

การทดสอบสมรรถนะของหน่วยเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าโดยใช้
อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า



นายเก่งกาจ ปัทมรัตน์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ภาควิชา เคมีเทคนิค

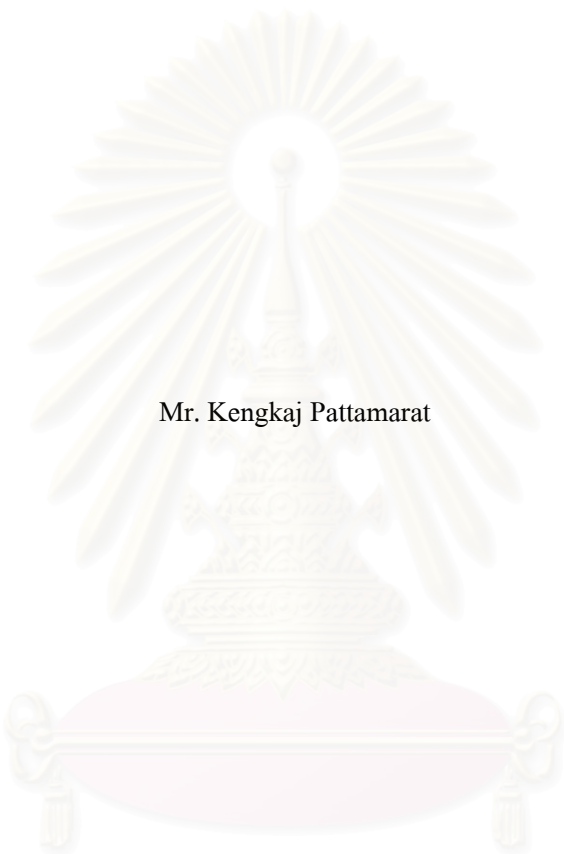
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-1326-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TESTING OF MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY PERFORMANCE BY
ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY



Mr. Kengkaj Pattamarat

สภามหาวิทยาลัยบูรพา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology
Department of Chemical Technology

Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2005
ISBN 974-53-1326-2

เก่งกาจ ปัทมารัตน์ : การทดสอบสมรรถนะของหน่วยเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าโดยใช้อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (TESTING OF MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY PERFORMANCE BY ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.มะลิ หุ่นสม, 100 หน้า. ISBN 974-53-1326-2

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) เป็นกระบวนการผลิตพลังงานที่สะอาดซึ่งคาดว่าจะนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็กและในยานพาหนะเพราะว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูง ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำและสามารถเริ่มเดินเครื่องได้เร็ว เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีโครงสร้างที่ซับซ้อนดังนั้นการทำความเข้าใจถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงจึงมีความสำคัญ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนโดยใช้เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (EIS) ความถี่ที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 50 มิลลิเฮิร์ตซ์ ถึง 10 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อที่จะระบุผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้า (0.55 – 0.8 โวลต์) อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง (80 – 200 sccm) และอุณหภูมิของเซลล์ (39 – 70 องศาเซลเซียส) จึงทำการออกแบบการทดลองเป็นแบบ 2^k แฟกทอเรียล ทำการทดลองที่ภาวะการให้ความชื้นอิ่มตัวและร้อยละ 60 ที่ฝั่งแอโนดและแคโทดตามลำดับ ผลจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิ ศักย์ไฟฟ้า และอันตรกิริยาของอุณหภูมิเซลล์กับอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้นอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนยังส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทาน โอห์มมิกและความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ ในงานวิจัยนี้ได้หาสมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้นกับความต้านทานชนิดต่างๆ และภาวะการทำงานที่ดีที่สุดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้

ภาควิชา ... เคมีเทคนิคลายมือชื่อนิสิต.....เก่งกาจ ปัทมารัตน์.....
 สาขาวิชา ... เคมีเทคนิคลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา ...2548.....

4772222623 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: PEMFC / IMPEDANCE / EXPERIMENTAL DESIGN

KENGKAJ PATTAMARAT: TESTING OF MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY PERFORMANCE BY ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY. THESIS
ADVISOR: ASST. PROF. MALI HUNSOM 100 pp. ISBN 974-53-1326-2

The proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) is one of the most promising candidate as a clean and power source for small electrical devices and vehicles because of its high energy conversion efficiency, low or zero noxious emission of environmental pollutant, low operating temperature and relatively quick start-up. Due to the complexity in structure inside the PEMFC, the understanding of mechanism of fuel cell is more important. This work was carried out to study the influence of several parameters on the performance of the PEMFC by using the electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The applied frequency was in the range of 50 mHz-10 kHz. The experiments were conducted by using the 2^k factorial design to identify the effects of various parameters including cell voltage (0.55-0.8 V), flow rates of gaseous fuels (80-200 sccm) and cell temperature (39-70 °C) at the saturated humidification condition and 60% humidification condition in the anode and cathode side, respectively. The preliminary results indicated that the cell temperature, the cell voltage and the interaction of cell voltage, flow rates of H_2 and O_2 had significant effect on the cell performance. In addition, the flow rate of O_2 had a strong effect on the ohmic resistance (R_Ω) and the charge transfer resistance (R_{ct}) in the system. The model equations describing the relationship of above parameters and various kinds of resistances in system and the optimum condition were determined in this study.

Department ... Chemical TechnologyStudent's signature.....*kengkaj pattamarat.*

Field of study ... Chemical TechnologyAdvisor's signature.....*Mali Hunsom*

Academic year ... 2005 ...

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ การทำวิจัย ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์ด้วยดียิ่ง รวมทั้ง คณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำ

งานวิจัยเรื่อง “การทดสอบสมรรถนะของหน่วยเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าโดยใช้อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิงภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยี ปิโตรเคมีและศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกี้ยวดี พฤกษาทรร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณบุคลากรภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและให้คำแนะนำต่างๆ ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจจนกระทั่งทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	2
2. วารสารปริทัศน์.....	4
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง.....	4
2.1.1 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงและหลักการทำงาน.....	4
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	7
2.2.1 หน่วยประกอบเมมเบรนและขั้วไฟฟ้า.....	8
2.2.2 ชั้นแก๊สแพร่.....	10
2.2.3 แผ่นช่องทางการไหลของแก๊ส.....	10
2.2.4 แหวนกันรั่ว.....	10
2.3 โพลีไธเซน.....	11
2.4 อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า.....	15
2.4.1 ตัวต้านทาน.....	19
2.4.2 ตัวเก็บประจุ.....	20
2.4.3 Constant Phase Element.....	21

	หน้า
2.4.4 อิมพีแดนซ์แบบวาเบอร์ก.....	21
2.4.5 อิมพีแดนซ์แบบแทนเจนต์.....	21
2.4.6 ขดลวดเหนี่ยวนำ.....	21
2.4.7 รูปแบบของอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นในลักษณะต่างๆ.....	22
2.5 วงจรสมมูลทางไฟฟ้า.....	25
2.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	26
2.6.1 การแจกแจงแบบ F.....	26
2.6.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	26
2.6.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล.....	28
2.6.4 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k	28
2.6.5 การเพิ่มจุดศูนย์กลางให้แก่การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k	30
2.6.6 แบบจำลองการถดถอย.....	31
2.6.7 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	32
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	35
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	35
3.1.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	35
3.1.2 หน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง.....	36
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	37
3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
3.4 ภาวะที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.5 ขั้นตอนการทำวิจัย.....	39
3.6 วิธีการทดลอง.....	40
3.6.1 การทดสอบสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี.....	40
3.6.2 ขั้นตอนภายหลังการทดลอง.....	43

	หน้า
4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	44
4.1 ผลของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี.....	44
4.2 ผลของตัวแปรต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	48
4.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความต้านทานโอห์มมิก.....	50
4.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ.....	61
4.2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวเก็บประจุ.....	72
4.3 ภาวะที่ดีที่สุดในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	79
4.4 วงจรไฟฟ้าสมมูล.....	85
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	87
5.1 ผลของตัวแปรต่างๆ.....	87
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	87
รายการอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก การหาค่าความต้านทานโอห์มมิก ความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุและตัวเก็บประจุ.....	92
ภาคผนวก ข การแปลงค่าตัวแปรจริงให้อยู่ในรูปตัวแปรเข้ารหัส.....	94
ภาคผนวก ค การคำนวณสมมูลน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง.....	95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	100

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง.....	6
2.2	องค์ประกอบของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า.....	19
2.3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียว แบบจำลองผลกระทบคงที่.....	27
2.4	รูปแบบทั่วไปของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k	29
3.1	การออกแบบการทดลอง.....	40
4.1	ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k	49
4.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความต้านทาน โอห์มมิก.....	51
4.3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของลอการิทึมของค่าความต้านทาน โอห์มมิก.....	53
4.4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ.	63
4.5	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของลอการิทึมของค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ.....	65
4.6	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวเก็บประจุ.....	73
4.7	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของลอการิทึมของตัวเก็บประจุ.....	75
4.8	ภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่สัมพันธ์กับผลตอบสนองที่ถูกต้องให้ความสำคัญสำคัญระดับ 5	82
4.9	ผลของการหาภาวะที่ดีที่สุดในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	84
4.10	องค์ประกอบต่างๆของวงจรไฟฟ้าสมมูล.....	86

สารบัญญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	การเคลื่อนที่ของไอออนและอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด...	7
2.2	เซลล์เดี่ยว (Single cell) ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน...	8
2.3	โครงสร้างของซัลโฟเนตพลูออโรเอทิลีน.....	9
2.4	โครงสร้างของเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีการดูดซึมน้ำเอาไว้.....	9
2.5	หลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	11
2.6	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	12
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า – ศักย์ไฟฟ้าของระบบเคมีไฟฟ้าในเชิง ทฤษฎี.....	15
2.8	Nyquist plot.....	17
2.9	รูปแบบอิมพีแดนซ์ของระบบเคมีไฟฟ้า.....	23
2.10	รูปแบบของอิมพีแดนซ์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการปนเปื้อนในแก๊สเชื้อ เพลิง.....	24
2.11	รูปแบบของอิมพีแดนซ์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่เกิดน้ำท่วม.....	24
2.12	วงจรมูลของเซลล์ไฟฟ้าเคมีและการแยกย่อย Z_T เป็น R_s และ C_s หรือ R_{ct} และ Z_w	25
2.13	การออกแบบรูปผสมจุดศูนย์กลางสำหรับ 3 ตัวแปร.....	31
3.1	เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ใช้ในการทดลอง.....	35
3.2	หน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง.....	37
3.3	เครื่อง Potentiostat/Galvanostat ที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.4	แผนภาพการไหลของแก๊สของหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง.....	42
4.1	Nyquist plot เปรียบเทียบผลของอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนที่ 80 sccm (▲) 200 sccm (♦) เมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm ศักย์ ไฟฟ้า 0.8 โวลต์ อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส	45
4.2	Nyquist plot แก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 80 sccm ศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์ อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน (▲) 80 sccm (♦) 200 sccm	45

รูปที่	หน้า
4.3 Nyquist plot เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ 39 องศาเซลเซียส (▲) และ 70 องศาเซลเซียส (◆) ที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm ศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์.....	46
4.4 Nyquist plot เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ 39 องศาเซลเซียส (◆) และ 70 องศาเซลเซียส (▲) ที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm ศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์ ที่ความชื้นอิ่มตัวทั้งสองฝั่ง.....	47
4.5 Nyquist plot เปรียบเทียบผลของศักย์ไฟฟ้าที่ 0.55 โวลต์ (▲) และ 0.8 โวลต์ (◆) เมื่อใช้ที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส.....	47
4.6 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความต้านทานโอห์มมิก.....	52
4.7 กราฟของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของความต้านทานโอห์มมิก.....	52
4.8 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าลอการิทึมของความต้านทาน โอห์มมิก.....	54
4.9 กราฟของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของค่าลอการิทึมของความต้านทานโอห์มมิก.....	55
4.10 ผลของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนที่มีต่อค่าความต้านทานโอห์มมิก.....	56
4.11 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานโอห์มมิก.....	56
4.12 ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อค่าความต้านทานโอห์มมิก.....	57
4.13 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนกับอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนที่มีต่อค่าความต้านทาน โอห์มมิก.....	58
4.14 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนกับอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานโอห์มมิก.....	59
4.15 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนกับอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานโอห์มมิก.....	60
4.16 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนกับศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อค่าความต้านทาน โอห์มมิก.....	60

รูปที่	หน้า
4.17 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ของค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ.....	62
4.18 กราฟของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของความต้านทานเนื่องจากการถ่าย โอนประจุ.....	62
4.19 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ของค่าลอการิทึมของความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ.....	66
4.20 กราฟของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของค่าลอการิทึมของความต้านทาน เนื่องจากการถ่ายโอนประจุ.....	66
4.21 ผลของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนที่มีต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการ ถ่ายโอนประจุ.....	67
4.22 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ.....	68
4.23 ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ.....	68
4.24 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนกับอัตราการไหล ของแก๊สออกซิเจนที่มีต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ.....	69
4.25 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนกับอุณหภูมิที่มีต่อ ค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ.....	70
4.26 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนกับศักย์ที่มีต่อค่า ความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ.....	71
4.27 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อค่าความต้านทานเนื่อง จากการถ่ายโอนประจุ.....	71
4.28 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ของตัวเก็บประจุ.....	74
4.29 กราฟของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของตัวเก็บประจุ.....	74
4.30 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ของค่าลอการิทึมของตัวเก็บประจุ.....	76
4.31 กราฟของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของค่าลอการิทึมของตัวเก็บประจุ.....	77
4.32 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวเก็บประจุ.....	78
4.33 ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อตัวเก็บประจุ.....	78

รูปที่	หน้า
4.34 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนกับอุณหภูมิที่มีต่อตัวเก็บประจุ.....	79
4.35 โปรแกรม Design-Expert 6.0.10 ที่ใช้ในการคำนวณหาภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	80
4.36 การให้ความสำคัญกับผลตอบสนองของโปรแกรม Design – Expert.....	81
4.37 Nyquist plot ที่ภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงต่างๆ โดยที่ภาวะที่ 1 (♦) ภาวะที่ 2 (x) และภาวะที่ 3 (*).	82
4.38 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่ภาวะต่างๆ โดยที่ (▲) คือภาวะที่ 1(♦) คือภาวะที่ 2 และ (■) คือภาวะที่ 3.....	83
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 94 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 140 sccm อุณหภูมิเซลล์ 39 องศาเซลเซียส เมื่อให้ความชื้นฝั่งแคโทดร้อยละ 60 กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.4 วัตต์.....	85
4.40 วงจรไฟฟ้าสมมูลของเซลล์เชื้อเพลิงที่ภาวะการทำงานที่ดีที่สุด.....	86
ก1 ตัวอย่าง Nyquist plot ที่ใช้ในการหาค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุ ที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส ศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์.....	92
ค1 รูปที่ ค1 การทำสมดุลมวลของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง	95

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้พลังงานกันมากทั้งในภาคอุตสาหกรรม การคมนาคมขนส่ง และในครัวเรือน ทำให้มีการคาดการณ์ว่าอีกไม่นาน โลกจะต้องประสบปัญหาการขาดแคลนพลังงาน และอีกปัญหาหนึ่งก็ตามมาจากการใช้พลังงานคือ ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์และเครื่องจักรต่าง ๆ ทำให้เกิดมลพิษขึ้น ไม่ว่าจะเป็นมลพิษทางอากาศหรือกากของเสียที่ได้จากกระบวนการ เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดภาวะปรากฏการณ์เรือนกระจก (Green house effect) ส่งผลให้เกิดปัญหาโลกมีอุณหภูมิสูงและร้อนขึ้น ด้วยเหตุนี้ทำให้ทั่วโลกได้มีการค้นคว้าหาพลังงานทดแทนแหล่งใหม่ที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงหรือดีกว่าแหล่งพลังงานเดิม ซึ่งทางเลือกอันหนึ่งก็คือเซลล์เชื้อเพลิงนั่นเอง

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) เป็นหน่วยผลิตพลังงานใหม่อีกชนิดหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง คือ ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process) โดยปราศจากกระบวนการเผาไหม้ (Combustion) เซลล์เชื้อเพลิงและแบตเตอรี่มีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกัน คือ สามารถผลิตขึ้นเป็นหน่วยเล็ก ๆ แล้วนำมาต่อเข้าด้วยกันในกรณีที่ต้องการเพิ่มกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้า แต่เซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะที่แตกต่างกับแบตเตอรี่ตรงที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีการป้อนเชื้อเพลิงในรูปของเหลวหรือแก๊สเข้าไปอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ในเซลล์เชื้อเพลิงจะไม่ถูกใช้หมดไป ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงจึงมีประสิทธิภาพในการให้พลังงานสูง และเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดเนื่องจากผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดขึ้นคือน้ำและความร้อนเท่านั้น นอกจากนี้การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงยังไม่ก่อปัญหาทางด้านมลภาวะอีกด้วย ตลอดการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะไม่มีเสียงดังรบกวนเนื่องจากไม่มีอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่จึงสามารถลดปัญหาอันเนื่องมาจากแรงเสียดทาน รวมถึงปัญหาของการซ่อมบำรุงรักษาลดลง

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาและพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงกันอย่างกว้างขวางและต่อเนื่อง ตั้งแต่วัตถุดิบที่ใช้เป็นองค์ประกอบพื้นฐาน ตัวเร่งปฏิกิริยา การประกอบเซลล์ รวมถึงการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ผลิตได้ ปัญหาที่พบในกระบวนการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงคือ เซลล์มีประสิทธิภาพต่ำ จึง

ต้องมีการศึกษาค้นคว้าอะไรเป็นปัจจัยที่ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพต่ำ การวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำได้หลายวิธี เช่น แมสสเปกโทรสโกปี (Mass spectroscopy, MS), ไซคลิกโวลต์แทมเมตรี (Cyclic voltammetry, CV) และ อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) เป็นต้น โดยวิธี MS เป็นการวิเคราะห์เพื่อสังเกตปริมาณมวลของสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ที่สามารถระเหยเป็นไอได้ของปฏิกิริยา โดยที่การทำ MS จะทำร่วมกับ CV เพื่อให้ได้ข้อมูลเพิ่มขึ้นในการนำมาวิเคราะห์ ผลที่ได้จากการทำ MS จะเป็นสัญญาณมวลที่เปลี่ยนแปลงไปตามศักย์ไฟฟ้า ข้อเสียของวิธีนี้คืออุปกรณ์ที่ใช้มีความซับซ้อนและมีจำนวนค่อนข้างมากทำให้ค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ค่อนข้างสูง ส่วน CV เป็นการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า

อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการวิเคราะห์องค์ประกอบภายในของเซลล์และสามารถหาความต้านทานภายในเซลล์ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงสมรรถนะการทำงานของเซลล์ได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการใช้เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้าซึ่งเป็นเทคนิคใหม่ในการวิเคราะห์หน่วยเชื้อแผ่นและขั้วไฟฟ้า
2. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเชื้อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนโดยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า
3. หาภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้องค์ความรู้ใหม่ในการวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง
2. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าเอกสารและข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีในอดีตทั้งในและต่างประเทศ
2. ศึกษาโปรแกรม Frequency Respond Analyser (FRA) และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยคือ หน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง (Test Station) และเครื่อง Potentiostat/Galvanostat

3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในทางการค้าโดยใช้อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า และการออกแบบการทดลองแบบ 2^k factorial โดยปัจจัยที่ทำการศึกษามีดังนี้
 - อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน (80-200 sccm)
 - อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน (80-200 sccm)
 - อุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิง (39-70 องศาเซลเซียส)
 - ศักย์ไฟฟ้า (0.55-0.8 โวลต์)
4. หาภาวะที่เหมาะสมของการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ส่งผลให้มีสมรรถนะดีที่สุดโดยใช้โปรแกรม Design-Expert
5. เขียนวงจรไฟฟ้าสมมูลของภาวะที่เหมาะสมของการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง
6. วิเคราะห์ผลการทดลอง สรุปผลและเขียนวิทยานิพนธ์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell)

เซลล์เชื้อเพลิงจัดเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกัลวานิก (Galvanic cell) ซึ่งพลังงานอิสระของปฏิกิริยาเคมีจะถูกเปลี่ยนไปเป็นกระแสไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิปลส์ (Gibbs free energy) ของปฏิกิริยาเคมีมีความสัมพันธ์กับความต่างศักย์ดังสมการที่ (2.1) [Larminie , 2003]

$$\Delta G = -nF\Delta u_0 \quad (2.1)$$

เมื่อ n คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่มีส่วนร่วมในปฏิกิริยา

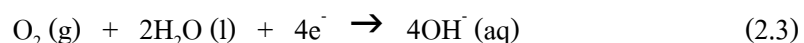
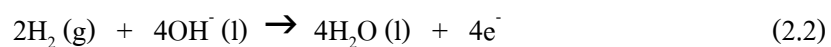
F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์มีค่าเท่ากับ 96485 คูลอมบ์ / โมล

Δu_0 คือ ความต่างศักย์สมดุลทางอุณหพลศาสตร์ของเซลล์ในกรณีที่ไม่ปรากฏการไหลของกระแสไฟฟ้า

2.1.1 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงและหลักการทำงาน

เซลล์เชื้อเพลิงสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ชนิดตามประเภทอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ [Barbir, 2005] คือ

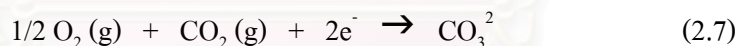
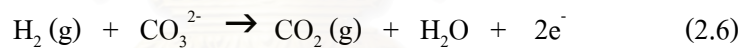
- เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ (Alkaline fuel cells, AFC) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ สำหรับสารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้นั้นสามารถใช้ได้หลายตัว เช่น นิกเกิล (Ni) เงิน (Ag) ออกไซด์ของโลหะและโลหะมีตระกูล เป็นต้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและแคโทดเป็นดังสมการที่ (2.2) และ (2.3) ตามลำดับ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ได้ถูกนำมาใช้งานจริงในปี ค.ศ.1960 ในยานอวกาศ Apollo



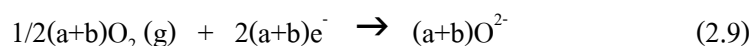
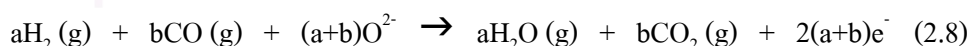
● เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid fuel cells, PAFC) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้กรดฟอสฟอริกเป็นอิเล็กโทรไลต์ ใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งทางด้านแอโนดและแคโทด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการที่ (2.4) และ (2.5) อุณหภูมิในการทำงานอยู่ระหว่าง 150 ถึง 220 องศาเซลเซียส ปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ได้มีการนำมาใช้เป็นแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าตามอาคารต่างๆ



● เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอเนตหลอม (Molten carbonate fuel cells, MCFC) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้สารประกอบของแอลคาไลน์ (ลิเทียม โซเดียม หรือโพแทสเซียม) กับคาร์บอเนตเป็นอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิการทำงานอยู่ระหว่าง 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสูงเช่นนี้ ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้เร็ว ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้โลหะมีตระกูล เช่น แพลทินัม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการที่ (2.6) และ (2.7) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะถูกพัฒนาต่อไปเป็นแหล่งผลิตพลังงานพื้นฐานต่อไป



● เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide fuel cells, SOFC) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้ออกไซด์ของโลหะที่ไม่มีรูพรุนเป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยทั่วไปแล้วจะใช้ยิตเรียมออกไซด์และเซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) อุณหภูมิการทำงานอยู่ระหว่าง 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการที่ (2.8) และ (2.9)



● เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cells, PEMFC) หรือเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพอลิเมอร์ของแข็ง (Solid polymer fuel cells, SPFC) เป็น

เซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิและความดันต่ำ เป้าหมายหลักของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับยานพาหนะ และด้วยขนาดที่เล็กจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นแหล่งให้พลังงานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ สำหรับรายละเอียดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ได้กล่าวในหัวข้อ 2.2

นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงทั้ง 5 ชนิดยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มตามอุณหภูมิการทำงานได้ดังนี้

- เซลล์เชื้อเพลิงแบบอุณหภูมิต่ำจะทำงานที่อุณหภูมิ 80-200 องศาเซลเซียส ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนซึ่งเหมาะที่จะใช้กับยานอวกาศและรถยนต์

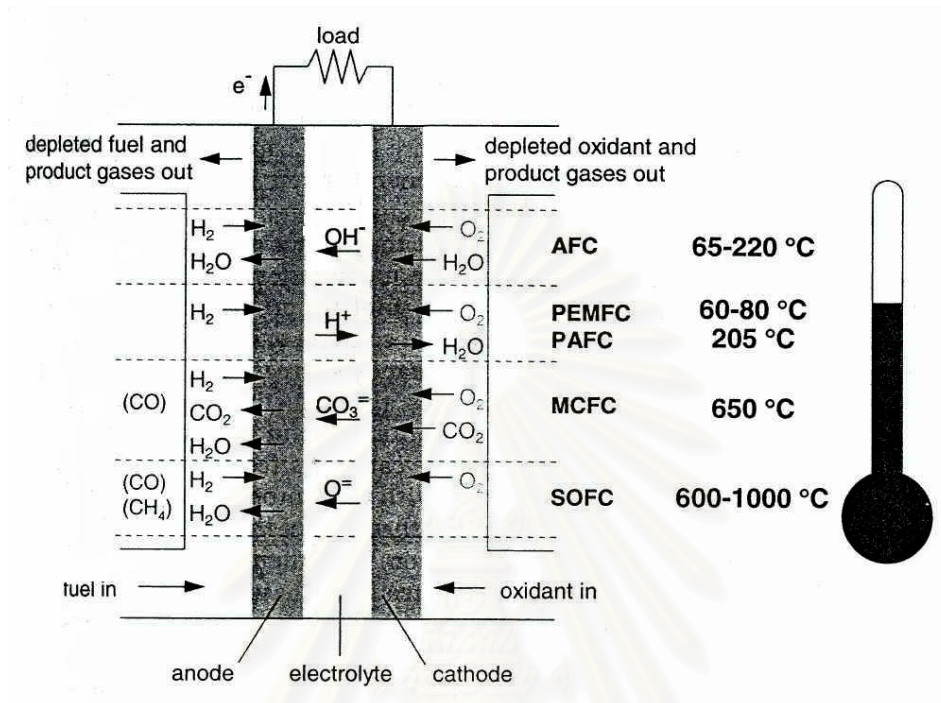
- เซลล์เชื้อเพลิงแบบอุณหภูมิสูงจะทำงานที่อุณหภูมิ 600-1000 องศาเซลเซียส ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอนเนตหลอม เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง เป็นต้น ซึ่งเหมาะในกรณีที่ต้องการผลิตกระแสไฟฟ้าและความร้อนในปริมาณมาก

ตารางที่ 2.1 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง [Larminie, 2003]

ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง	ไอออนที่เคลื่อนที่	อุณหภูมิในการใช้งาน (องศาเซลเซียส)	ลักษณะการใช้งาน
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์	OH^-	50-200	ใช้ในยานอวกาศ เช่น ยานอวกาศ กระสวยอวกาศ
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก	H^+	150-220	ใช้ในระบบ CHP* ขนาด 200 กิโลวัตต์
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	H^+	50-100	ใช้ในยานพาหนะ อุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนที่และระบบ CHP* ขนาดเล็ก
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอนเนตหลอมเหลว	CO_3^{2-}	600-700	เหมาะสำหรับระบบ CHP* ขนาดกลางถึงขนาดใหญ่
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง	O^{2-}	800-1000	เหมาะสำหรับระบบ CHP* ทุกขนาด ตั้งแต่ 2 กิโลวัตต์ จนถึงหลายกิโลวัตต์

* การทำงานร่วมของความร้อนและกำลังไฟฟ้า

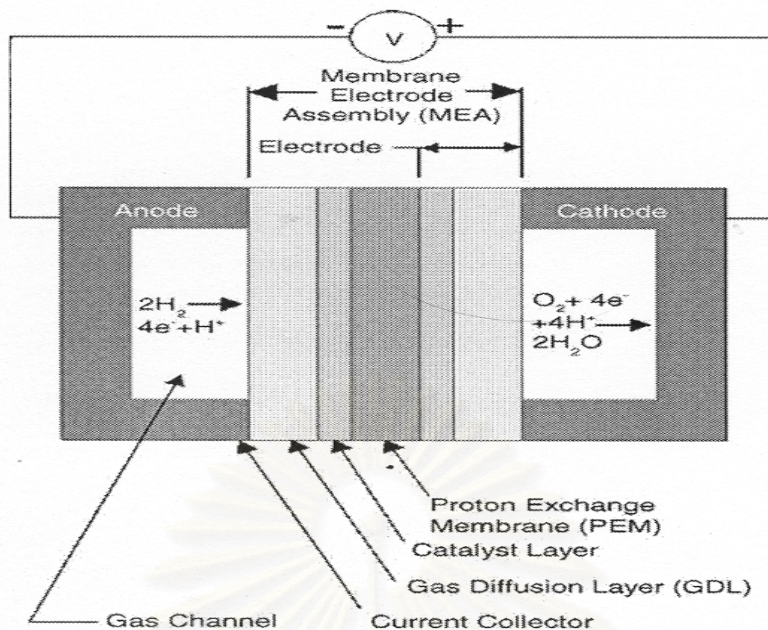
ตารางที่ 2.1 แสดงการสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิดและลักษณะการประยุกต์ใช้งาน ส่วนรูปที่ 2.1 แสดงหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง และการเคลื่อนที่ของไอออนผ่าน อิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของไอออนและอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด [Barbir, 2005]

2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน หรือเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพอลิเมอร์ของแข็งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับการใช้งานที่อุณหภูมิและความดันต่ำซึ่งต้องมีการเคลื่อนที่ เช่น รถยนต์ เพราะเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูง แต่มีภาวะการทำงานที่อุณหภูมิและความดันต่ำ คือ อยู่ในช่วง 60-100 องศาเซลเซียส, 1 - 2 บรรยากาศ [Larminie, 2003] เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ประกอบด้วยโครงสร้างหลัก 4 ส่วนใหญ่ๆ คือ หน่วยประกอบเมมเบรนและขั้วไฟฟ้า ชั้นแก๊สแพร่ แผ่นช่องทางไหลของแก๊สและแผ่นกันรั่ว ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เซลล์เดี่ยว (Single cell) ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน
[Litster, 2004]

2.2.1 หน่วยประกอบเมมเบรนและขั้วไฟฟ้า (Membrane electrode assembly, MEA)

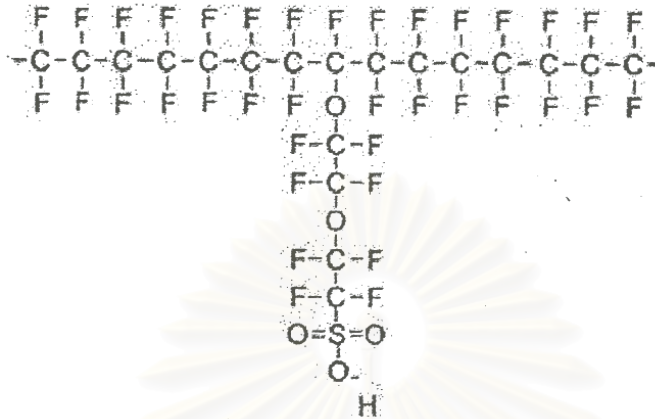
หน่วยประกอบเมมเบรนและขั้วไฟฟ้าเป็นส่วนที่สำคัญมากในเซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาและการถ่ายโอนประจุ โดยที่มีส่วนประกอบอยู่ 4 ส่วนคือ

- **ขั้วแอโนด (Anode)** ทำหน้าที่เป็นขั้วลบ โดยที่ขั้วจะมีส่วนที่ติดกับสารเร่งปฏิกิริยาอยู่บนผิวหน้าของเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ขั้วไฟฟ้าจะส่งอิเล็กตรอนซึ่งได้จากปฏิกิริยาที่ (2.4)

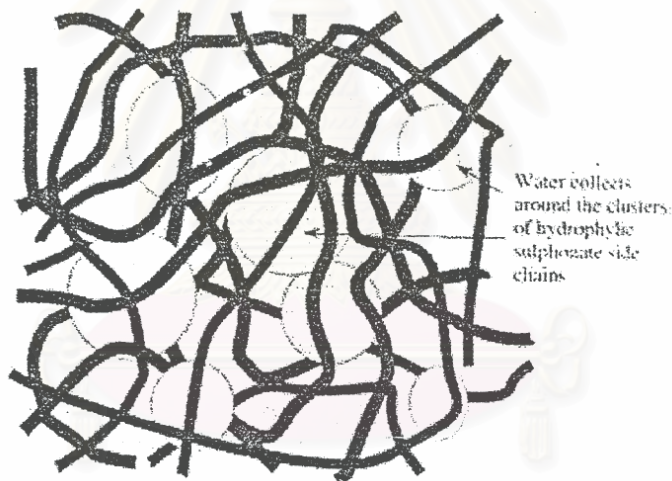
- **ขั้วแคโทด (Cathode)** ทำหน้าที่เป็นขั้วบวก โดยที่ขั้วจะมีส่วนที่ติดกับสารเร่งปฏิกิริยาอยู่บนผิวหน้าของเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ขั้วไฟฟ้าจะทำการรับอิเล็กตรอนที่ไหลกลับมาจากวงจรภายนอก รับโปรตอนและแก๊สออกซิเจนเกิดปฏิกิริยาที่ (2.5) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ

- **เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Electrolyte)** เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีโครงสร้างหลักเป็นสารพอลิเมอร์จำพวกซัลโฟเนตฟลูออโรพอลิเมอร์ (Sulphonated fluoropolymers) หรือ ฟลูออโรเอทิลีน (Fluoroethylene) การเตรียมพอลิเมอร์ทำได้โดยการให้ฟลูออรีนแทนที่ตำแหน่งของไฮโดรเจนในโมเลกุลของเอทิลีน เรียกกระบวนการนี้ว่าเปอร์ฟลูออรีเนชัน (Perfluorination) ได้โครงสร้างที่เรียกว่า เตตระฟลูออโรเอทิลีน (Tetrafluoroethylene) เมื่อ โมเลกุลเรียงต่อกันจะได้พอลิเมอร์ที่เรียกว่า พอลิตเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene) หรือ PTFE นอกจากนี้จะ

ทำโดยการเพิ่มส่วนของซัลโฟเนต (Sulfonate) ซึ่งได้มาจากกรดซัลโฟนิก (Sulfonic acid) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โมเลกุลของกรดซัลโฟนิกจะสร้างพันธะที่ปลายของ พอลิเมอร์กลายเป็นหมู่ SO_3^- ในส่วนปลายนี้เป็นส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) มีความสามารถในการดูดซึมโมเลกุลของน้ำไว้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของซัลโฟเนตฟลูออโรเอทิลีน [Larminie, 2000]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีการดูดซึมน้ำเอาไว้ [Larminie, 2000]

รูปที่ 2.4 แสดงส่วนที่ชอบน้ำของพอลิเมอร์ซึ่งจะทำหน้าที่ดูดซึมน้ำไว้ในอิเล็กโทรไลต์ โดยส่วนนี้จะมีแรงพันธะในการยึดกันระหว่างหมู่ SO_3^- กับโปรตอนอ่อนลง ทำให้โปรตอนสามารถเคลื่อนที่ได้ เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ทำหน้าที่เป็นสารอิเล็กโทรไลต์จะต้องมีสมบัติดังต่อไปนี้

- มีค่าการนำไอออนสูง แต่มีค่าการนำอิเล็กตรอนต่ำ
- มีค่าการแพร่ของแก๊สต่ำ
- มีขนาดที่แน่นอน (ไม่มีการบวม)

- มีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูง
- มีค่าการแพร่ของน้ำต่ำ
- มีค่าความต้านทานต่อการสูญเสียน้ำหรือมีความต้านทานต่อการเกิด ดีไฮเดรชัน (Dehydration)
- มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน รีดักชันและไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)
- มีค่าการถ่ายเทไอออนบวกสูง
- พื้นผิวของเมมเบรนต้องสามารถเชื่อมตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกาะบนพื้นผิวได้ดี
- มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity)

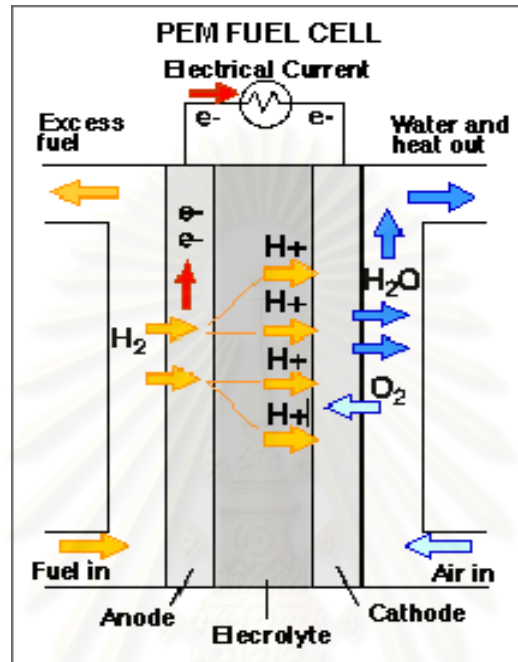
● **สารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)** หน้าที่หลักของสารเร่งปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงคือ ทำหน้าที่ดูดซับแก๊ส (Gas adsorption) ส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron transfer) และเป็นบริเวณที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา (Surface reaction) ซึ่งในที่นี้จะหมายถึงพื้นผิวของสารเร่งปฏิกิริยา โดยส่วนใหญ่แล้วสารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะเป็นผงแพลทินัมเคลือบอยู่บนเมมเบรน แลกเปลี่ยนโปรตอน เนื่องจากแพลทินัมมีความสามารถในการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนได้ดีมาก ทำให้โมเลกุลของไฮโดรเจนแตกออกเป็นอะตอมเกาะอยู่ที่ผิวของโลหะ ซึ่งอะตอมของไฮโดรเจนนี้จะว่องไวต่อการเข้าทำปฏิกิริยามากกว่าโมเลกุลของไฮโดรเจน และการใช้แพลทินัมแบบผงละเอียดคนั้นจะช่วยในการเพิ่มพื้นที่ผิว ทำให้มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น สำหรับขั้วแคโทดนั้น สารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ก็ยังคงเป็นผงแพลทินัม เนื่องจากยังมีความเหมาะสมอยู่มากกว่าสารเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ

2.2.2 ชั้นแก๊สแพร่ (Gas diffusion layer) เป็นส่วนที่ช่วยให้แก๊สเชื้อเพลิงและสารออกซิเดนต์สามารถแพร่กระจายไปทั่วบริเวณขั้วไฟฟ้าได้ดีขึ้น โดยทำจากวัสดุที่มีส่วนที่ไม่ชอบน้ำ มีความเป็นรูพรุนสูงและมีความสามารถในการนำอิเล็กตรอนสูง

2.2.3 แผ่นช่องทางการไหลของแก๊ส (Flow field plate) ช่องทางไหลของแก๊สเพื่อช่วยกระจายแก๊สให้สัมผัสกับขั้วอิเล็กโทรดได้อย่างทั่วถึง

2.2.4 แหวนกันรั่ว (Seal) ใช้สำหรับป้องกันการรั่วซึมของแก๊สออกจากเซลล์เชื้อเพลิง

หลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนแสดงในรูป 2.5 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปตามปฏิกิริยาที่ (2.4) และ (2.5)



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน [Brand D., Cornell researchers to kick-start fuel cell development with \$2.25 million federal award to find new materials for cheap, efficient technology (on-line)]

น้ำที่เกิดจากกระบวนการเคมีไฟฟ้าจะถูกกำจัดออกจากเซลล์มาเก็บแก๊สทางด้านแคโทด ส่วนความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกดึงออกโดยระบบหล่อเย็น ประสิทธิภาพของเมมเบรนจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการส่งถ่ายไอออนของไฮโดรเจน ดังนั้นแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ใช้ต้องทำให้มีความชื้น เพราะกระบวนการนำไอออนของเมมเบรนจะเกิดขึ้นไม่ได้หากเมมเบรนไม่มีน้ำ

2.3 โพลาริเซชัน (Polarization) [Larminie, 2003]

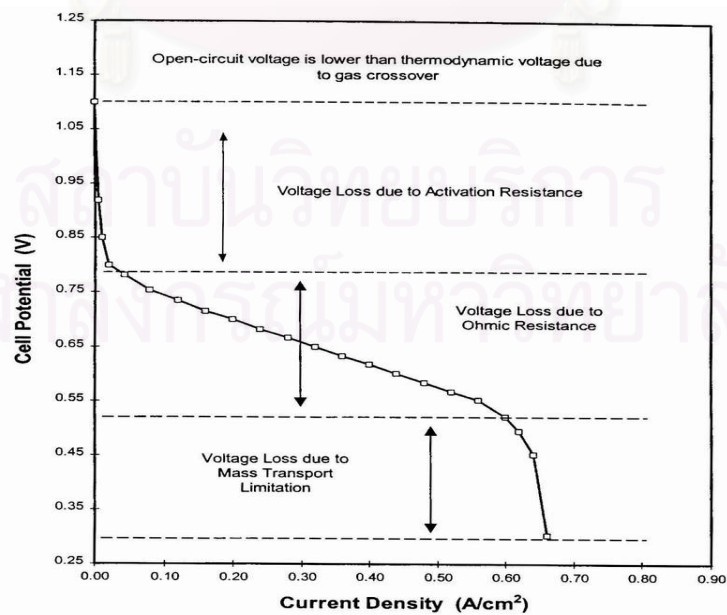
เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงถูกต่อเข้ากับวงจรภายนอกและมีการป้อนแก๊สเชื้อเพลิงให้กับเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงจะผลิตกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น ๆ แต่ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าไม่เท่ากับค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี หรือที่ได้จากกระบวนการผันกลับได้ (Reversible process) ซึ่งในเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สออกซิเจนจะได้ค่าความ

ต่างศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎีประมาณ 1.229 โวลต์ ซึ่งผลต่างระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าจริงที่จ่ายให้กับวงจรภายนอกกับค่าศักย์ไฟฟ้าตามกระบวนการผันกลับได้ตามหลักของอุณหพลศาสตร์ เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน (Overpotential) การลดลงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากค่าจริงเกิดในกระบวนการที่เรียกว่า โพลาริเซชัน (Polarization) โดยการเกิดโพลาริเซชันนั้นจะเกิดขึ้นทั้งที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ลดลง โดยศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จริง (E_{cell}) สามารถเขียนได้ดังสมการ (2.10)

$$E_{cell} = E_{cell}^O - |\varepsilon_c| - |\varepsilon_a| - ir \tag{2.10}$$

โดยที่	E_{cell}^O	คือ	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน (โวลต์)
	ε_c	คือ	ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแคโทด (โวลต์)
	ε_a	คือ	ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแอโนด (โวลต์)
	ir	คือ	เทอมของศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่เกิดจากความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิง (โวลต์)

เมื่อนำค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง มาเขียนกราฟ โพลาริเซชันจะแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนเปลี่ยนโปรตอน [Wood และคณะ, 1998]

จากรูปที่ 2.6 พบว่าที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎีเนื่องมาจากเกิดการแพร่ข้ามฝั่งของแก๊ส (Fuel cross over) ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดผ่านเมมเบรน เมื่อแก๊สข้ามไปยังอีกฝั่งหนึ่งจะมีการเกิดปฏิกิริยากับผิวขั้วไฟฟ้า เช่น เมื่อแก๊สไฮโดรเจนแพร่ข้ามไปยังขั้วแคโทดก็เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น ประกอบกับฝั่งขั้วแคโทดมีแก๊สออกซิเจน จึงเกิดปฏิกิริยารีดักชันภายในขั้วแคโทดเดียวกัน ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าภายใน (Internal current) [Larminie, 2000] ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินขึ้นที่ขั้วแคโทด เช่นเดียวกันกับฝั่งแอโนดที่มีการแพร่ข้ามของออกซิเจน ก็จะเกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแอโนดเช่นเดียวกัน จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง โดยเรียกค่าศักย์ไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open-circuit voltage)

เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 2.6 พบว่าจะมีการลดลงของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากการเกิดโพลาไรเซชัน โดยเมื่อสังเกตจากกราฟจะพบว่าสามารถแบ่งช่วงการเกิดโพลาไรเซชันออกได้เป็น 3 ช่วงคือ

1. โพลาไรเซชันทางเคมี (Chemical polarization) เป็นการสูญเสียเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Activation losses) ที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงเกิดขึ้น เนื่องมาจากอัตราเร็วของปฏิกิริยา ส่วนจะลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและกระแสไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิง ถ้าอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีมีค่าต่ำจะเกิด โพลาไรเซชันในทางเคมีมาก ศักย์ไฟฟ้าที่สูญเสียเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถหาได้จากสมการของทาเฟล (Tafel equation) ดังสมการที่ 2.11

$$\Delta V_{act} = A \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (2.11)$$

$$A = \frac{RT}{2\alpha F} \quad (2.12)$$

โดยที่	i	คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
	i_0	คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยน (Exchange current density)
	α	คือ ค่าคงที่การถ่ายโอนประจุ
	F	คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96485 คูลอมป์ต่อ โมล)
	T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)
	R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 จูล/โมล.เคลวิน)

2. โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน (Resistance polarization) เป็นการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากความต้านทานที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงในแต่ละส่วน เช่น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่บริเวณขั้วไฟฟ้าและที่บริเวณแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า ความต้านทานในการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเยื่อเมมเบรน (Ohmic loss) ศักย์ไฟฟ้าที่สูญเสียเนื่องจากความต้านทานที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงสามารถหาได้จากสมการที่ (2.13)

$$\Delta V_{ohm} = ir \quad (2.13)$$

โดยที่ i คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร, mA/cm²)

r คือ ความต้านทานพื้นที่จำเพาะ (กิโลโอห์มตารางเซนติเมตร, kΩcm²)

วิธีในการลดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานในส่วนของขั้วไฟฟ้าทำได้โดยการเลือกใช้ตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยา (Supporter) และตัวสะสมกระแสไฟฟ้าให้มีค่าการนำไฟฟ้าสูงๆ เพื่อลดแรงต้านทานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ส่วนของอิเล็กโทรไลต์ควรออกแบบให้มีขนาดบาง เพื่อลดระยะทางในการเคลื่อนที่ของโปรตอน หรือเพิ่มความชื้นในอิเล็กโทรไลต์ จะทำให้การเคลื่อนที่ของโปรตอนเป็นไปได้ง่ายขึ้น

3. โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration polarization) เป็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้น (Mass transport หรือ Concentration losses) ที่บริเวณพื้นผิวของขั้วไฟฟาลดลง ทำให้มีปริมาณสารตั้งต้นไม่เพียงพอในการเกิดปฏิกิริยา จึงทำให้เกิดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัดขึ้น (Limiting current density, i_l) เป็นผลทำให้ศักย์ไฟฟ้าลดลง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.14)

$$\Delta V_{trans} = -\frac{RT}{2F} \ln\left(1 - \frac{i}{i_l}\right) \quad (2.14)$$

โดยที่ i_l คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัด

ในกรณีที่ใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์มักจะไม่พบปัญหานี้เกิดขึ้น แต่เมื่อใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดส์จะเกิดปัญหานี้ขึ้นเนื่องจากในอากาศมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยกว่า ดังนั้นเมื่อใช้อากาศเป็นสารออกซิไดส์จำเป็นจะต้องมีออกแบบช่องทางเดินแก๊สให้อากาศสามารถสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าได้อย่างเต็มที่ เพื่อให้ออกซิเจนที่อยู่ในอากาศสามารถแพร่เข้าไปยังบริเวณขั้วไฟฟ้าให้มากที่สุด

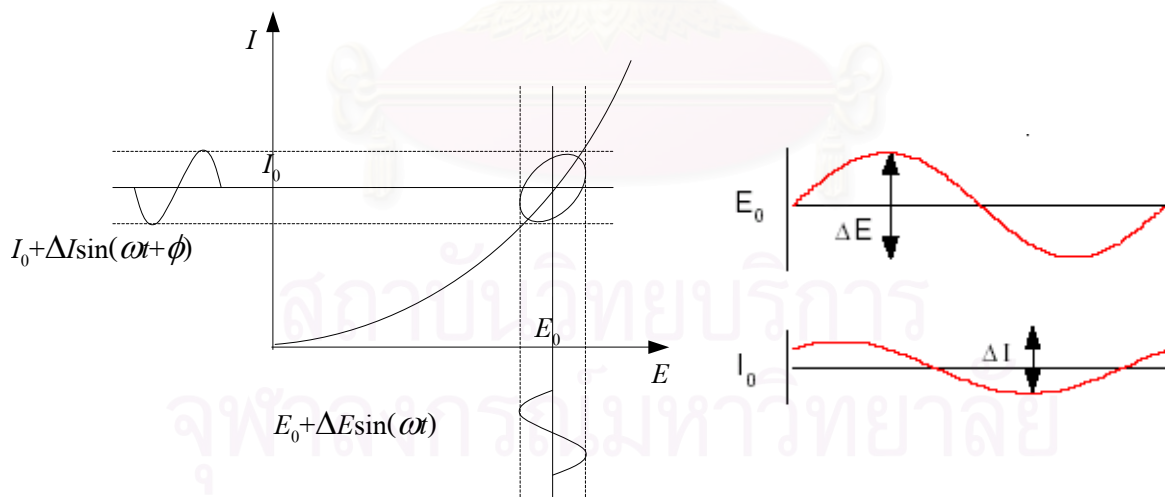
2.4 อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical impedance spectroscopy)

[Barsoukov และ Macdonald, 2005]

อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (EIS) เป็นเทคนิคที่มีประโยชน์มากในการวิเคราะห์ลักษณะของระบบเคมีไฟฟ้าโดยอาจจะช่วยแยกแยะอิทธิพลของลักษณะทางกายภาพและปรากฏการณ์ทางเคมีที่ศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่งในการทำงาน ด้วยการทดลองเพียงขั้นตอนเดียวก็ได้รับรวบรวมช่วงความถี่ที่ใช้งานไว้อย่างเพียงพอ

เมื่อไม่กี่ปีมานี้ EIS ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในด้านวัสดุศาสตร์ โดยมักใช้ในการศึกษาลักษณะการเคลือบ แบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิง และการกัดกร่อน อีกทั้งได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงในการวิเคราะห์การแพร่ของไอออนผ่านเยื่อและการศึกษารอยต่อของสารกึ่งตัวนำ

หลักการของวิธีการวัดโดยใช้อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้ามีหลักการคล้ายกับวิธีอิมพีแดนซ์ทั่วไป ซึ่งจะให้สัญญาณกระตุ้นในรูปฟังก์ชันไซน์ที่มีค่าแอมพลิจูดต่ำไปยังระบบภายใต้การวิเคราะห์ และวัดการตอบสนองในรูปของกระแสไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า หรือสัญญาณอื่นๆ ที่สนใจ จากรูปที่ 2.7 จะแสดงกราฟเส้นโค้งของกระแสไฟฟ้า - ศักย์ไฟฟ้า ของระบบเคมีไฟฟ้าในเชิงทฤษฎี โดยที่ I_0 คือ กระแสไฟฟ้ากระแสตรง E_0 คือ ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง ω คือ ความถี่เชิงมุม t คือเวลา และ ϕ คือการเลื่อนเฟส (Phase shift)



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า - ศักย์ไฟฟ้าของระบบเคมีไฟฟ้าในเชิงทฤษฎี

[Application notes: Electrochemical impedance spectroscopy (On-line)]

คลื่นรูปไซน์ที่มีแอมพลิจูดค่าของ $\Delta E \sin(\omega t)$ ณ ความถี่ค่าหนึ่ง ได้เป็นส่วนที่เพิ่มเติมเข้าไปในค่าศักย์ไฟฟ้า E_0 ส่งผลให้เกิดการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าเป็นคลื่นรูปไซน์ของ $\Delta I \sin(\omega t + \phi)$ เพิ่มเติมเข้าไปในค่า I_0 การตอบสนองของค่ากระแสไฟฟ้าจะเลื่อนไปตามศักย์ไฟฟ้าที่ให้อิมพีแดนซ์ของระบบสามารถคำนวณได้จาก กฎของโอห์ม (Ohm's Law) ดังสมการ (2.15)

$$Z(\omega) = \frac{\Delta E(\omega)}{\Delta I(\omega)} \quad (2.15)$$

ค่าอิมพีแดนซ์เป็นปริมาณเชิงซ้อนกับขนาดและการเลื่อนเฟสซึ่งขึ้นกับความถี่ของสัญญาณ โดยทั่วไปในระบบเคมีไฟฟ้าจะใช้ช่วงความถี่ประมาณ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ไปจนถึง 0.1 เฮิร์ตซ์ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่า $Z(\omega)$ เป็นปริมาณเชิงซ้อนจึงสามารถแสดงได้ในพิกัดเชิงขั้ว อิมพีแดนซ์ของข้อมูลโดยสามารถเขียนได้ในรูป

$$Z(\omega) = |Z(\omega)|e^{j\phi(\omega)} \quad (2.16)$$

เมื่อ $|Z(\omega)|$ คือขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ ω และ $\phi(\omega)$ คือการเลื่อนเฟสที่ความถี่ ω ในพิกัดคาร์ทีเซียน อิมพีแดนซ์เขียนได้ในรูป

$$Z(\omega) = Z_r(\omega) + jZ_j(\omega) \quad (2.17)$$

เมื่อ $Z_r(\omega)$ คือส่วนจริง (Real part) ของอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ ω และ $Z_j(\omega)$ คือส่วนจินตภาพ (Imaginary part) ที่ความถี่ ω และ $j = \sqrt{-1}$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริงกับส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ เรียกว่า Nyquist plot ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ก) ข้อดีของ Nyquist plot คือสามารถแสดงภาพรวมของข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและยังสามารถอธิบายได้ในเชิงคุณภาพ โดยที่แกนของส่วนจริงจะมีค่าเท่ากับแกนของส่วนจินตภาพเพื่อจะไม่ไปบิดเบือนรูปร่างของเส้นกราฟ ทั้งนี้รูปร่างของเส้นกราฟมีความสำคัญในการอธิบายเชิงคุณภาพของข้อมูล ข้อเสียของ Nyquist plot คือการไม่ได้แสดงมิติของความถี่ ทางหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหาที่กล่าวมาได้โดยระบุค่าความถี่ลงไปบนกราฟเลย

ส่วนค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์และการเลื่อนเฟสจะเขียนได้ในรูปฟังก์ชันของความถี่ โดยทั้งสองกราฟสามารถเขียนรวมกันได้ในรูปของ Bode plot ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ข) ซึ่งจะทำให้

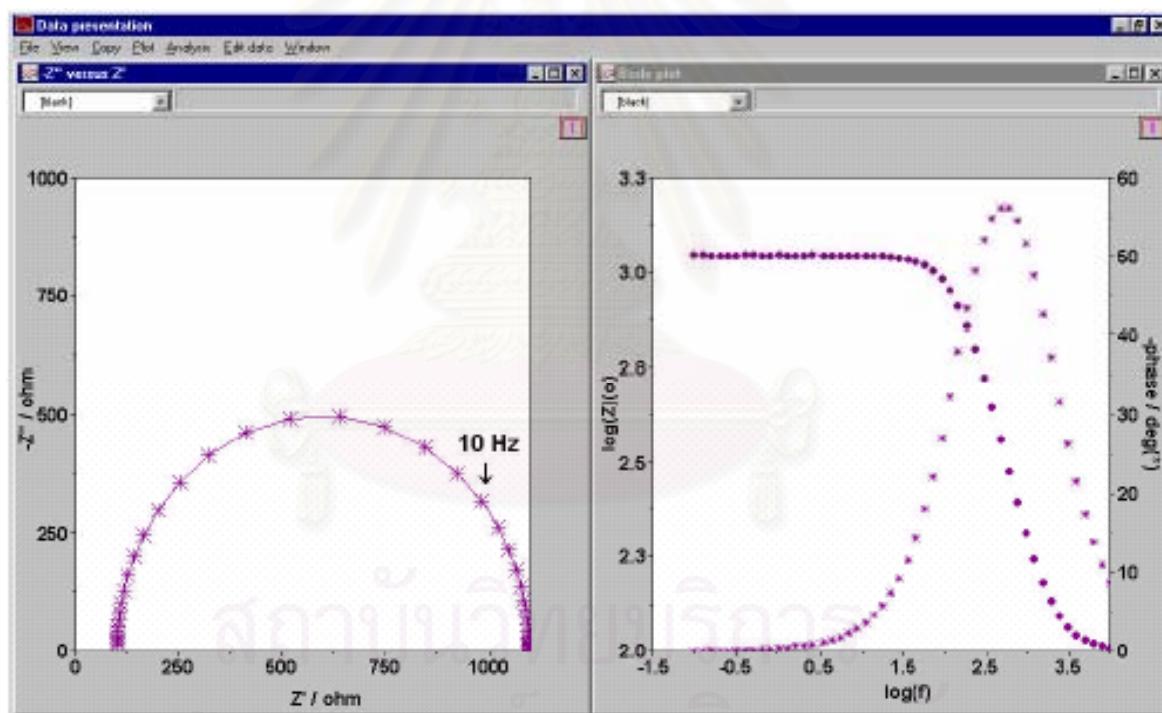
การแสดงผลของข้อมูลมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างการแสดงผลของข้อมูลในรูปแบบของ Nyquist Plot และ Bode Plot เป็นไปตามสมการ

$$|Z(\omega)|^2 = (Z_r(\omega))^2 + (Z_j(\omega))^2 \quad (2.18)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{Z_j(\omega)}{Z_r(\omega)} \quad (2.19)$$

$$Z_r(\omega) = |Z(\omega)| \cos \phi \quad (2.20)$$

$$Z_j(\omega) = |Z(\omega)| \sin \phi \quad (2.21)$$



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.8 Nyquist plot (ก) และ Bode plot (ข) [Application notes: Electrochemical impedance spectroscopy (On-line)]

โดยทั่วไปการทดลองอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าเคมีจะประกอบด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี (หรือระบบภายใต้การวิเคราะห์) เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า (Potentiostat) หรือเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้า (Galvanostat) และเครื่องวิเคราะห์การตอบสนองค่าความถี่ (Frequency Response Analyzer, FRA) ทั้งนี้ เครื่องวิเคราะห์การตอบสนองค่าความถี่จะใช้คลื่นรูปไซน์และการวิเคราะห์การตอบสนองของระบบเพื่อระบุอิมพีแดนซ์ของระบบ

เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในการทดลองอิมพีแดนซ์ จะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าจำนวน 2, 3 หรือ 4 ขั้ว เซลล์พื้นฐานที่สุดจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าจำนวน 2 ขั้ว โดยปกติขั้วไฟฟ้าภายใต้การวิเคราะห์จะเรียกว่า ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode) และขั้วไฟฟ้าที่ทำให้วงจรไฟฟ้าครบวงจรเรียกว่า ขั้วไฟฟ้าสมทบ (Counter Electrode) ขั้วไฟฟ้ามักจะจุ่มอยู่ในสารพาประจุที่เป็นของเหลว สำหรับระบบของแข็งก็อาจใช้สารพาประจุซึ่งเป็นของแข็ง หรืออาจไม่มีสารพาประจุก็ได้

ในที่นี้จะขอกล่าวถึงโครงสร้างของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว ซึ่งเป็นเซลล์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายที่สุด ขั้วไฟฟ้าชนิดที่สามนี้ คือขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ซึ่งถูกนำมาใช้ในการกำหนดศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทำงานให้มีความแน่นอน เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าสัมบูรณ์ของขั้วไฟฟ้าเดี่ยวไม่สามารถวัดค่าได้ การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าเคมีจึงใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็นหลักในการทำงาน เพราะฉะนั้นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงจึงควรมีความผันกลับ (Reversible) ไปมาได้ และศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงควรมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาทำการวัด

โดยทั่วไปการทดลองอิมพีแดนซ์จะทำภายใต้การควบคุมศักย์ไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยก็ใช้วิธีการนี้ รูปแบบของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะทำการทดลองโดยการกำหนดศักย์ไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่ง แล้วเพิ่มศักย์ไฟฟ้าในรูปฟังก์ชัน ไซน์เข้าไปรบกวนศักย์ไฟฟ้าและนำไปใช้กับเซลล์ ค่ากระแสไฟฟ้าจะถูกวัดเพื่อนำไประบุค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ

เครื่องวิเคราะห์การตอบสนองค่าความถี่จะทำงานในรูปกระแสไฟฟ้าสลับ โดยทั่วไปการวัดจะทำในรูปแบบของฟังก์ชัน ไซน์ฟังก์ชันเดียว แต่หากใช้ฟังก์ชัน ไซน์แบบหลายฟังก์ชันจะช่วยให้ประหยัดเวลาเมื่อทำการวัดที่ความถี่ต่ำมากๆ โดยสัญญาณกระตุ้นที่ใช้มักมีขนาดเล็กๆ ประมาณ 10 mV ภายใต้ช่วงความถี่ที่ใช้ถูกกำหนดโดยข้อจำกัดของเครื่องมือและระบบ ระยะเวลาที่ใช้ในการวัดของแต่ละค่าความถี่คือส่วนกลับของค่าความถี่นั่นเอง ดังนั้น เมื่อความถี่ต่ำมากๆ จะใช้เวลายาวมากเช่นกันในการอ่านข้อมูลอย่างสมบูรณ์ เช่น การวัดข้อมูลที่ค่าความถี่ 1 mHz จะใช้เวลา 1000 วินาที โดยทั่วไปความถี่ที่ใช้จะอยู่ในช่วง 100 kHz - 0.1 Hz ซึ่งจะใช้เวลาในการวัดทั้งสิ้นประมาณ 10 นาที อิมพีแดนซ์ที่ได้สามารถแปลให้อยู่ในรูปของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า (Equivalent circuit) และแบบจำลองของกระบวนการ ซึ่งจะทำให้สามารถประมาณขอบเขตที่ใช้อธิบายข้อมูลที่ได้จากการทดลองได้อย่างเหมาะสม และยังสามารถช่วยในการคาดการณ์พฤติกรรมของระบบภายใต้ภาวะที่หลากหลายได้ด้วย

วงจรสมมูลทางไฟฟ้าได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงในการแปลข้อมูลอิมพีแดนซ์ โดยวงจรสมมูลทางไฟฟ้าสร้างขึ้นมาจากองค์ประกอบที่เป็นที่รู้จักกันดี เช่น ความต้านทาน ตัวเก็บประจุ และ ขดลวดเหนี่ยวนำ รวมไปถึงองค์ประกอบอื่นๆ เช่น Constant Phase Element อิมพีแดนซ์แบบวาร์เบิร์กและอิมพีแดนซ์แบบแทนเจนต์ ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้จะต่อกันแบบอนุกรมหรือขนาน เพื่อให้วงจรสมมูลทางไฟฟ้ามีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ทั้งนี้องค์ประกอบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า [Wolf, 2003]

องค์ประกอบของวงจร	อิมพีแดนซ์	การเลื่อนของเฟส
ความต้านทาน (Resistance, R)	R	0
ตัวเก็บประจุ (Capacitance, C)	$\frac{1}{j\omega C}$	-90
ขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductance, L)	$j\omega L$	+90
Constant Phase Element, CPE	$\frac{1}{(j\omega C)^\alpha}$	-
อิมพีแดนซ์แบบวาร์เบิร์ก (Warburg Impedance)	$\frac{R}{\sqrt{j\omega}}$	-
อิมพีแดนซ์แบบแทนเจนต์ (Tangent Impedance)	$R \frac{\tanh \sqrt{j\omega\tau}}{\sqrt{\tau}}$	-

2.4.1 ตัวต้านทาน (Resistance, R) อิมพีแดนซ์ของความต้านทานสามารถแสดงได้ดังสมการ (2.22) ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์นี้จะไม่ขึ้นกับค่าความถี่ และไม่มีส่วนจินตภาพ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานจะมีเฟสเดียวกับศักย์ไฟฟ้าเสมอ ตัวอย่างของตัวต้านทานที่ใช้อธิบายระบบเคมีไฟฟ้า ได้แก่

$$Z = R \quad (2.22)$$

- Ohmic Resistance, R_Ω นั่นคือความต้านทานที่ทำให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงระหว่างขั้วไฟฟ้าอ้างอิงกับขั้วไฟฟ้าทำงาน ในบางครั้งอาจแทนด้วย R นอกจากนี้ค่าความต้านทานนี้ยังขึ้นกับการเหนี่ยวนำของเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนและลักษณะของขั้วอิเล็กโทรดอีกด้วย
- Charge Transfer Resistance, R_{ct} จากการที่ขั้วอิเล็กโทรดมีความเป็นขั้วมากขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดถูกบังคับให้เลื่อนไปจากศักย์ไฟฟ้าขณะวงจรเปิดเนื่องมาจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีนั้นจะทำให้มีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้า

ขนาดของกระแสไฟฟ้าจะถูกควบคุมโดยพลศาสตร์ของปฏิกิริยา และการแพร่เข้า-ออกของสารตั้งต้นที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรด โดยที่ R_{ct} จะมีความสัมพันธ์กับสมการของทาเฟลดังสมการที่ (2.23)

$$R_{ct} = \left(\frac{RT}{\alpha n F} \right) \frac{1}{i_0 e^{cnF\eta_{act}/(RT)}} \quad (2.23)$$

โดยที่	α	คือ ค่าคงที่การถ่ายโอนประจุ
	i_0	คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง
	n	คือ จำนวนอิเล็กตรอน
	η_{act}	คือ ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน
	T	คือ อุณหภูมิ
	R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส
	F	คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์

จากสมการที่ (2.23) จะเห็นว่าค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุสามารถลดลงได้เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงและค่าของศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินมีค่าเพิ่มขึ้น

2.4.2 ตัวเก็บประจุ (Capacitance, C) ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุแสดงได้ดังสมการ (2.24) ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์นี้จะขึ้นกับค่าความถี่และจะมีเพียงส่วนจินตภาพเท่านั้น และเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุจะมีค่าลดลง กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีเฟสเลื่อนเป็น -90° เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้า ตัวอย่างของตัวเก็บประจุที่ใช้อธิบายระบบไฟฟ้าเคมี ได้แก่

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \quad (2.24)$$

- Double Layer Capacitance, C_{dl} จาก การ ที่ บริเวณ รอยต่อ ของ ขั้วอิเล็กโทรด และ เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนชั้นประจุเชิงคู่ (Double layer) เกิดขึ้น ซึ่งชั้นประจุเชิงคู่นี้จะเปรียบเสมือนที่เก็บประจุจากสารละลายที่เคลื่อนที่ไปยังบริเวณพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งประจุเหล่านี้จะแยกออกมาจากประจุที่ขั้วอิเล็กโทรด ค่าตัวเก็บประจุที่ชั้นเชิงคู่นี้จะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายๆอย่าง ไม่ว่าจะเป็นศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรด อุณหภูมิ ความหนาแน่นของประจุ ชนิดของประจุ และความบริสุทธิ์ของสาร เป็นต้น

2.4.3 Constant Phase Element, CPE ในการอธิบายของระบบไฟฟ้าเคมีนั้นมักจะใช้ตัวเก็บประจุอุดมคติ นั่นคือสมมติให้ลักษณะของพื้นผิวที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเดียวกันตลอดทั้งแผ่น ซึ่งปกติแล้วจะเป็นไปไม่ได้ ดังนั้นจึงมีการใช้ CPE อธิบายในส่วนที่ไม่เป็นลักษณะเดียวกันของพื้นผิวดังแสดงในสมการที่ (2.25)

$$Z = \frac{1}{(j\omega C)^\alpha} \quad (2.25)$$

เมื่อ C คือตัวเก็บประจุอุดมคติ และ α คือค่าคงที่ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 - 1 โดยค่า $\alpha = 1$ ตัว CPE จะทำหน้าที่เสมือนกับตัวเก็บประจุอุดมคตินั่นเอง

2.4.4 อิมพีแดนซ์แบบวาร์เบิร์ก (Warburg Impedance, Z_{war}) ค่าอิมพีแดนซ์แบบวาร์เบิร์กเป็นอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำ แสดงถึงชั้นการแพร่ที่ไม่จำกัดขอบเขต (Infinite diffusion or Warburg diffusion) ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าดังสมการ (2.26)

$$Z = \frac{R}{\sqrt{j\omega}} \quad (2.26)$$

2.4.5 อิมพีแดนซ์แบบแทนเจนต์ (Tangent impedance) ค่าอิมพีแดนซ์แบบแทนเจนต์เป็นอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำ แสดงถึงชั้นการแพร่ที่จำกัดขอบเขต (Finite diffusion) ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าดังสมการ (2.27)

$$Z = R \frac{\tanh \sqrt{j\omega\tau}}{\sqrt{\tau}} \quad (2.27)$$

$$\tau = \frac{\delta^2}{D} \quad (2.28)$$

เมื่อ R คือ ความต้านทานในการแพร่

δ คือ ความหนาของชั้นการแพร่

τ คือ ค่าคงที่ของเวลาในการแพร่

D คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่

2.4.6 ขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductance, L) ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำดังสมการ (2.29) โดยค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น และจะมีเพียงส่วน

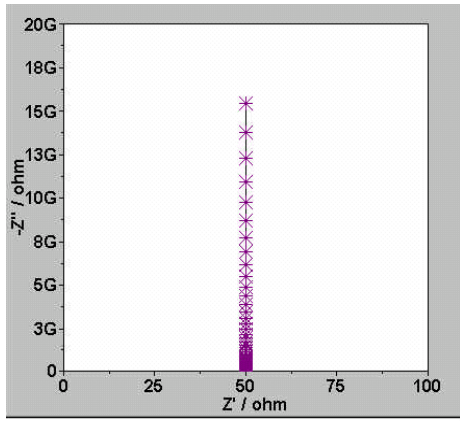
จินตภาพเท่านั้นเหมือนตัวเก็บประจุ แต่กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำจะมีเฟสเลื่อนเป็น $+90^\circ$ เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้า

$$Z = j\omega L \quad (2.29)$$

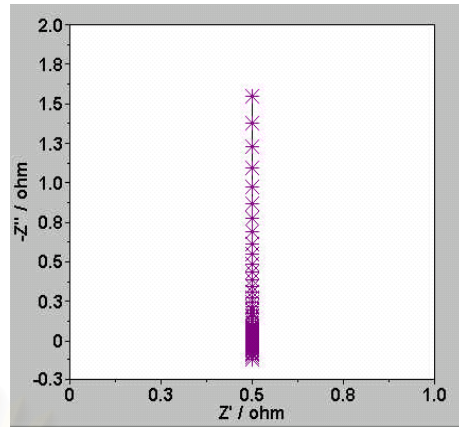
ค่าอิมพีแดนซ์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีบางครั้งก็เป็นผลมาจากการดูดซึมของสารตั้งต้นบนพื้นผิว ซึ่งจะสามารถสร้างแบบจำลองโดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำแทนได้นั่นเอง นอกจากนี้การเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นผลมาจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของกระแสไฟฟ้า การตอบสนองที่ช้าของขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิง ในกรณีนี้อาจจะสามารถอธิบายถึงผลของการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นได้ว่ามีสาเหตุมาจากข้อผิดพลาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดได้นั่นเอง

2.4.7 รูปแบบของอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นในลักษณะต่างๆ

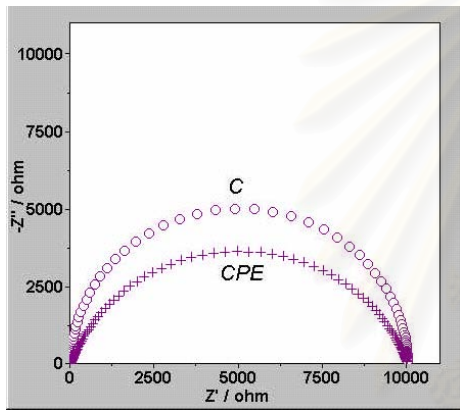
รูปที่ 2.9 (ก) แสดงถึง Nyquist plot ของระบบที่ประกอบไปด้วยความต้านทานโอห์มมิกต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุเท่านั้น โดยรูปแบบนี้จะเกิดขึ้นกับระบบที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบโลหะ (Coating) รูปที่ 2.9 (ข) เป็นระบบที่ประกอบไปด้วยความต้านทานโอห์มมิก ตัวเก็บประจุ และขดลวดเหนี่ยวนำ โดยที่ทั้ง 3 ตัวต่ออนุกรมกัน สำหรับอิมพีแดนซ์ลักษณะนี้จะเกิดขึ้นกับระบบของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor) รูปที่ 2.9 (ค) เป็นรูปแบบพื้นฐานที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงและระบบการกัดกร่อน (Corrosion) ซึ่งจะประกอบไปด้วยความต้านทานโอห์มมิก ความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุและตัวเก็บประจุหรือ CPE รูปที่ 2.9 (ง) แสดงถึงลักษณะของอิมพีแดนซ์ที่สัมพันธ์กับการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าและการแพร่ของสารตั้งต้นที่เข้าไปทำปฏิกิริยาโดยดูได้จากบริเวณความถี่ต่ำจะเห็นเส้นตรงทำมุม 45 องศา ซึ่งเรียกอิมพีแดนซ์บริเวณความถี่ต่ำนี้ว่าอิมพีแดนซ์แบบวาร์เบิร์ก รูปที่ 2.9 (จ) เป็นอิมพีแดนซ์ของระบบเคมีไฟฟ้าที่มีขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว เช่น แบตเตอรี่และเซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น รูปที่ 2.9 (ฉ) เป็นอิมพีแดนซ์ของการเคลือบสารอินทรีย์บนผิวของโลหะโดยการจุ่มลงในสารละลาย



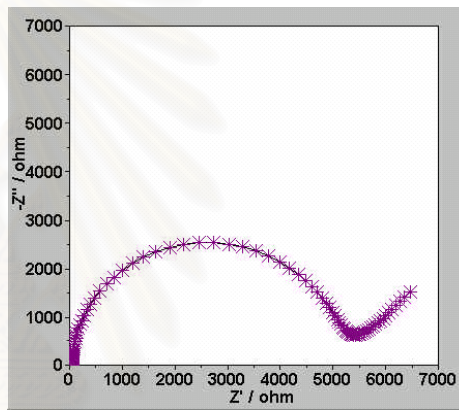
(ก)



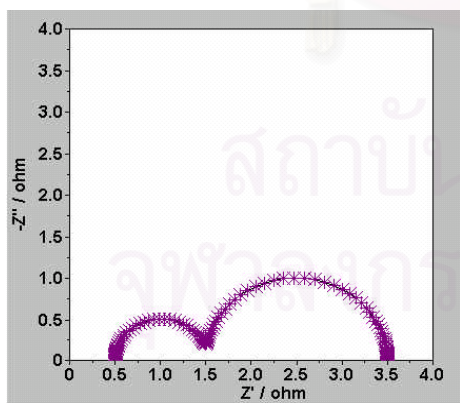
(ข)



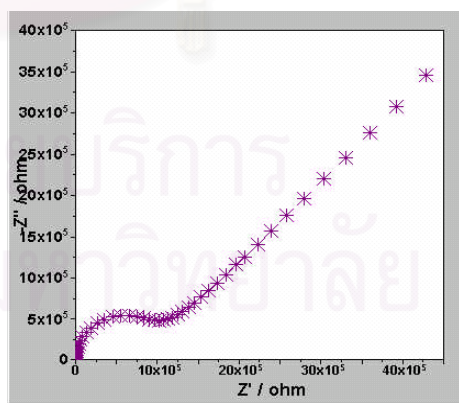
(ค)



(ง)

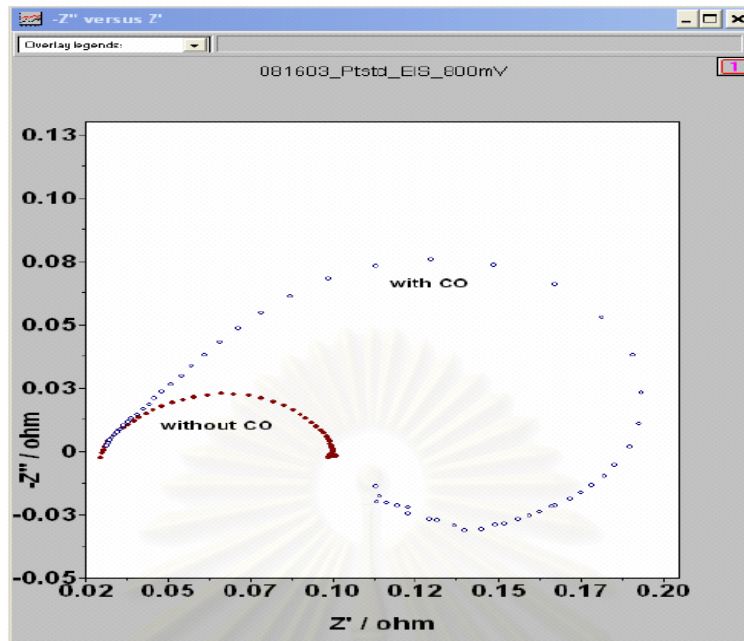


(จ)



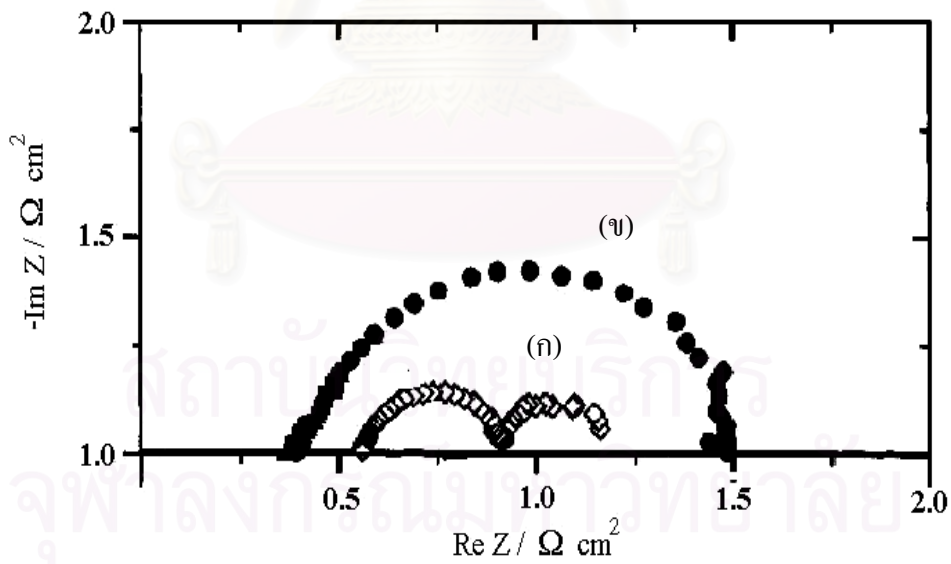
(ฉ)

รูปที่ 2.9 รูปแบบอิมพีแดนซ์ของระบบเคมีไฟฟ้า [Application notes: Electrochemical impedance spectroscopy (On-line)]



รูปที่ 2.10 รูปแบบของอิมพีแดนซ์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิง

[Application notes: Electrochemical impedance spectroscopy (On-line)]

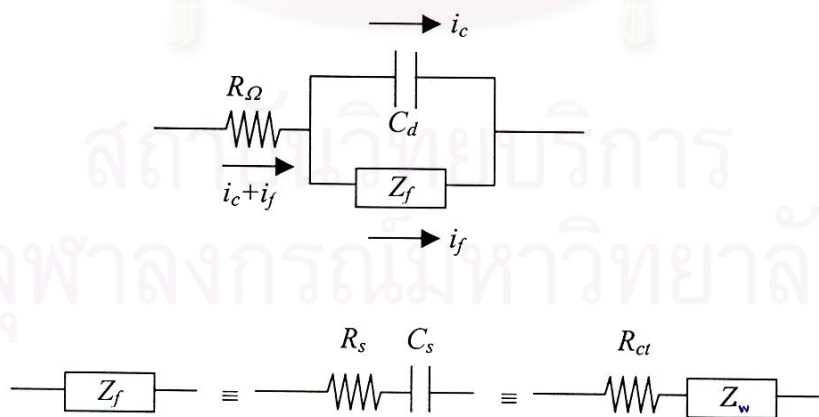


รูปที่ 2.11 รูปแบบของอิมพีแดนซ์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่เกิดน้ำท่วม [Freire และคณะ, 2001]

รูปที่ 2.10 แสดงถึงลักษณะของอิมพีแดนซ์ที่มีสารปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิง เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยจะสังเกตเห็นลักษณะการโค้งกลับของอิมพีแดนซ์ที่บริเวณความถี่ต่ำ และรูปที่ 2.11 แสดงถึงลักษณะของอิมพีแดนซ์ที่เกิดน้ำท่วมภายในเซลล์เชื้อเพลิง โดยดูได้จากอิมพีแดนซ์ที่บริเวณความถี่ต่ำ ซึ่งสามารถเกิดได้ 2 ลักษณะคือ เกิดเป็นส่วนโค้งที่บริเวณความถี่ต่ำดังรูปที่ 2.11 (ก) ซึ่งคล้ายกับรูปที่ 2.9 (จ) แต่มีความแตกต่างเล็กน้อยตรงที่รูปที่ 2.9 (จ) จะมีความเป็นระเบียบมากกว่าและส่วนโค้งที่เกิดขึ้นจะเกิดที่ความถี่สูงกว่า อีกรูปแบบหนึ่งคือไม่เกิดเป็นส่วนโค้ง แต่อิมพีแดนซ์ที่ปรากฏที่บริเวณความถี่ต่ำจะไม่เป็นระเบียบและไม่มียูรูปแบบดังรูปที่ 2.11 (ข)

2.5 วงจรสมมูลทางไฟฟ้า

แบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ที่นิยมใช้คือ วงจรสมมูลแบบแรนเดิลส์ (Randles equivalent circuit, RC) ซึ่งประกอบไปด้วย ความต้านทานอันเนื่องมาจากสารละลาย ค่าตัวเก็บประจุเชิงคู่และค่าอิมพีแดนซ์แบบฟาราเดย์ (Faradaic impedance) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.12 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบนี้ถูกนำมาใช้ในระบอบที่มีการกักครอบงำ และมักถูกใช้เป็นจุดเริ่มต้นสำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เมื่อ i_c คือ กระแสไฟฟ้าที่ขึ้นเชิงคู่ i_f คือ กระแสไฟฟ้าของฟาราเดย์ C_d คือ ตัวเก็บประจุ Z_f คือ อิมพีแดนซ์ของฟาราเดย์ R_s คือ ความต้านทานที่เกิดขึ้นในอิมพีแดนซ์ของฟาราเดย์ C_s คือ ตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นในอิมพีแดนซ์ของฟาราเดย์ R_{ct} คือ ความต้านทานเนื่องจากการถ่ายเทประจุ Z_w คือ ความต้านทานเนื่องจากการถ่ายเทมวล



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของเซลล์ไฟฟ้าเคมีและการแยกย่อย Z_f เป็น R_s และ C_s หรือ R_{ct} และ Z_w

[Allen, 2000]

2.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

2.6.1 การแจกแจงแบบ F

การแจกแจงแบบ F เป็นการแจกแจงที่มีตัวแปรสุ่มอิสระ 2 ตัวที่มีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ v_1 และ v_2 ตามลำดับ การแจกแจงประเภทนี้มีความสำคัญอย่างมากในการวิเคราะห์สถิติเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง เช่น ถ้ามีข้อมูลจากประชากรที่เป็นอิสระต่อกัน 2 ชุดที่มีค่าความแปรปรวนลักษณะเดียวกัน ถ้าตัวอย่างชุดที่ 1 มีประชากร อยู่ n_1 และตัวอย่างชุดที่ 2 มีประชากร อยู่ n_2 ดังนั้นระดับชั้นความเสรีของทั้งตัวอย่างชุดที่ 1 และชุดที่ 2 คือ n_1-1 และ n_2-1 ตามลำดับ [ปารเมศ, 2545]

2.6.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

คำว่า “การวิเคราะห์ความแปรปรวน” มาจากความหมายของการแบ่งความแปรปรวนทั้งหมดออกเป็นส่วนประกอบย่อย ๆ จะได้ว่า Total corrected sum of square (SS_T) [Montgomery, 2001] คือ

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 \quad (2.30)$$

โดยที่ y_{ij} คือ ค่าผลตอบสนองที่ได้จากการสังเกต
 $\bar{y}_{..}$ คือ ค่าเฉลี่ยทั้งหมดของค่าผลตอบสนอง

จากสมการที่ (2.30) ค่าของ SS_T สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \quad (2.31)$$

โดยที่ $\bar{y}_{i.}$ คือ ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองในแถวที่ i
 a คือ จำนวนระดับการทดลอง
 n คือ จำนวนการทดลองในแต่ละระดับ

จากสมการที่ (2.31) จะเห็นว่าความแปรปรวนทั้งหมดของข้อมูล (SS_T) สามารถแบ่งออกเป็นส่วนของผลรวมกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับกับค่าเฉลี่ยรวม รวมกับผลรวมของกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตภายในระดับกับค่าเฉลี่ยของระดับนั้น

ค่าของความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตเฉลี่ยของแต่ละระดับกับค่าเฉลี่ยรวม คือ ตัววัดความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของระดับ ในขณะที่ความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตภายในระดับกับค่าเฉลี่ยของระดับ คือ ความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random error) ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ (2.31) ใหม่ได้เป็นสมการที่ (2.32) ซึ่งค่า $SS_{Treatment}$ เรียกว่า ผลรวมของกำลังสองที่เกิดเนื่องจากระดับต่างๆ และ SS_E เรียกว่าผลรวมของกำลังสองที่เกิดเนื่องจากการผิดพลาด เนื่องจากมีค่าสังเกตทั้งหมด $an=N$ ค่า ดังนั้น SS_T จะมี $N-1$ ระดับขั้นความเสรี ปัจจัยที่กำลังพิจารณาอยู่จะมี a ระดับ (และมีขัณภูมิของระดับจะมี a ค่า) ดังนั้น $SS_{Treatment}$ มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ $a-1$ และภายในทุก ๆ ระดับจะมี n เพลทเกิด ทำให้มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ $n-1$ สำหรับการประมาณความผิดพลาดในการทดลอง ดังนั้นถ้าปัจจัยมี a ระดับ จะมีระดับขั้นความเสรีสำหรับความประมาณ $a(n-1) = an-a = N-a$

$$SS_T = SS_{Treatment} + SS_E \tag{2.32}$$

ส่วนค่ากำลังสองเฉลี่ย (MS) ของแต่ละส่วนคำนวณได้โดยการนำค่าผลรวมของกำลังสองของทั้ง 2 ส่วนหารด้วยระดับขั้นความเสรี แสดงดังสมการที่ (2.33) และ (2.34) การวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 2.3

$$MS_{Treatment} = SS_{Treatment} / (a - 1) \tag{2.33}$$

และ
$$MS_E = SS_E / (N - a) \tag{2.34}$$

ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียว แบบจำลองผลกระทบคงที่ [Montgomery, 2001]

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F_0
Between treatments	$SS_{Treatments}$	$a-1$	$MS_{Treatments}$	$F_0 = \frac{MS_{Treatments}}{MS_E}$
Error (within treatments)	SS_E	$N-a$	MS_E	
Total	SS_T	$N-1$		

2.6.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ในกรณีเช่นนี้ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด [ปารเมศ, 2545]

2.6.4 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัยซึ่งต้องการที่จะศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น กรณีพิเศษของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ สูง หรือ ต่ำ ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการมีหรือไม่มีของปัจจัยนั้นๆ ก็ได้ ใน 1 เพลทเคตที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น 2^k ข้อมูล และเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k รูปแบบทั่วไปของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ที่มี n เพลทเคตจะแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 รูปแบบทั่วไปของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k [Montgomery, 2001]

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom
k main effects		
A	SS_A	1
B	SS_B	1
.	.	.
.	.	.
K	SS_K	1
two-factor interactions		
AB	SS_{AB}	1
AC	SS_{AC}	1
.	.	.
.	.	.
JK	SS_{JK}	1
three-factor interactions		
ABC	SS_{ABC}	1
ABD	SS_{ABD}	1
.	.	.
.	.	.
IJK	SS_{IJK}	1
.	.	.
.	.	.
k-factor interactions		
ABC...K	$SS_{ABC...K}$	1
Error	SS_E	$2^k(n-1)$
Total	SS_T	$n2^k-1$

100 ซึ่งจะกำหนดค่าต่างๆ ได้ดังนี้

$$Contrast_{AB...K} = (a \pm 1)(b \pm 1) \cdots (k \pm 1) \quad (2.35)$$

$$\text{Effect estimate} = AB \cdots K = \frac{2}{n2^k} (\text{contrast}_{AB...K}) \quad (2.36)$$

$$SS_{AB\dots K} = \frac{2}{n2^k} (\text{contrast}_{AB\dots K})^2 \quad (2.37)$$

โดยที่ n แทนจำนวนของเรพลีเคต

2.6.5 การเพิ่มจุดศูนย์กลางให้แก่การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

ประการสำคัญในการใช้งานการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k คือ สมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของผลที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่าง ๆ แน่แน่นอนว่าความเป็นเชิงเส้นอย่างสมบูรณ์แบบไม่ได้เป็นสิ่งจำเป็นมากมายนัก และระบบการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ยังคงทำงานได้ค่อนข้างดีแม้ในกรณีที่สมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นเชิงเส้นจะเป็นได้เพียงโดยประมาณเท่านั้น ในความเป็นจริงแล้วจะสังเกตเห็นว่า ถ้าพจน์ของอันตรกิริยาถูกเติมเข้าไปในผลหลักหรือแบบจำลองขั้นแรก (First-order model) นั่นคือ

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.38)$$

โดยที่ β_j คือ สัมประสิทธิ์ของตัวแปรหลักในแบบจำลองสมการถดถอย

β_{ij} คือ สัมประสิทธิ์ของอันตรกิริยาในแบบจำลองสมการถดถอย

x คือ ตัวแปรที่ถูกเข้ารหัส

ε คือ ค่าความผิดพลาด

ดังนั้นมีแบบจำลองที่สามารถแสดงส่วนโค้งบางประการในฟังก์ชันของผลตอบ ส่วนโค้งนี้เกิดจากผลของอันตรกิริยา $\beta_{ij} x_i x_j$ นั่นเอง มีบางกรณีเช่นกันที่ส่วนโค้งในฟังก์ชันผลตอบไม่เพียงพอที่จะสร้างสมการของแบบจำลองตามแบบสมการที่ (2.39) ได้ ในกรณีเช่นนี้แบบจำลองที่เหมาะสมกว่าคือ

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \varepsilon \quad (2.39)$$

โดยที่ β_{jj} จะแสดงผลขั้นที่สอง (Second-order effect) หรือผลแบบกำลังสอง (Quadratic effect) และสมการ (2.39) นี้เรียกว่าแบบจำลองพื้นผิวผลตอบขั้นที่สอง (Second-order response surface model) ค่าผลรวมกำลังสองสำหรับส่วนโค้งแบบกำลังสองบริสุทธิ์ (Pure quadratic Curvature, $SS_{\text{pure quadratic}}$) ซึ่งมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 1 หาได้จาก

$$SS_{\text{Pure quadratic}} = \frac{n_F n_C (\bar{y}_F - \bar{y}_C)^2}{n_F + n_C} \quad (2.40)$$

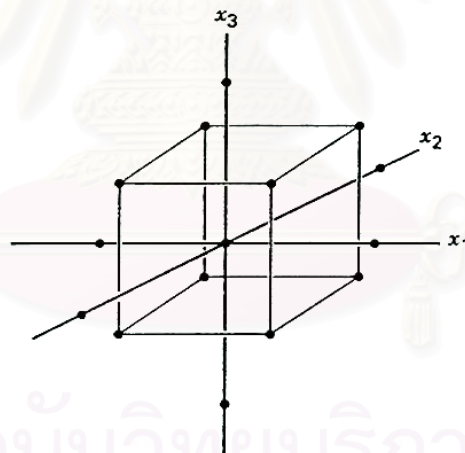
โดยที่ n_F คือ จำนวนของจุดในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล

n_C คือ จำนวนข้อมูลที่จุดศูนย์กลาง

\bar{y}_F คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

\bar{y}_C คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่จุดศูนย์กลาง

จากสมการที่ (2.40) ทำให้ทราบว่าพจน์ของกำลังสองจะมีผลต่อค่าผลตอบหรือไม่ ถ้าพจน์ของกำลังสองมีผลต่อค่าผลตอบจึงจำเป็นที่จะต้องประมาณค่าของพารามิเตอร์ β_{ij} แต่ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k แบบเพิ่มจุดศูนย์กลางจะไม่สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ตัวนี้ได้เนื่องจากมีข้อมูลไม่เพียงพอที่จะใช้ในการประมาณ วิธีการง่าย ๆ ในการแก้ไขปัญหานี้ก็คือนำการเติมการทดลองตามแนวแกน (Axial run) ลงไปในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ดังในรูปที่ 2.13 ซึ่งผลของการออกแบบเช่นนี้เรียกว่า การออกแบบรูปผสมจุดศูนย์กลาง (Central composite design, CCD)



รูปที่ 2.13 การออกแบบรูปผสมจุดศูนย์กลางสำหรับ 3 ตัวแปร [Montgomery, 2001]

2.6.6 แบบจำลองการถดถอย (Regression model) [ปารเมศ, 2545]

แบบจำลองการถดถอยแสดงได้ดังสมการ (2.40) ซึ่งพจน์ต่างๆในสมการจะได้มาจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยตัวแปรหรืออันตรกิริยาระหว่างตัวแปรที่มีผลกระทบมากกับค่าจากการทดลองจะถูกนำมาเขียนในสมการ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ β_0 คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด และค่า

สัมประสิทธิ์ $\beta_{i...k}$ จะเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าประมาณผลกระทบ (Effect estimate) เนื่องจากว่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอยจะเป็นตัววัดผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของ x หนึ่งหน่วยต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของ y และผลที่ประมาณได้นี้ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลง 2 หน่วย (จาก -1 ไป +1)

แบบจำลองของการถดถอยสามารถใช้ในการหาค่าจากการทำนาย (Predicted value) ได้ และค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของการออกแบบจะเท่ากับผลต่างของค่าจากการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งค่าส่วนตกค้างนี้จะสามารถนำไปวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของแบบจำลอง (Model adequacy) โดยการเขียนกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal probability plot) ต่อไปได้

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.41)$$

2.6.7 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง [ปารเมศ, 2545]

- **สมมติฐานของความเป็นปกติ**

การตรวจสอบสมมติฐานของความเป็นปกติสามารถทำได้โดยการวาดฮิสโทแกรมของส่วนตกค้าง คือการสร้างกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง ขั้นตอนการสร้างกราฟดังกล่าวนี้มีประโยชน์อย่างมาก และทำได้โดยตรงไปตรงมา ถ้าหากการแจกแจงของความผิดพลาดเป็นแบบปกติ กล่าวคือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และมีค่าความแปรปรวนคงที่ค่าหนึ่ง กราฟที่สร้างขึ้นมานี้จะเป็นเส้นตรง

- **การพล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต**

ถ้าหากแบบจำลองถูกต้องและสมมติฐานมีความเหมาะสมแล้ว ส่วนตกค้างที่เกิดขึ้นไม่ควรจะมีรูปแบบหรือโครงสร้างใด ๆ ทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่ควรจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด รวมถึงค่าผลตอบที่ถูกทำนาย (Predicted response) อีกด้วย การตรวจสอบอย่างง่าย ๆ คือ การพล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted value) กราฟที่ได้จากการพล็อตนี้ไม่ควรจะมีรูปร่างเฉพาะแต่อย่างใด

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Eikerling และคณะ (1999) พบว่าถ้าระยะทางในการถ่ายโอนเชื้อเพลิงมากเมื่อเทียบกับความหนาของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยอิมพีแดนซ์จะเป็นรูปครึ่งวงกลม และพบว่าที่ความถี่สูง ๆ การถ่ายโอนโปรตอนจะเป็นตัวกำหนดปฏิกิริยา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้า (0.5 - 0.9 V) พบว่าจะเกิดการลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลของความต้านทานเนื่องจากการถ่ายเทประจุ

Freire และคณะ (2001) ศึกษาผลของความหนาของชั้นเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน พบว่าเมื่อใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่บาง เซลล์จะมีความไวต่ำ (Less sensitive) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของระบบ ถ้าใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีความหนาเพิ่มขึ้นจาก 51 μm เป็น 254 μm จะทำให้เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีความต้านทานสูงขึ้นจาก 7.42 Ωcm^2 ไปเป็น 11 Ωcm^2 เมื่อใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีน้ำหนักเฉลี่ย (Equivalence weight) สูง จะทำให้ระบบมีความต้านทานเนื่องจากการถ่ายเทประจุเพิ่มขึ้น เช่น ถ้าใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นจาก 1000 g/mol ไปเป็น 1200 g/mol จะทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้นจาก 8.5 m Ω ไปเป็น 16.1 m Ω เนื่องจากการขาดแคลนน้ำภายในเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

Andreus และคณะ (2002) ศึกษาสมรรถนะที่ลดลงของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนขนาด 28 ตารางเซนติเมตรที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง โดยทดลองตัวแปรคือ ความหนาของเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเท่ากับ 51, 89, 127, 178 และ 254 ไมโครเมตร ที่ภาวะเมมเบรนแห้ง และปริมาณความชื้นภายในระบบโดยทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอุปกรณ์ให้ความชื้น ทำการวัดค่าความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิงและแสดงผลในรูปของกราฟอิมพีแดนซ์พบว่าเมื่อความหนาของเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเพิ่มขึ้นทำให้ความต้านทานในการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเมมเบรนมีมากขึ้น และส่งผลในการแพร่ของน้ำจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดทำได้ยาก ซึ่งทำให้เกิดการท่วมของน้ำที่ขั้วแคโทดได้ ในส่วนของปริมาณความชื้นภายในระบบ ถ้าความชื้นไม่เพียงพอนอกจากจะทำให้การเคลื่อนที่ของโปรตอนไม่ดีแล้ว ยังส่งผลให้เกิดโพลาไรเซชันทางเคมีได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ขั้วแคโทด เนื่องจากถ้ามีความชื้นในแอโนดน้อยจะไม่มีน้ำเพียงพอที่จะพาโปรตอนข้ามเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนผ่านไปยังแคโทดได้ ในส่วนของขั้วแคโทดเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ปริมาณน้ำที่ได้จากปฏิกิริยารีดักชันจะมีมากขึ้น ทำให้เกิดการท่วมของน้ำที่ผิวของขั้วไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดความต้านทานในการแพร่ของออกซิเจนที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้ามากขึ้น

พัฒน์พงษ์ (2545) ได้ศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ผลการทดลองพบว่าอัตราการไหลของแก๊ส อุณหภูมิ ionic ประกอบของสาร

ออกซิไดส์ ความชื้น และความดัน มีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงโดยส่งผลกระทบต่อเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานและความเข้มข้น ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสมมูลของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะลดลงเมื่ออัตราการไหลของแก๊สและอุณหภูมิการทำงานเพิ่มขึ้น สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ออกซิเจนเป็นสารออกซิไดส์จะดีกว่าที่ใช้อากาศเป็นสารออกซิไดส์ ในส่วนของความดันมีผลต่อสมมูลของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

Romero-Castañón และคณะ (2003) ทำการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนด้านแคโทดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าโดยใช้อิมพีแดนซ์ เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้มีพื้นที่ทำปฏิกิริยาขนาด 5 ตารางเซนติเมตร ใช้ลวด Pt เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ใช้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเป็นเชื้อเพลิงโดยป้อนในอัตราส่วนที่เท่ากันและผ่านการให้ความชื้น เซลล์ทำงานที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความถี่ 10-100 กิโลเฮิร์ตซ์ ผลการทดลองพบว่าที่บริเวณความถี่สูงไม่มีความสัมพันธ์กับกระบวนการฟาราเดย์และการถ่ายเทมวลและที่ศักย์ไฟฟ้าสูงใกล้เคียงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit voltage) รูปแบบของกราฟจะไม่เห็นลักษณะเป็นครึ่งวงกลมโดยที่อิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่อย่างมาก ในทางตรงข้ามที่ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใกล้ศักย์ไฟฟ้าที่ไม่เกิดกระแสไฟฟ้าอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยไปตามความถี่ที่ให้ โดยจะเห็นกราฟมีลักษณะเป็นครึ่งวงกลม เมื่อทำการหาค่า R_{ct} กับ C_{dl} พบว่าทั้งสองค่านี้มีการเปลี่ยนแปลงไปตามศักย์ไฟฟ้า โดยที่ C_{dl} ลดลงตามศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงและจะคงที่เมื่อมีปริมาณกระแสไฟฟ้ามาก และ R_{ct} จะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลด้วย

Prasanna และคณะ (2004) ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิของอุปกรณ์ให้ความชื้นของแก๊สด้านแคโทดต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) โดยใช้อากาศป้อนทางด้านแคโทดแทนการใช้แก๊สออกซิเจนที่อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเป็น 80 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิของอุปกรณ์ให้ความชื้น 65 องศาเซลเซียส เซลล์จะให้ประสิทธิภาพการทำงานดีที่สุดและจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของอุปกรณ์ให้ความชื้นมากกว่า 75 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเกิดน้ำท่วมภายในเซลล์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

3.1.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

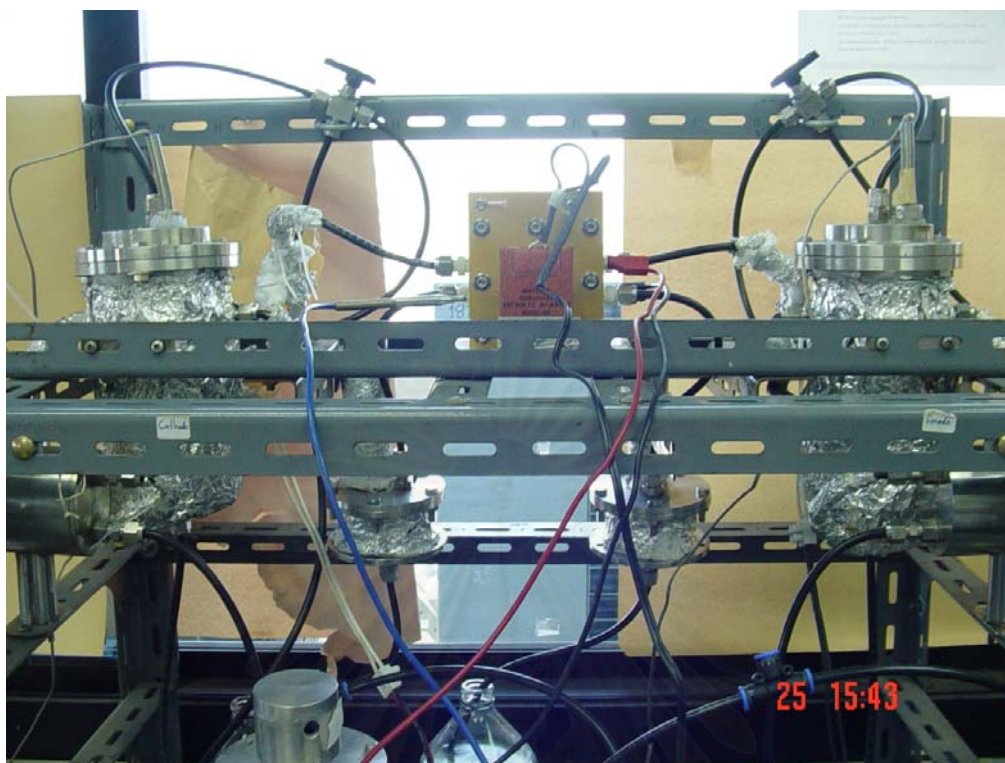
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงของบริษัท ElectroChem, Inc. จากประเทศสหรัฐอเมริกา รุ่น FC05-01SP มีพื้นที่ทำปฏิกิริยาขนาด 5 ตารางเซนติเมตร สารเร่งปฏิกิริยาคือแพลทินัมที่มีความหนาแน่น 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ใช้คือ เนฟิออน 115 ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2 หน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง (Test station) หน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย แสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้

- ระบบให้ความชื้นกับแก๊ส (Humidifier)
 - เครื่องควบคุมอัตราไหลของแก๊ส (Mass flow controller) ของบริษัท MKS Instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา รุ่น MKS Type M100B โดยมีช่วงการทำงาน 0-500 sccm
 - ชุดวาล์วขาเข้า (Intake Valve) และวาล์วขาออก (Relieve Valve) โดยวาล์วทั้งหมดเป็นวาล์วแบบ Ball Valve ขนาดท่อ ¼ นิ้ว
 - เครื่องควบคุมความดันแก๊ส (Pressure Regulator) ของบริษัท Harris ประเทศสหรัฐอเมริกา รุ่น 01-12804 ช่วงการทำงาน 0-200 บาร์
 - หน่วยควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) ของบริษัท Shimaden รุ่น SR17 ซึ่งทำหน้าที่ร่วมกับแผงรับสัญญาณ (Board Lab PC) ของบริษัท National Instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา และมีแผงสวิตช์ควบคุมกระแสไฟฟ้าซึ่งมีการติดตั้ง Solid State Relay ของบริษัท Carlo Gavazzi รุ่น RS1A23D10
3. เครื่องตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen Detector) ของบริษัท Oldham รุ่น TX2000
 4. โถดูดความชื้น

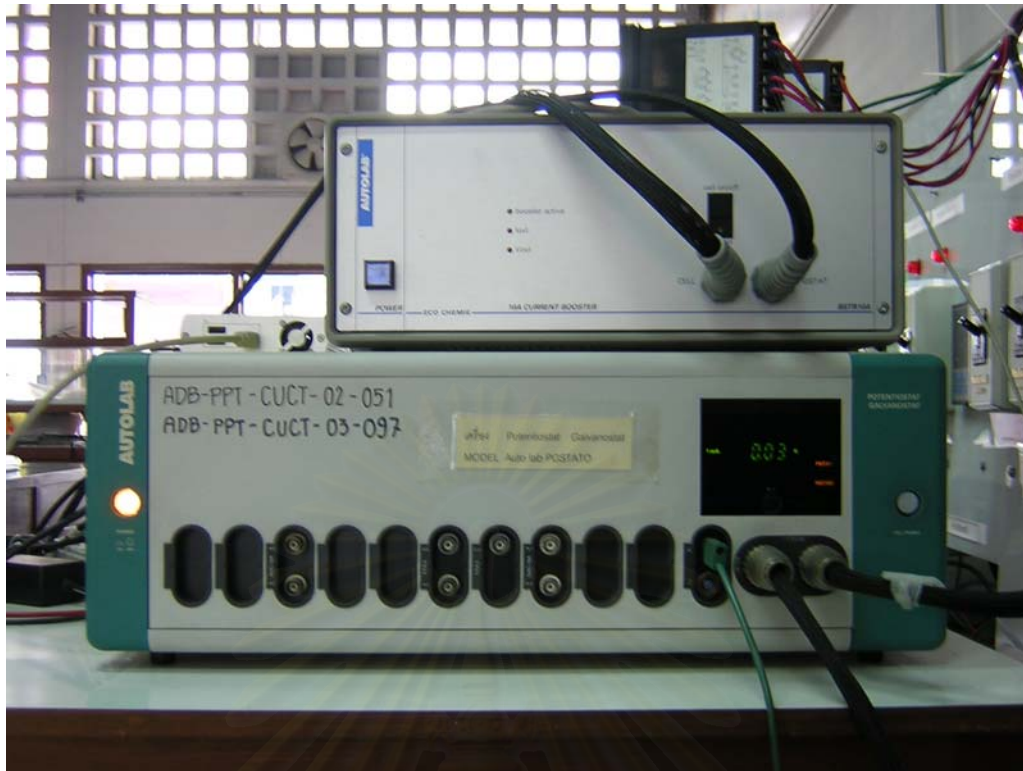


รูปที่ 3.2 หน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

เครื่องมือหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง คือ เครื่อง Potentiostat/Galvanostat รุ่น PG STATO 30 และเครื่อง booster รุ่น BSTR10A ของบริษัท AUTOLAB ดังรูปที่ 3.3 และใช้โปรแกรม Frequency Response Analyzer (FRA) ในการวัดอิมพีแดนซ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 เครื่อง Potentiostat/Galvanostat ที่ใช้ในการทดลอง

3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อสาร	บริษัท
แก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen 99.999 %)	Praxair
แก๊สออกซิเจน (Oxygen 99.99 %)	Praxair
แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen 99.99 %)	Praxair

3.4 ภาวะที่ใช้ในการทดลอง

1. อุณหภูมิการทำงาน 39-70 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ โดยแก๊สที่ป้อนเข้าฝั่งแอโนดมีค่าร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 ส่วนแก๊สที่ป้อนเข้าฝั่งแคโทดมีค่าร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 60
2. เซลล์ทำงานในระบบการป้อนแก๊สออกซิเจนและแก๊สไฮโดรเจน

3. ความถี่ที่ใช้ในช่วง 50 มิลลิเฮิร์ตซ์ - 10 กิโลเฮิร์ตซ์
4. ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในช่วง 0.55 - 0.8 โวลต์
5. อัตราการป้อนแก๊สไฮโดรเจนเข้าทางฝั่งขั้วแอโนดอยู่ในช่วง 80 - 200 sccm
6. อัตราการป้อนแก๊สออกซิเจนเข้าทางฝั่งขั้วแคโทดอยู่ในช่วง 80 - 200 sccm

3.5 ขั้นตอนการทำวิจัย

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในทางการค้าโดยใช้ EIS โดยออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล โดยปัจจัยที่ทำการศึกษามีดังนี้
 - A คือ อัตราการไหลของไฮโดรเจน ต่ำสุดที่ 80 sccm (-) และสูงสุดที่ 200 sccm (+)
 - B คือ อัตราการไหลของออกซิเจน ต่ำสุดที่ 80 sccm (-) และสูงสุดที่ 200 sccm (+)
 - C คือ อุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิง ต่ำสุดที่ 39 องศาเซลเซียส (-) และสูงสุดที่ 70 องศาเซลเซียส (+)
 - D คือ ศักย์ไฟฟ้า ต่ำสุดที่ 0.55 โวลต์ (-) และสูงสุดที่ 0.8 โวลต์ (+)
2. วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในการทำงานและความต้านทานในระบบ
3. วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผล

ตารางที่ 3.1 การออกแบบการทดลอง

ลำดับที่	การทดลอง	A	B	C	D
1	1	-	-	-	-
2	a	+	-	-	-
3	b	-	+	-	-
4	ab	+	+	-	-
5	c	-	-	+	-
6	ac	+	-	+	-
7	bc	-	+	+	-
8	abc	+	+	+	-
9	d	-	-	-	+
10	ad	+	-	-	+
11	bd	-	+	-	+
12	abd	+	+	-	+
13	cd	-	-	+	+
14	acd	+	-	+	+
15	bcd	-	+	+	+
16	abcd	+	+	+	+

3.6 วิธีการทดลอง

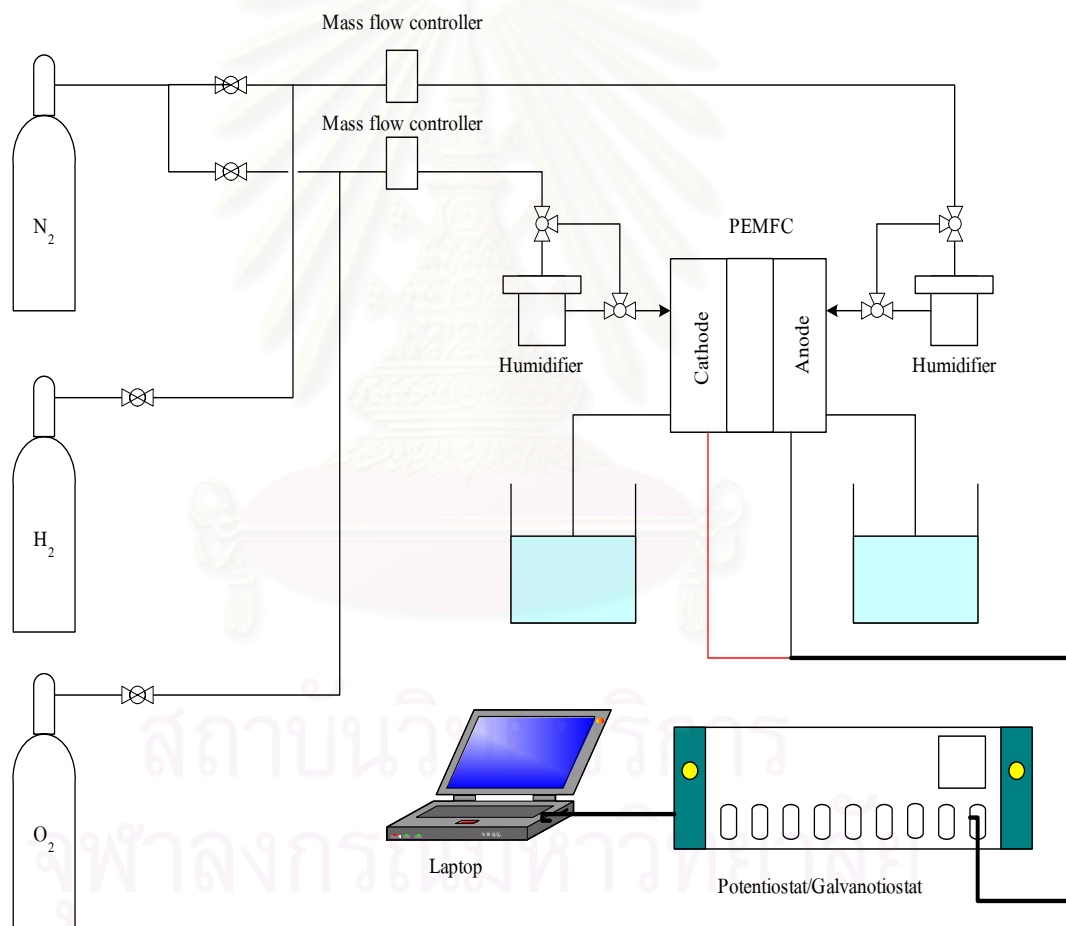
3.6.1 การทดสอบสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า

1. ตรวจสอบวาล์วขาเข้าของแก๊สแต่ละชนิดให้เปิด-ปิดอยู่ในทิศทางตามต้องการ เพื่อป้องกันการไหลปนกันของแก๊สต่างชนิด และวาล์วขาออกให้อยู่ในตำแหน่งปิด
2. ตรวจสอบความเรียบร้อยของข้อต่อต่าง ๆ ในหน่วยทดสอบให้อยู่ในสภาพที่พร้อมทำการทดลอง
3. ตรวจสอบระดับน้ำภายในส่วนระเหยน้ำภายในระบบให้มีความชื้น โดยดูจากส่วนจัดหาน้ำให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม โดยให้ปริมาณน้ำภายในส่วนจัดหาน้ำท่วมท่อที่อยู่ด้านล่าง แต่สูงไม่ถึงท่อที่อยู่ด้านบนของส่วนจัดหาน้ำที่เชื่อมต่อกับด้านข้างของส่วนระเหยน้ำ
4. ตรวจสอบเครื่องควบคุมความดันที่หัวถังแก๊สทุกถังให้อยู่ในตำแหน่งปิด

5. ตรวจสอบว่าลวดควบคุมความดันกลับให้อยู่ในตำแหน่งปิด
6. ตรวจสอบสายไฟที่ต่อจากขั้วไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงทั้ง 2 ขั้วที่ต่อมายังเครื่อง Potentiostat/Galvanostat ว่าให้อยู่ในสภาพที่ต่อเรียบร้อย
7. ตรวจสอบเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงให้อยู่ในช่องวัดอุณหภูมิ
8. เปิดเครื่องตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนเพื่อตรวจวัดความเข้มข้นของแก๊สในกรณีที่เกิดการรั่วของแก๊สไฮโดรเจน
9. เปิดสวิตช์หลักของเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส เพื่ออุ่นเครื่องประมาณ 15 นาทีก่อนทำการทดลอง
10. เปิดสวิตช์เครื่อง Potentiostat/Galvanostat เพื่ออุ่นเครื่องประมาณ 30 นาทีก่อนทำการทดลอง พร้อมเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับทำหน้าที่บันทึกข้อมูลจากเครื่อง Potentiostat/Galvanostat กดปุ่ม Cell Enable ให้อยู่ในตำแหน่งปิด
11. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมอุณหภูมิภายในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง เปิดโปรแกรม Lab-view เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในส่วนระเหยน้ำ ตั้งค่าอุณหภูมิตามต้องการ และกดปุ่ม Start ที่โปรแกรม
12. เปิดสวิตช์ที่แผงสวิตช์ควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้าที่สวิตช์หลัก (Main Switch) แล้วจึงเปิดสวิตช์ของเครื่องควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง แล้วจึงตั้งค่าอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงตามต้องการ และเปิดสวิตช์ของตัวให้ความร้อนทุกตัวภายในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง รอจนกระทั่งอุณหภูมิได้ตามค่าที่ตั้งไว้
13. ตั้งค่าอัตราการไหลตามต้องการที่เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส ซึ่งช่องสัญญาณที่ 1 คือ แก๊สออกซิเจนหรืออากาศ และช่องสัญญาณที่ 2 คือ แก๊สไฮโดรเจน ส่วนของแก๊สใน ไตรเจนจะใช้ทั้งสองช่องสัญญาณ โดยสับทางเดินของแก๊ส โดยใช้วาล์วเข้าเป็นตัวควบคุมทิศทางการไหลของแก๊ส
14. เมื่อต้องการจะป้อนแก๊สให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ให้เปิดแก๊สที่ต้องการใช้ที่วาล์วหัวถังของแก๊ส แล้วจึงเปิดเครื่องควบคุมความดันที่หัวถังให้ได้ความดันขาออกตามต้องการ ซึ่งโดยปกติเท่ากับ 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แล้วจึงมาเปิดสวิตช์วาล์วที่เครื่องวัดอัตราการไหลแต่ละช่องสัญญาณเพื่อให้แก๊สไหลเข้าสู่หน่วยทดสอบ
15. ก่อนจะทำการทดลองควรผ่านแก๊สใน ไตรเจนให้กับหน่วยทดสอบประมาณ 60 นาที โดยตั้งอัตราการไหลของแก๊สทั้ง 2 ช่องสัญญาณไว้ที่ 200 sccm และไม่ผ่านอุปกรณ์ให้ความชื้นก่อนด้วยสาเหตุดังนี้
 - เพื่อเป็นการไล่สิ่งสกปรกค้างอยู่ภายในหน่วยทดสอบออกก่อน

- เพื่อตรวจสอบการรั่วของแก๊สโดยใช้น้ำยาในการตรวจสอบการรั่วภายใน
หน่วยทดสอบ

16. เปลี่ยนจากการป้อนแก๊สในโตรเจนไปเป็นการป้อนแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแคโทด
และแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแอโนดด้วยอัตราตามต้องการ โดยที่เปิดแก๊สทั้งสองให้
ผ่านอุปกรณ์ให้ความชื้นและปล่อยทิ้งไว้ 30 นาทีก่อนที่จะทำการบันทึกค่า
อิมพีแดนซ์
17. เปิดโปรแกรม FRA กำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าและช่วงของค่าความถี่ตามภาวะที่ใช้
18. หลังจากครบ 30 นาที กดปุ่ม Cell Enable ให้อยู่ในตำแหน่งเปิดที่เครื่อง
Potentiostat/ Galvanostat จึงกดปุ่ม Start ที่โปรแกรม FRA เพื่อเริ่มบันทึกค่า



รูปที่ 3.4 แผนภาพการไหลของแก๊สของหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

3.6.2 ขั้นตอนภายหลังการทดลอง

1. เมื่อเสร็จสิ้นการวัด ทำการบันทึกผลการทดลองที่ได้ และปิดปุ่ม Cell Enable
2. ปิดสวิตซ์วาล์วที่เครื่องวัดอัตราการไหล แล้วจึงปิดวาล์วที่หัวถังแก๊สทุกถัง
3. ปิดวาล์วขาเข้าทุกตัวและค่อย ๆ เปิดวาล์วขาออกทีละตัวเพื่อลดความดันจากแก๊สที่ค้างอยู่ในท่อระหว่างถังแก๊สกับเครื่องวัดอัตราการไหล โดยที่วาล์วขาออกจะต่อท่อลงไปยังขวดที่มีน้ำอยู่ เพื่อลดการแพร่กระจายของแก๊ส รอกจนกระทั่งแก๊สที่วัดความดันที่เครื่องควบคุมความดันที่ถังแก๊สลดลงจนถึงศูนย์ทั้งขาเข้าและขาออก แล้วจึงเปิดวาล์วขาออกของแก๊สอีกถังหนึ่ง ทำในลักษณะเดียวกัน
4. เมื่อลดความดันในท่อแก๊สหมด จึงทำการปิดวาล์วขาออกของแก๊สทุกตัว
5. ปิดสวิตซ์ของตัวให้ความร้อนทุกตัวที่แผงสวิตซ์ควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้า
6. ปิดสวิตซ์ของเครื่องควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงที่แผงสวิตซ์ควบคุมแหล่งไฟฟ้า และปิดสวิตซ์หลัก
7. กดปุ่ม Stop ที่โปรแกรม Lab-view ที่ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิในส่วนระเหยน้ำ แล้วจึงปิดโปรแกรม
8. ปิดโปรแกรม FRA แล้วจึงปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ต่อจากนั้นจึงปิดสวิตซ์ที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat

บทที่ 4

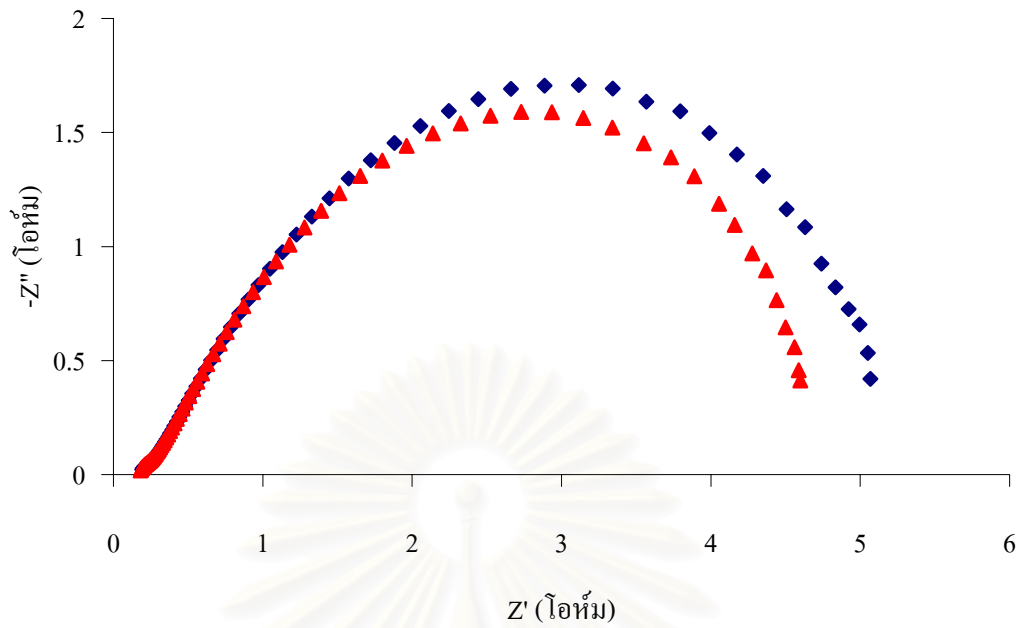
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการทดสอบประสิทธิภาพของหน่วยเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า (MEA) โดยใช้เทคนิคอิมพีแดนซ์ เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ต่อความต้านทานในระบบเซลล์เชื้อเพลิง โดยตัวแปรที่ศึกษา คือ ศักย์ไฟฟ้า อัตราการป้อนของแก๊สเชื้อเพลิงทั้งของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน อุณหภูมิภายในเซลล์ และเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัวที่จะมีต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง จึงได้ทำการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบ 2^k โดยทดลองจะทำการวัดความดันบรรยากาศ ภาวะการให้ความชื้นอิ่มตัวที่ฝั่งแอโนด และแคโทดร้อยละ 60

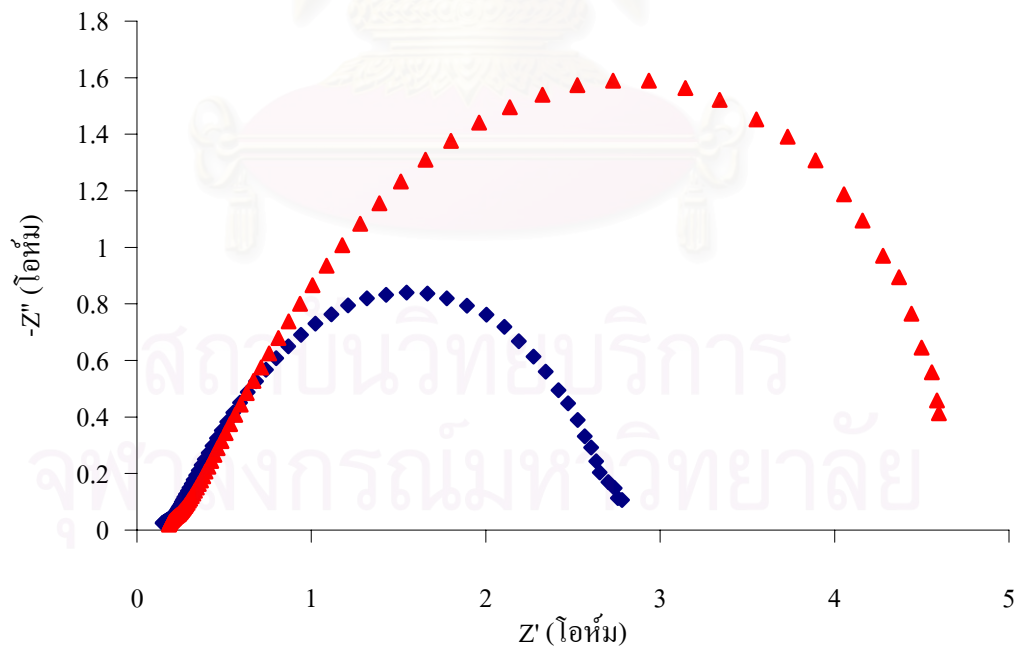
4.1 ผลของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี

รูปที่ 4.1 เป็นกราฟ Nyquist plot ที่ได้จากการทดลองที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 80 sccm และ 200 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือค่า stoichiometry ratio เท่ากับ 1:2 และ 1:0.8 ตามลำดับ ศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิเซลล์ 39 องศาเซลเซียส จากกราฟจะเห็นว่าที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนต่ำความกว้างของส่วนโค้งมีขนาดน้อยกว่าที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนสูงเนื่องจากที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนสูงน้ำที่เข้าสู่ระบบมีปริมาณมากอาจไปขวางกั้นการเข้าทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้น ในขณะที่ค่าความต้านทานโอห์มมิกไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน

รูปที่ 4.2 เป็นกราฟ Nyquist plot ที่ได้จากการทดลองที่อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 80 sccm และ 200 sccm อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 80 sccm หรือค่า stoichiometry ratio เท่ากับ 1:2 และ 1:5 ตามลำดับ ศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิเซลล์ 39 องศาเซลเซียส จากกราฟจะเห็นว่าที่อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่ำความกว้างของส่วนโค้งมีขนาดมากกว่าที่อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนสูง เนื่องจากปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจนเป็นปฏิกิริยาควบคุมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนจึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุจึงลดลง ในขณะที่ค่าความต้านทานโอห์มมิกลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนอาจเป็นผลเนื่องจากน้ำที่เข้ามาพร้อมกับแก๊สออกซิเจนและน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยามีปริมาณมากขึ้น

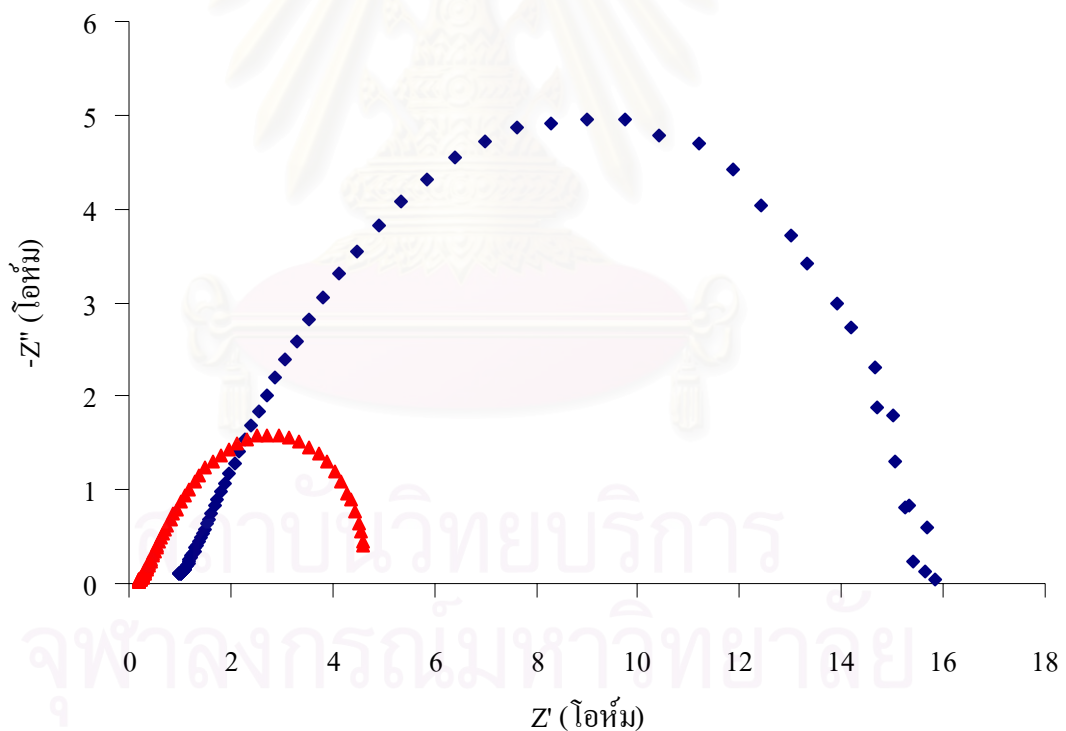


รูปที่ 4.1 Nyquist plot เปรียบเทียบผลของอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนที่ 80 sccm (\blacktriangle) 200 sccm (\blacklozenge) เมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm ศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์ อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส

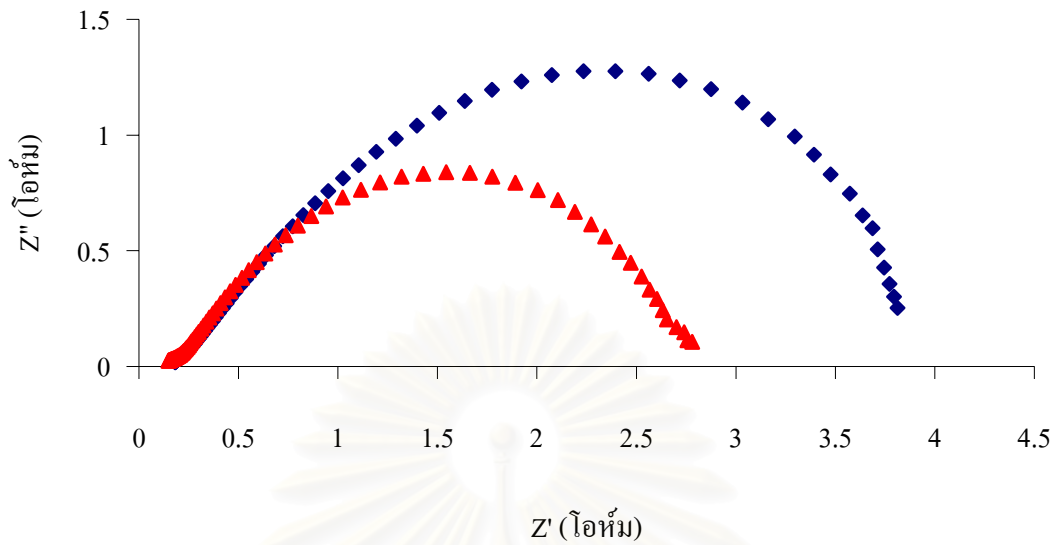


รูปที่ 4.2 Nyquist plot แก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 80 sccm ศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์ อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน (\blacktriangle) 80 sccm (\blacklozenge) 200 sccm

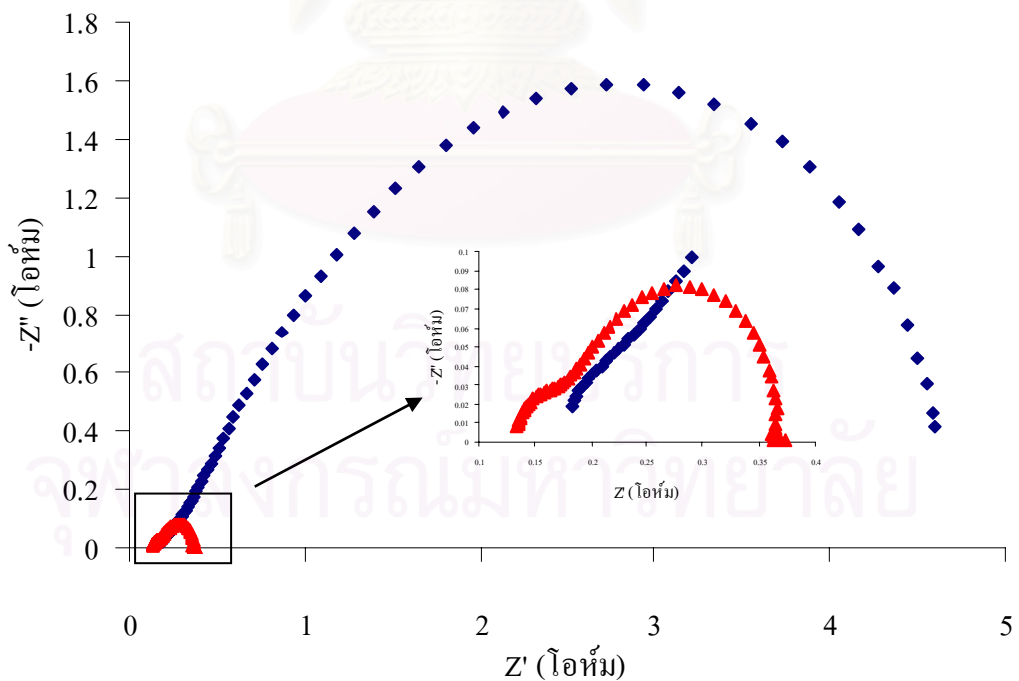
รูปที่ 4.3 เป็นกราฟ Nyquist plot ที่ได้จากการทดลองที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm ศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิเซลล์ 39 องศาเซลเซียสและ 70 องศาเซลเซียส จากกราฟจะเห็นว่าที่อุณหภูมิสูงค่าความต้านทานโอห์มมิกและจะมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิต่ำและความกว้างของส่วนโค้งมีขนาดมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำเช่นเดียวกัน ซึ่งขัดแย้งกับงานวิจัยของ Freire และคณะ (2001) ที่ระบุว่าความกว้างของส่วนโค้งของกราฟอิมพีแดนซ์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากในงานวิจัยนี้มีการให้ความร้อนในฝั่งแคโทดเพียงร้อยละ 60 เท่านั้น อาจส่งผลให้เมมเบรนมีความชื้นระดับหนึ่ง แต่เมื่อเซลล์ทำงานที่อุณหภูมิสูง น้ำอาจจะระเหยไปทำให้ความต้านทานโอห์มมิกและความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการทดลองโดยให้ความร้อนอิมิตัวทั้งสองฝั่งดังรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น และเมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิของน้ำภายในเซลล์ที่อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เท่ากับ 70 องศาเซลเซียสดังภาคผนวก ค ซึ่งพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงมีการสูญเสียน้ำออกจากระบบ ดังนั้นสมมติฐานที่กล่าวมาข้างต้นจึงเป็นสมมติฐานที่ถูกต้อง



รูปที่ 4.3 Nyquist plot เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ 39 องศาเซลเซียส (▲) และ 70 องศาเซลเซียส (◆) ที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm ศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์



รูปที่ 4.4 Nyquist plot เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ 39 องศาเซลเซียส (\diamond) และ 70 องศาเซลเซียส (\blacktriangle) ที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm ศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์ ที่ความชื้นอิ่มตัวทั้งสองฝั่ง



รูปที่ 4.5 Nyquist plot เปรียบเทียบผลของศักย์ไฟฟ้าที่ 0.55 โวลต์ (\blacktriangle) และ 0.8 โวลต์ (\diamond) เมื่อใช้ที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.5 เป็นกราฟ Nyquist plot ที่ได้จากการทดลองที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm อุณหภูมิเซลล์ 39 องศาเซลเซียส ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.8 และ 0.55 โวลต์ จากกราฟทั้ง 2 รูปจะเห็นว่ากราฟจะค่อนข้างมีลักษณะเป็นรูปครึ่งวงกลม 2 รูปต่อกัน โดยที่รูปครึ่งวงกลมที่บริเวณความถี่สูงเป็นครึ่งวงกลมขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับครึ่งวงกลมที่ความถี่ต่ำ ซึ่งครึ่งวงกลมขนาดเล็กจะเป็นผลตอบสนองของขั้วไฟฟ้าทางด้านแอโนด [O' Hayrec และคณะ, 2006] เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนสามารถเกิดขึ้นได้เร็วกว่าปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนบนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมจึงทำให้มีค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุน้อยกว่า แต่ในงานวิจัยนี้จะหาค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุมรวมของทั้งเซลล์ ดังนั้นความต้านทานที่หาค่าได้จึงเป็นความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุมรวมของทั้ง 2 ขั้ว และเมื่อเปรียบเทียบความกว้างของส่วนโค้งครึ่งวงกลมแล้วพบว่าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์ มีขนาดกว้างกว่าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.55 โวลต์ อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากที่ศักย์ไฟฟ้าสูงจะเป็นช่วงที่เกิดความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุมากกว่า ส่วนความต้านทานโอห์มมิกที่ศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์จะมีค่ามากกว่าที่ 0.55 โวลต์ โดยสามารถดูได้จากที่บริเวณความถี่สูง เนื่องจากที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำจะเกิดน้ำจากปฏิกิริยาในปริมาณมากจึงสามารถแพร่กลับเข้าไปในเมมเบรนได้ทำให้ความต้านทานโอห์มมิกลดลง และเมื่อพิจารณาที่บริเวณความถี่ต่ำจะเห็นว่าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.55 โวลต์ มีลักษณะที่ไม่เป็นระเบียบพฤติกรรมเช่นนี้จะแสดงถึงการเกิดน้ำท่วมภายในเซลล์ [Freire และคณะ, 2001] เนื่องจากที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนสามารถเกิดขึ้นได้เร็วเนื่องจากมีอิเล็กตรอนวิ่งไปทำปฏิกิริยาได้มากทำให้มีการผลิตน้ำออกมามากและเมื่อระบบระบายน้ำออกไม่ทันจึงทำให้เกิดน้ำท่วมบริเวณขั้วไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ที่ได้จึงไม่มีความแน่นอน

4.2 ผลของตัวแปรต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ หลายตัว เช่น ศักย์ไฟฟ้า อัตราการป้อนของแก๊สเชื้อเพลิง อุณหภูมิภายในเซลล์ เป็นต้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อความต้านทานและตัวเก็บประจุที่ได้จากการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี โดยทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบ 2^k โดยเพิ่มการทดลองที่จุดศูนย์กลางและการทดลองตามแนวแกน ตัวแปรที่นำมาออกแบบการทดลองมี 4 ตัวด้วยกัน คือ อัตราการป้อนของแก๊สเชื้อเพลิงคือแก๊สไฮโดรเจน (A) แก๊สออกซิเจน (B) อุณหภูมิภายในเซลล์ (C) และศักย์ไฟฟ้า (D) โดยผลตอบสนองของการทดลองนี้คือค่าความต้านทานโอห์มมิก (R_{Ω}) ค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายเทประจุ (R_{ct}) และตัวเก็บประจุ (C_p) ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

การทดลอง	A	B	C	D	R_{Ω} (โอห์ม)		R_{ct} (โอห์ม)		C (ไมโครฟารัด)	
					ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
l	-	-	-	-	0.1312	0.1625	0.2299	0.3219	45560	37963
a	+	-	-	-	0.2349	0.2856	0.4514	0.5682	19884	25091
b	-	+	-	-	0.2415	0.2249	0.4328	0.4449	28232	27467
ab	+	+	-	-	0.2483	0.2689	0.4268	0.5858	24534	24340
c	-	-	+	-	1.1972	1.2957	3.7217	3.4086	5099	4887
ac	+	-	+	-	1.4392	1.2222	3.8128	3.1933	6253	5217
bc	-	+	+	-	0.9344	1.2101	2.5551	3.8061	6520	4377
abc	+	+	+	-	0.2653	0.2419	0.8064	0.7789	17680	11523
d	-	-	-	+	0.1675	0.2100	4.1874	4.1463	74920	47597
ad	+	-	-	+	0.1721	0.2095	4.4493	3.7783	70510	44755
bd	-	+	-	+	0.1348	0.1307	2.2517	1.6415	75099	47576
abd	+	+	-	+	0.1638	0.2071	3.9620	3.2748	79182	44243
cd	-	-	+	+	0.9409	1.0843	12.3465	12.4322	8616	6282
acd	+	-	+	+	0.1859	0.2487	3.6974	3.7881	39186	32773
bcd	-	+	+	+	0.2869	0.2903	5.8844	4.6895	18078	30896
abcd	+	+	+	+	1.3620	1.1279	17.7091	16.4928	8182	11966
Axial	-1.414	0	0	0	0.6341	0.5542	5.9588	5.3227	9622	9230
Axial	1.414	0	0	0	0.5878	0.5845	4.2667	3.8451	9866	10948
Axial	0	-1.414	0	0	0.6390	0.6261	5.5837	4.0439	8799	8920
Axial	0	1.414	0	0	0.5493	0.5762	4.3309	4.8771	7136	8631
Axial	0	0	0	-1.414	0.5434	0.6208	1.9860	1.9168	7179	7438
Axial	0	0	0	1.414	0.4707	0.4768				
center	0	0	0	0	0.5646		3.1561		11429	
center	0	0	0	0	0.5493		3.2378		11140	
center	0	0	0	0	0.6125		3.7927		11099	

4.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความต้านทาน โอห์มมิก

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความต้านทานของโอห์มมิกจะพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % หรือระดับความสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 ซึ่งค่าวิกฤต ($F_0 = F_{0.05, 1, 27}$) เท่ากับ 4.21 จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.2 พบว่ามีเพียงตัวแปร A และกำลังสองของตัวแปร A B C และ D เท่านั้นที่มีค่า F_0 ต่ำกว่าค่าวิกฤต ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่ามีเพียงอัตราการใช้ของแก๊สไฮโดรเจน และกำลังสองของตัวแปรหลักเท่านั้นที่ไม่มีผลต่อค่าความต้านทานโอห์มมิก จากผลที่ได้จากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (4.1)

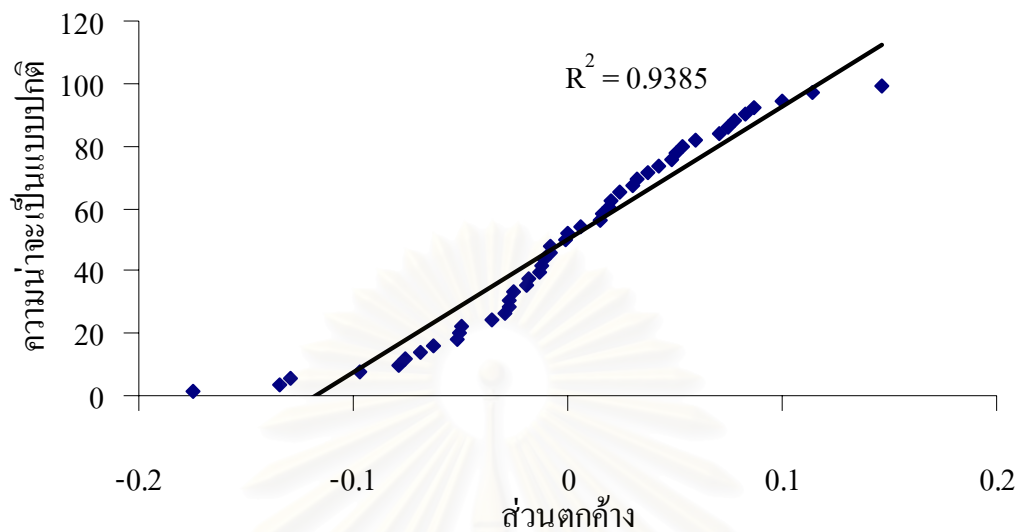
$$\begin{aligned}
 R_Q = & 0.5344 - 0.0511x_B + 0.3169x_C - 0.0747x_D + 0.0507x_Ax_B - 0.0479x_Ax_C - 0.0607x_Bx_C \\
 & + 0.0507x_Ax_D + 0.0881x_Bx_D - 0.0586x_Cx_D + 0.0554x_Ax_Bx_C + 0.1746x_Ax_Bx_D + 0.0612x_Ax_Cx_D \\
 & + 0.1063x_Bx_Cx_D + 0.1572x_Ax_Bx_Cx_D
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

โดยที่ x คือ ค่าของตัวแปรที่เข้ารหัส

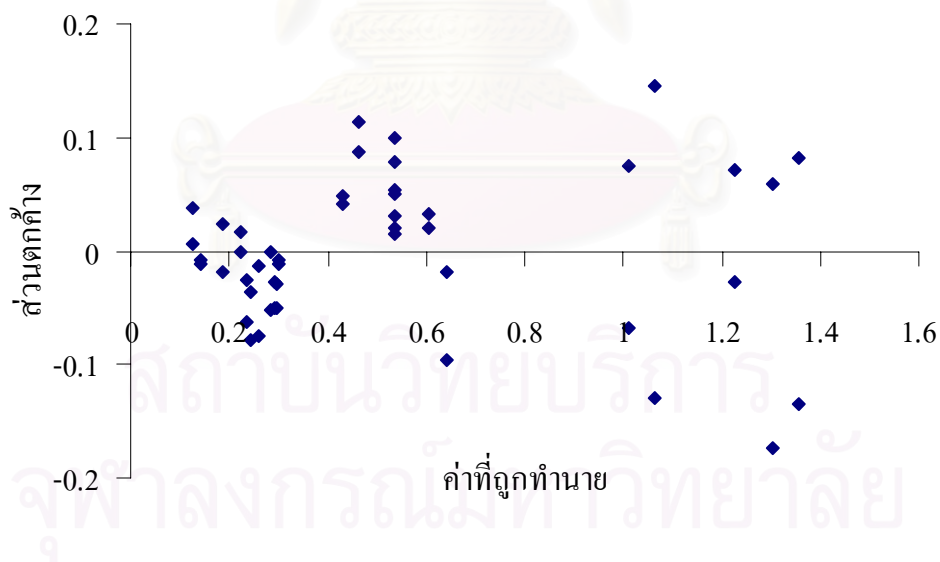
จากสมการเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้นำไปสร้างกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง (Normal probability plot) และกราฟของส่วนตกค้าง (Residuals) กับค่าที่ถูกทำนาย (Predicted value) เพื่อเป็นการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.6 พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.9385 แสดงว่าค่าของเศษตกค้างจากสมการมีการกระจายตัวที่เป็นแบบปกติ แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 4.7 พบว่าการกระจายตัวของเศษตกค้างมีค่าไม่คงที่ แสดงว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4.1) ไม่มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นจึงทำการเปลี่ยนรูปข้อมูล (Transformation) โดยทำการเปลี่ยนข้อมูลที่ได้จากการทดลองให้อยู่ในรูปลอการิทึมฐาน 10 ของข้อมูลเดิม ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลชุดใหม่ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของค่าความต้านทานโอห์มมิก

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F -Value	P-Value
A	0.015298	1	0.015298	2.890888	0.100575
B	0.104659	1	0.104659	19.77779	0.000134
C	3.212859	1	3.212859	607.1478	< 0.0001
D	0.223189	1	0.223189	42.17703	< 0.0001
A ²	0.00037	1	0.00037	0.069845	0.79357
B ²	0.000844	1	0.000844	0.159419	0.692833
C ²	0.009532	1	0.009532	1.801286	0.190735
D ²	0.003875	1	0.003875	0.732208	0.399698
AB	0.082296	1	0.082296	15.55187	0.000514
AC	0.073517	1	0.073517	13.89281	0.000906
AD	0.082296	1	0.082296	15.55187	0.000514
BC	0.117855	1	0.117855	22.27159	< 0.0001
BD	0.248125	1	0.248125	46.88923	< 0.0001
CD	0.110074	1	0.110074	20.80122	< 0.0001
ABC	0.098147	1	0.098147	18.54719	0.000196
ABD	0.975246	1	0.975246	184.2964	< 0.0001
ACD	0.119928	1	0.119928	22.66322	< 0.0001
BCD	0.361675	1	0.361675	68.3473	< 0.0001
ABCD	0.791219	1	0.791219	149.5201	< 0.0001
Error	0.142877	27	0.005292		
Total	6.803238	46			



รูปที่ 4.6 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตักข้างในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความต้านทานโอห์มมิก



รูปที่ 4.7 กราฟของส่วนตักข้างกับค่าที่ถูกทำนายของความต้านทาน โอห์มมิก

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.3 พบว่าตัวแปรที่มีค่า F_0 ต่ำกว่าค่าวิกฤติ คือ A และกำลังสองของตัวแปร A B และ D จึงสามารถกล่าวได้ว่าตัวแปรที่มีผลต่อค่าความต้านทานโอห์มมิกคือ อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน อุณหภูมิภายในเซลล์ ศักย์ไฟฟ้า และ

อันตรกิริยาทั้งหมดของตัวแปร ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (4.2)

ตารางที่ 4.3 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของลอการิทึมของค่าความต้านทาน โอห์มมิก

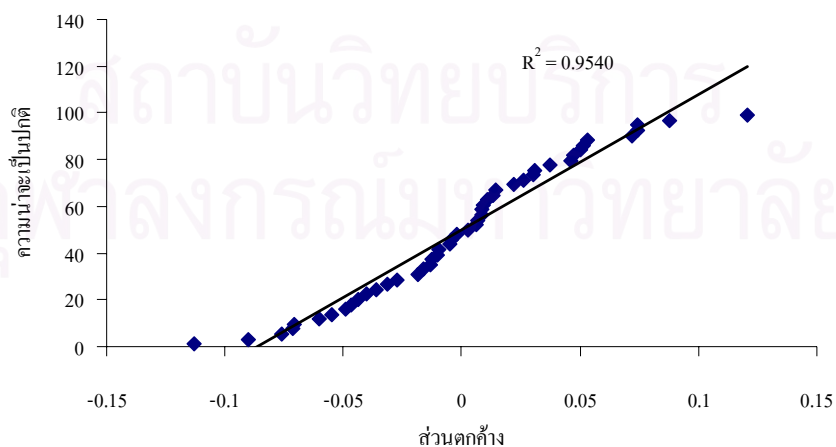
Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F-Value	P-Value
A	0.004007	1	0.004007	1.673775	0.2067
B	0.036509	1	0.036509	15.24901	0.0006
C	2.248671	1	2.248671	939.2238	< 0.0001
D	0.169205	1	0.169205	70.67346	< 0.0001
A ²	0.000204	1	0.000204	0.085186	0.7726
B ²	0.000443	1	0.000443	0.185132	0.6704
C ²	0.133511	1	0.133511	55.76489	< 0.0001
D ²	0.002711	1	0.002711	1.132171	0.2967
AB	0.043118	1	0.043118	18.00953	0.0002
AC	0.144726	1	0.144726	60.44914	< 0.0001
AD	0.021077	1	0.021077	8.803601	0.0062
BC	0.046447	1	0.046447	19.39983	0.0002
BD	0.051024	1	0.051024	21.31172	< 0.0001
CD	0.014482	1	0.014482	6.048691	0.0206
ABC	0.065109	1	0.065109	27.19473	< 0.0001
ABD	0.659001	1	0.659001	275.2514	< 0.0001
ACD	0.061757	1	0.061757	25.79443	< 0.0001
BCD	0.234505	1	0.234505	97.94778	< 0.0001
ABCD	0.325663	1	0.325663	136.0227	< 0.0001
Error	0.064643	27	0.002394		
Total	4.622194	46			

$$\begin{aligned} \text{Log } R_{\Omega} = & -0.2405 - 0.0302x_B + 0.2651x_C - 0.065x_D - 0.2009x_C^2 + 0.0367x_Ax_B - 0.0673x_Ax_C \\ & - 0.0381x_Bx_C + 0.0257x_Ax_D + 0.0399x_Bx_D - 0.0213x_Cx_D + 0.0451x_Ax_Bx_C \\ & + 0.1435x_Ax_Bx_D + 0.0439x_Ax_Cx_D + 0.0856x_Bx_Cx_D + 0.1009x_Ax_Bx_Cx_D \end{aligned} \quad (4.2)$$

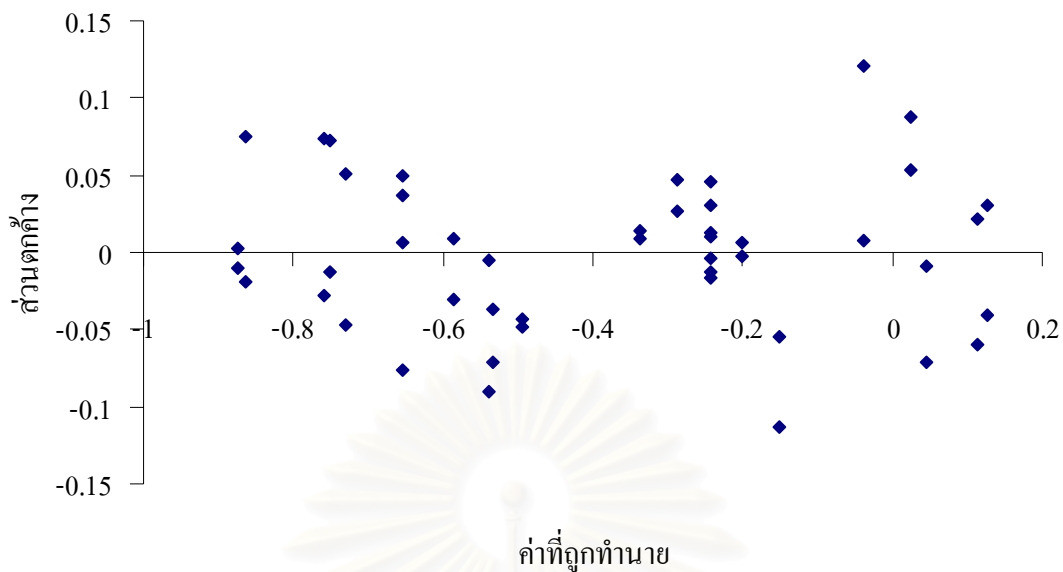
จะเห็นว่าสมการที่ได้ที่ความยุ่งยากในการคำนวณ และเมื่อพิจารณาค่า F ของตัวแปร CD และ AD พบว่ามีค่าสูงกว่าค่าวิกฤตเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับตัวแปรอื่นๆ ที่มีค่าสูงกว่าค่าวิกฤต จึงสามารถตัดพจน์ของอันตรกิริยาทั้งสองออกจากสมการที่ (4.2) ได้เป็นสมการที่ (4.3) ซึ่งมีค่า R²Prediction เท่ากับ 0.941 โดยค่านี้จะเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถของสมการในการทำนายค่าผลตอบแทน โดยสมการที่ (4.3) มีความสามารถทำนายค่าผลตอบแทนได้ร้อยละ 94.1

$$\begin{aligned} \text{Log } R_{\Omega} = & -0.2405 - 0.0302x_B + 0.2651x_C - 0.065x_D - 0.2009x_C^2 + 0.0367x_Ax_B - 0.0673x_Ax_C \\ & - 0.0381x_Bx_C + 0.0399x_Bx_D + 0.0451x_Ax_Bx_C + 0.1435x_Ax_Bx_D + 0.0439x_Ax_Cx_D \\ & + 0.0856x_Bx_Cx_D + 0.1009x_Ax_Bx_Cx_D \end{aligned} \quad (4.3)$$

เมื่อทำการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการที่ (4.3) โดยการสร้างกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติดังรูปที่ 4.8 พบว่ามีค่า R² เท่ากับ 0.9540 แสดงว่าค่าของเศษตกค้างจากสมการมีการกระจายตัวที่เป็นแบบปกติ ซึ่งตามสมมติฐานของการแจกแจงปกติพฤติกรรมดังกล่าวจะแสดงค่าเฉลี่ยของเศษตกค้างมีค่าเท่ากับศูนย์ และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.9 พบว่าการกระจายตัวของเศษตกค้างมีค่าคงที่และไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ในสมการที่ (4.3) สามารถใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 4.8 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าลอการิทึมของความต้านทานโอห์มมิก



รูปที่ 4.9 กราฟของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของค่าลอการิทึมของความต้านทาน โอห์มมิก

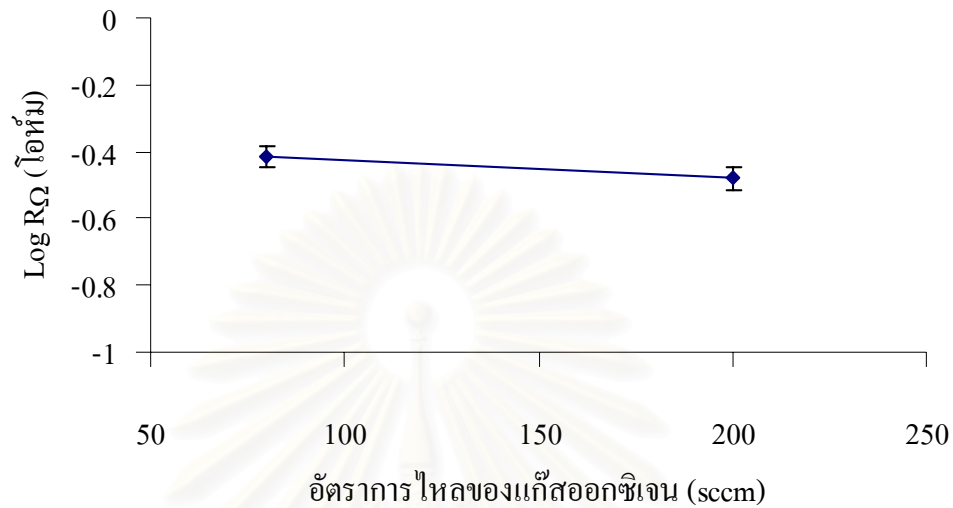
- ผลของอัตราการไหลของแก๊สต่อค่าความต้านทาน โอห์มมิก

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทำให้ทราบว่าอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนไม่มีผลต่อความต้านทาน โอห์มมิก ในขณะที่อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนจะส่งผลต่อค่าความต้านทาน โอห์มมิกในทิศทางที่ความต้านทาน โอห์มมิกลดลงแบบเชิงเส้นเมื่ออัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.10 เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนเกิดขึ้นได้มาก ทำให้ปริมาณน้ำฝั้แคะโทดเพิ่มขึ้นมากและเมื่ออัตราการไหลของแก๊สเพิ่มสูงขึ้นน้ำที่เข้ามาพร้อมกับแก๊สก็มีปริมาณมากขึ้นด้วย จึงเกิดการแพร่กลับของน้ำเข้าสู่เมมเบรนทำให้เมมเบรนมีความชุ่มน้ำมาก ส่งผลให้โปรตอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้ง่ายจึงทำให้ค่าความต้านทาน โอห์มมิกลดลง

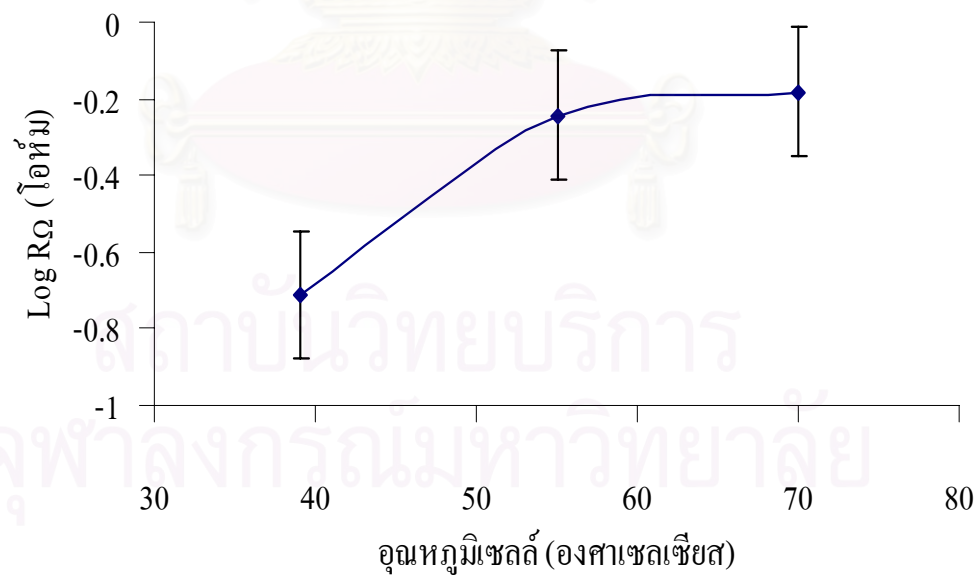
- ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความต้านทาน โอห์มมิก

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทำให้ทราบว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่าความต้านทาน โอห์มมิกแบบไม่เป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 4.11 จากการพิจารณาจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความต้านทาน โอห์มมิกจะเพิ่มขึ้น อาจเป็นผลเนื่องมาจากแก๊สออกซิเจนที่เข้าทางด้านแคโทดมีความชื้นร้อยละ 60 ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นน้ำที่อยู่ในเมมเบรนสามารถออกมายังฝั้แคะโทดและระเหยออกไปพร้อม

กับแก๊สออกซิเจน และการระเหยของน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนส่งผลให้เมมเบรนแห้ง ความต้านทานโอห์มมิกจึงเพิ่มขึ้น



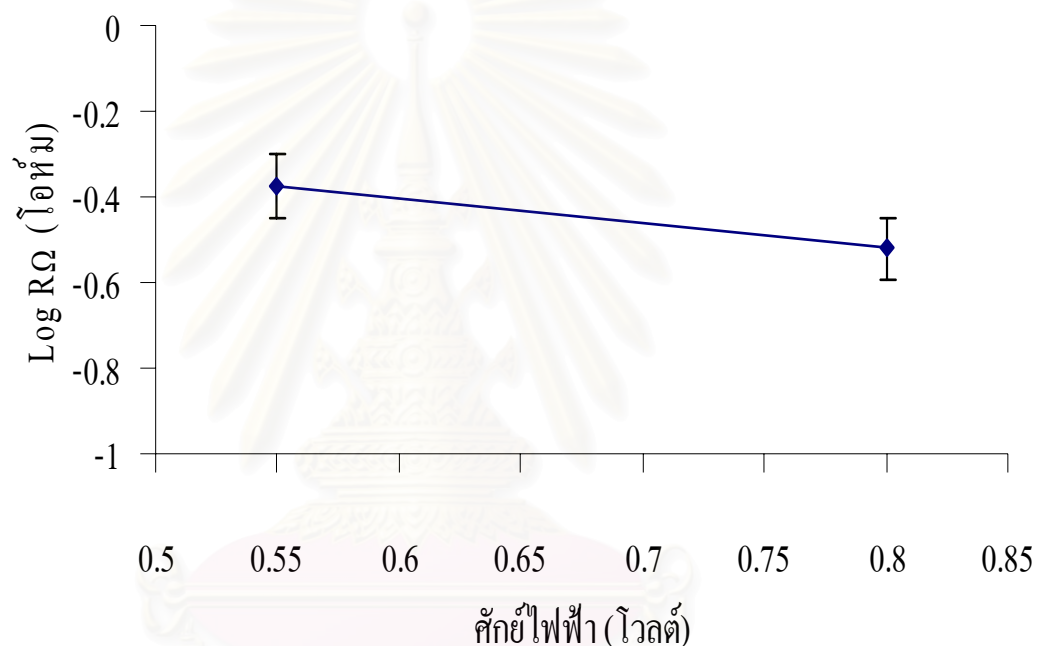
รูปที่ 4.10 ผลของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนที่มีต่อค่าความต้านทานโอห์มมิก



รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทาน โอห์มมิก

- ผลของศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อค่าความต้านทานโอห์มมิก

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทำให้ทราบว่าศักย์ไฟฟ้ามีผลต่อค่าความต้านทานโอห์มมิกแบบเชิงเส้น โดยเมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานโอห์มมิกจะลดลงดังรูปที่ 4.12 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Romero-Castanon และคณะ (2003) ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นผลเนื่องจากอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากแอโนดไปยังแคโทดได้เร็วขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าความต้านทานโอห์มมิกลดลง



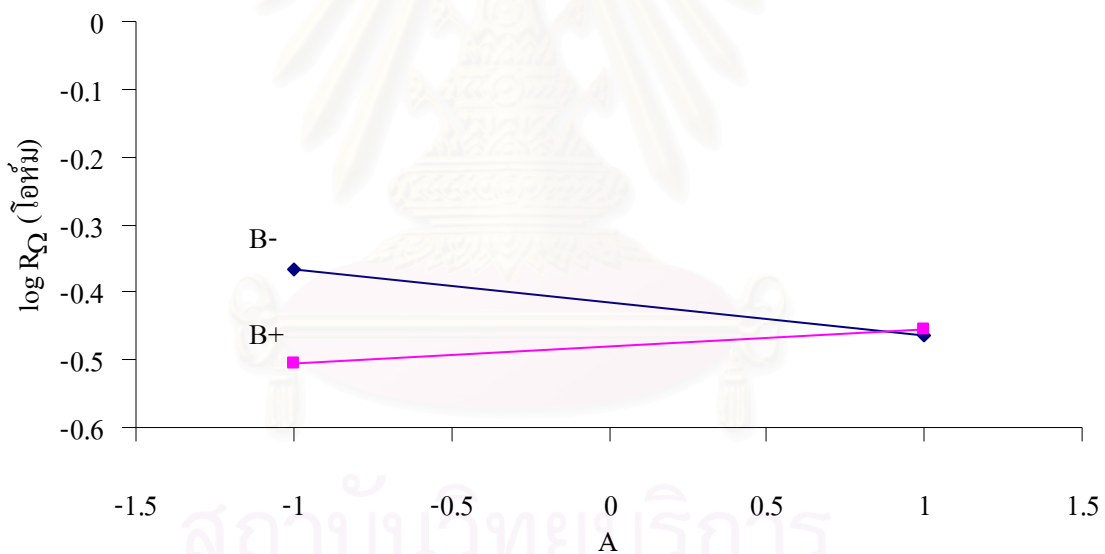
รูปที่ 4.12 ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อค่าความต้านทานโอห์มมิก

- ผลของอันตรกิริยาที่มีต่อค่าความต้านทานโอห์มมิก

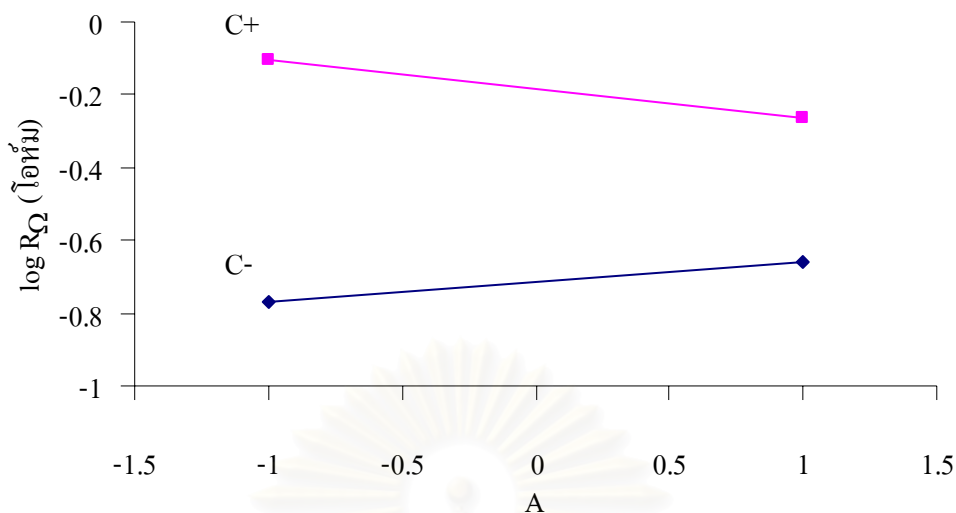
จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.2 ทำให้ทราบว่าอันตรกิริยา AB AC BC BD ABC ABD ACD BCD และ ABCD มีผลต่อค่าความต้านทานโอห์มมิก แต่การอธิบายความสัมพันธ์ของอันตรกิริยา 3 ตัวแปรขึ้นไปค่อนข้างมีความซับซ้อน ดังนั้นจึงแสดงผลของอันตรกิริยาของ 2 ตัวแปรเท่านั้น ดังรูปที่ 4.13 – 4.16

รูปที่ 4.13 แสดงอันตรกิริยาระหว่างอัตราการใช้ของแก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สออกซิเจนพบว่าที่อัตราการใช้ของแก๊สออกซิเจนต่ำค่าความต้านทานโอห์มมิกจะลดลงเมื่ออัตราการใช้ของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น อาจเป็นผลเนื่องมาจากน้ำที่ออกไปพร้อมกับออกซิเจนมีปริมาณน้อย

เพราะอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่ำและเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนจะทำให้ น้ำที่เข้ามาพร้อมกับแก๊สมีปริมาณมากขึ้นน้ำจึงสามารถแพร่เข้าสู่เมมเบรนได้ ดังนั้นเมมเบรนจึงมีความชุ่มน้ำมากขึ้นจึงทำให้ค่าความต้านทานโอห์มมิกลดลง ในทางกลับกันที่อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนสูงจะเห็นว่าความต้านทานโอห์มมิกเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น อาจเป็นผลเนื่องจากน้ำที่ฝั่งแคโทดสามารถออกไปพร้อมกับแก๊สออกซิเจนได้มาก ในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนน้ำที่เข้ามาพร้อมกับแก๊สจะแพร่เข้าสู่เมมเบรนได้น้อยเนื่องจากความเร็วของแก๊สที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าความต้านทานโอห์มมิกมีค่าสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนต่ำและอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนสูงจะให้ค่าความต้านทานโอห์มมิกต่ำสุด เนื่องจากที่ภาวะนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้เร็วโดยคู่ได้จากอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจนคือ 1:5 ซึ่งมีปริมาณแก๊สออกซิเจนมากในการเกิดปฏิกิริยาจึงทำให้มีปริมาณน้ำที่ฝั่งแคโทดมากกว่าที่ภาวะอื่น น้ำจึงสามารถแพร่กลับเข้าสู่เมมเบรนได้มากความต้านทานโอห์มมิกจึงมีค่าน้อย



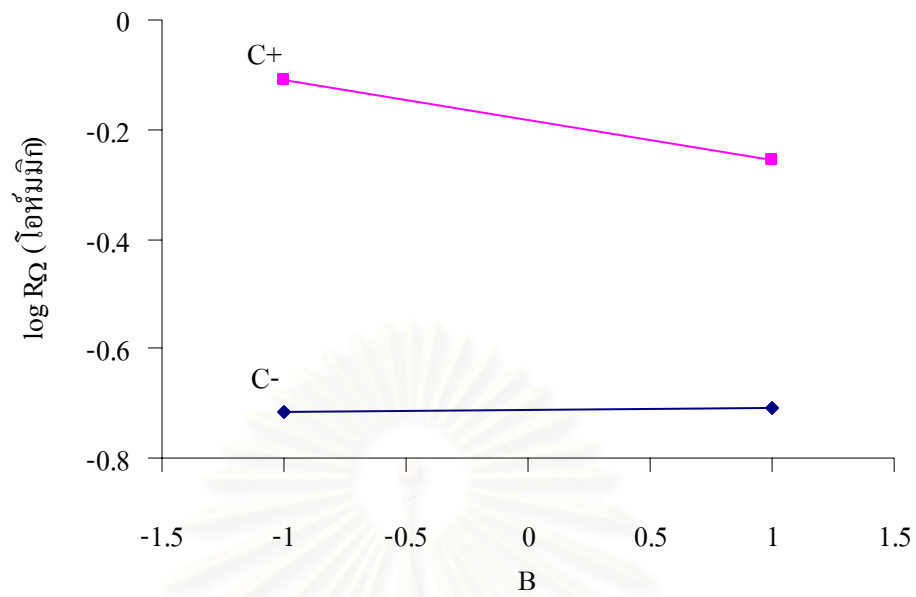
รูปที่ 4.13 ผลของอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนกับอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนที่มีต่อค่าความต้านทานโอห์มมิก



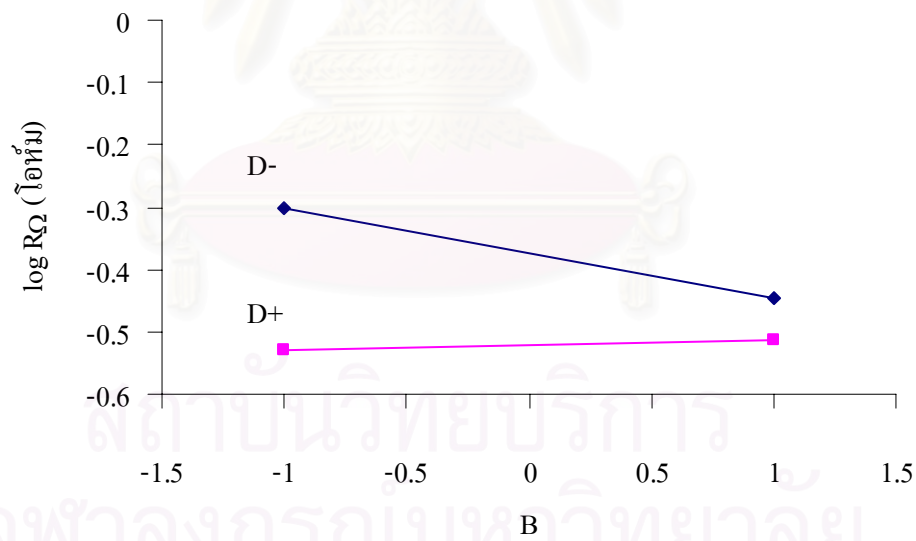
รูปที่ 4.14 ผลของอัตราเร็วระหว่างอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนกับอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานโอห์มมิก

รูปที่ 4.14 แสดงอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนกับอุณหภูมิเซลล์พบว่าที่อุณหภูมิต่ำค่าความต้านทานโอห์มมิกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน อาจเป็นผลเนื่องจากความเร็วของแก๊สที่เพิ่มขึ้นทำให้น้ำไม่สามารถแพร่เข้าสู่เมมเบรนได้ ในทางกลับกันที่อุณหภูมิสูงความต้านทานโอห์มมิกจะลดลงเมื่ออัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงน้ำที่เข้าไปสู่เซลล์มีปริมาณมากกว่าที่อุณหภูมิเซลล์ต่ำ ดังนั้นถึงแม้ความเร็วของแก๊สจะเพิ่มขึ้นน้ำก็ยังสามารถแพร่เข้าสู่เมมเบรนได้เนื่องจากมีความเข้มข้นสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าที่อุณหภูมิต่ำค่าความต้านทานโอห์มมิกจะต่ำกว่าที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงจึงควรทำงานที่อุณหภูมิต่ำ

จากรูปที่ 4.15 แสดงถึงอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนกับอุณหภูมิพบว่าที่อุณหภูมิต่ำค่าความต้านทานโอห์มมิกจะไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน เนื่องจากที่อุณหภูมิเซลล์ต่ำน้ำที่เข้ามาพร้อมกับแก๊สออกซิเจนเพื่อให้เซลล์มีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 จะมีปริมาณน้อยดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนค่าความต้านทานโอห์มมิกจึงไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิสูงพบว่าความต้านทานโอห์มมิกจะลดลงเมื่ออัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น อาจเป็นผลเนื่องจากอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณน้ำที่เข้าเซลล์ก็เพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามจากรูปจะเห็นว่าที่อุณหภูมิต่ำจะให้ความต้านทานโอห์มมิกน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากปริมาณน้ำที่ระเหยออกไปพร้อมกับแก๊สออกซิเจนน้อยกว่า



รูปที่ 4.15 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอัตราการใช้ของแก๊สออกซิเจนกับอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานโอห์มมิก



รูปที่ 4.16 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอัตราการใช้ของแก๊สออกซิเจนกับศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อค่าความต้านทานโอห์มมิก

จากรูปที่ 4.16 แสดงถึงอันตรกิริยาระหว่างอัตราการใช้ของแก๊สออกซิเจนกับศักย์ไฟฟ้า พบว่าที่ศักย์ไฟฟ้าสูงค่าความต้านทานโอห์มมิกลงไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงเมื่ออัตราการใช้ของแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยามีปริมาณน้อยดังนั้นเมื่ออัตราการใช้ของแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นจึงไม่ค่อยส่งผลต่อค่าความต้านทานโอห์มมิก แต่เมื่อพิจารณาที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำจะพบว่าค่าความต้านทานโอห์มมิกลงเมื่อเพิ่มอัตราการใช้ของแก๊สออกซิเจน เนื่องจากปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้เร็วทำให้มีน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์ปริมาณมากและสามารถแพร่กลับเข้าไปในเมมเบรนได้จึงทำให้ความต้านทานโอห์มมิกลง

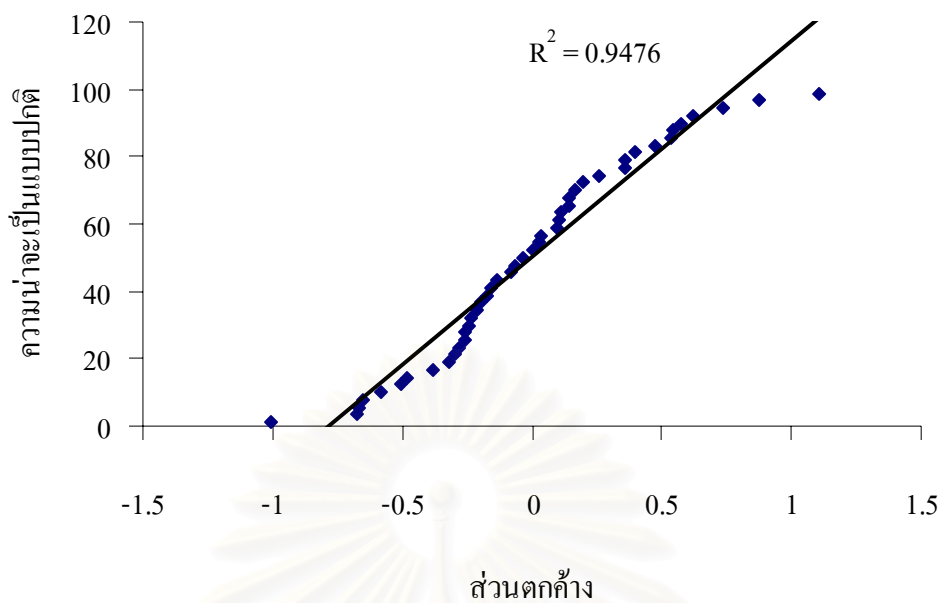
4.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุจะพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่นเช่นเดียวกับความต้านทานโอห์มมิก คือค่า F วิฤติ ($F_0 = F_{0.02, 1, 25}$) เท่ากับ 4.24 จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.4 พบว่าอัตราการใช้ของแก๊สไฮโดรเจน (A) อัตราการใช้ของแก๊สออกซิเจน (B) และอันตรกิริยาระหว่างอัตราการใช้ของแก๊สไฮโดรเจนกับอุณหภูมิ (AC) ที่ไม่มีผลต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ จากผลที่ได้จากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังตารางที่ (4.4)

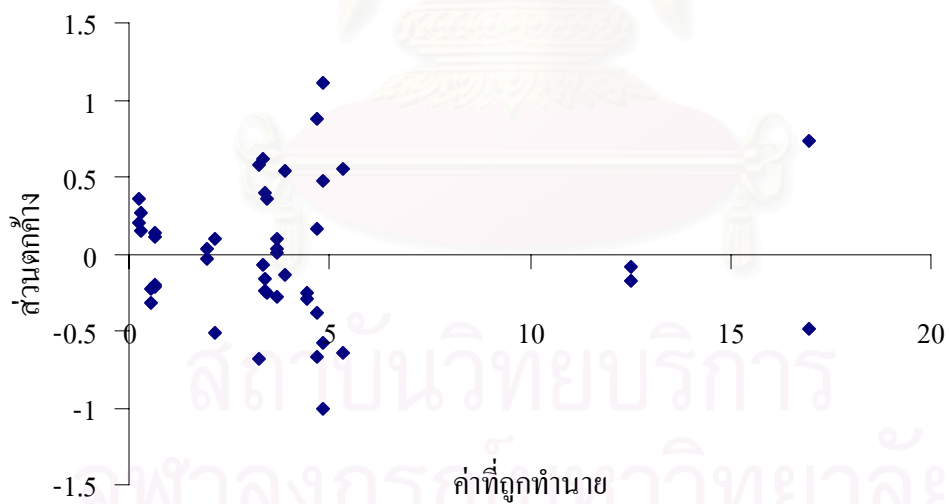
$$R_{ct} = 3.3955 + 2.1241x_C + 2.4746x_D + 0.7266x_A^2 + 0.6569x_B^2 - 1.7357x_C^2 + 1.0278x_D^2 + 1.2308x_Ax_B + 0.3573x_Bx_C + 0.4334x_Ax_D + 0.4047x_Bx_D + 0.9602x_Cx_D + 1.036x_Ax_Bx_C + 1.5424x_Ax_Bx_D + 0.2687x_Ax_Cx_D + 0.7641x_Bx_Cx_D + 1.3059x_Ax_Bx_Cx_D \quad (4.4)$$

โดยที่ x คือ ค่าของตัวแปรที่เข้ารหัส

เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของสมการที่ (4.4) จึงสร้างกราฟความหน้าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างและกราฟของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.17 พบว่าค่าของเศษตกค้างจากสมการมีการกระจายตัวที่เป็นแบบปกติเนื่องจากค่า R^2 มีค่าใกล้เคียง 1 แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 4.18 พบว่าการกระจายตัวของเศษตกค้างมีค่าไม่คงที่ แสดงว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4.4) ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นจึงทำการเปลี่ยนรูปข้อมูล โดยเปลี่ยนข้อมูลที่ได้จากการทดลองให้อยู่ในรูปลอการิทึมฐาน 10 ของข้อมูลเดิมเช่นเดียวกับความต้านทานโอห์มมิกและทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลชุดใหม่ดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.17 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกล้างในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ



รูปที่ 4.18 กราฟของส่วนตกล้างกับค่าที่ถูกทำนายของความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F -Value	P-Value
A	0.01572	1	0.01572	0.046393	0.8312
B	0.009487	1	0.009487	0.027997	0.8685
C	144.3721	1	144.3721	426.0701	< 0.0001
D	195.9542	1	195.9542	578.2988	< 0.0001
A ²	3.618178	1	3.618178	10.67795	0.0031
B ²	2.957026	1	2.957026	8.726759	0.0067
C ²	7.917151	1	7.917151	23.36505	< 0.0001
D ²	4.713848	1	4.713848	13.91148	0.0010
AB	48.47752	1	48.47752	143.0666	< 0.0001
AC	0.180826	1	0.180826	0.533653	0.4719
AD	6.011518	1	6.011518	17.74116	0.0003
BC	4.085582	1	4.085582	12.05735	0.0019
BD	5.241756	1	5.241756	15.46944	0.0006
CD	29.5056	1	29.5056	87.07676	< 0.0001
ABC	34.34692	1	34.34692	101.3644	< 0.0001
ABD	76.12392	1	76.12392	224.6565	< 0.0001
ACD	2.311304	1	2.311304	6.821107	0.0150
BCD	18.68393	1	18.68393	55.1399	< 0.0001
ABCD	54.57591	1	54.57591	161.0641	< 0.0001
Error	8.471146	25	0.338846		
Total	642.7582	44			

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.5 พบว่าตัวแปรที่ไม่มีผลต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุคือ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน (A) และอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนกับอุณหภูมิ (BC) เนื่องจากมีค่า F_0 ต่ำกว่าค่าวิกฤต ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (4.5)

$$\begin{aligned} \text{Log} R_{ct} = & 0.5295 - 0.0313x_B + 0.2846x_C + 0.3578x_D + 0.0748x_A^2 + 0.0701x_B^2 - 0.4540x_C^2 \\ & + 0.1334x_D^2 + 0.0320x_Ax_B - 0.0752x_Ax_C + 0.0335x_Ax_D + 0.0246x_Bx_D - 0.0913x_Cx_D \\ & + 0.0237x_Ax_Bx_C + 0.1319x_Ax_Bx_D + 0.0411x_Ax_Cx_D + 0.0989x_Bx_Cx_D \\ & + 0.0703x_Ax_Bx_Cx_D \end{aligned} \quad (4.5)$$

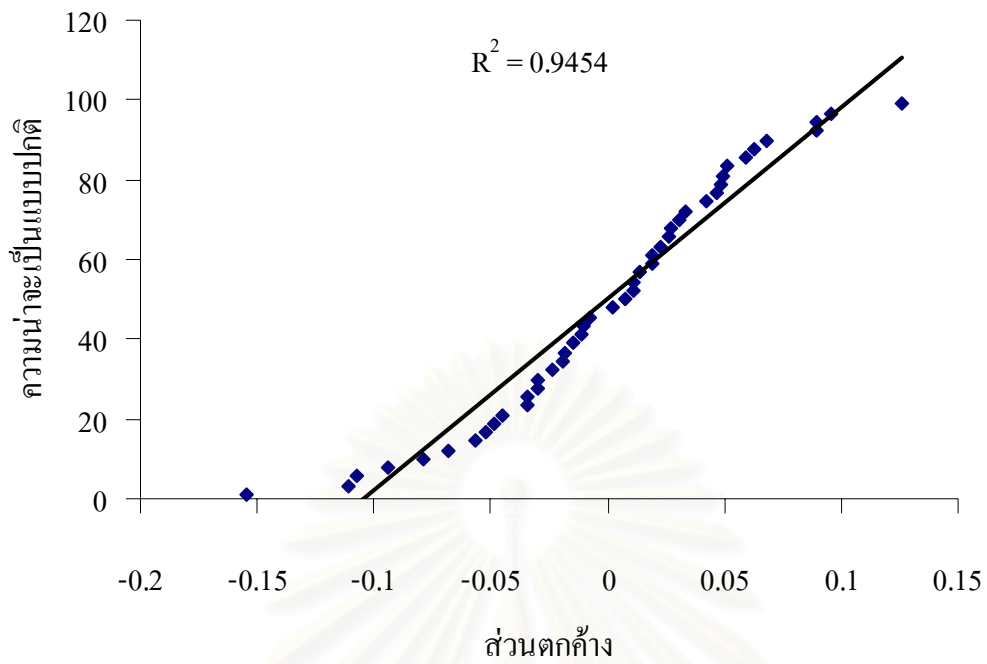
จากสมการที่ (4.5) จะเห็นว่าสมการมีความยุ่งยากในการคำนวณ จึงมีการตัดบางพจน์ที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุเพียงเล็กน้อยออกจากสมการ และเมื่อพิจารณาค่า F ของตัวแปร BD และ ABC พบว่ามีค่าสูงกว่าค่าวิกฤตเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรอื่นๆ ที่มีค่าสูงกว่าค่าวิกฤต จึงสามารถตัดพจน์ของอันตรกิริยาทั้งสองออกจากสมการที่ (4.5) ได้เป็นสมการที่ (4.6) โดยมีค่า $R^2_{\text{prediction}}$ เท่ากับ 0.961

$$\begin{aligned} \text{Log} R_{ct} = & 0.5295 - 0.0313x_B + 0.2846x_C + 0.3578x_D + 0.0748x_A^2 + 0.0701x_B^2 - 0.4540x_C^2 \\ & + 0.1334x_D^2 + 0.0320x_Ax_B - 0.0752x_Ax_C + 0.0335x_Ax_D - 0.0913x_Cx_D \\ & + 0.1319x_Ax_Bx_D + 0.0411x_Ax_Cx_D + 0.0989x_Bx_Cx_D + 0.0703x_Ax_Bx_Cx_D \end{aligned} \quad (4.6)$$

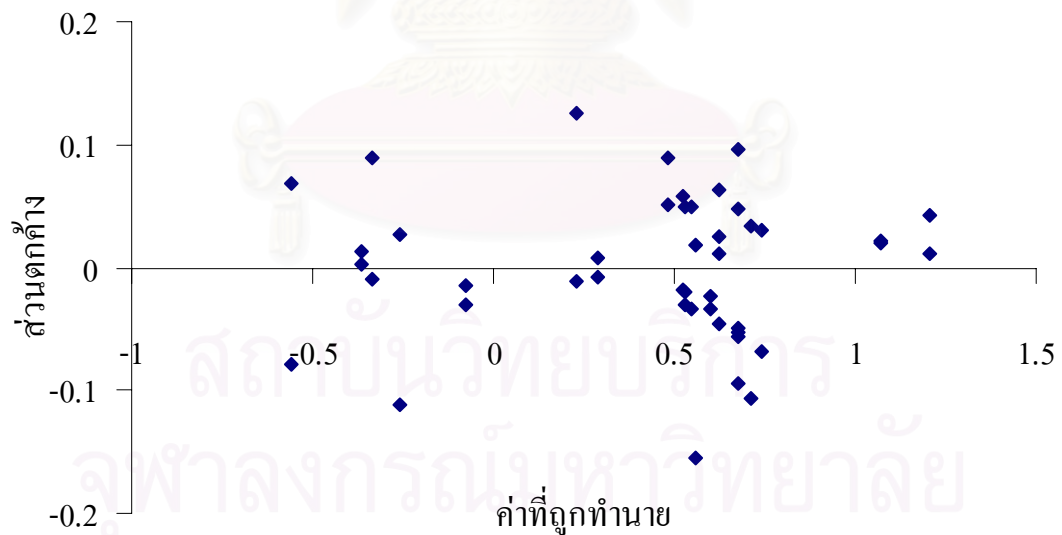
เมื่อทำการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการที่ (4.6) โดยการสร้างกราฟความหนาจะเป็นแบบปกติดังรูปที่ 4.13 พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.9454 แสดงว่าค่าของส่วนตกค้างจากสมการมีการกระจายตัวที่เป็นแบบปกติ ซึ่งตามสมมติฐานของการแจกแจงปกติพฤติกรรมดังกล่าวจะแสดงค่าเฉลี่ยของเศษตกค้างมรค่าเท่ากับศูนย์ และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.20 พบว่าการกระจายตัวของเศษตกค้างมีค่าคงที่และไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ในสมการที่ (4.6) สามารถใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 4.5 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของลอการิทึมของค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่าย
โอนประจุ

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F -Value	P-Value
A	0.0049	1	0.0049	1.1748	0.2888
B	0.0391	1	0.0391	9.3526	0.0052
C	2.5915	1	2.5915	620.3510	< 0.0001
D	4.0964	1	4.0964	980.5718	< 0.0001
A ²	0.0384	1	0.0384	9.1867	0.0056
B ²	0.0337	1	0.0337	8.0621	0.0089
C ²	0.5418	1	0.5418	129.6851	< 0.0001
D ²	0.0794	1	0.0794	19.0124	0.0002
AB	0.0329	1	0.0329	7.8653	0.0096
AC	0.1811	1	0.1811	43.3521	< 0.0001
AD	0.0358	1	0.0358	8.5753	0.0072
BC	0.0063	1	0.0063	1.5069	0.2310
BD	0.0194	1	0.0194	4.6479	0.0409
CD	0.2667	1	0.2667	63.8334	< 0.0001
ABC	0.0180	1	0.0180	4.3142	0.0482
ABD	0.5571	1	0.5571	133.3542	< 0.0001
ACD	0.0540	1	0.0540	12.9251	0.0014
BCD	0.3131	1	0.3131	74.9493	< 0.0001
ABCD	0.1583	1	0.1583	37.8939	< 0.0001
Error	0.1044	25	0.0042		
Total	9.2067	44			



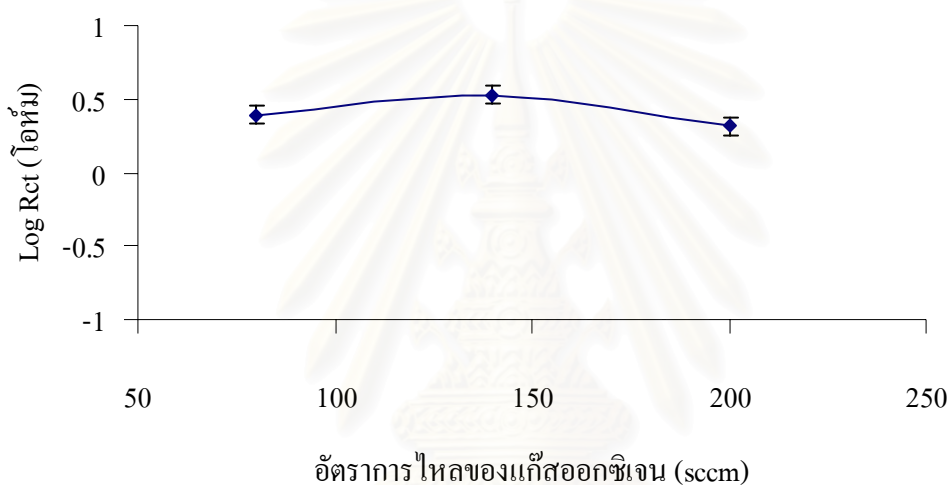
รูปที่ 4.19 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตักข้างในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าลอการิทึมของความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ



รูปที่ 4.20 กราฟของส่วนตักข้างกับค่าที่ถูกทำนายของค่าลอการิทึมของความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ

- ผลของอัตราการไหลของแก๊สที่มีต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ

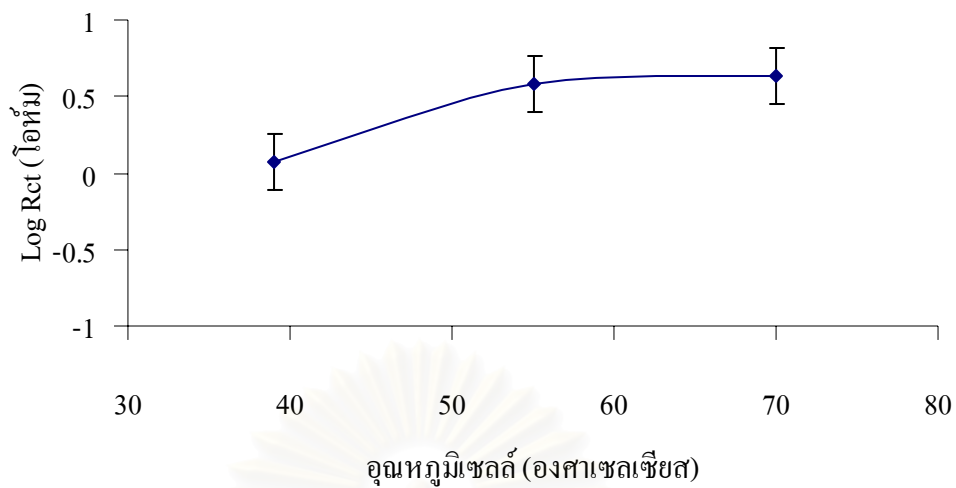
จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 4.5 ทำให้ทราบว่าอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนไม่มีผลต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ ในขณะที่อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนจะส่งผลต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุแบบไม่เป็นเชิงเส้นคือความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุลดลงเล็กน้อยเมื่ออัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.21 เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้มีโมเลกุลของออกซิเจนเข้ามาทำปฏิกิริยากับโปรตอนและอิเล็กตรอนมากขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุลดลง



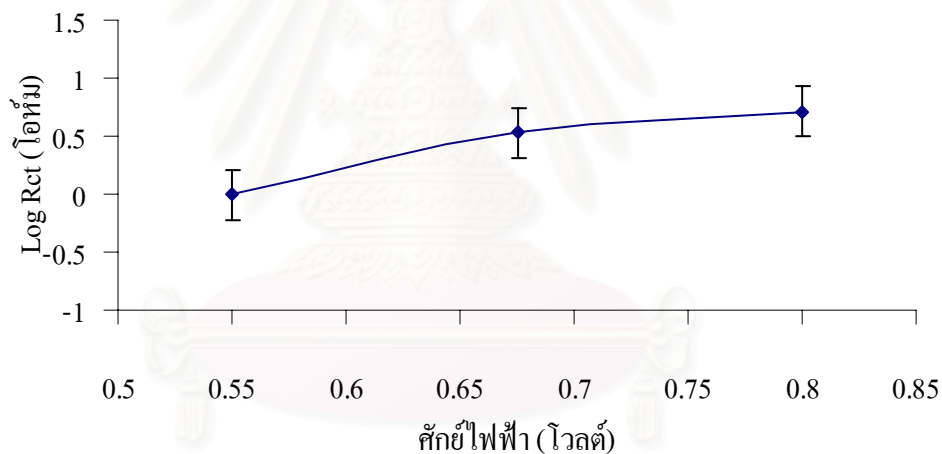
รูปที่ 4.21 ผลของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนที่มีต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ

- ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทำให้ทราบว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่าความต้านทานโอห์มมิกแบบไม่เป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 4.22 แต่ในทางทฤษฎีแล้วเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุลดลง [Freier และคณะ, 2001] ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นผลสืบเนื่องมาจากค่าความต้านทานโอห์มมิกที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปริมาณโปรตอนที่เคลื่อนที่จากขั้วแอโนดมายังขั้วแคโทดมีปริมาณน้อยทำให้ไม่เพียงพอในการเกิดปฏิกิริยา จึงทำให้ความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่งหลังจากนั้นจะเริ่มคงที่เนื่องจากค่าความต้านทานโอห์มมิกคงที่



รูปที่ 4.22 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ



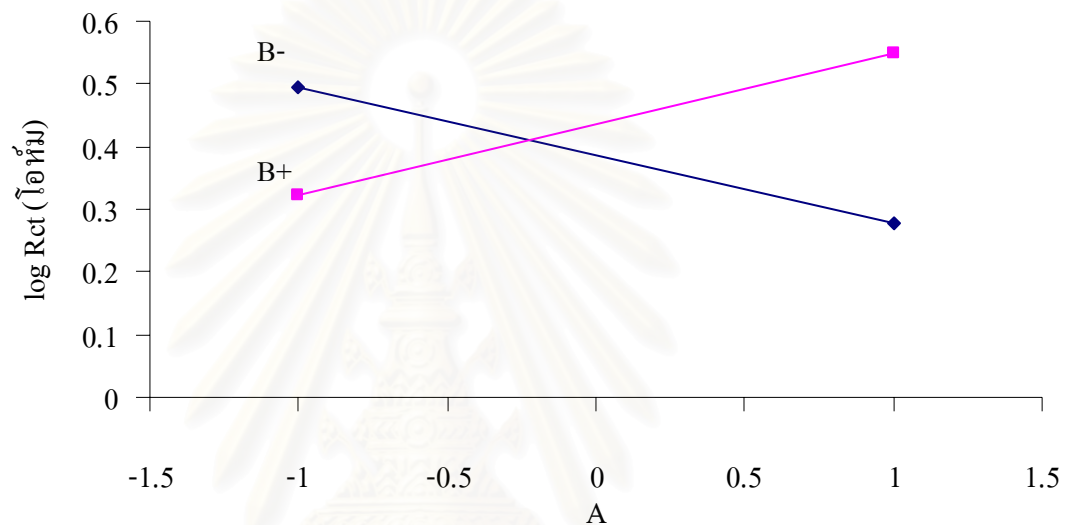
รูปที่ 4.23 ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ

- ผลของศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทำให้ทราบว่าศักย์ไฟฟ้ามีผลต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยเมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุจะเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.23 เป็นผลเนื่องจากเมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นได้ช้าทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ช้า จึงทำให้ค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุเพิ่มขึ้น

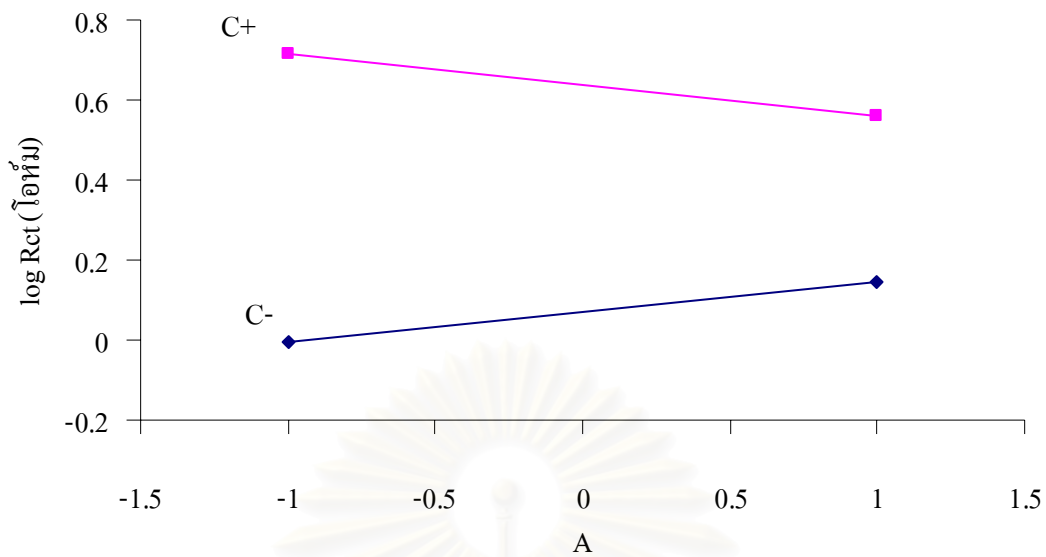
- ผลของอันตรกิริยาที่มีต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนความร้อน

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.5 ทำให้ทราบว่าอันตรกิริยา AB AC AD CD ABD ACD BCD และ ABCD มีผลต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุผลของอันตรกิริยาของ 2 ตัวแปรแสดงดังรูปที่ 4.24 – 4.27



รูปที่ 4.24 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนกับอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนที่มีต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ

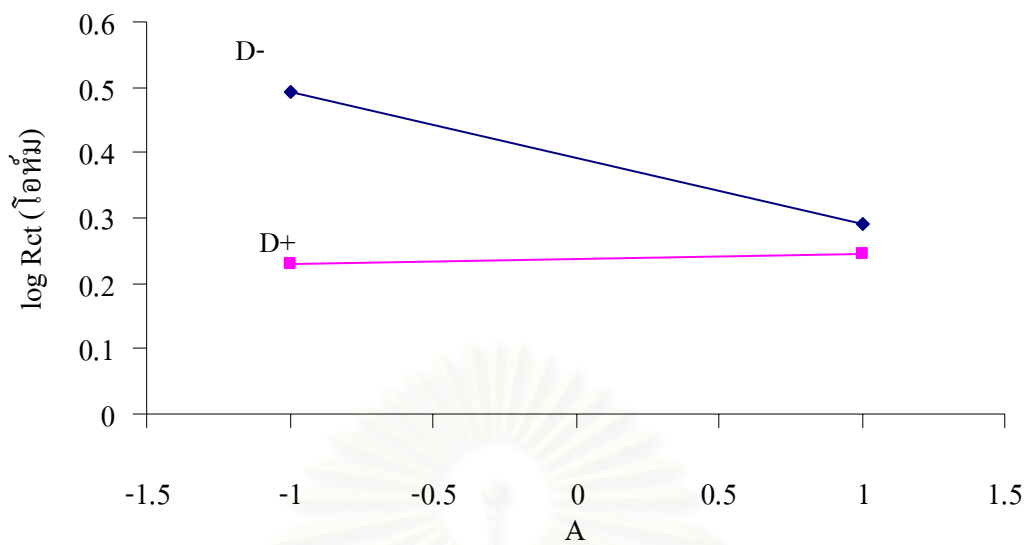
รูปที่ 4.24 แสดงถึงอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สออกซิเจนพบว่าที่อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนสูงค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นผลสืบเนื่องมาจากความต้านทานโอห์มมิกที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.13) ทำให้โปรตอนเคลื่อนที่ไปยังฝั่งแคโทดได้ลำบาก ดังนั้นปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นได้ช้า และเมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่ำจะให้ผลตรงกันข้าม กล่าวคือเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุจะมีค่าลดลงเป็นผลสืบเนื่องมาจากความต้านทานโอห์มมิกเช่นเดียวกันคือ ที่อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่ำค่าความต้านทานโอห์มมิกจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนจึงทำให้โปรตอนสามารถเคลื่อนที่ไปยังฝั่งแคโทดได้เร็ว จึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วด้วย ดังนั้นค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุจึงลดลง



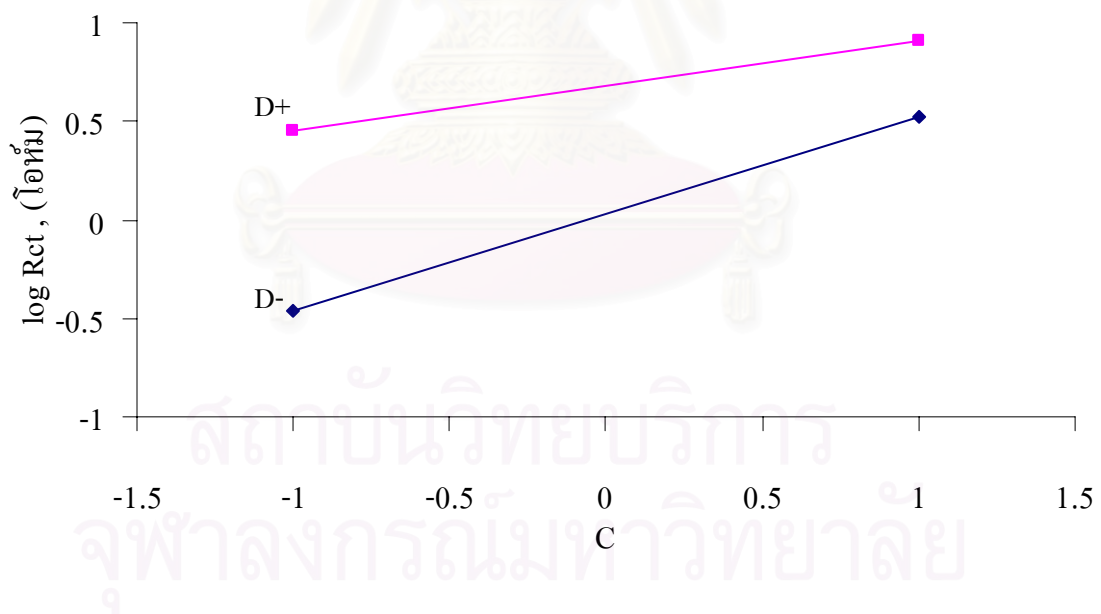
รูปที่ 4.25 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนกับอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ

จากรูปที่ 4.25 แสดงถึงอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนกับอุณหภูมิ พบว่าที่อุณหภูมิต่ำค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันที่อุณหภูมิสูงค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นผลสืบเนื่องมาจากความต้านทานโอห์มมิกเช่นเดียวกับผลของอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สทั้ง 2 ชนิดตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

จากรูปที่ 4.26 แสดงอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนกับศักย์ไฟฟ้า พบว่าที่ศักย์ไฟฟ้าสูงค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน เนื่องจากที่ศักย์ไฟฟ้างดกล่าวเป็นช่วงที่เกิดปฏิกิริยาได้น้อยการเปลี่ยนอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนจึงไม่ค่อยมีผลต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ และที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุจะลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนก็คือการเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้นเนื่องจากมีปริมาณไอออนมากทำให้ค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุลดลง



รูปที่ 4.26 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอัตราการใช้ของแก๊สไฮโดรเจนกับศักย์ที่มีต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ



รูปที่ 4.27 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ

รูปที่ 4.27 แสดงถึงอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและศักย์ไฟฟ้า จากรูปจะสังเกตเห็นว่าค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทำงานของเซลล์ทั้งที่ศักย์ไฟฟ้าสูงและศักย์ไฟฟ้าต่ำ เป็นผลเนื่องมาจากตัวแปรหลักคืออุณหภูมิและศักย์ไฟฟ้าที่ส่งผลให้ความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าของตัวแปรทั้งสอง

4.2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวเก็บประจุ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวเก็บประจุพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งค่าวิกฤต ($F_{0.05, 1, 25}$) เท่ากับ 4.24 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อตัวเก็บประจุคือ อุณหภูมิ (C) ศักย์ไฟฟ้า (D) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับศักย์ไฟฟ้า (CD) อันตรกิริยาของอัตราการใช้ของแก๊สเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดกับอุณหภูมิ (ABC) และอันตรกิริยาของแก๊สเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดกับศักย์ไฟฟ้า (ABD) จากผลที่ได้จากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (4.7)

$$C_d = 1499 - 15607x_C + 9919x_D + 17704x_C^2 + 4887x_Cx_D - 3400x_Ax_Bx_C - 3951x_Ax_Bx_D \quad (4.7)$$

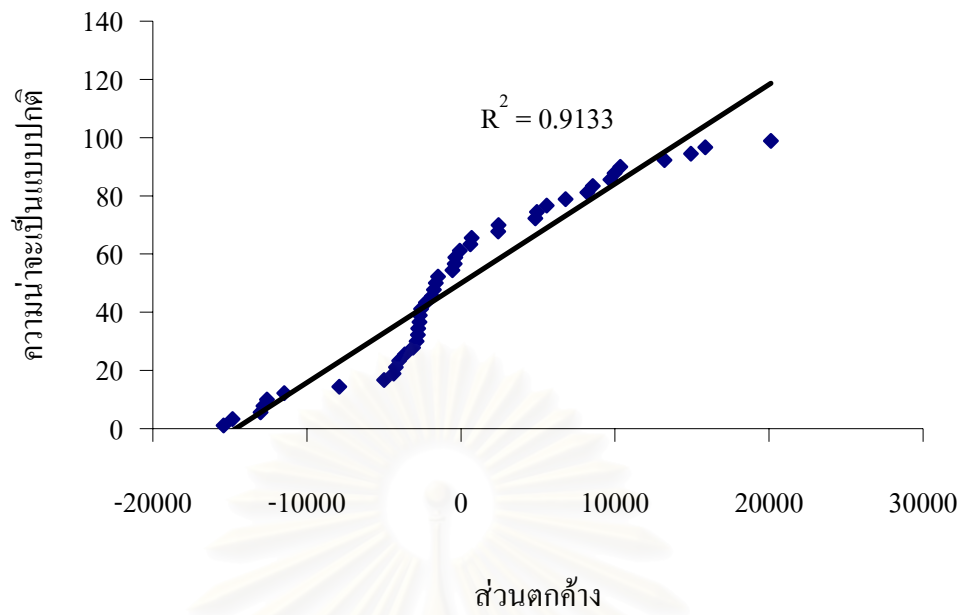
โดยที่ x คือ ค่าของตัวแปรที่เข้ารหัส

จากสมการเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้นำไปตรวจสอบความเหมาะสมของสมการที่จะนำมาใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลโดยการสร้างกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และกราฟของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกต้อง ดังแสดงในรูปที่ 4.28 และรูปที่ 4.29 ตามลำดับ

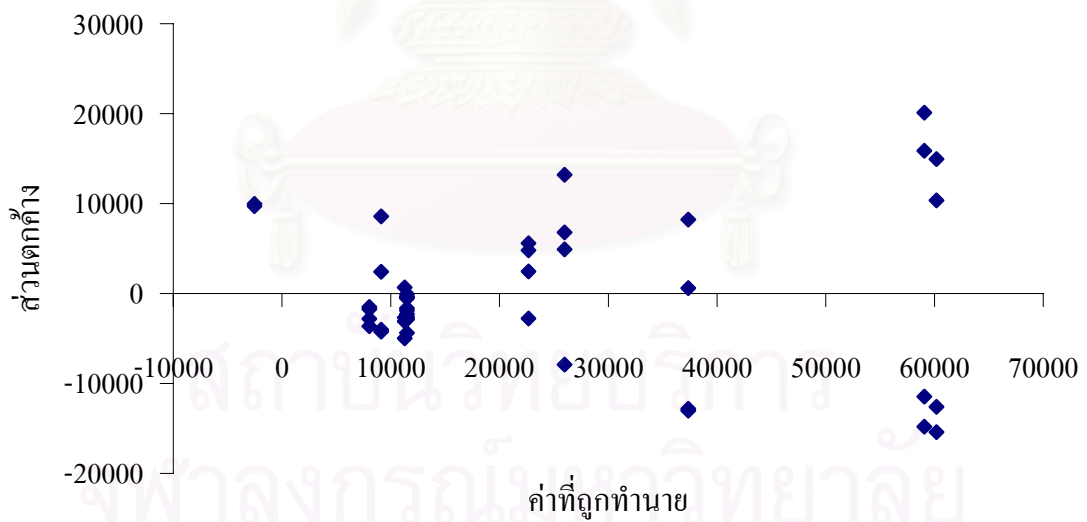
จากรูปที่ 4.28 พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.9133 แสดงว่าค่าของเศษตกค้างจากสมการมีการกระจายตัวที่เป็นแบบปกติ แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 4.29 พบว่าการกระจายตัวของเศษตกค้างมีค่าไม่คงที่ แสดงว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4.7) ไม่มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นจึงทำการเปลี่ยนรูปข้อมูล โดยทำการเปลี่ยนข้อมูลที่ได้จากการทดลองให้อยู่ในรูปลอการิทึมฐาน 10 ของข้อมูลเดิม ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลชุดใหม่ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวเก็บประจุ

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F -Value	P-Value
A	2.89×10^4	1	2.89×10^4	0.0004	0.9845
B	7.62×10^6	1	7.62×10^6	0.1016	0.7525
C	7.79×10^9	1	7.79×10^9	103.9490	< 0.0001
D	3.72×10^9	1	3.72×10^9	49.6728	< 0.0001
A ²	2.92×10^6	1	2.92×10^6	0.0390	0.8450
B ²	1.39×10^7	1	1.39×10^7	0.1859	0.6701
C ²	5.44×10^8	1	5.44×10^8	7.2548	0.0124
D ²	1.44×10^8	1	1.44×10^8	1.9148	0.1787
AB	2.69×10^7	1	2.69×10^7	0.3588	0.5546
AC	3.12×10^8	1	3.12×10^8	4.1593	0.0521
AD	7.00×10^7	1	7.00×10^7	0.9331	0.3433
BC	8.52×10^6	1	8.52×10^6	0.1137	0.7388
BD	5.35×10^5	1	5.35×10^5	0.0071	0.9334
CD	7.64×10^8	1	7.64×10^8	10.1929	0.0038
ABC	3.70×10^8	1	3.70×10^8	4.9325	0.0356
ABD	5.00×10^8	1	5.00×10^8	6.6618	0.0161
ACD	2.89×10^7	1	2.89×10^7	0.3858	0.5401
BCD	1.47×10^8	1	1.47×10^8	1.9625	0.1735
ABCD	1.95×10^8	1	1.95×10^8	2.6002	0.1194
Error	1.87×10^9	25	7.50×10^7		
Total	1.95×10^{10}	44			



รูปที่ 4.28 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตักข้างในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 4.29 กราฟของส่วนตักข้างกับค่าที่ถูกต้องทำนายของตัวเก็บประจุ

ตารางที่ 4.7 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของลอกาทิมของตัวเก็บประจุ

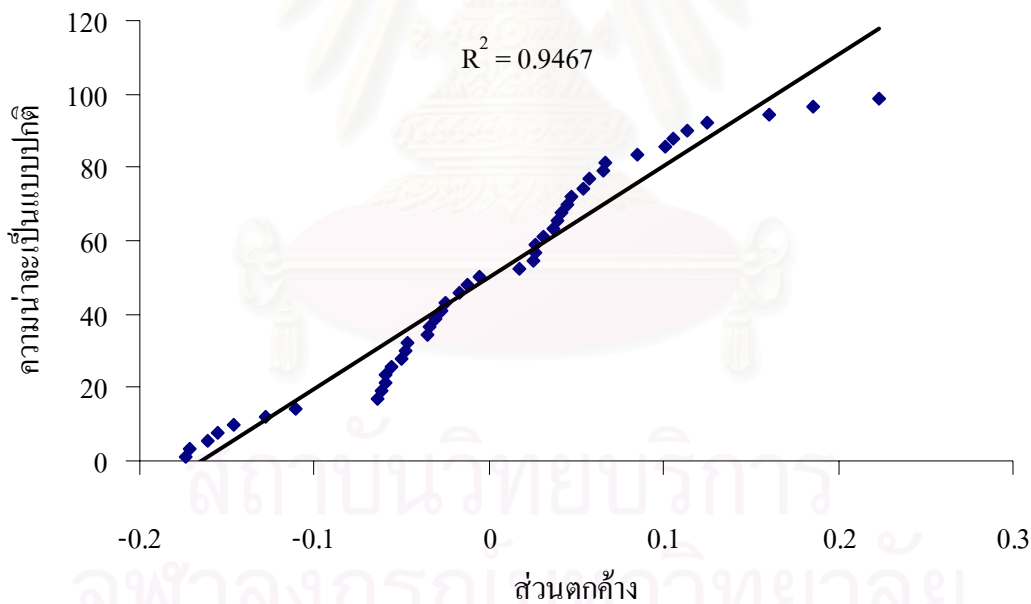
Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F -Value	P-Value
A	0.0247	1	0.0247	3.0753	0.0917
B	0.0036	1	0.0036	0.4423	0.5121
C	2.8179	1	2.8179	350.2541	< 0.0001
D	0.9291	1	0.9291	115.4801	< 0.0001
A ²	0.0051	1	0.0051	0.6346	0.4332
B ²	0.0285	1	0.0285	3.5448	0.0714
C ²	0.2811	1	0.2811	34.9433	< 0.0001
D ²	0.0033	1	0.0033	0.4142	0.5257
AB	0.0267	1	0.0267	3.3152	0.0806
AC	0.1660	1	0.1660	20.6304	0.0001
AD	0.0018	1	0.0018	0.2240	0.6401
BC	0.0297	1	0.0297	3.6875	0.0663
BD	0.0129	1	0.0129	1.6013	0.2174
CD	0.0040	1	0.0040	0.4985	0.4867
ABC	0.1088	1	0.1088	13.5224	0.0011
ABD	0.3301	1	0.3301	41.0287	< 0.0001
ACD	0.0278	1	0.0278	3.4567	0.0748
BCD	0.0508	1	0.0508	6.3160	0.0188
ABCD	0.1932	1	0.1932	24.0093	< 0.0001
Error	0.2011	25	0.0080		
Total	6.0995	44			

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.7 พบว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อตัวเก็บประจุคือ ออุณหภูมิ (C) ศักย์ไฟฟ้า (D) อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนกับอุณหภูมิ (AC) อันตรกิริยาของแก๊สเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดกับอุณหภูมิ (ABC) อันตรกิริยาของแก๊สเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดกับศักย์ไฟฟ้า (ABD) อันตรกิริยาของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน อุณหภูมิและศักย์ไฟฟ้า

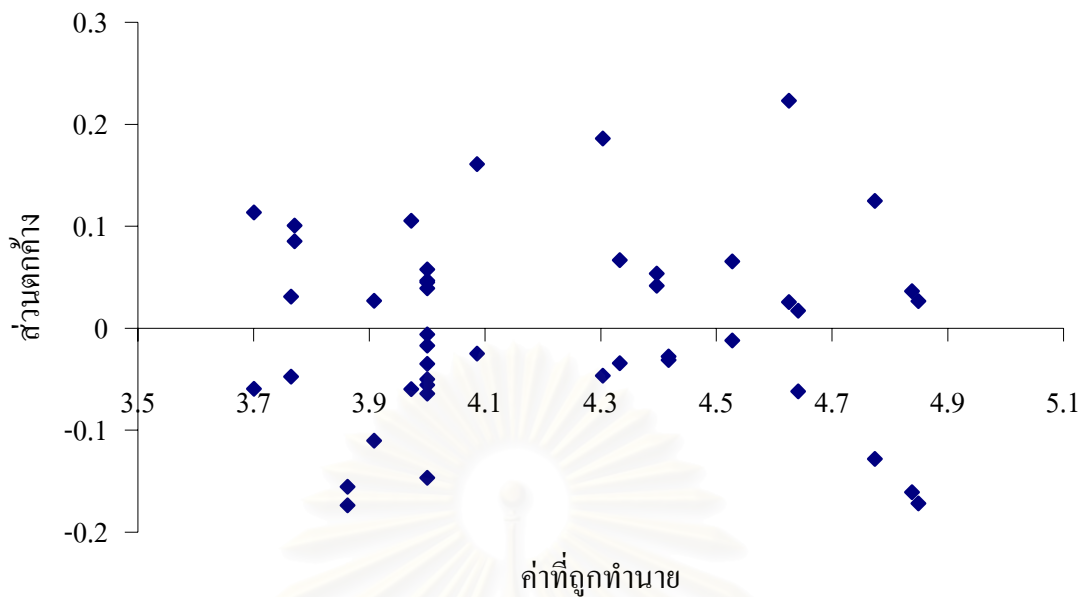
(BCD) และอันตรกิริยาของตัวแปรทั้งหมด (ABCD) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (4.8)

$$\begin{aligned} \text{Log } C = & 4.0002 - 0.2967x_C + 0.1622x_D + 0.3124x_C^2 + 0.0720x_Ax_C - 0.0583x_Ax_Bx_C \\ & - 0.1016x_Ax_Bx_D - 0.0398x_Bx_Cx_D - 0.0777x_Ax_Bx_Cx_D \end{aligned} \quad (4.8)$$

เมื่อทำการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการที่ (4.8) โดยการสร้างความน่าจะเป็นแบบปกติดังรูปที่ 4.30 พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.9467 แสดงว่าค่าของเศษตกค้างจากสมการมีการกระจายตัวที่เป็นแบบปกติ ซึ่งตามสมมติฐานของการแจกแจงปกติแล้วพฤติกรรมดังกล่าวจะแสดงถึงค่าเฉลี่ยของเศษตกค้างมีค่าเท่าศูนย์ และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.31 พบว่าการกระจายตัวของเศษตกค้างมีค่าคงที่และไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ในสมการที่ (4.8) สามารถใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างเหมาะสมโดยมีค่า $R^2_{\text{prediction}}$ เท่ากับ 0.882



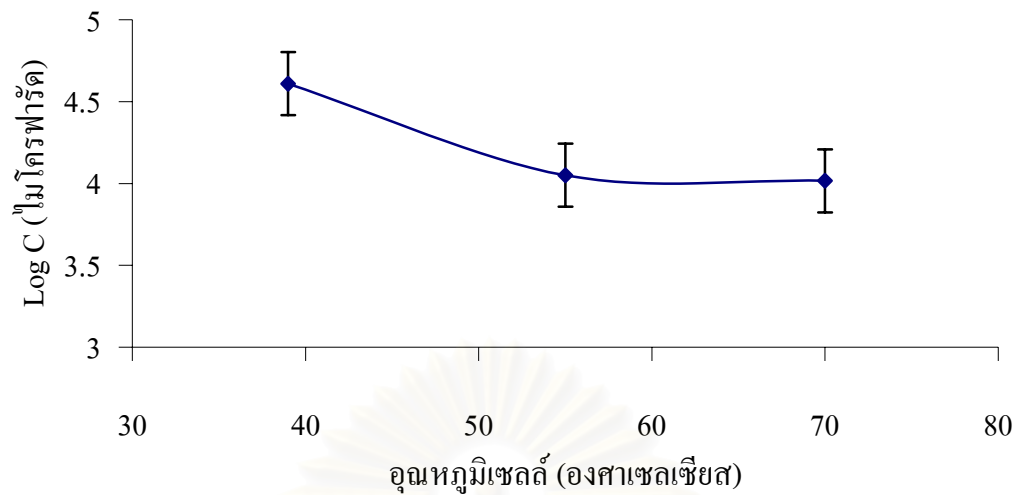
รูปที่ 4.30 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าลอการีทึมของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 4.31 กราฟของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของค่าลอการิทึมของตัวเก็บประจุ

- ผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวเก็บประจุ

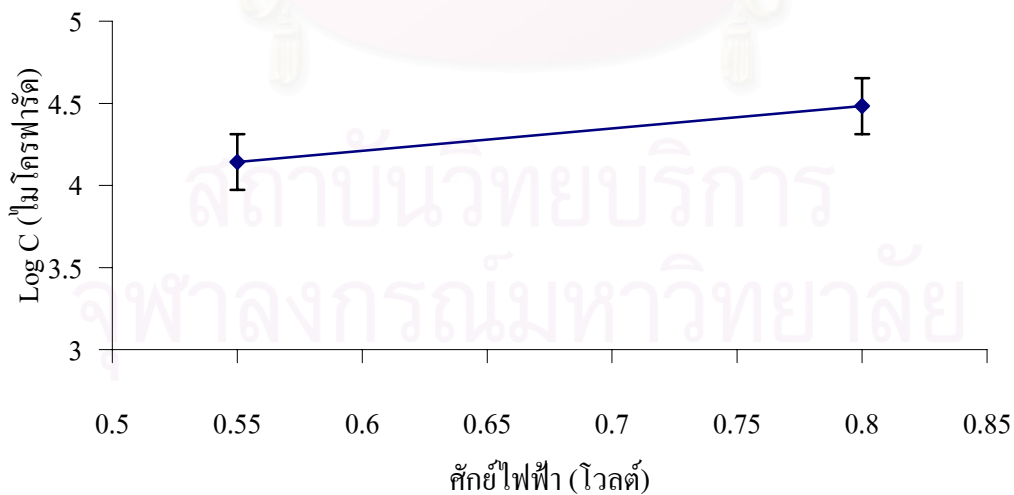
จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทำให้ทราบว่าอุณหภูมิมีผลต่อตัวเก็บประจุแบบไม่เป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 4.32 จากกราฟจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าของตัวเก็บประจุจะลดลงเล็กน้อยจนกระทั่งถึงค่าหนึ่ง ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้อิเล็กตรอนได้รับพลังงานกระตุ้น ที่ขั้วแอโนดอิเล็กตรอนจึงสามารถเอาชนะแรงดึงดูดของโปรตอนได้ทางด้านฝั่งแคโทดอิเล็กตรอนได้รับพลังงานกระตุ้นทำให้สามารถข้ามช่องว่างสามเฟสเข้าไปทำปฏิกิริยากับโปรตอนแล้วออกซิเจนได้จึงทำให้ค่าของตัวเก็บประจุลดลง [Geoffrey, 1990] แต่จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไประยะหนึ่งค่าตัวเก็บประจุจะเริ่มคงที่ อาจเป็นเนื่องจากค่าความต้านทานประจุจะคงที่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 55 องศาเซลเซียส ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจนคงที่ ดังนั้นอัตราการคายประจุของตัวเก็บประจุก็จะคงที่ด้วย



รูปที่ 4.32 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวเก็บประจุ

- ผลของศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อตัวเก็บประจุ

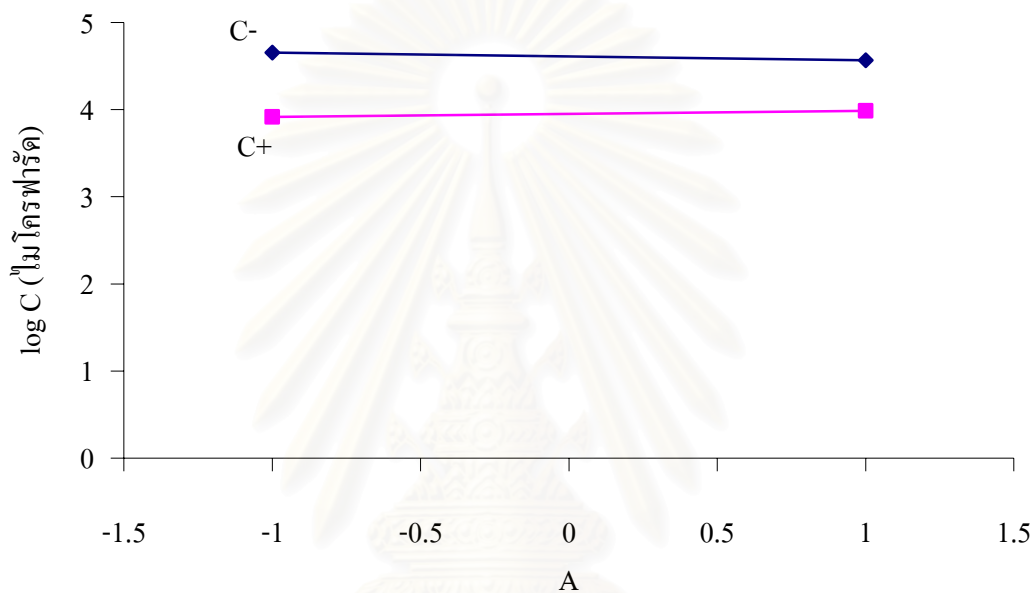
จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทำให้ทราบว่าศักย์ไฟฟ้ามีผลต่อตัวเก็บประจุแบบเชิงเส้น โดยเมื่อศักย์ไฟฟ้าลดลงค่าของตัวเก็บประจุจะลดลงดังรูปที่ 4.33 เนื่องจากเมื่อศักย์ไฟฟ้าลดลงจะทำให้เกิดการคายประจุบริเวณชั้นประจุเชิงคู่ได้เร็วขึ้นซึ่งจะเห็นได้จากกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น [Romero-Castanon และคณะ, 2003]



รูปที่ 4.32 ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อตัวเก็บประจุ

- ผลของอันตรกิริยาที่มีต่อตัวเก็บประจุ

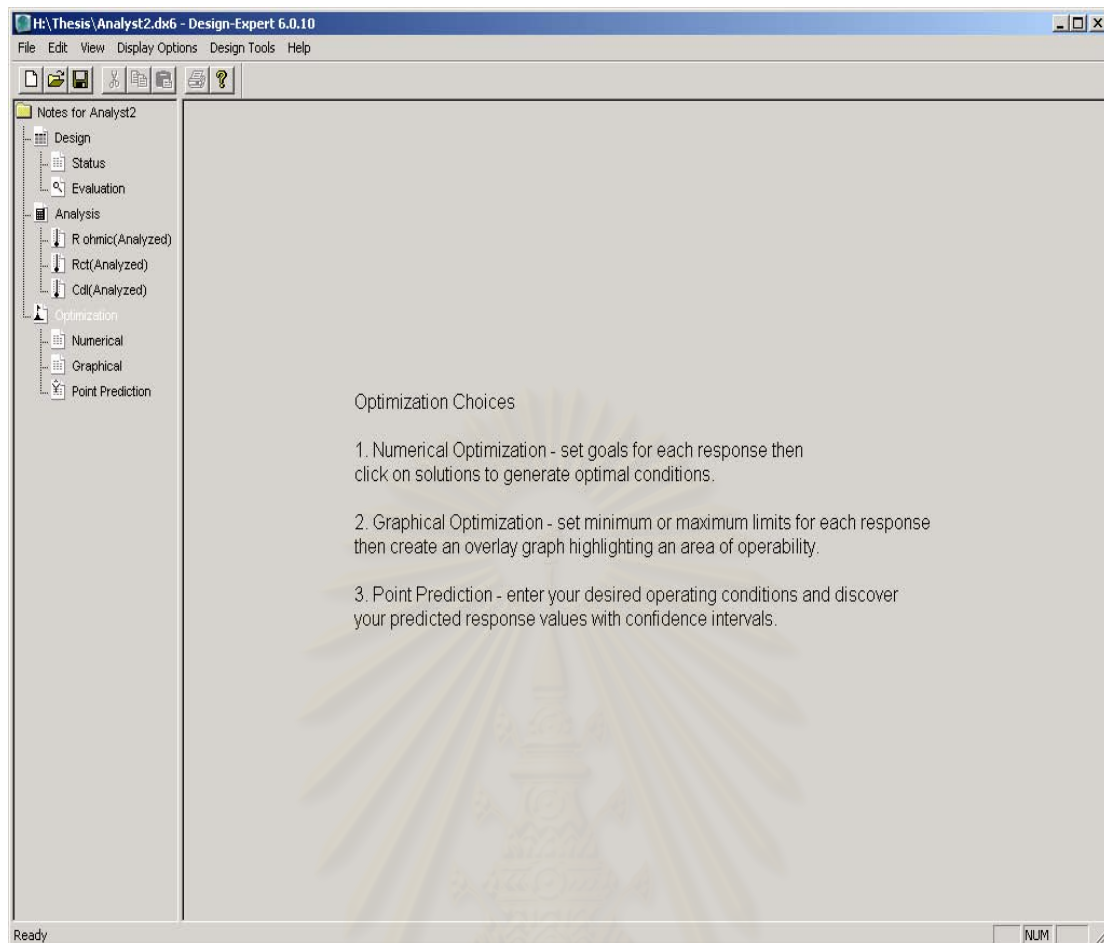
รูปที่ 4.34 แสดงถึงอันตรกิริยาระหว่างอัตราการใช้ของแก๊สไฮโดรเจนกับอุณหภูมิ จากรูปสังเกตว่าไม่เห็นอันตรกิริยาระหว่างอัตราการใช้ของแก๊สไฮโดรเจนกับอุณหภูมิ แต่เมื่อดูจากตารางที่ 4.7 พบว่าอันตรกิริยาระหว่างอัตราการใช้ของแก๊สไฮโดรเจนกับอุณหภูมิมิมีผลต่อตัวเก็บประจุเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 4.34 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอัตราการใช้ของแก๊สไฮโดรเจนกับอุณหภูมิที่มีต่อตัวเก็บประจุ

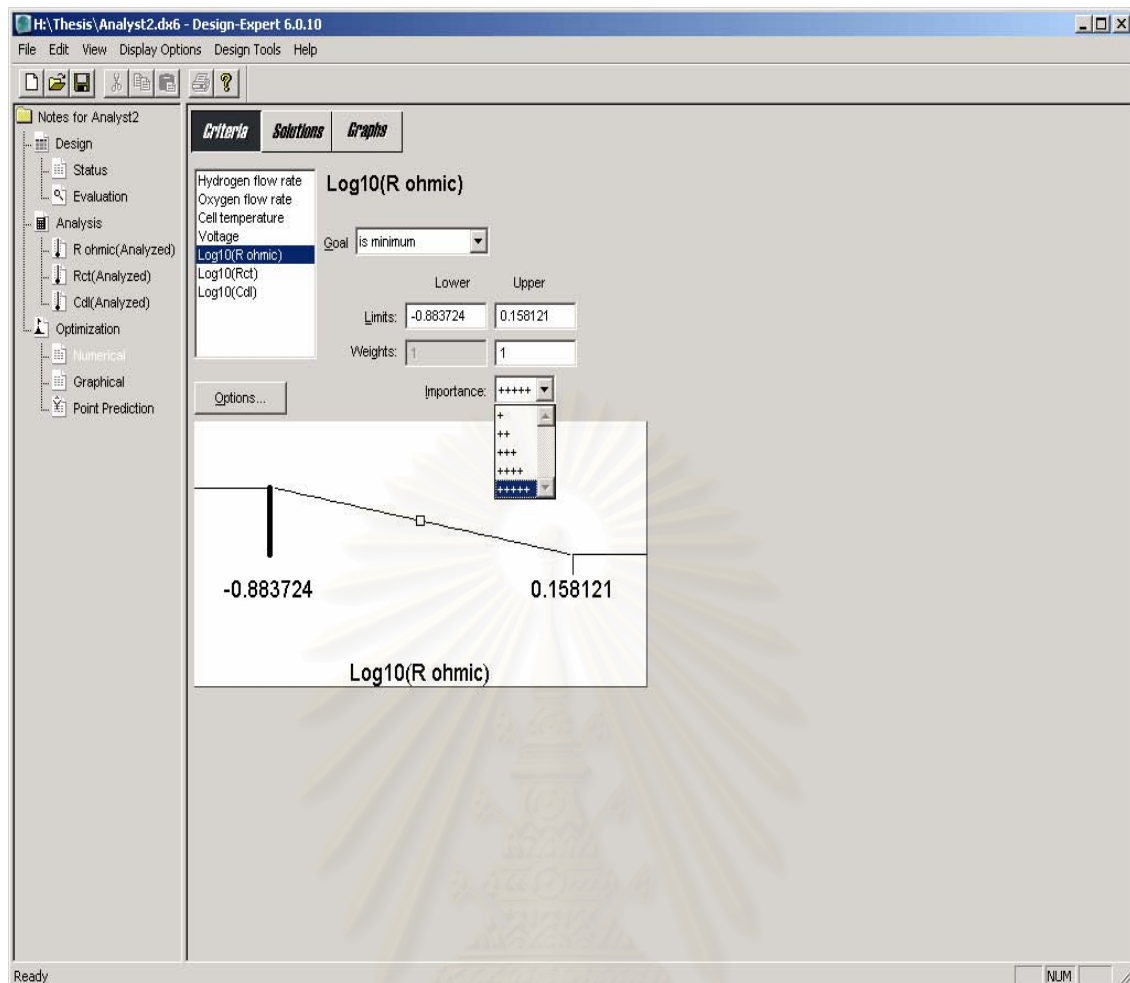
4.3 ภาวะที่ดีที่สุดในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

ภาวะการทำงานที่ดีที่สุดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนนั้นคือภาวะที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงานแล้วให้ค่าความต้านทาน โอห์มมิก ความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ และค่าตัวเก็บประจุมีน้อยที่สุด โดยสามารถหาได้จากสมการที่ (4.3) (4.6) และ (4.8) ซึ่งการคำนวณหาภาวะที่ทำให้ค่าความต้านทานทั้งสองและค่าตัวเก็บประจุมีน้อยที่สุดจากสมการทั้งสามนั้นมีความซับซ้อนมาก ดังนั้นจึงได้นำโปรแกรมสำเร็จรูปคือ Design – Expert 6.0.10 เข้ามาช่วยในการคำนวณ (รูปที่ 4.35)



รูปที่ 4.35 โปรแกรม Design – Expert 6.0.10 ที่ใช้ในการคำนวณหาภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

เนื่องจากผลตอบสนองมี 3 ค่าคือ ความต้านทานโอห์มมิก ความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุและตัวเก็บประจุ จึงต้องกำหนดความสำคัญให้กับผลตอบสนองแต่ละตัวดังรูปที่ 4.36 โดยระดับความสำคัญสูงสุดอยู่ที่ระดับ 5 และระดับความสำคัญต่ำสุดคือ 1 ในการหาภาวะที่เหมาะสมจะให้ระดับความสำคัญที่ระดับ 5 สำหรับผลตอบสนองที่สนใจ และระดับ 3 สำหรับผลตอบสนองที่ไม่ให้ความสนใจรองลงมา ดังตารางที่ 4.8 แสดงภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่สัมพันธ์กับผลตอบสนองที่ถูกให้ความสำคัญในระดับ 5

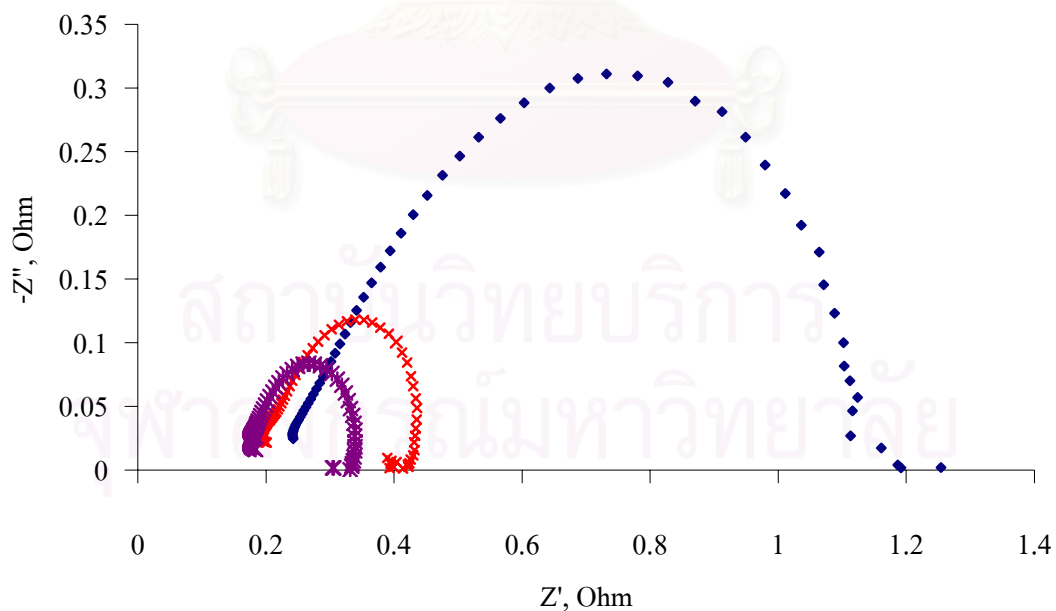


รูปที่ 4.35 การให้ความสำคัญกับผลตอบสนองของโปรแกรม Design – Expert

ตารางที่ 4.8 แสดงภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่สัมพันธ์กับผลตอบสนองที่ถูกให้ความสำคัญที่ระดับที่ 5 จะเห็นว่าภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบ่งได้ 3 ภาวะ คือ ภาวะที่ 1 อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 200 sccm อุณหภูมิการทำงานของเซลล์ 70 องศาเซลเซียส ศักย์ไฟฟ้า 0.55 โวลต์ โดยที่ภาวะนี้จะให้ความสำคัญระดับที่ 5 กับ R_{Ω} , R_{ct} , C_d หรือ R_{Ω} , C_d หรือ R_{ct} , C_d หรือ R_{Ω} ภาวะที่ 2 เป็นภาวะที่ได้จากการให้ระดับความสำคัญกับ R_{ct} ในระดับที่ 5 โดยอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 118 และ 140 sccm ตามลำดับ อุณหภูมิเซลล์เท่ากับ 39 องศาเซลเซียส และศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.55 โวลต์ และภาวะที่ 3 เป็นภาวะที่ได้จากการให้ระดับความสำคัญกับ R_{ct} และ R_{Ω} ในระดับที่ 5 โดยมีอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 94 และ 140 sccm ตามลำดับ อุณหภูมิเซลล์เท่ากับ 39 องศาเซลเซียส และศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.55 โวลต์ นำภาวะที่ได้จากโปรแกรมมาทำการทดลองโดยการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้าเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลที่ได้จากสมการ

ตารางที่ 4.8 แสดงภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่สัมพันธ์กับผลตอบสนองที่ถูกต้อง
 ความสำคัญระดับ 5

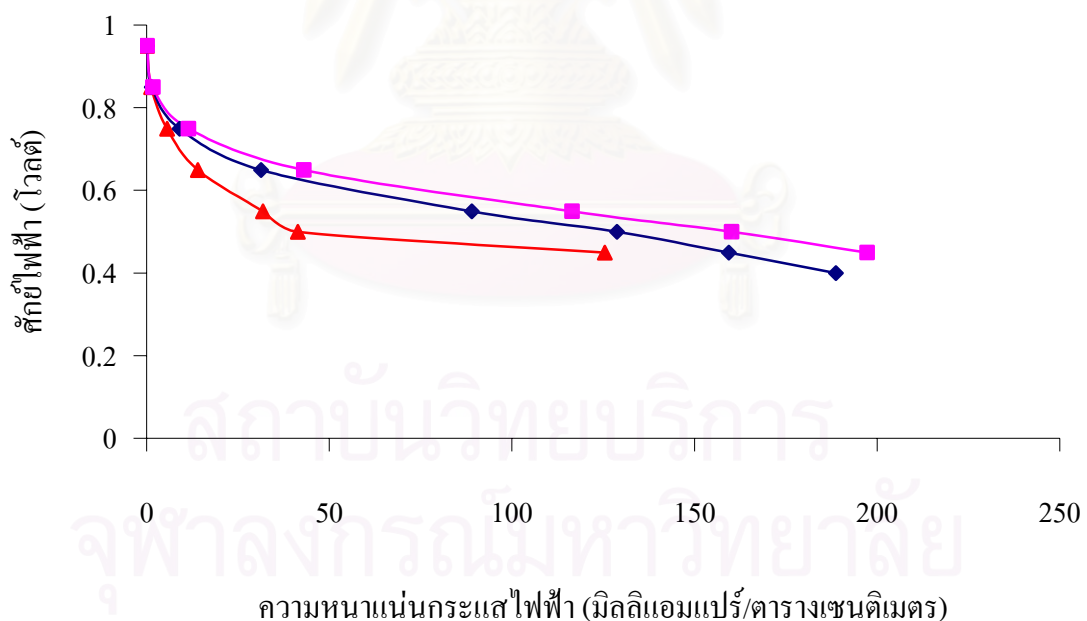
ภาวะที่	ผลตอบสนอง ที่ถูกต้อง ความสำคัญ ระดับ 5	ภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง			
		อัตราการ ไหลของ แก๊สไฮโดรเจน (sccm)	อัตราการ ไหลของ แก๊สออกซิเจน (sccm)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
1	$R_{\Omega}, R_{ct}, C_d /$ $R_{\Omega}, C_d / R_{ct}, C_d /$ R_{Ω} / C_d	200	200	70	0.55
2	R_{ct}	118	140	39	0.55
3	R_{Ω}, R_{ct}	94	140	39	0.55



รูปที่ 4.37 Nyquist plot ที่ภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงต่างๆ โดยที่ภาวะที่ 1 (♦) ภาวะที่ 2 (x)
 และภาวะที่ 3 (*)

รูปที่ 4.37 แสดงผลการทดลองซึ่งจากรูปจะเห็นว่าที่ภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ 3 คือให้ความสำคัญเฉพาะค่า R_{Ω} และ R_{ct} จะเป็นภาวะการทำงานที่ดีที่สุดเนื่องจากกราฟอิมพีแดนซ์มีขนาดเล็กและใกล้กับเส้นแกนตั้งที่สุด โดยมีค่าความต้านทานโอห์มมิกเท่ากับ 0.1743 โอห์ม ค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุเท่ากับ 0.2454 โอห์ม และค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 31337 ไมโครฟารัด ซึ่งค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุที่ได้จากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากสมการไม่เกินร้อยละ 15 แสดงดังตารางที่ 4.9

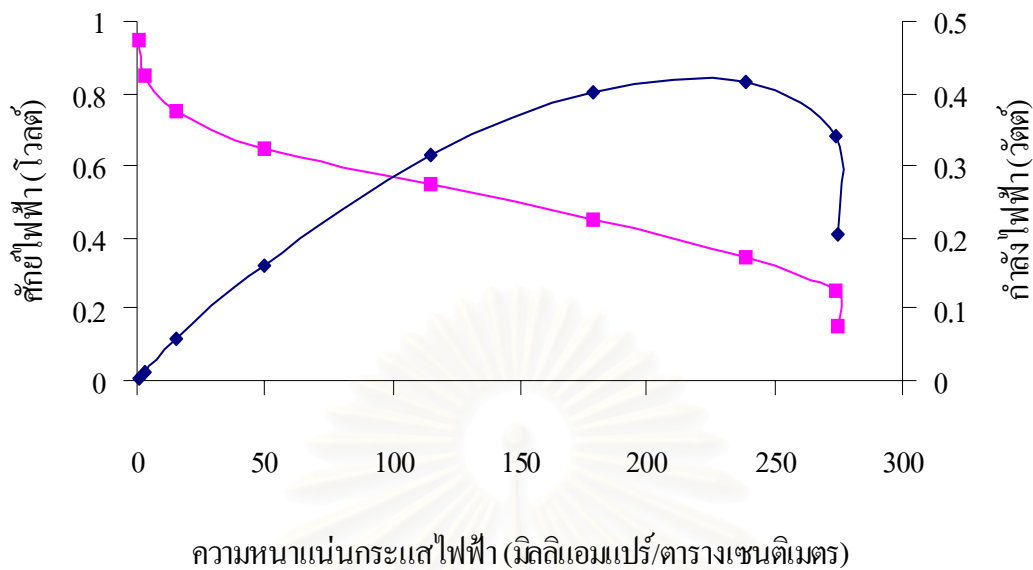
เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า จึงทำการวัดโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงทั้ง 3 ภาวะดังแสดงในรูปที่ 4.38 พบว่าให้ผลสอดคล้องกันคือที่ภาวะที่ 3 จะให้สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงดีที่สุดในช่วงที่ทำการทดลอง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 94 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 140 sccm อุณหภูมิเซลล์ 39 องศาเซลเซียสและศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.55 โวลต์ เป็นภาวะที่ดีที่สุดในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงที่ทำการทดลองเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ที่ฝั่งแอโนดอิ่มตัวและแคโทดร้อยละ 60 โดยกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.4 วัตต์ ที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.35 โวลต์และมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 238.72 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.38 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่ภาวะต่างๆ โดยที่ (▲) คือภาวะที่ 1 (◆) คือภาวะที่ 2 และ (■) คือภาวะที่ 3

ตารางที่ 4.9 ผลของการหาภาวะที่ดีที่สุดในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

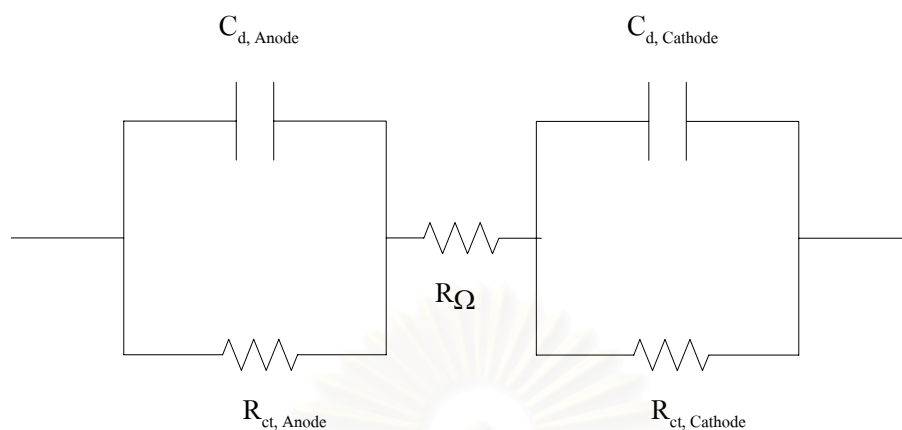
ภาวะที่	ผลตอบสนอง ที่ถูกละ ความสำคัญ ระดับ 5	ผลตอบสนอง								
		R_{Ω} (โอห์ม)			R_{ct} (โอห์ม)			C_d (ไมโครฟารัด)		
		การ ทดลอง	สมการ	คลาดเคลื่อน (ร้อยละ)	การ ทดลอง	สมการ	คลาดเคลื่อน (ร้อยละ)	การ ทดลอง	สมการ	คลาดเคลื่อน (ร้อยละ)
1	$R_{\Omega}, R_{ct}, C_d /$ $R_{\Omega}, C_d / R_{ct}, C_d /$ R_{Ω} / C_d	0.2409 - -	0.2608 - -	7.6 - -	0.7789 - -	0.8374 - -	7 - -	11523 - -	12191 - -	10 - -
2	R_{ct}	0.1992	0.2127	9.7	0.3369	0.306	10.1	26640	28293	5.8
3	R_{Ω}, R_{ct}	0.1743	0.1862	6.4	0.2454	0.2864	14.3	31337	31622	0.9



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 94 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 140 sccm อุณหภูมิเซลล์ 39 องศาเซลเซียส เมื่อให้ความชื้นฝั่งแคโทดร้อยละ 60 กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.4 วัตต์

4.4 วงจรไฟฟ้าสมมูล

จากผลของการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้าที่ภาวะการทำงานที่ดีที่สุดในช่วงการทดลองคือ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 94 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 140 sccm หรือค่า Stoichiometry ratio เท่ากับ 1:3 อุณหภูมิเซลล์ 39 องศาเซลเซียส และศักย์ไฟฟ้า 0.55 โวลต์ สามารถหาวงจรไฟฟ้าสมมูลได้ โดยใช้โปรแกรม FRA ซึ่งวงจรไฟฟ้าสมมูลที่ได้เป็นไปดังรูปที่ 4.40 โดยจะประกอบไปด้วยความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุต่อขนานกับตัวเก็บประจุทั้งด้านแอโนดและแคโทดและจะต่ออนุกรมกับค่าความต้านทานโอห์มมิกซึ่งกันอยู่กึ่งกลางระหว่างขั้วทั้งสอง ค่าขององค์ประกอบต่างๆ ของวงจรไฟฟ้าสมมูลที่ได้จากโปรแกรมแสดงดังตารางที่ 4.10 โดยจะเห็นว่าเมื่อรวมความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุและตัวเก็บประจุของทั้ง 2 ขั้วเข้าด้วยกันจะมีค่าไม่เท่ากับค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุรวมของระบบในตารางที่ 4.9 เนื่องจากว่าค่าที่ขั้วแอโนดมาจากส่วนโค้งของครึ่งวงกลมที่บริเวณความถี่สูงซึ่งมีขนาดเล็กมากทำให้การหาค่าดังกล่าวทำได้ยากค่าที่ได้จึงอาจจะมีคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง โดยสามารถดูได้จากค่า Chi - square (χ^2) ซึ่งมีค่าค่อนข้างมาก



รูปที่ 4.40 วงจรไฟฟ้าสมมูลของเซลล์เชื้อเพลิงที่ภาวะการทำงานที่ดีที่สุด

ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบต่างๆ ของวงจรไฟฟ้าสมมูล

องค์ประกอบของวงจรไฟฟ้าสมมูล		χ^2
R_{Ω} (โอห์ม)	0.170	1.546
$R_{ct, Anode}$ (โอห์ม)	0.023	
$C_{d, Anode}$ (ฟารัด)	0.021	
$R_{ct, Cathode}$ (โอห์ม)	0.157	
$C_{d, Cathode}$ (ฟารัด)	0.165	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 ผลของตัวแปรต่างๆ

จากการศึกษาถึงผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยใช้เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน อุณหภูมิภายในเซลล์ และศักย์ไฟฟ้า ซึ่งในการทดลองจะออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k โดยอัตราการไหลของแก๊สทั้ง 2 ชนิดจะมีค่าต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่ 80 และ 200 sccm ตามลำดับ อุณหภูมิจะมีค่าต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่ 39 และ 70 องศาเซลเซียสตามลำดับ และศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่ 0.55 และ 0.8 โวลต์ตามลำดับ ทำการทดลองที่ภาวะการให้ความชื้นฝั่งแคโทดร้อยละ 60

จากผลการทดลองในการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ใช้ในการทดลอง คือ อุณหภูมิภายในเซลล์ ศักย์ไฟฟ้า และอันตรกิริยาของศักย์ไฟฟ้ากับแก๊สเชื้อเพลิงและแก๊สออกซิโดซ์ และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนยังส่งผลต่อค่าความต้านทานโอห์มมิกและค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าความต้านทานโอห์มมิก ความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุและค่าตัวเก็บประจุ สามารถนำมาใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลได้เป็นอย่างดีและจากสมการทั้งสามนี้จะทำให้สามารถหาภาวะที่ดีที่สุดในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้โดยภาวะที่ดีที่สุดในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงที่ทำกรทดลองคือ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 94 และ 140 sccm ตามลำดับ อุณหภูมิเซลล์เท่ากับ 39 องศาเซลเซียส และศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.55 โวลต์ โดยที่ภาวะการให้ความชื้นกับแก๊สขาเข้าที่ฝั่งแคโทดอยู่ที่ร้อยละ 60 และค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงที่ภาวะการทำงานนี้เท่ากับ 0.4 วัตต์ ที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.35 โวลต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การทดลองควรทำซ้ำอย่างน้อย 1 ครั้ง เนื่องจากอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีมีการตอบสนองเร็วต่อสิ่งที่เปลี่ยนแปลงไปในระบบ จึงควรทำการทดลองซ้ำเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง

2. ก่อนที่จะทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ควรปล่อยแก๊สเชื้อเพลิงให้ไหลผ่านระบบอย่างน้อย 30 นาที เพื่อให้ระบบเข้าสู่ภาวะคงที่
3. ควรที่จะทำการศึกษาผลของความชื้นที่มีต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงโดยการติดตั้งอุปกรณ์ที่สามารถวัดความชื้นได้โดยตรง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ปารเมศ ชุติมา, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

พัฒนพงษ์ สวางนรักษ์, การออกแบบหน่วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

ภาษาอังกฤษ

Allen J. B. and Larry R. F., Electrochemical methods fundamentals and applications, New York : John Wiley & Sons., 2000

Andreas B., McEvoy A.J. and Scherer G.G., Analysis performance loss in polymer electrolyte fuel cells at high current densities by impedance spectroscopy, Electrochimica Acta 47 (2002) : 2223-2229

Application notes: Electrochemical impedance spectroscopy (On-line). Available from <http://www.ecochemie.nl/?pag=5>

Barbir F., PEM fuel cell theory and practice. California, Elsevier Academic Press, 2005

Barsoukov E. and Macdonald J.R., Impedance spectroscopy, Theory, Experiment and Applications, New Jersey: John Wiley & Sons., 2005

Brand D., Cornell researchers to kick-start fuel cell development with \$2.25 million federal award to find new materials for cheap, efficient technology (on-line). Available from <http://www.news.cornell.edu/releases/Nov03/Fuelcell.institute.deb.html>

Eikerling M. and Kornyshev A.A., Electrochemical impedance of the cathode catalyst layer in polymer electrolyte fuel cells, journal of Electroanalytical Chemistry 475 (1999) : 107-123

Freire T.J.P. and Gonzalez E.R., Effect of membrane characteristics and humidification conditions on the impedance response of polymer electrolyte fuel cells, Journal of Electroanalytical Chemistry 503 (2001) : 57-68

Geoffrey P., Electrochemical Engineering Principles, Prentice Hall International Inc., 1990

Larminie J. and Dicks A., Fuel Cell Systems Explained, John Wiley & Sons Ltd., 2003

Litster, S., and McLean, G., PEM fuel cell electrode, Journal of Power Sources 130 (2004) : 61-76.

- Montgomery D.C., Design and analysis of experiments, 5th ed. New York: John Wiley & Sons Ltd., 2001
- O' Hayre R., Cha S. W. and Colella W., Fuel cell fundamentals. New York, John Wiley & Sons., 2006
- Prasanna M., Ha H.Y., Cho E.A., Hong S.-A. and Oh I.-H., Investigation of oxygen gain in polymer electrolyte membrane fuel cells, Journal of Power Sources 137 (2004) : 1-8
- Romero-Castañón T. Arriaga L.G., and Cano-Castillo U., Impedance spectroscopy as a tool in the evaluation of MEA's, Journal of Power Sources 118 (2003) : 179-182
- Wolf V., Hubert A.G. and Arnold L., Handbook of fuel cells – Fundamentals, Technology and Applications, Vol. 2: Electrocatalysis, New York : John Willey & Sons Ltd., 2003.
- Wood D. L., Yi J. S. and Nguyen T. V., Effect of direct liquid water injection and interdigitated flow field on the performance of proton exchange membrane fuel cells, Electrochimica Acta 43 (1998) : 3795-3809



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

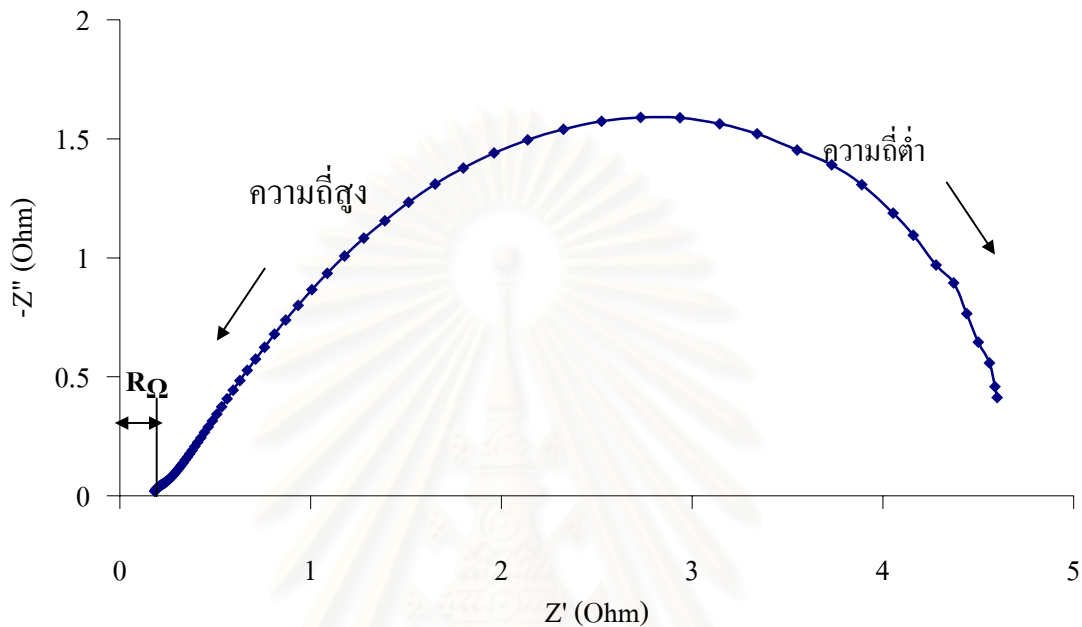


ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การหาค่าความต้านทานโอห์มมิก ความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุและตัวเก็บประจุ



รูปที่ ก1 แสดงตัวอย่าง Nyquist plot ที่ใช้ในการหาค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุ ที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส ศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์

จากกราฟ Nyquist plot รูปที่ ก1 ที่ได้จากการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า สามารถหาค่าความต้านทานโอห์มมิกได้จากค่าตัดแกนนอนที่บริเวณความถี่สูงซึ่งจากกราฟรูปนี้จะได้ค่าเท่ากับ 0.167 โอห์ม และจากกราฟรูปเดียวกันยังสามารถหาค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุได้ โดยในทางทฤษฎีสามารถหาได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางของสวนโค้งครึ่งวงกลม แต่ในกรณีนี้จะเห็นว่าที่บริเวณความถี่ต่ำ กราฟที่ได้ไม่โค้งลงมาตัดกับเส้นแกนนอน ดังนั้นจึงได้นำวิธี Karmers-Konig Transform เข้ามาใช้ในการหาค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ โดยค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R_{ct} = \left(\frac{2}{\pi}\right) \int_0^{\infty} \left[\frac{Z''(x)}{x}\right] dx \approx \left(\frac{2}{\pi}\right) \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \left[\frac{Z''(x)}{x}\right] dx$$

โดยที่ R_{ct} คือ ความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ (โอห์ม)
 $Z''(x)$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ส่วนจินตภาพที่ความถี่ใดๆ (โอห์ม)
 x คือ ความถี่ (เฮิรตซ์)

จากการคำนวณโดยการหาพื้นที่ใต้กราฟที่พล็อตระหว่าง $[Z''(x)/x]$ กับ x จะได้ค่า R_{ct} มีค่าเท่ากับ 4.187 โอห์ม หลังจากที่ได้ค่า R_{ct} มาแล้ว สามารถนำค่าที่ได้ไปหาค่าตัวเก็บประจุ (C_d) ได้จากการคำนวณในสมการ

$$\omega = 1/(R_{ct}C_d)$$

โดยที่ ω คือ ค่าความถี่เชิงมุมที่จุดสูงสุดของกราฟ Nyquist plot
 C_d คือ ตัวเก็บประจุ (ฟารัด)

ซึ่งในตัวอย่างกราฟที่แสดงนี้ มีค่าความถี่เชิงมุมที่จุดสูงสุดเท่ากับ 3.187 เรเดียน และจากสมการข้างต้น สามารถคำนวณค่าตัวเก็บประจุได้ดังนี้

$$\begin{aligned} 3.187 &= 1/(4.187 * C_d) \\ C_d &= 1/(4.187 * 3.187) \\ &= 0.0655 \text{ ฟารัด} \end{aligned}$$

ดังนั้นตัวเก็บประจุจึงมีค่าเท่ากับ 0.0655 ฟารัด

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การแปลงค่าตัวแปรจริงให้อยู่ในรูปตัวแปรเข้ารหัส

ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k จำเป็นต้องแปลงค่าตัวแปรจริงให้อยู่ในรูปของตัวแปรเข้ารหัส (x) สมการที่ใช้ในแปลงคือ

$$x_i = \frac{\xi_i - (\xi_{i,low} + \xi_{i,high}) / 2}{(\xi_{i,high} - \xi_{i,low}) / 2}$$

โดยที่ x_i คือ ตัวแปรที่ถูกเข้ารหัสของตัวแปร i

ξ_i คือ ค่าตัวแปรจริงของตัวแปร i

ในทางกลับกันถ้าต้องการแปลงค่าจากตัวแปรเข้ารหัสเป็นตัวแปรจริงก็ทำการย้ายข้างของสมการ

ตัวอย่างการแปลงค่าตัวแปรจริงให้เป็นตัวแปรเข้ารหัส

ต้องการแปลงค่าอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน (A) ให้เป็นตัวแปรเข้ารหัส

ค่าสูงสุดที่ทำการทดลอง ($\xi_{A, high}$) คือ 200 sccm

ค่าต่ำสุดที่ทำการทดลอง ($\xi_{A, low}$) คือ 80 sccm

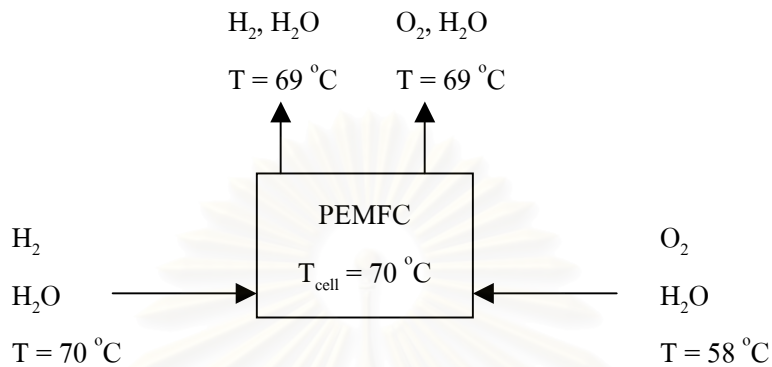
ค่าอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนที่ต้องการแปลง (ξ_A) คือ 140 sccm

$$x_A = \frac{140 - (80 + 200) / 2}{(200 - 80) / 2}$$

ตัวแปรเข้ารหัสของอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนที่ 140 sccm มีค่าเท่ากับ 0

ภาคผนวก ค

การคำนวณสมดุลน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ ค1 การทำสมดุลมวลของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง

ดุลน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง

ปริมาณน้ำสะสมในเซลล์เชื้อเพลิง = ปริมาณน้ำเข้า+ปริมาณจากปฏิกิริยา-ปริมาณน้ำออก

ข้อมูลจากการทดลอง

ความดัน	1	บรรยากาศ
อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	70	องศาเซลเซียส
อัตราการไหลเข้าของแก๊สไฮโดรเจน	0.0036	โมลต่อนาที
อัตราการไหลเข้าของแก๊สออกซิเจน	0.0036	โมลต่อนาที
ความชื้นแก๊สไฮโดรเจนขาเข้า	100	ร้อยละ
อุณหภูมิแก๊สไฮโดรเจนขาเข้า	70	องศาเซลเซียส
ความชื้นแก๊สออกซิเจนขาเข้า	60	ร้อยละ
อุณหภูมิแก๊สออกซิเจนขาเข้า	58	องศาเซลเซียส
ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง	0.8	โวลต์
ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้	0.013	แอมแปร์
ความชื้นแก๊สไฮโดรเจนขาออก	100	ร้อยละ
อุณหภูมิแก๊สไฮโดรเจนขาออก	69	องศาเซลเซียส
ความชื้นแก๊สออกซิเจนขาออก	84	ร้อยละ
อุณหภูมิแก๊สออกซิเจนขาออก	69	องศาเซลเซียส

ปริมาณน้ำในแก๊สขาเข้าฝั่งแอโนด

ความดันไอของน้ำที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเท่ากับ 0.0246 บรรยากาศ
จากกฎความดันย่อยของดาลตัน

$$P_T = P_{H_2} + P_{H_2O}$$

$$P_{H_2} = 1 - 0.0246 = 0.9754 \text{ บรรยากาศ}$$

จาก

$$\frac{P_{H_2}}{P_{H_2O}} = \frac{n_{H_2}}{n_{H_2O}}$$

น้ำที่เข้ามาพร้อมกับแก๊สไฮโดรเจน

$$n_{H_2O} = (0.0036)(0.0246)/(0.9754) = 9.04 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อนาที}$$

ดังนั้นจำนวนโมลของน้ำที่เข้ามาพร้อมกับแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 9.04×10^{-5} โมลต่อนาที

ฝั่งแคโทด

ความดันไอของน้ำที่อุณหภูมิ 58 องศาเซลเซียสเท่ากับ 0.0162 บรรยากาศ
จากกฎความดันย่อยของดาลตัน

$$P_T = P_{O_2} + P_{H_2O}$$

$$P_{O_2} = 1 - 0.0162 = 0.9838 \text{ บรรยากาศ}$$

น้ำที่เข้ามาพร้อมกับแก๊สออกซิเจน

$$n_{H_2O} = (0.0036)(0.0162)/(0.9838) = 5.89 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อนาที}$$

ดังนั้นจำนวนโมลของน้ำที่เข้ามาพร้อมกับแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 5.89×10^{-5} โมลต่อนาที

ปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา

ปริมาณน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาสามารถคำนวณได้จากค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลตามกฎของฟาราเดย์ คือ

$$n_{H_2O} = \frac{it}{n_e F}$$

เมื่อ i คือ ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

t คือ เวลา (วินาที)

n_e คือ จำนวนอิเล็กตรอน (equivalent ต่อ โมล)

F คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์มีค่า 96485 แอมแปร์.วินาทีต่อ โมล

$$n_{H_2O} = (0.013)(60)/(2)(96485) = 4.04 \times 10^{-6} \text{ โมลต่อนาที}$$

ดังนั้นจำนวนโมลของน้ำที่เกิดขึ้นเท่ากับ 4.04×10^{-6} โมลต่อนาที
จากปฏิกิริยา



จะใช้ไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 4.04×10^{-6} โมลต่อนาที

เหลือไฮโดรเจนขาออกเท่ากับ $0.0036 - 4.04 \times 10^{-6} = 0.0036$ โมลต่อนาที

จะใช้ออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 2.02×10^{-6} โมลต่อนาที

เหลือออกซิเจนขาออกเท่ากับ $0.0036 - 2.02 \times 10^{-6} = 0.0036$ โมลต่อนาที

ปริมาณน้ำในแก๊สขาออก

ฝั่งแอโนด

อุณหภูมิแก๊สขาออกเท่ากับ 69 องศาเซลเซียส และอิ่มตัวด้วยไอน้ำ

$$P_{H_2O} = 0.0239 \text{ บรรยากาศ}$$

$$P_{H_2} = 1 - 0.0239 = 0.9761 \text{ บรรยากาศ}$$

คำนวณหาโมลน้ำในแก๊สไฮโดรเจนขาออก

$$n_{H_2O} = (0.0036)(0.0239)/(0.9761) = 8.72 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อนาที}$$

ฝั่งแคโทด

อุณหภูมิแก๊สขาออกเท่ากับ 69 องศาเซลเซียส และความชื้นร้อยละ 84

$$P_{H_2O} = 0.0200 \text{ บรรยากาศ}$$

$$P_{O_2} = 1 - 0.0200 = 0.9800 \text{ บรรยากาศ}$$

คำนวณหาโมลน้ำในแก๊สออกซิเจนขาออก

$$n_{H_2O} = (0.0036)(0.0200)/(0.9800) = 7.30 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อนาที}$$

คูลน้ำที่ฝั่งแอโนด

ปริมาณน้ำสะสมที่ฝั่งแอโนด = ปริมาณน้ำเข้าที่ฝั่งแอโนด - ปริมาณน้ำออกที่ฝั่งแอโนด

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณน้ำสะสมที่ฝั่งแอโนด} &= 9.04 \times 10^{-5} - 8.72 \times 10^{-5} \\ &= 3.16 \times 10^{-6} \text{ โมลต่อนาที} \end{aligned}$$

คูลน้ำที่ฝั่งแคโทด

ปริมาณน้ำสะสมที่ฝั่งแคโทด = ปริมาณน้ำเข้าที่ฝั่งแคโทด + ปริมาณน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยา
- ปริมาณน้ำออกที่ฝั่งแคโทด

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณน้ำสะสมที่ฝั่งแคโทด} &= 5.89 \times 10^{-5} + 4.04 \times 10^{-6} - 7.30 \times 10^{-5} \\ &= -1.0 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อนาที} \end{aligned}$$

คลื่อน้ำทั้งหมดในเซลล์เชื้อเพลิง

$$\begin{aligned}\text{ปริมาณน้ำที่สะสม} &= (9.04 \times 10^{-5}) + (5.89 \times 10^{-5}) + (4.04 \times 10^{-6}) - (8.72 \times 10^{-5}) - (7.30 \times 10^{-5}) \\ &= -6.94 \times 10^{-6} \text{ โมลต่อนาที}\end{aligned}$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเก่งกาจ ปัทมรัตน์ เกิดวันที่ 20 มีนาคม 2525 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนยานนาวาศิวิทยาคม จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย