

## แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM อย่างง่ายสำหรับวิศวกรไฟฟ้า

### A Simple PEM Fuel Cell Model for Electrical Engineers

วัฒนา แก้วมณี\*

#### 1. บทนำ

นับเป็นเวลาหลายสิบปีมาแล้ว ที่พลังงานจากซากดึกดำบรรพ์เช่นน้ำมัน ถ่านหิน หรือแก๊สธรรมชาติได้ถูกขุดขึ้นมาเพื่อใช้หล่อเลี้ยงสังคมมนุษย์ อย่างไรก็ตามสิ่งหนึ่งที่นักวิทยาศาสตร์และนักนโยบายทั่วโลกทราบกันดีคือสังคมมนุษย์ไม่สามารถคงอยู่อย่างยั่งยืนได้โดยการพึ่งพาพลังงานจากซากดึกดำบรรพ์เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานชนิดนี้มีอยู่อย่างจำกัดและไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ในเวลาอันสั้น นอกจากนี้การเผาไหม้ของพลังงานชนิดนี้ยังเป็นสาเหตุหลักของการเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ[1-3] หรือที่ประชาชนทั่วไปเรียกว่าสภาวะโลกร้อน

แนวทางการแก้ไขปัญหาคือการเปลี่ยนมาใช้แหล่งพลังงานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเช่นพลังงานลมหรือพลังงานแสงอาทิตย์ [4] แต่ข้อจำกัดอย่างหนึ่งของพลังงานประเภทนี้คือพลังงานที่ได้ไม่คงที่ในแต่ละช่วงของวัน การใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวกลางในการเก็บสะสมพลังงานจึงเป็นกุญแจสำคัญของเทคโนโลยีนี้ [5] แนวคิดหลักคือการนำพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานทดแทนมาแยกน้ำให้เป็นแก๊สไฮโดรเจนและเก็บไว้ในถังพักเมื่อต้องการนำพลังงานมาใช้ก็ทำโดยการป้อนไฮโดรเจนให้กับเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งจะได้เอาที่พูดเป็นพลังงานไฟฟ้า เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอุณหภูมิต่ำซึ่งเหมาะที่จะนำไปใช้ในที่พักอาศัยหรือเป็นแหล่งพลังงานให้ยานพาหนะในอนาคตคือเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM (Proton Exchange Membrane)

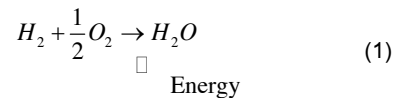
อย่างไรก็ดีข้อจำกัดอย่างหนึ่งของเซลล์เชื้อเพลิงคือตัวเซลล์ให้แรงดันเอาท์พุทเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระดับค่อนข้างต่ำและมีการเปลี่ยนแปลงมากเมื่อจ่ายกระแสไปที่ภาระ การนำเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้งานจึงจำเป็นต้องต่อผ่านวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า การออกแบบวงจรแปลงผัน

แรงดันไฟฟ้ามักจะทำโดยวิศวกรไฟฟ้าซึ่งไม่มีความรู้สึกซึ่งในปรากฏการณ์ทางเคมีในเซลล์เชื้อเพลิง ประกอบกับแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงในบทความวิจัยทั่วไปนั้นมียากหลายแบบ [6-11]โดยแต่ละแบบจะเน้นศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆในตัวเซลล์ซึ่งอาจไม่มีความจำเป็นและมีรูปแบบไม่สอดคล้องกับความต้องการของวิศวกรไฟฟ้าที่ต้องการแบบจำลองสำหรับใช้ต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าขณะต่อกับเซลล์เชื้อเพลิง

บทความวิชาการนี้จึงนำเสนอแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ที่พัฒนาขึ้นในรูปของ SPICE circuit description ซึ่งวิศวกรไฟฟ้าสามารถนำไปใช้ต่อร่วมกับวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าที่วิศวกรพัฒนาขึ้นในโปรแกรมประเภท SPICE ได้อย่างสะดวก

#### 2. โครงสร้างและพฤติกรรมที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM

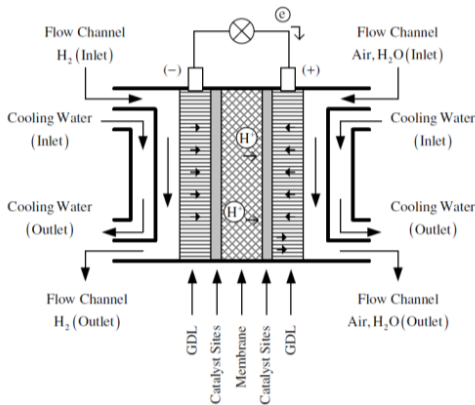
เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยาโดยผลลัพธ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาคือน้ำและพลังงานสมการทางเคมีทางเคมีของปฏิกิริยานี้คือ



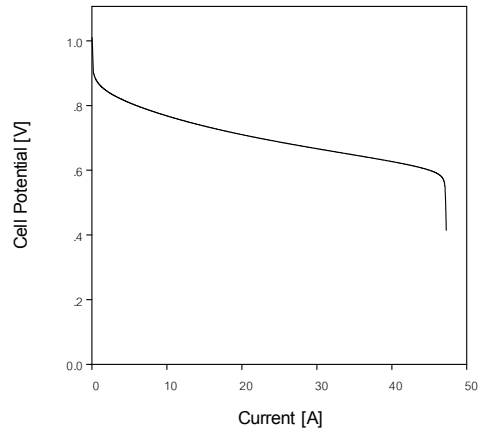
พลังงานที่ได้จากการทำปฏิกิริยานี้จะอยู่ในรูปของไฟฟ้าและความร้อน โดยแรงดันที่ได้จากการทำปฏิกิริยาในสภาวะ reversible จะสามารถคำนวณได้โดย [12]

$$E_r^{\ominus} = -\frac{\Delta g}{2 \cdot F} \quad (2)$$

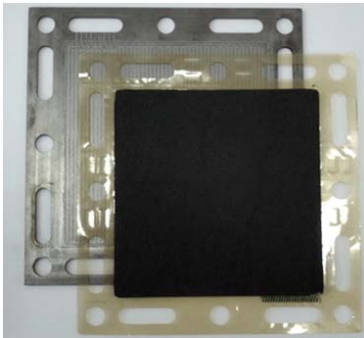
\* อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โทร. 02-555-2000 ต่อ 3300 อีเมลล์ wattanak@kmutnb.ac.th



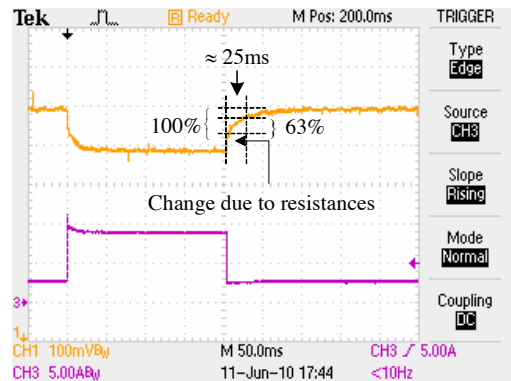
รูปที่ 1 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM



รูปที่ 3 กราฟลักษณะสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 2 ลักษณะภายในของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM



รูปที่ 4 การตอบสนองเชิงพลวัตของเซลล์เชื้อเพลิง

เมื่อ  $\Delta g$  คือ Gibb's free energy ของปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ  $-237.1$  กิโลจูลส์ และ  $F$  คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ มีค่าเท่ากับ  $96,485$  คูลอมป์/โมล  $E_r^\ominus$  คือแรงดัน reversible ในสภาวะอ้างอิง แรงดันนี้จะมีค่า  $1.229$  โวลต์ ที่ความดัน  $1 \times 10^5$  ปาสคาล และอุณหภูมิ  $25$  องศาเซลเซียส

ในการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาและสามารถนำพลังงานไฟฟ้ามาใช้ได้ เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM จะใช้แผ่นเมมเบรนพิเศษที่เป็นฉนวนอิเล็กทรอนิกส์แต่สามารถให้โปรตอนไหลผ่านได้มากกึ่งกลางระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนดังในรูปที่ 1 ในการรวมตัวกันของแก๊สทั้งสองไฮโดรเจนจะแบ่งตัวเป็นโปรตอนและเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน ส่วนอิเล็กตรอนจะไหลผ่านวงจรภายนอกซึ่งจะเป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านภาระนั่นเอง

ลักษณะภายในของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM แสดงไว้ในรูปที่ 2 พฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงที่สำคัญคือ V-I characteristic curve ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างแรงดันที่ขั้วและกระแสของเซลล์เชื้อเพลิง ความสัมพันธ์นี้จะแตกต่างกันไปตามโครงสร้างและรายละเอียดทางเคมีของวัสดุที่นำมาประกอบเป็นตัวเซลล์ ตัวอย่างกราฟลักษณะสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงไว้ในรูปที่ 3 พฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือการตอบสนองเชิงพลวัตต่อการเปลี่ยนแปลงกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงตัวอย่างการตอบสนองของแรงดันที่ขั้วเซลล์ต่อการเปลี่ยนแปลงกระแสในลักษณะขั้นบันไดแสดงไว้ในรูปที่ 4

### 3. แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิง

แบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงจะคล้ายกับแบบจำลองของแบตเตอรี่คือ มีแหล่งจ่ายแรงดันภายในซึ่งแสดงถึงระดับแรงดันขณะปลดภาระของเซลล์เชื้อเพลิง แรงดันนี้จะถูกนำไปหักลบกับแรงดันที่เกิดจากปรากฏการณ์อื่นๆที่ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง [13-16] ซึ่งได้แก่ การขาดตัวทำปฏิกิริยา การที่พลังงานบางส่วนถูกใช้ไปในการกระตุ้นปฏิกิริยาเคมี และการสูญเสียจากความต้านทานภายในเซลล์ ในกรณีที่ต้องการนำแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงไปต่อร่วมกับวงจรแปลงผันแรงดัน พฤติกรรมเชิงพลวัตที่เกิดจากความจุ double-layer ก็เป็นอีกองค์ประกอบหนึ่งที่ควรรวมไว้ในแบบจำลองด้วย

#### 3.1 แรงดันขณะปลดภาระของเซลล์เชื้อเพลิง

แรงดันขณะปลดภาระของเซลล์เชื้อเพลิง ( $E_{oc}$ ) คือแรงดันที่ถูกใช้แทนค่าแรงดัน reversible ( $E_r$ ) ซึ่งเป็นระดับแรงดันที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเคมีในสภาวะสมดุลโดยที่ยังไม่มีการจ่ายกระแสไปที่ภาระ ระดับแรงดันนี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยาและความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ คือแก๊สไฮโดรเจนออกซิเจน และน้ำ แรงดันนี้สามารถคำนวณได้จากสมการของ Nernst [17]

$$E_r = E_r^\ominus + \frac{R \cdot T}{2F} \cdot \ln \left( \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) + \frac{\Delta S}{2F} (T - T_{ref}) \quad (3)$$

เมื่อ  $E_r$  คือแรงดัน reversible ในสภาวะที่กำหนด  $R$  คือค่าคงที่ของแก๊ส ตัวแปร  $P_{H_2}$ ,  $P_{O_2}$  และ  $P_{H_2O}$  คือ partial pressure ของแก๊สไฮโดรเจน ออกซิเจนและน้ำตามลำดับ  $\Delta S$  คือค่าเอนโทรปีของปฏิกิริยา  $T$  คืออุณหภูมิในสภาวะที่กำหนด และ  $T_{ref}$  คืออุณหภูมิในสภาวะอ้างอิง

อย่างไรก็ดีเมื่อทำการทดลองวัดแรงดันที่ขั้วเซลล์เชื้อเพลิงขณะไม่ต่อภาระ ค่าที่วัดได้มักจะต่ำกว่าค่าแรงดัน reversible ที่คำนวณ ในทางปฏิบัติจึงมักใช้ค่าที่วัดได้นี้แทน

### 3.2 การลดลงของแรงดันที่เกิดจากการสูญเสียความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา

เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงมีการจ่ายกระแสไปที่ภาระไอออนของแก๊สไฮโดรเจนทางฝั่งแอโนดจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไปรวมกับออกซิเจนทางฝั่งแคโทดและได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นน้ำและพลังงานไฟฟ้า ทำให้ความเข้มข้นของแก๊สที่ผิวอิเล็กโทรดลดลง แก๊สใหม่จากแหล่งจ่ายจะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่ในลักษณะแพร่กระจาย ผ่านวัสดุที่มีความพรุนซึ่งสามารถให้แก๊สไหลผ่านได้ในอัตราที่จำกัด ในกรณีที่จ่ายกระแสสูงถึงระดับที่อัตราการรวมตัวกันของแก๊สที่ผิวอิเล็กโทรดสูงกว่าอัตราการเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่ของแก๊สใหม่ จะส่งผลให้ไฮโดรเจนหรือออกซิเจนหมดไปจากผิวอิเล็กโทรดซึ่งจะทำให้แรงดันลดลงอย่างรวดเร็วตามสมการ Nernst การคำนวณหาความเข้มข้นของแก๊สที่ผิวอิเล็กโทรดให้แม่นยำจำเป็นจะต้องมีแบบจำลองทางไฮดรอลิกส์ของช่องทางเดินแก๊สและแบบจำลองวัสดุพรุนของชั้นแพร่กระจายแก๊สซึ่งยุ่งยากและไม่เหมาะสมวิศวกรไฟฟ้า สมการอย่างง่ายที่นิยมใช้แทนแรงดันที่ลดลงเนื่องจากการขาดแก๊สนี้คือ

$$V_{conc} = -B \ln \left( 1 - \frac{i_{FC}}{I_{limit}} \right) \quad (4)$$

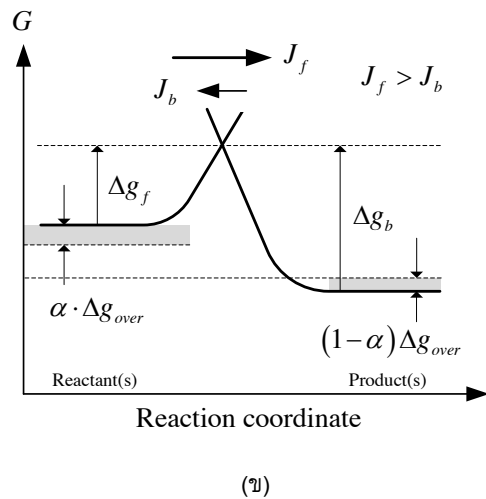
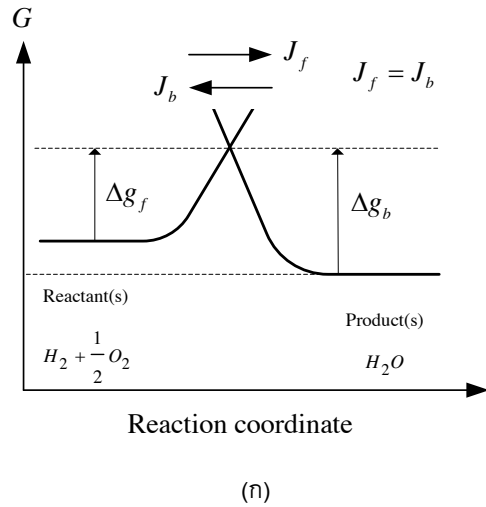
เมื่อ  $V_{conc}$  คือค่าแรงดันที่ลดลงเนื่องจากการขาดแก๊สที่ผิวหน้าอิเล็กโทรด  $i_{FC}$  คือค่ากระแสของเซลล์เชื้อเพลิง  $I_{limit}$  คือกระแสสูงสุดที่เซลล์สามารถจ่ายได้ และ  $B$  คือค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการปรับแบบจำลองให้เหมือนจริง

#### 3.3 แรงดันกระตุ้นปฏิกิริยา

ทฤษฎีทางเคมีอธิบายว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา และระดับพลังงานของตัวทำปฏิกิริยา จากรูปที่ 5 (ก) ส่วนที่เป็นยอดแหลมของพลังงานบนเส้นทางการเกิดปฏิกิริยา คือแนวกันหรือกำแพงพลังงาน (energy barrier) ความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานของตัวทำปฏิกิริยากับค่ายอดของกำแพงพลังงานซึ่งแทนโดย  $\Delta G_f$  จะแปรผกผันกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา

ในขณะเดียวกัน เมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวทำปฏิกิริยาจะกลายเป็นผลผลิตของปฏิกิริยา (product of reaction) ถ้าไม่มีการนำผลผลิตนี้ออกไปผลผลิตจะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ในระบบที่เกิดปฏิกิริยาสามารถเกิดในทิศทางย้อนกลับได้เช่นในกรณีของเซลล์เชื้อเพลิงที่แก๊สไฮโดรเจนรวมกับออกซิเจนจะได้น้ำและน้ำสามารถแยกกลับเป็นแก๊สไฮโดรเจนกับออกซิเจนได้เมื่อน้ำซึ่งเป็นผลผลิตมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่งอัตราการรวมตัวของไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นน้ำจะเท่ากับอัตราการแยกตัวของน้ำเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน สภาวะนี้เรียกว่าสภาวะสมดุลแบบ reversible แรงดันที่ได้จากการทำปฏิกิริยาจะเท่ากับแรงดันที่ได้จากสมการของ Nernst

เมื่อมีการต่อภาระให้กับเซลล์เชื้อเพลิงจะทำให้มีกระแสไหล การเกิดปฏิกิริยาเคมีจะอยู่ในสภาวะไม่สมดุลดังในรูปที่ 5 (ข) ในสภาวะนี้อัตราการรวมตัวของไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นน้ำจะต้องมากกว่าอัตราการแยกตัวของน้ำเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจนซึ่งหมายความว่าพลังงานจำนวนหนึ่งจะต้องถูกใช้ไปในการลดระดับกำแพงพลังงานของการรวมตัวและการเพิ่มระดับกำแพงพลังงานของการแยกตัว พลังงานที่ใช้ไปในส่วนนี้เองที่ทำให้แรงดันที่ขั้วของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงเมื่อมีการจ่ายกระแสให้ภาระ วิศวกรไฟฟ้ามักเรียกแรงดันที่ลดลงนี้ว่าแรงดันกระตุ้นปฏิกิริยา (activation voltage,  $V_{act}$ ) และมองว่าเป็นการสูญเสียซึ่งมักไม่เป็นที่ยอมรับในกลุ่มวิศวกรเคมีที่นิยมเรียกแรงดันนี้ว่าโอเวอร์โพเทนเชียล (overpotential,  $\eta$ ) ความสัมพันธ์ของแรงดันกระตุ้นปฏิกิริยากับระดับการไหลของกระแสที่หน้าสัมผัสของอิเล็กโทรดซึ่งเป็นพื้นที่



รูปที่ 5 | ไดอะแกรมการทำปฏิกิริยา (ก) ในสภาวะสมดุล  
(ข) ในสภาวะไม่สมดุล

ทำปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้โดยสมการ Butler-Volmer [12]

$$i_{FC} = I_0 \left( e^{\frac{\alpha 2F}{RT} V_{act}} - e^{-\frac{(1-\alpha) 2F}{RT} V_{act}} \right) \quad (5)$$

เมื่อ  $V_{act}$  คือแรงดันกระตุ้นปฏิกิริยา  $I_0$  คือ exchange current ซึ่งเป็นกระแสที่ตัวทำปฏิกิริยาเกิดการแลกเปลี่ยนกับผลผลิตของปฏิกิริยาในสภาวะสมดุล  $\alpha$  คือค่าสัมประสิทธิ์การเกิดปฏิกิริยามีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยปกติจะใช้ค่า 0.5

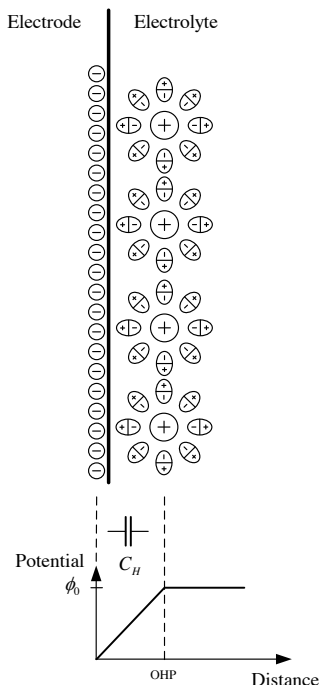
### 3.4 Resistive Loss

การสูญเสียจากความต้านทานความต้านทานภายในของอุปกรณ์เป็นการสูญเสียที่วิศวกรไฟฟ้าคุ้นเคยเป็นอย่างดีคือข้อแตกต่างของเซลล์เชื้อเพลิงกับอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่วไปคือความสูญเสียที่เกิดขึ้นในเมมเบรนซึ่งเป็นฉนวนอิเล็กตรอนแต่เป็นตัวนำโปรตอน เราเรียกความต้านทานนี้ว่า ionic resistance ซึ่งค่าความต้านทานจะขึ้นอยู่กับชนิด รูปทรง ความชื้นและอุณหภูมิของแผ่นเมมเบรนเป็นหลักความต้านทานนี้สามารถหาได้จากการทดลอง โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในระดับมิลลิโอห์มแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานหาได้จากกฎของโอห์ม

$$V_{ohmic} = R_{memb} i_{FC} \quad (6)$$

### 3.5 ความจุ double-layer

องค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงคือค่าความจุที่เกิดจากปรากฏการณ์ double-layer ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการที่อิเล็กตรอนในแผ่นอิเล็กโทรดและโปรตอนที่สามารถเคลื่อนที่ได้อิสระในเมมเบรนมาเรียงตัวกันเป็นชั้นบางๆบริเวณผิวสัมผัสของเมมเบรนกับอิเล็กโทรดดังในรูปที่ 6 แม้ว่าโปรตอนและอิเล็กตรอนจะดึงดูดกันแต่จะยังไม่รวมตัวกันเพราะ



รูปที่ 6 ความจุ double-layer ที่ผิวอิเล็กโทรด [12]

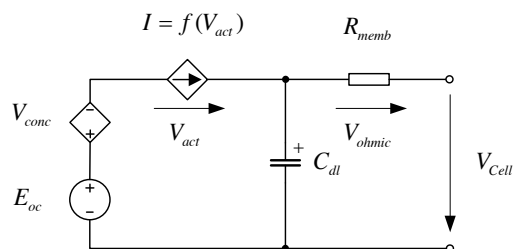
โปรตอนถูกล้อมไว้โดยโมเลกุลของน้ำ ชั้นบางๆของโปรตอนและอิเล็กตรอนนี้มีโครงสร้างเช่นเดียวกับตัวเก็บประจุทั่วไปยกเว้นระยะห่างของชั้นประจุทั้งสองที่ใกล้กันมาก ความใกล้กันนี้เองที่ทำให้ค่าความจุมีค่าสูงมาก [12] โดยปกติจะมีค่าในระดับฟาราด

ค่าความจุนี้เป็นสิ่งที่วิศวกรควรให้ความสำคัญและใส่ไว้ในแบบจำลองเมื่อต้องการจำลองการทำงานกับวงจรแปลงผันแรงดัน เพราะแม้พลวัตของเซลล์เชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์อื่นๆเช่นอุณหภูมิ หรือความชื้นของอากาศที่ป้อนเข้าเซลล์ แต่พลวัตจากพารามิเตอร์เหล่านั้นมีค่าเวลาคงตัวค่อนข้างนาน เช่นการสะสมอุณหภูมิของตัวเซลล์อาจใช้เวลาหลายนาทีจึงจะส่งผลกระทบต่อการทำงาน ต่างกับค่าความจุที่เกิดจากปรากฏการณ์ double-layer นี้ที่ส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมของเซลล์เมื่อนำไปต่อกับวงจรแปลงผันแรงดัน

### 3.6 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงในรูปวงจรไฟฟ้า

จากสมการที่อธิบายการทำงานในส่วนต่าง ๆ ของเซลล์ที่ได้กล่าวไปแล้ว เราสามารถเขียนแบบจำลองเชิงวงจรของเซลล์เชื้อเพลิงได้ดังรูปที่ 7 ข้อดีของการเขียนแบบจำลองในรูปของวงจรคือเราสามารถใช่โปรแกรมประเภท SPICE จำลองการทำงานได้ SPICE circuit description ซึ่งเป็นภาษาเพื่อใช้บรรยายรายละเอียดของวงจรในรูปที่ 8 แสดงไว้ในรูปที่ 8

จุดเด่นของการใช้ SPICE คือการจำลองสามารถให้รายละเอียดในระดับรายอุปกรณ์ ซึ่งจะต่างกับการใช้โปรแกรม MATLAB ที่สามารถทำได้โดยสะดวกเช่นกัน แต่รายละเอียดจะอยู่ในระดับแนวคิด



รูปที่ 7 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงอย่างง่ายในรูปวงจรไฟฟ้า

```
.subckt wkm_FC_01 V_Cell+ V_Cell-
V_oc Va V_Cell- {Cell_number*E_oc}
H1 Vb Va value={Cell_number*B*LN(1-(-(V_oc))/I_limit)}
G_A Vb Vc VALUE { 10*EXP(65.7*(Vb, Vc)/Cell_number) }
G_K Vc Vb VALUE { 10*EXP(-65.7*(Vb, Vc)/Cell_number) }
R1 Vc V_Cell+ {Cell_number*R_memb}
C1 Vc V_Cell- {C_dl/Cell_number}
* All parameter are parameters for 1 cell
* except cell number
.backanno
.ends wkm_FC_01
```

รูปที่ 8 SPICE circuit description ของแบบจำลอง เซลล์เชื้อเพลิงที่สร้างขึ้น

#### 4. การจำลองการทำงาน

การจำลองการทำงานจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ การจำลองหา V-I characteristic curve การจำลองหา การตอบสนองต่อกระแสภาวะแบบขั้นบันได และการจำลองการทำงานเมื่อต่อร่วมกับวงจรแปลงผัน แรงดันไฟฟ้า โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

Symbol	Value	Unit
$E_{oc}$	1	V
$I_0$	$1 \times 10^{-3}$	A
$R_{memb}$	$4 \times 10^{-3}$	$\Omega$
$C_{dl}$	4	F
$I_{limit}$	50	A
$B$	$8 \times 10^{-2}$	-

การจำลองการทำงานทำในโปรแกรม LTspice IV ซึ่งเป็นตัวจำลองตามมาตรฐาน SPICE3 ของ Linear Technology ที่อนุญาตให้ผู้ใช้สามารถดาวน์โหลดมาใช้งานได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย

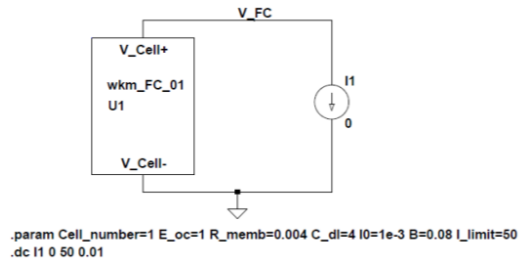
##### 4.1 การจำลองหา V-I characteristic curve

เนื่องจากแบบจำลองถูกสร้างขึ้นใน LTspice โดยใช้ circuit description มาสร้างเป็นอุปกรณ์ การหา V-I characteristic curve จึงทำได้ง่ายโดยการต่อแบบจำลองเข้ากับแหล่งจ่ายกระแส  $I_f$  และใช้การวิเคราะห์แบบ dc sweep โดยทำการเปลี่ยนแปลง

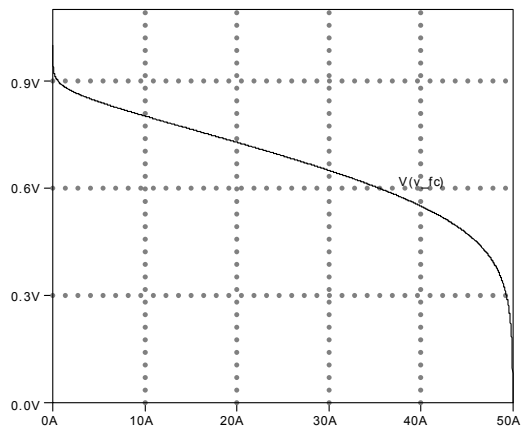
ค่ากระแสของ  $I_f$  จาก 0A ถึง 50 A ดังแสดงในรูปที่ 9 ผลการจำลองแสดงไว้ในรูปที่ 10

##### 4.2 การจำลองหาการตอบสนองต่อกระแสภาวะแบบขั้นบันได

การจำลองการทำงานในช่วงจรเดียวกับการหา V-I characteristic curve แต่จำลองการทำงานในแบบ Transient โดยทำการเปลี่ยนแปลงกระแสภาวะจาก 10A ไปเป็น 5A ผลการจำลองการทำงานแสดงไว้ในรูปที่ 11 จากรูปจะเห็นว่า การตอบสนองจะคล้ายการทำงานของเซลล์จริงที่แรงดันเซลล์ลดลงทันทีจากผลของความต้านทานภายในและมีส่วนที่เป็นเอ็กซีโพเนนท์ชี้ยลซึ่งเกิดจากพลวัตของความจุ double-layer



รูปที่ 9 การต่อแบบจำลองเพื่อหา V-I characteristic Curve

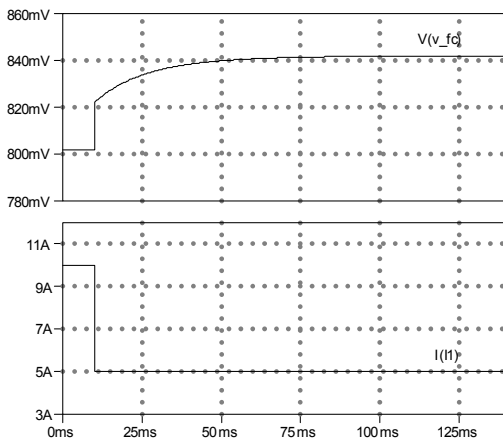


รูปที่ 10 V-I characteristic curve จากการจำลอง

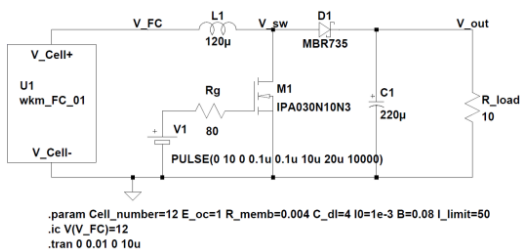
### 4.3 การจำลองการทำงานเมื่อต่อร่วมกับวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า

การจำลองเลือกใช้วงจรแปลงผันแรงดันแบบทบแรงดัน (Boost converter) ซึ่งเป็นวงจรที่นิยมนำมาต่อกับเซลล์เชื้อเพลิงเพราะวงจรมีกระแสอินพุตแบบต่อเนื่อง [18] วงจรและค่าของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 12 และผลการจำลองการทำงานแสดงไว้ในรูปที่ 13

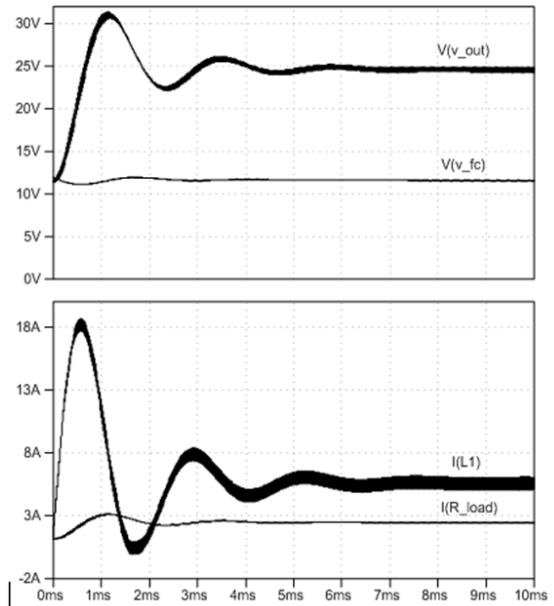
จากรูปจะเห็นว่าแบบจำลองสามารถรองรับการจำลองได้ทั้งในเชิงสถิติและพลวัตได้ทำให้นักออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันสามารถเห็นพฤติกรรมของวงจรที่ออกแบบเมื่อนำไปต่อกับเซลล์เชื้อเพลิงได้โดยสะดวก



รูปที่ 11 การตอบสนองเชิงพลวัตของเซลล์



รูปที่ 12 การต่อแบบจำลองเข้ากับวงจรทบแรงดัน



รูปที่ 13 ผลการจำลองการทำงานเมื่อต่อเข้ากับวงจรทบแรงดัน

## 5. สรุป

บทความนี้แนะนำเสนอแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM แบบจำลองที่นำเสนอสามารถจำลองพฤติกรรมที่สำคัญเช่นระดับแรงดันหรือความจุ double-layer ของเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้แบบจำลองสามารถรองรับการจำลองทั้งในเชิงสถิติและพลวัตได้ นอกจากนี้แบบจำลองได้ถูกนำเสนอในรูปแบบของวงจรไฟฟ้าบนแพลตฟอร์ม SPICE วิศวกรไฟฟ้าจึงสามารถนำแบบจำลองนี้ไปต่อเพื่อจำลองการทำงานกับวงจรแปลงผันแรงดันที่ออกแบบไว้ได้ทันที

## เอกสารอ้างอิง

- [1] H. T. SHAPIRO, *et al.*, *America's energy future: technology and transformation*. Washington, D.C.: National Academy of Sciences, 2009.
- [2] M. Mouliney, *et al.*, *Hydrogen Energy and Fuel Cells: A vision of our future*. Luxembourg: European Communities, 2003.



- [3] R. U. Ayres and E. H. Ayres, *Crossing the Energy Divide: Moving from Fossil Fuel Dependence to a Clean-Energy Future*. New Jersey: Pearson Education, 2010.
- [4] B. Sorensen, *et al.*, *Renewable Energy Focus Handbook*. Oxford: Academic Press, 2009.
- [5] S. Al-Hallaj and K. Kiszynski, *Hybrid Hydrogen Systems: Stationary and Transportation Applications*, 1st ed. London: Springer-Verlag, 2011.
- [6] J. M. Andújar, *et al.*, "A suitable model plant for control of the set fuel cell-DC/DC converter," *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 813-826, 2008.
- [7] C. M. Baca, *et al.*, "Three-dimensional, single-phase, non-isothermal CFD model of a PEM fuel cell," *Journal of Power Sources*, vol. 178, pp. 269-281, 2008.
- [8] J. J. Baschuk and X. Li, "A comprehensive, consistent and systematic mathematical model of PEM fuel cells," *Applied Energy*, vol. 86, pp. 181-193, 2009.
- [9] M. Becherif, *et al.*, "Electrical equivalent model of a proton exchange membrane fuel cell with experimental validation," *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 2582-2588, 2011.
- [10] J. E. Dawes, *et al.*, "Three-dimensional CFD modelling of PEM fuel cells: An investigation into the effects of water flooding," *Chemical Engineering Science*, vol. 64, pp. 2781-2794, 2009.
- [11] M. Y. El-Sharkh, *et al.*, "A dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential applications," *Journal of Power Sources*, vol. 138, pp. 199-204, 2004.
- [12] A. J. Bard and L. R. Faulkner, *Electrochemical methods: fundamentals and applications*: Wiley India Pvt. Ltd., 2006.
- [13] R. Chedid, *et al.*, "A Simplified Electric Circuit Model for the Analysis of Hybrid Wind-Fuel Cell Systems," in *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE, 2007*, pp. 1-6.
- [14] A. M. Dhirde, *et al.*, "Equivalent Electric Circuit Modeling and Performance Analysis of a PEM Fuel Cell Stack Using Impedance Spectroscopy," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 778-786, 2010.
- [15] G. Fontes, *et al.*, "A Large-Signal and Dynamic Circuit Model of a H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> PEM Fuel Cell: Description, Parameter Identification, and Exploitation," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 1874-1881, 2010.
- [16] D. Yu and S. Yuvarajan, "Electronic circuit model for proton exchange membrane fuel cells," *Journal of Power Sources*, vol. 142, pp. 238-242, 2005.
- [17] J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, 2nd ed. NJ: John Wiley & Sons, 2003.
- [18] P. Thounthong, *et al.*, "Fuel cell high-power applications," *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, vol. 3, pp. 32-46, 2009.