



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

อิทธิพลของโครงสร้างอิเล็กโทรดระดับจุลภาค
ต่อสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง

**Effect of Electrode Microstructure on
Solid-Oxide Fuel Cell Performance**

สันติ วัฒนานุสรณ์

นิวัฒน์ ภูเจริญ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ประจำปี 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ.....อิทธิพลของโครงสร้างอิเล็กโทรดระดับจุลภาค

ต่อสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง

แหล่งเงิน.....เงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ.....2554.....จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน.....64,900.....บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย.....1.....ปี ตั้งแต่.....ตุลาคม 2553.....ถึง.....กันยายน 2554

รายนามคณะผู้วิจัย

1. นาย สันติ วัฒนานูสรณ์ (หัวหน้าโครงการ)
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โทรศัพท์ 02-329-8360 ต่อ 166 E-mail santi_wattananusorn@hotmail.com
2. นาย นิวัฒน์ ภูเจริญ (ผู้ร่วมโครงการวิจัย)
สำนักบริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 6115 E-mail kpniwat@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เราได้นำเสนอผลการจำลองเชิงตัวเลขของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบในระดับเมมเบรนอิเล็กโทรดแอสเซมบลี(membrane-electrode-assembly, MEA) โดยทำการศึกษาสมรรถนะของเซลล์ที่ประกอบขึ้นในลักษณะที่มีโลหะรองรับ เปรียบเทียบกับสมรรถนะของเซลล์แบบเก่าที่เป็นแบบออกไซด์-คาโทด รองรับ ภายใต้รูปแบบการไหลตามกันและสวนกัน โดยเปรียบเทียบการกระจายความร้อน และกำลังไฟฟ้าที่ได้ ผลการศึกษาพบว่า การไหลแบบสวนกันเกิดจุดร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอมากกว่า และให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ภาระการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด มากกว่าการไหลแบบตามกัน ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกันทั้ง 2 แบบ อย่างไรก็ตามพบว่า จุดร้อน และ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ภาระการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์ชนิดออกไซด์-คาโทดรองรับนั้นมีค่าสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากเกิดเกรเดียนต์ของความเข้มข้นของเชื้อเพลิงในชั้นของโลหะรองรับ ดังนั้นเพื่อชดเชยสมรรถนะที่สูญเสียไปเราได้ปรับปรุงรูปแบบของรีบ ด้านคาโทด ผลปรากฏว่า ความหนาแน่นไฟฟ้ากำลัง สูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 0.984 W/cm^2 เป็น 1.034 W/cm^2 ซึ่งต่ำกว่ากรณีที่เป็นแบบออกไซด์-คาโทด 0.132 เปอร์เซนต์ ที่ภาวะการทำงานเดียวกัน โดยยังคงเกิดจุดร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า สำหรับการไหลแบบสวนกัน

คำสำคัญ : เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง เมมเบรนอิเล็กโทรดแอสเซมบลี เกรเดียนต์ของความเข้มข้น

Research Title:.....Effect of Electrode Microstructure on Solid-Oxide Fuel Cell Performance

Researchers:.....Santi Wattananusorn.....and.....Niwat Phoocharoen

Faculty:.....Engineering.....**Department:**.....Chemical Engineering

ABSTRACT

In this research, we present the numerical results of planar solid oxide fuel cell at the level of membrane electrode assembly, MEA. It is aimed at studying the performance of metal support design versus the conventional anode-cathode support under co-flow and counter-flow conditions. The maximum temperature of counter-flow condition is not only lower than that of co-flow condition but also the temperature distribution of counter-flow condition is more uniform than co-flow condition. Moreover the corresponding current density at maximum power is also higher with this configuration. This later design however poses greater concentration loss or over-potential due to fuel concentration gradient at the porous layer of supporting metal. To compensate this difference, we have proposed the rib of the current collector at the cathode side in order to reduce the ohmic loss, while minimizing the concentration loss at the reaction site. The result of this modification suggests an improvement of maximum power density from 0.984 W/cm^2 to 1.034 W/cm^2 . This is slightly less than the reference value for only 0.132 %. At this counter-flow configuration the value of peak temperature is also lower as compared with its counterpart.

Keywords : solid oxide fuel cell, membrane electrode assembly, concentration gradient

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

สันติ วัฒนานุสรณ์
นิวัฒน์ ภูเจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	4
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.7 ขั้นตอนของการศึกษา.....	5
บทที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง.....	6
2.1 การแพร่ของแก๊สในอิเล็กโทรด.....	6
2.2 ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า.....	8
2.3 วิเคราะห์ตัวแปรในระบบสมการเซลล์เชื้อเพลิง.....	10
2.3.1 แบบจำลอง.....	10
2.3.1.1 cell overpotential.....	10
2.3.1.2 ความต่างศักย์สมดุลที่.....	11
2.3.1.3 การสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา.....	16
2.3.1.4 การสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส.....	25
2.3.1.5 การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ.....	29
2.4 การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง.....	31
2.4.1 ผลกระทบของความหนาเซลล์ต่อชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง.....	31
2.4.2 ผลกระทบของการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า.....	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 ผลกระทบของความหนาแน่นด้านไอโนด.....	35
2.4.4 ผลกระทบของขนาดรูพรุน.....	36
2.4.5 ผลกระทบของความพรุน.....	39
2.4.6 ผลกระทบของอุณหภูมิขณะทำงาน.....	42
2.4.7 ผลกระทบของส่วนประกอบของแก๊ส.....	47
2.4.8 ผลกระทบของความดันอ้างอิง.....	49
2.5 เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งแบบโลหะรองรับ.....	52
2.5.1 ความหนาของโลหะรองรับ.....	54
2.5.2 ความพรุนของโลหะรองรับ.....	55
2.5.3 การขยายตัวแบบเชิงเส้นเนื่องจากอุณหภูมิ.....	56
บทที่ 3 การจำลองและวิเคราะห์ผลเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง.....	57
3.1 การจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง.....	57
3.1.1 รูปร่างของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง.....	57
3.1.2 วัสดุและคุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิง.....	60
3.1.3 ปฏิกริยาเคมีไฟฟ้า.....	60
3.1.4 เงื่อนไขขอบเขต.....	61
3.1.5 กริด (grid) และรูปแบบของกริด.....	61
3.1.6 โปรแกรมสำเร็จรูปและเวลาที่ใช้ในการจำลอง.....	61
3.2 ผลการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง.....	61
3.3 การวิเคราะห์ผลการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง.....	64
บทที่ 4 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	70
บรรณานุกรม.....	71
ประวัติผู้เขียน.....	73

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมการ nernst ในเทอมความดันย่อยของชนิดเชื้อเพลิงต่างๆ.....	12
2.2 คุณสมบัติวัสดุพอรุนของ Ni-YSZ และ/หรือ LSM-YSZ	23
3.1 คุณสมบัติวัสดุพอรุนและ โลหะ.....	59
3.2 คุณสมบัติการถ่ายโอนของวัสดุพอรุน.....	59

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงในระดับต่างๆ.....3
1.2	ลักษณะการไหลแบบตามกันของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งแบบอาโนดรองรับ4
2.1	กราฟความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า 12
2.2	การถ่ายโอนอิเล็กตรอนและกระแสไฟฟ้า 13
2.3	ลักษณะการไหลของกระแสไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งแบบท่อ 14
2.4	กราฟความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่อุณหภูมิทำงานต่ำ 15
2.5	กราฟความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่อุณหภูมิทำงานสูง 15
2.6	แนวคิดแบบจำลองของ Costamagna และคณะ.....18
2.7	ก. อนุภาคทรงกลม18
2.7	ข. อนุภาคทรงกระบอก.....19
2.8	เปรียบเทียบผลการจำลองของ 2 รูปทรง.....20
2.9	แนวคิดแบบจำลองของ Xiaohua Deng และคณะ 21
2.10	กราฟความสัมพันธ์ของสมการ (2.31)22
2.11	กราฟความสัมพันธ์ของสมการ (2.32)22
2.12	แนวคิดแบบจำลองของ Vinod M. Janardhanan และคณะ.....24
2.13	เส้นทางเดินเฉลี่ยอิสระของแต่ละโมเลกุล.....27
2.14	ความสมดุลของกระแสไฟฟ้า30
2.15	ผลจากความหนาของเซลล์ 33
2.16	ผลกระทบของอุณหภูมิขณะทำงานต่อสมรรถนะรวม.....35
2.17	ผลกระทบของความหนาอาโนดต่อสมรรถนะรวม 36
2.18	ก. ขนาดของรูพรุน ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา.....38
2.18	ข. ขนาดของรูพรุน ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส 38
2.18	ค. ผลกระทบของขนาดรูพรุนต่อสมรรถนะรวม39
2.19	ก. ความพรุน ที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 41
2.19	ข. ความพรุน ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส 42
2.19	ค. ผลกระทบของความพรุนต่อสมรรถนะรวม.....42
2.20	ก. อุณหภูมิขณะทำงาน ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา และการสูญเสียเนื่องจากการต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ.....45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 ข. อุณหภูมิขณะทำงาน ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส	46
2.20 ค. ผลกระทบของอุณหภูมิขณะทำงานต่อสมรรถนะรวม.....	46
2.21 ก. เศษส่วนโมลของไฮโดรเจนที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา และการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส	48
2.21 ข. ผลกระทบของเศษส่วน โมลของไฮโดรเจนต่อสมรรถนะรวม.....	48
2.22 ก. ความดันอ้างอิง ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา และการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส	52
2.22 ข. ผลกระทบความดันอ้างอิงต่อสมรรถนะรวม.....	52
2.23 วิวัฒนาการของเซลล์เชื้อเพลิง	53
2.24 เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบอิเล็กโทรไลต์รองรับ.....	53
2.25 เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบฮาโลรองรับ.....	53
2.26 เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบโลหะรองรับ	54
2.27 ความหนาของโลหะรองรับด้านแอโนด	54
2.28 ความพรุนของโลหะรองรับด้านแอโนด.....	55
2.29 การขยายตัวแบบเชิงเส้นเนื่องจากอุณหภูมิ.....	56
3.1 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบ	58
3.2 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบโลหะรองรับ	58
3.3 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง.....	58
3.4 เปรียบเทียบ I-V-P curve ของแอโนด-คาโธดรองรับ สำหรับการไหลตามกันและสวนกัน...62	62
3.5 เปรียบเทียบ I-V-P curve ของโลหะรองรับ สำหรับการไหลตามกันและสวนกัน.....62	62
3.6 เปรียบเทียบ I-V-P curve ของการไหลตามกันของทั้ง 2 แบบจำลอง	63
3.7 เปรียบเทียบ I-V-P curve ของการไหลสวนกันของทั้ง 2 แบบจำลอง.....	63
3.8 การกระจายอุณหภูมิของแอโนด-คาโธดรองรับ สำหรับการไหลแบบสวนกัน	64
3.9 การกระจายอุณหภูมิของโลหะรองรับ สำหรับการไหลแบบสวนกัน.....	65
3.10 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (ก.) แอโนด-คาโธดรองรับ (ข.) โลหะรองรับ สำหรับการไหลแบบสวนกัน ที่ $x = 20$ mm.	65
3.11 เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งที่ปรับปรุงอินเตอร์คอนเนคเตอร์.....	66
3.12 การกระจายอุณหภูมิของโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว สำหรับการไหลแบบสวนกัน.....	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (ก.) แบบโลหะรองรับ (ข.) แบบโลหะรองรับ ที่ปรับปรุงแล้ว สำหรับการไหลแบบสวนกัน ที่ $x = 20$ mm.	67
3.14 เปรียบเทียบ I-V-P curve ของโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว สำหรับการไหลแบบสวนกัน ...	68
3.15 เปรียบเทียบ I-V-P curve ระหว่างอาโนด-คาโทดรองรับกับโลหะรองรับ ที่ปรับปรุงแล้ว สำหรับการไหลแบบสวนกัน.....	68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในระยะเวลา 30 ปีของการพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง มุ่งเน้นที่จะลดต้นทุนของการสร้างสแตค (stack) เพื่อที่จะสามารถนำไปสู่การค้าได้ในอนาคต ซึ่งปัจจุบันการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบ ถูกแบ่งเป็น 3 ยุค ได้ดังนี้ ยุคที่ 1 เป็นอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) รองรับ ใช้ Ytria Stabilised Zirconia (YSZ) เป็นตัวนำไอออน (ion) หนาประมาณ 200 μm อุณหภูมิทำงานที่ 1,000 $^{\circ}\text{C}$ อินเตอร์คอนเนค (interconnect) เป็น เซรามิก (ceramic) ทำจาก Doped Lanthanum Chromite (LaCrO_3) ต่อมาในยุคที่ 2 เป็นชนิดอาโนดรองรับ ใช้ Ni/YSZ เป็นตัวนำอิเล็กตรอน (electron) หนาประมาณ 200-1,000 μm โดยการลดความหนาของอิเล็กโทรไลต์เหลือประมาณ 10-50 μm อุณหภูมิทำงานที่ 800 $^{\circ}\text{C}$ อินเตอร์คอนเนคเป็น สแตนเลส สตีล (Stainless-Steel) ต่อมายุคล่าสุด ยุคที่ 3 เป็นโลหะ(อินเตอร์คอนเนค)รองรับ ใช้ผงผสม STS430 เป็นตัวนำอิเล็กตรอน หนาประมาณ 1,000-2,000 μm อยู่ด้านอาโนด และลดความหนาของอิเล็กโทรไลต์ และอาโนด ให้เท่ากันที่ 10 μm สามารถทำงานประมาณ 600-700 $^{\circ}\text{C}$ ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดโลหะรองรับ คือ สามารถสร้างสแตคในราคาต่ำได้ ช่วยกระจายความร้อนจากอาโนดเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี รักษาอุณหภูมิของสแตคให้เสถียรและลดเวลาในการอุ่นห่อเซลล์ (cell stack) ผู้อุณหภูมิทำงาน

ได้มีผลงานตีพิมพ์ความก้าวหน้าที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งแบบโลหะรองรับ โดยในปี 2005 Brandon และคณะ [1] นำเสนอแบบจำลองที่คิดรวม electronic leakage ด้วยวิธี positive-electrolyte-negative (PEN) สำหรับ metal-supported planar IT-SOFC โดยใช้ gadolinia-doped ceria (CGO) เป็นอิเล็กโทรไลต์ ทำงานที่อุณหภูมิ 500-600 $^{\circ}\text{C}$ ผลการจำลองสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี เนื่องจากใช้โปรแกรม gPROMS ปรับค่าการจำลองให้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง ต่อมาในปี 2008 Lee และ Bae [2] นำเสนอแบบจำลอง 2 มิติ โดยให้ความดันย่อยของออกซิเจน P_{O_2} เป็น 0.21 และ 1 atm ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 800 $^{\circ}\text{C}$ สำหรับ metal-supported SOFC และใช้ $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.6}\text{O}_3$ (LSCM-8246) เป็นคาโทด ผลการจำลองสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่า 0.2 A/cm^2 ทั้ง 2 กรณี

นอกจากนี้ Visco และคณะ [3-4] ทำการศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับการใช้โลหะผสมทองเหลืองทำเป็นซีล (seal) และพัฒนาวัสดุที่ทำให้อิเล็กโทรไลต์และอาโนดขยายตัวอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เท่าๆกัน และเรื่องอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งแบบโลหะรองรับมาตั้งแต่ปี 2002 จนถึงปัจจุบัน

ในงานวิจัยนี้เราจะนำเสนอการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบโลหะรองรับ ด้วยวิธี membrane-electrode-assembly (MEA) โดยทำการศึกษาผลกระทบของโลหะรองรับ ต่อ รูปแบบการไหล(ตามกันและสวนกัน) ความร้อน ไฟฟ้า และเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Ramakrishna และคณะ จากปี 2006 [5]

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยนี้มุ่งหวังที่จะศึกษาการจำลอง(simulation)เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบโลหะรองรับ ด้วยวิธี membrane-electrode-assembly (MEA) โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. ศึกษาการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งด้วยวิธี MEA
2. จำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบโลหะรองรับด้วยวิธี MEA
3. ศึกษาอินเตอร์คอนเนคเตอร์ของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบโลหะรองรับด้วยวิธี MEA

ความมุ่งหมายที่คาดว่าจะได้รับหลังจากการศึกษา มีดังต่อไปนี้

1. เข้าใจหลักการของวิธี MEA ที่ใช้ในการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง
2. สามารถประยุกต์ใช้วิธี MEA จำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบโลหะรองรับได้
3. สามารถปรับปรุงอินเตอร์คอนเนคเตอร์ของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบโลหะรองรับด้วยวิธี MEA ได้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งอยู่บนพื้นฐานของสมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม พลังงาน ไฟฟ้า และสปีชีส์ (species) สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงการจำลองที่สำคัญ ได้แก่ ปฏิกิริยาการถ่ายโอนในวัสดุพรุน (porous media) เช่น ปฏิกิริยาเฮเทอโรจีเนียส (heterogeneous reaction) ในอิเล็กโทรด (electrode) และมีปฏิสัมพันธ์ ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (electrochemical) กับสนามของศักย์ไฟฟ้า (current-potential field) สมมติฐานของแบบจำลอง

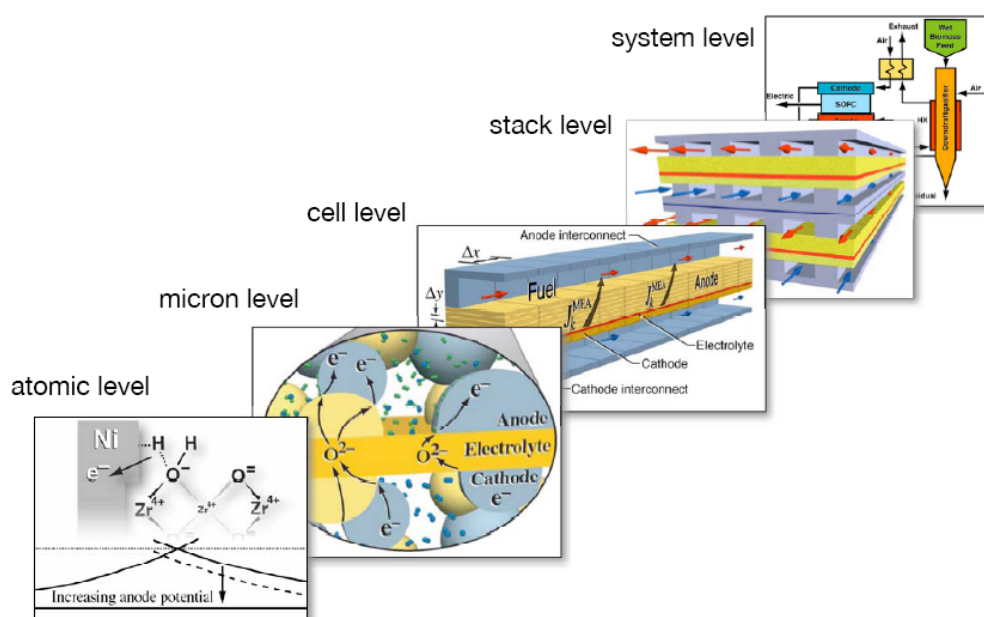
1. สภาวะคงตัว (steady state)
2. ไหลราบเรียบ (laminar flow)
3. อุณหภูมิที่ขอบเขตของการจำลองคงที่ (isothermal)
4. แก๊สอุดมคติ (ideal gas)
5. ไม่มีคิอทธิพลของการกลายเป็นไอ (vaporization) และของเหลว (condensation) ในสถานะแก๊ส

6. ใช้สมการ Stefan-Maxwell อธิบายการแพร่ของแก๊สชนิดต่างๆ (multi-species)
7. ใช้สมการ Butler-Volmer อธิบายปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst)
8. ใช้สมการ Nerst-Planck อธิบายการถ่ายโอนไอออนในอิเล็กโทรด
9. ใช้กฎของ Ohm อธิบาย polarization curve
10. ไม่กิดอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง

1.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

แบบจำลองที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เราสนใจของเซลล์เชื้อเพลิงมีอยู่ด้วยกัน 5 ระดับ ดังนี้

1. แบบจำลองในระดับอะตอม (atomic level)
2. แบบจำลองในระดับไมโคร (micron level)
3. แบบจำลองในระดับเซลล์ (cell level)
4. แบบจำลองในระดับสแตค (stack level)
5. แบบจำลองในระดับระบบ (system level)



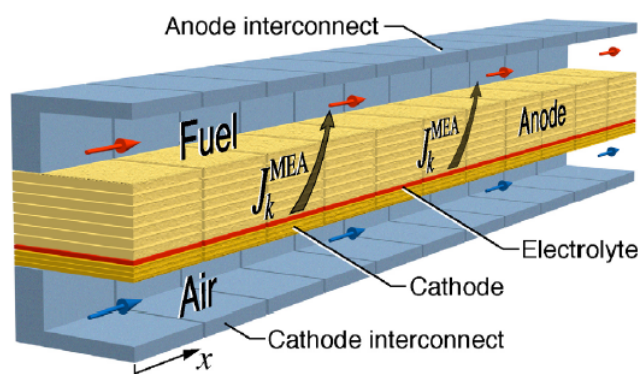
รูปที่ 1.1 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงในระดับต่างๆ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในระดับเซลล์ แบบ 3D-MAE (electrode kinetic models) และเป็นแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ขอบเขต 3 สถานะ (triple-phase boundary, TPB) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิง

ดังนั้นการศึกษาลักษณะที่เกิดขึ้นในชั้นแอโนด, คาโทด, อิเล็กโทรไลต์ หรือเรียกรวมกันว่า membrane-electrode-assembly (MEA) และโลหะรองรับ ที่มีผลต่ออินเทอร์คอนเนคเตอร์ ด้วยแบบจำลองนี้จะทำให้เราเข้าใจปรากฏการณ์ได้มากขึ้น และนำไปสู่การพัฒนาอินเทอร์คอนเนคเตอร์ในที่สุด โดยการศึกษาชั้น จะทำการศึกษาผลของความร้อนและไฟฟ้า ที่เกิดจากการไหลแบบตามกันและสวนกัน ได้แก่

1. เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบ
2. เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบโลหะรองรับ
3. เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบโลหะรองรับที่ปรับปรุงอินเทอร์คอนเนคเตอร์

หลังจากได้ศึกษาในหัวข้อที่ 1. และ 2. ตามลำดับแล้ว



รูปที่ 1.2 ลักษณะการไหลแบบตามกันของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งแบบแอโนดรองรับ

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

จากข้อหัวที่ผ่านวิธีการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงมีอยู่ด้วยกัน 5 ระดับ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่อย่างไรก็ตาม แบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้จะมีเพียง 2 ระดับ ได้แก่ ระดับสแตก (PEN) และระดับเซลล์ (MEA) ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้งานแตกต่างกันได้ดังนี้

ข้อดี

1. ระดับเซลล์สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นใน MEA ได้
2. ระดับเซลล์ให้รายละเอียดมากกว่าสำหรับการพัฒนาอินเทอร์คอนเนคเตอร์

ข้อเสีย

1. ระดับเซลล์กำหนดคุณสมบัติทางกายภาพของ MEA ยุ่งยากซับซ้อนมากกว่า
2. ระดับเซลล์ใช้หน่วยความจำมากกว่าสำหรับการพัฒนาอินเทอร์คอนเนคเตอร์

1.6 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งด้วยการประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อการพัฒนาอินเตอร์คอนเนคเตอร์ โดยมีขอบเขตการศึกษาดังนี้

1. จำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบตามเอกสารอ้างอิง
2. ใช้ข้อมูลคุณสมบัติต่างๆ ตามเอกสารอ้างอิง
3. จำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบโลหะ 1 แบบจำลอง
4. พัฒนาอินเตอร์คอนเนคเตอร์จากคำแนะนำตามเอกสารอ้างอิง
5. เปรียบเทียบผลการจำลองด้วยผลการจำลองที่มีอยู่เดิม

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 4 บทด้วยกันคือ

- บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน
แบบจำลองที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา
- บทที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง
- บทที่ 3 การจำลองและวิเคราะห์ผลเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง
- บทที่ 4 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง

แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งอยู่บนพื้นฐานของสมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม พลังงาน ไฟฟ้า และสปีชีส์ (species) สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงการจำลองที่สำคัญ ได้แก่ ปฏิกิริยาการถ่ายโอนในวัสดุพรุน (porous media) เช่น ปฏิกิริยาเฮเทอโรจีเนียส (heterogeneous reaction) ในอิเล็กโทรด (electrode) และมีปฏิสัมพันธ์ ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (electrochemical) กับสนามของ ศักย์ไฟฟ้า (current-potential field) สมมุติฐานของแบบจำลอง 1. สภาวะคงตัว (steady state) 2. ไหลราบเรียบ (laminar flow) 3. อุณหภูมิที่ขอบเขตของการจำลองคงที่ (isothermal) 4. แก๊สอุดมคติ (ideal gas) 5. ไม่คิดอิทธิพลของการกลายเป็นไอ (vaporization) และของเหลว (condensation) ในสถานะแก๊ส 6. ใช้สมการ Stefan-Maxwell อธิบายการแพร่ของแก๊สชนิดต่างๆ (multi-species) 7. ใช้สมการ Butler-Volmer อธิบายปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) 8. ใช้สมการ Nerst-Planck อธิบายการถ่ายโอนไอออนในอิเล็กโทรด 9. ใช้กฎของ Ohm อธิบาย polarization curve 10. ไม่คิดอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง

2.1 การแพร่ของแก๊สในอิเล็กโทรด

สมมุติฐานของสมการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัมในวัสดุพรุนให้คิดอิทธิพลของ porosity ϵ และ permeability κ ร่วมด้วย จะได้ สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon\rho) + \nabla \cdot (\epsilon\rho\mathbf{v}) = 0 \quad (2.1)$$

เมื่อ ϵ เป็น isotropic porosity , ρ เป็น ความหนาแน่น และ \mathbf{v} เป็น เวกเตอร์ความเร็ว ของแก๊สผสม สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon\rho\mathbf{v}) + \nabla \cdot (\epsilon\rho\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) = -\epsilon\nabla p + \nabla \cdot (\epsilon\boldsymbol{\delta}) + \frac{\epsilon^2\mu\mathbf{v}}{\kappa} \quad (2.2)$$

เมื่อ p เป็น ความดัน , $\boldsymbol{\delta}$ เป็น เทนเซอร์ความเค้นเฉือน (shear stress tensor) , μ เป็น ความหนืด พลวัต , κ เป็น ค่าการซึมผ่านได้ ส่วนเทอมสุดท้ายด้านขวามือ (2.2) เป็น Darcy's drag force ขึ้นอยู่กับช่องว่าง (pore) ของของไหล ซึ่งมีผลต่อความดันตกคร่อม (pressure drop) ในอิเล็กโทรด

สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} [(1-\varepsilon)\rho_B h_B + \varepsilon \rho h] + \nabla \cdot (\varepsilon \rho v h) \\ & = \nabla \cdot \mathbf{q} + \varepsilon \delta \cdot \nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \cdot \nabla (\varepsilon p) - j_t \left(\frac{S}{V} \right)_{eff} \eta + \frac{|\mathbf{i} \cdot \mathbf{i}|}{\sigma} \end{aligned} \quad (2.3)$$

เมื่อ h เป็น enthalpy ของแก๊สผสม, ρ_B , h_B เป็น ความหนาแน่นและ enthalpy ของของแข็ง เทอมที่ 2 และ 3 ด้านขวามือของ (2.3) เป็น พลังงานเนื่องจากการสลายตัวของความหนืด (viscous dissipation) และ งานเนื่องจากการอัดตัว (compression work) ซึ่งเป็นกระบวนการย้อนกลับได้ตามลำดับ ส่วน \mathbf{q} เป็น heat flux ประกอบด้วย ความร้อนเนื่องจากการนำ (thermal conduction) และ ความร้อนเนื่องจากการแพร่ของสปีชีส์ (species diffusion) สามารถเขียนเป็น

$$\mathbf{q} = \lambda_{eff} \nabla T + \sum_i \mathbf{J}_i h_i \quad (2.4)$$

เมื่อ h_i เป็น enthalpy ของสปีชีส์ใดๆ ซึ่งเป็นผลรวมของ enthalpy of formation และ sensible enthalpy, \mathbf{J}_i เป็น diffusion flux, T เป็น อุณหภูมิ และ λ_{eff} เป็น effective thermal conductivity ของของไหลและของแข็งร่วมกัน ส่วน 2 เทอมสุดท้ายด้านขวามือของ (2.3) เป็น electrical work และ Joule heating ตามลำดับ เทอมที่ 2 และ 5 เป็นการสูญเสียอันเนื่องมาจากกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ (irreversible loss) เกิดขึ้นขณะทำปฏิกิริยา โดยการเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานความร้อนตามกฎอนุรักษ์พลังงาน ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว

สมการอนุรักษ์สปีชีส์

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho v w_i) = \nabla \cdot \mathbf{J}_i + M_i (v_i'' - v_i') \left(\frac{S}{V} \right)_{eff} \frac{j_t}{F} \quad (2.5)$$

ด้านซ้ายมือของ (2.5) เป็นเทอมการพา (convection term) ส่วนเทอมสุดท้ายด้านขวามือเป็น source term ของอัตราการสร้าง (creation rate) หรือ อัตราการบริโภค (consumption rate) ของสปีชีส์ใดๆ ต่อปริมาตรของวัสดุพอร์ ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า แบบเฮเทอโรเจนีค (heterogeneous electrochemical reactions) ซึ่งผลผลิต (product) ของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ในกรณีนี้เป็นแบบ อัตราผลผลิตเชิงปริมาตร (volumetric production rate) ส่วน v_i' และ v_i'' เป็น normalized stoichiometric coefficients สำหรับ ตัวทำปฏิกิริยา (reactants) และ ผลผลิต ตามลำดับ และ M_i เป็น molecular weight ของสปีชีส์ใดๆ, $(S/V)_{eff}$ เป็น effective surface-to-volume ratio ซึ่งเชื่อมต่อดังตรงกับ triple

phase boundary (TPB) และเทอมแรกด้านขวามือ (2.5) เรียกว่า เทอมการแพร่ (diffusion term) มี J_i เป็น diffusion flux สามารถเขียนใหม่เป็น

$$\begin{aligned} J_i = & \rho D_{i,eff} \nabla w_i + \frac{\rho w_i}{M} D_{i,eff} \nabla M + \rho w_i \sum_j D_{j,eff} \nabla w_j \\ & + \rho w_i \frac{\nabla M}{M} \sum_j D_{j,eff} w_j \end{aligned} \quad (2.6)$$

เทอมแรกเป็นการแพร่แบบ Fickian diffusion เกิดจาก concentration gradients ส่วน 3 เทอมที่เหลือ เรียกว่า correction terms ซึ่งอยู่ในรูปของ effective diffusion coefficient ของสปีชีส์ j ใดๆ ในช่อง การไหล $D_{i,eff}$ และ $D_{j,eff}$ เป็น effective mass diffusion coefficient ใช้บอกขนาดของการแพร่เข้าสู่ อิเล็กโทรด ของ Stefan-Maxwell diffusion โดยอนุมานจาก free stream diffusion coefficient $D_{i,FS}$ หรือเรียกว่า Bruggemann model ซึ่งขึ้นอยู่กัค่า tortuosity τ ตามสมการ (2.7)

$$D_{i,eff} = D_{i,FS} \varepsilon^\tau \quad (2.7)$$

2.2 ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

เอาโนดทำจากวัสดุ nickel และ yttrium stabilized zirconia cermet (Ni/YSZ) และพิจารณา ให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ triple-phase boundary ดังนั้น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density) เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่าง ionic species transport และ electron transport โดยพิจารณา ให้การถ่ายโอนมวล (mass transport) เกิดขึ้นที่ช่องว่างของแก๊ส (gas pore) และปรากฏการณ์ การถ่ายโอนประจุ (charge transport) ขึ้นอยู่กับ 4 ตัวแปรทางไฟฟ้า (four electric parameters) ได้แก่ ionic conductivities σ_{as} , electronic conductivities σ_{am} , ionic potential ϕ_{as} และ electronic potential ϕ_{am} ส่วนคาโทดทำจากวัสดุ lanthanum manganite ($\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_{3-\delta}$ doped YSZ) พฤติกรรมคล้าย กับเอาโนดดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าด้านเอาโนด



ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าด้านคาโทด



จลศาสตร์ (kinetics) ของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าใน (2.8) และ (2.9) ของอิเล็กโทรด สามารถอธิบายได้ด้วย Butler-Volmer equation ที่ triple-phase boundary สำหรับปฏิกิริยาด้านแอโนด จะได้

$$j_{at} = j_{a0} \left[\exp\left(\frac{\alpha_a F}{RT} \eta_a\right) \frac{[H_2]}{[H_2]_0} - \exp\left(-\frac{\alpha_c F}{RT} \eta_a\right) \frac{[H_2O]}{[H_2O]_0} \right] \quad (2.10)$$

เมื่อ j_{at} เป็น faradaic current density ด้านแอโนด, α_a และ α_c เป็น symmetry factors หาได้จากการทดลอง Tafel slopes, j_{a0} เป็น exchange current density ด้านแอโนด, F เป็น Faraday constant, R เป็น ideal gas law constant และ $[สปีชีส์]_0$ เป็น ค่าความเข้มข้นอ้างอิง (concentration values at reference) ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอ้างอิง (reference current density) ส่วน η_a เป็น overpotential นิยามโดย เป็นผลต่างของ electronic potential ϕ_{aM} และ ionic potential ϕ_{aS} จะได้

$$\eta_a = \phi_{aM} - \phi_{aS} - E_{a0} \quad (2.11)$$

เมื่อ E_{a0} เป็น ผลต่างศักย์ (potential difference) ระหว่างอิเล็กโทรไลต์และนิกเกิล (nickel) ที่สภาวะสมดุล (equilibrium) ซึ่งไม่มีการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของอิเล็กตรอนนิวทรัล (electroneutral conditions) และสามารถเขียนอธิบายได้ในรูปสมการ

$$\nabla \cdot i_a = \nabla \cdot i_c = 0 \quad (2.12)$$

เมื่อ i_a และ i_c เป็น เวกเตอร์ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของด้านแอโนดและคาโทด ตามลำดับ กระแสไฟฟ้าในแต่ละด้านอาจจะแยกออกเป็น 2 สถานะ ได้แก่ สถานะที่ไหลผ่านตัวกลางที่นำไอออน หรือเรียกว่า สถานะไอออน (ionic phase) และสถานะที่ไหลผ่านตัวกลางที่นำอิเล็กตรอน หรือเรียกว่า สถานะอิเล็กตรอน (electronic phase) ของวัสดุพอร์ สำหรับด้านแอโนดในสมการ (2.12) สามารถเขียนส่วนประกอบให้อยู่ในรูปของสถานะ i_{aS} และ i_{aM} ตามลำดับ และเขียนใหม่เป็น

$$\nabla i_{aS} + \nabla i_{aM} = 0 \quad (2.13)$$

จากสมการ (2.13) ขณะที่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าส่วนของแข็งในวัสดุพอร์ กระแสไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของการถ่ายโอนประจุ (charge transfer) ระหว่างสถานะไอออนและสถานะอิเล็กตรอน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแหล่งรับประจุ (source) และแหล่งจ่ายประจุ (sink) ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (2.13) ใหม่เป็น

$$-\nabla i_{as} = \nabla i_{am} = j_{at} \left(\frac{S}{V} \right)_{eff} = \left(\frac{S}{V} \right)_{eff} \sum_{j=1}^{N_{steps}} j_{at,j} \quad (2.14)$$

จากกฎอนุรักษ์ประจุ (charge conservation law) เราสามารถเขียนสมการ (2.14) ให้อยู่ในรูปกฎของโอห์ม (Ohm's law) สำหรับด้านแอโนด ดังแสดงด้านล่างนี้

$$\nabla \cdot (\sigma_{as} \nabla \phi_{as}) = -\nabla \cdot (\sigma_{am} \nabla \phi_{am}) = j_{at} \left(\frac{S}{V} \right)_{eff} \quad (2.15)$$

2.3 วิเคราะห์ตัวแปรในระบบสมการเซลล์เชื้อเพลิง

ความเข้าใจในตัวแปรต่างๆในระบบสมการของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้น ในหัวข้อนี้ จะได้อธิบายถึงตัวแปรต่างๆและความสัมพันธ์เชื่อมโยงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

2.3.1 แบบจำลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิง เป็นแบบจำลองทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งแท้จริงแล้วมาจาก 2 เงื่อนไข คือ

1. โครงสร้างทางจุลภาค ได้แก่ ความพรุนและขนาดของรูพรุน
2. เงื่อนไขขณะทำงาน ได้แก่ อุณหภูมิ ความดันและองค์ประกอบของแก๊ส

แบบจำลองนี้ พัฒนาขึ้นมาเพื่อจะศึกษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง โดยพิจารณาจากองค์ประกอบ

1. activation overpotential
2. concentration overpotential
3. ohmic overpotential

ดังนั้น เราควรศึกษาให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการเหล่านี้ ให้เข้าใจอย่างถ่องแท้เพื่อนำไปสู่การพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงได้อย่างเหมาะสม ซึ่งเราจะได้อธิบายในรายละเอียดของตัวแปรให้เข้าใจอย่างลึกซึ้งในหัวข้อต่อไป โดยเริ่มจาก

2.3.1.1 cell overpotential

cell overpotential อธิบายถึง ความต่างศักย์ที่แท้จริงของเซลล์เชื้อเพลิง อันเนื่องมาจาก ความแตกต่างระหว่างความต่างศักย์ทางทฤษฎีและความต่างศักย์รวมของการสูญเสียที่เกิดจากขบวนการย้อนกลับไม่ได้ ดังนี้

1. การสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา

2. การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ
 3. การสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส
- และนอกจากนี้ ยังมีการสูญเสียอีก 2 อย่าง แต่ในบทความนี้ไม่ได้นำมาพิจารณา ซึ่งได้แก่
4. การสูญเสียเนื่องจากผิวสัมผัสของวัสดุ
 5. การสูญเสียเนื่องจากการรั่วทางไฟฟ้าหากอิเล็กโทรไลต์มีค่าการนำไฟฟ้า
- ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการ cell overpotential ได้ตามนี้

$$V = E - (\eta_{act} + \eta_{ohm} + \eta_{conct}) \quad (2.16)$$

เมื่อ E คือ ความต่างศักย์สมดุลคงที่, η_{act} คือ การสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา, η_{ohm} คือ การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ, η_{conc} คือ การสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส ตามลำดับ จากนั้น เราควรทำการศึกษา ความต่างศักย์ที่สถานะสมดุลคืออะไร

2.3.1.2 ความต่างศักย์สมดุลคงที่

ความต่างศักย์สมดุลคงที่ คือ ความต่างศักย์ในอุณหภูมิต่ำ หรือ ความต่างศักย์สูงสุดที่คำนวณจากสมการ nernst equation (Keneko และคณะ ในปี 2006) ด้วยแนวทางสมดุลคงที่ โดยพิจารณาจากปฏิกิริยารวมของสารตั้งต้นและผลผลิตในเซลล์เชื้อเพลิง จะได้ $H+0.5O \rightarrow H_2O$ ดังนั้นสามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของความดันย่อยได้ดังนี้

$$E = -\frac{\Delta G_T^0}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \quad \text{เมื่อ} \quad -\frac{\Delta G_T^0}{2F} = 1.253 - (2.4516e - 4)T \quad (2.17)$$

พิจารณาเทอม ΔG_T^0 เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของ Gibbs ที่สถานะมาตรฐานเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและมีเครื่องหมายติดลบ เนื่องจากเปลี่ยนงานทางเคมีไฟฟ้าสูงสุดไปเป็นงานทางกำลังไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้น E คือ ความต่างศักย์สมดุลคงที่จากขบวนการย้อนกลับทางคุณสมบัติพลศาสตร์ความร้อน, R คือ ค่าคงที่สากลของแก๊ส (8.3145 J/mol.K), F คือ ค่าคงที่ของ Faraday (9.6485e+4 C/mol), T คือ อุณหภูมิ, P_{H_2, O_2, H_2O} คือ ความดันย่อยของไฮโดรเจน, ออกซิเจนและไอน้ำที่ผิวสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ ตามลำดับ และนอกจากนี้ยังสามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของเศษส่วนโมลได้ดังนี้

$$E = -\frac{\Delta G_T^0}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{X_{H_2} X_{O_2}^{0.5}}{X_{H_2O}} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0.5} \right) \quad (2.18)$$

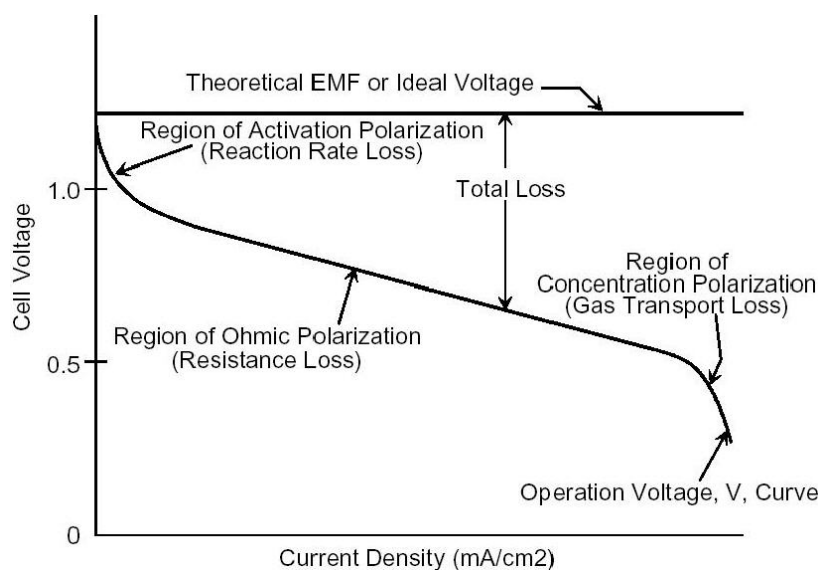
เมื่อ X_{H_2, O_2, H_2O} คือ เศษส่วนโมล ไฮโดรเจน, ออกซิเจนและไอน้ำ ที่ผิวสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ ตามลำดับ ส่วน P และ P_0 คือ ความดันและความดันอ้างอิง ซึ่งสมการ nernst ไม่นิยมเขียนในเทอมของเศษส่วนโมล ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงเสริมสมการ nernst ที่ใช้เชื้อเพลิงประเภทไฮโดรคาร์บอน หวังว่าจะเป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัยเซลล์เชื้อเพลิงในด้านอื่นๆต่อไป ตามตารางด้านล่างนี้

ตารางที่ 2.1 สมการ nernst ในเทอมความดันย่อยของชนิดเชื้อเพลิงต่างๆ

Cell Reactions ^a	Nernst Equation
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	$E = E^\circ + (RT/2F) \ln [P_{H_2} / P_{H_2O}] + (RT/2F) \ln [P_{O_2}^{1/2}]$
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 + CO_{2(c)} \rightarrow H_2O + CO_{2(a)}$	$E = E^\circ + (RT/2F) \ln [P_{H_2} / P_{H_2O} (P_{CO_2})_{(a)}] + (RT/2F) \ln [P_{O_2}^{1/2} (P_{CO_2})_{(c)}]$
$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	$E = E^\circ + (RT/2F) \ln [P_{CO} / P_{CO_2}] + (RT/2F) \ln [P_{O_2}^{1/2}]$
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow 2H_2O + CO_2$	$E = E^\circ + (RT/8F) \ln [P_{CH_4} / P_{H_2O}^2 P_{CO_2}] + (RT/8F) \ln [P_{O_2}^2]$

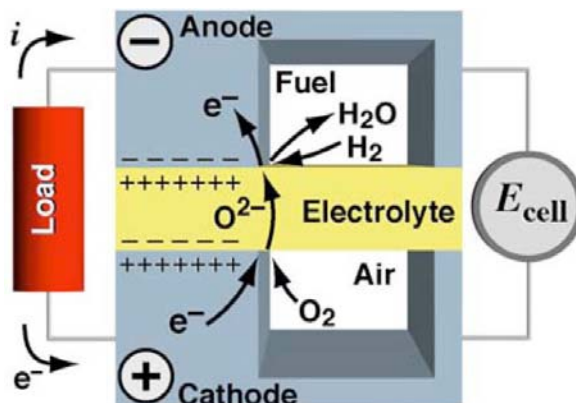
- (a) - anode
- (c) - cathode
- E - equilibrium potential
- P - gas pressure
- R - universal gas constant
- T - temperature (absolute)

จากนั้นเราควรศึกษาความสัมพันธ์ของกราฟ I-V curve ว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไรในสมการ cell overpotential



รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า

จากรูปด้านบน เป็นกราฟความสัมพันธ์ของสมการ cell overpotential ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าขณะทำงานและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยรูปแบบของกราฟจะขึ้นอยู่กับ 2 เงื่อนไข ได้แก่ โครงสร้างทางจุลภาคของเซลล์และเงื่อนไขขณะทำงาน ซึ่งจะแบ่งอยู่ในเทอมของ nernst และผลรวมของการสูญเสียทั้ง 3 เทอม ดังนั้น การหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขณะทำงาน จึงเป็นเงื่อนไขที่เราสามารถกำหนดเพื่อหาความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์ได้ โดยพิจารณาจากรูปด้านล่างนี้ประกอบคำอธิบาย

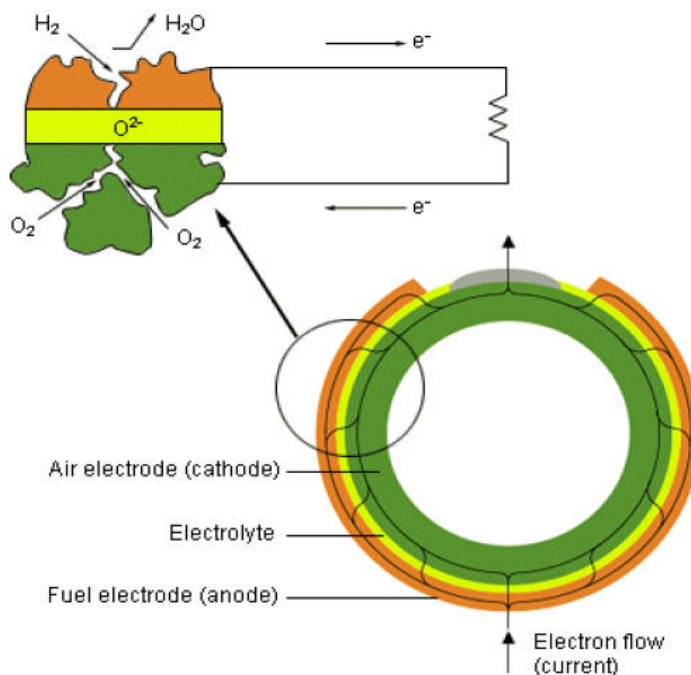


รูปที่ 2.2 การถ่ายโอนอิเล็กตรอนและกระแสไฟฟ้า

จากนิยามกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ คือ ปริมาณอิเล็กตรอนจำนวน 6.242×10^{18} อิเล็กตรอน หรือเท่ากับ 1 คูลอมบ์ เคลื่อนที่ในตัวนำใน 1 วินาที หรือสามารถเขียนได้ตามนี้

$$I = \frac{Q}{t} \quad (2.19)$$

เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้า, Q คือ ปริมาณประจุไฟฟ้า และ t คือ เวลา ดังนั้น จากรูปที่ 2.2 พิจารณาจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและกระแสไฟฟ้า ออกซิเจนไอออนถ่ายโอนจากผิวสัมผัสด้านคาโทดซึ่งมีสถานะเป็นประจุลบไปสู่ผิวสัมผัสด้านแอโนดซึ่งมีสถานะเป็นประจุบวก ดังนั้น จากนิยามการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและกระแสไฟฟ้า จะได้ว่า อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากความต่างศักย์ต่ำไปสู่ความต่างศักย์สูง และกระแสไฟฟ้าจะเคลื่อนที่จากความต่างศักย์สูงไปสู่ความต่างศักย์ต่ำ ดังนั้น อิเล็กตรอนและกระแสไฟฟ้าจะเคลื่อนที่สวนทางกัน จากนั้นนี้ ด้านคาโทดจะมีความต่างศักย์สูงและด้านแอโนดจะมีความต่างศักย์ต่ำ ดังนั้น อิเล็กตรอนจะถ่ายโอนจากด้านแอโนด



รูปที่ 2.3 ลักษณะการไหลของกระแสไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งแบบท่อ

ไปสู่ด้านคาโทด และกระแสไฟฟ้าจะถ่ายโอนจากด้านคาโทดไปสู่ด้านแอโนด จากความเข้าใจนี้ เราสามารถเขียนสมการสถานะของความต่างศักย์ ได้ดังนี้

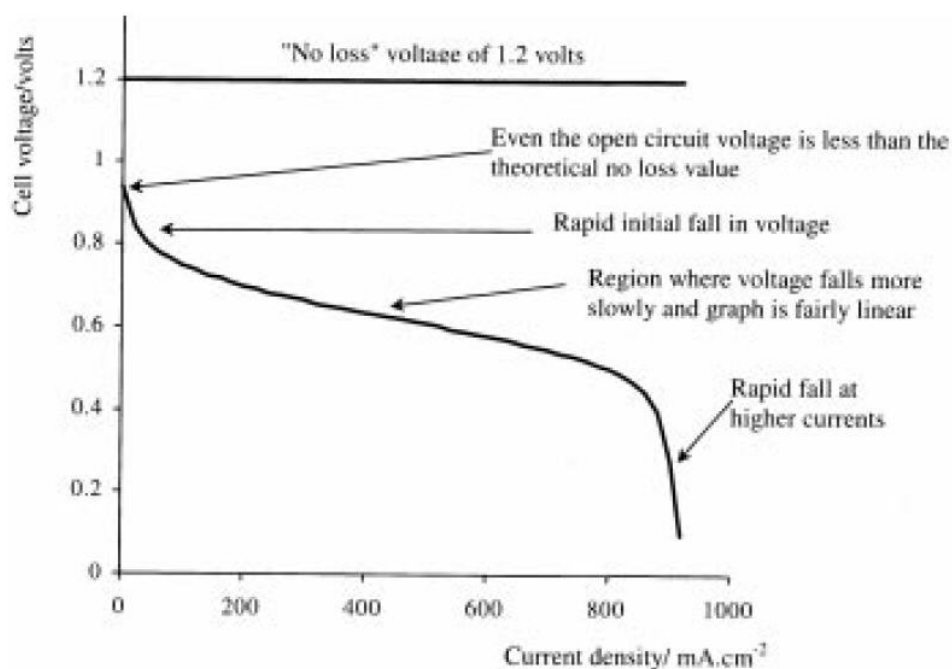
$$E_{nemst} = V_{cell} + (+ E_c - E_a) \quad (2.20)$$

จากสมการด้านบน เราสามารถคำนวณหาค่าความต่างศักย์ขณะทำงานได้โดยนำค่าผลต่างของความต่างศักย์ที่ด้านคาโทดและแอโนดลบออกจากค่าความต่างศักย์สูงสุด ดังแสดงด้านล่างนี้

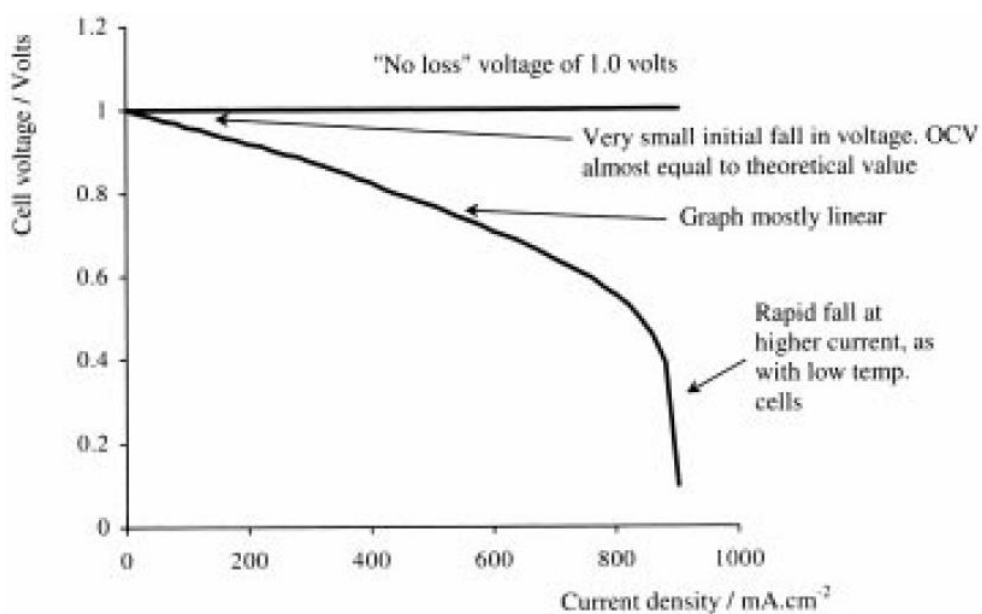
$$V_{cell} = E_{nemst} - E_c + E_a \quad (2.21)$$

โดย กำหนดค่าความต่างศักย์ด้านแอโนด (E_a) เป็น ground หรือเป็น 0 เนื่องจากกระแสไฟฟ้าจะไหลจากความต่างศักย์สูงสู่ ground นั้นเอง และกำหนดค่าความต่างศักย์ด้านคาโทด (E_c) เป็นลบตามสมการแต่มีค่าหรือขนาดมากขึ้นแต่ไม่เกินค่าความต่างศักย์สูงสุด ค่าที่มากจะได้ค่าความต่างศักย์ขณะทำงานน้อยและได้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง และหากพิจารณาเทอม ($E_c + E_a$) ให้สมมูลกับผลรวมของการสูญเสีย ดังนั้น เทอมนี้เปรียบได้กับการสูญเสียของความต่างศักย์ แต่อย่างไรก็ตามรูปที่ 2.1 เป็นเพียงแนวทางการพิจารณาความสัมพันธ์ของ overpotential มิใช่ให้อธิบายกราฟนี้ เป็นแบบอย่างมาตรฐานในการบอกถึงสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงทุกๆเงื่อนไข

ทำงาน ดังนั้นคณะผู้วิจัย จะได้อธิบายถึงรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ของ overpotential และ ลักษณะพฤติกรรมของกราฟ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่อุณหภูมิทำงานต่ำ



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่อุณหภูมิทำงานสูง

จากรูปที่ 2.4 และ 2.5 จะเห็นได้ชัดว่า อุณหภูมิขณะทำงานที่สูงจะมีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาและการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ ถ้าอุณหภูมิขณะทำงานสูงการสูญเสียทั้ง 2 แบบจะน้อย ดังดูได้จากความชันของกราฟในช่วงการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิขณะทำงานต่ำมีความชันสูงกว่า หมายความว่า จะสูญเสียมากกว่าที่อุณหภูมิขณะทำงานต่ำ และในทำนองเดียวกันกับการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ แต่ลักษณะของกราฟมีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นทั้ง 2 กรณี สำหรับการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊สที่อุณหภูมิขณะทำงานต่ำมีความชันน้อยกว่าที่อุณหภูมิขณะทำงานสูง นั้นแสดงว่าที่อุณหภูมิขณะทำงานสูงเกิดการสูญเสียมากกว่า ดังจะได้อธิบายเหตุและผลที่เป็นที่มาของกราฟโดยละเอียดในแต่ละหัวข้อนั้นๆ ตามลำดับต่อไป โดยเริ่มจากการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา เป็นลำดับแรก

2.3.1.3 การสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา

การสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา มีปัจจัยที่สำคัญได้แก่ โครงสร้างทางจุลภาคของอิเล็กโทรดและเงื่อนไขขณะทำงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิทำงาน มีผลอย่างมากต่อการสูญเสียประเภทนี้ ซึ่งปัจจัยที่ได้กล่าวมาจะแฝงอยู่ในสมการการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ดังนั้น เราควรศึกษาตัวแปรให้เข้าใจอย่างถ่องแท้ โดยเริ่มจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยสามารถแสดงในรูปแบบสมการ Butler-Volmer ได้ดังนี้

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha z F \eta_{act}}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\alpha) z F \eta_{act}}{RT}\right) \right] \quad (2.22)$$

เมื่อ J คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า, J_0 คือ การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า, α คือ ตัวคูณสมมาตร, z คือ จำนวนอิเล็กตรอนต่อ 1 ปฏิกิริยา และนอกจากนี้ ยังสามารถเขียนความสัมพันธ์ของการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ได้ดังนี้

$$\eta_{act,i} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1}\left(\frac{J}{2J_{0,i}}\right) = \frac{RT}{F} \ln \left[\frac{J}{2J_{0,i}} + \sqrt{\left(\frac{J}{2J_{0,i}}\right)^2 + 1} \right] \quad \text{เมื่อ } i = a, c \quad (2.23)$$

ต่อมาพิจารณาตัวแปร การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ซึ่งตัวแปรนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการได้มาของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ซึ่งตัวแปรนี้จะประกอบไปด้วย 2 เทอมที่สำคัญ

ได้แก่ เทอมที่ได้จากโครงสร้างทางจุลภาคของอิเล็กโทรด เช่น ความพรุนและขนาดของรูพรุน เป็นต้น และเทอมที่ได้จากเงื่อนไขขณะทำงาน เช่น อุณหภูมิ ความดัน และส่วนประกอบของเชื้อเพลิง และอากาศ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองด้วยเทคนิคการด้านกระแสสลับ พบว่า ขบวนการถ่ายโอนประจุ ด้านคาโทด ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิขณะทำงาน ซึ่งพิสูจน์โดยการเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนพบว่า มีผลน้อยกว่า แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มไอน้ำ จะช่วยให้ไฮโดรเจนเกิดปฏิกิริยาดูดซับและการแพร่ดีขึ้น และจากเหตุผลนี้ คณะผู้วิจัย พิจารณาความเป็นไปได้ พบว่า การพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงแบบอานโตรองรับ อาจจะมาจกเหตุผลนี้ เนื่องจากการสูญเสียจากการถ่ายโอนมวลของเชื้อเพลิง คงมีผลน้อยมากหากเทียบกับผลของอุณหภูมิขณะทำงาน และในทำนองเดียวกันของด้านคาโทด พบว่า ขบวนการถ่ายโอนประจุ ขึ้นอยู่กับทั้งอุณหภูมิขณะทำงานและความดันย่อยของออกซิเจน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

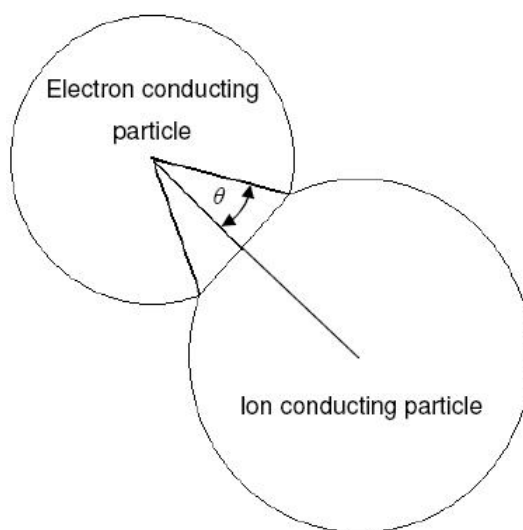
$$\text{สำหรับด้านอานโนด} \quad J_{0,a} \alpha \left(\frac{P_{H_2}}{P_{ref}} \right) \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{ref}} \right) \exp \left(- \frac{E_{act,a}}{RT} \right) \quad (2.24)$$

$$\text{สำหรับด้านคาโทด} \quad J_{0,c} \alpha \left(\frac{P_{O_2}}{P_{ref}} \right)^{0.25} \exp \left(- \frac{E_{act,c}}{RT} \right) \quad (2.25)$$

เมื่อ P_{ref} คือ ความดันอ้างอิง ที่ 1 บาร์, $E_{act, a, c}$ คือ ระดับพลังงานก่อกัมมันต์ของด้านอานโนดมีค่าเท่ากับ $1e5$ J/mol และคาโทดมีค่าเท่ากับ $1.2e5$ J/mol ตามลำดับ นอกจากนี้ การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ายังแปรผันตรงกับความยาวของขอบเขต 3 สถานะ ซึ่งความยาวของขอบเขต 3 สถานะนี้ เป็นตัวบอกถึงตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยา และสามารถหาได้จาก ขนาดของเกรน ความพรุน และขนาดรูพรุน ซึ่งก่อนที่จะได้กล่าวในรายละเอียด ดังกล่าวนั้น ขอกล่าวย้อนกลับไปถึงการหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเชิงปริมาตร โดยใช้ค่าพื้นที่ผิวปฏิกิริยาต่อหน่วยปริมาตร ซึ่งตัวแปรนี้มิใช่กันอย่างแพร่หลายและรวมถึงโปรแกรมสำเร็จรูปด้วย เช่น CFD-ACE+ และ FLUENT เป็นต้น ซึ่งตัวแปรนี้พัฒนาขึ้นในปี 1997 โดย Costamagna และคณะ โดยมีสมมุติฐาน ดังนี้

1. อยู่ภายใต้สภาวะคงตัว
 2. อุณหภูมิและความดันสม่ำเสมอตลอดทั้งอิเล็กโทรด
 3. พิจารณาเฉพาะตัวทำปฏิกิริยาไฮโดรเจนและออกซิเจนในอานโนดและคาโทดเท่านั้น
 4. แบบจำลองเป็นฟังก์ชันกับความหนาของอิเล็กโทรดแบบ 1 มิติ
 5. อนุภาคตัวนำอิเล็กตรอนและไอออน พิจารณาเป็นแบบต่อเนื่อง, เนื้อเดียวกันเหมือนกัน
- ทุกประการและมีความต้านทานทางไฟฟ้าไม่ขึ้นกับความหนาของอิเล็กโทรด

โดยแบบจำลองนี้พัฒนาขึ้นจากหลักการของการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคตัวนำอิเล็กตรอนและไอออน ดังแสดงในรูปด้านล่างนี้

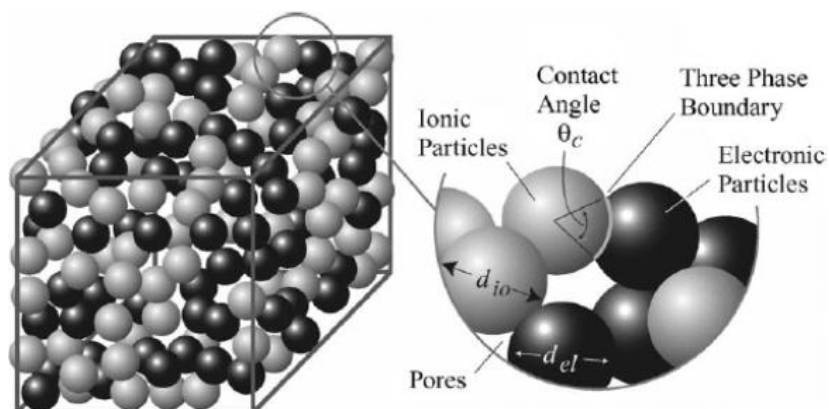


รูปที่ 2.6 แนวคิดแบบจำลองของ Costamagna และคณะ

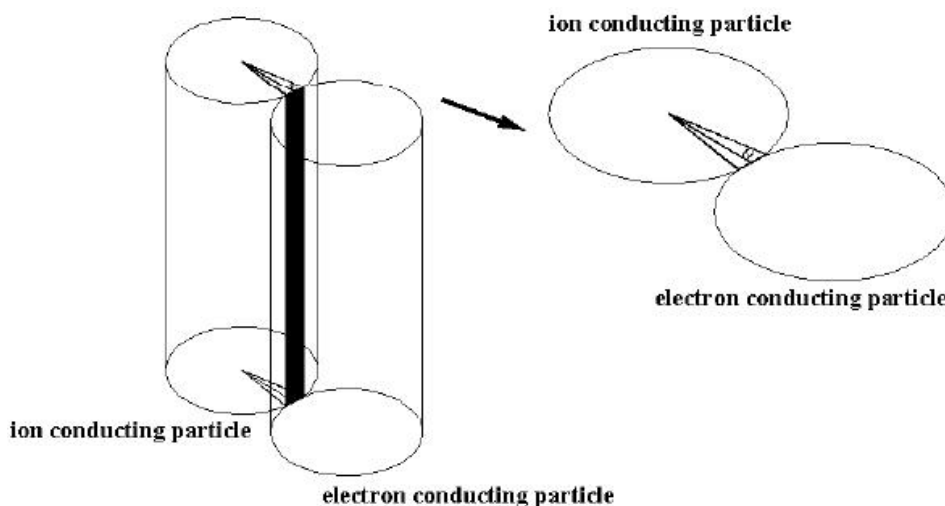
โดยแบบจำลองนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากการพิจารณาอนุภาคตัวนำอิเล็กตรอนและไอออนที่มีลักษณะทรงกลมและทรงกระบอก ตามลำดับ ซึ่งสามารถเขียนได้ตามลำดับ ดังนี้

อนุภาคทรงกลม
$$A_{v,spherical} = \pi \sin^2 \theta r_{el}^2 n_i n_{el} n_{io} \frac{Z_{el} Z_{io}}{Z} p_{el} p_{io} \quad (2.26)$$

อนุภาคทรงกระบอก
$$A_{v,cylindrical} = 2Rh \sin \theta n_i n_{el} n_{io} \frac{Z_{el} Z_{io}}{Z} p_{el} p_{io} \quad (2.27)$$



รูปที่ 2.7 ก. อนุภาคทรงกลม

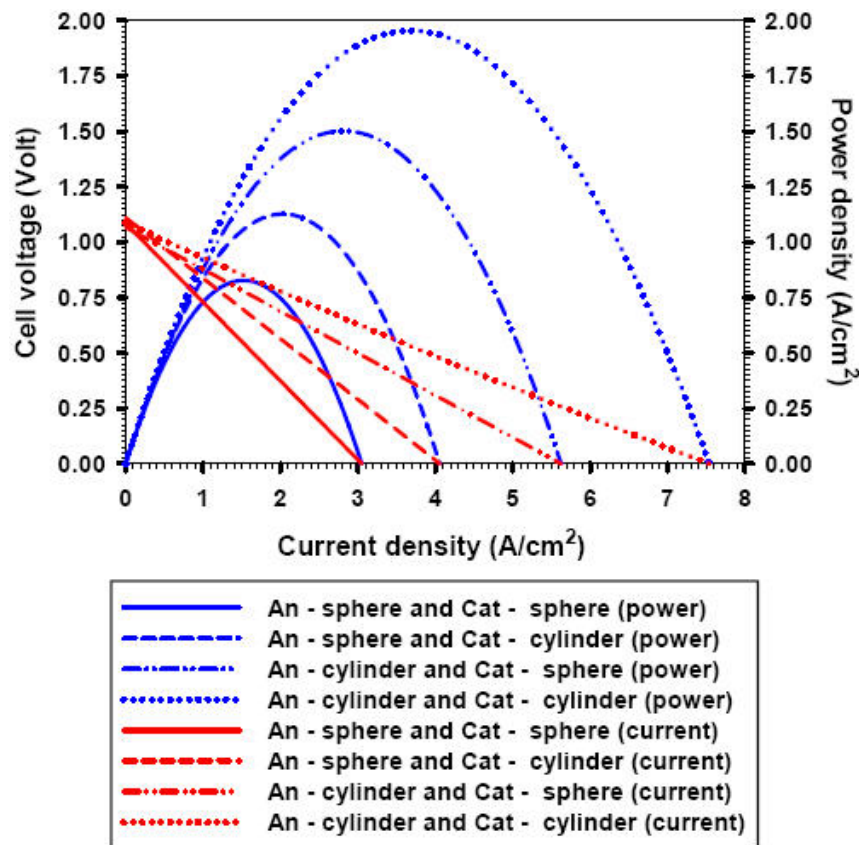


รูปที่ 2.7 ข. อนุภาคทรงกระบอก

เมื่อ A_v คือ พื้นที่ผิวปฏิกิริยาต่อหน่วยปริมาตร, θ คือ มุมสัมผัสกันระหว่างอนุภาคตัวนำอิเล็กตรอนและไอออนที่บริเวณทำปฏิกิริยา, r_{el} คือ รัศมีของอนุภาคตัวนำอิเล็กตรอน, $n_{t,el,io}$ คือ จำนวนทั้งหมดของอนุภาคตัวนำต่อหน่วยปริมาตร, จำนวนเศษส่วนของอนุภาคตัวนำอิเล็กตรอนและจำนวนเศษส่วนของอนุภาคตัวนำไอออนที่บริเวณทำปฏิกิริยา ตามลำดับ และ $Z_{el,io}$ คือ จำนวนประสาคันของอนุภาคตัวนำอิเล็กตรอนและไอออนที่บริเวณทำปฏิกิริยา ตามลำดับ ส่วน Z คือ จำนวนเฉลี่ยทั้งหมดของการสัมผัสกันของแต่ละอนุภาค และ $p_{el,io}$ คือ ความเป็นไปได้ของอนุภาคตัวนำอิเล็กตรอนและไอออนที่บริเวณทำปฏิกิริยา ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยได้ละ สมการของแต่ละตัวแปรเอาไว้ในขณะนี้ ดังนั้น ผู้วิจัยท่านอื่นๆสามารถศึกษาค้นคว้าได้จากเอกสารที่เกี่ยวข้องได้ตามลำดับต่อไป

จากที่ได้ศึกษาสมการพื้นที่ผิวปฏิกิริยาต่อหน่วยปริมาตรแล้ว ดังนั้น จึงมาศึกษาต่อถึงผลกระทบของรูปทรงอนุภาคต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ผลการจำลองพบว่า อนุภาคตัวนำอิเล็กตรอนและไอออนแบบทรงกระบอกให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่าแบบทรงกลม โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบและกำหนดเงื่อนไขการจำลอง ดังต่อไปนี้

1. เงื่อนไขการทำงานที่ ความดัน 1 บรรยากาศ และ อุณหภูมิ 800 °C
2. เชื้อเพลิง ไฮโดรเจน 0.95 % โมล และ ไอน้ำ 0.05 % โมล
3. อากาศ ออกซิเจน 0.21 % โมล และ ไนโตรเจน 0.79 % โมล



รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบผลการจำลองของ 2 รูปทรง

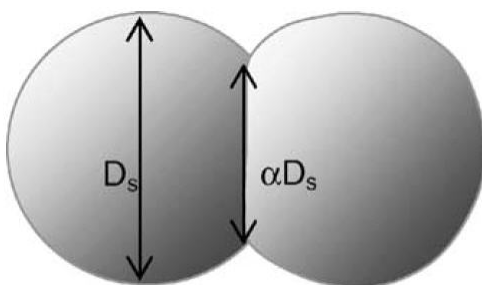
จากผลการจำลองพอสรุปได้ว่า อนุภาคแบบทรงกระบอกดีกว่าแบบทรงกลม ในกรณีนี้ จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมด แบบจำลองพื้นที่ผิวปฏิกิริยาต่อหน่วยปริมาตร มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับขอบเขต 3 สถานะ และถูกใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเชิงปริมาตร แต่ไม่ได้เชื่อมโยงรูปแบบสมการต่อตัวแปรการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ดังจะแสดงในสมการด้านล่างนี้

$$A_v J = A_v J_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha z F \eta_{act}}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\alpha) z F \eta_{act}}{RT}\right) \right] \quad (2.28)$$

เมื่อ $A_v J$ คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเชิงปริมาตร มีหน่วยเป็น $[L^2/L^3][A/L^2]$ และ

$$J_0 = J_{0,ref} \left(\frac{x}{x_{ref}}\right)^\gamma \left(\frac{p}{p_{ref}}\right)^\gamma \left(\frac{T_{ref}}{T}\right)^\gamma \quad \text{เมื่อ } \gamma \text{ คือ อันดับปฏิกิริยา} \quad (2.29)$$

จากสมการ (2.29) การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับอัตราส่วนของเศษส่วนโมล, อัตราส่วนของความดันและอัตราส่วนของอุณหภูมิ ดังนั้น การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอ้างอิง อาจเป็นสัมประสิทธิ์การแปรผันตรงของสมการ ซึ่งสมการนี้ แตกต่างจากสมการที่คณะผู้วิจัย ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ ว่า การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า นอกจากจะแปรผันตรงตามสมการ (2.24) และ (2.25) แล้วยังแปรผันตรงกับความยาวของขอบเขต 3 สถานะ ซึ่งความยาวของขอบเขต 3 สถานะ สามารถหาได้จาก ขนาดของเกรน ความพรุนและขนาดรูพรุน แบบจำลองนี้พัฒนาขึ้นจากแบบจำลองทางเรขาคณิต ในปี 2005 โดย Xiaohua Deng และคณะ ซึ่งมีสมมติฐานว่า ขนาดของเกรนหรืออนุภาคตัวนำอิเล็กตรอนและไอออน มีขนาดเท่ากัน โดยดูรูปด้านล่างประกอบคำอธิบาย



รูปที่ 2.9 แนวคิดแบบจำลองของ Xiaohua Deng และคณะ

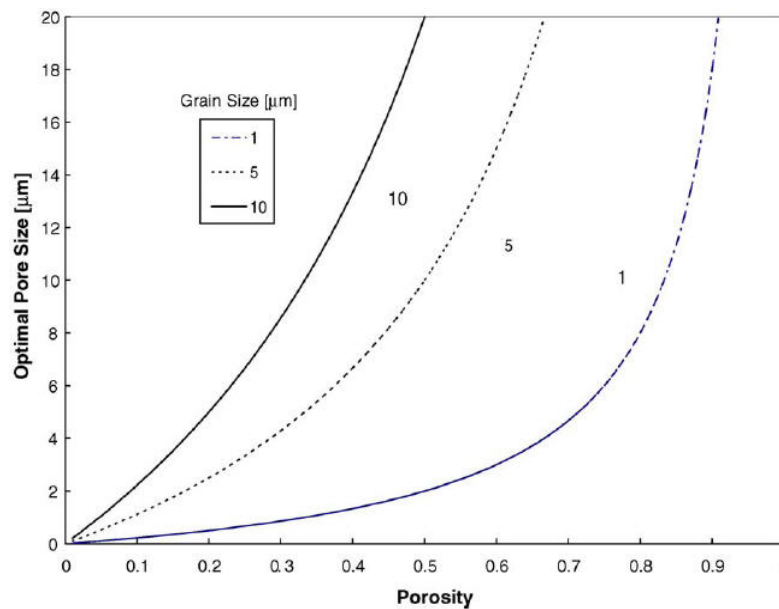
จากรายงานการศึกษา พบว่า การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับความยาวของขอบเขต 3 สถานะ และสามารถคำนวณได้จาก ขนาดของเกรน ความพรุนและขนาดรูพรุน ดังนี้

$$L_{TPB} = \frac{72\alpha[D_p - (D_p + D_s)V_p]V_p}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})} \quad (2.30)$$

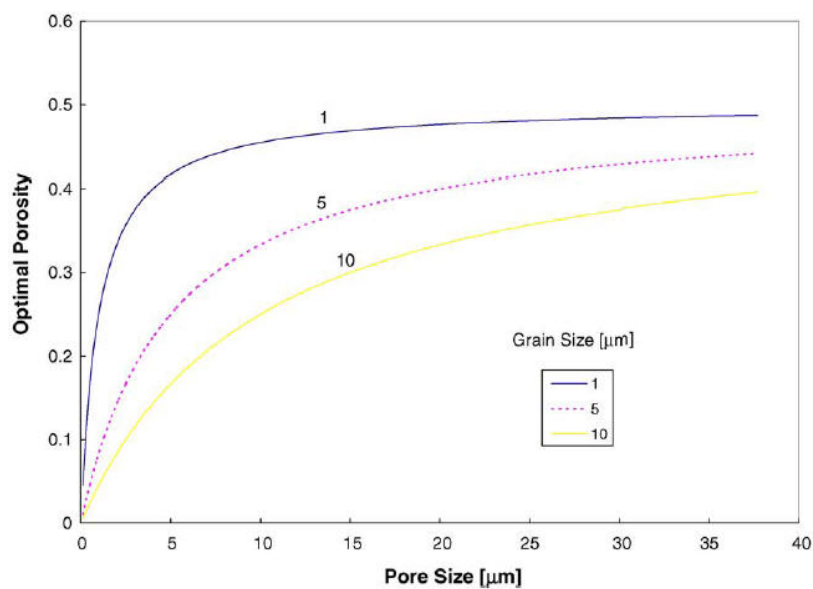
เมื่อ L_{TPB} คือ ความยาวของขอบเขต 3 สถานะ มีหน่วยเป็น $[L/L^4]$, α คือ อัตราส่วนความยาวของการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคตัวนำอิเล็กตรอนและไอออน, V_p คือ ความพรุนของอิเล็กโทรด, $D_{s,p}$ คือ เส้นรอบวงของเกรนและรูพรุน ตามลำดับ จากสมการพบว่า ความยาวของขอบเขต 3 สถานะแปรผกผันกับขนาดของเกรน ดังนั้น หากต้องการได้ การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงต้องทำให้ขนาดของเกรนเล็กเท่าที่จะทำได้ แต่อย่างไรก็เราควรหาขนาดของรูพรุนและความพรุนที่เหมาะสมสำหรับขนาดของเกรนตามต้องการ ดังต่อไปนี้

ขนาดรูพรุนที่เหมาะสม $D_p^{opt} = 2D_s \frac{V_p}{1-V_p}$ (2.31)

ความพรุนที่เหมาะสม $V_p^{opt} = \frac{D_p}{2(D_p + D_s)}$ (2.32)



รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ของสมการ (2.31)



รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ของสมการ (2.32)

และจากการค้นคว้าเพิ่มเติม พอที่จะได้ขนาดของรูพรุนและความพรุน ที่ใช้ในการศึกษากันอยู่ ณ ขณะนี้ ซึ่งเป็นข้อมูลหรือแนวทางในการคำนวณย้อนกลับหาค่าขนาดของเกรน เพื่อประเมินค่าการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ตามตารางด้านล่างนี้

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติวัสดุพรุนของ Ni-YSZ และ/หรือ LSM-YSZ

$\kappa_{anode} [m^2]$	$\kappa_{cathode} [m^2]$	METHOD	MICROSTRUCTURE	SOURCE
$2-18 \times 10^{-14}$		Permeametry, porosimetry.	$\varepsilon \approx 0.4,$ $1\mu m > d_p > 5\mu m$	[37]
$1-4 \times 10^{-14}$		Permeametry	$\varepsilon > 0.3$	[38]
	2.96×10^{-14}	Permeametry	$\varepsilon=0.3, d_p=1\mu m$	[39]
9.83×10^{-15}		Permeametry	$d_p \approx 0.5-10\mu m$	[40]
$1-5 \times 10^{-15}$		Permeametry, porosimetry	$0.2 > \varepsilon > 0.5$	[41]
10^{-12}	10^{-12}	constant parameter	$\varepsilon=0.38 - 0.5,$ $d_p=1-2\mu m$	[42,43]
1.7×10^{-12}	1.7×10^{-12}	constant parameter	$\varepsilon=0.3, d_p=1\mu m$	[44]
1.57×10^{-12}	1.57×10^{-12}	constant parameter	$d_p=1\mu m$	[4]
1.76×10^{-11}	1.76×10^{-11}	constant parameter	$\varepsilon = 0.5$	[2]
1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}	constant parameter	$\varepsilon=0.9$	[5]
2.18×10^{-14}	3.6×10^{-14}	Kozeny-Carman	$\varepsilon=0.35, d_p=0.5\mu m$	[45]
1.27×10^{-15}	1.27×10^{-15}	Kozeny-Carman	$\varepsilon=0.3, d_p=0.5\mu m$	[16]
9.237×10^{-15}	9.237×10^{-15}	Kozeny-Carman	$\varepsilon=0.5, d_p=2.5\mu m$	[17]
1.9×10^{-15}	1.9×10^{-15}	Kozeny-Carman	$\varepsilon=0.3, d_p=1\mu m$	[46]
8×10^{-16} (6×10^{-15})	8×10^{-16} (6×10^{-15})	Kozeny-Carman (numerical experiment)	$\varepsilon=0.4, d_p=0.9\mu m$	[47]
1.27×10^{-15}	1.27×10^{-15}	Kozeny-Carman	$\varepsilon=0.3, d_p=0.5\mu m$	[26]

ดังนั้น การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่แปรผันตรงกับความยาวของขอบเขต 3 สถานะ สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$J_{0,i} \propto \frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s) V_p] V_p}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})} \quad (2.33)$$

และจากความสัมพันธ์ทั้ง 2 รูปแบบของการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$J_{0,a} \propto \frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s) V_p] V_p}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})} \left(\frac{P_{H_2}}{P_{ref}} \right) \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{ref}} \right) \exp\left(-\frac{E_{act,a}}{RT} \right) \quad (2.34)$$

สำหรับด้านแอโนด

$$J_{0,a} = k_a \frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s)V_p] V_p \left(\frac{P_{H_2}}{P_{ref}}\right) \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{ref}}\right) \exp\left(-\frac{E_{act,a}}{RT}\right)}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})} \quad (2.35)$$

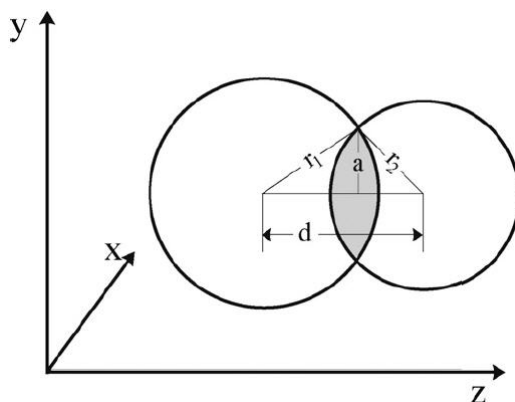
และ

$$J_{0,c} = \alpha \frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s)V_p] V_p \left(\frac{P_{O_2}}{P_{ref}}\right)^{0.25} \exp\left(-\frac{E_{act,c}}{RT}\right)}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})} \quad (2.36)$$

สำหรับด้านคาโทด

$$J_{0,c} = k_c \frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s)V_p] V_p \left(\frac{P_{O_2}}{P_{ref}}\right)^{0.25} \exp\left(-\frac{E_{act,c}}{RT}\right)}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})} \quad (2.37)$$

เมื่อ $k_{a,c}$ คือ สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าด้านแอโนดและคาโทด ตามลำดับ และจากสมการ (2.35) และ (2.37) แสดงให้เห็นว่า การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เป็นฟังก์ชันของโครงสร้างทางจุลภาคของอิเล็กโทรดและเงื่อนไขขณะทำงาน แต่อย่างไรก็ตาม แบบจำลองของ Xiaohua Deng และคณะ ยังอยู่บนพื้นฐานของอนุภาคตัวนำอิเล็กตรอนและไอออน ที่มีขนาดเท่ากัน ซึ่งในความเป็นจริงคณะผู้วิจัยทางด้านวัสดุศาสตร์ของ เซลล์เชื้อเพลิง อาจจะพัฒนาให้อนุภาคตัวนำอิเล็กตรอนและไอออน มีขนาดไม่เท่ากัน เพื่อหวังผล ในทางที่ดีขึ้น ก็ย่อมเป็นไปได้



รูปที่ 2.12 แนวคิดแบบจำลองของ Vinod M. Janardhanan และคณะ

ดังนั้น ในปี 2008 Vinod M. Janardhanan และคณะ ได้พัฒนาแบบจำลองความยาวของขอบเขต 3 สถานะ โดยสามารถใช้ได้ทั้งขนาดของอนุภาคตัวนำอิเล็กตรอนและไอออน เท่ากันและไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และความยาวของขอบเขต 3 สถานะแบบอนุภาคตัวนำอิเล็กตรอนและไอออน มีขนาดไม่เท่ากัน สามารถเขียนแสดงได้ ดังนี้

$$\text{อนุภาคไม่เท่ากัน} \quad vL_{TPB} = \frac{\phi(1-\phi)(1+M)Z_{i-e}2\pi a}{(4/3)\pi(r_1^3 + Mr_2^3) - (1-\psi)(1+M)V_i} \quad (2.38)$$

และ

$$\text{อนุภาคเท่ากัน} \quad vL_{TPB} = \frac{\phi(1-\phi)Z_{i-e}2\pi a}{(4/3)\pi r^3 - (1-\psi)V_i} \quad (2.39)$$

เมื่อ vL_{TPB} คือ ความยาวของขอบเขต 3 สถานะ มีหน่วยเป็น $[L]/[L^3]$, ϕ คือ ความพรุน, M คือ อัตราส่วนของจำนวนอนุภาคตัวนำไอออนและอิเล็กตรอน, Z_{i-e} คือ จำนวนการประสานกันของอนุภาคตัวนำไอออนและอิเล็กตรอน, a คือ รัศมีความยาวของการสัมผัสระหว่างอนุภาคตัวนำไอออนและอิเล็กตรอน, $r_{1,2}$ คือ รัศมีความยาวของอนุภาคตัวนำที่โตกว่าและที่เล็กกว่า ตามลำดับ, ψ คือ เศษส่วนของการซ้อนกัน, V_i คือ ปริมาตรสูญเสีย แต่อย่างไรก็ตาม แบบจำลองนี้ น่าจะพัฒนาต่อ ยอดจากแนวคิดของ Costamagna และคณะ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ละสมการของแต่ละตัวแปร และผู้วิจัยท่านอื่นๆสามารถศึกษาค้นคว้าได้จากเอกสารที่เกี่ยวข้องได้ตามลำดับต่อไป จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมด เป็นการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา ต่อไปเราจะศึกษาตัวแปรการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส เป็นลำดับต่อไป

2.3.1.4 การสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส

การสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส เป็นการสูญเสียเนื่องจาก การต้านทานของตัวทำปฏิกิริยาและตัวผลผลิต เข้าและออก จากบริเวณช่องการไหลของแก๊สและบริเวณที่ทำปฏิกิริยา ดังนั้น สามารถเขียนการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส ให้อยู่ในเทอมของความดันย่อยของแก๊ส ได้ดังนี้

$$\text{ด้านอาโนด} \quad \eta_{cont,a} = \frac{RT}{2F} \ln \left[\left(\frac{P_{H_2}^I}{P_{H_2}^0} \right) \left(\frac{P_{H_2O}^0}{P_{H_2O}^I} \right) \right] \quad (2.40)$$

ด้านคาโทด

$$\eta_{cont,c} = \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P'_{O_2}}{P^0_{O_2}} \right)^{0.5} \quad (2.41)$$

เมื่อ P'_{H_2, H_2O, O_2} คือ ความดันย่อยของ ไฮโดรเจน ใอน้ำและออกซิเจน ที่ผิวสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ ตามลำดับ, P_{H_2, H_2O, O_2} คือ ความดันย่อยของ ไฮโดรเจน ใอน้ำและออกซิเจนที่อิเล็กโทรด ตามลำดับ และโดยธรรมชาติของวัสดุพูนนั้น การถ่ายโอนมวลของแก๊สต้องอาศัยกลไกการแพร่ของแก๊ส ดังนั้น ความดันย่อยของ ไฮโดรเจน ใอน้ำและออกซิเจน ที่ผิวสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ สามารถหาได้ด้วยทอมของการแพร่ ดังต่อไปนี้ ตามลำดับ

ด้านแอโนด

$$\eta_{cont,a} = \frac{RT}{2F} \ln \left[\left(1 + \frac{RTd_a J}{2FD_a^{eff} P_{H_2O}^0} \right) / \left(1 - \frac{RTd_a J}{2FD_a^{eff} P_{H_2}^0} \right) \right] \quad (2.42)$$

และ

ด้านคาโทด

$$\eta_{cont,c} = \frac{RT}{4F} \ln \left(P_{O_2}^0 / \frac{P_c}{\delta_{O_2}} - \left(\frac{P_c}{\delta_{O_2}} - P_{O_2}^0 \right) \exp \left(\frac{RTd_c J \delta_{O_2}}{4FD_c^{eff} P_c} \right) \right) \quad (2.43)$$

เมื่อ P_c คือ ความดันขณะทำงานที่ด้านคาโทด, $d_{a,c}$ คือ ความหนาของอิเล็กโทรดด้านแอโนดและคาโทด ตามลำดับ, $D_{a,c}^{eff}$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิทธิพลรวมสำหรับอิเล็กโทรดด้านแอโนดและคาโทด ตามลำดับ และ δ_{O_2} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของออกซิเจน หาได้จาก

$$\delta_{O_2} = \frac{D_{O_2,k}^{eff}}{D_{O_2,k}^{eff} + D_c^{eff}} \quad (2.44)$$

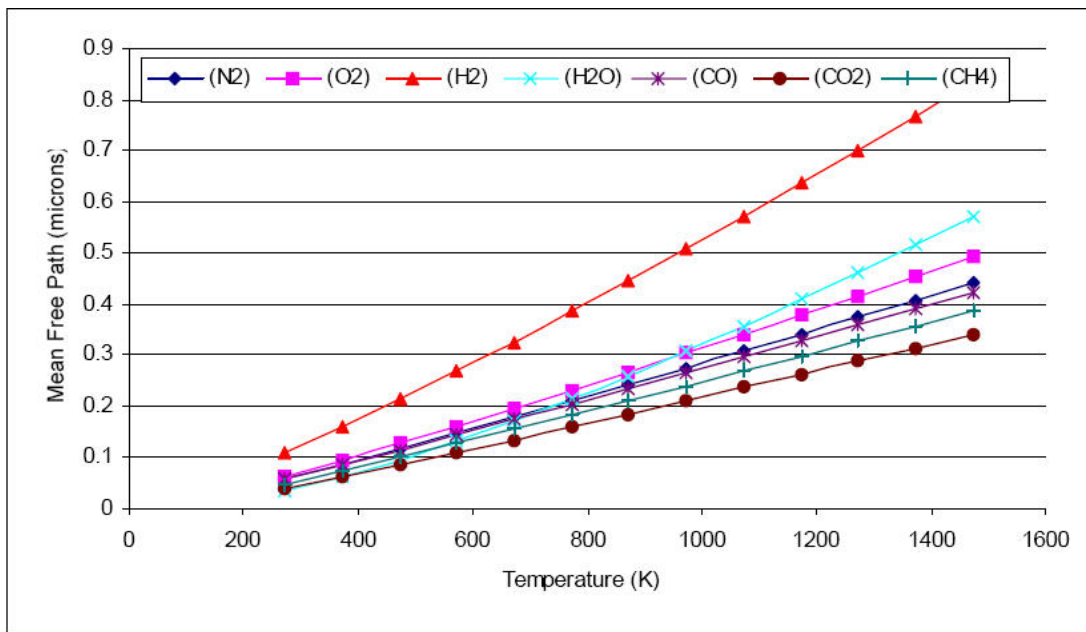
เมื่อ $D_{O_2,k}^{eff}$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิทธิพล Knudsen สำหรับออกซิเจน และจากที่ได้กล่าวมาแล้ว ธรรมชาติของวัสดุพูนต้องอาศัยกลไกของการแพร่สำหรับถ่ายโอนมวลของแก๊ส ดังนั้น กลไกการแพร่ มีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะ คือ กลไกการแพร่ด้วยโมเลกุลและกลไกการแพร่ด้วย Knudsen ซึ่งกลไกการแพร่ด้วยโมเลกุลจะถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาของโมเลกุลต่อโมเลกุล ถ้ารูพูนใหญ่กว่าเส้นทางเดินเฉลี่ยอิสระของโมเลกุลนั้น และในทางตรงข้ามกัน กลไกการแพร่ด้วย Knudsen จะถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาของโมเลกุลต่อผนังรูพูน ถ้ารูพูนเล็กกว่าเส้นทางเดินเฉลี่ยอิสระของโมเลกุลนั้น ดังนั้น สามารถคำนวณได้จาก

$$K_n = \frac{\lambda}{d_p} \quad (2.45)$$

เมื่อ K_n คือ จำนวน Knudsen, d_p คือ เส้นรอบวงของรูพรุน และ λ คือ เส้นทางเดินเฉลี่ยอิสระของโมเลกุล และหาได้จาก

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d_m^2 n} \quad (2.46)$$

เมื่อ n คือ จำนวนโมเลกุลต่อปริมาตร, d_m คือ เส้นรอบวงของโมเลกุล ดังนั้น เส้นรอบวงของไฮโดรเจนและไอน้ำ เท่ากับ 0.5654×10^{-9} เมตร และ 0.5282×10^{-9} เมตร ตามลำดับ และเส้นทางเดินเฉลี่ยอิสระของโมเลกุล หาได้จากตารางด้านล่างนี้



รูปที่ 2.13 เส้นทางเดินเฉลี่ยอิสระของแต่ละโมเลกุล

ดังนั้น จากค่ากล่าวข้างต้น สามารถเข้าใจจำนวน Knudsen ที่เป็นตัวกำหนดการควบคุมของกลไกการแพร่ ได้ดังนี้

$$K_n = \frac{\lambda}{d_p} \quad \text{ถ้า } K_n < 1 \text{ ควบคุมโดยกลไกการแพร่ด้วยโมเลกุล} \quad (2.47)$$

และ

$$K_n = \frac{\lambda}{d_p} \quad \text{ถ้า } K_n > 1 \text{ ควบคุมโดยกลไกการแพร่ด้วย Knudsen} \quad (2.48)$$

ดังนั้น กลไกการแพร่ของทั้ง 2 แบบนี้ จึงมีความสำคัญต่อการถ่ายโอนมวลของแก๊สในโครงสร้างของวัสดุพอร์ ซึ่งทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิทธิพลรวม จึงต้องพิจารณารวมทั้ง 2 กลไกการแพร่นี้ โดยใช้สูตรของ Basanquet ดังแสดงในสามการด้านล่าง

$$\text{สำหรับอานอด} \quad \frac{1}{D_a^{eff}} = \frac{\xi}{n} \left(\frac{1}{D_{H_2-H_2O}^{eff}} + \frac{1}{D_{H_2,k}^{eff}} \right) \quad (2.49)$$

และ

$$\text{สำหรับคาโทด} \quad \frac{1}{D_c^{eff}} = \frac{\xi}{n} \left(\frac{1}{D_{O_2-N_2}^{eff}} + \frac{1}{D_{O_2,k}^{eff}} \right) \quad (2.50)$$

เมื่อ ξ/n คือ เศษส่วนระหว่างความคดเคี้ยวต่อความพอร์, $(n/\xi)D_{H_2-H_2O, O_2-N_2}^{eff}$ คือ ส่วนกลับของสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิทธิพลโมเลกุลสำหรับ H_2-H_2O และ O_2-N_2 ของระบบคู่, $(n/\xi)D_{(H_2,k)}^{eff}$ คือ ส่วนกลับของสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิทธิพล Knudsen สำหรับ H_2 และ $(n/\xi)D_{(O_2,k)}^{eff}$ คือ ส่วนกลับของสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิทธิพล Knudsen สำหรับ O_2 และจากทฤษฎีของ Chapman-Enskog และทฤษฎีจลน์ของแก๊ส สามารถหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิทธิพลโมเลกุลและสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิทธิพล Knudsen ได้ตามลำดับดังนี้

$$D_{A-B}^{eff} = 1.86e-3 \frac{T^{\frac{3}{2}}}{P \sigma_{A-B}^2 \Omega_{D_{A-B}^{eff}}} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{0.5} \quad (2.51)$$

และ

$$D_{A,k}^{eff} = \frac{d_p}{3} T^{\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{8R}{\pi M_A}} \quad (2.52)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ, P คือ ความดัน, R คือ ค่าคงที่สากลของแก๊ส, M คือ น้ำหนักโมเลกุลของสารนั้น, σ คือ ตัวแปร Lennard-Jones, Ω คือ ตัวแปรไร้มิติที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิทธิพลโมเลกุล และจากสมการ (2.49), (2.50) ของสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิทธิพลรวมนั้น สามารถใช้ได้กับกลไกการแพร่ทั้ง 2 รูปแบบ แต่จากสมการ (2.51), (2.52) ของสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิทธิพลโมเลกุลและสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิทธิพล Knudsen เป็นการคำนวณมาจากสมมุติฐานว่า ขนาดรูพรุนเท่ากันและสม่ำเสมอ ดังนั้นจากตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.13 แสดงว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิทธิพลรวมเกิดจากกลไกการแพร่ของสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิทธิพลโมเลกุล ยกเว้นสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิทธิพลรวมไฮโดรเจนที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 K และจากที่ได้กล่าวมานั้น เป็นการหาการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวล ดังนั้นเราจะศึกษาการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุเป็นลำดับต่อไป

2.3.1.5 การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ

การสูญเสียประเภทนี้ เป็นการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากความสามารถของการนำทางไฟฟ้าของอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ โดยพิจารณาทั้งการนำไฟฟ้าของโลหะและการนำไฟฟ้าของเซรามิกในอิเล็กโทรด และการนำไฟฟ้าของเซรามิกในอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้น กระแสไฟฟ้าอธิบายด้วยกฎของโอห์มและสมดุลประจุตามลำดับ และสามารถแสดงในรูปที่ 2.14 ประกอบสมการ ได้ดังนี้

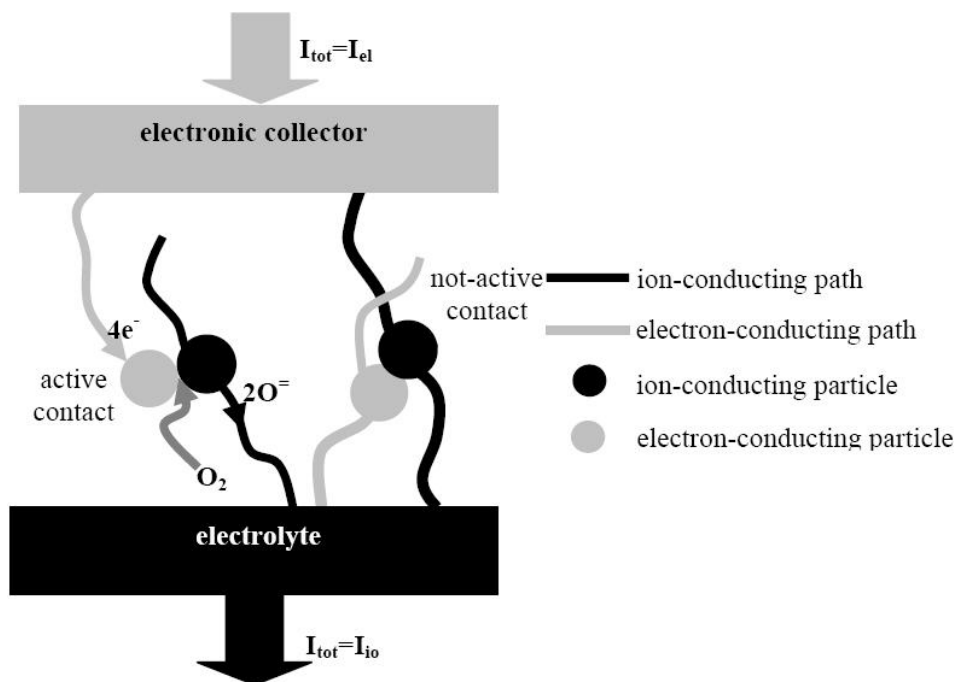
$$\text{สำหรับอิเล็กโทรไลต์} \quad j_{io} = -\sigma_{io}^{eff} \nabla \phi_{io} \quad (2.53)$$

และ

$$\text{สำหรับอินเตอร์คอนเนคเตอร์} \quad j_{el} = -\sigma_{el}^{eff} \nabla \phi_{el} \quad (2.54)$$

และ

$$\text{สำหรับอินเตอร์คอนเนคเตอร์} \quad \nabla \cdot j_{io} = -\nabla \cdot j_{el} \quad (2.55)$$



รูปที่ 2.14 ความสมดุลของกระแสไฟฟ้า

เมื่อ $j_{io,el}$ คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าออกซิเจนไอออนและอิเล็กตรอน ตามลำดับ, $\sigma_{io,el}^{eff}$ คือ ค่าการนำไฟฟ้าเนื่องจากอิทธิพลของอนุภาคตัวนำไอออนและอิเล็กตรอน ตามลำดับ, $\phi_{io,el}$ คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าของออกซิเจนไอออนและอิเล็กตรอน ตามลำดับ และจาก ค่าการนำไฟฟ้าของเซรามิกน้อยกว่า ค่าการนำไฟฟ้าของโลหะ ซึ่งทำให้การนำไฟฟ้าของเซรามิกในอิเล็กโทรไลต์ น้อยกว่า การนำไฟฟ้าของโลหะและการนำไฟฟ้าของเซรามิกในอิเล็กโทรด ดังนั้น การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ จะถูกควบคุมด้วยการนำไฟฟ้าของเซรามิกในอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\eta_{ohm} = J_{el} R_{el} \quad (2.56)$$

เมื่อ R_{el} คือ พื้นที่จำเพาะของอิเล็กโทรไลต์ หาได้จาก

$$R_{el} = \frac{L_{el}}{\sigma_{el}} \quad (2.57)$$

เมื่อ L_{el} คือ ความหนาของอิเล็กโทรไลต์ และ σ_{el} คือ การนำไฟฟ้าของออกซิเจนไอออนในอิเล็กโทรไลต์ หาได้จาก

$$\sigma_{el} = \frac{\sigma_0}{T} \exp\left(-\frac{E_{el}}{RT}\right) \quad (2.58)$$

และแทนสมการ (2.57), (2.58) ลงในสมการ (2.56) จะได้

$$\eta_{ohm} = (2.99e - 11)J_{el}L_{el} \exp\left(\frac{10300}{T}\right) \quad (2.59)$$

ดังนั้น จากสมการ (2.59) จึงไม่แปลกใจที่นักวิจัยเซลล์เชื้อเพลิง ถึงพยายามลดขนาดความหนาของ อิเล็กโทรไลต์และการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุแปรผกผันกับอุณหภูมิ

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดเป็นการศึกษาตัวแปรของการสูญเสีย ดังนั้น เราต้องทำการศึกษา ต่อถึงผลกระทบของตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่อการสูญเสีย ว่า สัมพันธ์กันอย่างไร ในหัวข้อต่อไปนี้

2.4 วิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

การวิเคราะห์ตัวแปรในหัวข้อนี้ จะเป็นการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของตัวแปร เช่น ชนิดของ เซลล์เชื้อเพลิง การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ความหนาของอิเล็กโทรด ขนาดของรูพรุน ความพรุน อุณหภูมิขณะทำงาน ส่วนประกอบของแก๊สและความดัน ว่ามีผลอย่างไรต่อ สมรรถนะรวมของเซลล์เชื้อเพลิง โดยหาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์พร้อมยกตัวอย่างประกอบ เปรียบเทียบกับแนวคิดนั้น ซึ่งจะเริ่มศึกษาจากผลกระทบของความหนารูพรุน เป็นลำดับแรก ดังนี้

2.4.1 ผลกระทบของความหนาเซลล์ต่อชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง

ในหัวข้อนี้จะศึกษาเปรียบเทียบเพียง 3 ชนิด ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งแบบ อิเล็กโทรไลต์รองรับ คาโทดรองรับ และแอนโอดรองรับ ตามลำดับ ซึ่งชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นกับ ตัวแปรความหนาของอิเล็กโทรไลต์และอิเล็กโทรด ดังนั้น ตัวแปรที่วิเคราะห์ ได้แก่ ความหนาของ เซลล์ ดังหาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ ดังนี้

สำหรับอิเล็กโทรไลต์รองรับ

ความหนาของอิเล็กโทรไลต์ ที่มีผลต่อสมรรถนะรวม ได้แก่

$$\eta_{ohm} = (2.99e - 11)J_{el}L_{el} \exp\left(\frac{10300}{T}\right) \quad \text{ดังนั้น } \eta_{ohm} \propto L_{el}$$

เพราะฉะนั้น ควรลดความหนาของอิเล็กโทรไลต์

สำหรับคาโทดรองรับ

ความหนาคาโทด ที่มีผลต่อสมรรถนะรวม ได้แก่

$$\eta_{cont,c} = \frac{RT}{4F} \ln \left[P_{O_2}^0 \frac{\frac{P_c}{\delta_{O_2}}}{\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\text{large-term}}} - \underbrace{\left(\frac{P_c}{\delta_{O_2}} - P_{O_2}^0 \right)}_{\text{large-term}} \exp \left(\frac{RTd_c J \delta_{O_2}}{4FD_c^{eff} P_c} \right)}_{\text{large-term}} \right] \quad \text{ดังนั้น } \eta_{cont,c} \propto d_c$$

$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\text{small-term}}$
 $\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\text{large-term}}$

เพราะฉะนั้น ควรลดความหนาคาโทด

สำหรับอโนดรองรับ

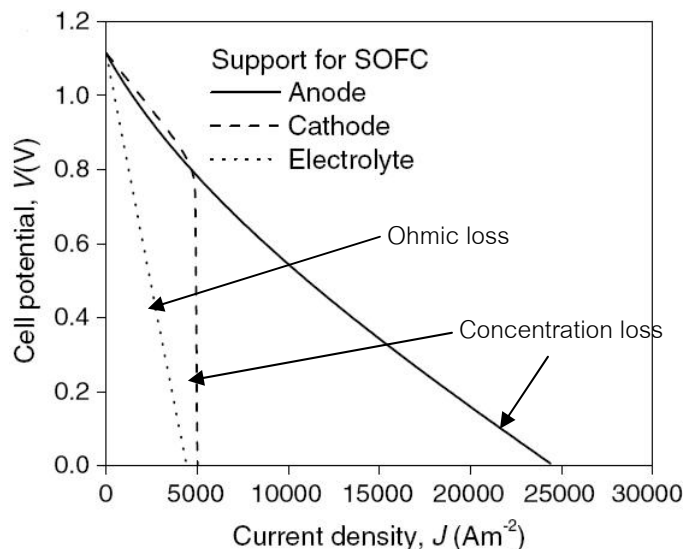
ความหนาอโนด ที่มีผลต่อสมรรถนะรวม ได้แก่

$$\eta_{cont,a} = \frac{RT}{2F} \ln \left[\underbrace{\left(1 + \frac{RTd_a J}{2FD_a^{eff} P_{H_2O}^0} \right)}_{\text{large-term}} \right] / \underbrace{\left(1 - \frac{RTd_a J}{2FD_a^{eff} P_{H_2}^0} \right)}_{\text{small-term}} \quad \text{ดังนั้น } \eta_{cont,a} \propto d_a$$

$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\text{large-term}}$
 $\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\text{small-term}}$

เพราะฉะนั้น ควรลดความหนาอโนด

ตัวอย่างของผลกระทบ



รูปที่ 2.15 ผลจากความหนาของเซลล์

2.4.2 ผลกระทบของการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

ตัวแปรนี้ มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับ โครงสร้างจุลภาคของอิเล็กโทรดและเงื่อนไขทำงาน แต่อย่างไรก็ตามในหัวนี้ จะแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิขณะทำงานที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความสัมพันธ์อื่น ๆ จะได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป ดังนั้น สมรรถนะรวมของเซลล์เชื้อเพลิง พิจารณาได้จาก การสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

สำหรับด้านแอโนด

อุณหภูมิขณะทำงาน ที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ได้แก่

$$J_{0,a} = k_a \underbrace{\frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s) V_p]}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})}}_{large-term} \underbrace{\left(\frac{P_{H_2}}{P_{ref}} \right)}_{small-effect} \underbrace{\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{ref}} \right) \exp\left(-\frac{E_{act,a}}{RT} \right)}_{large-term} \quad \text{ดังนั้น } J_{0,a} \propto T$$

สำหรับด้านคาโทด

อุณหภูมิขณะทำงาน ที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ได้แก่

$$J_{0,c} = k_c \underbrace{\frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s)N_p] V_p}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})}}_{large-term} \underbrace{\left(\frac{P_{O_2}}{P_{ref}}\right)^{0.25}}_{large-effect} \underbrace{\exp\left(-\frac{E_{act,c}}{RT}\right)}_{large-term} \text{ ดังนั้น } J_{0,c} \propto T$$

และการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่

$$\eta_{act,i} = \underbrace{\frac{RT}{F} \sinh^{-1}\left(\frac{J}{2J_{0,i}}\right)}_{small-term} \text{ ดังนั้น } \eta_{act} \propto \frac{1}{T}$$

ดังนั้น อุณหภูมิขณะทำงาน ที่มีผลต่อสมรรถนะรวม ได้แก่

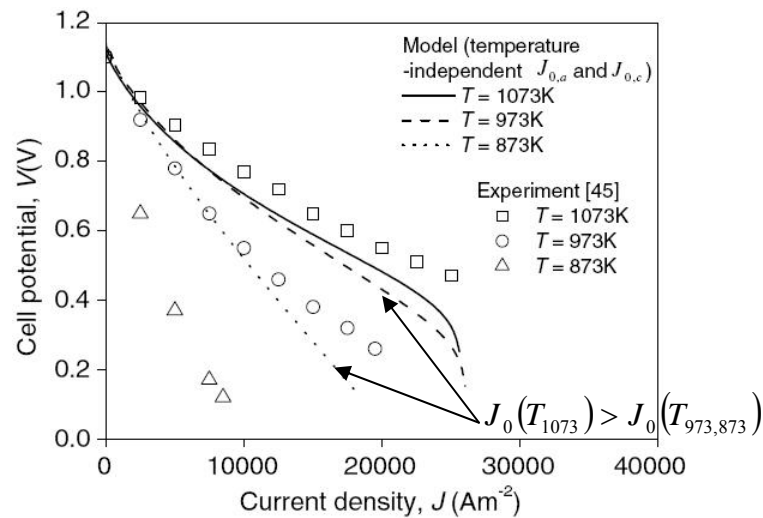
$$J = J_0 \underbrace{\left[\exp\left(\frac{\alpha z F \eta_{act}}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\alpha) z F \eta_{act}}{RT}\right) \right]}_{small-effect} \text{ ดังนั้น } J \propto T$$

large-term

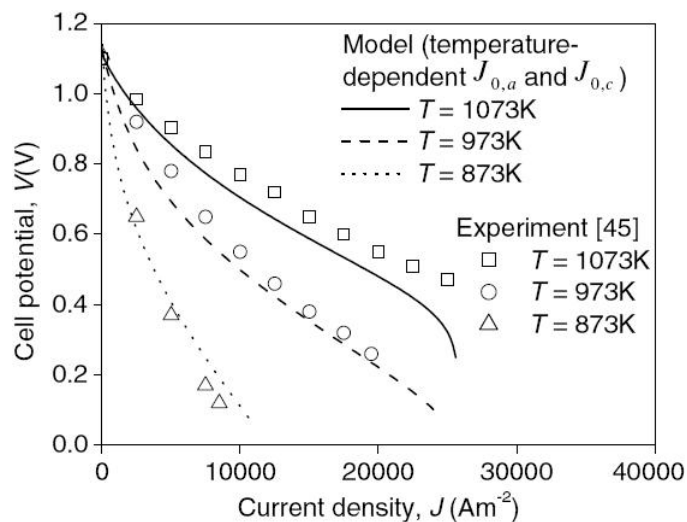
เพราะฉะนั้น อุณหภูมิขณะทำงานควรสูง

ตัวอย่างของผลกระทบ

จากการศึกษา พบว่า หากการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไม่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิขณะทำงาน จะส่งผลให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าผิดพลาด ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าใช้การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิขณะทำงานเท่าไร หากนำมาใช้กับอุณหภูมิขณะทำงานที่ต่ำกว่า จะส่งผลให้ได้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าเท่าที่จะเป็น ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ก.



ก. การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไม่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิขณะทำงาน

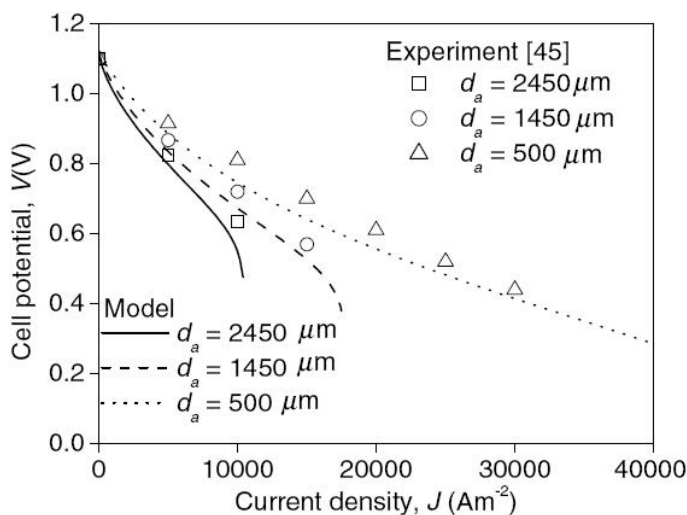


ข. การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิขณะทำงาน

รูปที่ 2.16 ผลกระทบของอุณหภูมิขณะทำงานต่อสมรรถนะรวม

2.4.3 ผลกระทบของความหนาแน่นด้านไอออน

หัวข้อนี้ เป็นเพียงการขยายความเข้าใจของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นด้านไอออนที่มีผลต่อสมรรถนะรวมของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งแบบบอานโตรองรับ ซึ่งจากการศึกษา พบว่า การสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊สแปรผันตรงกับความหนาแน่นไอออน ดังนั้น สมรรถนะรวมเซลล์เชื้อเพลิงแปรผกผันกับความหนาแน่นไอออน ดังแสดงความสัมพันธ์ในรูปด้านล่างนี้



รูปที่ 2.17 ผลกระทบของความหนาอากาศต่อสมรรถนะรวม

2.4.4 ผลกระทบของขนาดรูพรุน

ขนาดของรูพรุน มีความสัมพันธ์เกี่ยวกับทั้งการเสียดสีเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาและการถ่ายโอนมวลของแก๊ส ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาและพยายามหาอัตราส่วนระหว่างการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส แต่ยังไม่มีความชัดเจนพอที่จะสนับสนุนอัตราส่วนดังกล่าว แต่จากการสังเกต พบว่า การสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา มีผลกระทบต่อสมรรถนะรวมมากกว่าการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส แต่อย่างไรก็ตาม เราจะแนะนำแนวทางการหาอัตราส่วนดังกล่าว โดยวิธีเปรียบเทียบให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากันของแต่ละการสูญเสีย ซึ่งวิธีนี้ยังสอดคล้องกับความเป็นจริง ดังนั้น เราจะแสดงเฉพาะความสัมพันธ์ของผลกระทบเท่านั้น ดังนี้

สำหรับด้านอากาศ

ขนาดของรูพรุน ที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ได้แก่

$$J_{0,a} = k_a \underbrace{\frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s) N_p] V_p}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})}}_{\text{large-term}} \underbrace{\left(\frac{P_{H_2}}{P_{ref}} \right) \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{ref}} \right) \exp\left(-\frac{E_{act,a}}{RT} \right)}_{\text{large-term}} \quad \text{ดังนั้น } J_{0,a} \propto \frac{1}{D_p}$$

ขนาดของรูพรุน ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส ได้แก่

$$\eta_{cont,a} = \frac{RT}{2F} \ln \left[\underbrace{\left(1 + \underbrace{\frac{RTd_a J}{2FD_a^{eff} P_{H_2O}^0}}_{small-term} \right)}_{small-term} / \underbrace{\left(1 - \underbrace{\frac{RTd_a J}{2FD_a^{eff} P_{H_2}^0}}_{small-term} \right)}_{small-term} \right] \text{ ดังนั้น } \eta_{cont,a} \propto \frac{1}{D_p}$$

สำหรับด้านคาโทด

ขนาดของรูพรุน ที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ได้แก่

$$J_{0,c} = k_c \underbrace{\frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s)V_p] V_p \left(\frac{P_{O_2}}{P_{ref}}\right)^{0.25}}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})}}_{large-term} \exp\left(-\frac{E_{act,c}}{RT}\right) \text{ ดังนั้น } J_{0,c} \propto \frac{1}{D_p}$$

ขนาดของรูพรุน ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส ได้แก่

$$\eta_{cont,c} = \frac{RT}{4F} \ln \left[P_{O_2}^0 / \underbrace{\left(\underbrace{\frac{P_c}{\delta_{O_2}}}_{large-term} - \underbrace{\left(\frac{P_c}{\delta_{O_2}} - P_{O_2}^0 \right)}_{small-term} \exp\left(\frac{RTd_c J \delta_{O_2}}{4FD_c^{eff} P_c}\right)}_{small-term} \right)}_{large-term} \right] \text{ ดังนั้น } \eta_{cont,c} \propto \frac{1}{D_p}$$

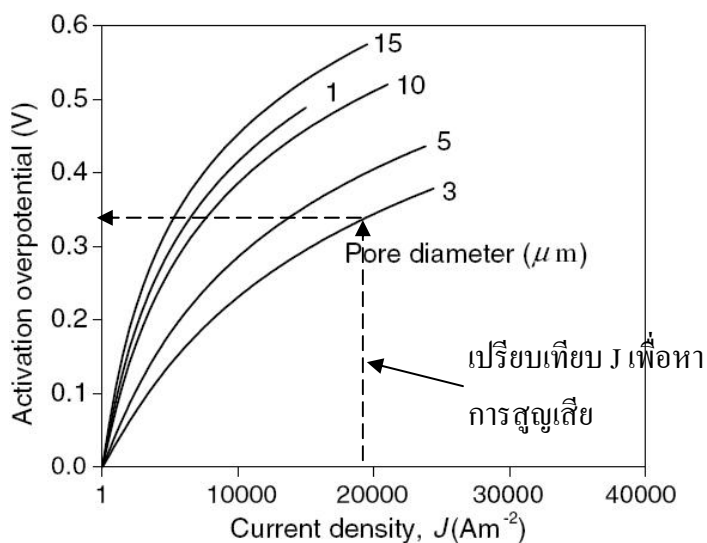
และจากที่ได้กล่าวมา การสูญเสียที่ควบคุมสมรรถนะรวม ได้แก่ การสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยเปรียบเทียบขนาดของการสูญเสียต่อขนาดของการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส ดังนั้น การแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่

$$\eta_{act,i} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\underbrace{\frac{J}{2J_{0,i}}}_{small-term} \right) \text{ ดังนั้น } \eta_{act} \propto D_p$$

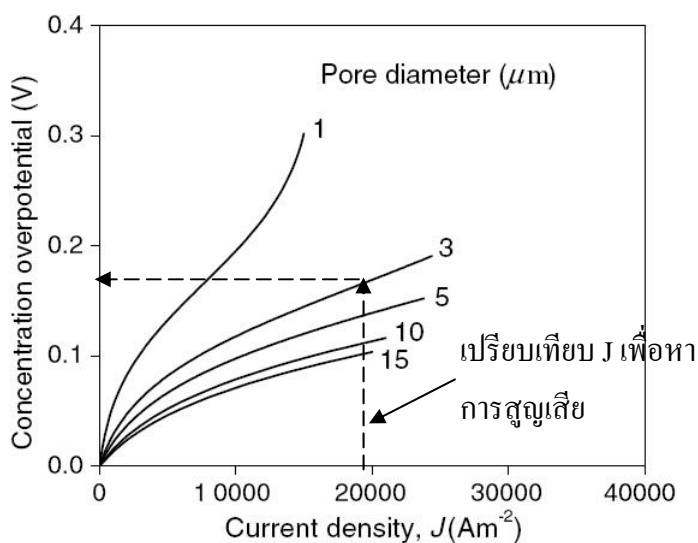
ดังนั้น ขนาดของรูพรุน ที่มีผลต่อสมรรถนะรวม ได้แก่

$$J = J_0 \left[\underbrace{\exp\left(\frac{\alpha z F \eta_{act}}{RT}\right)}_{\text{small-term}} - \underbrace{\exp\left(-\frac{(1-\alpha) z F \eta_{act}}{RT}\right)}_{\text{large-term}} \right] \quad \text{ดังนั้น } J \propto \frac{1}{D_p}$$

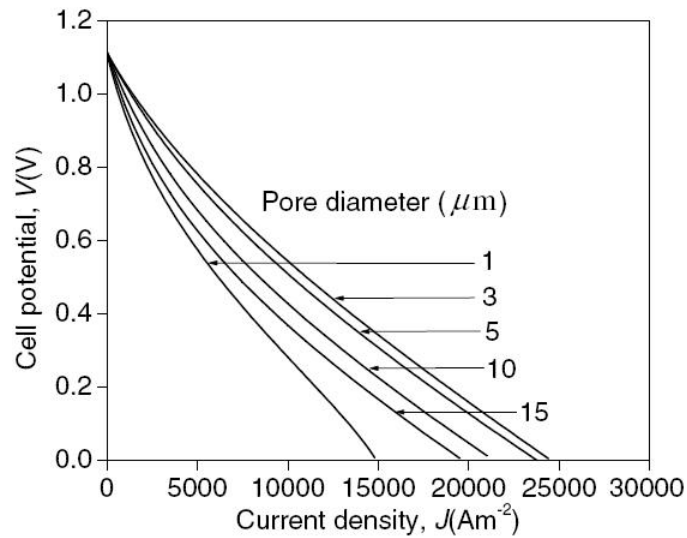
เพราะฉะนั้น ขนาดของรูพรุนควรเล็กและตัวอย่างของผลกระทบตามรูปด้านล่าง



ก. ขนาดของรูพรุน ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา



ข. ขนาดของรูพรุน ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส



รูปที่ 2.18 ค. ผลกระทบของขนาดรูพรุนต่อสมรรถนะรวม

2.4.5 ผลกระทบของความพรุน

ความพรุน มีความสัมพันธ์คล้ายคลึงกันกับขนาดของรูพรุน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ ดังนั้น เราจะแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

สำหรับด้านแอโนด

ความพรุน ที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ได้แก่

$$J_{0,a} = k_a \underbrace{\frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s)V_p]}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})}}_{large-term} \underbrace{V_p \left(\frac{P_{H_2}}{P_{ref}} \right) \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{ref}} \right) \exp\left(-\frac{E_{act,a}}{RT} \right)}_{large-term} \text{ ดังนั้น } J_{0,a} \propto V_p$$

ความพรุน ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส ได้แก่

จาก

$$\frac{1}{D_a^{eff}} = \underbrace{\frac{\xi}{n}}_{large-term} \underbrace{\left(\frac{1}{D_{H_2-H_2O}^{eff}} + \frac{1}{D_{H_2,k}^{eff}} \right)}_{large-term} \text{ ดังนั้น } D_a^{eff} \propto n$$

ดังนั้น

$$\eta_{cont,a} = \frac{RT}{2F} \ln \left[\underbrace{\left(1 + \underbrace{\frac{RTd_a J}{2FD_a^{eff} P_{H_2O}^0}}_{small-term} \right)}_{small-term} / \underbrace{\left(1 - \underbrace{\frac{RTd_a J}{2FD_a^{eff} P_{H_2}^0}}_{small-term} \right)}_{small-term} \right] \text{ ดังนั้น } \eta_{cont,a} \propto \frac{1}{D_p}$$

สำหรับด้านคาโทด

ความพรุน ที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ได้แก่

$$J_{0,c} = k_c \underbrace{\frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s) V_p] V_p \left(\frac{P_{O_2}}{P_{ref}} \right)^{0.25}}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})}}_{large-term} \exp\left(-\frac{E_{act,c}}{RT}\right) \text{ ดังนั้น } J_{0,c} \propto V_p$$

ความพรุน ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส ได้แก่

$$\text{จาก } \frac{1}{D_c^{eff}} = \underbrace{\frac{\xi}{n}}_{large-term} \underbrace{\left(\frac{1}{D_{O_2-N_2}^{eff}} + \frac{1}{D_{O_2,k}^{eff}} \right)}_{large-term} \text{ ดังนั้น } D_c^{eff} \propto n$$

ดังนั้น

$$\eta_{cont,c} = \frac{RT}{4F} \ln \left[P_{O_2}^0 / \underbrace{\left(\underbrace{\frac{P_c}{\delta_{O_2}}}_{large-term} - \underbrace{\left(\frac{P_c}{\delta_{O_2}} - P_{O_2}^0 \right)}_{large-term} \exp\left(\frac{RTd_c J \delta_{O_2}}{4FD_c^{eff} P_c}\right)}_{small-term} \right)}_{large-term} \right] \text{ ดังนั้น } \eta_{cont,c} \propto \frac{1}{D_p}$$

และจากที่ได้กล่าวมา การสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา จะได้

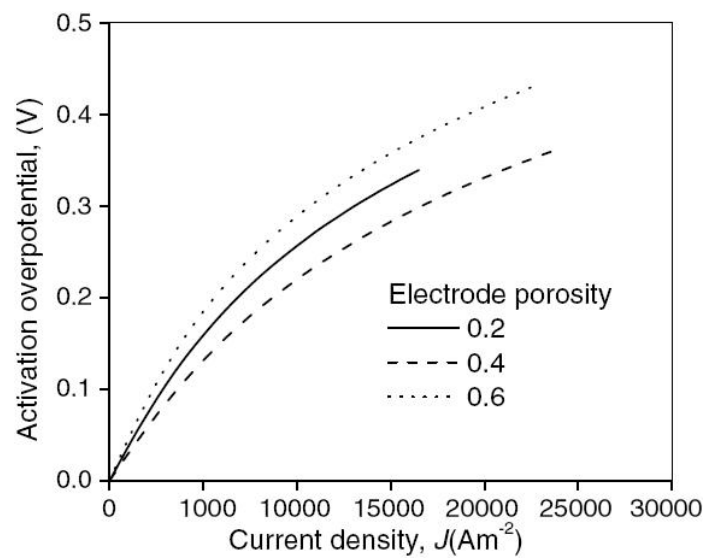
$$\eta_{act,i} = \frac{RT}{F} \underbrace{\sinh^{-1}\left(\frac{J}{2J_{0,i}}\right)}_{\substack{\text{small-term} \\ \text{small-term}}} \quad \text{ดังนั้น } \eta_{act} \propto V_p$$

ดังนั้น ความพรุน ที่มีผลต่อสมรรถนะรวม ได้แก่

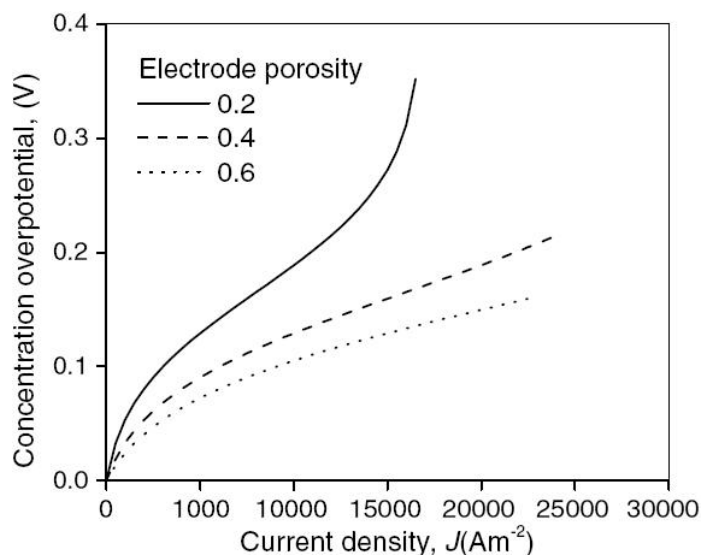
$$J = J_0 \underbrace{\left[\exp\left(\frac{\alpha z F \eta_{act}}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\alpha) z F \eta_{act}}{RT}\right) \right]}_{\substack{\text{small-term} \\ \text{large-term}}} \quad \text{ดังนั้น } J \propto \frac{1}{V_p}$$

เพราะฉะนั้น ความพรุนควรร้อย

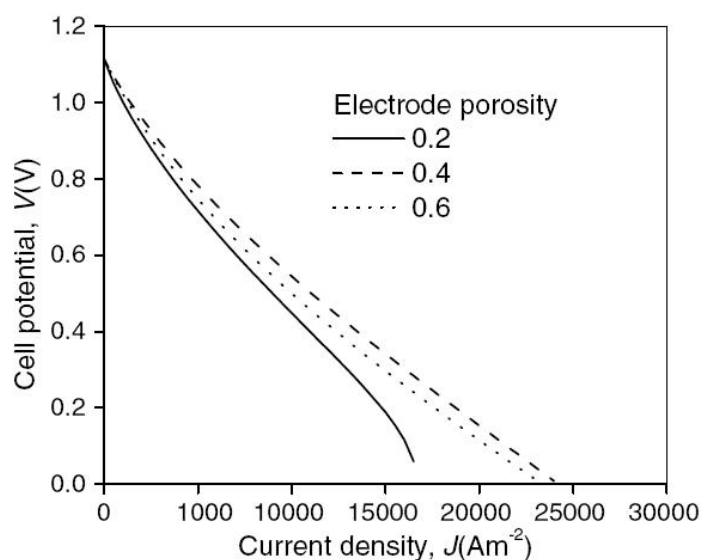
ตัวอย่างของผลกระทบ



ก. ความพรุน ที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า



ข. ความพรุน ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส



รูปที่ 2.19 ค. ผลกระทบของความพรุนต่อสมรรถนะรวม

2.4.6 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อสมรรถนะการทำงาน

อุณหภูมิต่อสมรรถนะการทำงาน มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องต่อการสูญเสียทั้ง 3 รูปแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการสูญเสียเนื่องจากการต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ ซึ่งจากการเปรียบเทียบด้วยวิธีที่กล่าวมา การสูญเสียเนื่องจากการต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ เป็นการสูญเสียควบคุมต่อสมรรถนะรวม แต่อย่างไรก็ตาม ในหัวข้อนี้จะแสดงความสัมพันธ์ทั้ง 3 รูปแบบของการสูญเสีย ให้เห็นถึงผลกระทบของอุณหภูมิต่อสมรรถนะการทำงาน ดังจะอธิบายตามลำดับ ดังนี้

สำหรับไอออน

อุณหภูมิขณะทำงาน ที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ได้แก่

$$J_{0,a} = k_a \underbrace{\frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s) N_p] V_p}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})} \left(\frac{P_{H_2}}{P_{ref}} \right)}_{large-term} \underbrace{\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{ref}} \right) \exp\left(-\frac{E_{act,a}}{RT} \right)}_{large-term} \text{ ดังนั้น } J_{0,a} \propto T$$

ดังนั้น อุณหภูมิขณะทำงาน ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากอัตราการผลิตปฏิกิริยา จะได้

$$\eta_{act,i} = \frac{RT}{F} \underbrace{\sinh^{-1}\left(\frac{J}{2J_{0,i}} \right)}_{small-term} \text{ ดังนั้น } \eta_{act} \propto \frac{1}{T}$$

อุณหภูมิขณะทำงาน ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส ได้แก่

$$\text{จาก } D_{A-B}^{eff} = 1.86e-3 \underbrace{\frac{T^{\frac{3}{2}}}{P \sigma_{A-B}^2 \Omega_{D_{A-B}^{eff}}} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{0.5}}_{large-term} \text{ ดังนั้น } D_{A-B}^{eff} \propto T$$

และ

$$\text{จาก } D_{A,k}^{eff} = \frac{d_p}{3} \underbrace{\frac{T^{\frac{1}{2}}}{large-term} \sqrt{\frac{8R}{\pi M_A}}}_{large-term} \text{ ดังนั้น } D_{A,k}^{eff} \propto T$$

และ

$$\text{จาก } \frac{1}{D_a^{eff}} = \frac{\xi}{n} \underbrace{\left(\frac{1}{D_{H_2-H_2O}^{eff}} + \frac{1}{D_{H_2,k}^{eff}} \right)}_{large-term} \text{ ดังนั้น } D_a^{eff} \propto T$$

ดังนั้น

$$\eta_{cont,a} = \frac{RT}{2F} \ln \left[\underbrace{\left(1 + \underbrace{\frac{RTd_a J}{2FD_a^{eff} P_{H_2O}^0}}_{large-term} \right)}_{large-term} / \underbrace{\left(1 - \underbrace{\frac{RTd_a J}{2FD_a^{eff} P_{H_2}^0}}_{large-term} \right)}_{large-term} \right] \quad \text{ดังนั้น } \eta_{cont,a} \propto T$$

สำหรับด้านคาโทด

อุณหภูมิจะทำงาน ที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ได้แก่

$$J_{0,c} = k_c \underbrace{\frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s)N_p] V_p}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})} \left(\frac{P_{O_2}}{P_{ref}} \right)^{0.25}}_{large-term} \underbrace{\exp\left(-\frac{E_{act,c}}{RT}\right)}_{large-term} \quad \text{ดังนั้น } J_{0,c} \propto T$$

ดังนั้น อุณหภูมิจะทำงาน ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา จะได้

$$\eta_{act,i} = \frac{RT}{F} \underbrace{\sinh^{-1}\left(\frac{J}{2J_{0,i}}\right)}_{small-term} \quad \text{ดังนั้น } \eta_{act} \propto \frac{1}{T}$$

อุณหภูมิจะทำงาน ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส ได้แก่

จาก

$$\frac{1}{D_c^{eff}} = \frac{\xi}{n} \underbrace{\left(\frac{1}{D_{O_2-N_2}^{eff}} + \frac{1}{D_{O_2,k}^{eff}} \right)}_{large-term} \quad \text{ดังนั้น } D_c^{eff} \propto T$$

ดังนั้น

$$\eta_{cont,c} = \frac{RT}{4F} \ln \left(P_{O_2}^0 \underbrace{\frac{P_c}{\delta_{O_2}}}_{\text{large-term}} - \underbrace{\left(\frac{P_c}{\delta_{O_2}} - P_{O_2}^0 \right)}_{\text{small-term}} \exp\left(\frac{RTd_c J \delta_{O_2}}{4FD_c^{eff} P_c} \right)}_{\text{small-term}} \right) \quad \text{ดังนั้น } \eta_{cont,c} \propto T$$

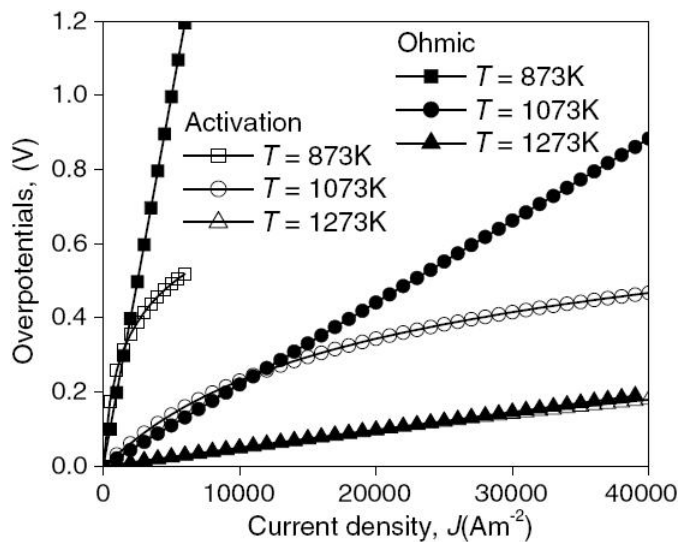
สำหรับอิเล็กโทรไลต์

อุณหภูมิขณะทำงาน ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากการต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ

$$\eta_{ohm} = \underbrace{(2.99e-11)J_{el}L_{el}}_{\text{small-term}} \exp\left(\frac{10300}{T}\right) \quad \text{ดังนั้น } \eta_{ohm} \propto \frac{1}{T}$$

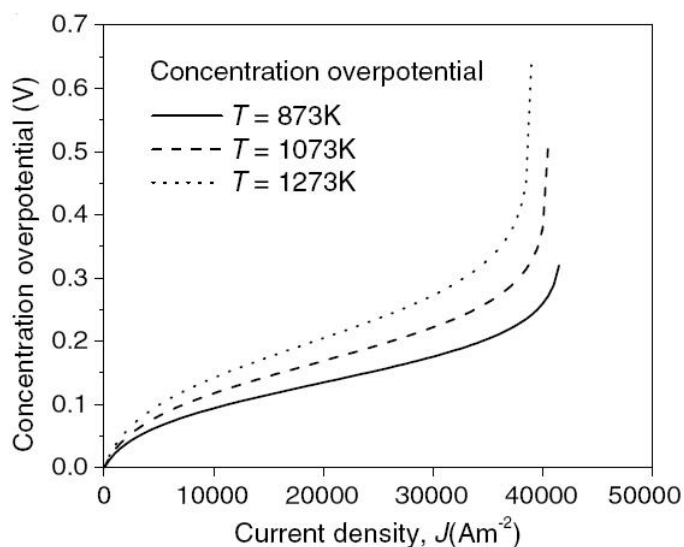
เพราะฉะนั้น อุณหภูมิขณะทำงานควรมาก

ตัวอย่างของผลกระทบท

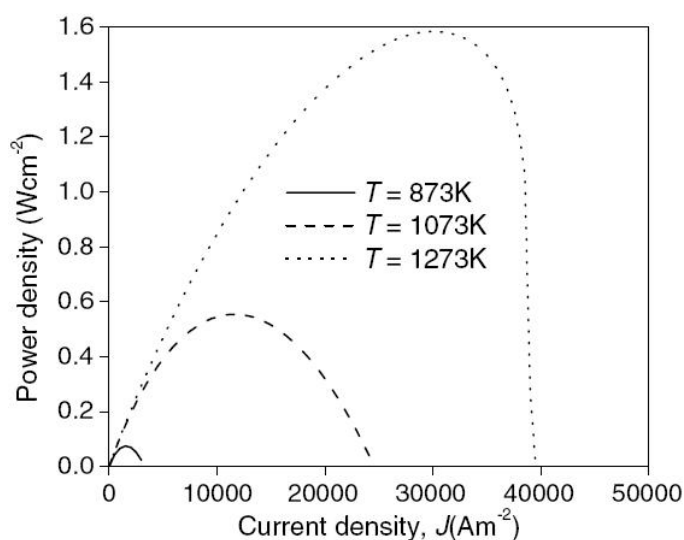


ก. อุณหภูมิขณะทำงาน ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาและการสูญเสียเนื่องจากการต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ

จากการศึกษาอุณหภูมิต่างกัน พบว่า การสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาและการสูญเสียเนื่องจากการต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ มีขนาดใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิต่างกัน และที่อุณหภูมิต่างกันสูงการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาและการสูญเสียเนื่องจากการต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ มีขนาดเท่ากัน ส่วนการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง จะพบการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก ดังแสดงในรูปด้านล่างนี้



ข. อุณหภูมิต่างกัน ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส



รูปที่ 2.20 ค. ผลกระทบของอุณหภูมิต่างกันต่อสมรรถนะรวม

2.4.7 ผลกระทบของส่วนประกอบของแก๊ส

จากการศึกษาผลกระทบของส่วนประกอบของแก๊ส พบว่า เศษส่วนโมลของไฮโดรเจนที่ขอบเขต 3 สถานะ ของการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส เป็นตัวแปรควบคุมสมรรถนะรวมของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งในหัวนี้จะแตกต่างจากหัวข้อที่ผ่าน เพราะ พิจารณาส่วนประกอบของเชื้อเพลิง ที่เป็นปัจจัยส่งผลกระทบต่อสมรรถนะ ซึ่งในกรณีทั่วไป เศษส่วนโมลของไฮโดรเจนที่ขอบเขต 3 สถานะต่ำ จะไม่ส่งผลมากนักต่อสมรรถนะรวมของเซลล์เชื้อเพลิง หากเทียบกับการสูญเสียที่เหลือ แต่อย่างไรก็ตาม เศษส่วนโมลของไฮโดรเจน มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาและการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส และนอกจากนี้ จำนวนโมลของไฮโดรเจนแปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลให้เศษส่วนโมลของไฮโดรเจนเป็นตัวแปรควบคุมความหนาแน่นไฟฟ้ากำลัง ดังจะแสดงความสัมพันธ์ ตามลำดับด้านล่างนี้

สำหรับไอออน

เศษส่วนโมลของไฮโดรเจน ที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ได้แก่

จากความสัมพันธ์ของ $y_i = P_i/P_0$ เมื่อ y_i คือ เศษส่วนโมลของแก๊ส

$$J_{0,a} = k_a \underbrace{\frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s)N_p] V_p}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})} \left(\frac{P_{H_2}}{P_{ref}} \right) \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{ref}} \right) \exp\left(-\frac{E_{act,a}}{RT}\right)}_{\substack{\text{small-term} \\ \text{arg e-effect}}} \text{ ดังนั้น } J_{0,a} \propto y_{H_2}^I$$

ดังนั้น เศษส่วนโมลของไฮโดรเจน ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา จะได้

$$\eta_{act,i} = \frac{RT}{F} \underbrace{\sinh^{-1}\left(\frac{J}{2J_{0,i}}\right)}_{\substack{\text{small-term} \\ \text{small-term}}} \text{ ดังนั้น } \eta_{act} \propto y_{H_2}^I$$

เศษส่วนโมลของไฮโดรเจน ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส

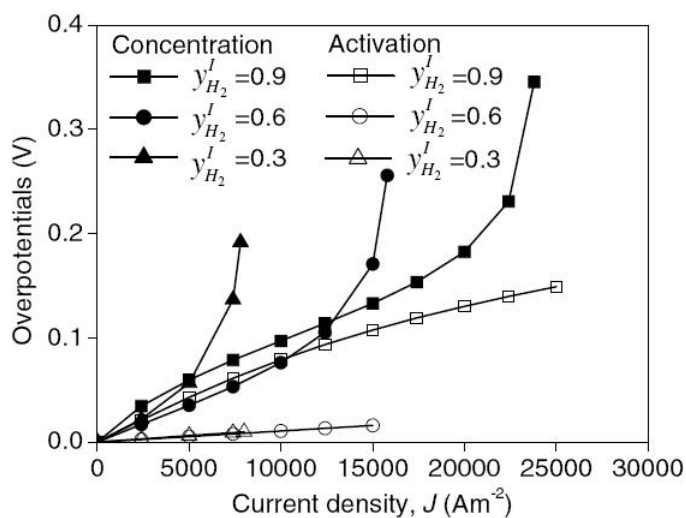
$$\eta_{cont,a} = \frac{RT}{2F} \ln \left[\underbrace{\left(\frac{P_{H_2}^I}{P_{H_2}^0} \right) \left(\frac{P_{H_2O}^0}{P_{H_2O}^I} \right)}_{\substack{\text{small-term} \\ \text{arg e-effect}}} \right] \text{ ดังนั้น } \eta_{cont,a} \propto y_{H_2}^I$$

ดังนั้น ความหนาแน่นไฟฟ้ากำลัง จะได้

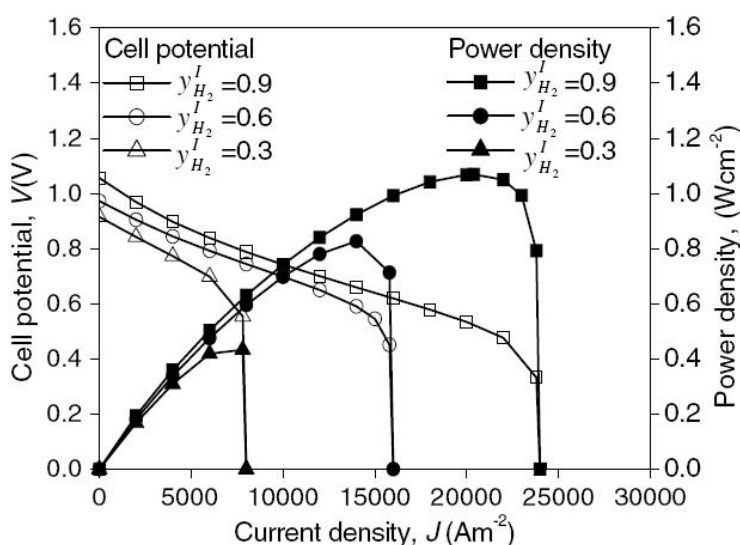
$$P = EI \text{ เมื่อ } I = n_{H_2} 2F \text{ และ } y_i = \frac{n_i}{\sum_i n_i} \text{ ดังนั้น } P \propto y_i$$

เพราะฉะนั้น เศษส่วนโมลของไฮโดรเจนควรสูง

ตัวอย่างของผลกระทบ



ก. เศษส่วนโมลของไฮโดรเจนที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาและการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส



รูปที่ 2.21 ข. ผลกระทบของเศษส่วนโมลของไฮโดรเจนต่อสมรรถนะรวม

2.4.8 ผลกระทบของความดันอ้างอิง

จากการศึกษาผลของความดันอ้างอิง พบว่า ความดันอ้างอิงมีผลต่อการสูญเสียทั้งการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาและการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส โดยความดันอ้างอิงยังส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ทั้ง 2 ด้าน ดังนั้น การสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส จึงเป็นตัวแปรควบคุมสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ดังจะแสดงความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้สำหรับไอออน

ความดันอ้างอิง ที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ได้แก่

$$J_{0,a} = k_a \underbrace{\frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s)V_p] V_p}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})} \left(\frac{P_{H_2}}{P_{ref}} \right) \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{ref}} \right) \exp\left(-\frac{E_{act,a}}{RT}\right)}_{small-term} \text{ ดังนั้น } J_{0,a} \propto P_{ref}$$

เนื่องจาก

$$P = EI \quad \text{เมื่อ} \quad I = n_{H_2} 2F \quad \text{และ} \quad n_i = \frac{P_{ref} V}{RT} \quad \text{ดังนั้น} \quad P \propto P_{ref}$$

ดังนั้น ความดันอ้างอิง ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา จะได้

$$\eta_{act,i} = \frac{RT}{F} \underbrace{\sinh^{-1}\left(\frac{J}{2J_{0,i}}\right)}_{small-term} \text{ ดังนั้น } \eta_{act} \propto \frac{1}{P_{ref}}$$

ความดันอ้างอิง ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส ได้แก่

$$\text{จาก} \quad D_{A-B}^{eff} = 1.86e-3 \underbrace{\frac{T^{\frac{3}{2}}}{P \sigma_{A-B}^2 \Omega_{D_{A-B}^{eff}}} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{0.5}}_{small-term} \text{ ดังนั้น } D_{A-B}^{eff} \propto \frac{1}{P_{ref}}$$

และ

จาก $D_{A,k}^{eff} = \frac{d_p}{3} T^{\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{8R}{\pi M_A}}$ ดังนั้น $D_{A,k}^{eff}$ ไม่ขึ้นกับ P

และ $\frac{1}{D_a^{eff}} = \frac{\zeta}{n} \left[\underbrace{\frac{1}{D_{H_2-H_2O}^{eff}}}_{\text{large-term}} + \frac{1}{D_{H_2,k}^{eff}} \right]$ ดังนั้น $D_a^{eff} \propto \frac{1}{P_{ref}}$ แต่มีผลน้อย

ดังนั้น

$$\eta_{cont,a} = \frac{RT}{\underbrace{2F}_{\text{small-effect}}} \ln \left[\underbrace{\left(1 + \frac{RTd_a J}{2FD_a^{eff} P_{H_2O}^0} \right)}_{\text{small-term}} / \underbrace{\left(1 - \frac{RTd_a J}{2FD_a^{eff} P_{H_2}^0} \right)}_{\text{small-term}} \right] \quad \text{ดังนั้น } \eta_{cont,a} \propto \frac{1}{P_{H_2}^0}$$

สำหรับด้านคาโทด

ความดันอ้างอิง ที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ได้แก่

$$J_{0,c} = k_c \underbrace{\frac{72\alpha [D_p - (D_p + D_s) V_p] V_p}{D_s^2 D_p^2 (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})} \left(\frac{P_{O_2}}{P_{ref}} \right)^{0.25} \exp\left(-\frac{E_{act,c}}{RT}\right)}_{\text{large-term}} \quad \text{ดังนั้น } J_{0,c} \propto P_{ref}$$

ดังนั้น ความดันอ้างอิง ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา จะได้

$$\eta_{act,i} = \frac{RT}{F} \underbrace{\sinh^{-1}\left(\frac{J}{2J_{0,i}}\right)}_{\text{small-term}} \quad \text{ดังนั้น } \eta_{act} \propto \frac{1}{P_{ref}}$$

ความดันอ้างอิง ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส ได้แก่

จาก
$$D_{A-B}^{eff} = 1.86e-3 \underbrace{\frac{T^{\frac{3}{2}}}{P\sigma_{A-B}^2 \Omega_{D_{A-B}^{eff}}}}_{small-term} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{0.5} \text{ ดังนั้น } D_{A-B}^{eff} \propto \frac{1}{P_{ref}}$$

และ

จาก
$$D_{A,k}^{eff} = \frac{d_p}{3} T^{\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{8R}{\pi M_A}} \text{ ดังนั้น } D_{A,k}^{eff} \text{ ไม่ขึ้นกับ } P$$

และ

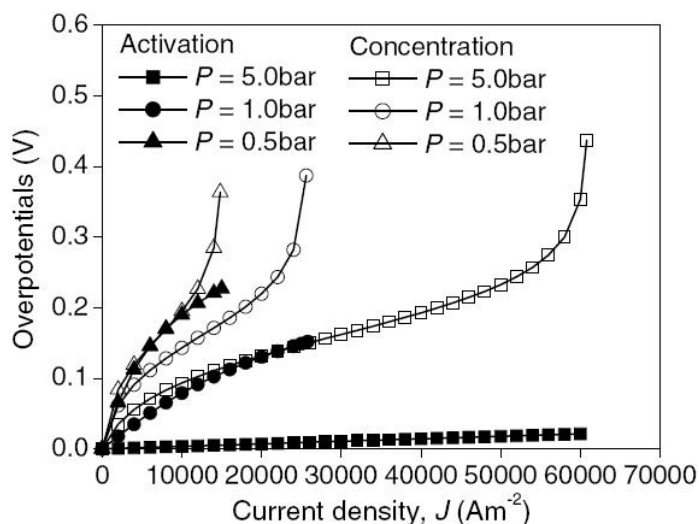
$$\frac{1}{D_c^{eff}} = \frac{\xi}{n} \underbrace{\left(\frac{1}{D_{O_2-N_2}^{eff}} + \frac{1}{D_{O_2,k}^{eff}} \right)}_{large-term} \text{ ดังนั้น } D_c^{eff} \propto \frac{1}{P_{ref}} \text{ แต่มีผลน้อย}$$

ดังนั้น

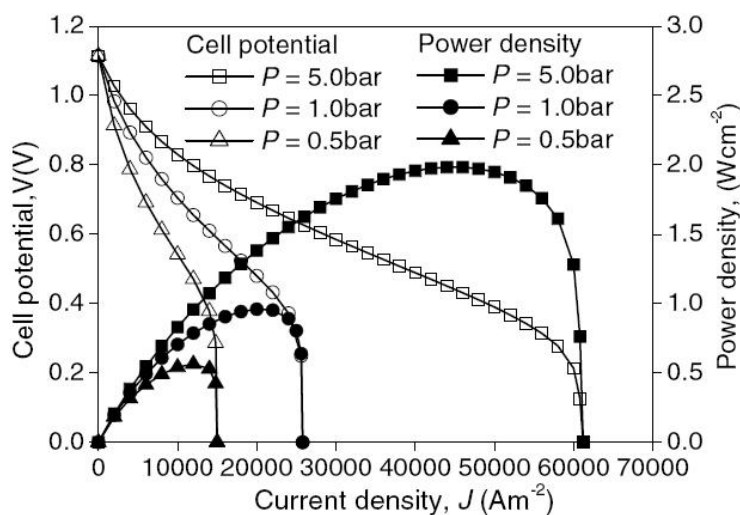
$$\eta_{cont,c} = \underbrace{\frac{RT}{4F}}_{small-effect} \ln \left[\underbrace{\frac{P_{O_2}^0}{\delta_{O_2}}}_{large-term} \underbrace{\left(\frac{P_c}{\delta_{O_2}} - \frac{P_{O_2}^0}{\delta_{O_2}} \right)}_{small-term} \underbrace{\exp\left(\frac{RTd_c J \delta_{O_2}}{4FD_c^{eff} P_c} \right)}_{small-term} \right], \eta_{cont,c} \propto \frac{1}{P_{O_2}^0}$$

เพราะฉะนั้น ความดันอ้างอิง ควรสูง

ตัวอย่างของผลกระทบ



ก. ความดันอ้างอิง ที่มีผลต่อการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาและการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของแก๊ส

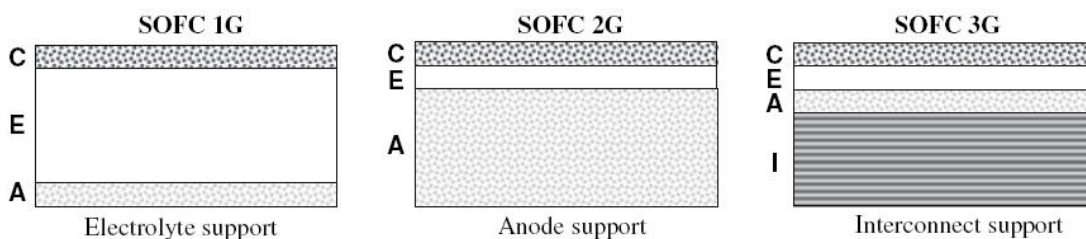


รูปที่ 2.22 ข. ผลกระทบความดันอ้างอิงต่อสมรรถนะรวม

2.5 เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งแบบโลหะรองรับ

ในช่วงระยะเวลา 50 ปีที่ผ่านมา ของการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง ได้เน้นการลดต้นทุนการผลิตของสแตค เนื่องจาก สแตค คือ ชิ้นส่วนที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ อิเล็กโทรไลต์, อานอด, คาโทด และอินเตอร์คอนเนคเตอร์ ซึ่งประกอบกันเป็นชุดผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้น เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งแบบโลหะรองรับ จึงเป็นทางเลือกหนึ่ง ที่จะตอบสนองความต้องการการลดต้นทุนการผลิตมากกว่าแบบเดิมที่ผ่านมา เนื่องจาก การผลิตอินเตอร์คอนเนคเตอร์จากโลหะ

ซึ่งมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าแบบเซรามิกผสม ดังแสดงในรูปของวิวัฒนาการของการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิง ได้ตามรูปด้านล่างนี้



รูปที่ 2.23 วิวัฒนาการของเซลล์เชื้อเพลิง

และปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งของต้นทุนการผลิตเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ วัสดุที่นำมาผลิตเป็นส่วนประกอบของเซลล์ ซึ่งต้นทุนขึ้นอยู่กับความหนาของส่วนประกอบและเทคนิคการผลิตนั้นๆ ดังจะแสดงราคาต้นทุนการผลิตเปรียบเทียบตามวิวัฒนาการของการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิง

สำหรับอิเล็กทรอนิกส์รองรับ อุณหภูมิการทำงานประมาณ 1000 °C ต้นทุนการผลิตสูง ที่ขึ้นส่วนอินเตอร์คอนเนคเตอร์ เนื่องจากมีความหนามากจึงใช้วัสดุปริมาณจำนวนมากในผลิตขึ้นรูป


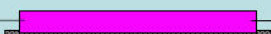



ส่วนประกอบ	อิเล็กทรอนิกส์รองรับ	ราคาวัสดุ	เทคนิคการผลิต
2 mm LaCrO ₃		\$40/kW	<i>Prohibitive</i> \$\$\$
50 μm LSM/YSZ		\$6/kW	Screen-printing
200 μm YSZ		\$24/kW	Tape-casting
50 μm Ni/YSZ		\$6/kW	Screen-printing
		\$76/kW	

รูปที่ 2.24 เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบอิเล็กทรอนิกส์รองรับ

ส่วนประกอบ	อาโนดรองรับ	ราคาวัสดุ	เทคนิคการผลิต
0.25 mm Stainless		\$3/kW	Sheet metal
50 μm LSM/YSZ		\$6/kW	Screen-printing
10 μm YSZ		\$1/kW	Screen-printing
2 mm Ni/YSZ		\$150/kW	Tape-casting
		\$160/kW	

รูปที่ 2.25 เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบอาโนดรองรับ

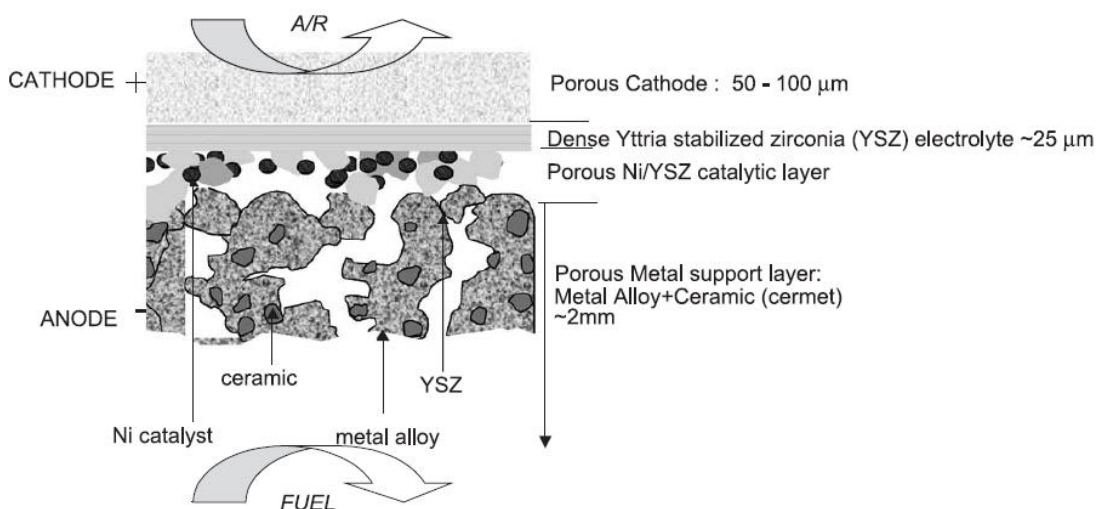
ในทำนองเดียวกัน สำหรับไอโครองรับ อุณหภูมิขณะทำงานประมาณ 800 °C ต้นทุนการผลิตสูงมาก ที่ขึ้นส่วนของไอโค แต่เนื่องด้วยอุณหภูมิขณะทำงานต่ำ อินเตอร์คอนเนคเตอร์ จึงสามารถใช้โลหะแทนเซรามิกได้ ตามรูปที่ 2.25 และสำหรับโลหะรองรับ อุณหภูมิขณะทำงานประมาณ 800 °C ต้นทุนการผลิตต่ำ เนื่องจากใช้ปริมาณวัสดุน้อยสำหรับผลิตเมมเบรนและราคาต่ำสำหรับการผลิตอินเตอร์คอนเนคเตอร์และโลหะรองรับ ดังแสดงในรูปด้านล่าง

ส่วนประกอบ	โลหะรองรับ	ราคาวัสดุ	เทคนิคการผลิต
0.25 mm Stainless		\$3/kW	Sheet metal
50 μm LSM/YSZ		\$6/kW	Screen-printing
10 μm YSZ		\$1/kW	Screen-printing
10 μm Ni/YSZ		\$1/kW	Screen-printing
2 mm Stainless		\$26/kW	Tape-casting
		\$37/kW	

รูปที่ 2.26 เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบโลหะรองรับ

ดังนั้น เปรียบเทียบต้นทุน จะได้ว่า โลหะรองรับน้อยกว่าอิเล็กโทรไลต์รองรับ 51% และน้อยกว่าไอโครองรับ 77% นอกจากต้นทุนของการผลิตซึ่งเป็นแรงผลักดันของการพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งแบบโลหะรองรับ ที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีประเด็นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังกล่าวจะนำเสนอตามลำดับดังนี้

2.5.1 ความหนาของโลหะรองรับ

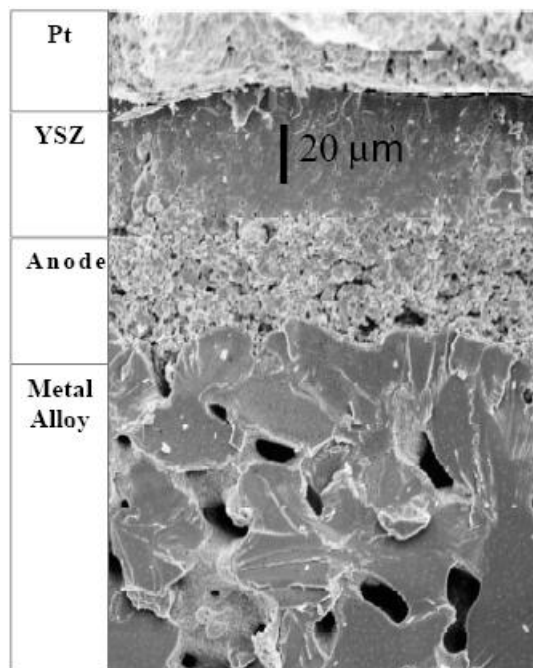


รูปที่ 2.27 ความหนาของโลหะรองรับด้านไอโค

จากการศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปรจากทฤษฎีในหัวข้อ 2.4 ที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียรวมทั้ง 3 รูปแบบทำให้เราตัดสินใจเลือกการเพิ่มโลหะรองรับด้านแอโนด เนื่องจาก เราทราบจากทฤษฎีมาแล้วว่า ความเข้มข้นของเชื้อเพลิงด้านแอโนด มีผลน้อยกว่าด้านคาโทด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาผลงานวิจัยและนำเอาความหนาของโลหะรองรับจากงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 2.27 ประมาณ 2 mm. ด้านแอโนด แต่อย่างไรก็ตามความหนาของโลหะรองรับมีผลต่อการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของความเข้มข้นของเชื้อเพลิงด้านแอโนด ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาผลกระทบเนื่องจากความหนาของโลหะรองรับ

2.5.2 ความพรุนของโลหะรองรับ

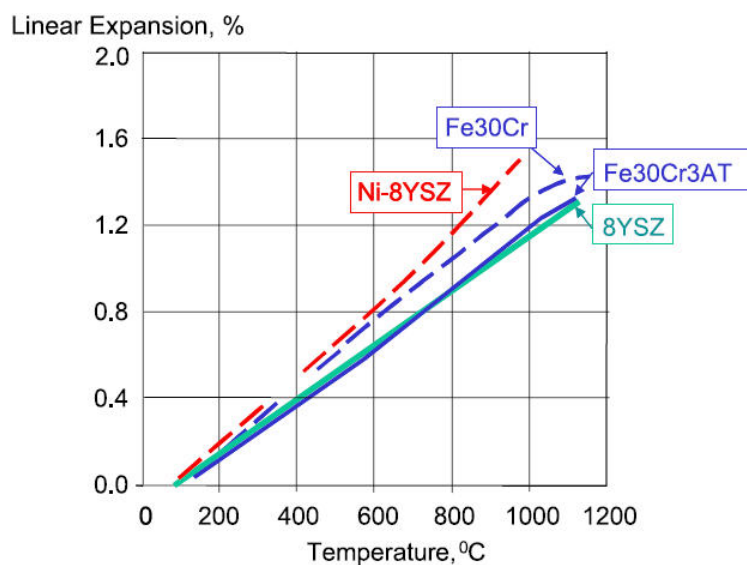
ความพรุนของโลหะรองรับ ได้จากหลักคิดเดียวกันกับความหนาของโลหะรองรับ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ความพรุนขนาด 15 μm . ส่งผลต่อการสูญเสียเนื่องจากการโอนมวลของแก๊สน้อยมาก และเนื่องด้วยโลหะรองรับไม่ได้ทำปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ดังนั้น การเสียดูเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา จึงไม่นำมาพิจารณา และจากการศึกษาผลงานวิจัย พบว่า ขนาดความพรุนของโลหะรองรับ ประมาณ 20 μm . ดังแสดงในรูปด้านล่าง



รูปที่ 2.28 ความพรุนของโลหะรองรับด้านแอโนด

2.5.3 การขยายตัวแบบเชิงเส้นเนื่องจากอุณหภูมิ

จากการศึกษาการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ พบว่า การขยายตัวของอิเล็กโทรไลต์น้อยกว่า อาโนด เนื่องจาก อาโนดมีโลหะเป็นส่วนผสมและมีช่องว่างซึ่งอาจจะสามารถให้โลหะขยายตัวได้มากกว่าอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่มีโลหะผสมและช่องว่าง และอาจด้วยสาเหตุนี้ ที่ทำให้เกิดการแตกหักเสียหายเนื่องจากการขยายตัวที่ไม่เท่ากัน ดังนั้น โลหะรองรับด้านอาโนดควรขยายตัวเท่ากับกับอาโนด และจากการศึกษาผลงานวิจัย พบว่า โลหะรองรับขยายตัวใกล้เคียงกันกับอาโนด ดังแสดงตามรูปด้านล่าง



รูปที่ 2.29 การขยายตัวแบบเชิงเส้นเนื่องจากอุณหภูมิ

บทที่ 3

การจำลองและวิเคราะห์ผลเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง

จากการศึกษาและการจำลองเปรียบเทียบแบบจำลองของ Hwang และคณะ จากปี 2005 [6] และแบบจำลองของ Ramakrishna และคณะ จากปี 2006 [5] ผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ จากนั้นเราศึกษาแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบโลหะรองรับ ด้วยการเพิ่มแบบจำลองวัสดุพอร์เข้าไปในแบบจำลองของ Ramakrishna หน้า 2 mm. ทำด้วยผงผสม STS430 โดยให้อยู่ด้านอานอด [2,7] โดยสมมุติให้คุณสมบัติวัสดุพอร์ของโลหะรองรับ เป็นไปตามสมการ ด้านล่าง

$$\kappa = \frac{d_p^2}{36k_0\tau} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}$$

โดยอาศัยความสัมพันธ์ของ Kozeny-Carman [8] เมื่อ d_p เป็น average particle diameter , k_0 เป็น shape factor ซึ่ง Wyllie และคณะ พบว่า k_0 มีค่าระหว่าง 2.0-3.0 อย่างไรก็ตาม Carman รายงานว่าค่าของ $k_0\tau$ ที่สอดคล้อง (fit) กับผลการทดลอง จะมีค่าเท่ากับ 5 หรือเรียกว่า Kozeny constant

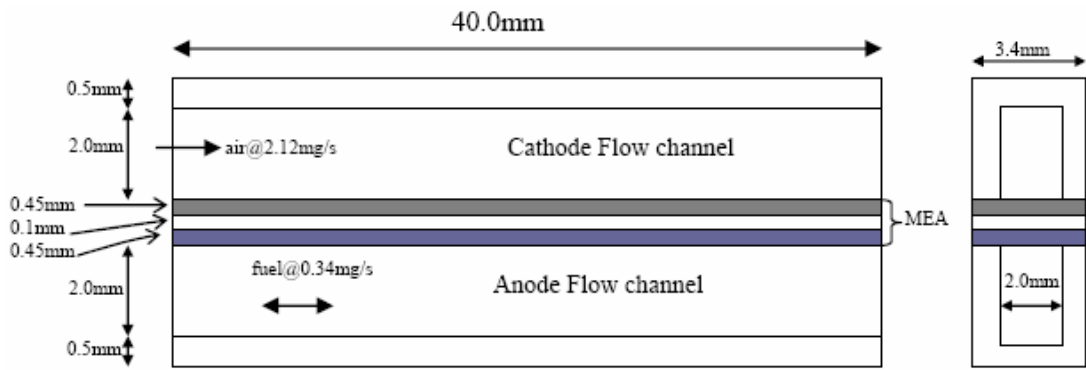
สำหรับค่า permeability κ ของโลหะรองรับ ทางคณะผู้วิจัยทำการศึกษาเปรียบเทียบโดยการเปลี่ยนค่า d_p จาก 20 μm ถึง 200 μm จะได้ค่า κ อยู่ระหว่าง $1\text{e-}12 \text{ m}^2$ ถึง $1\text{e-}10 \text{ m}^2$ และจากผลการจำลองพบว่า permeability แปรผกผันกับ current density และได้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจาก โลหะรองรับที่มีขนาดความพอร์ที่ใหญ่ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ เพราะ พื้นที่ตัวนำไฟฟ้าลดลงตามขนาดความพอร์

3.1 การจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง

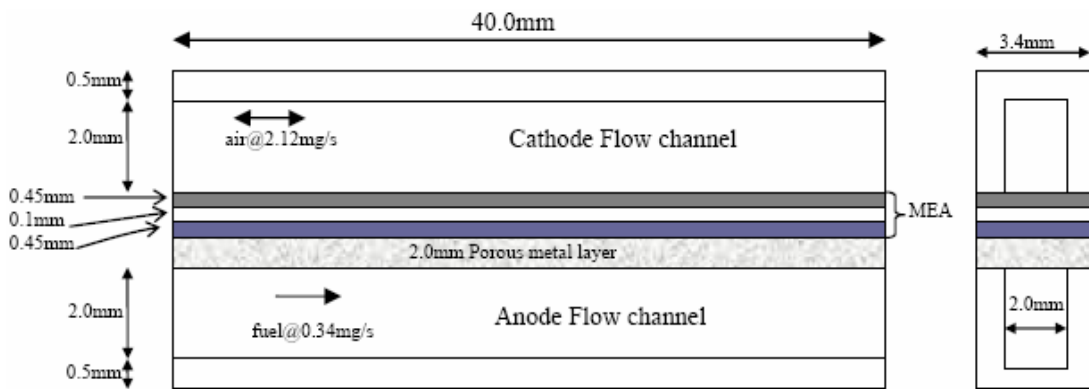
รูปแบบการจำลองและลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งในงานวิจัยนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1.1 รูปร่างของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง

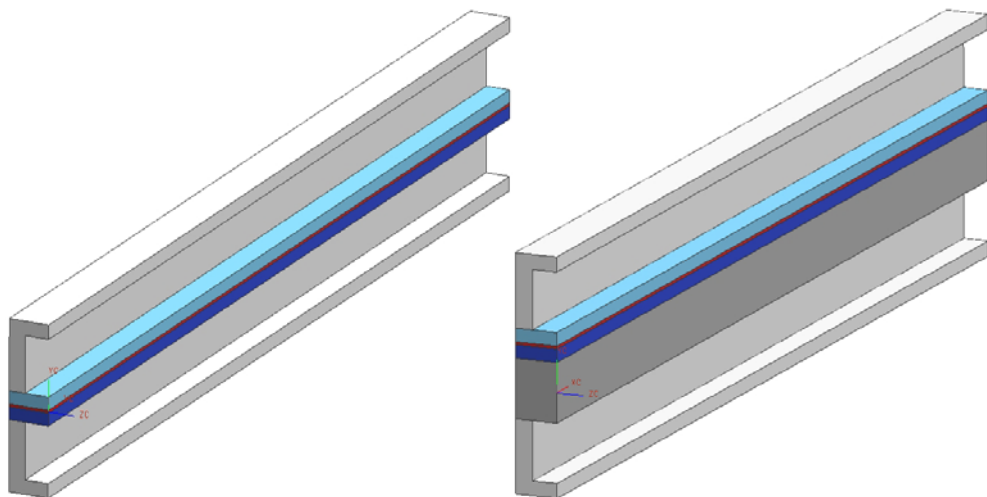
แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบ ก.) และแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบโลหะรองรับ ข.) เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาและพัฒนาอินเตอร์คอนเนคเตอร์ โดยคณะผู้วิจัยเพิ่มโลหะรองรับ ซึ่งเป็นวัสดุพอร์ที่ด้านอานอด หน้า 2 mm. ทำด้วยผงผสม STS430 ดังในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.1 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบ



รูปที่ 3.2 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งชนิดราบแบบโลหะรองรับ



ก.) แบบจำลอง 3 มิติ ชนิดราบ

ข.) แบบจำลอง 3 มิติ แบบโลหะรองรับ

รูปที่ 3.3 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติวัสดุพอร์นและโลหะ [5]

Volume name	ε	κ	k	RXN	S/V	Pore	Diffusivity	σ_M
Anode	0.4	1e-12	6.23	Eq. 8	1e2	1e-6	Bruggman(2)	1e5
Cathode	0.5	1e-12	9.6	Eq. 9	1e2	1e-6	Bruggman(2)	7.7e3
Electrolyte	0.01	1e-18	2.7	-	-	1e-6	Bruggman(2)	1e-20
Metal-supported	0.5	1e-10	27	-	-	20e-6	Bruggman(2)	85e4
	[9]	[8]	[10]			[11]	[5]	[10]
Anode contact	-	-	27	-	-	-	-	85e4
			[10]					[10]
Cathode contact	-	-	27	-	-	-	-	85e4
			[10]					[10]

ε : porosity (fluid volume/total volume); κ : permeability (m^2) (total volume/surface area)²; k: thermal conductivity (W/mK); S/V: surface to volume ratio (1/m) and σ_M : electrical conductivity ($1/\Omega m$)

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติการถ่ายโอนของวัสดุพอร์น [5]

Volume name	ρ	μ	σ_s	C_p	k	Γ
Anode	IGL	MixKin	10	JANNAF	MixKin	SCH(0.7)
Cathode	IGL	MixKin	10	JANNAF	MixKin	SCH(0.7)
Electrolyte	IGL	MixKin	10	JANNAF	MixKin	SCH(0.7)
Metal-supported	IGL [5]	MixKin	1e-20	JANNAF	MixKin	SCH(0.7)
		[5]	[5]	[5]	[5]	[5]
Anode channel	IGL	MixKin	1e-20	JANNAF	MixKin	SCH(0.7)
Cathode channel	IGL	MixKin	1e-20	JANNAF	MixKin	SCH(0.7)
Anode contact	7.7e3 [13]	-	-	0.8 [13]	-	-
Cathode contact	7.7e3 [13]	-	-	0.8 [13]	-	-

ρ : density (kg/m^3); IGL: ideal gas law; μ : viscosity (kg/ms); MixKin: kinetic theory; σ_s : electrical conductivity ($1/\Omega m$); C_p : specific heat (J/kgK) by JANNAF curve fit; k: thermal conductivity (W/mK) and Γ : mass diffusivity (kg/ms) by Schmidt number
yttrium stabilized ZrO_2 (8 mol% Y_2O_3)

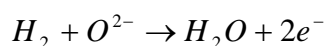
3.1.2 วัสดุและคุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิง

เอาโนดทำจากวัสดุ nickel และ yttrium stabilized zirconia cermet (Ni/YSZ) คาโทดทำจากวัสดุ lanthanum manganite ($\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_{3-\delta}$ doped YSZ) และอิเล็กโทรไลต์ทำจากวัสดุซึ่งทั้งหมดนี้เป็นวัสดุพูนส่วนอินเตอร์คอนเนคเตอร์ทำจากโลหะสแตนเลสสตีล คุณสมบัติของวัสดุ ดังในตารางที่ 3.1 และ 3.2

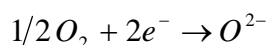
3.1.3 ปฏิริยาเคมีไฟฟ้า

พิจารณาการเกิดปฏิริยาเคมีไฟฟ้าที่ขอบเขต 3 สถานะของวัสดุพูนส่วนเอาโนด, คาโทดตามสมการด้านล่างและปริมาณส่วนผสมโดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงและอากาศ ดังนี้

ปฏิริยาเคมีไฟฟ้าด้านเอาโนด



ปฏิริยาเคมีไฟฟ้าด้านคาโทด



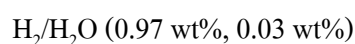
กระแสไฟฟ้าอ้างอิง (j_0) และค่าคงที่ Tafel สำหรับด้านเอาโนด

$$j_{a0} = 1e+14, \alpha_a = 0.7, \alpha_c = 0.7$$

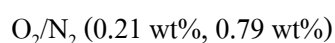
กระแสไฟฟ้าอ้างอิง (j_0) และค่าคงที่ Tafel สำหรับด้านคาโทด

$$j_{c0} = 1e+10, \alpha_a = 0.7, \alpha_c = 0.7$$

ปริมาณส่วนผสมโดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงด้านเอาโนด



ปริมาณส่วนผสมโดยน้ำหนักของอากาศด้านคาโทด



3.1.4 เงื่อนไขขอบเขต

กำหนดอัตราส่วนโดยมวลของอากาศทางเข้าด้านคาโรด $3.415e-6$ kg/s อัตราส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิงทางเข้าด้านไอโนด $2.12e-5$ kg/s อุณหภูมิและความดันทางเข้าของทั้ง 2 ด้านเป็น 1,073 K และ 1 atm ตามลำดับ ส่วนเงื่อนไขการจำลองรูปแบบการไหลของการศึกษาในงานวิจัยนี้มีการไหลตามกันและการไหลสวนกัน

3.1.5 กริด (grid) และรูปแบบของกริด

จำนวนกริดที่ใช้ในการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง เป็นจำนวนกริดที่ไม่ส่งผลต่อคำตอบของปัญหา (grid-independent) ซึ่งได้ตามแกน (x,y,z) ดังนี้ (80,70,10) ตามลำดับ และรูปร่างของกริดเป็นกริดสี่เหลี่ยมหกด้านแบบสามมิติ (hexahedral mesh)

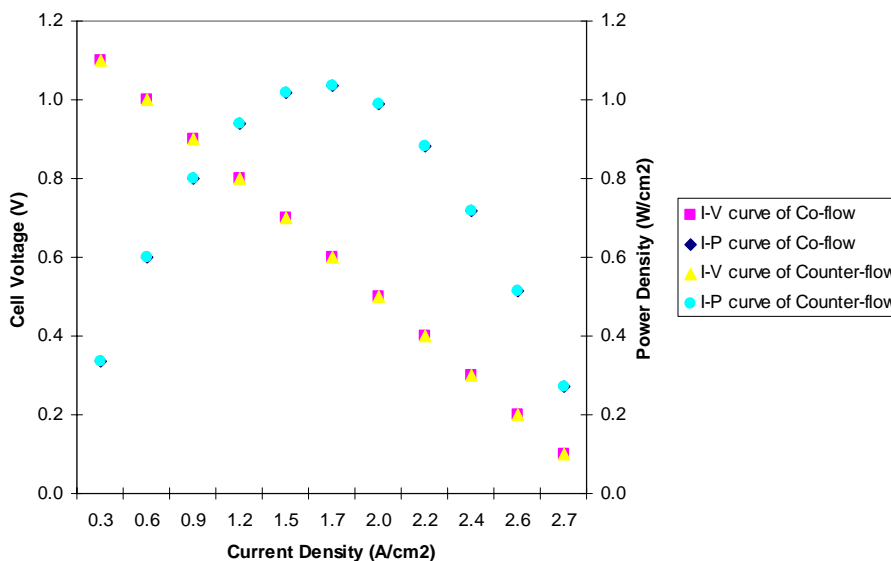
3.1.6 โปรแกรมสำเร็จรูปและเวลาที่ใช้ในการจำลอง

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม CFD-RC ถูกพัฒนาจากวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (finite volume method) ใช้ SIMPLEC algorithm ในการคำนวณค่าตัวแปรในโดเมนของการคำนวณ และใช้แบบจำลอง Darcy สำหรับวัสดุพอรุน โดยสมมติให้ความต้านทานเป็นเชิงเส้นแบบเท่ากันทุกทิศทาง (isotropic linear resistance model) สำหรับเวลาที่ใช้ในการคำนวณโดยเฉลี่ยของแต่ละแบบจำลองประมาณ 3 ชั่วโมง โดยกำหนดค่าเข้าสู่คำตอบ (convergence) $1e-4$ คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ IBM, ระบบประมวลผล (CPU) Intel PM 1.73 GHz และขนาดหน่วยความจำ (RAM) 2 GB

3.2 ผลการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง

ผลการจำลองนำเสนอในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ของเซลล์ และความหนาแน่นไฟฟ้ากำลัง (I-V-P curve) ซึ่งประกอบไปด้วย แบบจำลองของ Ramakrishna (ไอโนด-คาโรดรองรับ) และแบบโลหะรองรับ โดยพิจารณา รูปแบบการไหลเป็น การไหลตามกัน และสวนกัน ดังต่อไปนี้

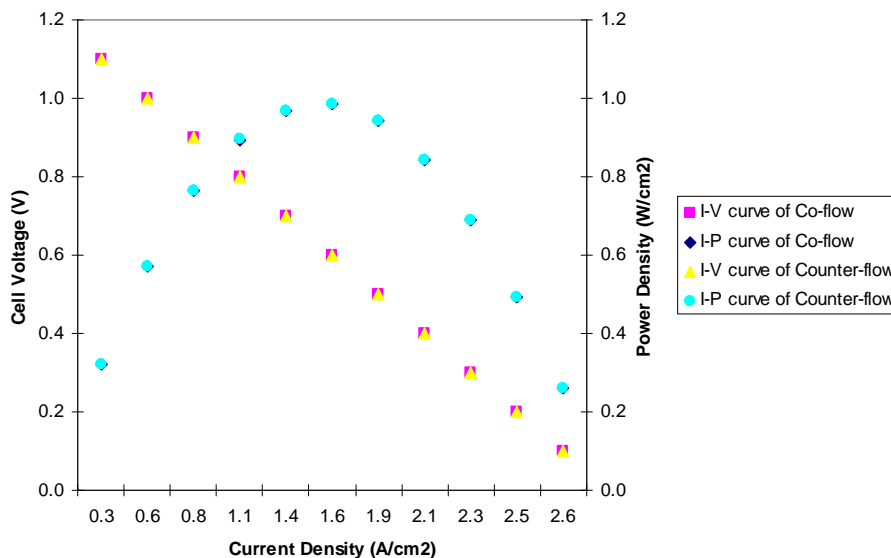
I-V-P Curve of Anode-Cathode supported (Co-flow vs. Counter-flow)



รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบ I-V-P curve ของแอโนด-คาโทดรองรับ สำหรับการไหลตามกันและสวนกัน

ค่าความหนาแน่นไฟฟ้ากำลังสูงสุดของการไหลตามกันและสวนกัน เท่ากับ 1.034 และ 1.035 W/cm^2 ตามลำดับ สำหรับแอโนด-คาโทดรองรับ ตามรูปที่ 3.4

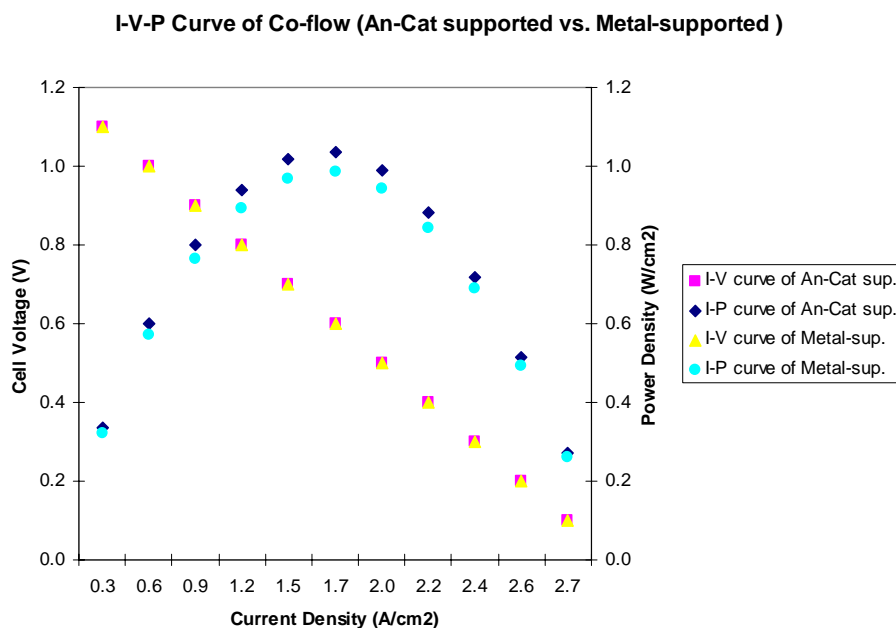
I-V-P Curve of Metal-supported (Co-flow vs. Counter-flow)



รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบ I-V-P curve ของโลหะรองรับ สำหรับการไหลตามกันและสวนกัน

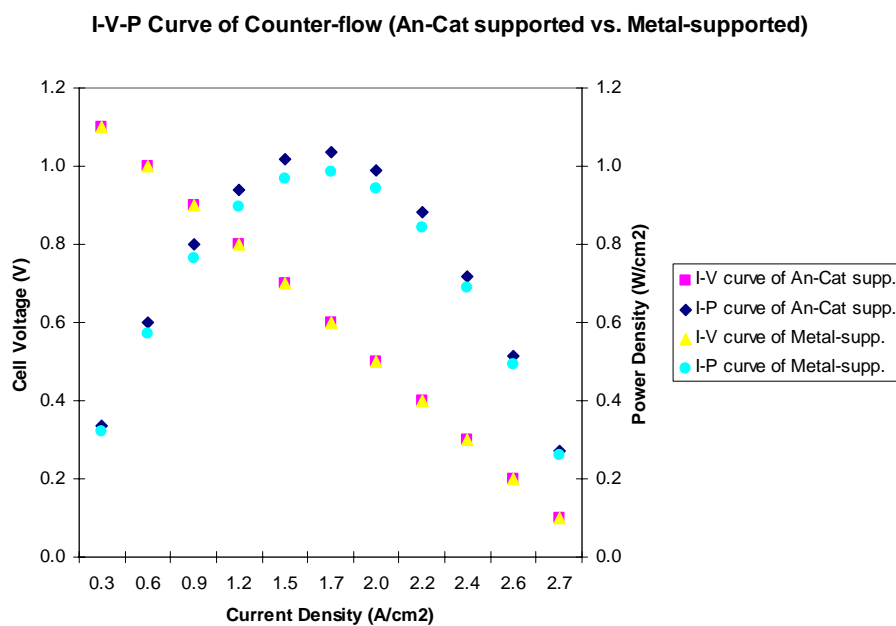
ค่าความหนาแน่นไฟฟ้ากำลังสูงสุดของการไหลตามกันและสวนกัน เท่ากับ 0.9844 W/cm^2

และ 0.9845 W/cm^2 ตามลำดับ สำหรับโลหะรองรับ ตามรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบ I-V-P curve ของการไหลตามกันของทั้ง 2 แบบจำลอง

ค่าความหนาแน่นไฟฟ้ากำลังสูงสุดของโลหะรองรับน้อยกว่าอินค-คาโรรรองรับ 4.8% สำหรับการไหลตามกัน ตามรูปที่ 3.6

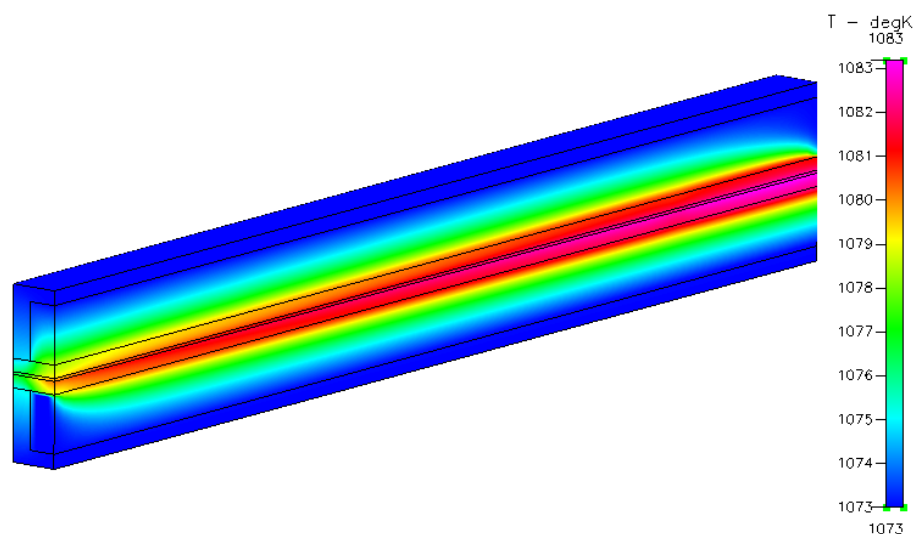


รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบ I-V-P curve ของการไหลสวนกันของทั้ง 2 แบบจำลอง

ค่าความหนาแน่นไฟฟ้ากำลังสูงสุดของโลหะรองรับน้อยกว่าอาโนด-คาโทดรองรับ 5 % สำหรับการไหลสวนกัน ตามรูปที่ 3.7

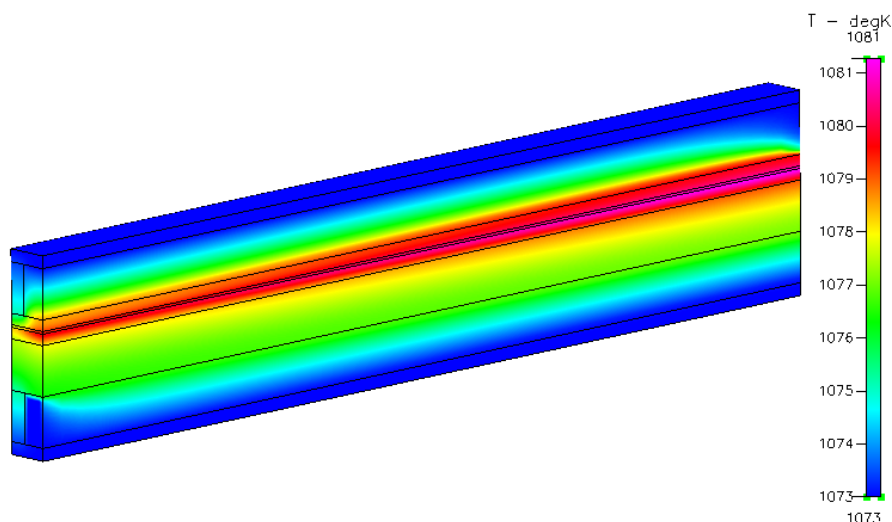
3.3 การวิเคราะห์ผลการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง

จากผลการจำลองในแบบของอาโนด-คาโทดรองรับ แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอากาศต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า เนื่องจากพบว่า เกิดอุณหภูมิสูงที่บริเวณทางเข้าของอากาศ แต่เกิดอุณหภูมิต่ำที่บริเวณใต้รับ ทั้งการไหลแบบตามกันและสวนกัน ดังในรูปที่ 3.8



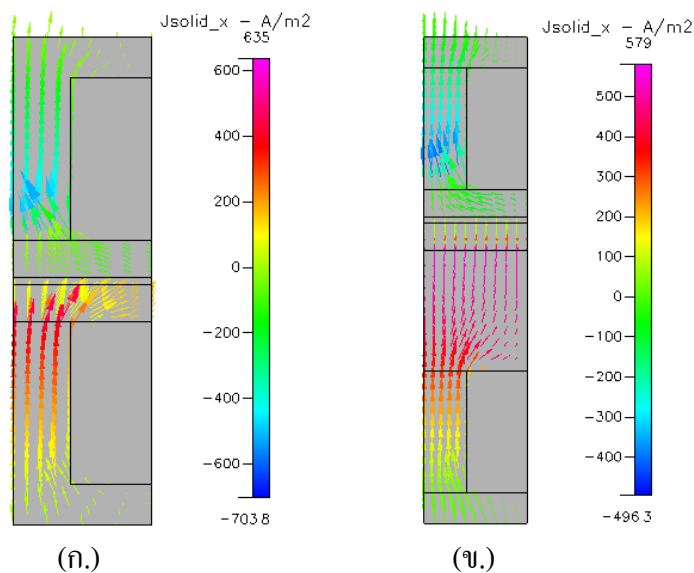
รูปที่ 3.8 การกระจายอุณหภูมิของอาโนด-คาโทดรองรับ สำหรับการไหลแบบสวนกัน

และ ผลการจำลองของแบบโลหะรองรับ แสดงให้เห็นถึงลักษณะของการกระจายอุณหภูมิต่างกันกับแบบ อาโนด-คาโทดรองรับ แต่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และมีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่ำกว่า ซึ่งจากการตรวจสอบค่าความเข้มข้นของเชื้อเพลิงในบริเวณของการเกิดปฏิกิริยา พบว่า ในแบบโลหะรองรับจะมีความเข้มข้นน้อยกว่า ดังนั้น ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า จึงถูกควบคุมโดย gas diffusion rate ด้านอาโนด นั่นคือ แบบจำลองโลหะรองรับ จะเกิด concentration loss จากโลหะรองรับมากกว่า และยังพบว่าโลหะรองรับช่วยระบายความร้อนให้แก่อาโนด เนื่องจากโลหะรองรับมีค่าการนำความร้อนสูงกว่า 4 เท่า จึงเป็นสาเหตุให้อาโนดอุณหภูมิต่ำลง ดูรูปที่ 3.7 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ



รูปที่ 3.9 การกระจายอุณหภูมิของโลหะรองรับ สำหรับการไหลแบบสวนกัน

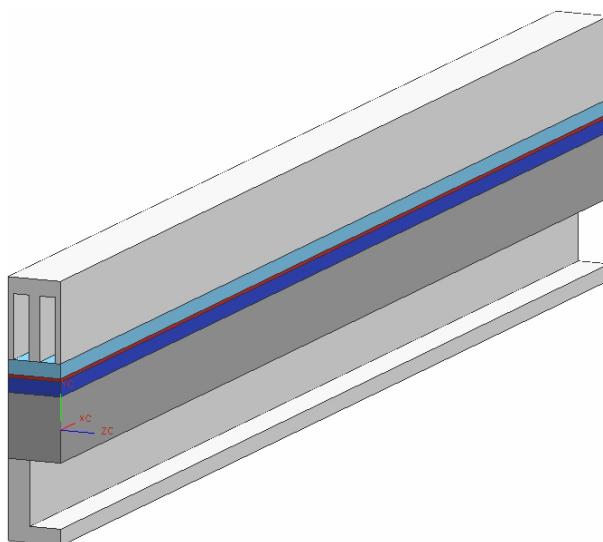
จากนั้นเราได้ปรับปรุงรูปแบบของอินเตอร์คอนเนคต์ด้านคาโธด เพื่อให้ concentration loss ลดน้อยลง และจากผลการจำลองทิศทางการไหลและการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า พบว่าจะมี ohmic loss ด้านคาโธดร่วมด้วย เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเดินทางผ่านคาโธดในทิศแนวอนออกจากอิเล็กโทรไลต์ ดังในรูปที่ 3.10 (ก.)



รูปที่ 3.10 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (ก.) อาโนด-คาโธดรองรับ (ข.) โลหะรองรับ สำหรับการไหลแบบสวนกัน ที่ $x = 20$ mm.

และจากการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลง ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในรูปที่ 3.10 (ข.) พบว่า ohmic loss ด้านอาโนดในแบบโลหะรองรับมีค่าน้อยกว่า ด้านคาโธด เนื่องจาก โลหะมีค่าการนำ

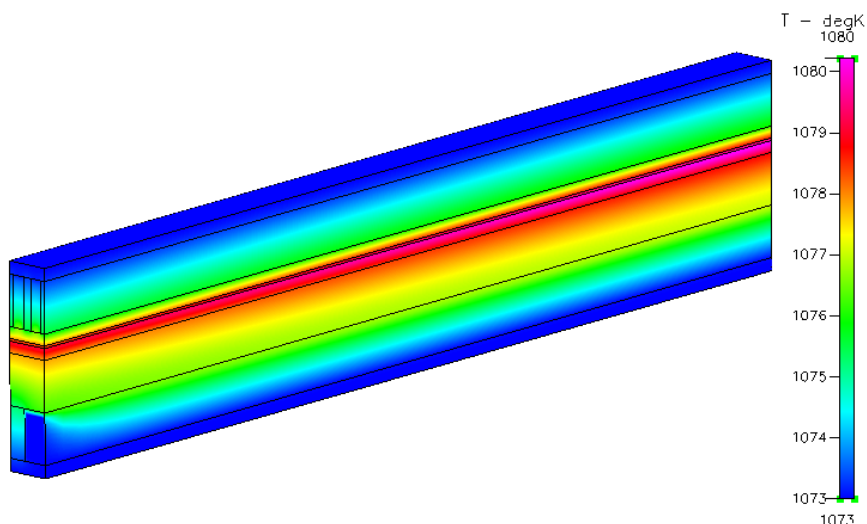
ไฟฟ้าใกล้เคียงกับอินเตอร์คอนเนค ซึ่งมากกว่าอาโนด 8.5 เท่า และมากกว่าคาโทด 110 เท่า ตามลำดับ ดังนั้น ถ้าเราปรับปรุงรูปแบบของริบด้านคาโทด ให้ออกซิเจนมีโอกาสแพร่เข้าสู่คาโทด ถึงอิเล็กโทรไลต์ในระยะทางที่สั้นที่สุด และกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งพื้นที่ผิวสัมผัสของ อิเล็กโทรไลต์ เราน่าจะได้รับความหนาแน่นไฟฟ้ากำลังสูงขึ้น เนื่องจาก เรากำล้างจะลด concentration loss และ ohmic loss ซึ่งเป็นข้อสันนิฐานของเรา



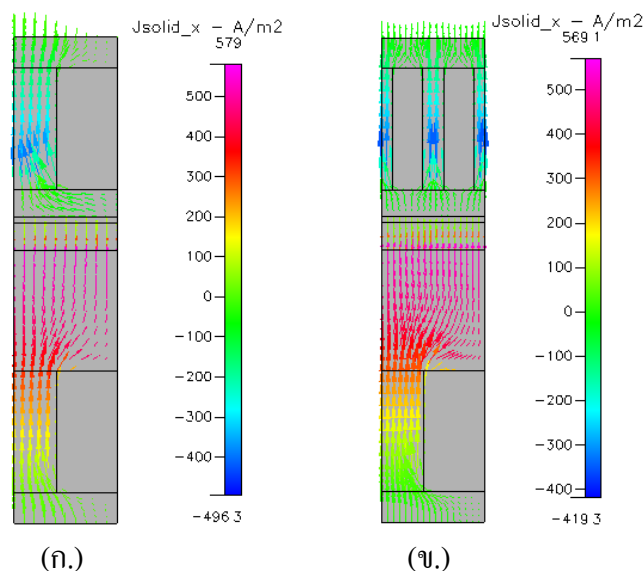
รูปที่ 3.11 เซลล์เชื้อเพลิงออกไซค์แข็งที่ปรับปรุงอินเตอร์คอนเนคเตอร์

การปรับปรุงรูปแบบของริบ พิจารณาให้อัตราส่วน พื้นที่ของริบต่อช่องการไหล เท่าเดิม โดยเปลี่ยนจาก 0.7:1 เป็น 0.35:0.5 ซึ่งยังสอดคล้องกับรายงานของ Khaleel และคณะ [12] ในปี 2003 ที่แนะนำให้ใช้อัตราส่วนระหว่าง 1:3 ถึง 2:3

จากผลการจำลองของโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว พบว่า ได้คุณสมบัติต่ำกว่าทั้งกรณีของการไหลแบบตามกันและแบบสวนทางกัน และได้ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงกว่าแบบโลหะรองรับ แต่อย่างน้อยกว่าแบบอาโนด-คาโทดรองรับอยู่เพียงเล็กน้อย (0.132 %) สำหรับการไหลแบบสวนกันและจากรูปที่ 3.12 ยังพบว่ามีกระจายอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัดของอาโนด เนื่องจากมีการกระจายของบริเวณที่เกิดปฏิกิริยามากขึ้นกว่าแบบแรก ระยะทางเดินของกระแสไฟฟ้าไปสู่ current collector ลดลง ในขณะที่ระยะทางที่ออกซิเจนเดินทางเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ทั่วถึงมากขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยามากขึ้น



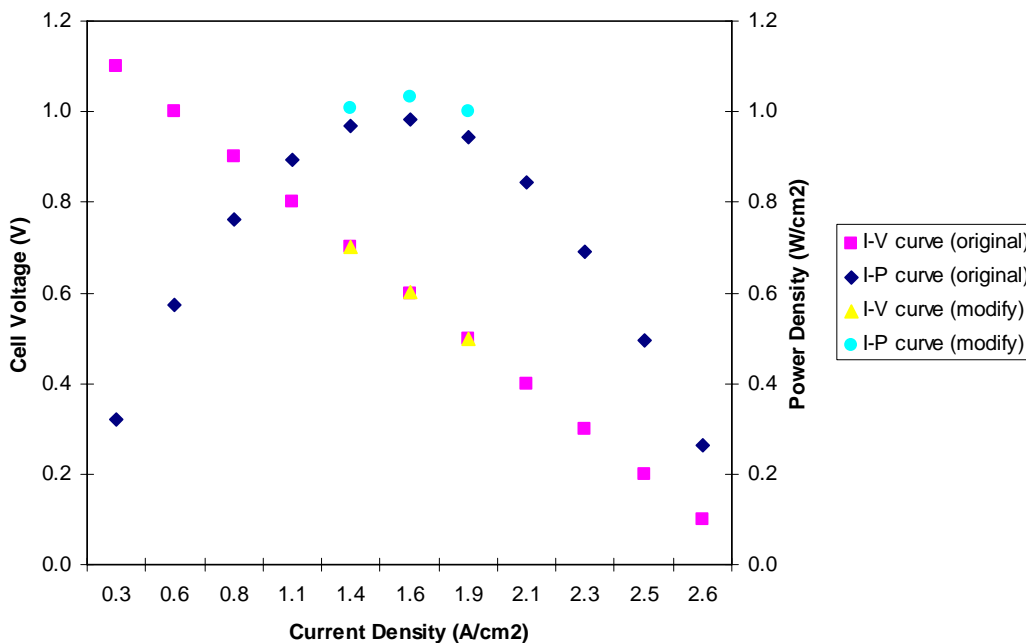
รูปที่ 3.12 การกระจายอุณหภูมิของโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว สำหรับการไหลแบบสวนกัน



รูปที่ 3.13 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (ก.) แบบโลหะรองรับ (ข.) แบบโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว สำหรับการไหลแบบสวนกัน ที่ $x = 20$ mm.

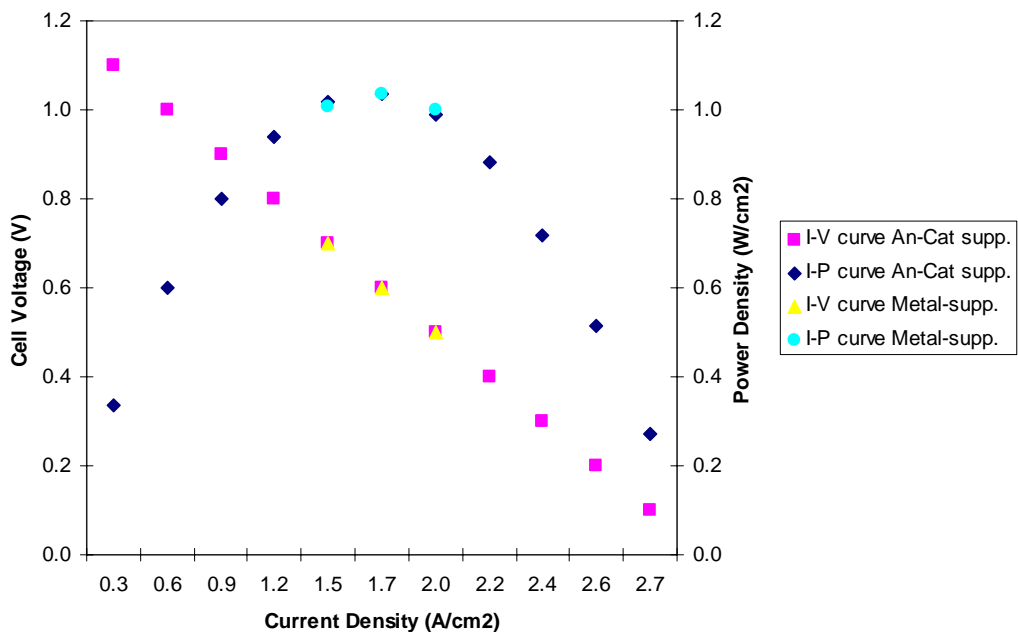
และผลจากการปรับปรุงรูป ในรูปที่ 3.13 (ข.) จะเห็นลักษณะการเดินทางของกระแสไฟฟ้าจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาไปสู่ current collector ที่สั้นลงนั่นคือ ohmic loss ในคาโรลดลดลงด้วย นอกจากนี้เราจะเห็นว่าระดับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นในบริเวณริบถึงแม้จะมีพื้นที่หน้าตัดรวมเท่าเดิม เนื่องจาก กระแสไฟฟ้าเดินทางได้สะดวกมากขึ้นนั่นเอง

I-V-P Curve of Metal-Supported (Counter-flow)



รูปที่ 3.14 เปรียบเทียบ I-V-P curve ของโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว สำหรับการไหลแบบสวนกัน

An-Cat supported vs. Metal-supported (modify) for Counter-flow



รูปที่ 3.15 เปรียบเทียบ I-V-P curve ระหว่างอาโนด-คาโทดรองรับกับโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว สำหรับการไหลแบบสวนกัน

ทั้งนี้ อิทธิพลของ ohmic loss ที่ลดลง ส่งผลให้โลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว มีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น โดยมีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงสุด เพิ่มขึ้น 4.8 เปอร์เซ็นต์ ตามรูปที่ 3.14 และจากรูปที่ 3.15 การลด ohmic loss ของโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว ยังไม่มากพอที่จะเอาชนะ concentration loss จากโลหะรองรับของตัวเองได้ จึงยังส่งผลให้ความหนาแน่นไฟฟ้ากำลังของโลหะรองรับที่ปรับปรุงแล้ว ต่ำกว่า เซลล์เชื้อเพลิงแบบฮาโนด-คาโทดรองรับ และมีความหนาแน่นไฟฟ้ากำลังสูงสุด น้อยกว่า 0.132 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการไหลสวนกัน

บทที่ 4

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

การจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง ด้วยวิธี MEA ทำให้เราเข้าใจ ปรัชญาการของการแพร่ของของไหล เข้าสู่อิเล็กโทรด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ที่บริเวณผิวสัมผัส ระหว่างอินเตอร์คอนเนคกับ ความหนาของอิเล็กโทรด ซึ่งทำให้เรารู้พบกลไก (mechanism) การเกิด over-potentials ซึ่งเป็นปฏิสัมพันธ์กันระหว่าง concentration loss, activation loss และ ohmic loss และด้วยวิธีนี้สามารถนำเราไปสู่การออกแบบและพัฒนาเซลล์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งให้รายละเอียดมากกว่าวิธี PEN ตามคำแนะนำของ Khaleel และคณะ [12] ในปี 2003

จากการพัฒนาอินเตอร์คอนเนคเตอร์ พบว่า เพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนเข้าสู่คาโทด, อุณหภูมิกระจายตัวมากขึ้นและช่วยลดทางเดินของกระแสไฟฟ้ามากขึ้น ทั้งหมดนี้เป็นการช่วยการสูญเสียรวมให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งออกซิเจนที่ผลอย่างมากต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ดังนั้นสรุปได้ตามนี้

1. การเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนช่วยลดการสูญเสียเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาและการถ่ายโอนมวลของแก๊ส

2. อินเตอร์คอนเนคเตอร์ที่ปรับปรุงแล้วช่วยลดการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานทางไฟฟ้า

3. อินเตอร์คอนเนคเตอร์ที่ปรับปรุงแล้วช่วยกระจายความร้อนอย่างสม่ำเสมอด้านคาโทด

นอกจากนี้ความเข้าใจเชิงตัวแปรของระบบสมการของเซลล์เชื้อเพลิง มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ผล และช่วยให้เราเข้าใจปรัชญาการที่เกิดขึ้นหลังจากการจำลอง และยังช่วยให้เราคาดเดาความเป็นไปได้ทางทฤษฎี หากเราไม่ทำการจำลอง

ข้อเสนอแนะหลังจากการศึกษาวิจัย พบว่า การศึกษาวิจัยในส่วนของพัฒนาปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาคของอิเล็กโทรด มีความสำคัญมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความยาวขอบเขต 3 สถานะ น่าจะเป็นตัวควบคุมการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้น ควรมุ่งเน้นศึกษาต่อยอดทางด้าน

1. การออกแบบโครงสร้างทางจุลภาคของอิเล็กโทรด

2. การออกแบบโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะรองรับ สำหรับทำเป็น

ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรคาร์บอน

บรรณานุกรม

- [1] R.T. Leah, N.P. Brandon, P. Aguiar, **Modelling of cells, stacks and systems based around metal-supported planar IT- SOFC cells with CGO electrolytes operating at 500–600 °C.** Journal of Power Sources 145, pp. 336–352, 2005.
- [2] Changbo Lee, Joongmyeon Bae, **Fabrication and characterization of metal-supported solid oxide fuel cells.** Journal of Power Sources 176, pp. 62–69, 2008.
- [3] Yuriy B. Matus, Lutgard C. De Jonghe, Craig P. Jacobson, Steven J. Visco, **Metal-supported solid oxide fuel cell membranes for rapid thermal cycling.** Solid State Ionics 176, pp. 443–449, 2005.
- [4] Michael C. Tucker, Lutgard C. De Jonghe, Steven J. Visco, **A braze system for sealing metal-supported solid oxide fuel cells.** Journal of Power Sources 160, pp. 1049–1057, 2006.
- [5] P.A. Ramakrishna, Shi Yang, C.H. Sohn, **Innovative design to improve the power density of a solid oxide fuel cell.** Journal of Power Sources 158, pp. 378–384, 2006.
- [6] J.J. Hwang, C.K. Chenb, D.Y. Lai, **Detailed characteristic comparison between planar and MOLB-type SOFCs.** Journal of Power Sources 143, pp. 75–83, 2005.
- [7] Craig P. Jacobson, Lutgard C. De Jonghe, Steven J. Visco, **LBNL Activity Overview. Presented at the SECA Workshop,** February 20th, 2003.
- [8] Won Yong Lee, **Modeling of Solid Oxide Fuel Cells.** Libraries of Massachusetts Institute of Technology, January 2nd, 2007.
- [9] Shiqiang (Rob) Hui, Dongfang Yang, Zhenwei Wang, Sing Yick, Cyrille Dec`es-Petit, Wei Qu, Adam Tuck, Radenka Maric, Dave Ghosh, **Metal-supported solid oxide fuel cell operated at 400–600 °C.** Journal of Power Sources 167. pp. 336–339, 2007.
- [10] Grant Hawkes, Jim O'Brien, Carl Stoots, Steve Herring, Mehrdad Shahnam, **Thermal And Electrochemical Three Dimensional CFD Model Of A Planar Solid Oxide Electrolysis Cell.** Proceedings of ASME Summer Heat Transfer Conference. HT2005-72565, 2005.
- [11] Steve Visco, Craig Jacobson, Lutgard C. De Jonghe, **Development of Low-Cost Alloy Supported SOFCs.** Presented at SECA workshop, June 18, Pittsburgh, PA, 2002.

- [12] Zijng Lin, J.W. Stevenson, M.A. Khaleel, **The effect of interconnect rib size on the fuel cell concentration polarization in planar SOFCs**. Journal of Power Sources 117, pp. 92–97, 2003.

ประวัติและผลงาน

ชื่อ

: นาย สันติ วัฒนานูสรณ์

เกิด

: วันที่ 23 กันยายน พ.ศ. 2512

การศึกษา

: วท.บ. (เคมี) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ. 2534

: วศ.ม. (วิศวกรรมเคมี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พ.ศ. 2540

: Dr.-Ing. (วิศวกรรมเครื่องกล) Ruhr-University Bochum พ.ศ. 2550

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญ : กลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics)

ประสบการณ์การทำงาน

: นักเคมี บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด พ.ศ. 2535

: พนักงานด้านเทคนิค บริษัท S&T Enterprises (ประเทศไทย) จำกัด พ.ศ. 2535

: อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. พ.ศ. 2541

ผลงานวิชาการ

- Explicit Analytical Solution for Drying Kinetics of Flat Materials. [Wattananusorn, S. (2009)
: *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, vol. 43, no. 1, pp. 70 – 73]
- New Space-Averaging Procedure for Inhomogeneous Flow Fields using Balance Equation Formulations. [Wattananusorn, S. (2006) : *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 220, no. 9, pp. 1363 – 1374]
- Determination of Membrane Resistance for Cross-Flow Microfiltration in a Rectangular Module including Back-Flow. [Wattananusorn, S. (2008) : *Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 222, no. 1, pp. 75 – 77]

- Interference of Laminar Flow on Displacement Thickness in a Streamwise Corner.

[Wattananusorn, S. (2004) : *Journal of Power and Energy*, vol. 218, no. 1, pp. 51 – 53]

- Significance of the Balance-Based Averaging Theory for Application in Energy and Process

Engineering. [Wattananusorn, S. (2007) : Dissertation, Ruhr-University Bochum]

ประวัติและผลงาน

ชื่อ

: นาย นิวัฒน์ ภูเจริญ

เกิด

: วันที่ 19 ธันวาคม 2520

การศึกษา

: วศ.บ. วิศวกรรมเครื่องกล สจล. พ.ศ. 2545

: วศ.ม. วิศวกรรมเครื่องกล สจล. พ.ศ. 2553

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญ : Computer Simulation

รางวัลที่เคยได้รับ

: พุทธการศึกษาระดับปริญญาเอก คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี พ.ศ. 2554

: โล่ประกาศเกียรติคุณ โครงการพัฒนาโปรแกรมสร้างสมุดตารางยิงสำหรับกระสุนปืนใหญ่ ศูนย์อำนวยการสร้างอาวุธ ศูนย์การอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงานทหาร ปี พ.ศ. 2553

: พุทธการศึกษาระดับปริญญาโท โครงการพัฒนาหม้อน้ำรถยนต์ บริษัท ซีเอช วัฒนายนต์ จำกัด ปี พ.ศ. 2548

ประสบการณ์การทำงาน

: ผู้ช่วยนักวิจัยโครงการพัฒนาใบพัดหม้อน้ำรถยนต์ สจล. ปี พ.ศ. 2545

: ผู้ช่วยนักวิจัยโครงการพัฒนาหม้อน้ำรถยนต์ สจล. ปี พ.ศ. 2546

: วิศวกรวิจัยและพัฒนา บริษัทเอนโก ไทย จำกัด ปี พ.ศ. 2547

: ผู้ช่วยนักวิจัยโครงการพัฒนาครีบบ่มหม้อน้ำรถยนต์แบบเกล็ด สจล. ปี พ.ศ. 2548

: ที่ปรึกษาพิเศษ R&D บริษัท ซีเอช วัฒนายนต์ จำกัด ปี พ.ศ. 2548-2552

: วิศวกร สำนักบริการคอมพิวเตอร์ สจล. ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 ถึงปัจจุบัน

: ที่ปรึกษาพิเศษ R&D บริษัท ซีเอช โอโตพาร์ท จำกัด ปี พ.ศ. 2552 ถึงปัจจุบัน

ผลงานวิชาการ

ผลงานหลังการสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารที่ประชุมระดับชาติ จำนวน 2 ฉบับ

1. จารุวัตร เจริญสุข, นิวัฒน์ นาคะโยธินสกุล, นิวัฒน์ ภูเจริญ “การจำลอง การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำารถยนต์ด้วยเทคนิควิศวกรรม” การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, 15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัด ปราจีนบุรี
2. จารุวัตร เจริญสุข, นิวัฒน์ นาคะโยธินสกุล, นิวัฒน์ ภูเจริญ “การจำลองการไหลของอากาศผ่านใบพัดหม้อน้ำด้วยวิธีหลายแกน”, การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, 15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัด ปราจีนบุรี

ผลงานวิจัยระหว่างศึกษาระดับปริญญาโท

(ก) ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 9 ฉบับ

3. Zhonghua Sun, Thanapong Chaichana, Tretep Nipawan, Manas Sangworasil, Supan Tungjitsolmun, Jarruwat Charoensuk, **Niwat Phoocharoen**, Yvonne B Allen, David Hartley, Michael M Lawrence-Brown, Simulation of blood flow in abdominal aortic aneurysms pre-and post-fenestrated stent graft repair: A preliminary study, Int J CARS 2008 3 (Suppl 1): S64-S67 DOI 10.1007/s11548-008-0173-1
4. Non-reacting Flow Distributions under Various SOFC Stack Configurations” W. Wattana, J. Charoensuk, **N. Phoocharoen** and S. Charojrochkul, Solid Oxide Fuel Cells 10, The Electrochemical Society. The Tenth International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells (SOFC-X), Nara, Japan, June 3-8, 2007.
5. V. Jayranaiwachira **N. Phoocharoen**, SIMULATION MODELS OF JET MIXING OF NON-NEWTONIAN FLUIDS USING STAR-CD PROGRAM, The 17th International Symposium on Transport Phenomana, Toyama, JAPAN, 4-8 September, 2006
6. T. Nipawan, B. Wiwatanapataphee, T. Siriapisith, **N. Phoocharoen**, Y.H.Wu, Effect of bypass graft on blood flow in stenotic coronary artery reconstructed from medical images, Proceedings of the 5th Asian Mathematical Conference, Malaysia 2009
7. K. Hemtiwakorn, **N. Phoocharoen**, S. Tungjitsolmun, C. Pintavirooj, NASAL AIRFLOW SIMULATION IN HUMAN USING A COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD), The 2nd Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON 2009), August 13-14, 2009, Phuket, Thailand

8. Khaisang Hemtiwakorn, **Niwat Phoocharoen**, Supan Tungjitkusolmun, Visan Mahasittiwat, Manas Sangworasil, Chuchart Pintavirooj, Combined Medical Imaging with CFD Analysis for Application of Diagnostic and Treatment Planning: The Case Study of Human Nasal Airflow Simulation based on CT Imaging, ASIA SIMULATION CONFERENCE 2009 (JSST 2009), October 7-9, 2009, Ritsumeikan University Shiga Japan
9. **Niwat Phoocharoen**, Jarruwat Charoensuk, NUMERICAL SIMULATION OF METALSUPPORTED SOLID OXIDE FUEL CELL (mSOFC), Proceedings of ASME 2009 Seventh International Fuel Cell Science, Engineering and Technology Conference (FuelCell2009-85017), June 8-10, 2009 Newport Beach, California, USA
10. Winit jaiboon, **Niwat Phoocharoen**, Seiji Okawa, Jarruwat Chareonsuk, Simulation of Flow Aerodynamics and Heat Transfer in a Plate-Fin Radiator, 13th Annual Symposium on Computational Science and Engineering (ANSCSE 13), March 25-27, 2009, Kasetsart University
11. W. Jaiboon, **N. Phoocharoen**, S. Okawa, J. Charoensuk, Numerical Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer in a Plate Fin Radiator, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences (ICCES'09), 8-13 April 2009, Phuket, Thailand

(ข) ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารที่ประชุมระดับชาติ จำนวน 7 ฉบับ

12. **นิวัฒน์ ภูเจริญ**, ทวี เทศเจริญ, จารุวัตร เจริญสุข “การจำลองเชิงตัวเลขของเซลล์เชื้อเพลิง ออกไซด์แข็งแบบโลหะรองรับ” การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22, 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
13. **นิวัฒน์ ภูเจริญ**, จารุวัตร เจริญสุข, มนต์ สัจวงศิลป์, สุพันธ์ ตั้งจิตกุศลมัน “การปรับปรุงความผิดพลาดจากการตัดปลายของการประมาณค่าอนุพันธ์ช่วงเชิงซ้อนด้วยการประมาณค่านอกช่วงของริชาร์ดสัน: อนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของสมบัติทางฟิสิกส์ในระดับนาโนเมตร” การประชุมวิชาการวิศวกรรมชีวการแพทย์ไทย ครั้งที่ ๑ ณ อาคารอาทิตย์ อุไรรัตน์ มหาวิทยาลัยรังสิต 18-19 ธันวาคม 2550
14. **นิวัฒน์ ภูเจริญ**, จารุวัตร เจริญสุข, อุन्नัต พิณโสภณ “การวิเคราะห์ความผิดพลาดจากการปิดเศษของการประมาณค่านอกช่วงของริชาร์ดสัน สำหรับสมการเชิงอนุพันธ์: อนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง” การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21, 17-19 ตุลาคม 2550 จังหวัดชลบุรี

15. นิวัฒน์ ภูเจริญ, จารุวัตร เจริญสุข, ทวี เทศเจริญ “การวิเคราะห์ความผิดพลาดจากการตัดปลายของการประมาณค่านอกช่วงของริชาร์ดสัน สำหรับสมการเชิงอนุพันธ์: ปัญหาหนึ่งมิติการพา-การแพร่” การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21, 17-19 ตุลาคม 2550 จังหวัดชลบุรี
16. นิวัฒน์ ภูเจริญ, จารุวัตร เจริญสุข, มนัส สังวรศิลป์, สมโชค กิมปาน “การวิเคราะห์ความผิดพลาดรวมของการประมาณค่านอกช่วงของริชาร์ดสันสำหรับการประมาณค่าอนุพันธ์ช่วงเชิงซ้อน: อนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง” งานประชุมสัมมนาวิชาการเทคโนโลยีกริด ณ โรงแรมรามารการ์เด็นส์ กรุงเทพฯ 23-24 สิงหาคม 2550
17. นิวัฒน์ ภูเจริญ, จารุวัตร เจริญสุข, สมชาติ เล็กบางพลัด, กิตติ อนุศิษฏ์วิวัฒน์ “การวิเคราะห์ความผิดพลาดจากการตัดปลายของการประมาณค่านอกช่วงของริชาร์ดสันสำหรับพจน์การพา: ปัญหาหนึ่งมิติการพา-การแพร่” งานประชุมสัมมนาวิชาการเทคโนโลยีกริด ณ โรงแรมรามารการ์เด็นส์ กรุงเทพฯ 23-24 สิงหาคม 2550
18. กิตติภาส วศินารมณ, นิวัฒน์ ภูเจริญ, จารุวัตร เจริญสุข “การวิเคราะห์ทางความร้อนและการประเมินสมรรถนะเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก” การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, 4-7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่