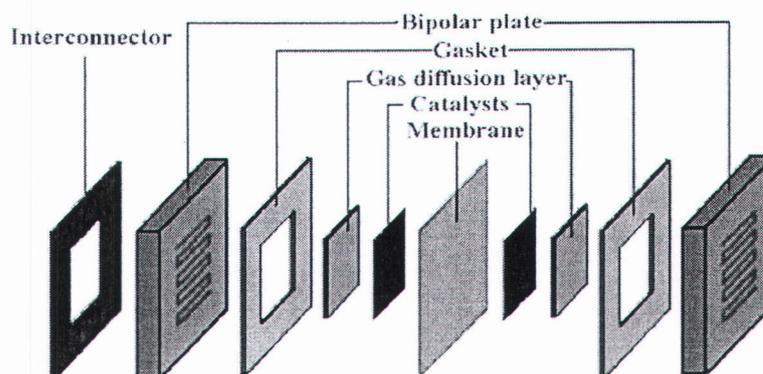


## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 2 ประกอบไปด้วยเนื้อหา 4 ส่วนหลัก โดยส่วนแรกมีเนื้อหาเกี่ยวกับหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง รายละเอียดเกี่ยวกับองค์ประกอบภายในเซลล์เดี่ยวซึ่งจะอธิบายการทำงานของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ รวมไปถึงการเพิ่มขนาดแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ส่วนที่สองมีเนื้อหาเกี่ยวกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงและการทำงาน ส่วนที่สามเกี่ยวกับการจัดการกับน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง ความสำคัญของน้ำต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงและการเพิ่มระบบน้ำภายในเซลล์ และในส่วนตัวสุดท้ายของบทนี้ได้นำตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานภายใต้อากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำและการปรับปรุงสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานภายใต้ความชื้นต่ำ

### 2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่สร้างพลังงานไฟฟ้าจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเมมเบรน โดยใช้เชื้อเพลิงเป็นไฮโดรเจนและตัวทำปฏิกิริยา(reactant) อีกตัวที่อาจเป็นออกซิเจนหรืออากาศก็ได้ ภายในเซลล์เชื้อเพลิงจะประกอบด้วยส่วนของเมมเบรนและประกบด้วยชั้นของ catalyst layers และ diffusion layer ทั้งสองด้าน ส่วนที่อยู่ตรงใจกลางนี้ทั้งหมดถูกเรียกว่า Membrane Electrode Assemblies (MEA) ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ถัดออกมาจะเป็นชั้นของปะเก็น (gasket) ที่ใช้เพื่อป้องกันไม่ให้ไฮโดรเจนและออกซิเจนรั่วออกจากพื้นที่ที่ต้องการให้เกิดปฏิกิริยา ถัดจากนั้นจึงเป็นชั้นของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว (bipolar plate) ที่ทำหน้าที่เป็นแผ่นกำกับทิศทางการไหลของไฮโดรเจนและออกซิเจน นอกเหนือจากนี้แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วยังทำหน้าที่เป็นตัวส่งกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ภายในเซลล์ออกไปอีกด้วย ลักษณะของการจัดเรียงชั้นต่างๆภายในเซลล์เป็นไปตามรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 องค์ประกอบภายในของเซลล์เชื้อเพลิง [29]

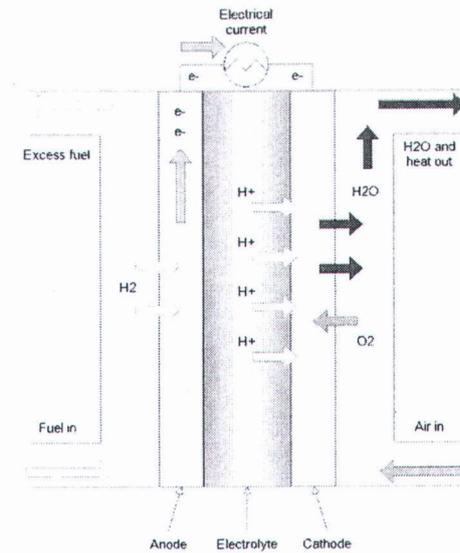
การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเริ่มจากการป้อนไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ให้วิ่งผ่านแผ่นกักก๊าสทิศทางไหลของแก๊สเข้าสู่ขั้วแอโนด และป้อนออกซิเจนหรืออากาศเข้าสู่แผ่นกักก๊าสทิศทางไหลด้านแคโทด ซึ่งที่ขั้วแอโนดจะใช้แพลทินัม (Platinum) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแยกแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) เป็นไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) และอิเล็กตรอน ( $e^-$ ) ดังสมการ



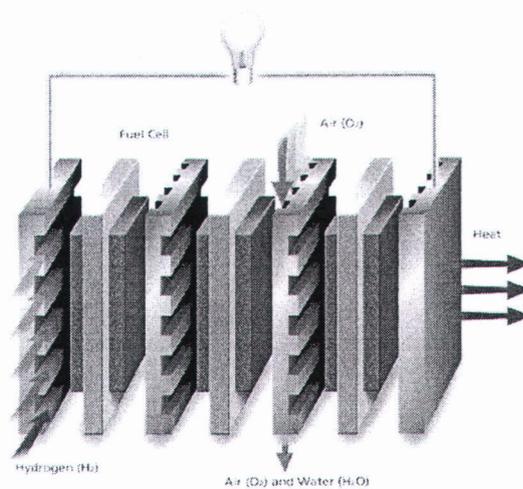
ไฮโดรเจนไอออนจะวิ่งผ่านเมมเบรนไปยังขั้วแคโทด ซึ่งเมมเบรนนั้นจะยอมให้แค่ไอออนบวกหรือโปรตอนผ่านเท่านั้น ในขณะที่เดียวกันอิเล็กตรอนจะต้องวิ่งผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกซึ่งจะก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้า ณ ขั้วแคโทดจะมีปฏิกิริยาที่เกิดจากอิเล็กตรอนและไฮโดรเจนไอออนรวมเข้ากับออกซิเจนได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำดังสมการ



รูปที่ 2-2 แสดงปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเพียงหนึ่งเซลล์ จากปฏิกิริยาดังกล่าว เซลล์เชื้อเพลิงสามารถให้ค่าแรงดันไฟฟ้าประมาณ 1 โวลต์ การเพิ่มแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำได้ง่ายเพียงนำเซลล์เชื้อเพลิงมาต่ออนุกรมเข้าด้วยกันก็จะได้แรงดันไฟฟ้าและกำลังเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2-3 โดยปกติจะเรียกการประกอบเซลล์เชื้อเพลิงหลายๆเซลล์รวมเข้าด้วยกันนี้ว่าเซลล์แถว (stack) [17-18]



รูปที่ 2-2 การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน [30]

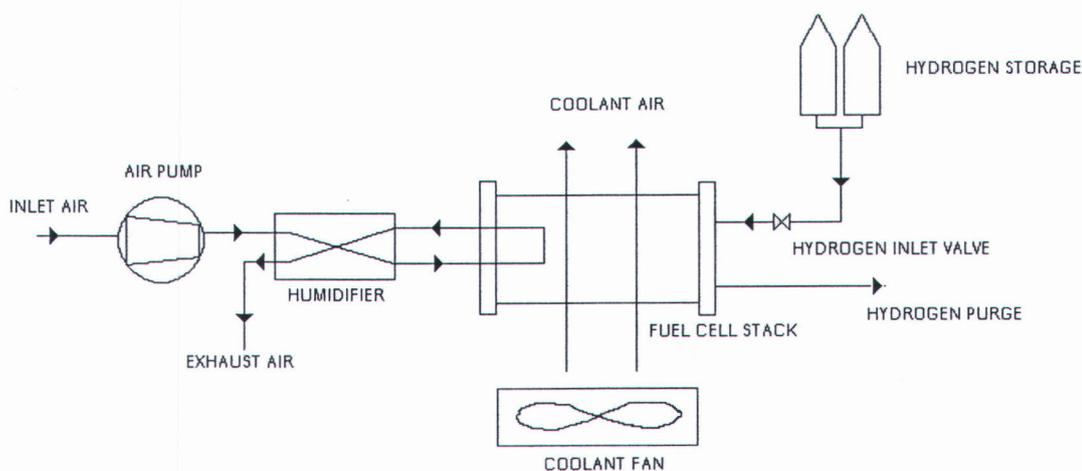


รูปที่ 2-3 การประกอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ stack [31]

เซลล์เชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปของเซลล์แถวจำเป็นต้องประกอบไปด้วยหลายระบบย่อย ทั้งระบบป้อนไฮโดรเจน ระบบป้อนอากาศเข้าสู่เซลล์แถว ระบบระบายความร้อน เป็นต้น เซลล์เชื้อเพลิงที่ประกอบด้วยระบบย่อยดังกล่าวจะถูกเรียกว่า "ระบบเซลล์เชื้อเพลิง" ซึ่งมีรายละเอียดอยู่ในหัวข้อถัดไป

## 2.2 ระบบเซลล์เชื้อเพลิง [ PEMFC Power Module ]

PEMFC power module หรือ Proton Exchange Membrane Fuel Cell Power Module คือ เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีอุปกรณ์เสริม (Auxiliary) รวมอยู่ด้วยและมีระบบที่เชื่อมต่อให้การทำงานเป็นไปในรูปแบบที่สมบูรณ์ ทำให้สามารถทำงานแบบ stand-alone ได้ หากเป็นระบบเซลล์เชื้อเพลิงขนาดเล็กจะถูกออกแบบให้สามารถพกพาได้โดยไม่ต้องเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นได้อีกและสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่ขึ้นก็จะถูกออกแบบระบบเซลล์เชื้อเพลิงให้สามารถเคลื่อนย้ายได้เหมาะสมสำหรับการนำไปพัฒนาสู่การใช้งานยาวนานโดยอุปกรณ์เสริมสำหรับระบบเซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าวจะทำหน้าที่ป้อนอากาศ ไฮโดรเจน ระบายความร้อน ควบคุมระดับอุณหภูมิและความดันทำงานของเซลล์แถวให้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ นอกจากนี้นี้อาจออกแบบให้ระบบเซลล์เชื้อเพลิงประกอบไปด้วยระบบปลีกย่อยอื่นๆ เช่น ระบบปรับปรุงคุณภาพของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์ให้มีค่าสม่ำเสมอ ระบบจัดการกับน้ำให้มีค่าที่เหมาะสมต่อความต้องการเมมเบรน เป็นต้น



รูปที่ 2-4 ตัวอย่างองค์ประกอบของ power module

อุปกรณ์เสริมที่มีความจำเป็นได้แก่ คอมเพรสเซอร์ พัดลมระบายความร้อน อุปกรณ์เพิ่มความชื้น เซนเซอร์และระบบคอนโทรลอื่นๆ ดังแสดงตำแหน่งที่ติดตั้ง auxiliary เข้ากับ stack ในรูปที่ 2-4

การทำงานของ power module เริ่มจากการป้อนตัวทำปฏิกิริยาเข้าสู่ระบบ โดยในด้านแคโทดจะมีระบบป้อนอากาศเข้าสู่คอมเพรสเซอร์ซึ่งทำหน้าที่อัดอากาศแล้วส่งผ่านไปยังอุปกรณ์เพิ่มความชื้น เพื่อเพิ่มอุณหภูมิและปริมาณความชื้นให้แก่อากาศป้อนก่อนที่จะเคลื่อนที่เข้าสู่เซลล์

แถว สำหรับด้านแอโนดจะมีระบบป้อนไฮโดรเจนผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลแล้วเข้าสู่ด้านแอโนด ในระหว่างที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงานเซลล์แถวจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี จึงต้องมีพัดลมระบายความร้อนคอยช่วยระบายความร้อนทิ้ง เพื่อให้เซลล์แถวรักษาระดับอุณหภูมิให้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้และป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายภายในเมมเบรน ซึ่งมักจะเกิดการเสียหายเมื่อต้องทำงานภายใต้อุณหภูมิสูง

ในระหว่างที่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงทำงาน อุปกรณ์เสริมต่างๆ จะใช้ไฟฟ้าที่เซลล์แถวผลิตได้ โดยไม่ใช่แหล่งจ่ายไฟสำรองเลย ซึ่งจากการศึกษา พบว่า อุปกรณ์เสริมหลักที่มีการบริโภคกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แถวสูงสุด ได้แก่ คอมเพรสเซอร์และพัดลมระบายความร้อน ตามลำดับ [23] ในการกำหนดสถานะในการทำงานจึงไม่สามารถละเลยการพิจารณาถึงปริมาณของกำลังไฟฟ้าที่อุปกรณ์เสริมเหล่านี้บริโภคได้เลย ในงานวิจัยนี้จึงจะนำการบริโภคกำลังไฟฟ้าของทั้งคอมเพรสเซอร์และพัดลมระบายอากาศมาเป็นหนึ่งในปัจจัยในการพิจารณาสมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิง ดังที่ได้เกริ่นไว้ในบทนำ

## 2.3 การจัดการกับน้ำ

การจัดการกับน้ำเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ได้รับความสนใจและมีหลากหลายงานวิจัยพยายามที่จะศึกษา ในหัวข้อนี้จึงมีเนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับความสำคัญของปริมาณน้ำภายในเซลล์ การเคลื่อนที่ของน้ำภายในเซลล์และการเพิ่มน้ำจากภายนอกเข้าสู่เซลล์ รายละเอียดมีดังต่อไปนี้

### 2.3.1 ปริมาณน้ำภายในเมมเบรน [18-20]

ค่า protonic conductivity ของเมมเบรนมีค่าขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเมมเบรนและปริมาณน้ำสะสมภายในเมมเบรนนั้น หากเมมเบรนมีปริมาณน้ำไม่เพียงพอจะส่งผลให้เมมเบรนแห้ง ค่า conductivity ภายในเมมเบรนมีค่าลดลง ทำให้ค่า ohmic loss มีค่าเพิ่มขึ้นและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ลดลงเนื่องจาก ohmic loss ที่มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในอีกกรณีหนึ่ง หากมีการป้อนไอน้ำเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงมากเกินไปอาจทำให้เกิดปริมาณน้ำสะสมในเซลล์มากเกินไปก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์มีปริมาณลดลง ส่งผลให้การจัดการกับปริมาณน้ำให้มีค่าที่เหมาะสมกลายเป็นกุญแจสำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะและประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง นอกเหนือจากนั้นยังส่งผลต่ออายุการใช้งานของเมมเบรนและความคงทนของ catalyst อีกด้วย

### 2.3.2 การเคลื่อนที่ของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง [18,21]

น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์เชื้อเพลิง อัตราของน้ำที่ได้จากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี มีค่าดังสมการ

$$N_{H_2O,gen} = \frac{i}{2F} \quad (2-3)$$

โดย  $N_{H_2O,gen}$  คือ อัตราของน้ำที่ได้จากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีมีหน่วยเป็น  $mols^{-1} cm^{-2}$  และ  $F$  คือ Faraday's constant

ในขณะที่โปรตอนเคลื่อนที่จากฟางฝั่งแอโนดสู่ฝั่งแคโทด โปรตอนจะอุ้มน้ำไปยังฝั่งแคโทดด้วย กลไกนี้ถูกเรียกว่า "electroosmotic drag" ส่งผลให้ด้านแคโทดมีปริมาณน้ำสูงกว่าด้านแอโนดมาก ทั้งจากน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและน้ำที่ได้จากปฏิกิริยา electroosmotic drag ทำให้เกิดภาวะที่เรียกว่า "water diffusion back" ซึ่งใช้เรียกภาวะน้ำเคลื่อนที่ย้อนกลับจากด้านแคโทดสู่ด้านแอโนดเนื่องจากปริมาณน้ำที่ด้านแคโทดสูงกว่าด้านแอโนดมาก

### 2.3.3 การเพิ่มความชื้นแก่ระบบเซลล์เชื้อเพลิง [22]

ในกรณีที่เซลล์เชื้อเพลิงมีระดับน้ำในเซลล์ไม่เพียงพอ ความชื้นภายในเซลล์ต่ำ สมรรถนะของเซลล์จะมีค่าต่ำลงไปด้วยตามเหตุผลที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1 ปริมาณน้ำในเมมเบรน การป้อนน้ำจากภายนอกให้แก่เซลล์จึงกลายเป็นสิ่งจำเป็นและสามารถทำได้หลากหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมมากที่สุดคือการเพิ่มความชื้นให้แก่ตัวทำปฏิกิริยา โดยการออกแบบให้ตัวทำปฏิกิริยาเคลื่อนที่ผ่านเครื่องเพิ่มความชื้นก่อนจะเข้าสู่เซลล์ นอกเหนือจากนี้ ระบบที่ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความชื้นภายนอกสามารถออกแบบให้อากาศที่ออกจากเซลล์ไหลกลับมาป้อนน้ำให้แก่อากาศขาเข้าเพื่อเพิ่มระดับความชื้นแก่อากาศป้อนก่อนที่จะไหลเข้าสู่เซลล์

## 2.4 เซลล์เชื้อเพลิงภายใต้ความชื้นต่ำ

เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้อากาศในบรรยากาศเป็นออกซิแดนที่ในการเข้าทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีจะมีสภาวะของอากาศป้อนที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับอากาศแวดล้อม หากเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่อากาศแวดล้อมความชื้นต่ำ ซึ่งไม่เหมาะต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงดังได้กล่าวไปในหัวข้อก่อนหน้านี้ โดยพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงที่ต้องทำงานภายใต้อากาศที่มีความชื้นต่ำและการเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะอากาศดังกล่าว มีเนื้อหาดังต่อไปนี้



#### 2.4.1 สมรรถนะในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้ความชื้นต่ำ

ในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าเมมเบรนที่ใช้ภายในเซลล์เชื้อเพลิงต้องการให้มีความชื้นภายในเมมเบรนสูงจึงจะทำงานได้ดี เนื่องจาก ค่า protonic conductivity ของเมมเบรนนั้นจะมีค่าที่ดีก็ต่อเมื่อปริมาณความชื้นภายในเซลล์มีค่าเพียงพอตามที่เคยกล่าวไปในหัวข้อ การเพิ่มความชื้นแก่เซลล์จึงมีความจำเป็นโดยในหลากหลายการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิง นิยมติดอุปกรณ์เพิ่มความชื้นแก่อากาศไว้ภายนอกเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มความชื้นแก่อากาศขาป้อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิง แต่ก็มีอีกหลายงานวิจัยที่พยายามจะศึกษากรณีที่อากาศป้อนมีความชื้นต่ำ เนื่องจากการไม่ใช้อุปกรณ์เพิ่มความชื้นว่าเซลล์เชื้อเพลิงจะยังคงทำงานได้ดีหรือไม่ ผลการศึกษาพบว่า สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อเซลล์ทำงานที่ความชื้นต่ำยังคงมีค่าต่ำกว่าตอนที่เซลล์มีความชื้นสูงอยู่มาก แต่ก็ยังพบว่ามีหลายปัจจัยที่สามารถปรับปรุงเซลล์ที่มีความชื้นในการทำงานต่ำมีค่าสมรรถนะที่ดีขึ้นได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้พยายามรวบรวมผลการวิจัยที่บ่งชี้ว่า หากเซลล์เชื้อเพลิงมีอากาศป้อนที่ความชื้นต่ำ จะสามารถแก้ไขให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นได้โดยอาศัยปัจจัยดังต่อไปนี้

#### 2.4.2 การเพิ่มสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานภายใต้ความชื้นต่ำ

การเพิ่มสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานภายใต้ความชื้นต่ำสามารถทำการปรับค่าในการทำงานได้หลายค่า ได้แก่ ความดันทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง อุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง อัตราการไหลของตัวทำปฏิกิริยา เป็นต้น รายละเอียดการเพิ่มสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานภายใต้ความชื้นต่ำมีดังต่อไปนี้

##### (ก) ความดันทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [15,18,24]

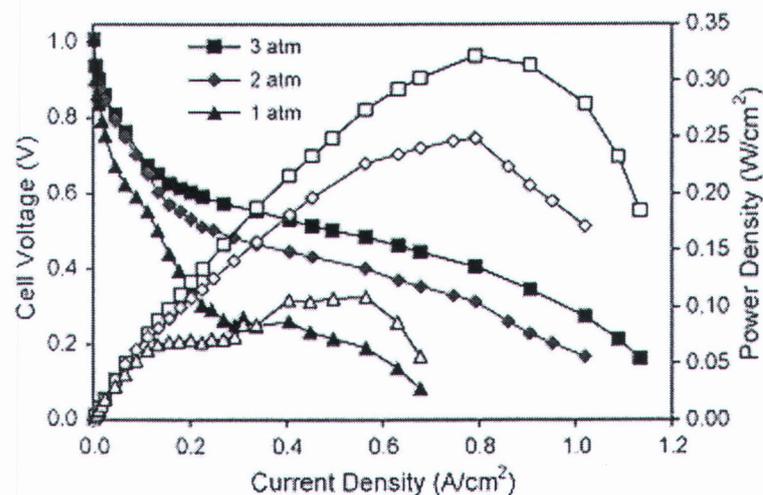
โดยปกติแล้วเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนนั้นสามารถทำงานในที่มีความดันบรรยากาศหรือสูงกว่าความดันบรรยากาศก็ได้ ระดับความดันทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะถูกควบคุมโดย backpressure regulator ที่ติดตั้งไว้ที่ขาออกของตัวทำปฏิกิริยาทั้งสองด้าน สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานที่ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศนั้นจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า แต่ในการเลือกว่าจะใช้ความดันทำงานที่เท่าใดยังจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึง Power consumption ที่มีผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบด้วย นอกจากนี้ยังมีปัญหาการรั่วของตัวทำปฏิกิริยาที่ต้องคำนึงถึงด้วยเช่นกัน

ในการทดสอบหาค่าความดันทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสม ทาง J.L.Zhang ได้แบ่งการวิเคราะห์ผลการทดสอบของเขาและคณะออกเป็น 2 วิธีด้วยกัน โดยวิธีแรก



เขาได้ใช้วิธีประเมินประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจากค่า cell voltage และค่า power density เทียบกับค่า current density และสำหรับวิธีที่สองเขาจะเพิ่มการพิจารณาค่า kinetic and mass transfer resistances ที่ประเมินจากค่า In-situ AC Impedance diagnosis เข้าไปร่วมกับการพิจารณาในวิธีแรก

ในการทดสอบครั้งแรกของเขา J.L.Zhang [15] ที่ทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงอุณหภูมิทำงานเป็น 80-120°C โดยใช้อากาศแห้งเป็นออกซิแดนท์แล้วใช้วิธีการวิเคราะห์วิธีแรก พบว่า เมื่อความดันเพิ่มขึ้นจาก 1 atm เป็น 2 atm และ 3 atm ตามลำดับ ค่า Cell voltage ของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าเพิ่มขึ้นไปด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูป 2-5 เขาให้เหตุผลว่า การลดค่าความดันทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะส่งผลในเชิงลบต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงถึงสองด้านด้วยกัน ด้านแรกคือส่งผลให้เกิด partial pressure drop ขึ้นภายในช่องทางการไหลของตัวทำปฏิกิริยาทั้งสอง และในด้านที่สองคือการเพิ่มขึ้นของ volumetric flow rate เมื่อทำงานที่ความดันต่ำ เมื่อเทียบกับกรณีที่มีความดันสูงขึ้นและใช้ค่า mass flow rate คงที่

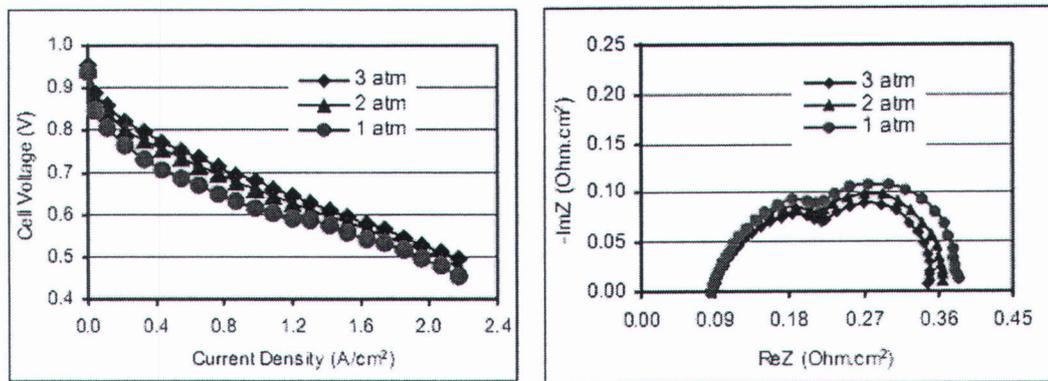


รูปที่ 2-5 ผลของความดันทำงานที่มีต่อค่า Cell Voltage ของเซลล์เชื้อเพลิง [15]

ผลที่ได้จากงานวิจัยชิ้นแรกสอดคล้องกับงานวิจัยชิ้นที่สองของ J.L.Zhang [24] ที่ทำการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเป็น 70°C และใช้ตัวทำปฏิกิริยาที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์เป็น 100% แล้วใช้วิธีการวิเคราะห์วิธีที่สอง พบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจาก 1 atm ไปเป็น 2 และ 3 atm. ค่า Cell voltage ของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าเพิ่มขึ้นไปด้วยเช่นเดียวกันกับงานชิ้นแรกดังแสดงในรูปที่ 2-6 (a) และจากผลของ In-situ Ac Impedance

diagnosis แสดงให้เห็นว่า kinetic and mass transfer resistances มีค่าลดลงเมื่อความดันทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2-6 (b)

จากการทดสอบทั้งสองครั้งของเขพบว่า เมื่อทำการเพิ่มความดันทำงานเซลล์เชื้อเพลิงจะส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าดีขึ้นไม่ว่าเซลล์เชื้อเพลิงจะทำงานโดยไม่ได้รับความชื้นจากภายนอกเลยหรือทำงานโดยได้รับความชื้นจากภายนอกเป็นปริมาณสูงก็ตาม



รูปที่ 2-6 ผลของความดันทำงานที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง [24]

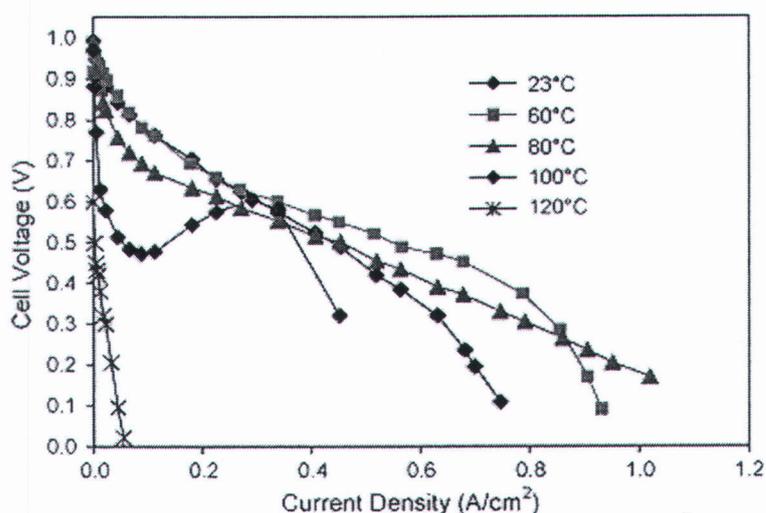
(a) ผลต่อ cell voltage (b) ผลต่อ In-situ AC Impedance diagnosis

(ข) อุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [15,25]

อุณหภูมิทำงานเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง การที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์ดีขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง ค่า reaction kinetic ของทั้งไฮโดรเจนและออกซิเจนจะมีค่าสูงขึ้น แต่อุณหภูมิที่สูงก็จะทำให้ไอน้ำภายในเมมเบรนระเหยเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำสะสมภายในเซลล์ลดลงซึ่งจะส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพของเซลล์ การควบคุมอุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงให้มีค่าที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นและหลีกเลี่ยงไม่ได้

ในการศึกษาหาอุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบที่ความชื้นต่ำหรืออากาศแห้งนั้น เมื่อทำการทดสอบแล้ววิเคราะห์ผลการทดสอบที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งนั้นเป็นไปได้ยากที่จะสรุปให้แน่ชัดได้ว่าผลการทดสอบที่ได้เกิดจากสาเหตุใด ในงานวิจัยบางชิ้น อาจใช้การเปรียบเทียบผลของ polarization curve หรือใช้การเปรียบเทียบค่า cell voltage ควบคู่ไปกับ ค่า internal resistance ในการบ่งชี้ว่าอุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมควรมีค่าเป็นเท่าไร ดังงานวิจัยตัวอย่างต่อไปนี้

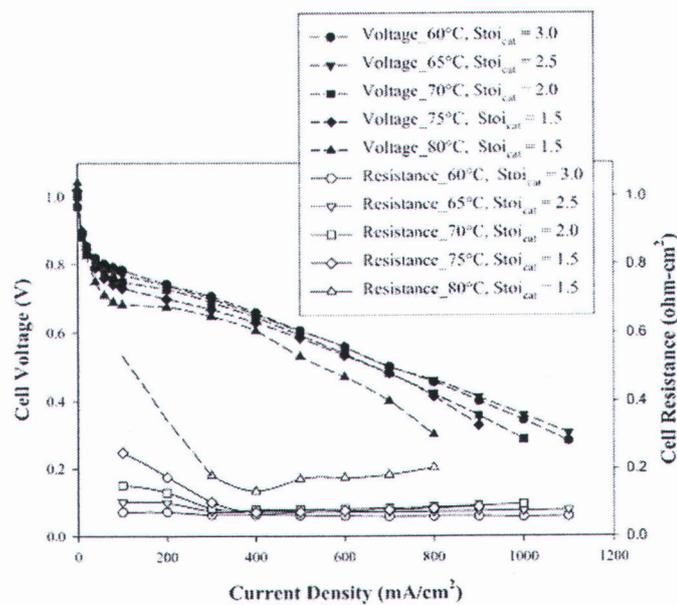
ในงานวิจัยของ J. Zhang และคณะ [15] ได้ทดสอบผลของอุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีค่าเป็น 23°C 60°C 80°C 100°C และ 120°C ต่อเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้อากาศแห้งเป็นออกซิแดนท์ พบว่า อุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมที่สุดเป็น 60°C โดยวิเคราะห์จาก polarization curve ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-7 โดยเขาได้อธิบายผลการทดสอบว่า ในช่วงที่ current density มีค่าต่ำ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าที่ดี เมื่ออุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเป็น 23°C และ 60°C ที่อุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าวจะให้ค่า current density ที่ใกล้เคียงกันมาก น่าจะเนื่องมาจากขณะที่ current density มีค่าต่ำนั้น และที่เซลล์เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิทำงานเป็น 23°C เซลล์จะมีปริมาณน้ำสะสมภายในเซลล์สูงกว่าเมื่ออุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเป็น 60°C แต่ ณ อุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเป็น 60°C เซลล์จะมีค่า reaction kinetics ที่ดีกว่า ณ อุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง 23°C และเมื่อทดสอบที่ current density สูงขึ้น พบว่า ที่อุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเป็น 60°C จะให้ค่า current density ที่ดีกว่า ณ อุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบค่าอื่นๆ เนื่องจากผลของค่า reaction kinetics ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะมีผลมากกว่าผลจากการสูญเสียปริมาณน้ำที่สะสมภายในเซลล์



รูปที่ 2-7 Polarization curve ณ อุณหภูมิทำงานต่างๆ [15]

ในงานวิจัยของ Minkmas V. Williams และคณะ [25] ที่ทำการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่ใช้อุปกรณ์เพิ่มความชื้นแล้วทดสอบผลของอุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง โดยทดสอบที่อุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเป็น 60°C, 65°C, 70°C, 75°C และ 80°C แล้ววัดค่า cell voltage และค่า internal resistance เพื่อนำมาพิจารณา

เปรียบเทียบกรณีที่ทดสอบทั้ง 5 กรณี พบว่า ที่ current density เป็น  $400 \text{ mA/cm}^2$  ค่า cell voltage จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามอุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น จาก  $60^\circ\text{C}$  ไปเรื่อยๆจนมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิเป็น  $75^\circ\text{C}$  แล้วจึงตกลงเมื่ออุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเป็น  $80^\circ\text{C}$  ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาค่า internal resistance ที่เกิดขึ้นแล้ว ก็พบว่า ณ อุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเป็น  $80^\circ\text{C}$  ค่า internal resistance จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างมาก ทำให้ทางคณะวิจัยอนุมานว่าค่า cell voltage ที่ตกลงเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเป็น  $80^\circ\text{C}$  เป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของค่า internal resistance ที่เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2-8



รูปที่ 2-8 ผลของอุณหภูมิทำงานต่อ cell voltage และ cell resistance ของเซลล์เชื้อเพลิง[25]

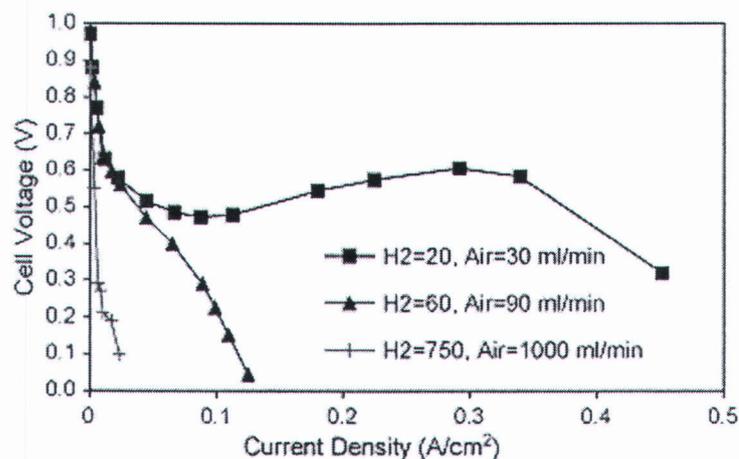
จากผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ความชื้นต่ำลงจะมีแนวโน้มที่จะมีสมรรถนะที่ดี ณ อุณหภูมิทำงานที่ต่ำเช่นกัน โดยเปรียบเทียบจากอุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับความนิยมอย่างเหมาะสม ซึ่งมักจะมีค่าประมาณ  $80^\circ\text{C}$

#### (ค) อัตราการไหลของตัวทำปฏิกิริยา [15]

อัตราการไหลของตัวทำปฏิกิริยาที่ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงนั้นนอกจากป้อนเข้าไปเพื่อการทำปฏิกิริยาแล้ว ในด้านแคโทด การป้อนออกซิแดนที่ก็ต้องให้เพียงพอต่อการไล่น้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นในบริเวณด้านแคโทดอีกด้วย การเลือกใช้อัตราการไหลของออกซิแดนที่จึงนิยมให้มีค่าสูงกว่าความต้องการของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

นอกเหนือจากผลดีต่อการกำจัดน้ำภายในเซลล์แล้ว การใช้อัตราการไหลของออกซิเจนที่สูงยังส่งผลให้ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ป้อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าสูงสม่ำเสมออีกด้วย แต่การใช้อัตราการไหลของออกซิเจนที่สูงนั้นก็ส่งผลให้คอมเพรสเซอร์กินไฟเพิ่มขึ้น และการใช้อัตราการไหลของออกซิเจนที่สูงในกรณีที่ปริมาณน้ำภายในเซลล์มีค่าต่ำ จะส่งผลให้เมมเบรนแห้งและการเกิดปฏิกิริยาลดลง

ในกรณีที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงาน ณ ความชื้นต่ำ กลับพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจะทำงานได้ดีเมื่ออัตราการไหลต่ำ ดังเช่นการทดสอบของ J.L.Zhang และคณะ [15] ที่พวกเขาทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้อากาศแห้งเป็นออกซิเจนแล้วพบว่าที่อัตราการไหลของอากาศสูง เซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่า cell voltage ที่ต่ำมากๆ เมื่อเทียบกับการทดสอบที่อัตราการไหลต่ำ ณ current density เดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2-9 โดยเขาได้ให้เหตุผลไว้ว่า ที่อัตราการไหลสูงจะส่งผลให้มีการสูญเสียน้ำออกจากเมมเบรน มากเกินไปส่งผลให้เมมเบรนแห้งแล้วจึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าต่ำลงเมื่อ เทียบกับการทดสอบที่ใช้อัตราการไหลที่ต่ำลงมา



รูปที่ 2-9 ผลของอัตราการไหลของอากาศต่อค่า cell voltage [15]

(ง) ปัจจัยอื่นๆ [26]

การปรับปรุงสมรรถนะในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ความชื้นภายในเซลล์ต่ำ ยังคงมีผู้ที่ศึกษาในแง่มุมอื่นๆ อีก เช่น ผลของพื้นที่ของอิเล็กโทรด (electrode) ต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง การเลือกชนิดของ อิเล็กโทรดและจัดเตรียมอิเล็กโทรดภายในเซลล์ การออกแบบทิศทางการไหลของออกซิเจน โดยออกแบบ แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว (bipolar plate) ใหม่ โดยมุ่งว่าการควบคุมทิศทางการไหลของไฮโดรเจนและอากาศจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์มีค่าที่ดียิ่งขึ้น ฯลฯ