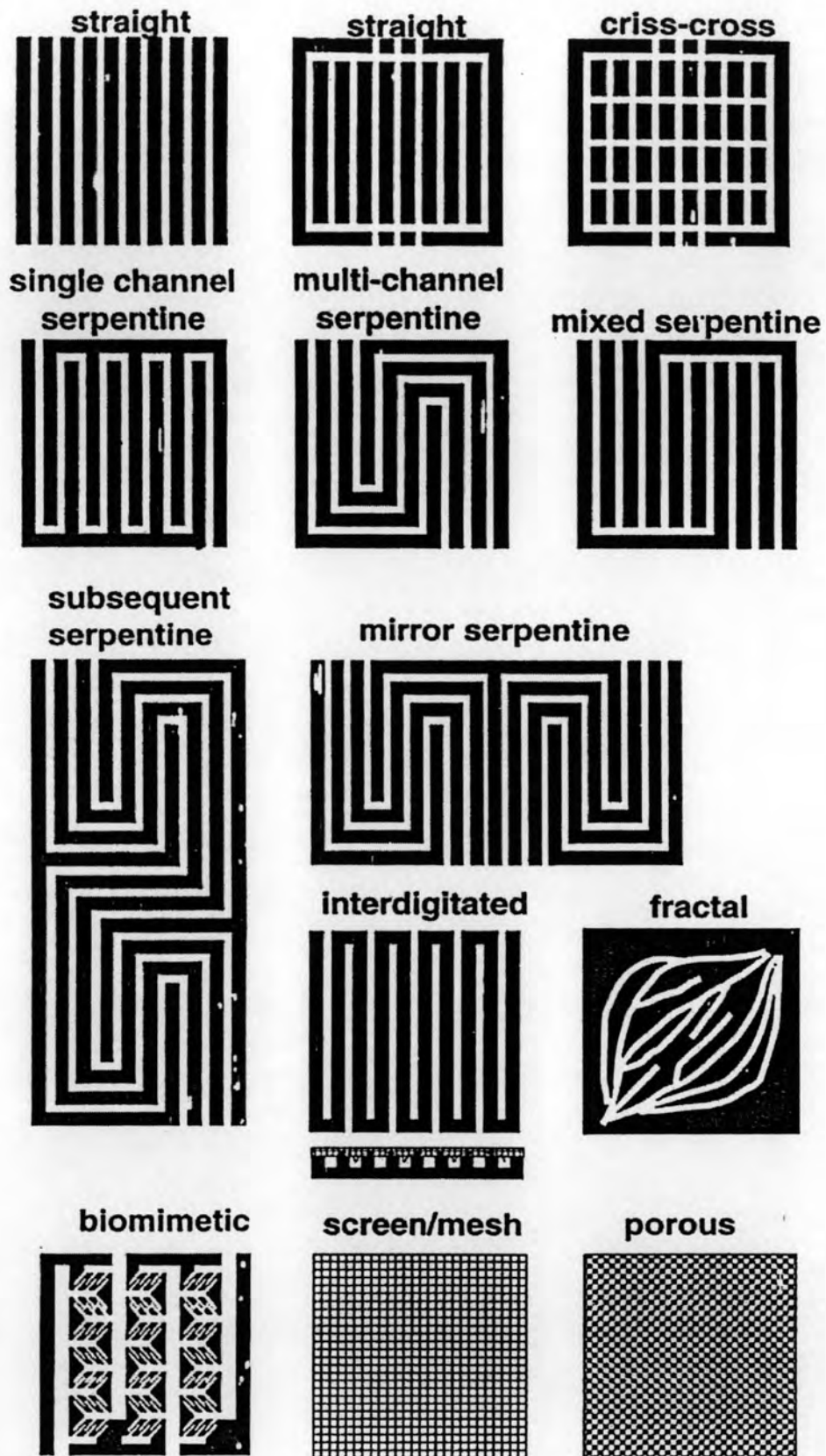
รูปที่ 2.11 ทิศทางการไหลที่เป็นไปได้ในแผ่นช่องทางการไหล [3]



รูปที่ 2.12 รูปแบบต่าง ๆ ของการวางชั้นเซลล์เชื้อเพลิง [3]

- รูปแบบของช่องทาง

มีหลายรูปแบบที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบฟลูอิด โดยมีจุดประสงค์อยู่ที่ให้เกิดที่เข้าไปในเซลล์เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและให้ผลดีต่อการจัดการน้ำที่เกิดขึ้น จากรูปที่ 2.13 แสดงรูปแบบที่นิยมนำมาใช้ในการออกแบบช่องทางการไหล

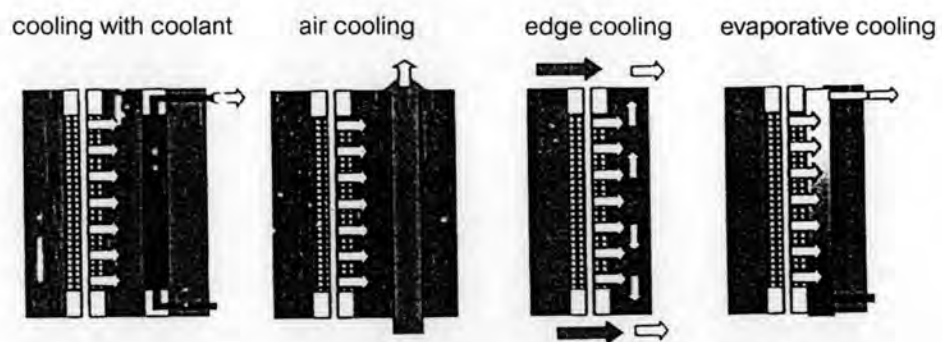


รูปที่ 2.13 ลักษณะของช่องทางการไหลในรูปแบบต่าง ๆ [3]

2.3.5 การจัดการกับความร้อนที่เกิดขึ้นภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

เพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ภายในเซลล์ การจัดการกับความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเซลล์จากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี วิธีการจัดการกับความร้อนที่เกิดขึ้นแสดงดังในรูป 2.14

1. การหล่อเย็นด้วยสารหล่อเย็นให้ไหลผ่านระหว่างเซลล์ โดยที่น้ำที่นำมาใช้อาจเป็นน้ำที่ผ่านการนำไอออนออก (Deionized water) สารหล่อเย็นที่ป้องกันการแข็งตัว (Antifreeze coolant) หรืออากาศ โดยที่การหล่อเย็นจะทำโดยให้สารหล่อเย็นไหลผ่านระหว่างเซลล์หรือระหว่างกลุ่มของเซลล์
2. การหล่อเย็นด้วยสารหล่อเย็นที่ปลายของพื้นที่เกิดปฏิกิริยา (ชนิดมีและไม่มีครีบระบายความร้อน) ความร้อนจะถูกนำผ่านแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วจากนั้นจึงถ่ายโอนไปยังสารหล่อเย็นโดยทั่วไปมักจะเป็นอากาศ และแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วที่ใช้กันนั้นจะต้องมีลักษณะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีเพื่อรักษาสภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิให้คงที่ นอกจากนี้พื้นผิวที่ปลายขอบอาจจะทำหน้าที่ถ่ายโอนความร้อนได้ไม่ดีพอ จึงต้องมีการนำแผงระบายความร้อนเข้ามาช่วยในการระบายความร้อน วิธีการนี้นิยมใช้กับงานที่ต้องการค่ากำลังไฟฟ้าไม่สูงนัก
3. การหล่อเย็นด้วยการทำให้เปลี่ยนสถานะ สารหล่อเย็นที่ใช้ อาจจะเป็นน้ำหรือสื่อกลางแบบอื่น ๆ การใช้น้ำจะง่ายต่อการออกแบบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากน้ำเป็นส่วนประกอบอยู่ในทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทด



รูปที่ 2.14 รูปแบบและลักษณะการหล่อเย็นชั้นเซลล์เชื้อเพลิง [3]

2.3.6 ความร้อนในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (Stack heat balance)

โดยทั่วไปพลังงานของเชื้อเพลิงจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของไฟฟ้าหรือความร้อน พลังงานในเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา = ความร้อนที่เกิดขึ้น + ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

หรือ

$$\frac{I}{2F} H_{HHV} n_{cell} = Q_{gen} + IV_{cell} N_{cell} \quad (2.17)$$

โดยที่	I	=	ค่ากระแสไฟฟ้า (A)
	F	=	ค่าคงที่ฟาราเดย์เท่ากับ 96,485 (Coulombs/electron-mol)
	V_{cell}	=	ความต่างศักย์ไฟฟ้าในแต่ละเซลล์ (volt)
	N_{cell}	=	จำนวนเซลล์ในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

ความร้อนที่เกิดขึ้นในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะเป็น

$$Q_{gen} = (1.482 - V_{cell}) I N_{cell} \quad (2.18)$$

โดยในสมการแรกจะตั้งสมมติฐานที่ว่าน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์ทั้งหมดออกจากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงในสถานะของเหลวที่ 25 องศาเซลเซียส และน้ำที่เข้ามาในเซลล์อยู่ในสถานะอิ่มตัว ณ ภาวะอุณหภูมิที่ทำการทดลอง หรือถ้าให้น้ำที่เกิดขึ้นออกจากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงในสถานะไอ จะได้สมการจะเปลี่ยนเป็น

$$Q_{gen} = (1.254 - V_{cell}) I N_{cell} \quad (2.19)$$

เอนทัลปีของแก๊สที่เป็นสารตั้งต้น (Q_{in}) เท่ากับผลรวมพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้น (W_{el}) เอนทัลปีของแก๊สที่ไม่ได้ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาที่รวมถึงความร้อนของน้ำที่เกิดขึ้น ($\sum Q_{out}$) ค่ากระจายความร้อนไปยังสิ่งแวดล้อม (Q_{dis}) และความร้อนออกไปกับจากการหล่อเย็น ดังสมการที่ 2.20

$$\Sigma Q_{in} = W_{el} + \Sigma Q_{out} + Q_{dis} + Q_c \quad (2.20)$$

1. การนำความร้อน (heat conduction)

อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการนำความร้อนในทิศทาง X ผ่านพื้นที่หน้าตัด

A ตามกฎของ Fourier Law จะได้ว่า

$$Q_x = kA \frac{dT}{dx} \quad (2.21)$$

ซึ่ง k คือค่าการนำความร้อน ($\text{W/m}^1\text{k}^{-1}$)

ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity, k , $\text{W/m}^1\text{k}^{-1}$) ของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแสดงไว้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง [3]

วัสดุ	ค่าการนำความร้อน, k , $\text{W/m}^1\text{k}^{-1}$
อลูมิเนียม	237
ทองแดง	401
นิกเกิล	91
นิกเกิล อัลลอยด์	12
ไทเทเนียม	22
สแตนเลส 316	13
แพลทินัม	71
แกรไฟต์	98
แกรไฟต์/พอลิเมอร์ผสม	-20^b
กระดาษเส้นใยคาร์บอน	1.7^b
เทฟลอน	0.35
น้ำ(ของเหลว)	0.611
น้ำ(ไอ)	0.0198
อากาศ	0.0267
ไฮโดรเจน	0.198

ที่ 300 K, ^b through-plane

การนำความร้อน ณ ภาวะคงที่ (steady state) จะอธิบายได้จากสมการ

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0 \quad (2.22)$$

เมื่อพิจารณาในเทอมของสามมิติจะได้

$$\nabla \cdot (\nabla T) = 0 \quad (2.23)$$

เมื่อความร้อนถูกนำผ่านวัตถุที่มีค่าการนำความร้อนที่แตกต่างกัน เงื่อนไขขอบเขตที่สามจะได้มาจากการกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ ณ พื้นผิว หรือมีความไม่ต่อเนื่องทางด้านกรกระจายตัวของอุณหภูมิที่พื้นผิว กำหนดเป็นค่าความต้านทานผิวสัมผัส (R_{ic}) หรือสัมประสิทธิ์การสัมผัสทางความร้อน (h_{ic}) สามารถหาได้จาก

$$Q = h_{ic} A \Delta T \quad (2.24)$$

$$R_{ic} = \frac{1}{h_{ic} A} \quad (2.25)$$

สำหรับกรณีที่มีการเกิดความร้อนขึ้นภายในเข้ามาเกี่ยวข้องเนื่องจากความต้านทานทางไฟฟ้าจะได้ว่า

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{q_{int}}{k} = 0 \quad (2.26)$$

ซึ่ง q_{int} = อัตราการเกิดความร้อนต่อหน่วยปริมาตร
 k = ค่าการนำความร้อน ($W/m^2 \cdot K$)

ในเซลล์เชื้อเพลิงการเกิดความร้อนภายในเป็นผลมาจากกระแสไฟฟ้าและความต้านทานการเคลื่อนที่ของไอออน

$$q_{int} = i^2 \rho_s \quad (2.27)$$

ในสื่อที่เป็นรูปพรุน ค่าการนำความร้อนจะคิดในปริมาณของความพรุนของสื่อ, ε

$$k_{eff} = -2k_s + \left[\frac{\varepsilon}{2k_s + k} + \frac{1-\varepsilon}{3k_s} \right]^{-1} \quad (2.28)$$

2. การกำจัดความร้อน (Active heat removal)

การหล่อเย็นที่ผนังของเซลล์เชื้อเพลิงจะต้องรักษาให้อุณหภูมิคงที่หรือให้ค่าพังก์ความร้อนคงที่ ความร้อนที่ถูกกำจัดออกโดยวิธีการหล่อเย็นหาได้จาก

$$Q_c = \Sigma Q_{in} - w_{el} - \Sigma Q_{out} - Q_{dis} \quad (2.29)$$

การถ่ายโอนความร้อนจากการหล่อเย็นจะได้เป็น

$$\frac{dQ_c}{dA_c} = h(T_s - T_c) \quad (2.30)$$

คิดในเทอมของพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด (A_c)

$$Q_c = UA_c LMTD \quad (2.31)$$

โดยที่ h = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W m^{-2} \cdot C$)
 U = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนทั้งหมด ($W m^{-2} \cdot C$)
 A_c = พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (พื้นที่ของช่องทางหล่อเย็น) (m^2)

$LMTD$ = logarithmic mean temperature difference ($^{\circ}C$) หาได้จาก

$$LMTD = \frac{(T_s - T_c)_{in} - (T_s - T_c)_{out}}{\ln \frac{(T_s - T_c)_{in}}{(T_s - T_c)_{out}}} \quad (2.32)$$

T_s = อุณหภูมิภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง
 T_c = อุณหภูมิของสารหล่อเย็น

ซึ่งความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงและสารหล่อเย็นอาจจะคงที่หรืออาจจะเปลี่ยนตามด้านที่เข้าไปในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่สารหล่อเย็นเข้าและออกจากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงกับแก๊สที่เข้าและออก

ความร้อนอาจถูกดูดซึมได้จากสารที่ใช้หล่อเย็นและพาความร้อนออกไปจากชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

$$Q_c - \dot{m} c_p (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (2.33)$$

ผลต่างของอุณหภูมิ $\Delta T_c = (T_{c,out} - T_{c,in})$ เป็นตัวแปรที่ออกแบบมาให้เลือกใช้สำหรับอัตราการไหลของสารหล่อเย็น เพื่อให้จะให้กระจายตัวของอุณหภูมิมี่ความสม่ำเสมอตลอดทั้งเซลล์เชื้อเพลิง ΔT_c ควรีค่าให้น้อยที่สุดที่จะทำได้ ทำได้โดยเพิ่มอัตราการไหลของสารหล่อเย็น ซึ่งจะปลดค่ากำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพของระบบลง ในทางตรงกันข้าม ΔT_c ที่มีขนาดใหญ่เป็นผลมาจากการมีอุณหภูมิต่ำ

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อน (h) ขึ้นอยู่กับ Nusselt number, สมบัติของน้ำหล่อเย็นและลักษณะการไหล

$$h = Nu \frac{k}{D_H} \text{ หรือ } h = Nu_L \frac{k}{L} \text{ หรือ } \bar{h} = \bar{Nu}_L \frac{k}{L} \quad (2.34)$$

Nusselt number คืออัตราส่วนระหว่างการพาความร้อนของของไหลที่เคลื่อนที่ต่อการนำความร้อนของชั้นที่ไม่เคลื่อนที่ของของไหล

3. การกระจายความร้อนจากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงโดยการพาความร้อนและการแผ่ความร้อน

ค่าความร้อนที่สูญเสียจากการพาความร้อนทางธรรมชาติและจากการแผ่ความร้อน (Radiation) ไปยังสิ่งแวดล้อมหาได้จาก

$$Q_{dis} = \frac{T_s - T_o}{R_{th}} \quad (2.35)$$

โดยที่ T_s = อุณหภูมิผิวของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง
 T_o = อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

R_{th} = ค่าความต้านทานความร้อนหาได้จาก

$$R_{th} = \frac{1}{\frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_R}} \quad (2.36)$$

โดยที่ R_C = ค่าความต้านทานการพาความร้อนหาจาก

$$R_C = \frac{1}{hA_S} \quad (2.37)$$

และ R_R = ค่าความต้านทานการแผ่ความร้อนหาได้จาก

$$R_R = \frac{1}{\sigma F A_S (T_S + T_O)(T_S^2 + T_O^2)} \quad (2.38)$$

โดย σ = ค่าคงที่ Stefan-Boltzman $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$

F = shape factor โดยในการประมาณครั้งแรกจะให้ค่าเท่ากับ 1

A_S = พื้นที่ผิวของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (m^2)

สำหรับกรณีชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีขนาดสั้น ค่าอัตราส่วนของพื้นที่ผิวภายนอกและพื้นที่ผิวภายใน, A_S / A_{act} , จะมีค่ามากและชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะไม่สามารถมีอุณหภูมิได้สูงเท่าที่ต้องการ เนื่องจากอัตราของการเบี่ยงเบนความร้อนมีค่าสูงกว่าอัตราของความร้อนที่เกิดขึ้น กรณีแบบนี้เกิดได้บ่อยกับการทดลองที่ใช้เซลล์เดี่ยว จึงต้องมีการแก้ปัญหาโดยการนำแผ่นให้ความร้อน (heat pads) มาติดเพิ่มเพื่อให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนในเทอมที่เป็นฟังก์ชันกับ Nusselt number หาได้จาก

$$h = \frac{k}{L} Nu_L \quad (2.39)$$

กรณีแผ่นวางในแนวตั้งและเป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ Nusselt number จะเป็นฟังก์ชันกับ Prandtl และ Rayleigh number ($Nu_L = f(\text{Pr}, Ra_L)$)

2.3.7 การอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (Stack clamping)

แต่ส่วนประกอบของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงไม่ว่าจะเป็นหน่วยประกอบหัวไฟฟ้า เมมเบรน ชั้นแก๊สแพร่และแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว จะต้องประกบเข้าด้วยกันเป็นอย่างดีเพื่อ

1. ป้องกันการรั่วของแก๊สระหว่างชั้น
2. เพื่อลดความต้านทานของผิวสัมผัสระหว่างชั้นทั้งหมด

แรงที่ใช้ในการยึดจะต้องเท่ากับแรงที่ต้องการในการอัดปะเก็นบวกกับแรงที่ต้องการในการอัดชั้นแก๊สแพร่บวกกับแรงภายใน (ความดันระหว่างทำการทดลอง)

แรงอัดที่ต้องการเพื่อป้องกันการรั่วไหลระหว่างชั้นนั้นขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำปะเก็นและการออกแบบ มีวัสดุหลายชนิดที่ทำมาจากยางเพื่อนำมาใช้เป็นปะเก็น การออกแบบก็หลากหลายตามผู้ผลิตรวมถึงความแบนราบหรือลักษณะของปะเก็น

แรงทอร์กที่ใช้ในการยึดเข้าด้วยกันสามารถคำนวณหาได้จากสมการ

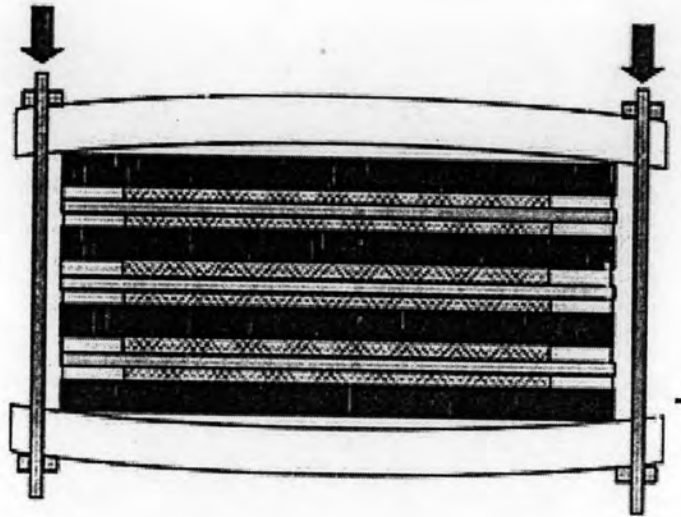
$$T = \frac{FK_b D_b}{N_b} \quad (2.40)$$

กำหนดให้

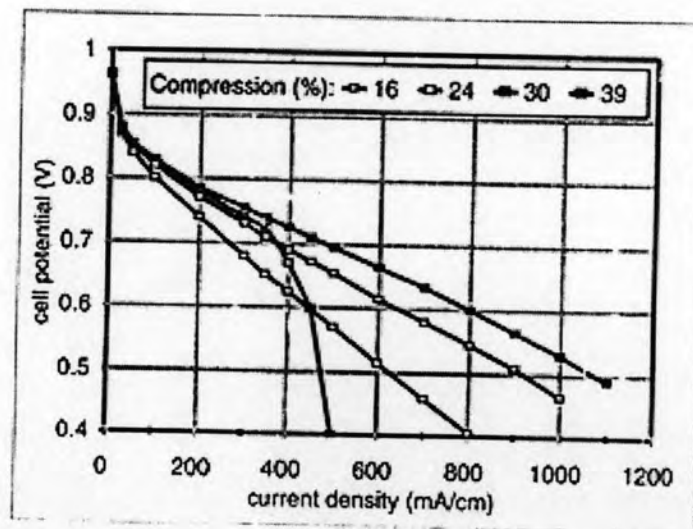
T	=	แรงของทอร์กที่ใช้ (Nm)
F	=	แรงที่ใช้ในการยึด (N)
K_b	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (สำหรับนอตที่มีการหล่อลื่นมีค่า 0.17 และสำหรับนอตที่ไม่มีการหล่อลื่นมีค่า 0.20)
D_b	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของนอต (m)
N_b	=	จำนวนนอตที่ใช้

การใช้แรงยึดในการอัดประกอบเซลล์มากเกินไปจะทำให้แผ่นประกบ (End plates) เกิดการโค้งงอตัวได้ดังแสดงในรูปที่ 2.15 การใช้ความดันในระบบที่ 1.5 – 2.0 เมกกะปาสคาลจะช่วยลดค่าความต้านทานผิวสัมผัสระหว่างชั้นแก๊สแพร่และแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วให้มีน้อยลงได้ เนื่องจากชั้นแก๊สแพร่มีสมบัติในการกดอัดได้ (Compressible) ในการทดลองจึงควรเลือกใช้ชั้นแก๊สแพร่ที่มีความหนาอย่างเหมาะสมกับปะเก็นและเหมาะสมกับแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วที่ใช้ด้วย ถ้าชั้นแก๊สแพร่ถูกกดอัดมากเกินไปจะทำให้เกิดการเหลื่อมล้ำกันในระหว่างขั้นตอนการประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง ประสิทธิภาพที่ได้จากการทำงานจะลดลง [6] ดังแสดงในรูปที่ 2.16 พบว่าเมื่อเพิ่มแรงที่ใช้ในการอัดประกอบเซลล์ ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเนื่องจาก

ความต้านทานระหว่างผิวสัมผัสมีค่าลดลง แต่ถ้าใช้แรงอัดมากเกินไปเส้นกราฟโพลาริเซชันที่ได้จะแสดงผลของโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น การหาแรงอัดที่เหมาะสมสามารถหาได้จากการคำนวณจากการทดลองสำหรับชนิดของชั้นแก๊สแพร่ต่าง ๆ



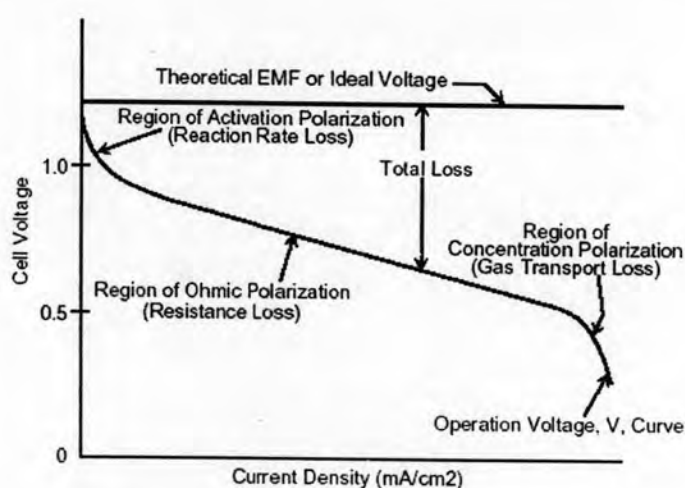
รูปที่ 2.15 ลักษณะการโค้งตัวของแผ่นประกบกรณีใช้แรงในการอัดประกอบเซลล์มากเกินไป [3]



รูปที่ 2.16 ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อใช้แรงในการอัดประกอบต่างกัน [6]

2.4 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบฟอสเฟต [7]

สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถศึกษาได้จากกราฟโพลาริเซชัน (Polarization curve) ดังรูปที่ 2.17 พบว่าเมื่อเซลล์มีการสร้างกระแสไฟฟ้าค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (Cell potential) จะมีค่าลดลงจากค่าศักย์ไฟฟ้าขณะที่เซลล์ยังไม่ได้มีการผลิตกระแสไฟฟ้า (Open circuit potential) ซึ่งการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้านี้เกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานจริงของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นเป็นกระบวนการไม่ผันกลับ และค่าศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงจะเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าเกินตัว (Overpotential) หรือโพลาริเซชัน (Polarization)



รูปที่ 2.17 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบฟอสเฟต [7]

2.4.1 การผันกลับไม่ได้ (Irreversibilities) [7]

สาเหตุที่ทำให้ค่าความต่างศักย์จริงของเซลล์เชื้อเพลิงมีความแตกต่างจากค่าความต่างศักย์แบบผันกลับไม่ได้ เกิดจากการสูญเสียภายในตัวเซลล์ ค่าความแตกต่างนี้เรียกได้อีกอย่างว่า การผันกลับไม่ได้ (Irreversibilities) หรือการสูญเสีย (Losses) หรือศักย์ไฟฟ้าเกินซึ่งการผันกลับไม่ได้ของเซลล์เชื้อเพลิงที่เป็นสาเหตุให้ความต่างศักย์ลดลงประกอบด้วย

- 1) การสูญเสียอันเนื่องมาจากพลังงานกระตุ้น (Activation losses)

สาเหตุของการสูญเสียแบบนี้เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาที่ช้าบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์ส่วนหนึ่งที่เกิดขึ้นมาจะสูญเสียไปในการผลักดันให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์ในช่วงนี้จะมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งหากทำการเขียนกราฟค่าความ

ต่างศักย์เกินกับค่าลอการิทึม (Log) ของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า จะพบว่าความสัมพันธ์จะเป็นแบบเส้นตรงและเรียกกราฟรูปนี้ว่า Tafel plot

เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าเกินกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วงที่เป็นเชิงเส้นตรงสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$V = A \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (2.41)$$

ค่าคงที่ A จะมีค่าสูงในกรณีที่ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดได้ช้า ค่าคงที่ i_0 จะมีค่าสูงถ้าปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดขึ้นได้เร็ว ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (i_0) คือค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ซึ่งค่าความต่างศักย์เกินเริ่มเคลื่อนที่ออกจากค่าศูนย์ (จุดตัดแกน X) สมการ Tafel จะเป็นจริงเมื่อ $i > i_0$ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (i_0) มีชื่อเรียกว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจุดแลกเปลี่ยน (Exchange current density) ค่าความหนาแน่นกระแสจุดแลกเปลี่ยน (i_0) เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการควบคุมสมรรถนะหรือพฤติกรรมของขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิง

ค่าความต่างศักย์ของเซลล์เชื้อเพลิงในกรณีที่มีความต่างศักย์เกินเนื่องจากพลังงานกระตุ้นเพียงอย่างเดียวจะได้รับความสัมพันธ์

$$V = E - A \ln \left[\frac{i}{i_0} \right] \quad (2.42)$$

โดยที่ $E =$ ความต่างศักย์วงจรเปิดแบบผันกลับได้

การลดค่าความต่างศักย์เกินเนื่องจากพลังงานกระตุ้น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญยิ่งยวดในการลดค่าความต่างศักย์เกินอันเนื่องมาจากพลังงานกระตุ้น ดังนั้นในการปรับปรุงสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง สิ่งที่ได้ดีที่สุดก็คือการเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ขั้วแคโทดโดยวิธีต่อไปนี้

- การเพิ่มอุณหภูมิให้กับเซลล์เชื้อเพลิง
- ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความไวมากขึ้น เพิ่มความขรุขระของขั้วไฟฟ้า ส่งผลให้พื้นที่ผิวมีค่าสูงขึ้นและให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนมากขึ้น

- เพิ่มค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นเช่นการใช้แก๊สออกซิเจนที่มีความบริสุทธิ์แทนอากาศ จะช่วยให้พื้นที่ผิวที่ว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกปกคลุมด้วยสารตั้งต้นได้ดีขึ้น
- เพิ่มความดันในการทำงานจะช่วยให้พื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาถูกรอบครองด้วยสารตั้งต้นมากขึ้น ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าก็จะเกิดได้มากขึ้นตามไปด้วย

สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงอุณหภูมิต่ำและสูงปานกลาง ค่าความต่างศักย์เกินอันเนื่องมาจากพลังงานกระตุ้นเป็นกระบวนการผันกลับไม่ได้ที่สำคัญและเป็นเหตุให้เกิดการตกลงของค่าความต่างศักย์มักเกิดที่ขั้วแคโทดเป็นหลัก ในกรณีที่มีการใช้เชื้อเพลิงชนิดอื่นแทนแก๊สไฮโดรเจน เช่น เมทานอล ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเกินอันเนื่องมาจากพลังงานกระตุ้นมักเกิดที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้าง เมื่ออยู่ในภาวะที่อุณหภูมิและความดันสูงขึ้น ความต่างศักย์ไฟฟ้าเกินอันเนื่องมาจากพลังงานกระตุ้นจะมีค่าน้อยลง

ไม่ว่าการตกลงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าด้านใดด้านหนึ่งหรือเกิดทั้งสองด้าน จะได้ความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าเกินกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้างานี้

$$V = A \ln\left(\frac{i}{b}\right) \quad (2.43)$$

เมื่อ A และ b เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับขั้วไฟฟ้าและภาวะในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง จะเป็นจริงเฉพาะเมื่อ $i > b$

2) การไหลข้ามของเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel crossover) และการไหลข้ามของกระแสไฟฟ้าภายใน (Internal current)

ถึงแม้ว่าในความเป็นจริงแล้วอิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิงมีคุณสมบัติที่นำเฉพาะไอออนเพียงอย่างเดียว แต่มักปรากฏในการทำงานจริงที่ว่าอิเล็กโทรไลต์กลับสามารถนำอิเล็กตรอนได้บ้างเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่ามีกระแสของแก๊สไฮโดรเจนบางส่วนจากขั้วแอโนดผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วแคโทด ในระหว่างที่แก๊สไฮโดรเจนแพร่ผ่านก็จะเกิดปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจน เพราะว่ายังสัมผัสอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้กระแสที่ถูกผลิตขึ้นมาไม่ได้ไหลออกสู่วงจรภายนอก กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจึงมีชื่อเรียกว่า กระแสไฟฟ้าภายใน ส่วนปริมาณของแก๊สเชื้อเพลิงเพียงเล็กน้อยซึ่งแพร่ผ่านอิเล็กโทรไลต์เรียกว่า การไหลข้ามของเชื้อเพลิง (Fuel crossover)

การไหลข้ามของเชื้อเพลิงและกระแสไฟฟ้าภายในสามารถพิจารณาให้เป็นสิ่งเดียวกันได้ กล่าวคือทุก ๆ หนึ่งโมเลกุลของแก๊สไฮโดรเจนที่ไหลข้ามจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด

แก๊สไฮโดรเจนดังกล่าวจะเกิดปฏิกิริยาและเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนไปโดยเปล่าประโยชน์ 2 อิเล็กตรอน ปริมาณที่สูญเสียนี้เทียบเท่ากับการที่อิเล็กตรอน 2 ตัววิ่งเข้ามาภายในจากขั้วแอโนด ไปขั้วแคโทดแทนที่จะเป็นการไหลผ่านวงจรภายนอก

โดยปกติการไหลข้ามของเซลล์เชื้อเพลิงและอิเล็กตรอนจะมีค่าน้อย (ประมาณ 1 – 2 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร) เมื่อพิจารณาในแง่ของการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า เทอมผันกลับไม่ได้มีความสำคัญไม่มากนัก อย่างไรก็ตามสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีภาวะการทำงานต่ำ เทอมการสูญเสียอันเนื่องมาจากการไหลข้ามของเซลล์เชื้อเพลิงมีอิทธิพลมากพอที่จะทำให้สังเกตเห็นการตกลงของความต่างศักย์ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงยังทำงานอยู่ ที่ภาวะวงจรเปิดเป็นภาวะที่ไม่มีการดึงกระแส ค่าความต่างศักย์ทั้งสองค่าควรมีค่าเท่ากัน แต่ในความเป็นจริงค่าทั้งสองกลับไม่เท่ากัน เมื่อมีการใช้อากาศเป็นสารออกซิแดนซ์และทำงานที่ความดันบรรยากาศ ค่าความต่างศักย์ที่ได้รับมีค่าประมาณ 0.9 โวลต์น้อยกว่าค่าทางทฤษฎีที่ 1.23 โวลต์ ก็เป็นผลมาจากการเกิดกระแสไฟฟ้าภายในเซลล์เชื้อเพลิงนี้เอง

การเกิดการไหลข้ามของแก๊สและกระแสไฟฟ้าภายในเป็นสิ่งที่ไม่สามารถวัดได้ยากเพราะไม่สามารถนำแอมมิเตอร์ทำการวัดได้ ทางเดียวที่จะวัดได้คือการวัดปริมาณการใช้ไปของแก๊สดังต้น ในภาวะวงจรเปิด สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเดี่ยวหรือชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาดเล็ก อัตราการทำปฏิกิริยาไปของแก๊สจะต่ำมากจนไม่สามารถวัดได้ด้วยมาตรวัดอัตราการไหลของแก๊สแบบปกติทั่วไป แต่ควรวัดด้วย Bubble counting ปริมาณกระแสไฟฟ้าภายในสามารถคำนวณจากปริมาณแก๊สดังกล่าว ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณการใช้แก๊สขณะเปิดวงจร} &= \frac{I}{2F} \text{ โมล/วินาที} \\ &= (\text{ปริมาณการใช้แก๊ส}) \times 2F \end{aligned}$$

สามารถคิดเป็นเทอมของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโดยการหารด้วยพื้นที่ของเซลล์ ได้เป็น ความหนาแน่นกระแสภายใน (i_n) ค่าความหนาแน่นกระแสนี้มีค่าเท่ากับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูญเสียไปอันเนื่องมาจากการไหลข้ามและการเกิดกระแสภายใน เมื่อคิดผลของกระแสไฟฟ้าภายในที่มีต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเกินทุกชนิด จะได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเกินเนื่องมาจากพลังงานกระตุ้นเป็น

$$V = E - A \ln \left[\frac{i + i_n}{i_o} \right] \quad (2.44)$$

3) การสูญเสียแบบโอห์มมิก (Ohmic losses)

การสูญเสียอันเนื่องมาจากความต้านทานทางไฟฟ้า (Electrical resistance) ของขั้วไฟฟ้าและความต้านทานการไหลของไอออนในอิเล็กโทรไลต์ จัดเป็นการสูญเสียแบบโอห์มมิก การตกลงของค่าความต่างศักย์ในกรณีนี้มีค่าแปรผันโดยตรงกับกระแสไฟฟ้า

$$V = IR \quad (2.45)$$

ในเซลล์เชื้อเพลิงส่วนใหญ่ค่าความต้านทานมักเป็นผลมาจากอิเล็กโทรไลต์และจุดสัมผัสบริเวณแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วหรือแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า เพื่อให้รูปแบบสมการข้างต้นสอดคล้องกับสมการอื่น ๆ ซึ่งเขียนในเทอมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เราต้องกำหนดค่าความต้านทานใหม่เป็นค่าความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของเซลล์ (r) และเรียกว่า ค่าความต้านทานจำเพาะต่อพื้นที่ หรือ ASR ดังนั้นค่าความต่างศักย์ในสมการ 2.41 สามารถเขียนได้เป็น

$$V_r = ir \quad (2.46)$$

เมื่อ	V_r	=	ค่าความต่างศักย์เกินโอห์มมิก, (V)
	i	=	ค่าความหนาแน่นกระแส, (mA/cm ²)
	r	=	ความต้านทานจำเพาะต่อพื้นที่, (k Ω ·cm ²)

การสูญเสียความต่างศักย์อันเนื่องมาจากความต้านทานมีความสำคัญในเซลล์เชื้อเพลิงทุกประเภท แต่จะมีผลอย่างมากในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง เมื่อพิจารณาผลของความหนาแน่นของกระแสภายในด้วย จะได้ความสัมพันธ์

$$V_r = (i + i_n)r \quad (2.47)$$

4) การสูญเสียอันเนื่องมาจากการถ่ายโอนมวลหรือความเข้มข้น (Mass transport or concentration losses)

เกิดจากความดันของแก๊สที่ตกลงบริเวณใกล้ทางออกของเซลล์และสภาพการหมุนเวียนแก๊สที่แย่งเมื่อทำการทดลองที่ค่ากระแสไฟฟ้าสูง ๆ

เมื่อให้ i_l คือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัด (Limiting current density) เป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในขณะที่ปริมาณการใช้ไปของเซลล์เชื้อเพลิงมี

ค่าเท่ากับอัตราดอกเบี้ยสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงไปยังขั้วไฟฟ้า สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าเกินเนื่องจากความเข้มข้นได้ดังนี้

$$V_m = b \ln \left(1 - \frac{i + i_n}{i_l} \right) \quad (2.48)$$

เมื่อ V_m = ความต่างศักย์เกินเนื่องจากความเข้มข้น
 B = ค่าคงที่
 i_l = ความหนาแน่นกระแสจำกัด

สำหรับการสูญเสียอันเนื่องมาจากความเข้มข้นนี้มีผลเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่กระแสสูง ๆ ใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นกระแสจำกัด เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ ๆ จะไม่สามารถนำผลของการสูญเสียอันเนื่องมาจากความเข้มข้นมาคิดได้

2.4.2 การรวมค่าความต่างศักย์เกินที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิง

สามารถหาค่าแรงดันตกคร่อมเซลล์เชื้อเพลิงที่แท้จริงได้โดย

$$V_C = E - (i + i_n)r - A \ln \left(\frac{i + i_n}{i_o} \right) + B \ln \left(1 - \frac{i + i_n}{i_l} \right) \quad (2.49)$$

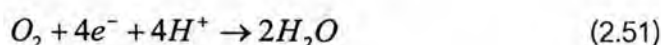
สำหรับที่ค่าความหนาแน่นกระแสต่ำ ๆ จะไม่คิดผลของการสูญเสียอันเนื่องมาจากความเข้มข้นได้ ดังนั้น

$$V_C = E - (i + i_n)r - A \ln \left(\frac{i + i_n}{i_o} \right) \quad (2.50)$$

โดยที่ V_C = ค่าความต่างศักย์ของเซลล์เดี่ยว
 ค่าคงที่ต่าง ๆ ข้างต้นจะมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง

2.4.3 ชั้นซ้อนประจุ (Charge double Layer) [7]

ชั้นซ้อนประจุเป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนที่น่าสนใจของขั้วไฟฟ้า ปรากฏการณ์ดังกล่าวมีความสำคัญต่อการทำความเข้าใจพฤติกรรมพลวัตของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อใดก็ตามที่นำวัสดุสองประเภทที่แตกต่างกันมาสัมผัสกัน จะเกิดการสะสมประจุบนพื้นผิวหรือมีการส่งถ่ายประจุจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ในปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า การเกิดชั้นซ้อนกันนั้นนอกจากเกิดจากอิทธิพลของการแพร่เช่นเดียวกับในวัสดุกึ่งตัวนำแล้ว ยังเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนในขั้วไฟฟ้ากับไอออนที่อยู่ในอิเล็กโทรไลต์และยังเป็นผลมาจากการป้องกันความต่างศักย์ให้กับเซลล์เคมีไฟฟ้าอีกด้วย ยกตัวอย่างเช่นการเกิดชั้นซ้อนประจุบนขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบกรด (Acid electrolyte fuel cell) อิเล็กตรอนเกิดการสะสมที่พื้นผิวของขั้วไฟฟ้าและไอออน H^+ ถูกดึงไปที่พื้นผิวของอิเล็กโทรไลต์ ทั้งอิเล็กตรอนและไอออนตลอดจนแก๊สออกซิเจนที่ป้อนให้กับขั้วแคโทดจะทำปฏิกิริยากันดังนี้



ความมากน้อยหรือโอกาสการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของประจุอิเล็กตรอนและไอออน H^+ บนพื้นผิวขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์ ยิ่งประจุมีความหนาแน่นเท่าใด ค่ากระแสไฟฟ้าก็จะมีค่ามากขึ้นเท่านั้น อย่างไรก็ตามการสะสมประจุก่อให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า ความต่างศักย์ในกรณีนี้คือ "ความต่างศักย์เกินอันเนื่องมาจากพลังงานกระตุ้นนั่นเอง" ดังนั้นการเกิดชั้นซ้อนกันของประจุจึงเป็นคำอธิบายที่ว่าทำไมจึงเกิดค่าความต่างศักย์เกินอันเนื่องมาจากพลังงานกระตุ้นและชี้ให้เห็นว่าการเกิดชั้นซ้อนประจุเป็นสิ่งจำเป็นต่อการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรด ถ้ามีความต้องการกระแสสูงขึ้นเท่าใด ความต้องการประจุก็น่าจะมีค่าสูงขึ้นเท่านั้นและค่าความต่างศักย์เกินก็จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย การพิจารณาดังกล่าวยังแสดงให้เห็นอีกว่าหากขั้วไฟฟ้าทำมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความไวมาก โอกาสการเกิดปฏิกิริยาก็น่าจะมากตาม

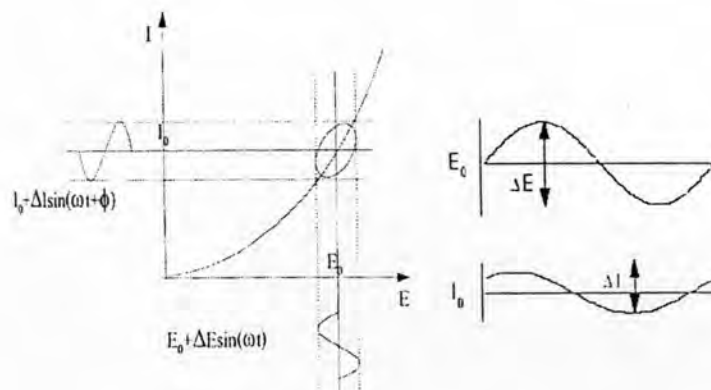
ชั้นประจุที่เกิดบริเวณชั้นผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้า/อิเล็กโทรไลต์ เป็นการเก็บประจุทางไฟฟ้าและพลังงานที่มีลักษณะการทำงานคล้ายตัวเก็บประจุทางไฟฟ้า (Electrical capacitor) ถ้ามีการลดกระแสไฟฟ้า ตัวเซลล์เชื้อเพลิงต้องใช้เวลาดำเนินการหนึ่งกว่าที่ประจุและค่าความต่างศักย์จะเกิดการกระจายตัวออกหรือมีการเพิ่มขึ้นของค่ากระแสไฟฟ้า การสะสมของประจุจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจะต้องใช้เวลาขณะหนึ่ง ดังนั้นค่าความต่างศักย์เกินอันเนื่องมาจากพลังงานกระตุ้นจะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดตามค่ากระแส ซึ่งแตกต่างจากความต่างศักย์เกินแบบโอห์มมิก ที่ว่าถ้ามีกระแสเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันกราฟจะค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่ค่าภาวะสมดุล

อันที่จริงแล้วอิทธิพลของความสามารถในการเก็บของชั้นซ้อนประจุก่อให้เกิดสมรรถนะเชิงพลวัต (Dynamic performance) ของเซลล์ที่ดีคือ ค่าความต่างศักย์จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปและราบเรียบ ไปยังค่าใหม่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ต้องการ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้แยกแยะการตกลงของความต่างศักย์ประเภทต่าง ๆ นำไปสู่การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้

2.5 ความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) [8]

ค่าความต้านทานเชิงซ้อนในเซลล์เชื้อเพลิงสามารถบ่งบอกได้ถึงประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้ การวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนจะทำโดยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) โดยเป็นวิธีที่ใช้ในการศึกษาหาสมบัติต่าง ๆ ทางไฟฟ้าของวัสดุและเป็นเทคนิคที่มีประโยชน์มากในการวิเคราะห์ลักษณะของระบบเคมีไฟฟ้า โดยอาจจะช่วยในการแยกแยะอิทธิพลของลักษณะทางกายภาพและปรากฏการณ์ทางเคมีที่ศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่งในการทำงาน ด้วยการทำงานเพียงขั้นตอนเดียวก็ได้รวบรวมช่วงความถี่ที่ใช้งานไว้อย่างเพียงพอ

หลักการวิธีการวัดโดยใช้ EIS มีหลักการคล้ายกับวิธีอิมพีแดนซ์ทั่วไป ซึ่งจะให้สัญญาณกระตุ้นในรูปฟังก์ชันไซน์ที่มีค่าแอมพลิจูดต่ำ ไปยังระบบภายใต้การวิเคราะห์และวัดการตอบสนองในรูปของกระแสไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้าหรือสัญญาณอื่น ๆ ที่สนใจจากรูปที่ 2.18 จะแสดงกราฟเส้นโค้งของกระแสไฟฟ้า – ศักย์ไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าเคมีในเชิงทฤษฎี



รูปที่ 2.18 กราฟกระแสไฟฟ้า – ศักย์ไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าเคมีในเชิงทฤษฎี [10]

คลื่นรูปไซน์ที่มีแอมพลิจูดต่ำของ $\Delta E \sin(\omega t)$ ณ ความถี่ค่าหนึ่งได้เป็นส่วนที่เพิ่มเติมเข้าไปในค่าศักย์ไฟฟ้า E_0 ส่งผลให้เกิดการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าเป็นคลื่นรูปไซน์ของ $\Delta I \sin(\omega t + \phi)$ เพิ่มเติมเข้าไปในค่า I_0 การตอบสนองของค่ากระแสไฟฟ้าจะเลื่อนไปตามศักย์ไฟฟ้าที่ให้ ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสามารถคำนวณได้จากกฎของโอห์ม (Ohm's Law) ดังสมการ

$$Z(\omega) = \frac{\Delta E(\omega)}{\Delta I(\omega)} \quad (2.52)$$

ค่าอิมพีแดนซ์เป็นปริมาณเชิงซ้อนกับขนาดและการเลื่อนเฟสซึ่งขึ้นกับความถี่ของสัญญาณ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของสัญญาณที่ให้อาจสามารถทำได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ โดยทั่วไปในระบบไฟฟ้าเคมีจะใช้ช่วงความถี่ประมาณ 100 kHz ไปจนถึง 0.1 Hz

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่า $Z(\omega)$ เป็นปริมาณเชิงซ้อนจึงสามารถแสดงได้โดยในพิกัดเชิงขั้วอิมพีแดนซ์ของข้อมูลสามารถเขียนได้ในรูป

$$Z(\omega) = |Z(\omega)| e^{j\phi(\omega)} \quad (2.53)$$

เมื่อ $|Z|$ คือขนาดของอิมพีแดนซ์และ ϕ คือการเลื่อนของเฟส

ในพิกัดคาร์ทีเซียน อิมพีแดนซ์สามารถเขียนได้ในรูป

$$Z(\omega) = Z_r(\omega) + jZ_f(\omega) \quad (2.54)$$

เมื่อ Z_r คือส่วนจริงของอิมพีแดนซ์และ Z_f คือส่วนจินตภาพและ $j = \sqrt{-1}$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริงกับส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เรียกว่า Nyquist Plot ดังแสดงในด้านซ้ายของรูป 2.19 ข้อดีของ Nyquist Plot คือสามารถแสดงภาพรวมของข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและยังสามารถอธิบายได้ในเชิงคุณภาพ โดยที่แกนของส่วนจริงจะมีค่าเท่ากับแกนของส่วนจินตภาพเพื่อจะได้ไม่ไปบิดเบือนรูปร่างของเส้นกราฟ ทั้งนี้รูปร่างของเส้นกราฟมีความสำคัญในการอธิบายเชิงคุณภาพของข้อมูล ข้อเสียของ Nyquist Plot คือการไม่ได้แสดงมิติของความถี่ วิธีที่จะแก้ปัญหานี้คือระบุค่าความถี่ลงไปในกราฟเลย

ค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์และการเลื่อนของเฟส จะเขียนได้ในรูปฟังก์ชันของความถี่โดยทั้งสองกราฟ สามารถเขียนรวมกันได้ในรูปแบบของ Bode plot ดังแสดงด้านขวาของรูป 2.20 ซึ่งจะทำให้การแสดงผลของข้อมูลมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

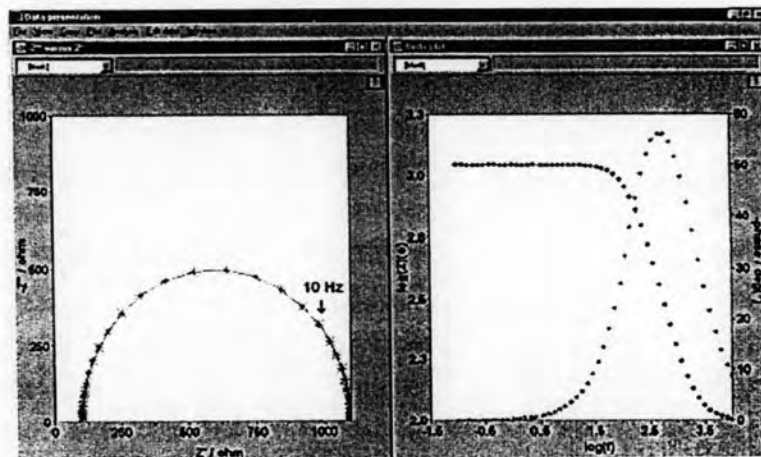
ความสัมพันธ์ระหว่างการแสดงผลของข้อมูลในรูปแบบของ Nyquist Plot และ Bode Plot ดังสมการ

$$|Z|^2 = (\text{Re } Z)^2 + (\text{Im } Z)^2 \quad (2.55)$$

$$\omega = \tan^{-1} \frac{\text{Im } Z}{\text{Re } Z} \quad (2.56)$$

$$\text{Re}(Z) = |Z| \cos \phi \quad (2.57)$$

$$\text{Im}(Z) = |Z| \sin \phi \quad (2.58)$$



รูปที่ 2.19 Nyquist Plot และ Bode Plot [10]

โดยทั่วไปการทดลองหาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบเคมีไฟฟ้าจะประกอบด้วย เซลล์เคมีไฟฟ้า (หรือระบบภายใต้การวิเคราะห์) เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า (Potentiostat) หรือเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้า (Galvanostat) และเครื่องวิเคราะห์การตอบสนองของความถี่ (Frequency Response Analyzer, FRA)

โดยที่เครื่องวิเคราะห์การตอบสนองค่าความถี่จะใช้คลื่นรูปไซน์และการวิเคราะห์การตอบสนองของระบบ เพื่อระบุค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ

โครงสร้างของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้วซึ่งเป็นเซลล์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายที่สุด ขั้วไฟฟ้าที่สามนี้คือขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode) ซึ่งถูกนำมาใช้ในการกำหนดศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทำงานให้มีความแน่นอน เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าสัมบูรณ์ของขั้วไฟฟ้าเดี่ยว ไม่สามารถทำการวัดค่าได้ การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าเคมีจึงใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็นหลักในการทำงาน เพราะฉะนั้นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงจึงควรผันกลับไปมาได้และศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงควรจะมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาที่ทำการวัด

โดยทั่วไปการทดลองอิมพีแดนซ์จะทำภายใต้การควบคุมศักย์ไฟฟ้า รูปแบบของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะทำการทดลองโดยการกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่ง แล้วเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าในรูปฟังก์ชันไซน์เข้าไปรบกวนศักย์ไฟฟ้าและนำไปใช้กับเซลล์ ค่ากระแสไฟฟ้าจะถูกวัดเพื่อนำไประบุอิมพีแดนซ์ของระบบ

เครื่องวิเคราะห์การตอบสนองค่าความถี่จะอยู่ในรูปแบบกระแสลับ โดยทั่วไปการวัดจะทำในรูปของฟังก์ชันไซน์เพียงฟังก์ชันเดียว แต่หากใช้ฟังก์ชันแบบหลายฟังก์ชัน (5 หรือ 15) จะเป็นการประหยัดเวลาเมื่อทำการวัดที่ความถี่ต่ำมาก ๆ โดยสัญญาณกระตุ้นที่ใช้จะมีขนาดเล็ก ๆ ประมาณ 10 mV โดยช่วยความถี่ที่ใช้ถูกกำหนดโดยข้อจำกัดของเครื่องมือและระบบ ระยะเวลาที่ใช้ในการวัดของแต่ละค่าความถี่คือส่วนกลับของค่าความถี่นั่นเอง ดังนั้น เมื่อความถี่ต่ำมาก ๆ จะใช้เวลาสูงมากในการที่จะอ่านข้อมูลอย่างสมบูรณ์ เช่นการวัดข้อมูลที่มีความถี่ 1 mHz จะใช้เวลา 1000 วินาที โดยปกติแล้วความถี่ที่ใช้จะอยู่ในช่วง 100 kHz – 0.1 Hz ซึ่งจะใช้เวลาในการวัดทั้งสิ้นประมาณ 10 นาที

อิมพีแดนซ์ที่ได้สามารถแปลให้อยู่ในรูปของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าและแบบจำลองกระบวนการ ซึ่งจะทำให้สามารถประมาณขอบเขตที่ใช้อธิบายข้อมูลที่ได้จากการทดลองได้อย่างเหมาะสม และยังสามารถช่วยในการคาดการณ์พฤติกรรมของระบบภายใต้ภาวะที่หลากหลายได้ด้วย

2.6 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k [9,10]

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้กันมากในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายปัจจัยที่ต้องการศึกษาถึงผลรวมที่มีผลต่อผลตอบสนองซึ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับคือระดับสูงและระดับต่ำ แบบจำลองทางสถิติของการออกแบบ 2^k ประกอบด้วยผลหลัก k ชนิด, อันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย, อันตรกิริยาของ 3 ปัจจัย และ 1 อันตรกิริยาของ

k ปัจจัย การออกแบบการทดลองแบบ 2^k มีประโยชน์อย่างมากต่อการทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยจำนวนมากที่ต้องการทดสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นการออกแบบ 2^k จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลง

2.6.1 แบบจำลองการถดถอย (Regressive model)

ในการออกแบบการทดลองแบบ 2^k สามารถหาแบบจำลองการถดถอยได้จาก

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.59)$$

โดยที่ x คือ ตัวแปรที่ถูกเข้ารหัส
 β คือ สัมประสิทธิ์ของการถดถอย

ซึ่งพจน์ต่าง ๆ ในสมการจะได้มาจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยตัวแปรหรือสหสัมพันธ์ของตัวแปร ที่มีผลกระทบมากกับค่าจากการทดลองจะถูกนำมาเขียนในสมการ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ β_0 คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมดและค่าสัมประสิทธิ์ $\beta_{1...k}$ จะเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าการประมาณผลกระทบ (Effect Estimate) เนื่องจากว่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอยจะเป็นตัววัดผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า x หนึ่งหน่วยต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของ y และผลที่ประมาณได้นี้ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลง 2 หน่วย (จาก -1 ไป +1)

แบบจำลองการถดถอยสามารถใช้ได้ในการหาค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ได้และค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของการออกแบบจะเท่ากับผลต่างของค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งค่าส่วนตกค้างนี้จะสามารถนำไปวิเคราะห์ความเพียงพอของแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้น โดยการทำให้ Normal probability plot

2.6.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

1. สมมติฐานของความเป็นปกติ

ในการออกแบบ 2^k จะต้องมีสมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นปกติที่ยอมรับได้ ดังนั้นจะต้องทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นปกติโดยการทำให้ Normal probability plot ของส่วน

ตกค้าง ซึ่งถ้าหากการแจกแจงความผิดพลาดเป็นแบบปกติคือ มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีค่าความแปรปรวนคงที่ค่าหนึ่ง กราฟที่สร้างขึ้นมานี้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง

2. การพล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต

หากแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความถูกต้องและสมมติฐานมีความเหมาะสมแล้ว ส่วนตกค้างที่เกิดขึ้นไม่ควรจะมีรูปแบบหรือโครงสร้างใด ๆ ทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่ควรมีความสัมพันธ์กับปัจจัยอื่น รวมถึงค่าผลตอบสนองที่ถูกทำนายอีกด้วย การตรวจสอบอย่างง่าย ๆ คือการพล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted value) กราฟที่ได้ไม่ควรจะออกมามีรูปร่างแต่อย่างใด

ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติของการออกแบบ 2^k สามารถสรุปได้ดังนี้

1. คาดเดาผลกระทบที่จะเกิดจากตัวแปรต่าง ๆ (Estimate factor effects)
2. สร้างแบบจำลองเริ่มต้น (Form initial model)
3. ดำเนินการทดสอบเชิงสถิติ (Perform statistical testing)
4. ทำการปรับปรุงแบบจำลอง (Refine model)
5. วิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Analyze residual)
6. อธิบายผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Interpret results)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lee และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาผลของแรงที่ใช้ในการอัดประกอบเซลล์เข้าด้วยกัน และผลของชั้นแก๊สแพร่ 3 ชนิดที่มีต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม โดยในการทดลอง กำหนดค่าอัตราส่วนของอัตราการไหลให้คงที่ พบว่าการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นฟังก์ชันกับการเปลี่ยนแรงโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการขับเคลื่อนอัดประกอบเซลล์ การใช้แรงอัดสูงเกินไปจะไปสร้างความเสียหายให้แก่ชั้นแก๊สแพร่ได้ โดยทำการทดลองที่ความดัน 202 kPa และอุณหภูมิ 353 K พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับความหนาของประเก็นและแรงโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการอัดเข้าไป โดยที่สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงมีความเปลี่ยนแปลงอาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงทางด้านความพรุน ความต้านทานผิวสัมผัสทางไฟฟ้า รวมไปถึงปริมาณน้ำในเมมเบรนด้วย

Jiang และคณะ [12] ทำการศึกษากการออกแบบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม 3 ชนิดประกอบ ด้วยแบบที่ใช้ bipolar, pseudo bipolar และ monopolar รวมถึงศึกษาผลของความชื้นและอุณหภูมิที่มีต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าชั้นเซลล์เชื้อเพลิงแบบที่ใช้ bipolar เหมาะกับการใช้งานแบบที่ให้กำลังไฟฟ้าปานกลางถึงสูงแต่ถ้าเกิดมีเซลล์เดี่ยวเซลล์ใดเสื่อม จะทำให้เซลล์

ทั้งหมดสูญเสียค่ากำลังไฟฟ้าไปด้วย การจัดการกับน้ำ ความร้อน อากาศและเชื้อเพลิงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบที่ใช้ bipolar สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบที่ใช้ pseudo bipolar สามารถเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าได้โดยเพิ่มหน่วย bi-cell เข้าไป กรณีใช้ monopolar แก๊สที่เข้าไปทำปฏิกิริยาจะถูกแยกออกจากกัน แต่ถ้ามีเซลล์เดี่ยวเซลล์หนึ่งเสื่อม ก็จะไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงทั้งหมด เหมาะกับการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการค่ากำลังไฟฟ้าต่ำ ๆ และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง ๆ

Scholta และคณะ [13] ได้ทำการพัฒนาชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มขนาด 10 กิโลวัตต์โดยคำนึงถึงการลดต้นทุนการผลิต ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่สร้างขึ้นมา 3 ขนาดคือ 3, 14 และ 72 เซลล์ ในการทดลองกำหนดให้ขนาด 3 และ 14 เซลล์ใช้ชั้นแก๊สแพร่ชนิดเดียวกัน พบว่าชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 3 และ 14 เซลล์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานได้หากเลือกใช้ชั้นแก๊สแพร่ที่มีคุณภาพดีรวมถึงการเลือกแผ่นนำไฟฟ้าแบบสองขั้วที่มีประสิทธิภาพดีด้วย ในส่วนของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 72 เซลล์ทำงานได้ดีเกินกว่าเป้าหมายที่คาดไว้ เป็นการช่วยยืนยันว่าขั้นตอนการออกแบบสร้างชั้นเซลล์เชื้อเพลิงโดยคำนึงถึงรูปแบบช่องทางไหลของแก๊สและการใช้ประโยชน์จากชนิดของชั้นแก๊สแพร่ให้คุ้มค่าที่สุดจะนำไปสู่การเพิ่มค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ได้ ผลการทดลองด้านการใช้งานเป็นระยะเวลานาน พบว่าการจัดการกับน้ำในเซลล์มีผลต่อการลดลงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์

Dante และคณะ [14] ทำการออกแบบการทดลองแบบ 2^k โดยใช้การทดลองแบบ 2 ระดับ 4 ปัจจัย มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม ขนาด 7 เซลล์โดยทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ ปัจจัยที่นำมาพิจารณาในการออกแบบการทดลองประกอบด้วยความดันและอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน และได้นำวิธี fractional matrix array มาใช้เพื่อลดจำนวนการทดลองเหลือ 8 การทดลองแทนที่จะทำแบบ full factorial design ที่ 16 การทดลอง ผลการทดลองพบว่าการใช้อัตราการไหลและความดันของแก๊สไฮโดรเจนต่ำจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ออกมาดีมีความเสถียร และช่วยลดความแปรปรวนที่เกิดระหว่างการทดลองได้ นอกจากนี้ยังพบว่าพฤติกรรมของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนจะตรงกันข้ามคือ เมื่อเพิ่มความดันให้แก๊สไฮโดรเจน ค่ากำลังไฟฟ้าจะเพิ่มตามไปด้วย ในขณะที่การเพิ่มความดันให้แก๊สออกซิเจนจะไปลดค่ากำลังไฟฟ้าลง และการให้อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเพิ่มสูงขึ้น จะเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าแต่การให้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนสูงจะไปลดค่ากำลังไฟฟ้าลง เหตุการณ์แบบนี้อาจเนื่องมาจากเกิดการผสมกันของปัจจัยทางด้านอุณหพลศาสตร์และจลนพลศาสตร์เข้าด้วยกันบนพื้นผิวที่เกิดปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า

Nguyen และคณะ [15] ทำการศึกษาการจัดการกับระบบช่องทางเดินแก๊สและน้ำเพื่อเป็นกุญแจสำคัญที่นำไปสู่การทำงานที่ดีขึ้นของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้

ช่องทางการไหลแบบ interdigitated แต่ช่องทางการไหลแบบนี้ไม่สามารถนำมาใช้ได้กับชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ต่อกันหลาย ๆ อัน เนื่องจากไม่สามารถที่จะทำให้แก๊สไหลผ่านอย่างสม่ำเสมอไปยังแต่ละเซลล์ได้ เพราะว่าช่องทางการไหลแบบ interdigitated ใช้อัตราการไหลของแก๊สเพื่อกำจัดน้ำส่วนที่มากเกินไป ถ้าอัตราการไหลของแก๊สไม่เพียงพอ ก็จะทำให้เซลล์เกิดการท่วมได้ เพื่อแก้ปัญหาการกระจายตัวของแก๊สที่ไม่สม่ำเสมอนี้ จึงได้คิดค้นวิธี sequential exhausting ขึ้นมา วิธีนี้จะควบคุมการไหลของแก๊สให้หมดผ่านไปทีละเซลล์จึงมั่นใจได้ว่าแก๊สจะไหลอย่างสม่ำเสมอผ่านเซลล์นั้น ๆ ในการทดลองนี้ใช้ชั้นเซลล์เชื้อเพลิง 3 ขนาด, ช่องทางการไหลแบบ interdigitated ทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศพบว่าการใช้วิธี sequential exhausting สามารถเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าจาก 0.26 วัตต์/ตร.ซม.ต่อเซลล์ไปเป็น 0.50 วัตต์/ตร.ซม.

Mehta และคณะ [16] ได้ทำการรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม โดยจะประกอบด้วยข้อมูลของเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน 16 ชนิด, ชั้นแก๊สแพร่ 2 ชนิด, ตัวเร่งปฏิกิริยาที่พื้นผิวฝั่งแอโนด 8 ชนิดและทางฝั่งแคโทด 4 ชนิด นอกจากนี้ยังได้ออกแบบแผ่นนำไฟฟ้าแบบสองขั้วมากกว่า 100 แบบและยังมีกระบวนการสำหรับ สังเคราะห์เมมเบรนชนิดต่าง ๆ ซึ่งถือเป็นตัวเลือกทางด้านการผลิต ใช้เป็นฐานข้อมูลไปสู่การขยายการผลิตต่อไป