

# รายงานฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การพัฒนาเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนสำหรับ  
เซลล์เชื้อเพลิง

(Development of Proton Exchange Membrane for  
Fuel Cell)

โดย

ผศ.ดร.ชันทอง สุนทรากา  
ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทศ  
วท 15  
011400

เงินทุนงบประมาณแผ่นดินเพื่อการวิจัย  
ประจำปี 2545

การพัฒนาเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนสำหรับ  
เซลล์เชื้อเพลิง  
(Development of Proton Exchange Membrane for  
Fuel Cell)



โดย

ผศ.ดร.ชั้นทอง สุนทรภา  
ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เงินทุนงบประมาณแผ่นดินเพื่อการวิจัย  
ประจำปี 2545

พฤศจิกายน 2545

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถดำเนินการลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2545 ขอขอบคุณ คุณพิทยา ยังพิชิต แห่งบริษัทโรงงานซูบพีเรียเคมีคัลส์จำกัด ที่ให้คำแนะนำและช่วยประกอบหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง Professor K-I OTA และนักศึกษาแห่ง Division of Materials Science and Chemical Engineering, Yokohama National University ประเทศญี่ปุ่น ที่ให้คำแนะนำระหว่างทำงานวิจัย ณ ประเทศญี่ปุ่นระหว่างวันที่ 14 มีนาคม ถึง 29 พฤษภาคม 2545 ขอขอบคุณ APPChE 2002 ที่ตอบรับงานวิจัยนี้ไปเสนอผลงาน ณ Christchurch ประเทศนิวซีแลนด์ ระหว่าง 29 กันยายน ถึง 3 ตุลาคม 2545 และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่อำนวยความสะดวกในการดำเนินการวิจัย

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เลขหมู่	วค 15
เลขทะเบียน	011400
วัน,เดือน,ปี	11 ต.ค. 45

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้เตรียมเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง ประกอบด้วย เมมเบรนไคโตซาน เมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเมมเบรนอัลจินต เมมเบรนที่เตรียมขึ้นในการศึกษานี้มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ  $0.94 \pm 0.24$ ,  $2.09 \pm 0.43$ ,  $2.36 \pm 0.21$ ,  $3.52 \pm 0.13$ ,  $4.18 \pm 0.15$ ,  $4.50 \pm 0.42$ ,  $4.57 \pm 0.37$  และ  $2.94 \pm 0.17$  ตามลำดับ สูงกว่าของเมมเบรน Nafion<sup>®</sup> 117 ซึ่งเท่ากับ 0.91 มิลลิโมลสมมูลต่อกรัม ค่าความนำไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจนที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 40 – 80 องศาเซลเซียส ของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้ว Dope ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าเป็นเพียงครึ่งหนึ่งของเมมเบรน Nafion<sup>®</sup> 117 ที่ทุกค่าอุณหภูมิ โดยต้องดำเนินการที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จึงจะมีค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับของเมมเบรน Nafion<sup>®</sup> 117 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ค่าพลังงานกระตุ้นของกลไกการเคลื่อนที่ของเมมเบรนไคโตซานประเภทนี้เท่ากับ 13.7 กิโลจูลต่อโมล

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### Abstract

In this study, the uncrosslinked chitosan membrane, crosslinked chitosan membrane with 1, 2, 3, 4, 5 and 10 %w/w  $H_2SO_4$  and alginate membrane were prepared and studied as candidate proton exchange membranes applicable in fuel cell. Their ion-exchange capacity was respectively  $0.94 \pm 0.24$ ,  $2.09 \pm 0.43$ ,  $2.36 \pm 0.21$ ,  $3.52 \pm 0.13$ ,  $4.18 \pm 0.15$ ,  $4.50 \pm 0.42$ ,  $4.57 \pm 0.37$ , and  $2.94 \pm 0.17$  comparing to 0.91 meq/g of Nafion<sup>®</sup> 117 membrane. However, the conductivity at 100% relative humidity under  $H_2$  atmosphere was measured with temperature in the range of 40 – 80°C. It was found that the conductivity of 2% crosslinked membrane doped with 1%  $H_2SO_4$  was half of Nafion<sup>®</sup> 117 in all temperature. Only the value at 80°C of doped membrane reached the value at 40°C of Nafion<sup>®</sup> 117. The activation energy of doped membrane was about 13.7 kJ mol<sup>-1</sup>.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	๗
บทคัดย่อภาษาไทย	๘
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๙
สารบัญ	๑
สารบัญตาราง	๗
สารบัญรูป	๗
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. วารสารปริทรรศน์	
2.1 เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง	4
2.2 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	4
2.3 โพลีโพรไคน	5
2.4 ประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิง	7
2.5 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	11
2.6 ไคติน	23
2.7 ไคโตซาน	23
2.8 สมบัติของไคตินและไคโตซาน	24
2.9 แหล่งของไคติน	29
2.10 การเกิดโครงสร้างตาข่าย	31
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
3. วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	38
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	38
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	39
3.4 การดำเนินการวิจัย	39

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย	
4.1 ร้อยละการกำจัดหมู่แอเซติล	54
4.2 ความหนาของเมมเบรน	54
4.3 ความสามารถทนต่อแรงดึง	55
4.4 ความสามารถในการยืดตัวสูงสุด	56
4.5 การดูดซับน้ำ	57
4.6 การเปลี่ยนแปลงความหนาของเมมเบรน	58
4.7 เสถียรภาพทางความร้อนของเมมเบรน	59
4.8 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรน	60
4.9 ความนำไฟฟ้าของเมมเบรน	63
4.10 ร้อยละ PTFE ในคาร์บอนเปเปอร์	66
4.11 ปริมาณแพลตินัมบนคาร์บอนเปเปอร์	66
4.12 ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียม MEA	67
4.13 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง	67
5. สรุปผลการวิจัย	
5.1 สรุปผลการทดลอง	69
5.2 ข้อเสนอแนะ	73
เอกสารอ้างอิง	74
ภาคผนวก ก	80
ภาคผนวก ข	182

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของโคตินและโคโตซาน	25
2.2 ความสามารถในการละลายของโคโตซานในสารละลายกรดชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นของกรดต่างๆ กัน	28
2.3 ปริมาณโคตินที่มีอยู่ในสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ	30
4.1 ความหนาของเมมเบรน	54
4.2 ความสามารถทนต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดตัวสูงสุดของเมมเบรน	55
4.3 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาและร้อยละการดูดซับน้ำของเมมเบรน	57
4.4 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรน	61
4.5 ค่าความนำไฟฟ้าของเมมเบรน ณ อุณหภูมิต่างๆ	64

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของพลังงานเสรีของกิบส์	10
2.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี	10
2.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของปฏิกิริยา $H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	11
2.4 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	12
2.5 การเตรียม Nafion หรือ Perfluorosulfonic acid polymer ของบริษัท DuPont	16
2.6 การเปรียบเทียบโครงสร้างโมเลกุลของเมมเบรน Nafion ที่ผลิตโดยบริษัท DuPont กับเมมเบรนฟลูออโรซัลโฟเนทไอโอโนเมอร์ที่ผลิตโดยบริษัท Dow	17
2.7 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	19
2.8 รูปแบบเริ่มแรกของขั้วอิเล็กโทรดแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนกับรูปแบบใหม่ของขั้วอิเล็กโทรดซึ่งสามารถทำให้ปริมาณความต้องการของแพลทินัมมีค่าลดลง 10 เท่า	20
2.9 การเปรียบเทียบปฏิกิริยา (a) ไม่ใส่ตัวเร่ง (b) ใส่ตัวเร่ง	21
2.10 โครงสร้างทางเคมีของไคติน	23
2.11 โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน	24
2.12 ค่าความหนืดของไคตินที่ละลายใน Formic acid anhydrous ที่อุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน วัดความหนืดที่ 25 องศาเซลเซียส โดยจุดตัดเป็นค่า Intrinsic viscosities, a = วันที่ 4, b = วันที่ 5, c = วันที่ 6 และ d = วันที่ 14	27
2.13 ผลของเวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอเซทิล (ในสารละลาย NaOH ร้อยละ 50 อุณหภูมิ 118 องศาเซลเซียส) ที่มีต่อความหนืดของสารละลายไคโตซาน	29
2.14 การเกิดโครงร่างตาข่ายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่	31
2.15 การเกิดโครงร่างตาข่ายของพอลิเมอร์เมื่อมีการใช้สารช่วยในการเกิดปฏิกิริยา (a) Bridging agent (b) Cross-linking initiator (c) Catalytic crosslinking agent (d) Active site generator	32
2.16 การเกิดโครงร่างตาข่ายขณะเกิดพอลิเมอร์เช่นกันด้วยการใช้มอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่	33
3.1 แผนภาพวิธีการเตรียมเมมเบรนไคโตซาน	40

3.2	แผนภาพวิธีการเตรียมเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย โดยใช้กรดซัลฟูริกเป็นสารเชื่อมขวาง	41
3.3	แผนภาพแสดงวิธีการเตรียม Dope Membrane	42
3.4	แผนภาพวิธีการเตรียมเมมเบรน Alginate	42
3.5	ขั้นตอนตัวอย่างสำหรับการวัดความสามารถทนต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดตัวสูงสุด	44
3.6	เครื่อง Universal Tester LLOYD Instruments LR 5K	44
3.7	การวัดค่าความนำไฟฟ้าด้วยวิธี Four probe method	47
3.8	เซลล์วัดค่าการนำไฟฟ้า	47
3.9	ชุดวัดค่าการนำไฟฟ้า	47
3.10	ระบบวัดค่าการนำไฟฟ้า	47
3.11	การจุ่มคาร์บอนเปเปอร์ลงในสารละลายพอลิเตตระฟลูออโรเอธิลีน	48
3.12	วิธีการเตรียมอิเล็กโทรด	50
3.13	การทดสอบผลสมลงบนแผ่นสแตนเลส	51
3.14	การใช้ลูกกลิ้งรีดให้ตัวอย่างติดกับคาร์บอนเปเปอร์	51
3.15	การอบอิเล็กโทรดในตู้อบ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน	51
3.16	แผนภาพการเตรียม MEA	52
3.17	การประกบอิเล็กโทรดบนเมมเบรน	52
3.18	การอัดเมมเบรนติดกับอิเล็กโทรดด้วยเครื่องอัดความร้อน	52
3.19	การทดสอบรอยแตกของเมมเบรนโดยการวัดความต้านทาน	52
3.20	แผ่น Separator ที่นำมาประกอบเป็นเซลล์เชื้อเพลิง	53
3.21	การทดสอบการลัดวงจร โดยวัดค่าความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิง	53
4.1	ความสามารถทนต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดตัวสูงสุดของเมมเบรน	56
4.2	ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาและร้อยละการดูดซับน้ำของเมมเบรน	58
4.3	Thermogram ของเมมเบรนไคโตซาน	59
4.4	Thermogram ของเมมเบรน Alginate	60
4.5	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรน	62
4.6	โครงสร้างโมเลกุลของไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริก	62
4.7	ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรน ณ อุณหภูมิต่างๆ	65
4.8	การพลอตแบบอาร์เรย์สของเมมเบรน ณ อุณหภูมิต่างๆ	65

- 4.9 Polarization curve ของเซลล์เชื้อเพลิงที่เตรียมจากเมมเบรนชนิดต่างๆ ณ อุณหภูมิห้อง 68
- 4.10 Polarization curve ของเซลล์เชื้อเพลิงที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 68



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 1

### บทนำ



#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมและการประหยัดพลังงานในปัจจุบัน ทำให้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงกับงานต่างๆมากขึ้น ได้แก่ การจัดเป็นหน่วยผลิตไฟฟ้าที่ใช้ในหน่วยงานขนาดเล็ก เช่น โรงพยาบาล (ในกรณีฉุกเฉิน) โรงแรม เรือรบ หรือประยุกต์ใช้กับทางการทหาร นอกจากนี้สำหรับเมืองใหญ่ๆ ที่มีการจราจรติดขัดได้มีการนำเซลล์เชื้อเพลิงมาผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ขับเคลื่อนรถยนต์ รถบรรทุกโดยสาร รถบรรทุกขนส่ง ซึ่งนับได้ว่าเป็นทางออกที่ดีที่จะช่วยลดปัญหามลพิษทางอากาศได้ [1] พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่สะอาดและสะดวกที่จะนำมาใช้งาน โดยผลิตได้จากพลังงานความร้อนและพลังงานนิวเคลียร์ ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบธรรมดาจะเปลี่ยนพลังงานความร้อนไปเป็นกระแสไฟฟ้า ซึ่งส่วนใหญ่ได้มาจากการเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงซึ่งจะเกิดการสูญเสียพลังงานมากมาย แต่ในกรณีเซลล์เชื้อเพลิงนั้นจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงให้กลายเป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้โดยตรง ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงและสูญเสียพลังงานน้อยกว่า ซึ่งปัจจุบันนี้เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงได้รับการพัฒนาขึ้นมาจนสามารถใช้เป็นแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าที่สำคัญอีกแหล่งหนึ่ง

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (Power density) สูง อิเล็กโทรดที่ใช้ก็มีปริมาณของแพลทินัม (Pt) ต่ำ อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ก็ไม่กัดกร่อน อีกทั้งยังสามารถประกอบได้ง่ายเพราะมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน สารตั้งต้นที่ใช้ก็คือแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน เมมเบรนที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในงานวิจัยเซลล์เชื้อเพลิงและในอุตสาหกรรมก็คือ Nafion (DuPont) ซึ่งผลิตจากเตตระฟลูออโรเอธิลีน (Tetrafluoroethylene) แต่เมมเบรนดังกล่าวต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศและมีราคาสูง จากปัญหาดังกล่าวทำให้เป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ ดังนั้นต้องพยายามลดราคาของเมมเบรนลง จึงมีแนวความคิดที่จะผลิตเมมเบรนจากวัตถุดิบที่มีในประเทศโดยใช้ภูมิปัญญาคนไทย เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาทางด้านเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เตรียมเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนจากวัสดุภายในประเทศ
2. ทดสอบสมบัติของเมมเบรนข้างต้นถึงศักยภาพในการนำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. เตรียมเมมเบรนที่จะนำมาทดสอบสมบัติต่าง ๆ 5 ชนิด กล่าวคือ
  - โคโตซานเมมเบรนที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย (Uncrosslinked chitosan membrane)
  - โคโตซานเมมเบรนที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (1% Crosslinked chitosan membrane)
  - โคโตซานเมมเบรนที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (2% Crosslinked chitosan membrane)
  - โคโตซานเมมเบรนที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นทำให้อิ่มตัวด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Doped chitosan membrane)
  - อัลจีเนตเมมเบรน (Alginate membrane)
2. ทดสอบสมบัติเมมเบรนที่เตรียมได้ ดังนี้
  - ความสามารถทนต่อแรงดึง (Tensile strength)
  - ความสามารถในการยืดตัวสูงสุด (Ultimate elongation)
  - ร้อยละการดูดซับน้ำ (Water content)
  - ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา (Thickness change)
  - ค่าอุณหภูมิเริ่มสลายตัว (Decomposition temperature)
  - ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange capacity)
  - ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)
3. เตรียมอิเล็กโทรด
4. เตรียม MEA (Membrane Electrode Assembly)
5. ทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเป็นสาร

ตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แม่แบบรณแลกเปลี่ยนโปรตอนเพื่อใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง
2. เป็นการพัฒนาเทคโนโลยีด้วยภูมิปัญญาคนไทย
3. เป็นแนวทางด้านเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อการศึกษาและพัฒนาต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## วารสารปริทรรศน์

### 2.1 เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง [1]

เซลล์เชื้อเพลิงคือเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical reaction) ที่มีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกับแบตเตอรี่ (Battery) นั่นเอง กล่าวอีกนัยหนึ่งเซลล์เชื้อเพลิงจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงให้กลายเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current) เซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะการทำงานคล้ายกับแบตเตอรี่อีกอย่างคือ เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตเป็นหน่วยเล็กๆ แล้วสามารถนำมาต่อเข้าด้วยกันในกรณีที่ต้องการเพิ่มกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้า แต่เซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะที่ต่างกับแบตเตอรี่ตรงที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีการป้อนเชื้อเพลิงในรูปของของเหลวหรือแก๊สเข้าไปอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) ในเซลล์เชื้อเพลิงจะไม่ถูกใช้หมดไป เซลล์เชื้อเพลิงนับว่าเป็นเทคโนโลยีที่ล้ำหน้าทันสมัย ด้วยเหตุผลต่างๆ 3 ประการคือ "ประสิทธิภาพสูง สะอาด เงียบ"

เซลล์เชื้อเพลิงไม่ก่อให้เกิดสารพิษต่างๆ ผลที่ได้จากปฏิกิริยาของเซลล์จะเป็นน้ำ ( $H_2O$ ) แก๊สที่ปล่อยออกมาจากเซลล์เชื้อเพลิงจะมีปริมาณของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ ( $CO$ ) และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ( $NO_x$ ) ต่ำกว่าระดับมาตรฐานความปลอดภัยที่กำหนดโดยกองควบคุมมลพิษ

เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตเป็นหน่วยเล็กๆ ที่เรียกว่า Module และสามารถนำมาต่อเข้าด้วยกันได้ จึงทำให้ผู้ซื้อสามารถสั่งซื้อเซลล์เชื้อเพลิงได้ตามกำลังความต้องการและสามารถสั่งเพิ่มในกรณีที่ต้องการเพิ่มกำลังการผลิต นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงไม่ต้องการเนื้อที่ในการติดตั้งมากนัก เราสามารถที่จะแยกเอาแต่ละ Module ไปติดตั้งยังส่วนอื่นๆ ได้ ยกตัวอย่างเช่น เซลล์เชื้อเพลิงที่มีกำลังการผลิต 2 เมกะวัตต์ (MW) จะต้องการเนื้อที่ในการติดตั้งประมาณขนาดสนามเทนนิส

### 2.2 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [1]

ในเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดที่มีความพรุน 2 ขั้ว คือแคโทด (Cathode) และแอโนด (Anode) คู่หรือสัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งอาจเป็นของเหลวและ/





ลดลงจากเดิม โดยมีกระแสไฟฟ้า  $I$  แอมแปร์ ไหลผ่านเซลล์และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมความต้านทานภายในเซลล์เป็น  $Ir$  โวลต์ เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงมีความต้านทานภายในเซลล์เป็น  $r$  โอห์ม ดังนั้นในการทำงานเซลล์เชื้อเพลิงจะสูญเสียกำลังไฟฟ้าไป  $I^2r$  วัตต์ เสมอ ถ้าสามารถลดความต้านทานภายในเซลล์ลงได้ การสูญเสียพลังงานก็จะลดลง

### 2.3.1 โพลาริเซชันทางเคมี (Chemical polarization)

โพลาริเซชันแบบนี้บางครั้งเรียกว่า แอกติเวชันโพลาริเซชัน (Activation polarization) โพลาริเซชันแบบนี้เกิดจากอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีมีค่าต่ำ ซึ่งอาจเกิดขึ้นในขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งหรือหลายขั้นตอนในปฏิกิริยาอย่างง่ายดังเช่นที่ซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีปฏิกิริยาเป็นดังสมการที่ 2.4



ขณะที่วงจรเปิดไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเซลล์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาตามสมการที่ 2.4 จากซ้ายไปขวาและจากขวาไปซ้ายมีค่าเท่ากันเพราะอยู่ในภาวะสมดุล เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลออกจากเซลล์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจากซ้ายไปขวามากกว่าปฏิกิริยาจากขวาไปซ้าย และศักย์ไฟฟ้าจะลดลงจนคงที่ (Steady state) ส่วนจะลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและกระแสไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากอัตราเร็วของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีขึ้นอยู่กับพลังงานแอกติเวชัน (Activation energy) โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อโมเลกุลของสารที่เข้าทำปฏิกิริยามีพลังงานสูงกว่าพลังงานแอกติเวชัน ถ้ากำแพงพลังงานศักย์ (Potential energy barrier) มีค่าสูง เมื่อเทียบกับพลังงานของโมเลกุลของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาแล้วอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีก็จะมีค่าต่ำ ทำให้เกิดโพลาริเซชันทางเคมีมาก วิธีแก้ไขคือเพิ่มพลังงานโมเลกุลของสารตั้งต้นให้มากขึ้น เช่น เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น แต่วิธีนี้ไม่สามารถใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เพราะเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงได้ วิธีที่เหมาะสมคือลดกำแพงพลังงานศักย์ลงโดยการให้แคตะลิสต์ เช่น แพลตินัม สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีแก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงและแก๊สออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์

### 2.3.2 โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน (Resistance polarization)

ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบที่ใช้สารละลายกรดหรือเบสเป็นอิเล็กโทรไลต์ จะทำให้ความต้านทานภายในเซลล์มีค่าต่ำ เพราะอิเล็กโทรไลต์ดังกล่าวนำไอออนได้ดี แต่ในกรณีที่ใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นอิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิง จะทำให้โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานมีค่ามาก เพราะเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนนำไอออนได้น้อยกว่าสารละลายกรดหรือเบส

### 2.3.3 โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration polarization)

โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น เกิดจากเชื้อเพลิงหรือตัวออกซิไดซ์ถูกใช้มากเกินไป และผลของปฏิกิริยาซึ่งเกิดที่ขั้วไฟฟ้าสามารถทำให้ความเข้มข้นหรืออีกนัยหนึ่งคือความดันของสารตั้งต้นลดลง เป็นผลให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงตามสมการของเนิร์นสต์ (Nernst equation) ปัญหานี้มักจะเกิดกับเซลล์เชื้อเพลิงใช้ออกซิเจนจากอากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ ส่วนในกรณีใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์มักจะไม่มีปัญหาเกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อใช้กับอากาศจึงต้องมีระบบการถ่ายเทอากาศที่ดีพอสมควร ส่วนอัตราการไหลเวียนจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิง [3]

### 2.4 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง [2]

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงนับว่าเป็นส่วนหนึ่งที่น่าสนใจมาก เพราะเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงกว่าการผลิตไฟฟ้าแบบอื่นๆ โดยเซลล์เชื้อเพลิงจะเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง จึงทำให้มีการสูญเสียพลังงานน้อยกว่าการผลิตไฟฟ้าแบบอื่นๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานรูปอื่นก่อนแล้วจึงเปลี่ยนมาเป็นพลังงานไฟฟ้า

ประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถคำนวณโดยทางทฤษฎีได้ แต่ในทางปฏิบัติแล้วประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะวัดได้ต่ำกว่าในทางทฤษฎี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นหลัก โดยเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงนั้นเกิดจากความต้านทานภายในเซลล์ ดังนั้นถ้าต้องการให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงก็จะต้องหาทางลดความต้านทานภายในเซลล์ลง ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถแบ่งได้ดังนี้

#### 2.4.1 ประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ (Faradaic efficiency, $\eta_F$ )

ในทางปฏิบัติแล้วปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ขั้วไฟฟ้าอาจจะมีได้หลายปฏิกิริยากล่าวคือ ส่วนใหญ่ของปฏิกิริยาเป็นไปตามที่ต้องการโดยถือเป็นปฏิกิริยาหลักและส่วนน้อยเป็นปฏิกิริยาข้างเคียง ดังนั้นปริมาณสารที่เข้าทำปฏิกิริยาจึงไม่สัมพันธ์กับประจุที่ได้รับตามกฎของฟาราเดย์ ตัวอย่างเช่นปฏิกิริยาข้างเคียงให้จำนวนอิเล็กตรอนน้อยกว่าเป็นต้น นอกจากการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงแล้วการที่แก๊สซึมข้ามเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนไปทำปฏิกิริยากันโดยตรง ด้วยเหตุดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ลดลงได้ การวัดประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ ทำได้โดยการวัดประจุที่ได้รับต่อโมลของเชื้อเพลิง เปรียบเทียบกับประจุที่ควรจะได้รับในทางทฤษฎีต่อโมลของเชื้อเพลิง [3] ดังสมการที่ 2.5, 2.6 และ 2.7

$$\eta_F = \frac{\text{ประจุที่ได้รับต่อโมลของเชื้อเพลิง}}{\text{ประจุที่ควรจะได้รับในทางทฤษฎต่อโมลของเชื้อเพลิง}} \quad (2.5)$$

$$\eta_F = \frac{\text{กระแสไฟฟ้าที่วัดได้}}{\text{กระแสไฟฟ้าที่คำนวณได้จากอัตราการใช้เชื้อเพลิง}} \quad (2.6)$$

$$\eta_F = \frac{i}{NF \frac{dn}{dt}} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $i$  เป็นกระแสที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิงและ  $N$  เป็นจำนวนโมลของอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ส่วน  $F$  เป็นค่าคงที่ของฟาราเดย์ โดยที่  $dn/dt$  เป็นอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงมีหน่วยเป็นโมล/วินาที ประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์นี้แสดงว่ามีการใช้แก๊สไปด้วยอัตราหนึ่ง ควรได้กระแสไฟฟ้าเท่าใด แล้วในทางปฏิบัติจริงจะได้กระแสเท่าใด ดังนั้นบางครั้งจึงเรียกประสิทธิภาพนี้ว่าประสิทธิภาพของกระแส (Current efficiency) โดยปกติแล้วเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ค่อนข้างสูงกว่าประสิทธิภาพแบบอื่น โดยเฉพาะเมื่อใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงและออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ เพราะปฏิกิริยานี้มีปฏิกิริยาข้างเคียงน้อยกว่าปฏิกิริยาอื่น ดังนั้นในกรณีที่ต้องการดูค่าคร่าวๆ อาจถือได้ว่า  $\eta_F = 1$  แต่ในการทดลองแล้ว  $\eta_F$  มีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ

#### 2.4.2 ประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้า (Voltage efficiency, $\eta_V$ )

ประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้าแสดงถึงการลดลงของพลังงานศักย์เมื่อเทียบกับพลังงานศักย์ทางทฤษฎี เช่น ในทางทฤษฎีสำหรับปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีหนึ่งสามารถคำนวณได้ศักย์ไฟฟ้าเป็น  $E$  โวลต์ หมายความว่าเชื้อเพลิง 1 โมล มีพลังงานศักย์เป็น  $NFE$  โวลต์ แต่ในทางปฏิบัติ ขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกระแสไฟฟ้าออกจากเซลล์ทำให้ศักย์ไฟฟ้านลดลงเหลือ  $V$  โวลต์ ทำให้มีการสูญเสียพลังงานศักย์ไป  $NF(E - V)$  จูลน์ [4] ดังนั้นประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้าเขียนได้ดังสมการที่ 2.8

$$\eta_V = \frac{V}{E} \quad (2.8)$$

### 2.4.3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency, $\eta_T$ )

ปกติแล้วพลังงานที่ได้รับจากปฏิกิริยาเคมีมักจะเป็นพลังงานความร้อน ( $\Delta H$ ) เมื่อนำปฏิกิริยาดังกล่าวมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงจะได้พลังงานไฟฟ้า ( $\Delta G$ ) แต่ยังคงมีบางส่วนที่เป็นพลังงานความร้อน ( $T\Delta S$ ) ดังสมการที่ 2.9

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (2.9)$$

ดังนั้นประสิทธิภาพเชิงความร้อน ( $\eta_T$ ) หาได้จากสมการที่ 2.10

$$\eta_T = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (2.10)$$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน แสดงถึงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงสุด ประสิทธิภาพเชิงความร้อนขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาเท่านั้น ไม่ขึ้นกับลักษณะอื่นของเซลล์ [5]

เนื่องจาก  $\Delta G$  และ  $\Delta H$  แปรค่าตามอุณหภูมิดังรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 มีผลให้  $\eta_T$  แปรตามอุณหภูมิด้วย ในเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงและแก๊สออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ ค่า  $\eta_T$  จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.3

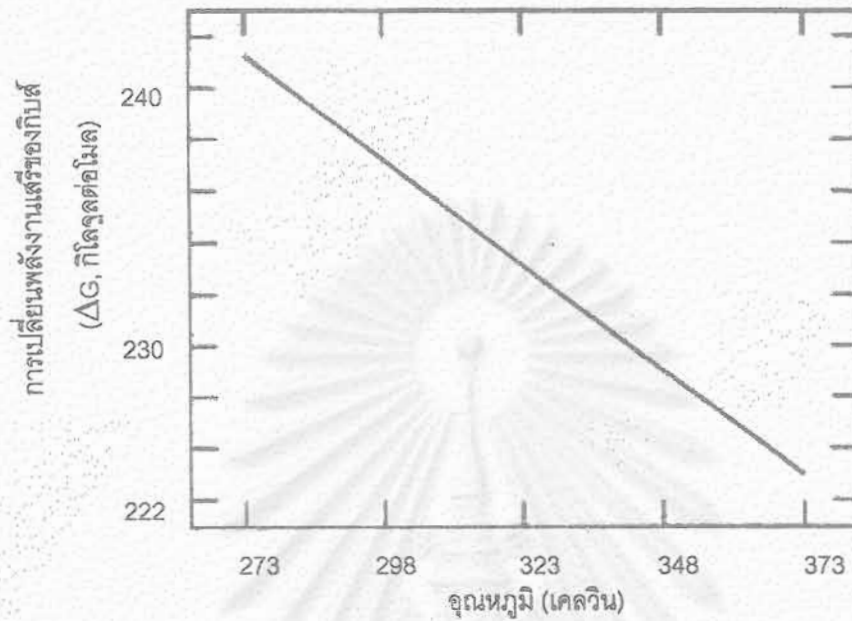
### 2.4.4 ประสิทธิภาพรวม (Overall efficiency, $\eta_o$ )

ประสิทธิภาพรวมเป็นการคิดประสิทธิภาพทั้งหมดเข้าด้วยกัน ซึ่งเขียนได้ดังสมการที่ 2.11

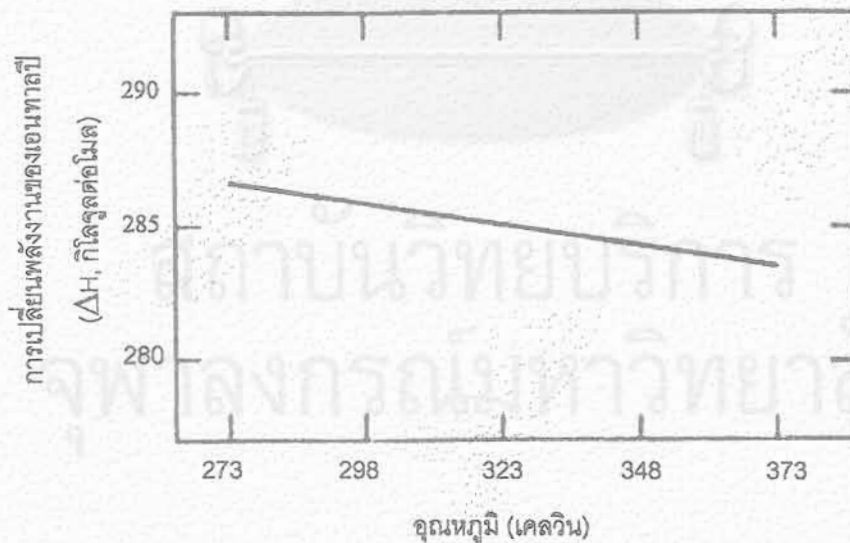
$$\eta_o = \eta_F \times \eta_V \times \eta_T \quad (2.11)$$

จากสมการ 2.7 และ 2.8 จะเห็นได้ว่าผลคูณของ  $\eta_F$  และ  $\eta_V$  หมายถึงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของกิบส์ ( $\Delta G$ ) ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ส่วน  $\eta_T$  ซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเอนทาลปี ( $\Delta H$ ) ให้เป็นพลังงานเสรีของกิบส์ก่อนที่จะเปลี่ยนต่อไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นประสิทธิภาพรวม ( $\eta_o$ ) ซึ่งเป็นผลคูณทั้งหมดดังสมการ 2.11 หมายถึงประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงในการเปลี่ยนเอนทาลปีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าว่ามีมากน้อยเพียงใด ดังนั้นประสิทธิภาพรวมของเซลล์เชื้อเพลิง จึงสามารถใช้เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพรวมของเครื่องกำเนิด

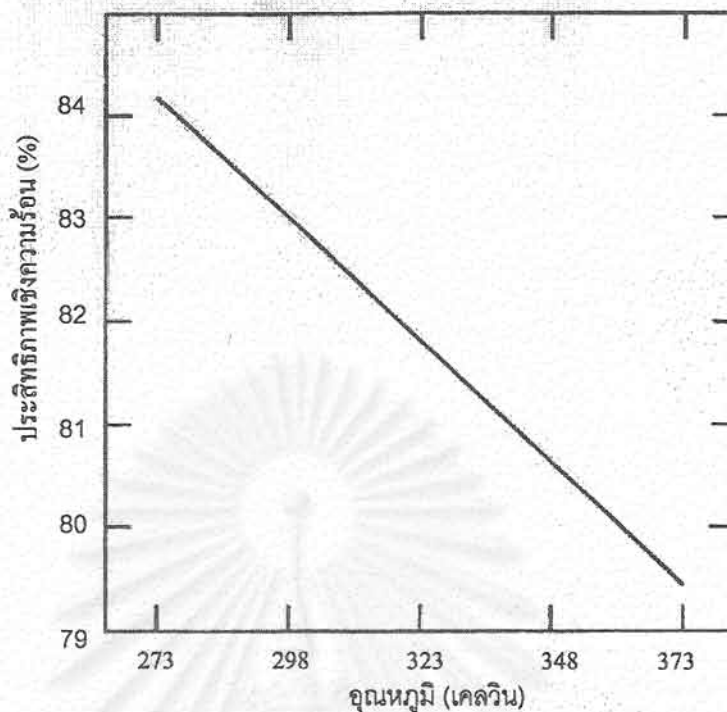
ไฟฟ้าแบบเครื่องยนต์ความร้อน (Heat engine) ได้โดยตรง [5] ซึ่งคำนวณได้จากพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากระบบแล้วเปรียบเทียบกับพลังงานความร้อนที่ให้แก่ระบบ



รูปที่ 2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของพลังงานเสรีของกิบส์ [2]



รูปที่ 2.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี [2]



รูปที่ 2.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของปฏิกิริยา  $H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$  [2]

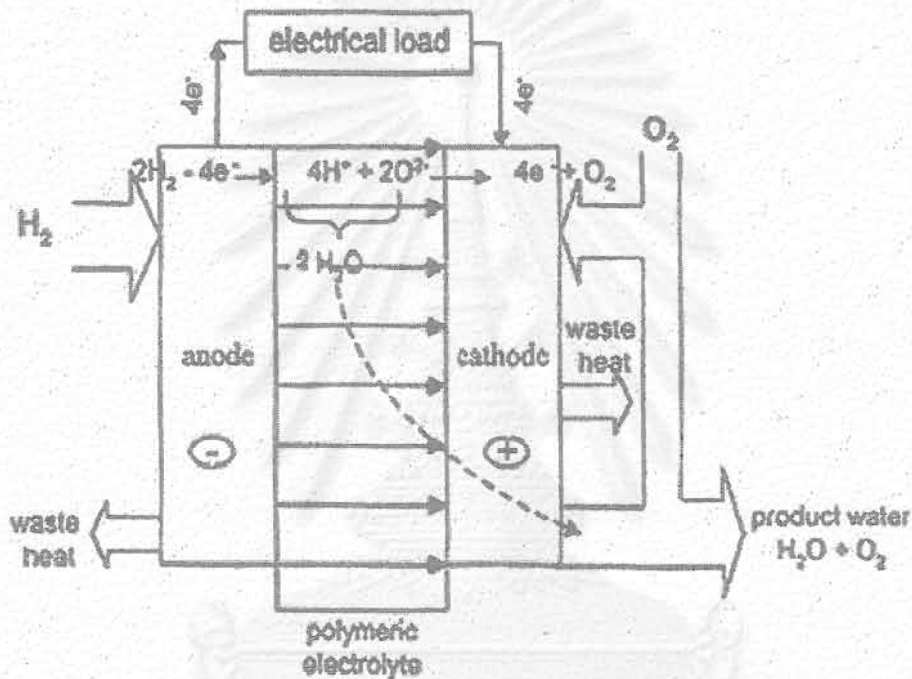
## 2.5 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cells) [6]

บริษัท General Electric (GE) เป็นบริษัทแรกที่พัฒนาและเรียกเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange membrane fuel cells, IEMFC) ต่อมาภายหลังมีหลายบริษัทที่ทำการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้และเรียกชื่อใหม่ว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) [7]

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับการใช้งานซึ่งต้องมีการเคลื่อนย้าย เช่น การใช้กับรถยนต์ เพราะเซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าวมีค่าความหนาแน่นของกำลังงาน (Power density) สูง [8] ถึงแม้ว่าสถานะอุณหภูมิการทำงานจะมีค่าอยู่ในช่วง 60-100 °ซ เซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าวนี้ถูกผลิตขึ้นเป็นครั้งแรกเพื่อใช้กับองค์การอวกาศของสหรัฐอเมริกา (NASA) โดยบริษัท GE ในช่วงทศวรรษที่ 1960 เหตุผลที่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ถูกเลือกใช้ในโครงการอวกาศ ก็เพราะเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนนี้มีค่าความหนาแน่นพลังงานสูง (Energy density) เมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ไม่มีการกัดกร่อนและหอสเซลล์เชื้อเพลิงนี้สามารถประกอบได้ง่ายเพราะมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน [9]

### 2.5.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนประกอบด้วยเมมเบรนพอลิเมอร์ของแข็งซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ ในที่นี้เมมเบรนจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนโปรตอน เมมเบรนดังกล่าวจะถูกประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้วที่มีความพรุนตัวและมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแพลทินัม (Pt) เกาะอยู่ [10] รูปที่ 2.4 แสดงหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน น้ำที่เกิดจากกระบวนการเคมีไฟฟ้าจะถูกดึงออกจากเซลล์มากับแก๊สทางฝั่งแคโทด ส่วนความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกดึงออกโดยระบบหล่อเย็น



รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน [6]

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนนี้ต้องใช้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนที่มีความชื้น (Humidified gases) ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นบนขั้วอิเล็กโทรดมีดังนี้

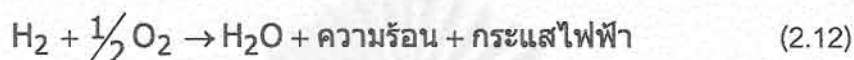
ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด: ไฮโดรเจนจะถูกออกซิไดซ์แล้วเกิดเป็น  $H^+$  (ไฮโดรเจนไอออน) และอิเล็กตรอน ดังสมการที่ 2.1 ข้างต้น



ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด:  $H^+$  ที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดจะเกิดการแพร่ผ่านเมมเบรนมาที่ขั้วแคโทดและเกิดปฏิกิริยารีดักชันดังสมการที่ 2 ดังนี้



ปฏิกิริยาสุทธิของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนแสดงดังสมการที่ 2.12



### 2.5.2 อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

อิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนจะไม่ใช้อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลว แต่เป็นเมมเบรนพอลิเมอร์ที่เหมือนพลาสติกที่มีสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งมีความหนาอยู่ในช่วง 50-175  $\mu\text{m}$  [3] เมมเบรนดังกล่าวมักประกอบด้วยกรดเปอร์ฟลูออโรซัลโฟนิค (Perfluorosulfonic acid) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์แบบฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon) ที่เหมือนเทฟลอน โดยมีด้านปลายของสายโซ่ (Chain) โมเลกุลเป็นกลุ่มซัลโฟนิค (Sulfonic acid) เมมเบรนดังกล่าวนี้มักถูกเรียกว่าเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane, PEM) หรือเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange membrane, IEM) โดยมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าแต่สามารถนำไอออนไฮโดรเจนได้ดี

เมมเบรนที่เคยนำมาใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีอยู่มากมายรวมทั้งพอลิเมอร์ที่ทำมาจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น Cross-linked polystyrene-divinylbenzene sulfonic acids และ Sulfonated phenolformaldehyde เป็นต้น โดยทั่วไปวัสดุดังกล่าวข้างต้นจะมีฤทธิ์เป็นกรด เนื่องจากมีกลุ่มกรดซัลโฟนิคอยู่ในเนื้อเมทริกซ์ สำหรับเมมเบรนที่มีฤทธิ์เป็นกรดจะมีลักษณะเป็นเจล (Gel) ซึ่งต้องมีโมเลกุลของน้ำและโปรตอนอยู่จึงจะเกิดการนำไอออนได้ [11] อัตราส่วนระหว่าง  $H_2O$  ต่อ  $H^+$  เพื่อให้เกิดการนำไอออนได้ดีที่สุดคือประมาณ 3:1 ดังนั้นค่าการนำไอออนของวัสดุพอลิเมอร์ดังกล่าวจึงขึ้นอยู่กับค่าความดันของน้ำที่ตำแหน่งนั้นๆ (หรืออีกนัยหนึ่งก็คือขึ้นอยู่กับอุณหภูมินั่นเอง) โดยภาพรวมสามารถพิจารณาว่าเมมเบรนพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เป็นอิเล็กโทรไลต์กรด (Acid electrolyte) ที่ซึ่งไอออนลบ (Anion) จะถูกยึดไว้โดยโครงสร้างพอลิเมอร์



สำหรับเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่เป็นกรดซึ่งถูกใช้เป็นตัวนำไอออนจะต้องมีสมบัติดังต่อไปนี้

- 1) มีค่าการนำไอออนสูง แต่มีค่าการนำอิเล็กตรอนต่ำ
- 2) มีค่าการแพร่ของแก๊สต่ำ
- 3) มีขนาดที่แน่นอน (ไม่มีการบวม)
- 4) มีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูง
- 5) มีค่าการแพร่ของน้ำต่ำ
- 6) มีความต้านทานต่อการสูญเสียน้ำ (Dehydration)
- 7) มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน รีดักชันและไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)
- 8) มีค่าการถ่ายเทไอออนบวก (Cation) สูง
- 9) พื้นผิวของเมมเบรนต้องสามารถเชื่อมตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกาะบนพื้นผิวได้ดี
- 10) มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity)

แต่เนื่องจากไม่มีเมมเบรนใดที่จะมีสมบัติเบื้องต้นครบทั้งหมด ดังนั้นจึงต้องพยายามเลือกให้มีความเหมาะสมมากที่สุด

### 2.5.3 การพัฒนาเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

งานพัฒนาเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ได้เริ่มโดยบริษัท General Electric [11] ซึ่งผลิตโดยการควบแน่นกรดฟีนอลซัลโฟนิค (Phenolsulfonic acid) และฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) เมมเบรนนี้จะมีคุณสมบัติและแตกได้ง่ายเมื่อเมมเบรนแห้งและถูกไฮโดรไลซิสได้อย่างรวดเร็วกลายเป็นกรดซัลฟูริก เมมเบรนพอลิเมอร์ของแข็งชุดถัดมาผลิตได้จากการทำซัลโฟเนชันบางส่วน (Partial sulfonation) แก่พอลิสไตรีน (Polystyrene) แต่สมบัติของเมมเบรนนี้ยังไม่เป็นที่น่าพอใจ เพราะมีอายุการใช้งานสั้น คือประมาณ 200 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เมมเบรนชุดต่อมาที่ได้รับการพัฒนาคือเมมเบรนที่ได้จากการทำซัลโฟเนชันแก๊สไดวินิลเบนซีน (Styrene divinylbenzene) ที่เกาะอยู่บนเมทริกซ์ที่ทำมาจากฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon matrix) เมมเบรนนี้จัดเป็นเมมเบรนชุดแรกที่มีความแข็งแรงอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ทั้งในสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งเมมเบรนนี้ได้ถูกนำไปใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในยานอวกาศ Gemini 7 ในปี ค.ศ. 1964 แต่อย่างไรก็ตามเมมเบรนนี้สามารถใช้งานได้นานแค่ 500 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เพราะเกิดการเสื่อมสภาพของพันธะ C-H ตรงตำแหน่งอัลฟา (Alpha) ในโครงสร้างของพอลิเมอร์ ภายหลังจากการปรับปรุงเมมเบรนให้มีโครงร่างตาข่าย (Cross-linking) พบว่าเมมเบรนที่ผลิตได้นี้มีอายุการใช้งานนานขึ้นเป็น 1000 ชั่วโมง

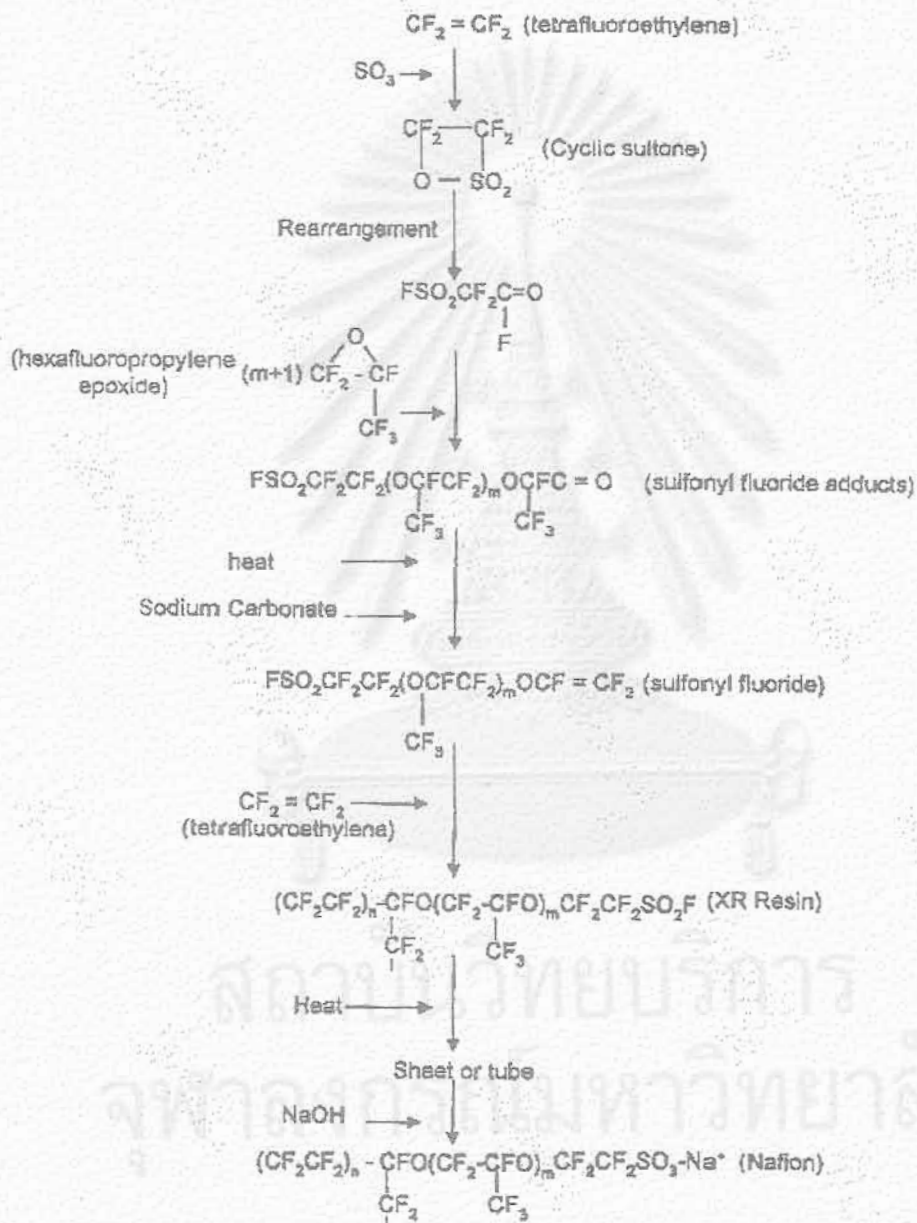
เมมเบรนชุดถัดมาคือ เมมเบรนซึ่งผลิตได้จากโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) ของกรด  $\alpha$ - $\beta$ ,  $\beta$  trifluorostyrene sulfonic acid เมมเบรนชนิดนี้มีความเสถียรทางเคมีและทางความร้อนแต่ยังมีจุดอ่อนในด้านสมบัติทางกายภาพ ต่อมาเมมเบรนแบบนี้ได้ถูกปรับปรุงโดยการผสมพอลิเมอร์ที่ผลิตจากกรดเปอร์ฟลูออโรซัลโฟนิคเข้ากับพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Poly-vinylidene fluoride) โดยการใช้ตัวพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ที่เป็นไตรเอธิลฟอสเฟต (Triethyl phosphate) เมมเบรนนี้สามารถใช้ได้นาน 2000 ชั่วโมงที่ 80 องศาเซลเซียส

ประมาณปี ค.ศ. 1968 บริษัท DuPont ได้พัฒนาเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ทำมาจาก Nafion [11] ซึ่งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกรดเปอร์ฟลูออโรซัลโฟนิค ซึ่งบางครั้งมีการเติมตัวเสริมกำลัง (Reinforce) เทฟลอนลงไป พอลิเมอร์นี้เตรียมขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Tetrafluoroethylene) กับ  $\text{SO}_3$  เพื่อให้ได้ไซคลิกซัลโทน (Cyclic sulfone) จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยากับเฮกซะฟลูออโรโพรพิลีน-อีพอกไซด์ (Hexafluoropropylene epoxide) จำนวน  $m+1$  โมเลกุล โดยที่  $m > 1$  ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาข้างต้นถูกนำไปให้ความร้อนร่วมกับไฮเดียมคาร์บอเนต จะเกิดเป็นซัลโฟนิลฟลูออไรด์ไวนิลอีเธอร์ (Sulfonyl fluoride vinyl ether) จากนั้นนำไปทำโคพอลิเมอร์ไรซ์กับเตตระฟลูออโรเอทิลีน เพื่อให้ได้เรซินซึ่งสามารถถูกหลอมให้เป็นแผ่นหรือท่อ ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำแผ่นพอลิเมอร์นี้ไปทำไฮโดรไลซิสด้วยด่าง (Base hydrolysis) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น Nafion เมมเบรนที่ทำมาจาก Nafion อาจถูกพิจารณาว่าเป็นกลุ่มซัลโฟเนต (Sulfonate) ของเทฟลอนได้ถึงแม้ว่าจะมีพันธะของอีเธอร์ (Ether) อยู่ รูปที่ 2.5 แสดงขั้นตอนการผลิต Nafion ตามกรรมวิธีข้างต้น

โดยทั่วไปเมมเบรน Nafion จะทนต่อกรดเข้มข้นและตัวออกซิเดนต์และเมมเบรนนี้จะสามารถนำไอออนไฮโดรเนียม (Hydronium ions) ได้เมื่อมีน้ำอยู่ในเมมเบรนประมาณ 20% โดยน้ำหนัก เมมเบรนดังกล่าวสามารถสร้างเป็นแผ่นที่มีความกว้าง 120 cm (โดยไม่จำกัดความยาว) และมีความหนาเท่ากับ 7 mils (หรือ 175 microns) ได้ ผลิตภัณฑ์ที่ขายในท้องตลาดจะมีชื่อเรียกตามหมายเลข เช่น Nafion 1170 เมื่อเลข 2 หลักแรกคือค่าน้ำหนักเทียบเท่า (Equivalent weight) หารด้วย 100 และสองตัวเลขหลังคือความหนาเป็น mils ที่คูณด้วย 10 (หมายเหตุ: น้ำหนักเทียบเท่า คืออัตราส่วนของน้ำหนักของพอลิเมอร์ต่อจำนวนโมลของกลุ่มกรดซัลโฟนิค) [10]

การเพิ่มความแข็งแรงทางกลของพอลิเมอร์สามารถทำได้ 2 แนวทาง คือ โดยการฝังตะแกรงที่ทำมาจากพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) ลงในเมมเบรน หรือการใช้ตัวรองรับมาหนุนด้านหลังของเมมเบรน เมมเบรนที่มีแผ่นรองรับ (Supported Nafion

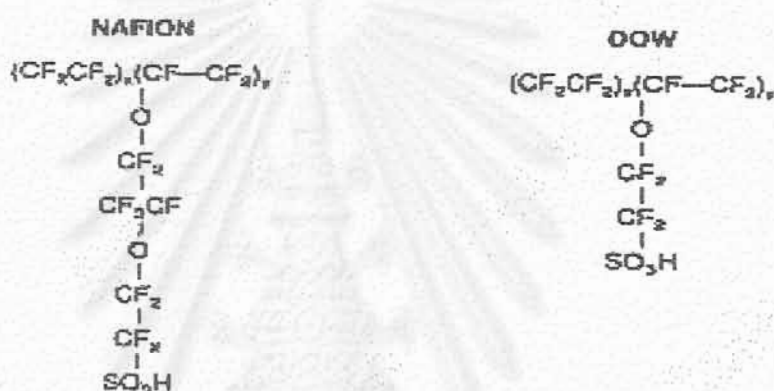
membrane) จะสามารถทนความแตกต่างของความดันได้มากกว่า 70 atm และสามารถทำงานที่ความดันสูงถึง 200 atm เมมเบรน Nafion ทั้งรูปแห้งและเปียกจะมีความเสถียรต่อการเกิดออกซิเดชันภายใต้ช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส สมบัติการนำไอออนของเมมเบรนที่มีน้ำหนักเทียบเท่า 1100 จนถึง 1500 จะมีค่าสูง



รูปที่ 2.5 การเตรียม Nafion หรือ Perfluorosulfonic acid polymer ของบริษัท DuPont

#### 2.5.4 เมมเบรนที่พัฒนาโดยบริษัท Dow Chemical

บริษัท Dow Chemical ได้พัฒนาเมมเบรนชนิดใหม่แต่ยังคงจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเมอร์ของเปอร์ฟลูออโรเนท ไอโอโนเมอร์ (Perfluorinated ionomers) วัตถุประสงค์หลักของการพัฒนาเมมเบรนแบบใหม่คือการผลิตเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนสำหรับอุตสาหกรรมคลอโร-อัลคาไล (Chloro-alkali industry) ผลการทดสอบพบว่าเมมเบรนชนิดใหม่นี้มีสมรรถนะสูงและทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตดังกล่าวสูงขึ้นกว่าเมมเบรน Nafion พอลิเมอร์ชนิดใหม่มีโครงสร้างโมเลกุลหลักเหมือนพอลิเตตระฟลูออโรเอธิลีนซึ่งคล้ายกับเมมเบรน Nafion แต่สายโซ่โมเลกุลด้านข้าง (Side chain) ซึ่งมีกลุ่มกรดซัลโฟนิกอยู่จะสั้นกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบโครงสร้างโมเลกุลของเมมเบรน Nafion ที่ผลิตโดยบริษัท DuPont กับเมมเบรนฟลูออโรซัลโฟเนทไอโอโนเมอร์ที่ผลิตโดยบริษัท Dow

พอลิเมอร์ที่ผลิตโดยบริษัท Dow Chemical จะมีสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนที่คล้ายคลึงกับ Nafion แต่เมมเบรนชนิดนี้ [12] จะมีค่าความรุนแรงของกรด (Acid strength) ที่สูงกว่าและมีค่าน้ำหนักเทียบเท่าต่ำกว่า (600-950) แม้ว่าเมมเบรนของ Dow จะมีค่าน้ำหนักเทียบเท่าที่ต่ำกว่า แต่ค่าความแข็งแรงเชิงกลของเมมเบรนกลับมีค่าสูงและไม่เกิดการแห้งอย่างรุนแรง ในขณะที่ถ้าเป็น Nafion ที่มีค่าน้ำหนักเทียบเท่าที่เท่ากันแล้ว Nafion จะเกิดเป็นพอลิเมอร์เจล (Gelled polymer) ซึ่งมีค่าความแข็งแรงเชิงกลต่ำ พอลิเมอร์ของ Dow จะดูดน้ำน้อยกว่า Nafion ถึง 50 เท่า แต่จะสามารถนำไอออนได้ดีเท่ากับ Nafion โดยมีค่าการแพร่ซึมของแก๊ส (Permeability) ต่ำ พอลิเมอร์ที่ผลิตด้วยบริษัท Dow จะมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (Glass transition temperature) ที่สูงกว่า 165 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับที่ 110 องศาเซลเซียสของ

Nafion ดังนั้นเมมเบรนที่ผลิตโดยบริษัท Dow จะสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า ( $>100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [13]

การเตรียมพอลิเมอร์ของ Dow ทำได้โดยใช้กระบวนการโคพอลิเมอร์ไรเซชัน (Copolymerization) ของเตตระฟลูออโรเอธิลีนกับไวนิลอีเธอร์มอนอเมอร์ (Vinyl ether monomer) การทดสอบเมมเบรนของ Dow โดยบริษัท Ballard ในปี ค.ศ. 1987 และ 1988 พบว่าประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีค่าสูงขึ้นมา ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า มีค่าสูงถึง 2.5 กิโลวัตต์ต่อตารางฟุต เมื่อใช้  $\text{H}_2\text{-O}_2$  เป็นสารตั้งต้นและมีค่า 1.4 กิโลวัตต์ต่อตารางฟุต โดยใช้  $\text{H}_2$ -อากาศ เป็นสารตั้งต้น [7]

### 2.5.5 อิทธิพลของน้ำที่มีผลต่อค่าการนำไอออนของเมมเบรน

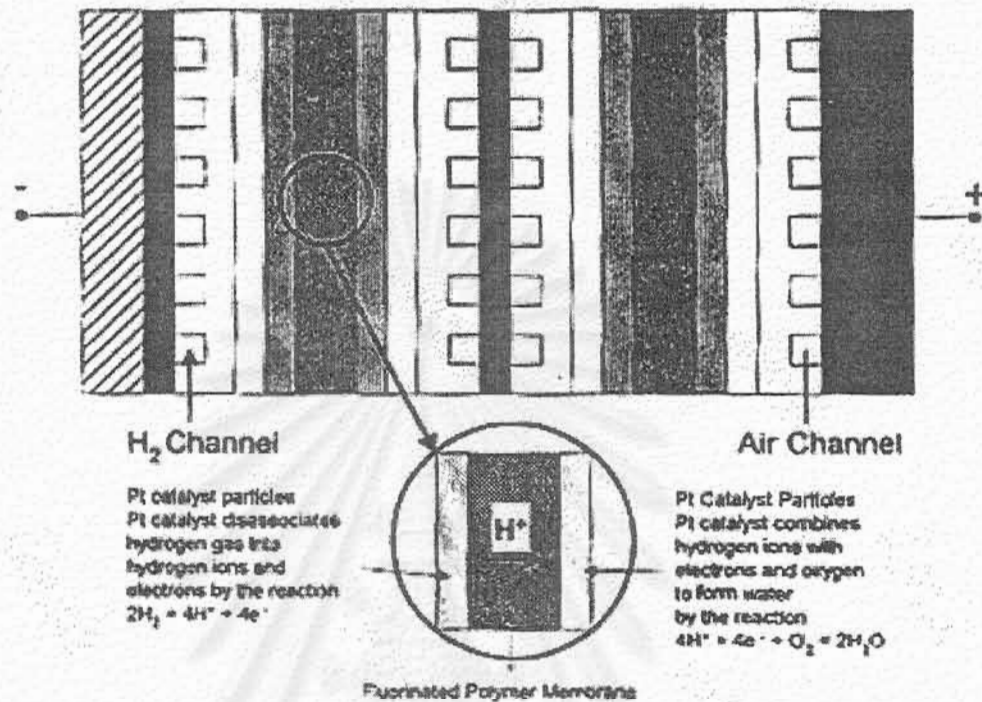
เนื่องจากประสิทธิภาพของเมมเบรนจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการส่งถ่ายไอออนของไฮโดรเจนและเป็นที่ทราบกันมานานแล้วว่ากระบวนการนำไอออนของเมมเบรนจะเกิดขึ้นไม่ได้หากในเมมเบรนไม่มีน้ำอยู่ ปริมาณของน้ำในเมมเบรนเป็นตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อค่าการนำไอออน การเพิ่มจำนวนโมลของน้ำต่อกลุ่มซัลโฟเนตจากหนึ่งเป็นหกจะช่วยเพิ่มค่าการนำไอออนของเมมเบรนได้ถึง  $10^6$  เท่า ในทางทฤษฎีการส่งถ่ายโปรตอนหนึ่งโมเลกุล จะต้องการน้ำ 3 โมเลกุล ดังนั้นจึงต้องมีการไหลเวียนกลับของน้ำจากขั้วแคโทด ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนทำงานอยู่

โดยปกติแก๊สที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนจะต้องอิ่มตัวด้วยน้ำ ทั้งนี้เพื่อลดการสูญเสียน้ำในเมมเบรน เนื่องจากน้ำถูกผลิตขึ้นที่ขั้วแคโทด ซึ่งน้ำนี้มีความสำคัญต่อการส่งถ่าย  $\text{H}^+$  ข้ามเมมเบรนในรูปของไอออน  $\text{H}_3\text{O}^+$  ดังนั้นแก๊สที่ป้อนเข้าขั้วแอโนดควรผ่านกระบวนการไฮเดรชัน (Hydration) หรือทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำก่อนเพื่อให้เซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้สามารถทำงานได้ แต่มีข้อเสียตรงที่แก๊สจะสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้ดีหากแก๊สนั้นมีความชื้นสูงซึ่งสิ่งนี้เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ การควบคุมให้อัตราการแพร่ของแก๊สผ่านเมมเบรนมีค่าต่ำเป็นสิ่งจำเป็น

### 2.5.6 อิเล็กโทรดและตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบใช้เมมเบรน

หัวใจของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรน คือชั้นเมมเบรนพอลิเมอร์ที่ถูกประกบทั้งสองด้านด้วยขั้วอิเล็กโทรด [14] แสดงดังรูปที่ 2.7 อิเล็กโทรดนี้จะถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยแพลทินัมหรือโลหะ

ผสมแพลทินัม (Platinum alloys) เพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าทั้งที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดสามารถดำเนินไปได้อย่างรวดเร็ว



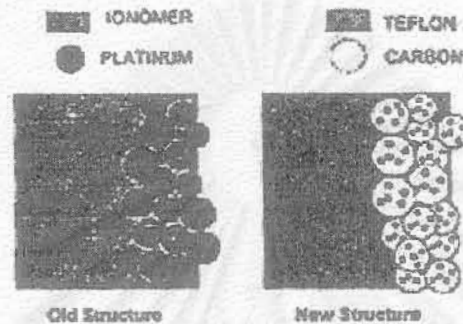
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน [6]

### 2.5.6.1 อิเล็กโทรด

ขั้วอิเล็กโทรดชนิดที่ยอมให้แก๊สผ่าน (Gas diffusion electrode) ซึ่งถูกใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงรุ่นแรกๆ ประกอบด้วยแพลทินัมที่เกาะอยู่บนคาร์บอน (ด้วยปริมาณ 0.4 mgPt/cm<sup>2</sup> หรือ 10-20% Pt บนคาร์บอน) แต่เดิมขั้วอิเล็กโทรดจะมีตัวเสริมความแข็งแรงที่ทำมาจากผ้าหรือกระดาษคาร์บอน (Carbon backing) และใช้สารละลายอิมัลชันของเทฟลอน (Teflon emulsion) เป็นตัวเชื่อมยึดอนุภาคแพลทินัมให้ติดอยู่บนกระดาษคาร์บอน แต่ต่อมาภายหลังการผลิตขั้วอิเล็กโทรดทำโดยนำตัวเร่งปฏิกิริยามายึดติดอยู่บนเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนโดยตรง

ในการสร้างอิเล็กโทรดแบบใหม่ที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยายึดติดบนเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน สามารถทำได้ 2 แบบคือการใช้แพลทินัมดำ (Platinum black) มาอัดโดยใช้ความร้อน (Hot processing) ให้ติดลงไปโดยตรงบนแผ่นเมมเบรน โดยค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดมีค่าอยู่ระหว่างอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้วและอุณหภูมิที่เกิดการเสื่อมสภาพ (Degradation

temperature) ของเมมเบรนแสดงดังรูปที่ 2.8 ซ้ำยมีือ ขั้วอิเล็กโทรดแบบที่มีสมรรถนะการทำงานปานกลางต้องการแพลทินัมประมาณ  $2 \text{ mg/cm}^2$  ต่อมาภายหลัง Los Alamos National Laboratory ได้พัฒนาเทคโนโลยีการทำอิเล็กโทรดแบบชั้นฟิล์มบาง (มีความหนา  $4\text{-}5 \text{ }\mu\text{m}$ ) โดยการนำแพลทินัมมาเกาะบนตัวรองรับคาร์บอนก่อน จากนั้นค่อยนำไปเกาะบนเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ดังแสดงดังรูปที่ 2.8 ซ้ำยมีือ



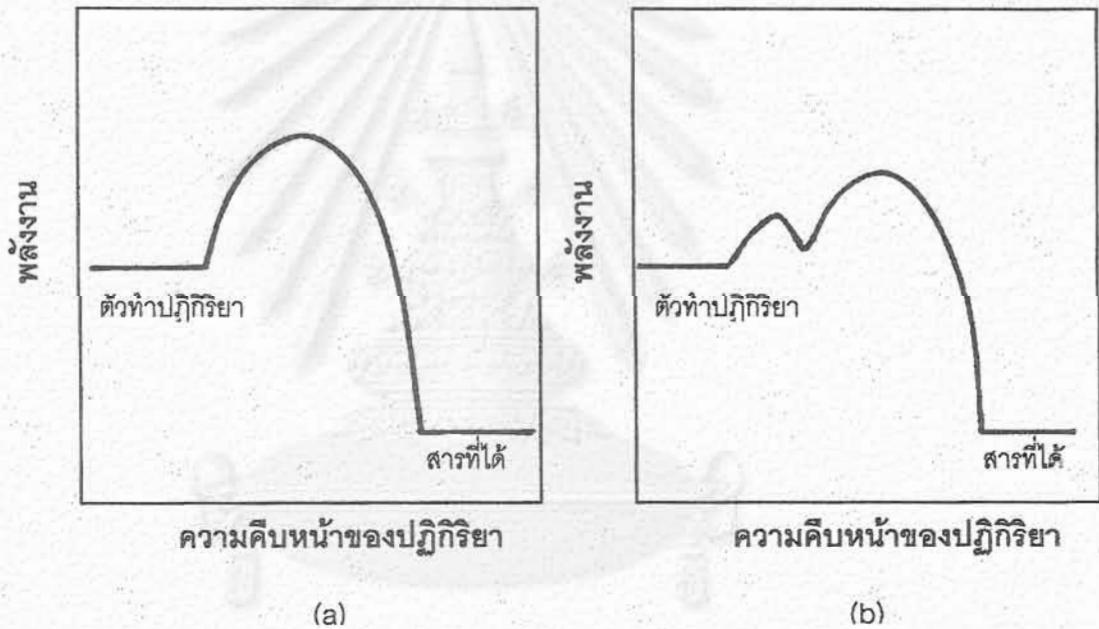
รูปที่ 2.8 รูปแบบเริ่มแรกของขั้วอิเล็กโทรดแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนกับรูปแบบใหม่ของขั้วอิเล็กโทรดซึ่งสามารถทำให้ปริมาณความต้องการของแพลทินัมมีค่าลดลง 10 เท่า [6]

ขั้วอิเล็กโทรดแบบชั้นฟิล์มบางให้สมรรถนะการทำงานที่ดีและให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงกับ 1 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยการให้  $\text{H}_2$  กับอากาศเป็นสารตั้งต้นและใช้แพลทินัมเพียง 0.12 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร หากเปรียบเทียบกับขั้วอิเล็กโทรดแบบเก่าซึ่งใช้แพลทินัมดำ ขั้วอิเล็กโทรดแบบเก่าจะให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพียงประมาณ 0.3 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร จากการให้  $\text{H}_2$  กับอากาศเป็นสารตั้งต้นและมีปริมาณแพลทินัมที่ใช้มากกว่าถึง 10 เท่า [14]

ในประเทศญี่ปุ่นได้มีการศึกษาพัฒนาขั้วอิเล็กโทรดเพื่อใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนด้วย เช่น สถาบันวิจัยแห่งชาติโอซากา (Osaka Nation Institute) [15] ได้ทำการศึกษาวิธีการเตรียมอิเล็กโทรดคาร์บอนที่มีการกระจายตัวของ Pt สูง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อจะลดปริมาณการใช้แพลทินัมลงให้เหลือ 0.1-0.2 กรัมของแพลทินัมต่อกิโลวัตต์ หรือ 5-10 วัตต์ต่อมิลลิกรัมแพลทินัม วิธีการเตรียมทำได้ 2 วิธี วิธีแรกคือวิธีการฝังโดยตรง (Direct Impregnation method) ส่วนวิธีที่สองคือวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange method)

### 2.5.6.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา [2]

ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารซึ่งช่วยเร่งอัตราการเกิดของปฏิกิริยาโดยที่ตัวเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี กล่าวคือ ยังคงอยู่อย่างเดิมเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลง ถ้าเขียนรูปแสดงการเปรียบเทียบระหว่างปฏิกิริยาที่ใส่ตัวเร่งกับปฏิกิริยาที่ไม่ใส่ตัวเร่ง ดังรูปที่ 2.9 โดยรูปที่ 2.9 (a) แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาที่ไม่ใส่ตัวเร่งมีเส้นยอดเพียงแห่งเดียว หมายถึงปฏิกิริยามีเพียงขั้นเดียว แต่มีพลังงานแอกติเวชันสูงเทียบกับรูปที่ 2.9 (b) ปฏิกิริยาที่ใส่ตัวเร่ง มีเส้นยอดเขา 2 แห่ง หมายถึงปฏิกิริยานี้มี 2 ขั้น และมีพลังงานแอกติเวชันต่ำกว่าจึงทำให้ปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งเกิดขึ้นเร็วกว่า แม้ว่าจะมีมากขึ้นกว่าก็ตามจึงกล่าวได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดวิถีทางใหม่ของปฏิกิริยา และทำให้พลังงานแอกติเวชัน (Activation energy) ของปฏิกิริยาลดลง [16]



รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบปฏิกิริยา (a) ไม่ใส่ตัวเร่ง (b) ใส่ตัวเร่ง [2]

ในเซลล์เชื้อเพลิงนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยามีหน้าที่ 3 อย่างคือ ดูดซับแก๊ส (Adsorption) ส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron transfer) และผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นที่เกิดปฏิกิริยา (Surface reaction) ทั้งนี้การดูดซับแก๊สเป็นการยึดเหนี่ยวแบบโควาเลนต์ (Covalent bond) ระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับและผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

ในช่วงแรกๆ ตัวเร่งปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนในเซลล์เชื้อเพลิงแบบใช้เมมเบรนพอลิเมอร์ของแข็งคือพาลลาเดียม (Palladium) [12] แต่เนื่องจากพาลลาเดียมมีแนวโน้มที่จะเกิดการ



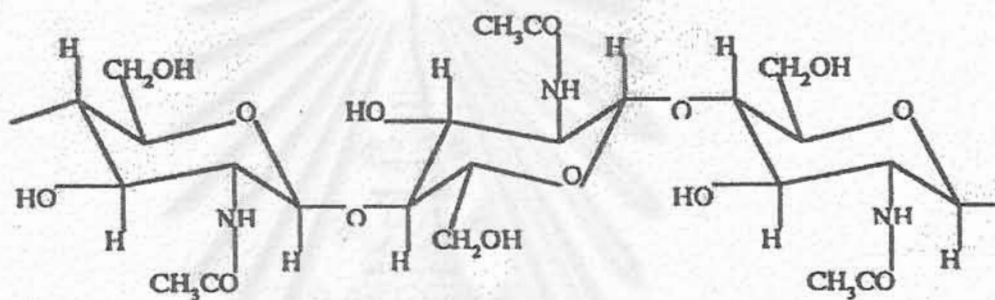
กักร่อนที่สภาวะอุณหภูมิประมาณ 85 องศาเซลเซียส แพลทินัมซึ่งมีราคาแพงกว่าจึงได้ถูกนำมาแทนพอลลาเดียมและทำให้สมรรถนะการทำงานของขั้วอิเล็กโทรดเสถียรมากกว่าและมีความไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าได้ดีกว่า ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบใช้เมมเบรนพอลิเมอร์ของแข็งรุ่นแรกๆ ที่ใช้ในยานอวกาศ Gemini นั้นปริมาณของ Pt ที่ใช้ในขั้วอิเล็กโทรดมีค่ามากถึง 35 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่ต่อมาเมื่อมีการผลิต Nafion มาใช้เป็นเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ปริมาณของแพลทินัมดำที่ต้องการทั้งในขั้วแอโนดและขั้วแคโทดมีค่าลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ความพยายามต่อเพื่อปรับปรุงสมรรถนะการทำงานของขั้วอิเล็กโทรดโดยยังคงรักษาให้ปริมาณการใช้โลหะตระกูลสูง (Noble metal) มีค่าน้อยเหมือนเดิมและมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมมากขึ้นคือ การใช้โลหะผสมแพลทินัม ได้แก่ Pt-Ru, Pt-Ir, Pt-V, Pt-Rh, Pt-Cr, Pt-Co, Pt-Ni, Pt-Fe, Pt-Mn และ Pt-Pd เป็นต้น จากการศึกษาที่ศูนย์วิจัยระบบเคมีไฟฟ้าและไฮโดรเจนของมหาวิทยาลัย Texas A&M ได้แสดงให้เห็นว่าโลหะผสมแพลทินัมที่เกาะอยู่บนตัวรองรับคาร์บอน (Pt-Cr, Pt-Mn, Pt-Ni, Pt-Fe และ Pt-Co) ช่วยทำให้สมรรถนะการทำงานของอิเล็กโทรดในแง่การเร่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าได้สูงขึ้น [17] ทั้งนี้เนื่องมาจากพฤติกรรมการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ของออกซิเจนบน Pt กับโลหะผสมแพลทินัมจะแตกต่างกันที่ค่าความต่างศักย์ที่มากกว่า 0.8 V

นอกจากนี้ที่ศูนย์วิจัย Higashi Fuji Technical Center [18] ในประเทศญี่ปุ่นได้ศึกษาการใช้โลหะผสมแพลทินัมจำนวน 10 ชนิด Pt-Ru, Pt-Ir, Pt-V, Pt-Rh, Pt-Cr, Pt-Co, Pt-Ni, Pt-Fe, Pt-Mn และ Pt-Pd มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับขั้วแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนพอลิเมอร์เพื่อพิสูจน์ว่าโลหะผสมคู่ใดที่จะสามารถทนทานต่อ CO ที่ผสมมากับแก๊ส  $H_2$  ที่ป้อนเข้าขั้วแอโนด แก๊สผสมดังกล่าวเกิดจากกระบวนการปฏิรูปของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน อาทิเช่นในกระบวนการปฏิรูปของเมทานอล แก๊สที่ได้จะมีปริมาณ  $CO_2$  อยู่สูงถึง 25 % และมี CO อยู่ในปริมาณเล็กน้อยแต่เนื่องจากสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนพอลิเมอร์ของแข็งจะลดลงอย่างมากกับความเข้มข้นของ CO ที่มีเพียง 1-5 ppm ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซับของ CO บน Pt อย่างแรง วิธีการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้ 2 วิธีคือ 1) โดยการพ่นอากาศ 2% เข้าไปที่ขั้วแอโนดเพื่อลดความเป็นพิษของ CO แต่วิธีนี้จะทำให้โครงสร้างและการควบคุมเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนพอลิเมอร์ของแข็งมีความซับซ้อนมากขึ้นและ 2) โดยการทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วแอโนดมีความทนทานต่อ CO มากขึ้นโดยการใช้โลหะผสมแพลทินัม ผลการทดสอบพบว่าแอโนดที่เตรียมมาจาก Pt-Ru จะสามารถทนต่อ CO ได้ดีที่สุด

## 2.6 ไคติน (Chitin) [19]

ไคตินเป็นสารพอลิเมอร์ธรรมชาติจำพวกคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลยาวมากโดยไม่มีกิ่งก้าน (Unbranched polysaccharide) สูตรโครงสร้างของไคตินเป็น Poly- $\beta$ -(1,4)-2-acetamino-2-deoxy-D-glucose หรือ Poly N-acetyl-glucosamine ซึ่งแต่ละหน่วยจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\beta$ -(1,4) และมีสูตรทั่วไปคือ  $(C_8H_{13}NO_5)_n$  ประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 47.29 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.45 ไนโตรเจนร้อยละ 6.89 และออกซิเจนร้อยละ 39.37 [20] และเมื่อพิจารณาจากสูตรโครงสร้างของไคตินพบว่าไคตินเป็นสารโมเลกุลยาวที่ไม่ใช่ประจุ (Nonelectrolytic polymer) ดังแสดงในรูป 2.10

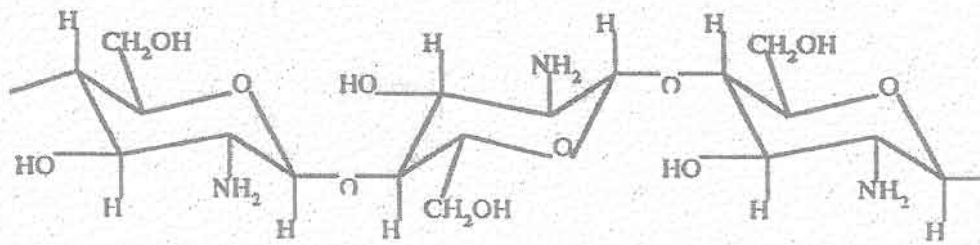


รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของไคติน [19]

โครงสร้างทางเคมีของไคตินมีความคล้ายคลึงกับเซลลูโลส จะต่างกันเพียงแต่หน่วยย่อยของเซลลูโลสเป็น D-glucose ส่วนหน่วยย่อยของไคตินเป็นอนุพันธ์ของกลูโคสคือ N-Acetylglucosamine โดยที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ตรงคาร์บอนตำแหน่งที่สองของเซลลูโลสจะถูกแทนที่ด้วย Acetylated amino (-NH-COCH<sub>3</sub>) [21] ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าแท้จริงแล้วไคตินก็คืออนุพันธ์ของเซลลูโลสนั่นเอง

## 2.7 ไคโตซาน (Chitosan) [19]

ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคติน มีชื่อทางเคมีว่า Poly- $\beta$ -(1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose สูตรทั่วไปคือ  $(C_8H_{11}O_4N)_n$  และมีสูตรโครงสร้างทางเคมีของไคโตซันดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน [19]

ไคโตซานเกิดจากการกำจัดหมู่แอสเตทิลในไคตินออก (Deacetylation) โดยที่หมู่แอสเตทิล (-CO-CH<sub>3</sub>) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่สองจะถูกตัดออกเหลือเป็นหมู่อะมีน (-NH<sub>2</sub>) ซึ่งไคโตซานสามารถที่จะมีประจุบวกบนหมู่อะมีนได้ ดังนั้นการเพิ่มของหมู่อะมีนนี้จะไปเพิ่มสมบัติการเป็น Polycationic activity บนพอลิเมอร์ การเกิดไคโตซานนั้นขึ้นอยู่กับการเกิด Deacetylation โดยดูจากค่า Degree of deacetylation ไคตินที่มี Degree of deacetylation ประมาณร้อยละ 50 จะถูกเรียกว่าไคโตซาน แต่โดยทั่ว ๆ ไปแล้วไคโตซานจะมี Degree of deacetylation อยู่ในช่วงร้อยละ 70 ถึง 90 ซึ่งก็คือยังคงมีหมู่ N-Acetyl เหลืออยู่ในโครงสร้างประมาณ 10 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ถ้าหมู่แอสเตทิลถูกกำจัดออกไปประมาณร้อยละ 90 ถึง 100 จะเรียกว่า Full deacetylation

## 2.8 สมบัติของไคตินและไคโตซาน [19]

สมบัติทางเคมีและกายภาพของไคตินและไคโตซานแสดงในตารางที่ 2.1

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของไคตินและไคโตซาน [22]

Characteristic parameter	Chitin	Chitosan
Molecular weight (Dalton) <sup>a</sup>	>10 <sup>6</sup> (native chitin) (1-5) x 10 <sup>5</sup> (commercial product)	(1-5)x10 <sup>5</sup> (commercial product)
Degree of polymerization (Average no. of the repeating unit in a molecule)	600-1800	600-1800
X-ray diffraction (Peaks)	8°58' - 10°26' 19°58' - 20°00'	8°58' - 10°26' 19°58' - 20°00'
Idealized composition (Empirical composition)	C <sub>8</sub> H <sub>13</sub> O <sub>5</sub> N	C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> O <sub>4</sub> N
Nitrogen content (%) (Commercial product)	6-7	7-9.5
%Moisture (Air dried product)	2-10	2-10
Extent of deacetylated (%)	10	60-80
Viscosity (cP)	Insoluble	250-2500 (1% in Acetic acid) Non-Newtonian and shear thinning
%Ash at 900°C	<1.0	<1.0
Transition metals <sup>b</sup> , µg/g	<0.5	<0.5 <sup>c</sup>

<sup>a</sup>Molecular weight and degree of polymerization (DP) is variable and depend on the source. The commercial products have low molecular weight and degree of polymerization because of degradation during extraction process.

<sup>b</sup>Excluding Fe which is present but not detrimental to application

<sup>c</sup>Crab chitosan contain typically (µg/g): V=0.12; Cr=0.04; Mn=0.09; Ni=1.3; Cu=1.03; Ag= 0.02; Cd=0.22; Hg=0.025 and Pb=0.15

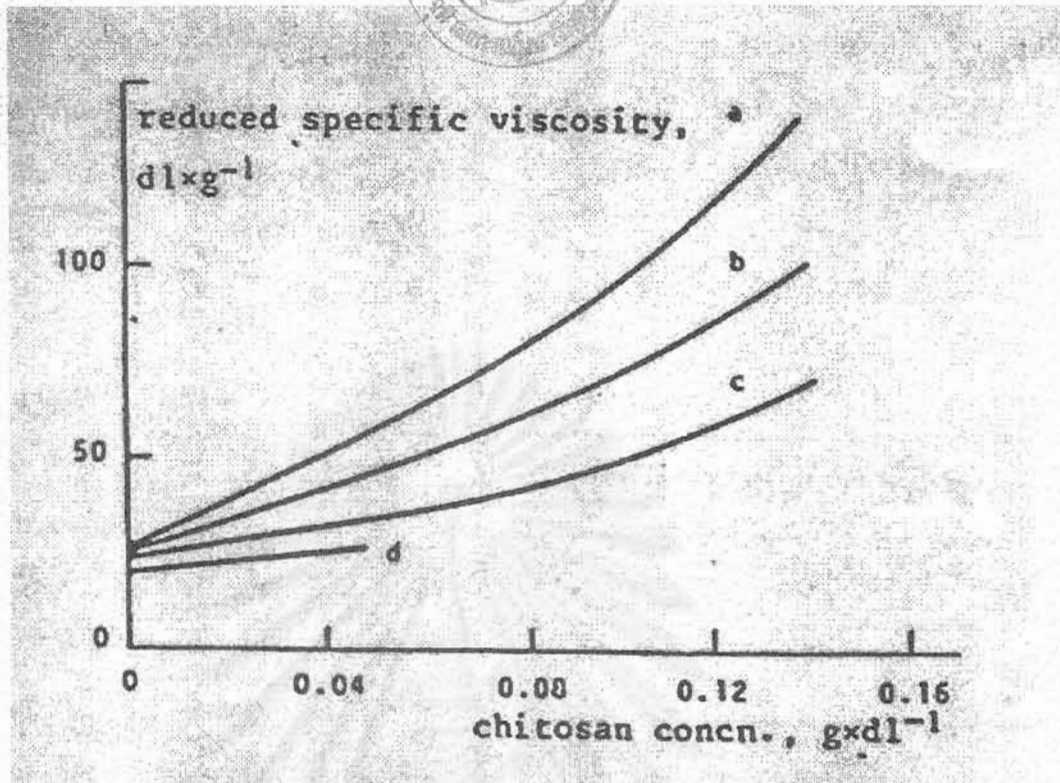
## 2.8.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของโคติน

### 2.8.1.1 การละลาย (Solubility)

โคตินเป็นพอลิเมอร์ที่ไร้ประจุทำให้ไม่สามารถละลายได้ในน้ำ กรดอ่อน และด่าง แต่โคตินสามารถละลายได้ในกรดแก่ เช่น กรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก กรดฟอสฟอริกความเข้มข้นร้อยละ 78-79 โดยน้ำหนัก กรดคาร์บอกซิลิก และกรดซัลโฟนิก เช่น กรดฟอร์มิก ไดคลอโรแอซิติค ไตรคลอโรแอซิติค และกรดมีเทนซัลโฟนิก โคตินจะละลายในกรดฟอร์มิกที่มีความแรงของกรดสูง แต่ระบบตัวทำละลายนี้จะว่องไวต่อน้ำซึ่งทำให้การละลายของโคตินลดลง อย่างไรก็ตามสามารถจะปรับปรุงการละลายได้โดยการเติมเกลือที่ละลายน้ำได้ เช่น NaCl, NaBr, CaCl<sub>2</sub>, LiCl, KCl และ KSCN การละลายของโคตินในกรดแก่จะทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการสลายตัวได้ (Degrade) และพบว่าตัวทำละลายประเภท Tertiary amide (R-CO-N-R<sub>2</sub>) ที่มี Lithium chloride (LiCl) ในปริมาณอย่างน้อยร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สามารถที่จะละลายโคตินได้ดีโดยเฉพาะ N,N-Dimethyl-acetamine และ N-Methyl-2-pyrrolidinone ซึ่งระบบตัวทำละลายนี้ไม่มีผลทำให้โคตินเกิดการสลายตัว นอกจากนี้แล้วโคตินยังสามารถละลายได้ในตัวทำละลาย Hexafluoroisopropanal (HFIP) และ Hexafluoroacetone sesquihydrate (HFAS) แต่สาร HFIP จะก่อให้เกิดความระคายเคืองและ HFAS เป็นสารที่มีพิษมากทำให้ไม่มีการใช้งานของตัวทำละลายทั้ง 2 นี้่อีกต่อไป

### 2.8.1.2 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของสารละลายโคตินจะมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear) กับระยะเวลาและความเข้มข้นของสารละลาย ดังแสดงในรูป 2.12 ความหนืดของสารละลายโคตินจะลดลงตามระยะเวลาถึงช่วงเวลาหนึ่งความหนืดจะคงที่ และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโคตินมากขึ้นจะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์เกิดลักษณะ Entangle มากขึ้น นอกจากนี้คุณสมบัติของสารละลายยังมีผลต่อความหนืดซึ่งพบว่าเมื่อสารละลายมีคุณสมบัติสูงขึ้นจะทำให้มีความหนืดลดลง



รูปที่ 2.12 ค่าความหนืดของไคตินที่ละลายใน Formic acid anhydrous ที่อุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน วัดความหนืดที่ 25 องศาเซลเซียส โดยจุดตัดเป็นค่า Intrinsic viscosities, a = วันที่ 4, b = วันที่ 5, c = วันที่ 6 และ d = วันที่ 14 [23]

## 2.8.2 สมบัติทางเคมีและกายภาพของไคโตซาน

### 2.8.2.1 การละลาย (Solubility)

ไคโตซานจะไม่ละลายน้ำที่มีค่าความเป็นกรดต่างสูงกว่า 6.5 ตัวทำละลายที่เป็นต่างและ Mineral acid ที่เข้มข้น เช่น กรดซัลฟูริก ไคโตซานสามารถละลายได้ในสารละลายกรดอินทรีย์เจือจาง ได้แก่ สารละลายกรดแอสติก สารละลายกรดซิตริก และสารละลายกรดฟอร์มิกที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 0.2-100 โดยปริมาตร [24] และในภาวะที่เป็นกรดนี้หมู่อะมิโนอิสระ ( $-NH_2$ ) จะถูกโปรตอนไปอยู่ในรูปของหมู่ Cationic amino ( $-NH_3^+$ ) [22] นอกจากนี้ไคโตซานยังสามารถละลายได้ในตัวทำละลายกรดอินทรีย์เจือจาง ได้แก่ สารละลายไฮโดรคลอริก สารละลายกรดไนตริก และละลายได้เล็กน้อยในสารละลายกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร ความสามารถในการละลายของไคโตซานในสารละลายกรดชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความสามารถในการละลายของโคโคซานในสารละลายกรดชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นของกรดต่างๆ กัน [19]

ชนิดของกรด	ความเข้มข้นของสารละลายกรด (v/v)				
	1%	5%	10%	50%	>50%
Acetic	+	+	+	+	
Adipic	+				
Citric	-				
Formic	+	+	+	+	+
Lactic	+	+	+		
Malic	+	+	+		
Tartalic	-		+		
Hydrochloric	+	-	-		
Nitric	+	-	-		
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	-	-	-		
Sulfuric	-	-	-		

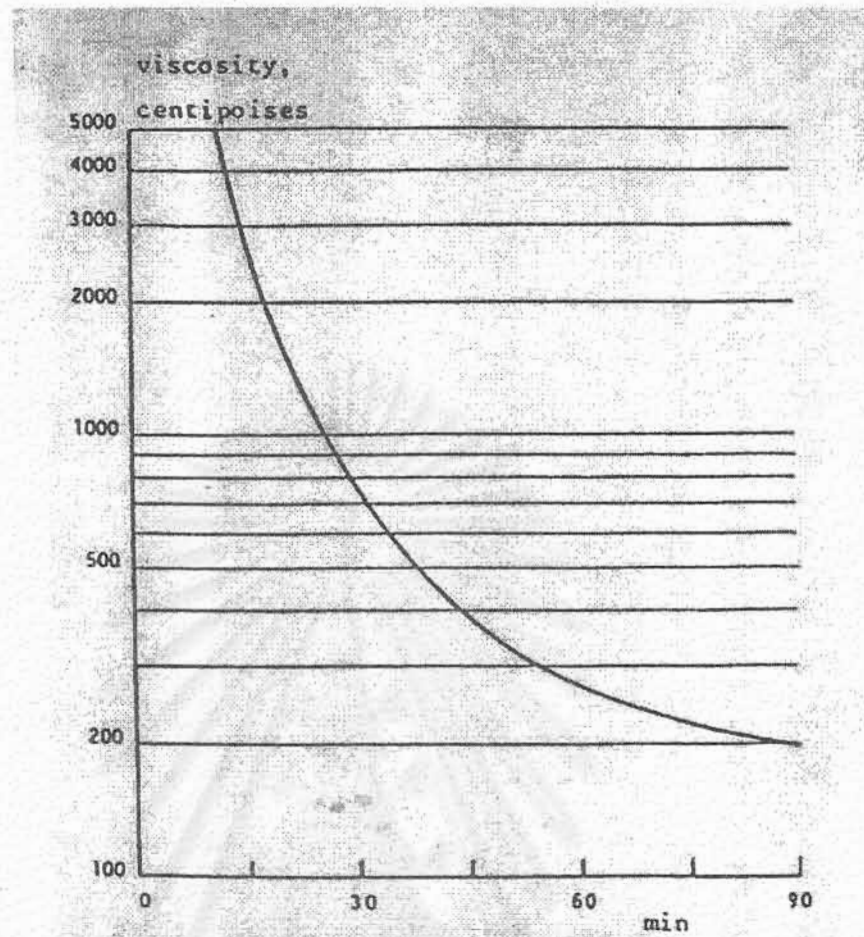
หมายเหตุ

+ แสดงว่าโคโคซานสามารถละลายได้ - แสดงว่าโคโคซานไม่สามารถละลายได้

\*แสดงว่าโคโคซานไม่สามารถละลายได้ในกรดซัลฟูริกและกรดฟอสฟอริก แต่สามารถละลายได้ในกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้นกรดน้อยกว่า 0.5%

### 2.8.2.2 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของสารละลายโคโคซานขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้การกำจัดหมู่แอสเตต (Deacetylation) ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอสเตต ซึ่งพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นมากและเวลานาน จะทำให้ความหนืดของสารละลายลดลง เนื่องจากภาวะที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอสเตตรุนแรงโดยจะมีผลทำให้เกิดการแตกขาดของสายโซ่โมเลกุล เวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอสเตตทำให้ความหนืดของสารละลายโคโคซานเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งพบว่าทำให้มีปัญหาในการผลิตโคโคซานที่มีมวลโมเลกุลสูง



รูปที่ 2.13 ผลของเวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอเซทิล (ในสารละลาย NaOH ร้อยละ 50 อุณหภูมิ 118 องศาเซลเซียส) ที่มีต่อความหนืดของสารละลายโคโคซาน [22]

## 2.9 แหล่งของไคติน [19]

ในจำพวกพอลิเมอร์ชีวภาพทั้งหมด ไคตินเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีอยู่มากเป็นอันดับสอง รองจากเซลลูโลส (Cellulose) ไคตินพบทั่วไปตามผนังเซลล์พืชและสัตว์ ในสัตว์แหล่งที่พบไคตินอยู่เป็นจำนวนมากได้แก่ กลุ่ม Arthropoda ซึ่งประกอบด้วย Insecta (พวกแมลงต่างๆ) ได้แก่ ตัวด้วง แมลงสาบ และกลุ่ม Crustacea ได้แก่ กุ้ง ปู กุ้ง และเคย เป็นต้น โดยไคตินจะทำหน้าที่เป็นโมเลกุลโครงร่างแข็งภายนอก (Exoskeleton) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเปลือกกุ้งและแมลง รวมทั้งกระดองของปูและปลาหมึก ในพืชบางชนิดอาจจะมีไคตินแทนเซลลูโลสหรือเกิดร่วมกับเซลลูโลสก็ได้ [25] นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นส่วนประกอบผนังเซลล์ของเชื้อรา เห็ดและยีสต์ รวมทั้งยังพบได้ในสัตว์ชั้นต่ำที่ไม่มีกระดูกสันหลังต่างๆ (Invertebrates) ในแหล่งที่พบไคตินนั้นจะมีโปรตีน ไขมัน เม็ดสีและเกลือแคลเซียมเกิดขึ้นปะปนอยู่ด้วย ดังนั้นถ้าต้องการแยกเฉพาะไคติน



จะต้องกำจัดการประกอบที่ปนอยู่ออก ไคตินที่พบในแหล่งต่างๆ จะมีปริมาณแตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปริมาณไคตินที่มีอยู่ในสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ [24]

ชนิด	ปริมาณไคติน (%)	ชนิด	ปริมาณไคติน (%)
<b>Crustacea</b>		<b>Insects</b>	
Cancer (Crab)	72.1 <sup>c</sup>	Periplaneta (Cockroach)	2.0 <sup>a</sup>
Carcinus (Crab)	0.4-3.3 <sup>a</sup>	Blatella (Cockroach)	18.4 <sup>c</sup>
	8.29 <sup>b</sup>		10 <sup>b</sup>
	64.2 <sup>b</sup>		35 <sup>c</sup>
Paralithodes (King crab)	35 <sup>b</sup>	Colcoptera (Beetle)	5-15 <sup>b</sup>
Callinectes (Blue crab)	14 <sup>a</sup>		27-35 <sup>c</sup>
Pleuroncodes (Red crab)	1.3-1.8 <sup>b</sup>	Tenebrio (Beetle)	2.1 <sup>a</sup>
Crangon (Shrimp)	5.8 <sup>b</sup>		4.9 <sup>b</sup>
	69.1 <sup>c</sup>		31.3 <sup>c</sup>
Nephropes (Lobster)	69.8 <sup>c</sup>	Diptera (True fly)	54.8 <sup>c</sup>
	6.7 <sup>b</sup>	Pieris (Sulfur butterfly)	64 <sup>c</sup>
Homarus (Lobster)	60.8-77.0 <sup>c</sup>	Grasshopper	2-4 <sup>c</sup>
Lepas (Barnacles)	58.3 <sup>c</sup>		20 <sup>c</sup>
		Bombyx (Silk worm)	44.2 <sup>c</sup>
		Calleria (Wax worm)	33.7 <sup>c</sup>
<b>Fungi</b>			
Aspergillus niger	42.2 <sup>e</sup>		
Penicillium notatum	18.5 <sup>e</sup>	<b>Molluscan Organs</b>	
Penicillium chrysogonium	20.1 <sup>e</sup>	Clamshell	6.1 <sup>b</sup>
Saccharomyces cerevisiae	2.9 <sup>e</sup>	Oyster shell	3.6 <sup>a</sup>
Mucor rouxi	44.5 <sup>e</sup>	Squid, skeletalpen	41.0 <sup>c</sup>
Lactarius vellereus	19.0 <sup>e</sup>	Krill, deproteinized shell	40.2 <sup>c</sup>
Alaskan shrimp	28 <sup>d</sup>	May (Beetle)	16 <sup>b</sup>

<sup>a</sup>Wet body weight

<sup>b</sup>Dry body weight

<sup>c</sup>Organ weight of cuticle

<sup>d</sup>Total dry weight of cuticle

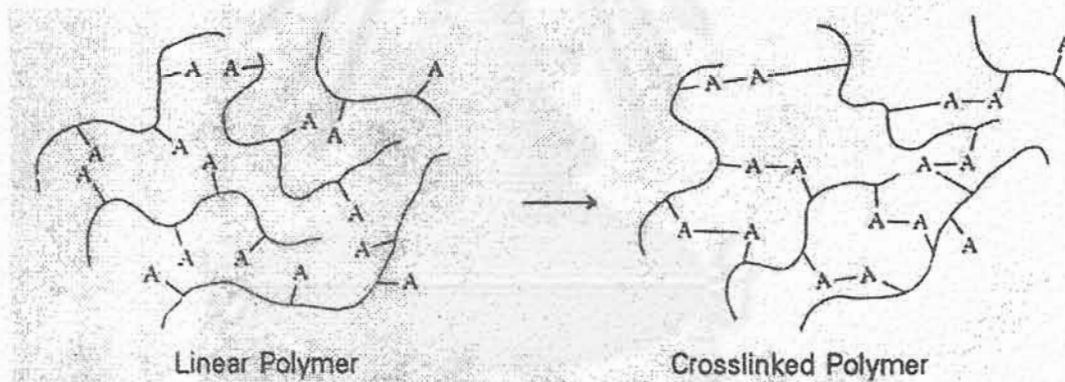
<sup>e</sup> Dry weight of the cell wall

## 2.10 การเกิดโครงร่างตาข่าย (Crosslinking) [19]

ปฏิกิริยาโครงร่างตาข่าย (Crosslinking) เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดพันธะเคมีระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์ ซึ่งโพลิเมอร์จะมีสายโซ่เชื่อมโยงกันด้วยพันธะไอออนิก เกิดโครงสร้างแบบโครงร่างสามมิติ (Three-dimension network) ลักษณะของการเกิดโครงร่างตาข่ายแบ่งออกได้ดังนี้

- ก) การเกิดโครงร่างตาข่ายเมื่อโพลิเมอร์สายโซ่ตรง (Linear polymer) หรือโพลิเมอร์กิ่งก้าน (Branched polymer) นั้นมีหมู่ที่สามารถเกิดปฏิกิริยา (Functional group) ได้หลายหมู่ ถ้าให้ A แทนหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ด้วยตัวเองและเกิดพันธะ A-A

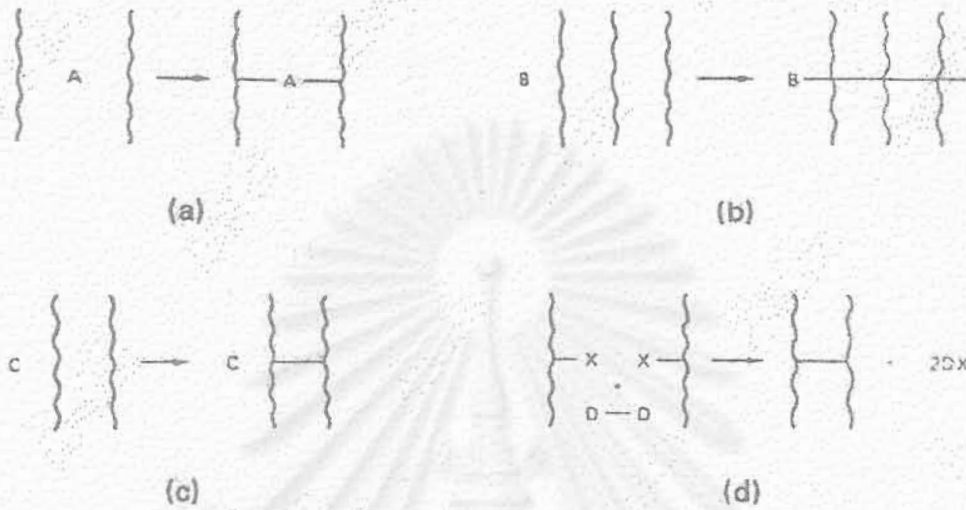
เมื่อโพลิเมอร์เหล่านี้อยู่ในภาวะที่ทำให้หมู่ฟังก์ชันเกิดปฏิกิริยาได้จะทำให้สายโซ่ทั้งหมดทำปฏิกิริยากันและเกิดการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะ A-A ดังรูปที่ 2.14 ดังนั้นเมื่อโพลิเมอร์เหล่านี้เกิดการโครงร่างตาข่ายจะทำให้ได้โพลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ การเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายนี้เป็นแบบที่ง่ายที่สุด



รูปที่ 2.14 การเกิดโครงร่างตาข่ายของโพลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่ [19]

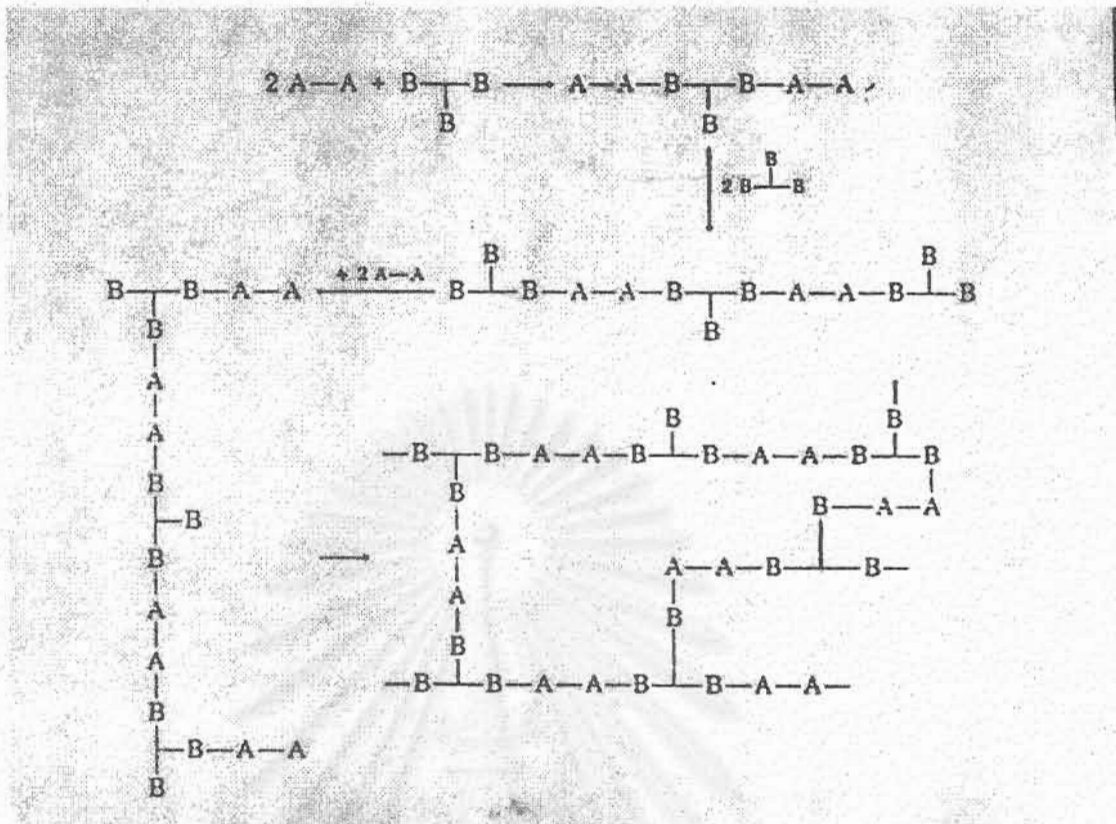
- ข) การเกิดโครงร่างตาข่ายด้วยการใช้สารทำให้เกิดการเชื่อมโยง (Crosslinking agent) การเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่าย เกิดขึ้นเนื่องจากโพลิเมอร์ทำปฏิกิริยากันเอง แต่ปฏิกิริยาแบบนี้ไม่สามารถทำให้เกิดโครงสร้างเป็นแบบโครงร่างสามมิติได้ ดังนั้นจึงมีการใช้สารทำให้เกิดการเชื่อมโยง ซึ่งสมบัติของสารช่วยในการเกิดปฏิกิริยา คือเป็นโพลิเมอร์ที่มีหมู่ที่สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนสายโซ่โพลิเมอร์ได้อย่างน้อย 2 หมู่ขึ้นไป สารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงอาจเป็นโพลิเมอร์ที่เชื่อมระหว่างโพลิเมอร์ 2 โพลิเมอร์ (รูป 2.15a) หรือโพลิเมอร์ที่กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่าย (รูป 2.15b) หรือเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่าย (รูป 2.15c)

หรือเป็นสารที่เข้าไปดึงโมเลกุลของพอลิเมอร์เพื่อให้เกิดตำแหน่งที่ว่องไวต่อการเชื่อมโยง (รูป 2.15d)



รูปที่ 2.15 การเกิดโครงร่างตาข่ายของพอลิเมอร์เมื่อมีการใช้สารช่วยในการเกิดปฏิกิริยา  
[6] (a) Bridging agent (b) Cross-linking initiator (c) Catalytic crosslinking agent  
(d) Active site generator [19]

- ค) การเกิดโครงร่างตาข่ายในระหว่างการพอลิเมอไรเซชันด้วยการใช้มอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน (Functional groups) เฉลี่ยมากกว่า 2 (Polyfunctional monomers) แทนการใช้มอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ (Difunctional monomer) ปฏิกิริยานี้มักจะเกิดในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่กับมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน 3 หมู่ (Trifunctional monomer) เช่นปฏิกิริยาของ Diol กับ Triisocyanate ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ในช่วงแรกของปฏิกิริยานั้นพอลิเมอร์ยังมีมวลโมเลกุลต่ำซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่และเกิดกิ่งก้านมาก แต่ยังไม่เกิดพันธะเชื่อมโยง แต่ในช่วงหลังปฏิกิริยาถึงจุดหนึ่ง โมเลกุลจะเกิดพันธะเชื่อมโยงได้พอลิเมอร์ที่มีโครงร่างตาข่าย ซึ่งทำให้ความหนืดของสารเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สารที่มีความหนืดมากนี้เรียกว่าเจล (Gel)



รูปที่ 2.16 การเกิดโครงร่างตาข่ายขณะเกิดพอลิเมอร์เชนด้วยการใช้มอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่ [19]

### 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สถานการณ์งานวิจัยและพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงในประเทศไทย เป็นดังนี้คือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทำการวิจัยเซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอนเนตหลอม (MCFC) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ทำการวิจัยเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ทำการวิจัยเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (SOFC) และตั้งแต่ปี 2544 ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ ทำวิจัยเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน นอกจากนี้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้เคยติดตั้งโรงไฟฟ้าสาริตเซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริกของบริษัท Fuji Electric ขนาดกำลังการผลิต 50 กิโลวัตต์ โดยใช้แก๊สธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง และตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม 2545 นักวิจัยไทยประกอบด้วย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยมหิดล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติได้ร่วมมือกันทำวิจัยเน้นเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

Maeda และคณะ (2000) [26] ได้ศึกษาผลของปริมาณองค์ประกอบเคมีในรีฟอร์มเมตจากเมธานอล เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ และเมธานอล ต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เพื่อประเมินความเหมาะสมในการใช้เซลล์เชื้อเพลิงจากการรีฟอร์มเมธานอลเพื่อประยุกต์ใช้งานแบบพกพาเคลื่อนที่ พบว่าปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์มีผลมากกว่าองค์ประกอบอื่นๆ และการควบคุมอุณหภูมิดำเนินการมีความสำคัญต่อการคงรักษาศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ในการทดสอบความคงทนดำเนินการกับรีฟอร์มเมตจากเมธานอลที่มีปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ 50 ส่วนในล้านส่วน ภายใต้โหลดคงที่ (constant load) ที่ 500 มิลลิแอมแปร์ ต่อตารางเซนติเมตร ความดัน 1 บรรยากาศสัมบูรณ์ อัตราการลดลงของสมรรถนะระหว่าง 2000 ชั่วโมงดำเนินการ เท่ากับ 6 มิลลิแอมแปร์ต่อ 1000 ชั่วโมง แต่อัตราการลดลงของสมรรถนะสูงขึ้นเป็น 20 มิลลิแอมแปร์ต่อ 1000 ชั่วโมง เมื่อเติมเมธานอลเข้าไปในเชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อตัดแปลงทางไหลของเชื้อเพลิงมิให้เกิดการติดขัดทำให้สามารถรับการแปรเปลี่ยนในอัตราการไหลของเชื้อเพลิงได้ดีขึ้น และชุดเซลล์เชื้อเพลิงสามารถดำเนินการได้อย่างคงที่โดยมีการใช้เชื้อเพลิงมากกว่า 90%

Wakizoe และคณะ (2000) [27] ศึกษาลักษณะพื้นฐานและเสถียรภาพของเมมเบรน Aciplex-S perfluorosulfonic หลายชนิดในการใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน

Yanagisawa และคณะ (2000) [28] ศึกษาพฤติกรรมการแพร่ซึมของน้ำภายใต้สภาวะการทำให้ขึ้นในลักษณะต่างๆ ของเมมเบรน Flemion® เพื่อใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน พบว่าความสามารถในการแพร่ซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange capacity) ของเมมเบรนเพิ่มขึ้น และได้ศึกษายืนยันผลดีของการใช้เมมเบรนบางต่อสมรรถนะของเซลล์กับเมมเบรนชนิด Flemion®HF (30 ไมครอน และ 1.1 มิลลิลิสมมูลย์ต่อกรัม) จากการสังเกตค่าความต่างศักย์ (IR Free voltage) ได้สังเคราะห์และทดสอบเมมเบรน Flemion®Rf (50 ไมครอน, 1.1 มิลลิลิสมมูลย์ต่อกรัม และมีปริมาณเส้นใย PTFE 2.7 %โดยน้ำหนัก) ด้วยเทคนิค PTFE-fibril reinforced technology โดยแสดง Creep property ที่ดีเยี่ยมแม้แต่ที่สภาวะอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และสูงเท่ากับสมรรถนะของเซลล์ที่ได้จากชนิด Non-reinforced Flemion®R (50 ไมครอน และ 1.1 มิลลิลิสมมูลย์ต่อกรัม)

Ota และคณะ (2000) [29] ได้ศึกษาปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนและปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนบน Pt microelectrode ที่นำหน้ากลุ่มมูลย์ต่างๆและในช่วงอุณหภูมิ 30 – 70 องศาเซลเซียส โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงแอกติวิตีของวัสดุโพลีเมอร์ที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิง ในงานวิจัยนี้ได้วัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายและความสามารถในการละลายของออกซิเจนและไฮโดรเจนในอิเล็กโทรไลต์โดยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี พบว่าความสามารถในการละลายของออกซิเจนและไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวน Hydrophobic moiety เพิ่มขึ้น น้ำหนักกลุ่มมูลย์ไม่มีผลต่อปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรด แต่ปริมาณน้ำในโพลีเมอร์อิเล็กโทรไลต์มีผลต่อปฏิกิริยาทั้งสองอย่างมาก

Takizawa และคณะ (2000) [30] ได้ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อความร้อนของเมมเบรนเนื่องจาก Thermal hysteresis ที่มีผลต่อลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน โดยการวัดค่าความต้านทานของเมมเบรน ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน และการดูดซับน้ำ พบว่าค่าความต้านทานของเมมเบรนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการบำบัดเชิงความร้อน (Heat-treatment temperature) แต่ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนไม่เปลี่ยนแปลง จากผลการทดลองนี้ทำให้สมมติได้ว่าการดูดซับน้ำลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับการพองตัวของเมมเบรนโดยความร้อนและไม่สามารถเกิดช่องว่างในเมมเบรนขึ้นได้อย่างเพียงพอ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในความต้านทานของเมมเบรนขึ้น

Zaidi S. M. J. และคณะ (2000) [31] ศึกษาสมบัติด้านการนำไฟฟ้าของเมมเบรนประเภทพอลิออกซาไดอะโซล (POD) ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ Dope ด้วยกรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) เมมเบรนดังกล่าวเตรียมโดยวิธีการเปลี่ยนเฟส (Phase inversion) เมมเบรนที่เตรียมได้นั้นจะมีรูพรุนขนาดใหญ่ รูปร่างเป็นทรงกระบอกตั้งฉากกับผิวหน้า มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 ไมโครเมตรหรือมากกว่าขึ้นอยู่กับขั้นตอนในการสังเคราะห์ (Synthesis procedure) โครงสร้างเช่นนี้จะมีผลต่อความสามารถในการแยก (Separative ability) ของเมมเบรน แต่เมมเบรนนี้ยังคงค่อนข้างไม่เสถียรและเปราะ ทำให้ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง การอัดเชิงกลจะช่วยลดความพรุนและช่วยเพิ่มความเสถียรทางกายภาพ (Physical stable) ทำให้แข็งแรงและยืดหยุ่นขึ้นด้วย การอัดเมมเบรนที่ความดัน 3.4 ตัน/ซม<sup>2</sup> จะช่วยลดความพรุน ในขณะที่การอัดที่ความดัน 5.7 ตัน/ซม<sup>2</sup> จะทำให้เมมเบรนปราศจากรูพรุนขนาดใหญ่ และความหนาของเมมเบรนจะลดลง 3-10 เท่า ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรน POD ที่ไม่ผ่านการ Dope ขณะที่มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าต่ำคือประมาณ  $10^{-7}$  S/cm และเกือบจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิในช่วงที่ทำการทดลองคือช่วง 25-90 องศาเซลเซียส การนำไฟฟ้าเกิดขึ้นคล้ายกลไกการนำไฟฟ้าของของเหลว

(Liquid-like mechanism) ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนที่ภาวะแห้ง (Dry stage) จะมีค่าน้อยกว่า 10-100 เท่าของค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนที่มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ เมมเบรนก่อนและหลังการอัดจะมีค่าการนำไฟฟ้าต่างกันเพียงเล็กน้อย สำหรับเมมเบรน POD ที่ผ่านการ Dope ด้วยกรดฟอสฟอริก เมมเบรนที่ไม่ผ่านการอัดจะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่า เนื่องจากเมมเบรนที่ไม่ได้ผ่านการอัดจะมีสัดส่วนช่องว่างมากกว่าทำให้มีกรดบรรจุอยู่ในรูพรุนของเมมเบรนมากกว่า ทำให้เกิดเส้นทางกรนำไฟฟ้า (Conduction pathway) ได้มากกว่านั่นเอง จากการพลอตกราฟแบบอาร์เรเนียส (Arrhenius plots) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเมมเบรนที่ผ่านการ Dope กราฟเกือบจะเป็นเส้นตรงในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาและมีพลังงานกระตุ้นของกลไกการเคลื่อนที่ (Transfer mechanism) ต่ำ แต่เมมเบรนที่มีกรดที่เป็นของเหลวบรรจุอยู่นั้นอาจจะไม่มีความเสถียรเพียงพอที่จะยังคงมีค่าการนำไฟฟ้าสูงในช่วงเวลานานหรือที่อุณหภูมิที่สูงกว่าที่ศึกษานี้ อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่าเมมเบรน POD ที่ผ่านการ Dope จะยังคงมีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสและการนำไฟฟ้าจะลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นหลังจากที่เก็บไว้ 1 เดือนในเซลล์ในแนวตั้งตรง ในกรณีผลของความเข้มข้นของพอลิเมอร์ในสารละลายก่อนนำไปขึ้นรูปต่อความพรุนของเมมเบรน พบว่าถ้าความเข้มข้นของพอลิเมอร์ในสารละลายน้อยลงเมมเบรนจะมีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น สำหรับการซึมผ่านของสารในเมมเบรน POD นั้น เมทานอลจะสามารถซึมผ่านได้น้อย ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane) เพื่อใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมทานอลได้ แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องทำการทดสอบเมมเบรนชนิดนี้ในภาวะการปฏิบัติงานจริงในเซลล์เชื้อเพลิงอีกครั้ง

Bever D. และคณะ (1996) [32] ศึกษาผลของการเคลือบ (Coating) พอลิเตตระฟลูออไรเอทิลีน (PTFE) บนคาร์บอนเปเปอร์ต่อสมบัติต่างๆ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน คาร์บอนที่นำมาศึกษาคือ Sigr PE 704 อุณหภูมิที่ใช้ในการ Sintering คือ 360-420 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ทำให้ PTFE ระเหยได้เพียงเล็กน้อยคือประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส จากการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิในการ Sintering สำหรับเปอร์เซ็นต์ PTFE ในช่วง 0-200 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อค่าเปอร์เซ็นต์ PTFE หลังการ Sintering พบว่าไม่มีแนวโน้มที่สามารถสรุปได้ เนื่องจากน้ำหนักส่วนที่หายไปนั้นจะรวมถึงปริมาณน้ำที่ระเหยออกไปด้วยซึ่งเป็นส่วนที่ไม่สามารถวัดได้ การศึกษาถึงความดันลด (Pressure drop) ของการป้อนแก๊สผ่านแผ่นคาร์บอนเปเปอร์นั้น พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการ Sintering ความดันลดจะมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะมีผลทำให้ PTFE ระหว่างเส้นใย (Fibres) ถูกกำจัดออกไปมากขึ้น ทำให้แก๊สสามารถไหลผ่านได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าที่เปอร์เซ็นต์ PTFE สูงขึ้นความแตกต่างระหว่างความ

ต้นลดก่อนและหลังการทำ Sintering จะมีค่ามากขึ้น ในกรณีของค่าการนำไฟฟ้า พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำ Sintering จะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลง น่าจะเกิดเนื่องจาก PTFE เกิดการเคลือบได้ดีขึ้น ทำให้มีสมบัติเป็นฉนวนมากขึ้น แต่ในความเป็นจริงแล้วคาร์บอนเปเปอร์ที่ไม่ผ่านการ Sintering ควรค่าการนำไฟฟ้าต่ำกว่าคาร์บอนเปเปอร์ที่ผ่านการ Sintering ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากข้อจำกัดของเครื่องมือ เนื่องจากการวัดความต้านทานที่มีช่วงต่ำ ส่วนผลของเปอร์เซ็นต์ PTFE ต่อค่าความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) พบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์ PTFE มีค่าเพิ่มขึ้นจะมีผลให้ค่าความไม่ชอบน้ำมีค่ามากขึ้น

Byun H. S. และคณะ (1994) [33] ศึกษาการซัลโฟเนชัน (Sulfonation) เมมเบรนพอลิไธรีนชนิดไม่สมมาตรที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายโดยใช้ไดไวนิลเบนซีน (Divinyl benzene) เป็นสารเชื่อมขวาง พบว่าการเพิ่มเวลาในการซัลโฟเนชัน จะมีผลทำให้ค่าการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange capacity) มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มเวลามากขึ้นจะทำให้มีกลุ่มซัลโฟเนต (Sulfonate group) มากขึ้นนั่นเอง การเพิ่มความหนาแน่นของโครงร่างตาข่าย (Crosslinking degree) มีผลทำให้สัดส่วนการบวม (Swelling ratio) มีค่าลดลง เนื่องจากทำให้โครงร่างตาข่าย (Network) มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าเมมเบรนผ่านการซัลโฟเนชันแล้วจะให้ผลในทางตรงกันข้าม กล่าวคือ การเพิ่มความหนาแน่นของโครงร่างตาข่าย จะมีผลทำให้ค่าสัดส่วนการบวมมีค่าเพิ่มขึ้น อาจเกิดเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลที่เป็นตัวเชื่อม (Bridging molecules) กับกรดซัลฟูริก ซึ่งมีผลทำให้โครงร่างตาข่ายลดลง ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ของส่วนที่ไม่เกิดโครงร่างตาข่ายร่วมด้วยและอาจเกิดเนื่องจากการเกิดวงแหวนในโครงสร้างโมเลกุลอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มเวลาในการเกิด ซัลโฟเนชันหรือการเพิ่มความหนาแน่นของโครงร่างตาข่าย จะมีผลทำให้มุมสัมผัสกับน้ำ (Contact angle) มีค่าลดลง มีผลทำให้ค่าความชอบน้ำมีค่ามากขึ้น

Sabnis S. และ Block L. (1997) [34] ศึกษาการวิเคราะห์ค่าการกำจัดหมู่อะเซทิล (Degree of *N*-deacetylation, DD) ของไคโตแซน โดยใช้วิธี Infrared spectroscopy techniques เนื่องจากการวิเคราะห์ในหลายๆเทคนิค จะต้องละลายพอลิเมอร์ในตัวทำละลายที่เหมาะสมและใช้ได้กับไคโตแซนที่มีค่า DD ประมาณ 70% หรือมากกว่าเท่านั้น แต่การวิเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าวไม่ต้องละลายไคโตแซนในตัวทำละลาย แต่จะวัดค่า Absorbance ที่ 1655 และ 3450  $\text{cm}^{-1}$  เท่านั้น ซึ่งค่า DD จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ได้จากกราฟสอบเทียบ (Calibration curve): โดยใช้ค่า Absorbance ratio  $[A_{1655}/A_{3450}]$  ดังนี้  $DD = 97.67 - [26.486(A_{1655}/A_{3450})]$  ซึ่งสมการนี้มีค่า  $r^2 = 0.976$  ( $n=12$ )



## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

Chitosan	Tokyo Kasei Kogyo Co., Ltd.
Acetic Acid (AR Grade)	BDH
Sodium Hydroxide (AR Grade)	BDH
Sulfuric Acid (AR Grade)	BDH
Hydrochloric Acid (AR Grade)	BDH
Methanol (AR Grade)	BDH
Ethylene Glycol Dimethyl Ether	Junsei Chemical Co., Ltd.
50% PVC	N.E. Chemcat Corporation
Nafion Perfluorinated Ion-exchange Resin	Aldrich Chemical Company
Polytetrafluoroethylene	Aldrich Chemical Company
Carbon Paper	Toray Co., Ltd.
ผงวุ้น	บริษัทพัฒนาศิลป์ จำกัด

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดเครื่องกวนชนิดปรับความเร็วรอบ
2. ชุดใบกวนเทปลอน
3. ตู้อบ
4. เต้าเผา
5. สูบสุญญากาศ
6. ชุดทดสอบการนำไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว (4-Probe conductivity testing system)
7. ชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว (Single cell testing system)
8. ชุดเตรียม MEA ซึ่งประกอบด้วยแผ่นกระจก แผ่นสแตนเลสและลูกกลิ้ง
9. เครื่อง Automatic Polarization System
10. เครื่องวัดความชื้น
11. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์

12. เครื่องอัดความร้อน (Hydraulic Press)
13. เครื่องขึงความละเอียด 2 ตำแหน่งและ 4 ตำแหน่ง
14. ไมโครมิเตอร์
15. โทดูดความชื้น
16. เครื่องแก้วอื่นๆ ในห้องปฏิบัติการ

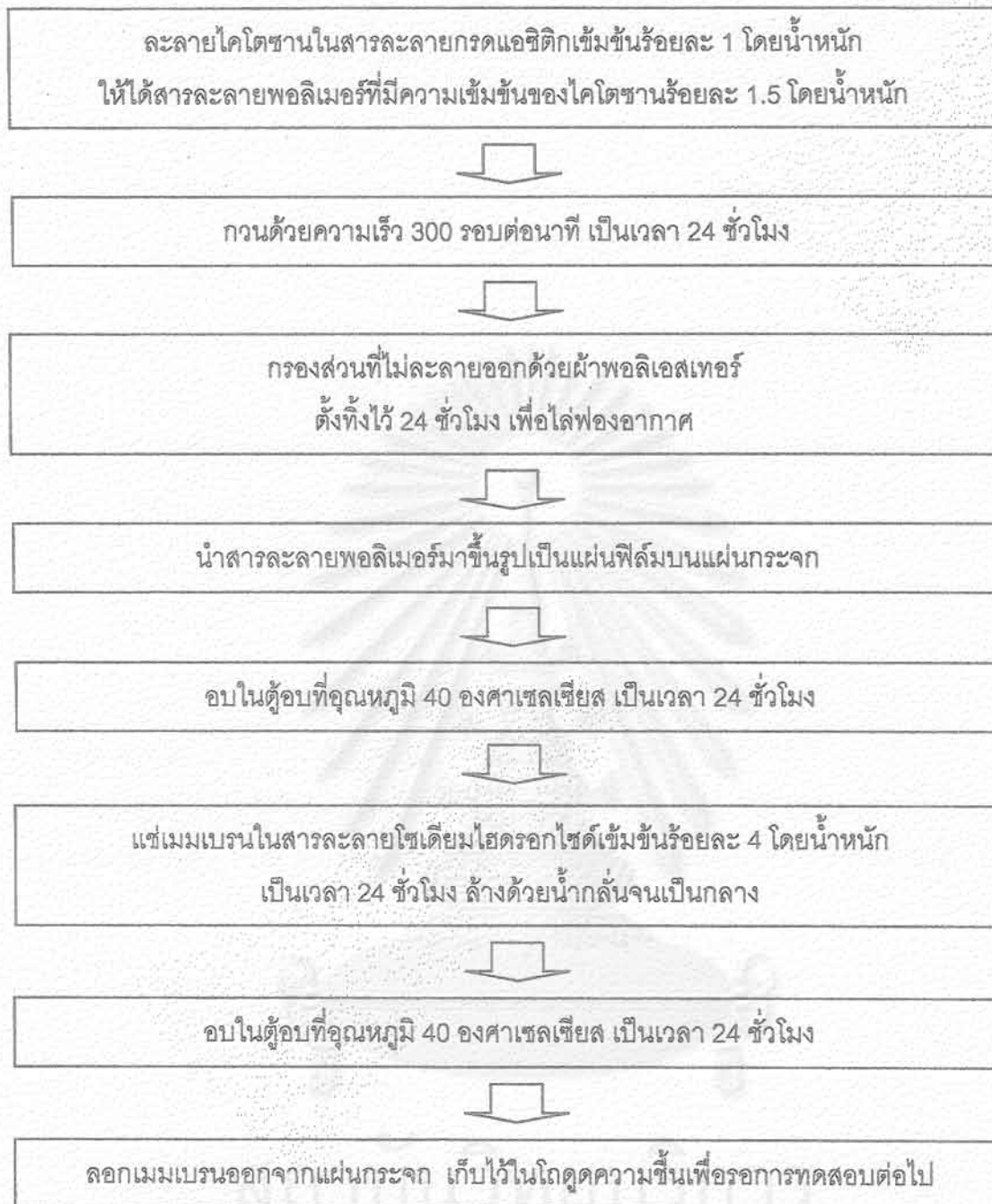
### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. Scanning Electron Microscope: Jeol JSM 6400
2. Gel Permeation Chromatography: Polymer Laboratories GPC11
3. Universal Testing Machine : LLOYD Instruments LR 5K
4. Differential Scanning Calorimeter: TA Instrument 2200

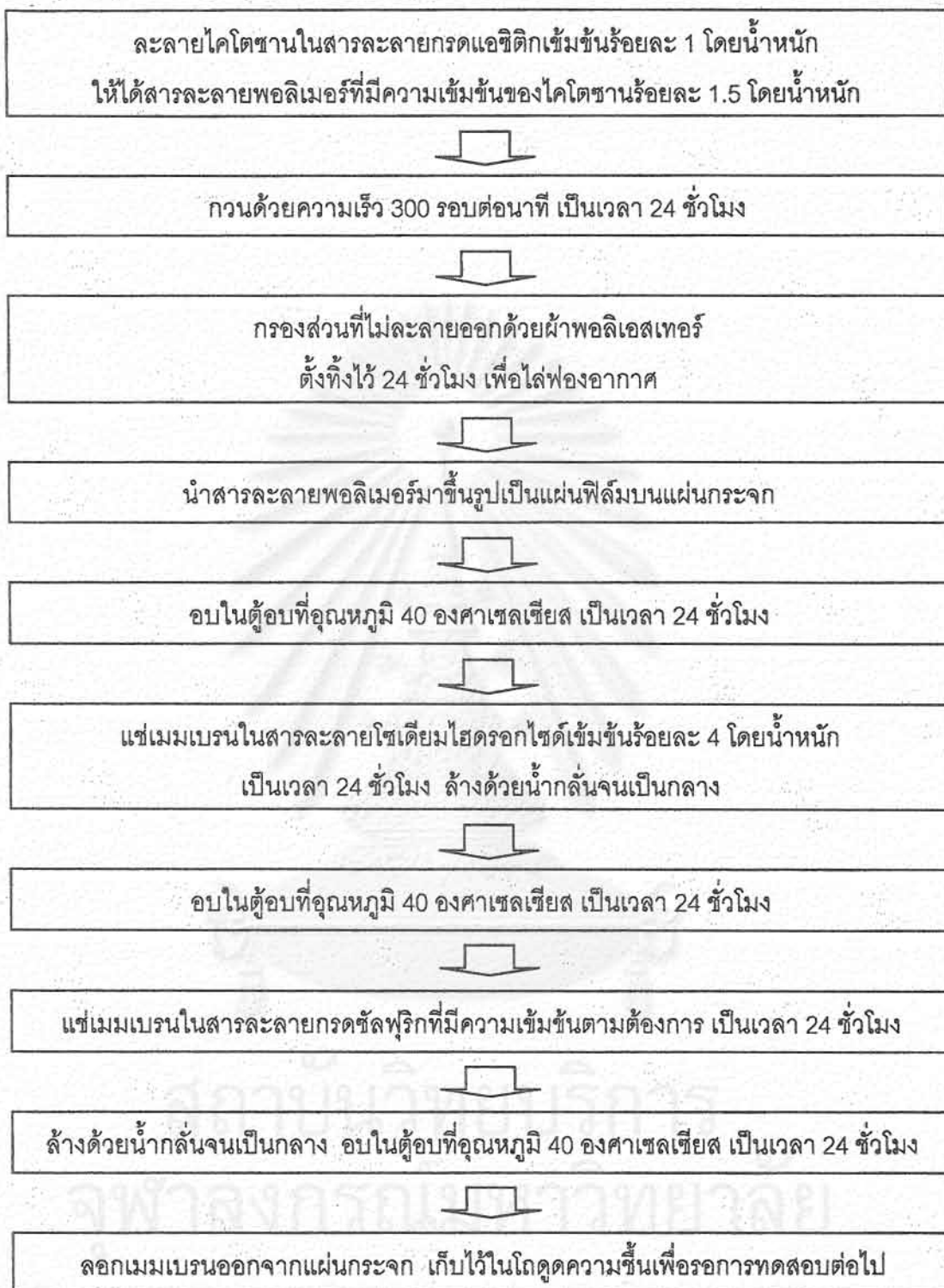
### 3.4 การดำเนินการวิจัย

#### 3.4.1 วิธีการเตรียมเมมเบรนเพื่อใช้ในการศึกษา

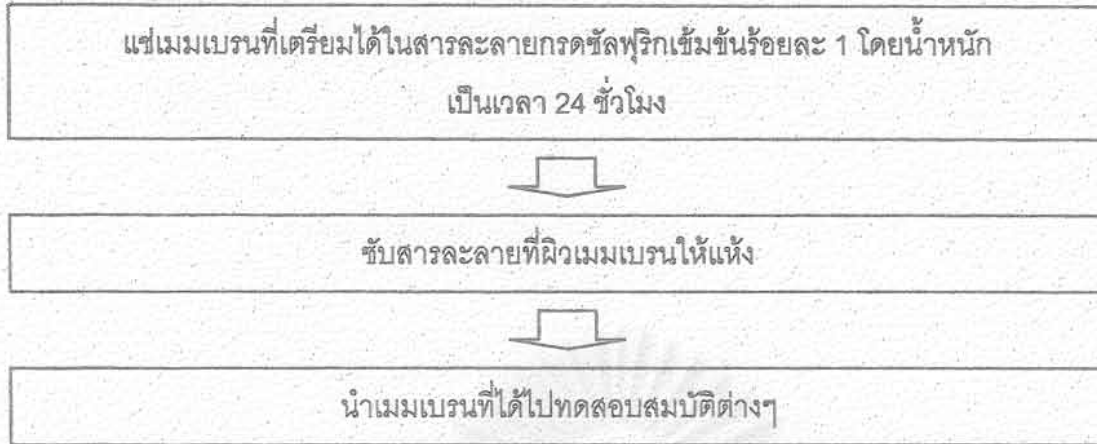
วิธีการเตรียมเมมเบรนโคโตซานแสดงดังรูปที่ 3.1 วิธีการเตรียมเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายโดยใช้กรดซัลฟูริกเป็นสารเชื่อมโยงแสดงดังรูปที่ 3.2 วิธีการเตรียมเมมเบรนประเภท Doped membrane แสดงดังรูปที่ 3.3 และวิธีการเตรียมเมมเบรน Alginate แสดงดังรูปที่ 3.4



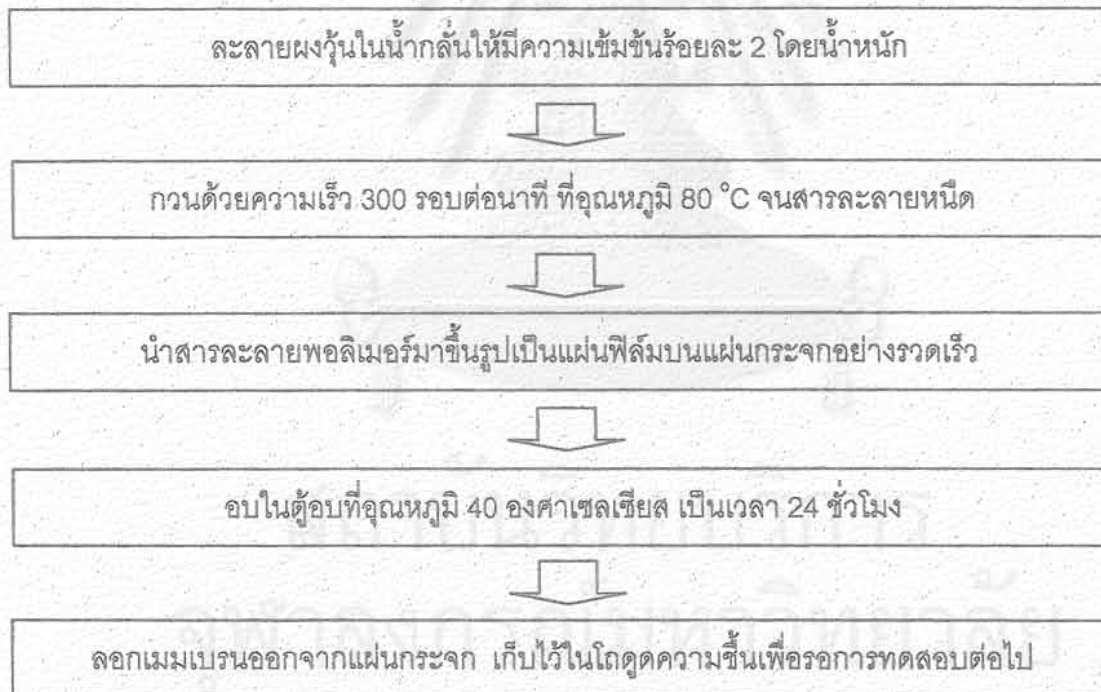
รูปที่ 3.1 แผนภาพวิธีการเตรียมเมมเบรนโคโตนานโน



รูปที่ 3.2 แผนภาพวิธีการเตรียมเมมเบรนโคโตนานที่ถูกทำให้เกิดโครงสร้างตาข่าย โดยใช้กรดซัลฟูริกเป็นสารเชื่อมขวาง



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงวิธีการเตรียม Dope Membrane



รูปที่ 3.4 แผนภาพวิธีการเตรียมเมมเบรน Alginate

### 3.4.2 การหาค่าร้อยละของการกำจัดหมู่แอมซิติล [35]

แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

#### ก) การเตรียมอนุพันธ์โคโตซานคลอไรด์

1. ละลายโคโตซาน 2.5 กรัม ในสารละลายกรดแอมซิติลเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก 200-400 มิลลิลิตร (ขึ้นอยู่กับความหนืดของสารละลาย) กวนด้วยเครื่องกวนที่ความเร็วรอบสูง เป็นเวลา 15 นาที
2. กรองส่วนที่ไม่ละลายออกด้วยผ้าพอลิเอสเทอร์
3. เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นช้าๆ ประมาณ 18 มิลลิลิตร โดยขณะเติมต้องกวนด้วยความเร็วรอบสูง กวนต่อไปจนโคโตซานคลอไรด์ตกตะกอนหมด ระหว่างการเติมกรดไฮโดรคลอริกอุณหภูมิของสารละลายจะเพิ่มขึ้นประมาณ 6 องศาเซลเซียส
4. กรองตะกอนออกด้วยผ้าพอลิเอสเทอร์ ล้างตะกอนด้วยเมธานอลจนไม่มีคลอไรด์อิสระเหลืออยู่ โดยทดสอบได้ด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งการล้างด้วยเมธานอลจะต้องทำประมาณ 5-6 ครั้ง
5. อบตะกอนของอนุพันธ์โคโตซานคลอไรด์ในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาข้ามคืน อนุพันธ์โคโตซานคลอไรด์ที่ได้จะมีสีน้ำตาลอ่อน

#### ข) การไตเตรตอนุพันธ์โคโตซานคลอไรด์

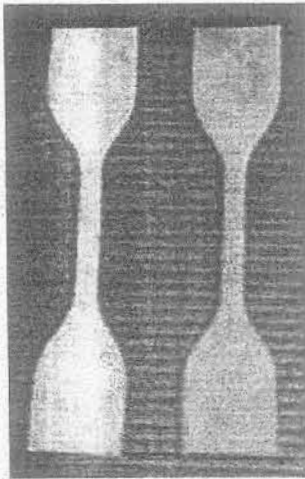
1. ละลายอนุพันธ์โคโตซานคลอไรด์ 1 กรัม ในน้ำกลั่น เจือจางจนมีปริมาตร 250 มิลลิลิตร
2. ปิเปตสารละลายอนุพันธ์โคโตซานคลอไรด์เจือจางในข้อ (1) ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.0876 โมลาร์ โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์
3. บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณร้อยละของการกำจัดหมู่แอมซิติลของโคโตซานโดยใช้สมการที่ 3.1

$$\text{degree of deacetylation} = \left( \frac{\text{amount of monomer having } -\text{NH}_2 \text{ group}}{\text{total amount of monomer}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

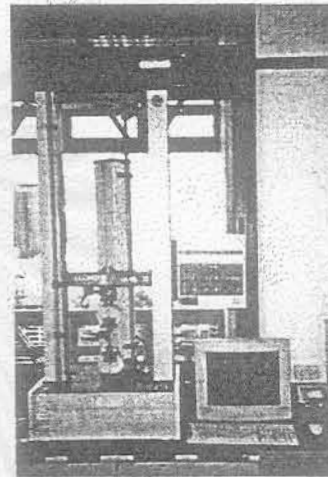
### 3.4.3 ความสามารถทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และความสามารถในการยืดตัวสูงสุด (Ultimate elongation)

มีขั้นตอนดังนี้ คือ

1. ตัดเมมเบรนให้มีลักษณะดังรูปที่ 3.5
2. วัดความหนาของเมมเบรนด้วยไมโครมิเตอร์
3. ทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ชิ้นตัวอย่างสำหรับการวัดความสามารถทนต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดตัวสูงสุด



รูปที่ 3.6 เครื่อง Universal tester LLOYD Instruments LR 5K

### 3.4.4 ร้อยละการดูดซับน้ำ (Water content)

มีขั้นตอนดังนี้คือ

1. ชั่งน้ำหนักของเมมเบรนแห้ง
2. แช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. นำเมมเบรนมาซับน้ำที่ผิวหน้าเมมเบรนออกให้แห้งด้วยกระดาษซับ แล้วชั่งน้ำหนักอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำในเมมเบรน
4. นำค่าน้ำหนักของเมมเบรนแห้งและหลังการดูดซับน้ำมาคำนวณค่าการดูดซับน้ำตามสมการที่ 3.2 ดังนี้

$$\% \text{ Water content} = \frac{(\text{Weight of wet membrane} - \text{Weight of dried membrane})}{\text{Weight of dried membrane}} \times 100 \quad (3.2)$$

### 3.4.5 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา (Thickness change)

มีขั้นตอนดังนี้คือ

1. วัดความหนาของเมมเบรนแห้งด้วยไมโครมิเตอร์
2. แช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. นำเมมเบรนมาซับน้ำที่ผิวหน้าเมมเบรนออกให้แห้งด้วยกระดาษซับ แล้ววัดความหนาของเมมเบรนอย่างรวดเร็ว
4. นำค่าความหนาที่ได้มาคำนวณค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงความหนาตามสมการที่ 3.3

$$\% \text{Thickness change} = \frac{(\text{Thickness of wet membrane} - \text{Thickness of dried membrane})}{\text{Thickness of dried membrane}} \times 100 \quad (3.3)$$

### 3.4.6 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange capacity)

มีขั้นตอนดังนี้คือ

1. ชั่งเมมเบรนแห้งให้มีน้ำหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม
2. แช่เมมเบรนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.005 นอร์มอล ปริมาณ 20 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยกวนตลอดเวลา
3. ปิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ข้างต้นมาไตเตรตกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.005 นอร์มอล โดยจุดยุติจะมีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7
4. คำนวณค่าความสามารถแลกเปลี่ยนไอออนตามสมการที่ 3.4

$$\text{Ion exchange capacity [meq/g]} = \frac{\left( N_1 V_1 - \left( \frac{V_1}{V_3} \right) N_2 V_2 \right)}{m} \quad (3.4)$$

### 3.4.7 มวลโมเลกุลเฉลี่ยของไคโตแซน (Average molecular weight of chitosan)

มวลโมเลกุลเฉลี่ยของไคโตซานสามารถหาได้โดยเครื่อง Gel Permeation Chromatography (GPC)

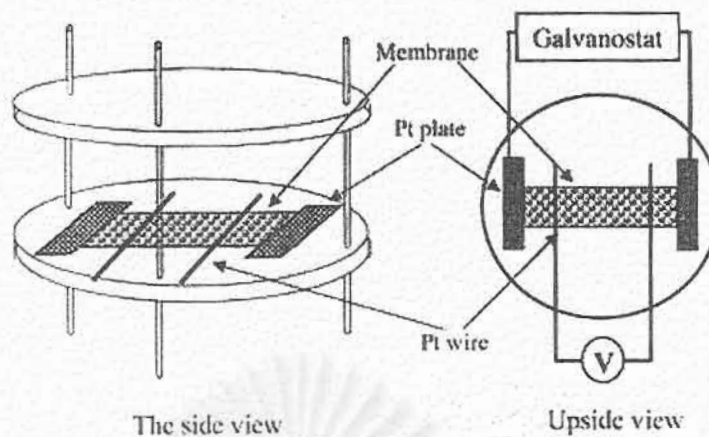


### 3.4.8 การวัดค่าการนำไฟฟ้า

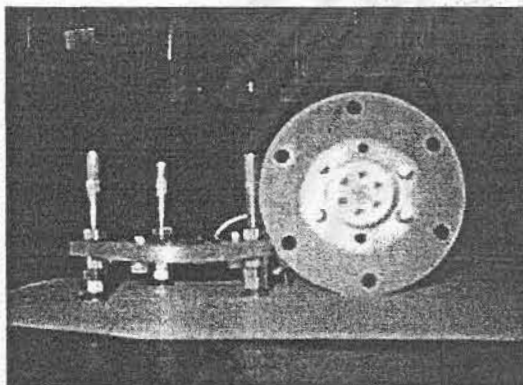
การวัดค่าความนำไฟฟ้าทำโดยวิธี Four probe method ดังรูปที่ 3.7

1. ตัดเมมเบรนให้มีขนาด 1x4 เซนติเมตร
2. วางเมมเบรนบนเซลล์วัดความนำไฟฟ้างดรูปที่ 3.8 โดยให้เมมเบรนอยู่บนลวดแพลทินัมทั้งสอง
3. วางแผ่นแพลทินัมที่ขนาด 1x2.5 เซนติเมตร บนปลายทั้งสองข้างของเมมเบรน
4. ประกอบเซลล์วัดความนำไฟฟ้าเข้าด้วยกัน ชั้นสกรูให้สัมผัสกับแผ่นแพลทินัมทั้ง 4 จุด ต่อสายไฟที่ขั้วทั้งสอง
5. บรรจุเซลล์เข้าสู่ชุดวัดค่าการนำไฟฟ้างดรูปที่ 3.9 ปิดฝาของชุดเครื่องมือและต่อเข้ากับระบบวัดค่าการนำไฟฟ้างดรูปที่ 3.10
6. ใส่ชุดวัดความนำไฟฟ้าเข้าในตู้อบ ณ อุณหภูมิที่ต้องการทดสอบ
7. บ้อนแก๊สไฮโดรเจนที่ผ่านระบบควบคุมความชื้นเข้าสู่ชุดวัดความนำไฟฟ้า โดยตั้งอุณหภูมิของระบบควบคุมความชื้นให้สูงกว่าอุณหภูมิของชุดวัดความนำไฟฟ้า 10 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการควบแน่นของไอน้ำในทางเดินแก๊สไฮโดรเจน
8. ต่อชุดวัดความนำไฟฟ้าเข้ากับเครื่อง Automatic polarization system
9. รอจนความชื้นในชุดวัดความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 100 จึงเริ่มทำการทดลอง
10. บันทึกค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า นำข้อมูลมาเขียนกราฟระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า ความชันของเส้นกราฟจะมีค่าเท่ากับค่าต้านทานของเมมเบรน
11. นำเมมเบรนออกจากชุดวัดความนำไฟฟ้า วัดขนาดของเมมเบรนเพื่อนำมาคำนวณหาขนาดพื้นที่หน้าตัดของเมมเบรน นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาความนำไฟฟ้างดสมการที่ 3.5

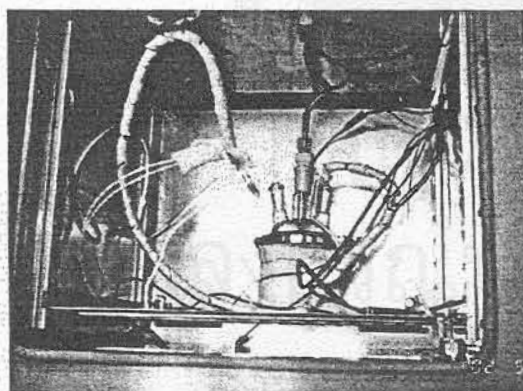
$$\sigma = \frac{1}{R} \left( \frac{l}{A} \right) \quad (3.5)$$



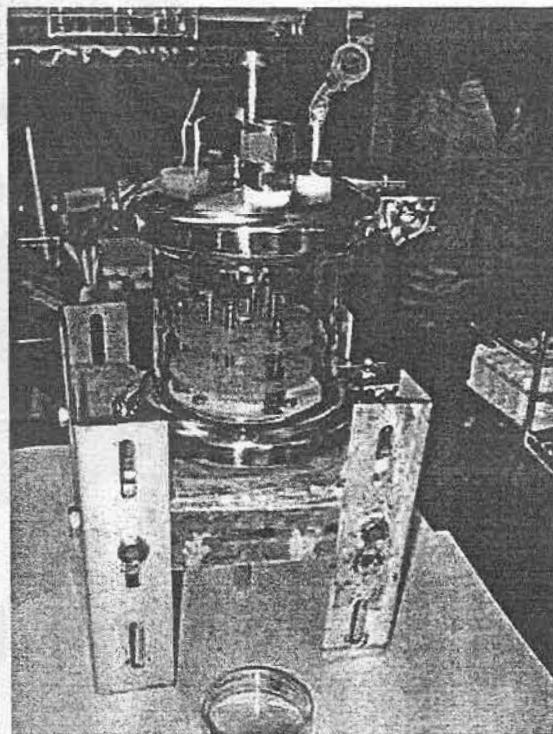
รูปที่ 3.7 การวัดค่าความนำไฟฟ้าด้วยวิธี Four probe method



รูปที่ 3.8 เซลล์วัดค่าการนำไฟฟ้า



รูปที่ 3.10 ระบบวัดค่าการนำไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 ชุดวัดค่าการนำไฟฟ้า

### 3.4.9 การเตรียมอิเล็กโทรด

ในการเตรียมอิเล็กโทรดจะใช้คาร์บอนแปเปอร์เป็นตัวรองรับ แต่เนื่องจากคาร์บอนแปเปอร์มีสมบัติซึมน้ำได้ ซึ่งถ้าอิเล็กโทรดชุ่มน้ำจะมีผลทำให้สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง ดังนั้น ก่อนนำคาร์บอนแปเปอร์ไปใช้เป็นตัวรองรับ จะต้องผ่านการปรับปรุงสมบัติเพื่อไม่ให้ซึมน้ำได้ ดังนี้

1. ตัดคาร์บอนแปเปอร์ให้มีขนาดกว้าง-ยาวด้านละ 6 ซม. แล้วนำไปซังน้ำหนัก
2. จุ่มลงในสารละลายพอลิเตตระฟลูออโรเอธิลีนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 3.11
3. นำคาร์บอนแปเปอร์ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
4. เผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซังน้ำหนัก
5. คำนวณปริมาณของพอลิเตตระฟลูออโรเอธิลีน โดยใช้สมการ 3.6

$$\% \text{ PTFE} = \left( \frac{\text{Weight of carbon paper with PTFE} - \text{Weight of carbon paper}}{\text{Weight of carbon paper with PTFE}} \right) \times 100 \quad (3.6)$$

6. ตัดคาร์บอนแปเปอร์ข้างต้น โดยใช้แผ่นสแตนเลสที่มีขนาดช่อง 5×5 เซนติเมตร เป็นแบบ ซังน้ำหนัก
7. รีดด้วยลูกกลิ้งเพื่อให้ผิวเรียบ
8. พร้อมนำไปเตรียมอิเล็กโทรดต่อไป



รูปที่ 3.11 การจุ่มคาร์บอนแปเปอร์ลงในสารละลายพอลิเตตระฟลูออโรเอธิลีน

ในการเตรียมอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่เท่ากับ A ตารางเซนติเมตร จะใช้สารเคมีต่างๆ ดังนี้

- |   |     |           |
|---|-----|-----------|
| 1. แพลทินัมบนผงคาร์บอนชนิดมีสัดส่วนแพลทินัมร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของคาร์บอน | 4A  | มิลลิกรัม |
| 2. สารละลาย Nafion ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก                         | 20A | มิลลิกรัม |
| 3. สารละลายเฮรัลีนไกลคอลไดเมธิลอีเทอร์                                    | 60A | มิลลิกรัม |
| 4. คาร์บอนที่เคลือบด้วยพอลิเตตระฟลูออโรเอธีลีน                            | 2A  | มิลลิกรัม |

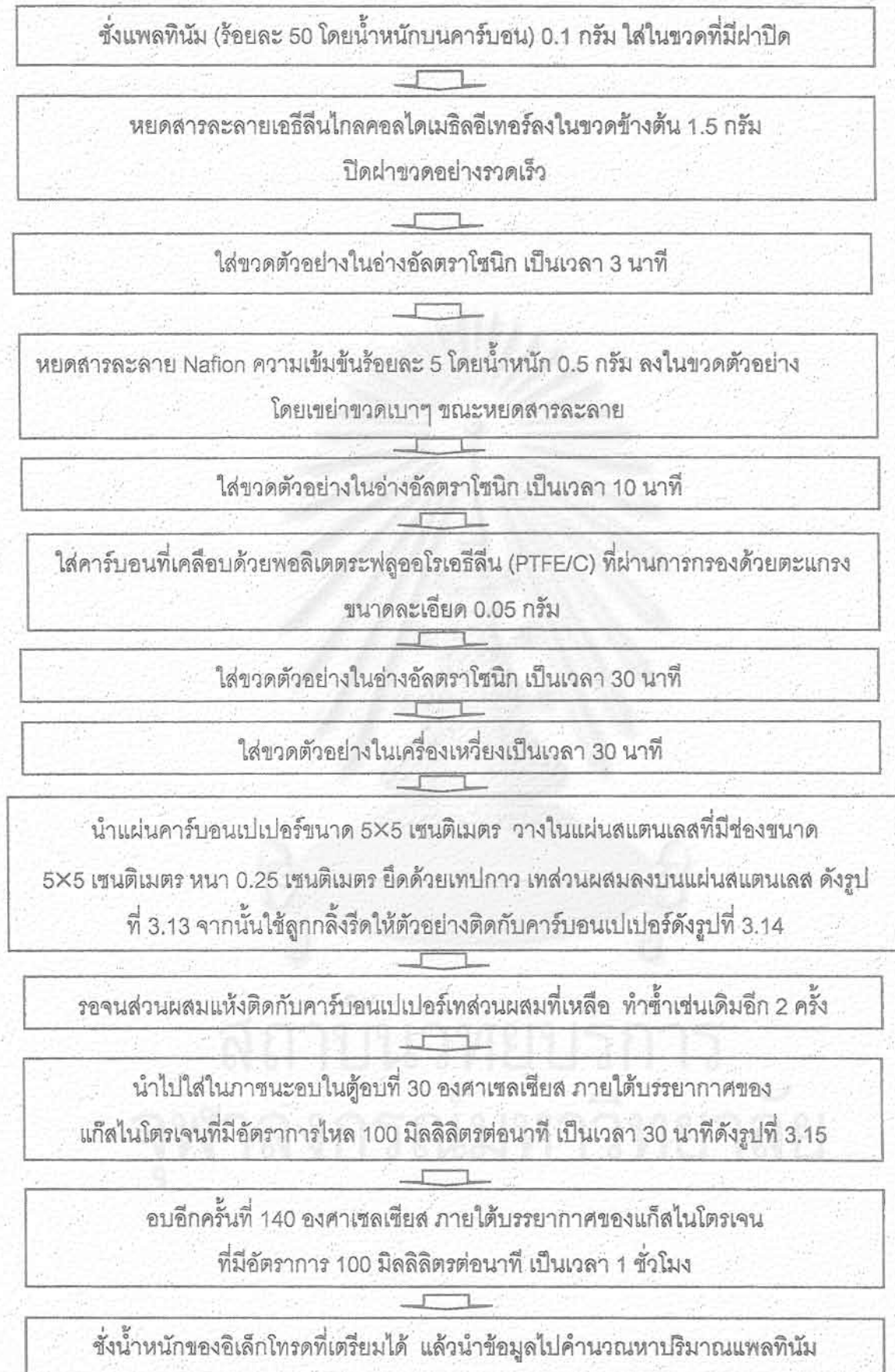
ดังนั้นในการเตรียมอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่เท่ากับ 25 ตารางเซนติเมตร จะใช้สารเคมีต่างๆ ดัง

นี้

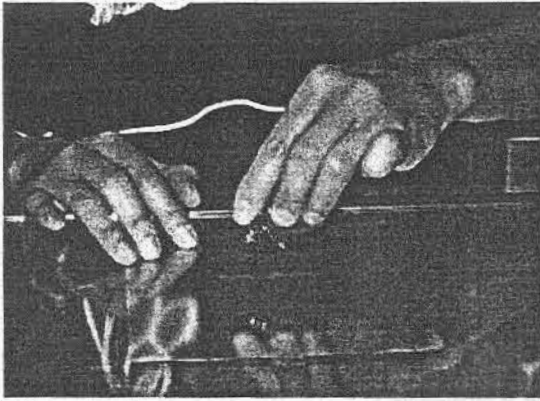
- |   |      |      |
|---|------|------|
| 1. แพลทินัมร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของคาร์บอน         | 0.1  | กรัม |
| 2. สารละลาย Nafion ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก | 0.5  | กรัม |
| 3. สารละลายเฮรัลีนไกลคอลไดเมธิลอีเทอร์            | 1.5  | กรัม |
| 4. คาร์บอนที่เคลือบด้วยพอลิเตตระฟลูออโรเอธีลีน    | 0.05 | กรัม |

โดยมีวิธีการเตรียมอิเล็กโทรด ดังรูปที่ 3.12

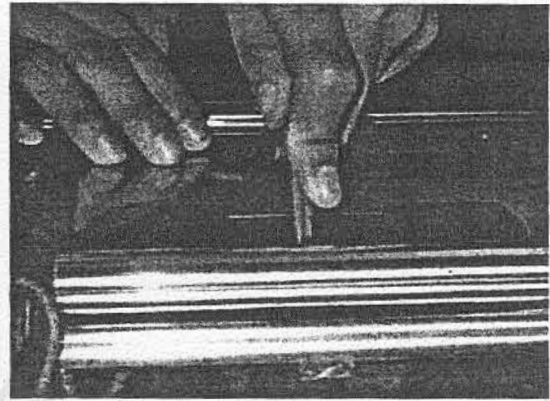
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



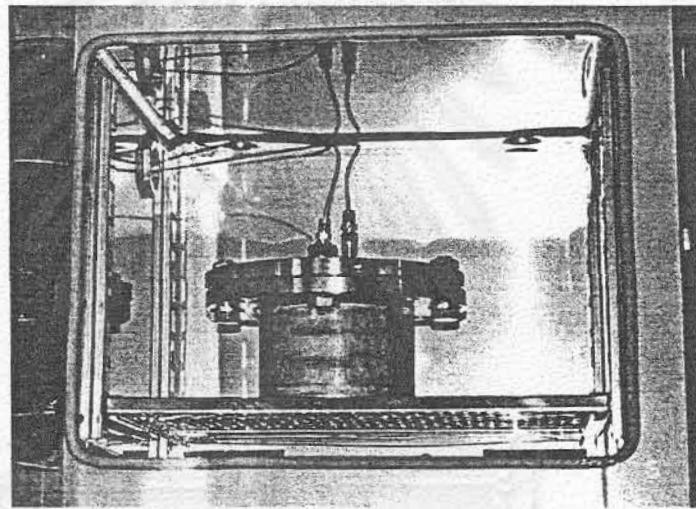
รูปที่ 3.12 วิธีการเตรียมอิเล็กโทรด



รูปที่ 3.13 การเทสวณผลลงบนแผ่นสแตนเลส



รูปที่ 3.14 การใช้ลูกกลิ้งรีดให้ตัวอย่างติดกับคาร์บอนเปเปอร์



รูปที่ 3.15 การอบอิเล็กโทรดในตู้อบ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน

#### 3.4.10 การเตรียม MEA

มีแผนภาพดังรูปที่ 3.16

นำอิเล็กโทรดที่เตรียมได้มาประกบที่ทั้งสองด้านของเมมเบรน นำแผ่นเทปลอนรองที่ด้านนอก  
ระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นทองแดงทั้งสองด้าน ดังรูปที่ 3.17 ยึดแผ่นทองแดงด้วยสกรู



อัดด้วยเครื่องอัดความร้อนดังรูปที่ 3.18 โดยใช้ความดัน 0.78 เมกะปาสคาล ที่อุณหภูมิ 140  
องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโพลีเอทิลีน เป็นเวลา 30 วินาที

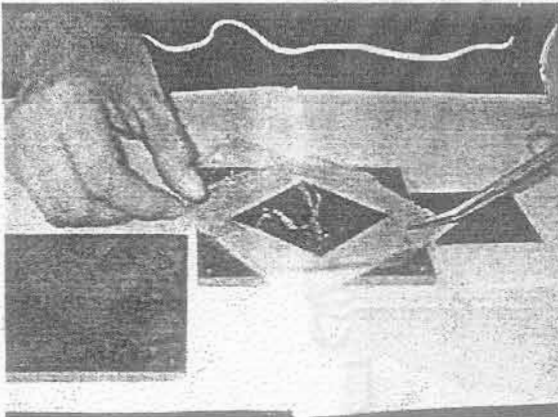


หมุนแผ่นทองแดงทำมุม 180 องศา อัดอีกครั้ง เป็นเวลา 30 วินาที

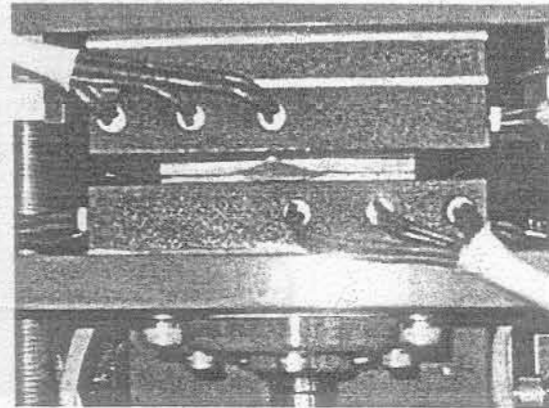


นำชุด MEA ที่เตรียมได้ออกจากเครื่องอัดความร้อน นำมาทดสอบรอยแตกโดยการวัด  
ความต้านทานดังรูปที่ 3.19 หากชุด MEA แตก จะมีค่าความต้านทานเข้าใกล้ศูนย์

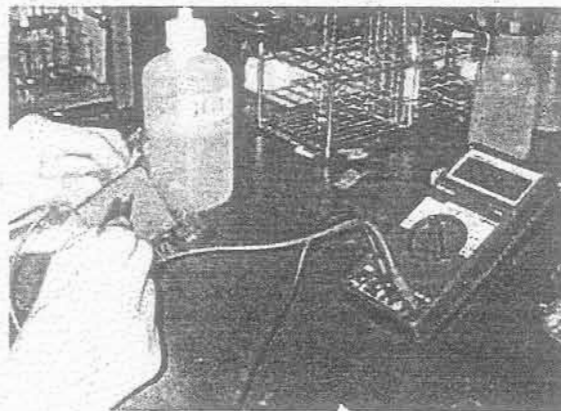
รูปที่ 3.16 แผนภาพการเตรียม MEA



รูปที่ 3.17 การประกบอิเล็กโทรดบนเมมเบรน



รูปที่ 3.18 การอัดเมมเบรนติดกับอิเล็กโทรด  
ด้วยเครื่องอัดความร้อน



รูปที่ 3.19 การทดสอบรอยแตกของเมมเบรนโดยการวัดความต้านทาน

### 3.4.11 การทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

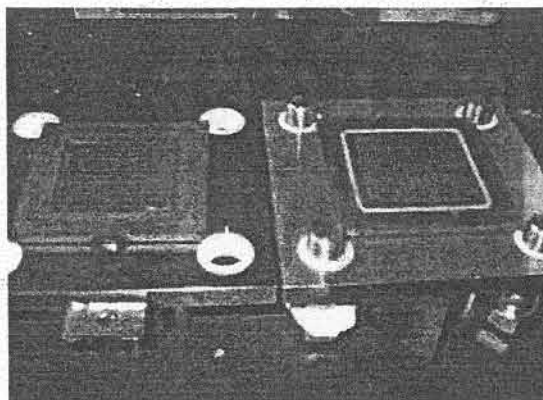
ทดสอบโดยใช้ชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง ทำการทดสอบดังนี้

1. นำ MEA ที่เตรียมได้ประกบกับแผ่น Separator ดังรูปที่ 3.20 ประกอบเป็นเซลล์เชื้อเพลิง
2. ตรวจสอบการลัดวงจร โดยวัดค่าความต้านทานของเซลล์ ดังรูปที่ 3.21 ถ้าเกิดการลัดวงจร ค่าความต้านทานจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์
3. ต่อเซลล์เชื้อเพลิงเข้ากับชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง
4. บ้อนแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนโดยที่มีอัตราการไหลเท่ากับ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งผ่านระบบให้ความชื้น (Humidifier) แล้วเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง คำนวณค่าร้อยละความชื้นจากสมการที่ 3.7 และสมการที่ 3.8

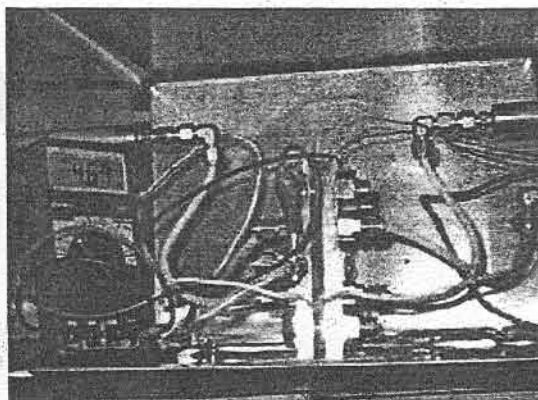
$$f(t) = 2.048 \times 10^{-7} t^3 - 1.056 \times 10^{-4} t^2 + 3.056 \times 10^{-2} t + 0.6767 \quad (3.7)$$

$$\varphi = \varphi' \times 10^{\{f(t') - f(t)\}} \quad (3.8)$$

5. วัดความต่างศักย์ขณะเปิดวงจร
6. แปรผันค่ากระแสไฟฟ้า บันทึกค่าความต่างศักย์
7. นำค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่ได้มาเขียนกราฟ ซึ่งกราฟที่ได้ คือ Polarization curve



รูปที่ 3.20 แผ่น Separator ที่นำมาประกอบเป็นเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 3.21 การทดสอบการลัดวงจร โดยวัดค่าความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิง



## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย

#### 4.1 ร้อยละการกำจัดหมู่แอสเตดิล

โคโตซานที่นำมาใช้เตรียมเมมเบรนมีค่าร้อยละการกำจัดหมู่แอสเตดิลเท่ากับ 67 ซึ่งคำนวณโดยใช้สมการที่ 4.1 และมีค่ามวลโมเลกุลเฉลี่ยเท่ากับ  $5.91 \times 10^5$  ดัลตัน

$$\text{ร้อยละของการกำจัดหมู่แอสเตดิล} = \left( \frac{\text{ปริมาณมอนอเมอร์ที่มีหมู่ NH}_2}{\text{ปริมาณมอนอเมอร์รวม}} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

#### 4.2 ความหนาของเมมเบรน

จากการวัดความหนาของเมมเบรนโคโตซานที่เตรียมได้ พบว่าเมมเบรนโคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายมีความหนาเท่ากับ  $14 \pm 4$  ไมโครเมตร เมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟริกเข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความหนาเท่ากับ  $20 \pm 1$ ,  $19 \pm 2$ ,  $21 \pm 1$ ,  $21 \pm 1$ ,  $20 \pm 1$  และ  $21 \pm 1$  ไมโครเมตรตามลำดับ เมมเบรน Alginate มีความหนาเท่ากับ  $40 \pm 1$  ไมโครเมตร แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความหนาของเมมเบรน

ชนิดของเมมเบรน	ความหนาเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
Uncrosslinked chitosan membrane	$14 \pm 4$
1% Crosslinked chitosan membrane	$20 \pm 1$
2% Crosslinked chitosan membrane	$19 \pm 2$
3% Crosslinked chitosan membrane	$21 \pm 1$
4% Crosslinked chitosan membrane	$21 \pm 1$
5% Crosslinked chitosan membrane	$20 \pm 1$
10% Crosslinked chitosan membrane	$21 \pm 1$
Alginate membrane	$40 \pm 2$

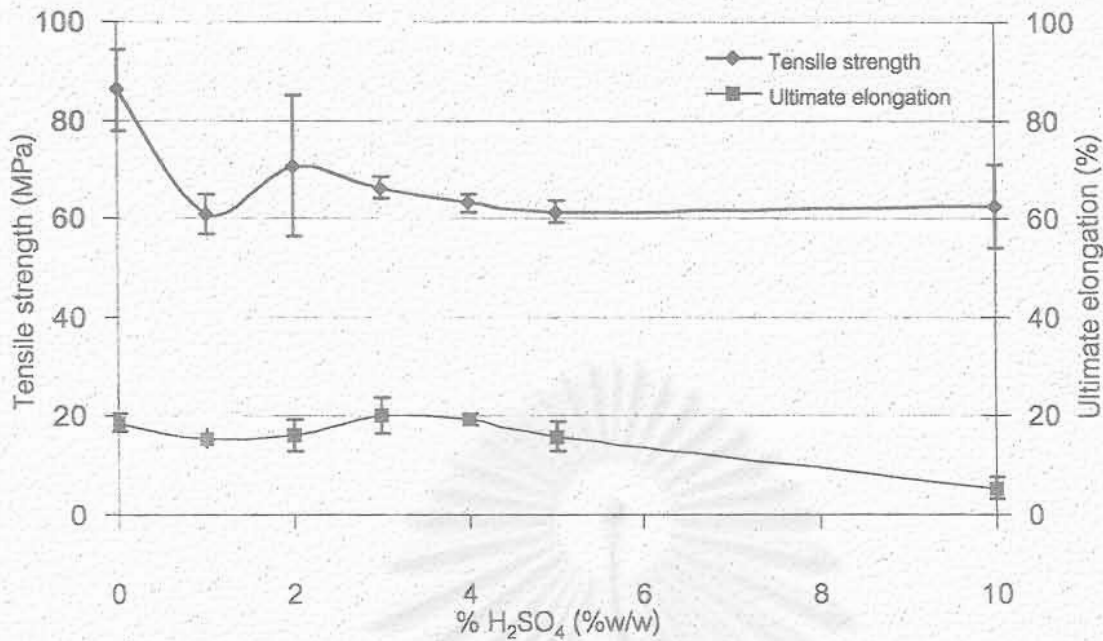
#### 4.3 ความสามารถทนต่อแรงดึง

จากการทดสอบความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนดังตารางที่ 4.2 พบว่าเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายสามารถทนต่อแรงดึงได้  $86.2 \pm 8.2$  เมกะปาสคาล ส่วนเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถทนต่อแรงดึงได้  $60.9 \pm 4.1$ ,  $70.7 \pm 14.4$ ,  $66.3 \pm 2.1$ ,  $63.2 \pm 1.8$ ,  $61.4 \pm 2.2$  และ  $62.2 \pm 8.5$  เมกะปาสคาล ตามลำดับ ส่วนเมมเบรน Alginate สามารถทนต่อแรงดึงได้  $76.3 \pm 5.8$  เมกะปาสคาล

จากรูปที่ 4.1 พบว่า เมมเบรนไคโตซานมีแนวโน้มทนแรงดึงได้ลดลง เมื่อนำเมมเบรนมาทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วกลับมีแนวโน้มทนแรงดึงได้มากขึ้นเมื่อเมมเบรนถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นความทนต่อแรงดึงจะมีค่าลดลงอีกครั้ง เมื่อเมมเบรนถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการที่เมมเบรนถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1, 3, 4, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้เกิดความหนาแน่นโครงร่างตาข่ายที่ไม่เหมาะสม จึงทำให้เกิดความเครียดขึ้นภายในเมมเบรน เมมเบรนจึงจนทนแรงดึงได้น้อยลง ส่วนการทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้เกิดความหนาแน่นโครงร่างตาข่ายในระดับที่เหมาะสม เมมเบรนจึงสามารถทนแรงดึงได้มากขึ้น

ตารางที่ 4.2 ความสามารถทนต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดตัวของเมมเบรน

ชนิดของเมมเบรน	ความทนต่อแรงดึง (MPa)	ความสามารถในการยืด ตัวสูงสุด (%)
Uncrosslinked chitosan membrane	$86.2 \pm 8.2$	$18.7 \pm 1.7$
1% Crosslinked chitosan membrane	$60.9 \pm 4.1$	$15.3 \pm 1.8$
2% Crosslinked chitosan membrane	$70.7 \pm 14.4$	$16.1 \pm 3.4$
3% Crosslinked chitosan membrane	$66.3 \pm 2.1$	$20.2 \pm 3.7$
4% Crosslinked chitosan membrane	$63.2 \pm 1.8$	$19.2 \pm 1.2$
5% Crosslinked chitosan membrane	$61.4 \pm 2.2$	$15.9 \pm 3.0$
10% Crosslinked chitosan membrane	$62.6 \pm 8.5$	$5.4 \pm 2.3$
Alginate membrane	$76.3 \pm 5.8$	$2.4 \pm 4.3$



รูปที่ 4.1 ความสามารถทนต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดตัวสูงสุดของเมมเบรน

#### 4.4 ความสามารถในการยืดตัวสูงสุด

เมื่อนำเมมเบรนอยู่ภายใต้แรงดึง จะทำให้เมมเบรนเกิดการยืดตัว ซึ่งจากการยืดตัวสูงสุดของเมมเบรนแสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า เมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายมีการยืดสูงสุดร้อยละ  $18.7 \pm 1.7$  ส่วนเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการยืดตัวสูงสุดร้อยละ  $15.3 \pm 1.8$ ,  $16.1 \pm 3.4$ ,  $20.2 \pm 3.7$ ,  $19.2 \pm 1.2$ ,  $15.9 \pm 3.0$  และ  $5.4 \pm 2.3$  ตามลำดับ ส่วนเมมเบรน Alginate มีการยืดตัวสูงสุดร้อยละ  $2.4 \pm 4.3$

จากรูปที่ 4.1 พบว่า ค่าการยืดตัวสูงสุดของเมมเบรนสำหรับเมมเบรนที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย และเมมเบรนที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้นจนถึง 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ในกรณีที่เมมเบรนถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 3-10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าการยืดตัวสูงสุดจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้โครงร่างตาข่ายมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เมื่อสายโซ่พอลิเมอร์เกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายกับสารเชื่อมขวาง ความเป็นอิสระและความสามารถเคลื่อนตัวของสายโซ่พอลิเมอร์จะลดลง จึงทำให้เมมเบรนมีการยืดตัวสูงสุดลดลง

#### 4.5 การดูดซับน้ำ

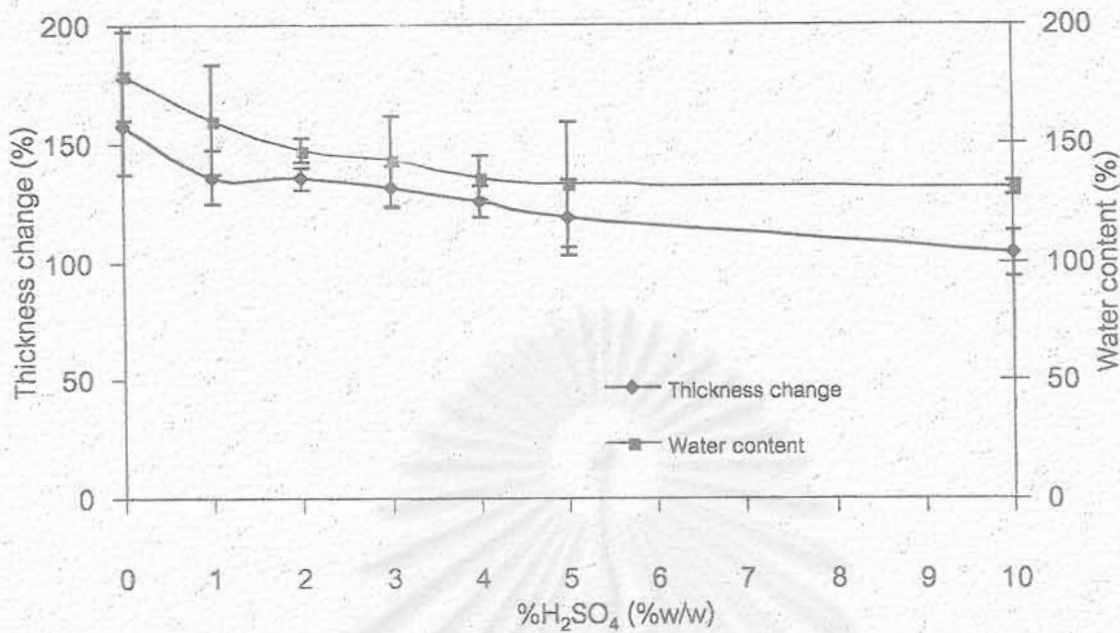
เมื่อนำเมมเบรนมาแช่ในน้ำจนเข้าสู่ภาวะสมดุล ค่าการดูดซับน้ำตามสมการที่ 4.2 พบว่า เมมเบรนไคโตซานมีค่าการดูดซับน้ำร้อยละ  $178.8 \pm 18.7$  เมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าการดูดซับน้ำร้อยละ  $160.1 \pm 23.1$ ,  $147.3 \pm 5.1$ ,  $142.9 \pm 18.9$ ,  $135.6 \pm 9.5$ ,  $132.7 \pm 26.7$ ,  $131.0 \pm 3.1$  ตามลำดับ ส่วนเมมเบรน Alginate มีค่าการดูดซับน้ำร้อยละ  $912.1 \pm 65.9$

$$\text{ร้อยละการดูดซับน้ำ} = \frac{(\text{น้ำหนักเมมเบรนเปียก} - \text{น้ำหนักเมมเบรนแห้ง})}{\text{น้ำหนักเมมเบรนแห้ง}} \times 100 \quad (4.2)$$

จากรูปที่ 4.2 พบว่าค่าการดูดซับน้ำของเมมเบรนมีค่าลดลง เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของกรดที่ทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริกเท่ากับเป็นการเพิ่มความหนาแน่นโครงร่างตาข่ายของไคโตซาน เมื่อความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายของไคโตซานเพิ่มขึ้น สายโซ่พอลิเมอร์ในเมมเบรนจะสามารถเคลื่อนตัวหรือมีความอิสระน้อยลง ทำให้เมมเบรนจะสามารถพองตัวในน้ำได้น้อยลง เมมเบรนจึงมีค่าการดูดซับน้ำน้อยลง

ตารางที่ 4.3 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาและร้อยละการดูดซับน้ำของเมมเบรน

ชนิดของเมมเบรน	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา	ร้อยละการดูดซับน้ำ
Uncrosslinked chitosan membrane	$157.4 \pm 19.8$	$178.8 \pm 18.7$
1% Crosslinked chitosan membrane	$135.8 \pm 11.3$	$160.1 \pm 23.1$
2% Crosslinked chitosan membrane	$135.3 \pm 4.7$	$147.3 \pm 5.1$
3% Crosslinked chitosan membrane	$131.7 \pm 8.7$	$142.9 \pm 18.9$
4% Crosslinked chitosan membrane	$125.5 \pm 6.9$	$135.6 \pm 9.5$
5% Crosslinked chitosan membrane	$119.0 \pm 15.9$	$132.7 \pm 26.7$
10% Crosslinked chitosan membrane	$103.5 \pm 9.5$	$131.0 \pm 3.1$
Alginate membrane	$655.5 \pm 109.0$	$912.1 \pm 65.9$



รูปที่ 4.2 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาและร้อยละการดูดซับน้ำของเมมเบรน

#### 4.6 การเปลี่ยนแปลงความหนาของเมมเบรน

เมื่อนำเมมเบรนมาแช่ในน้ำจนเข้าสู่ภาวะสมดุล คำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาโดยใช้สมการที่ 4.3 พบว่าเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายมีการเปลี่ยนแปลงความหนาร้อยละ  $157.4 \pm 19.8$  เมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการเปลี่ยนแปลงความหนาร้อยละ  $135.8 \pm 11.3$ ,  $135.3 \pm 4.7$ ,  $131.7 \pm 8.7$ ,  $125.5 \pm 6.9$ ,  $119.0 \pm 15.9$  และ  $103.5 \pm 9.5$  ตามลำดับ ส่วนเมมเบรน Alginate มีการเปลี่ยนแปลงความหนาร้อยละ  $655.5 \pm 109.0$  ดังตารางที่ 4.3

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา} = \frac{(\text{ความหนาเมมเบรนเปียก} - \text{ความหนาเมมเบรนแห้ง})}{\text{ความหนาเมมเบรนแห้ง}} \times 100$$

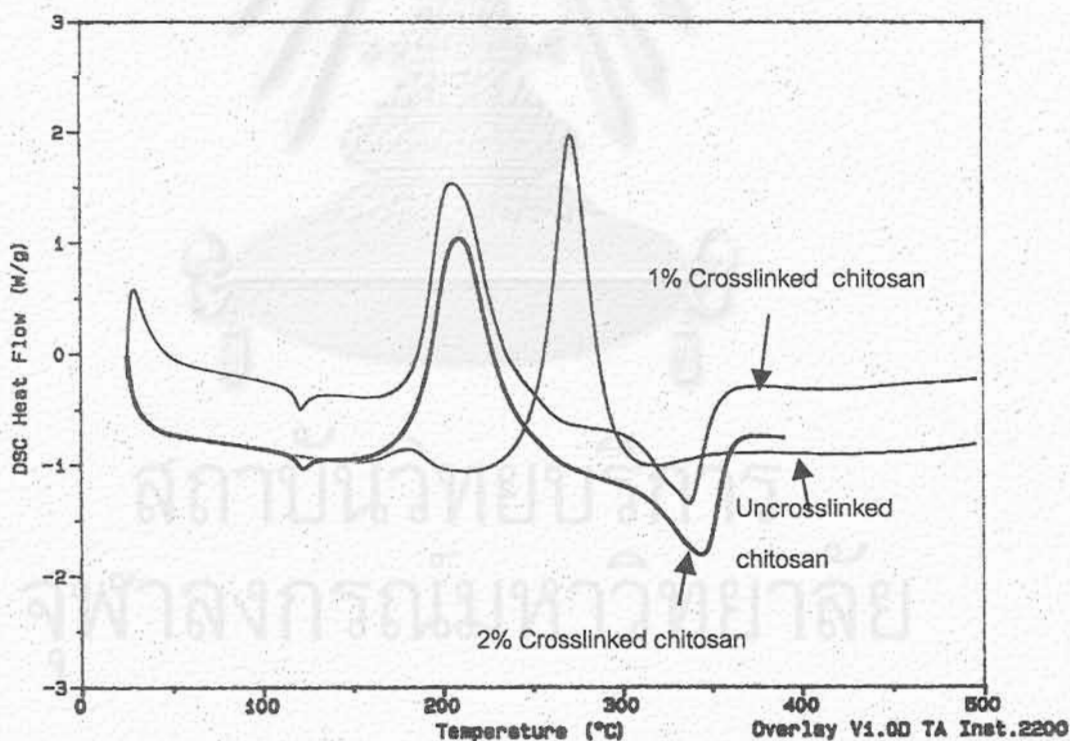
(4.3)

จากรูปที่ 4.2 พบว่าเมมเบรนมีการเปลี่ยนแปลงความหนาลดลง เมื่อเมมเบรนถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น เนื่องจากเมมเบรนมีความหนาแน่นของ

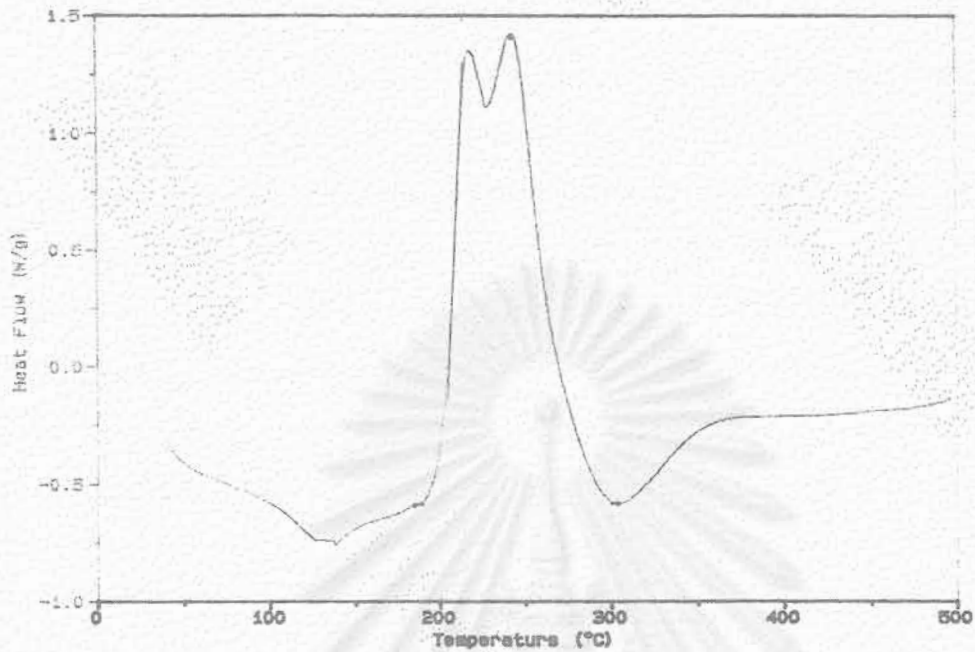
โครงร่างตาข่ายเพิ่มขึ้น ทำให้ความเป็นอิสระและความสามารถในการเคลื่อนตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง จึงทำให้เมมเบรนสามารถพองตัวในน้ำได้น้อยลง

#### 4.7 เสถียรภาพทางความร้อนของเมมเบรน

จากการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของเมมเบรนดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายมีอุณหภูมิเริ่มเกิดการสลายตัว (Decomposition temperature) เท่ากับ 180 องศาเซลเซียส ส่วนเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิเริ่มเกิดการสลายตัวเท่ากับ 120 องศาเซลเซียสเท่ากันทั้งสองชนิด เมมเบรน Alginate มีอุณหภูมิเริ่มเกิดการสลายตัวเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้สามารถระบุได้ว่าเมมเบรนดังกล่าว สามารถพัฒนาเป็นเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีอุณหภูมิในการทำงานไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.3 Thermogram ของเมมเบรนไคโตซาน



รูปที่ 4.4 Thermogram ของเมมเบรน Alginate

#### 4.8 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรน

ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน คำนวณได้โดยใช้สมการที่ 4.4 โดยพบว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรนไคโตซานมีค่าเท่ากับ  $0.94 \pm 0.24$  มิลลิโมลสมมูลต่อกรัมของเมมเบรน เมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ  $2.09 \pm 0.43$ ,  $2.36 \pm 0.21$ ,  $3.52 \pm 0.13$ ,  $4.18 \pm 0.15$ ,  $4.50 \pm 0.42$  และ  $4.57 \pm 0.37$  มิลลิโมลสมมูลต่อกรัมของเมมเบรน ตามลำดับ ส่วนเมมเบรน Alginate มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ  $2.94 \pm 0.17$  มิลลิโมลสมมูลต่อกรัมของเมมเบรน ดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 ในขณะที่เมมเบรน Nafion<sup>®</sup> 117 มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 0.91 มิลลิโมลสมมูลต่อกรัมของเมมเบรน

$$\text{Ion exchange capacity [mq/g]} = \frac{N_1 V_1 - \left( \frac{V_1}{V_3} \right) N_2 V_2}{m} \quad (4.4)$$

เมื่อ

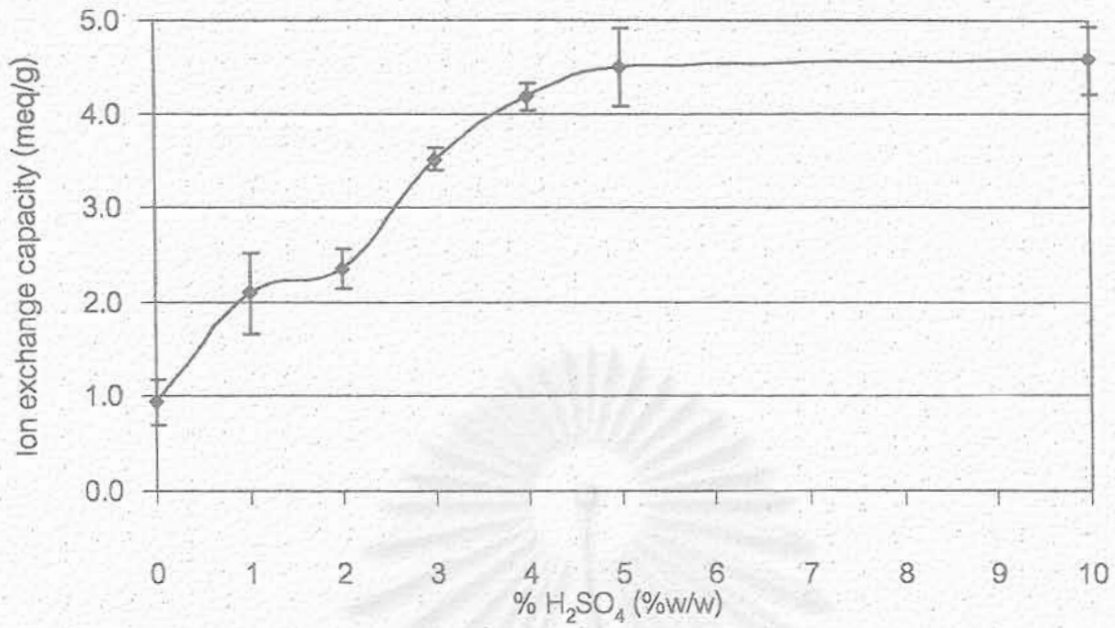
 $N_1$  = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (นอร์มอล) $N_2$  = ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (นอร์มอล) $V_1$  = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร) $V_2$  = ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร) $V_3$  = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ปีเปตมาไตเตรตกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร) $m$  = น้ำหนักของเมมเบรน (กรัม)

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรนไคโตซานอาจเกิดจากภายในหน่วยย่อยของสายโซ่พอลิเมอร์ของไคโตซานมีหมู่ไฮดรอกซิล หมู่อะมิโนและหมู่แอเซทิลที่หลุดจากปฏิกิริยาการกำจัดหมู่แอเซทิล ซึ่งหมู่ฟังก์ชันทั้งสามชนิดนั้นเป็นหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะขั้วทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ ส่วนเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก หมู่อะมิโนจะเกิดปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกกลายเป็นหมู่  $-NH_3^+$  โดยระหว่างหมู่  $-NH_3^+$  ทั้ง 2 หมู่จะถูกเชื่อมโยงด้วยหมู่  $-SO_4^{2-}$  ดังรูปที่ 4.6 ทำให้เมมเบรนที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นมากกว่ามีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่า และจากการทดลองค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรนทุกชนิดมีค่าสูงกว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของ Nafion<sup>®</sup> 117 ทำให้ระบุได้ว่าเมมเบรนที่เตรียมได้มีศักยภาพในการนำมาศึกษาและพัฒนาเป็นเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนต่อไป

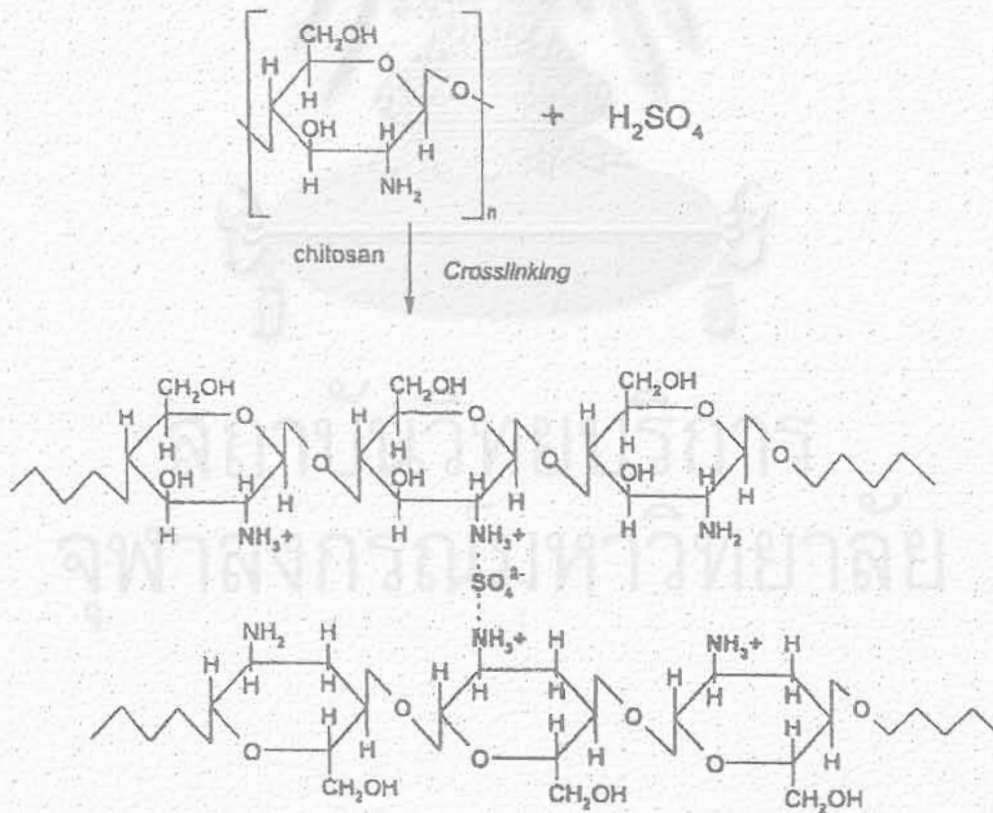
ตารางที่ 4.4 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรน

ชนิดของเมมเบรน	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (meq/g)
Uncrosslinked chitosan membrane	$0.94 \pm 0.24$
1% Crosslinked chitosan membrane	$2.09 \pm 0.43$
2% Crosslinked chitosan membrane	$2.36 \pm 0.21$
3% Crosslinked chitosan membrane	$3.52 \pm 0.13$
4% Crosslinked chitosan membrane	$4.18 \pm 0.15$
5% Crosslinked chitosan membrane	$4.50 \pm 0.42$
10% Crosslinked chitosan membrane	$4.57 \pm 0.37$
Alginate membrane	$2.94 \pm 0.17$





รูปที่ 4.5 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรน



รูปที่ 4.6 โครงสร้างโมเลกุลของไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริก

#### 4.9 ความนำไฟฟ้าของเมมเบรน

ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนคำนวณโดยใช้สมการที่ 4.5

$$\sigma = \frac{1}{R} \left( \frac{l}{A} \right) \quad (4.5)$$

เมื่อ  $\sigma$  = ความนำไฟฟ้า (โอห์ม/เซนติเมตร)

$R$  = ความต้านทาน (โอห์ม)

$l$  = ระยะระหว่างลวดแพลตินัม (เซนติเมตร)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของเมมเบรน (ตารางเซนติเมตร)

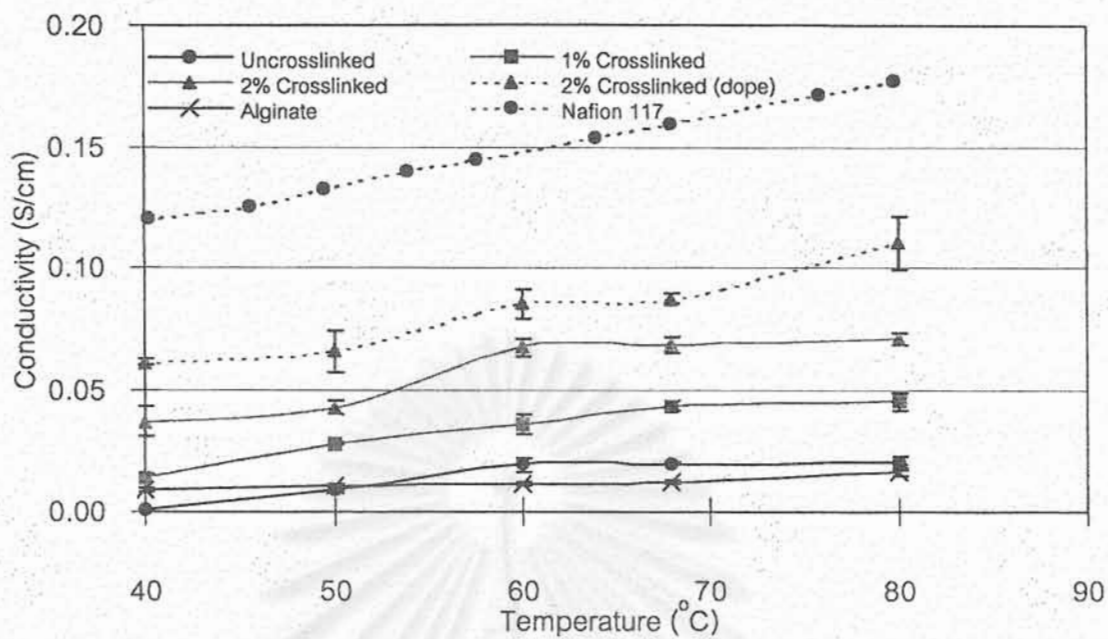
จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.7 พบว่า เมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย เมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแล้ว Dope ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ทำการทดลองเพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนประเภทนี้เกิดจากสองกลไก คือ การนำไฟฟ้าโดยการถ่ายเทโปรตอนผ่านตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางของโซพอลิเมอร์ในเมมเบรน และการถ่ายเทโปรตอนผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์กรดซัลฟูริกที่บรรจุภายในโครงสร้างของเมมเบรน กล่าวได้ว่าตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางของโซพอลิเมอร์ในเมมเบรนช่วยให้การถ่ายโอนโปรตอนในเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกดีขึ้นกว่าเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายเล็กน้อย แต่สารละลายอิเล็กโทรไลต์กรดซัลฟูริกภายในโครงสร้างของเมมเบรนมีบทบาทต่อการถ่ายโอนโปรตอนอย่างมากจนทำให้เส้นกราฟเมื่อพลอตแบบอาร์เรเนียสในรูปที่ 4.8 ของเมมเบรนประเภทนี้เกือบเป็นเส้นตรงตลอดช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา เมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้ว Dope ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะมีค่าความนำไฟฟ้าสูงกว่าเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายตามลำดับ โดยให้ค่าความนำไฟฟ้าสูงสุดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าความนำไฟฟ้าของเมมเบรน Nafion<sup>®</sup> 117 ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

กราฟแบบอาร์เรเนียส (Arrhenius plots) ในรูปที่ 4.8 ของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแล้ว Dope ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เกือบเป็นเส้นตรงมีพลังงานกระตุ้นของกลไกการเคลื่อนที่ (Transfer mechanism) ต่ำที่สุดเท่ากับ 13.8 กิโลจูล/โมล เมื่อเทียบกับ 9.1 กิโลจูล/โมล ของเมมเบรน Nafion<sup>®</sup> 117 สรุปได้ว่ามีเพียงเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแล้ว Dope ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเท่านั้น ที่น่าสนใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง

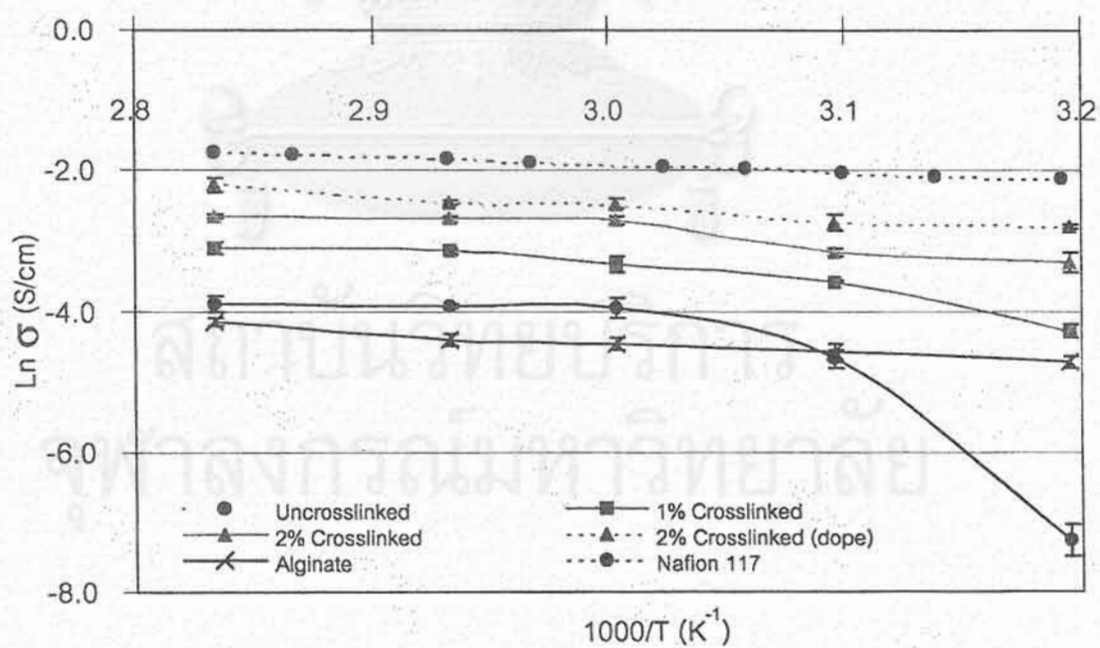
ตารางที่ 4.5 ค่าความนำไฟฟ้าของเมมเบรน ณ อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความนำไฟฟ้า (S/cm)				
	Uncrosslinked chitosan	1% Crosslinked chitosan	2% Crosslinked chitosan	2% Crosslinked chitosan (dope)	Alginate
40	0.0007 ± 0.0002	0.0138 ± 0.0013	0.0369 ± 0.0058	0.0611 ± 0.0012	0.0089 ± 0.0008
50	0.0093 ± 0.0012	0.0279 ± 0.0004	0.0424 ± 0.0028	0.0656 ± 0.0083	0.0102 ± 0.0014
60	0.0192 ± 0.0026	0.0357 ± 0.0042	0.0671 ± 0.0039	0.0851 ± 0.0059	0.0116 ± 0.0009
68	0.0199 ± 0.0006	0.0433 ± 0.0021	0.0683 ± 0.0031	0.0872 ± 0.0021	0.0122 ± 0.0012
80	0.0204 ± 0.0023	0.0452 ± 0.0035	0.0706 ± 0.0027	0.1105 ± 0.0110	0.0159 ± 0.0009

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรน ณ อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.8 การพลอตแบบอาร์เรเนียสของเมมเบรน ณ อุณหภูมิต่างๆ

#### 4.10 ร้อยละ PTFE ในคาร์บอนเปเปอร์

ในการเตรียมอิเล็กโทรดจะใช้คาร์บอนเปเปอร์เป็นตัวรองรับ แต่เนื่องจากคาร์บอนเปเปอร์มีสมบัติซึมน้ำได้ ซึ่งถ้าอิเล็กโทรดชุ่มน้ำจะมีผลทำให้สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง ดังนั้น ก่อนนำคาร์บอนเปเปอร์ไปใช้เป็นตัวรองรับ จะต้องผ่านการปรับปรุงสมบัติเพื่อไม่ให้ซึมน้ำได้โดยการจุ่มลงในสารละลาย PTFE ที่มีความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งปริมาณร้อยละ PTFE ในคาร์บอนเปเปอร์คำนวณจากสมการที่ 4.6 มีค่าร้อยละ PTFE ในคาร์บอนเท่ากับ  $23.68 \pm 1.00$

ร้อยละ PTFE ในคาร์บอนเปเปอร์ =

$$\left( \frac{\text{น้ำหนักคาร์บอนเปเปอร์ที่มี PTFE} - \text{น้ำหนักคาร์บอนเปเปอร์}}{\text{น้ำหนักคาร์บอนเปเปอร์ที่มี PTFE}} \right) \times 100 \quad (4.6)$$

#### 4.11 ปริมาณแพลตินัมนบนคาร์บอนเปเปอร์

ในการเตรียมอิเล็กโทรด สามารถคำนวณหาปริมาณแพลตินัมนบนคาร์บอนเปเปอร์ได้จากสมการที่ 4.7 ซึ่งจากการคำนวณพบว่าปริมาณแพลตินัมนบนคาร์บอนเปเปอร์เท่ากับ  $0.91 \pm 0.09$  มิลลิกรัม/ตารางเซนติเมตร

ปริมาณแพลตินัมนบนคาร์บอนเปเปอร์ =

$$\left[ \frac{\frac{1}{2} \left( \frac{\text{น้ำหนักอิเล็กโทรด} - \text{น้ำหนักคาร์บอนเปเปอร์ที่มี PTFE}}{\text{น้ำหนักอิเล็กโทรด}} \right)}{\text{พื้นที่อิเล็กโทรด}} \right] \times 100 \quad (4.7)$$

#### 4.12 ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียม MEA

ค่าเริ่มสลายตัวของเมมเบรน จะเป็นจุดเริ่มต้นในการหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียม MEA ซึ่งจากการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการเตรียม MEA ของเมมเบรนทุกชนิด คือ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความดัน 0.78 เมกะปาสคาล

#### 4.13 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

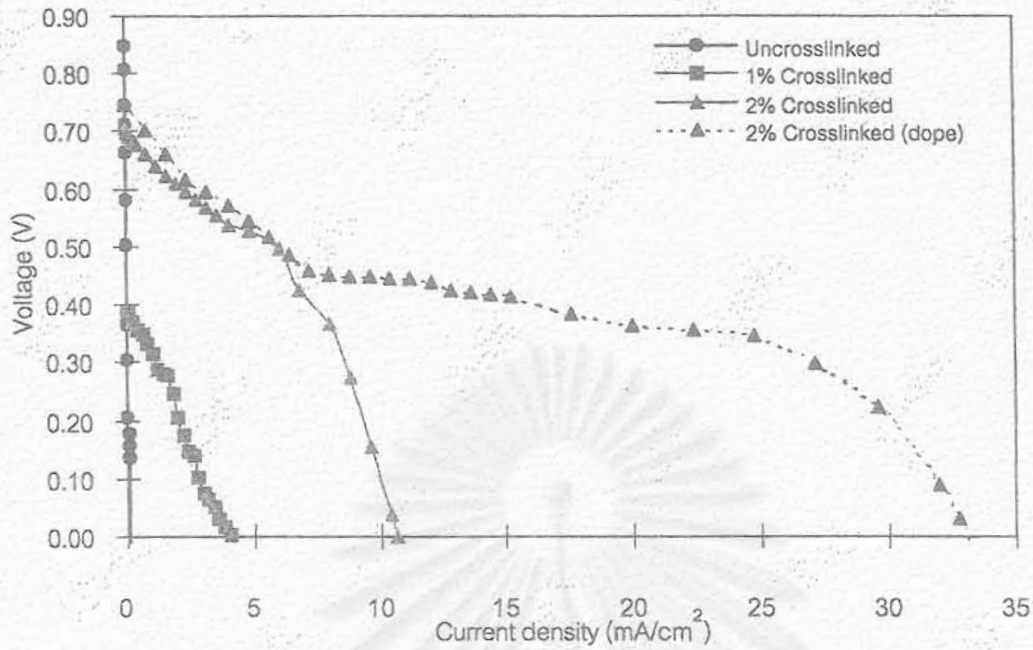
ในการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง โดยป้อนแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนที่มี อัตราการไหลเท่ากับ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งผ่านระบบให้ความชื้นแล้วเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง คำนวณค่าร้อยละความชื้นได้จากสมการที่ 4.8 และ สมการที่ 4.9

$$f(t) = 2.048 \times 10^{-7} t^3 - 1.056 \times 10^{-4} t^2 + 3.056 \times 10^{-2} t + 0.6767 \quad (4.8)$$

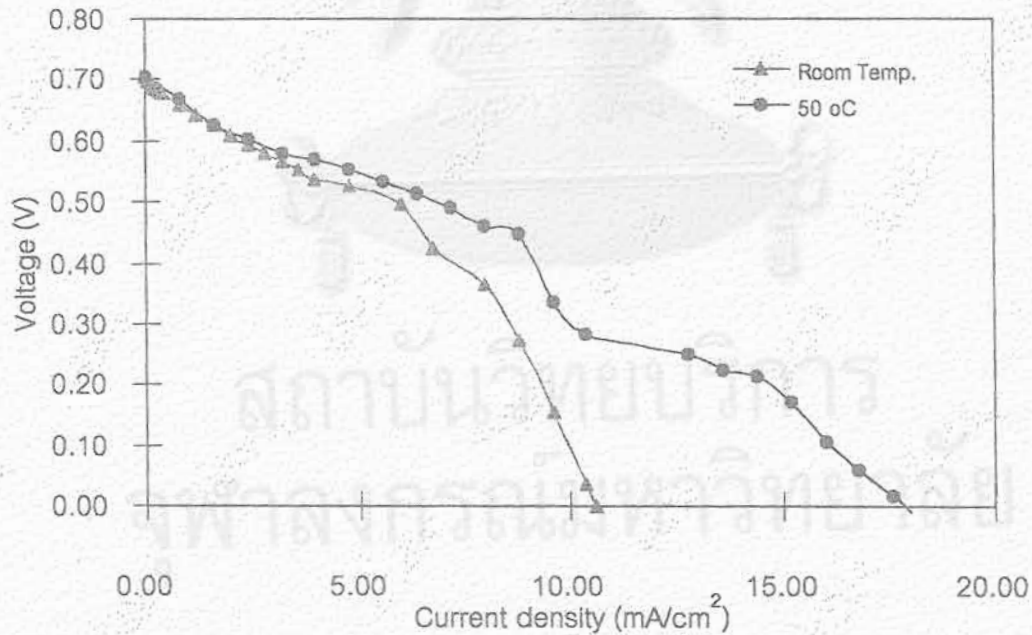
$$\varphi = \varphi' \times 10^{\{f(t') - f(t)\}} \quad (4.9)$$

- เมื่อ  $\varphi$  = Cell humidity (%)  
 $\varphi'$  = Sensor humidity (%)  
 $t$  = Cell temperature (°C)  
 $t'$  = Sensor humidity (°C)

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิห้องจากสูงไปต่ำคือ เมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตามลำดับ ในลักษณะแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าการนำไฟฟ้า ส่วนเมมเบรน Alginate ไม่ได้นำมาทดสอบสมรรถนะเนื่องจากให้ค่าการนำไฟฟ้าต่ำมาก จากการทดสอบสมรรถนะของเมมเบรน เมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าสมรรถนะการทำงานสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้อง ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 Polarization curve ของเซลล์เชื้อเพลิงที่เตรียมจากเมมเบรนชนิดต่างๆ ณ อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.10 Polarization curve ของเซลล์เชื้อเพลิงที่เตรียมจากเมมเบรนไคโดซานที่ถูกทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยการเตรียมเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

#### ก. ร้อยละการกำจัดหมู่แอเซติล

โคโตซานที่นำมาใช้เตรียมเมมเบรนมีค่าร้อยละการกำจัดหมู่แอเซติลเท่ากับ 67 และมีค่ามวลโมเลกุลเฉลี่ยเท่ากับ  $5.91 \times 10^5$  ดาลตัน

#### ข. ความหนาของเมมเบรน

เมมเบรนโคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายมีความหนาเท่ากับ  $14 \pm 4$  ไมโครเมตร เมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความหนาเท่ากับ  $20 \pm 1$ ,  $19 \pm 2$ ,  $21 \pm 1$ ,  $21 \pm 1$ ,  $20 \pm 1$  และ  $21 \pm 1$  ไมโครเมตร ตามลำดับ และเมมเบรน Alginate มีความหนาเท่ากับ  $40 \pm 1$  ไมโครเมตร

#### ค. ความสามารถทนต่อแรงดึง

เมมเบรนโคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายสามารถทนต่อแรงดึงได้  $86.2 \pm 8.2$  เมกะปาสคาล ส่วนเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถทนต่อแรงดึงได้  $60.9 \pm 4.1$ ,  $70.7 \pm 14.4$ ,  $66.3 \pm 2.1$ ,  $63.2 \pm 1.8$ ,  $61.4 \pm 2.2$  และ  $62.2 \pm 8.5$  เมกะปาสคาล ตามลำดับ ส่วนเมมเบรน Alginate สามารถทนต่อแรงดึงได้  $76.3 \pm 5.8$  เมกะปาสคาล โดยการทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้เกิดความหนาแน่นโครงร่างตาข่ายในระดับที่เหมาะสมที่สุด



ง. ความสามารถในการยึดตัวสูงสุด

เมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายมีการยึดสูงสุดร้อยละ  $18.7 \pm 1.7$  ส่วนเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการยึดตัวสูงสุดร้อยละ  $15.3 \pm 1.8$ ,  $16.1 \pm 3.4$ ,  $20.2 \pm 3.7$ ,  $19.2 \pm 1.2$ ,  $15.9 \pm 3.0$  และ  $5.4 \pm 2.3$  ตามลำดับ ส่วนเมมเบรน Alginate มีการยึดตัวสูงสุดร้อยละ  $2.4 \pm 4.3$

จ. การดูดซับน้ำ

เมมเบรนไคโตซานมีค่าการดูดซับน้ำร้อยละ  $178.8 \pm 18.7$  เมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าการดูดซับน้ำร้อยละ  $160.1 \pm 23.1$ ,  $147.3 \pm 5.1$ ,  $142.9 \pm 18.9$ ,  $135.6 \pm 9.5$ ,  $132.7 \pm 26.7$ ,  $131.0 \pm 3.1$  ตามลำดับ ส่วนเมมเบรน Alginate มีค่าการดูดซับน้ำร้อยละ  $912.1 \pm 65.9$  ค่าการดูดซับน้ำของเมมเบรนไคโตซานมีค่าลดลง เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของกรดที่ทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริกเท่ากับเป็นการเพิ่มความหนาแน่นโครงร่างตาข่ายของไคโตซาน เมื่อความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายของไคโตซานเพิ่มขึ้น สายโซ่พอลิเมอร์ในเมมเบรนจะสามารถเคลื่อนตัวหรือมีความอิสระน้อยลง ทำให้เมมเบรนจะสามารถพองตัวในน้ำได้น้อยลง เมมเบรนจึงมีค่าการดูดซับน้ำน้อยลง

ฉ. การเปลี่ยนแปลงความหนาของเมมเบรน

เมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายมีการเปลี่ยนแปลงความหนาร้อยละ  $157.4 \pm 19.8$  เมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการเปลี่ยนแปลงความหนาร้อยละ  $135.8 \pm 11.3$ ,  $135.3 \pm 4.7$ ,  $131.7 \pm 8.7$ ,  $125.5 \pm 6.9$ ,  $119.0 \pm 15.9$  และ  $103.5 \pm 9.5$  ตามลำดับ ส่วนเมมเบรน Alginate มีการเปลี่ยนแปลงความหนาร้อยละ  $655.5 \pm 109.0$  เมมเบรนไคโตซานมีการเปลี่ยนแปลงความหนาลดลง เมื่อเมมเบรนถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น เนื่องจากเมมเบรนมีความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายเพิ่มขึ้น ทำให้ความเป็นอิสระและความสามารถในการเคลื่อนตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง จึงทำให้เมมเบรนสามารถพองตัวในน้ำได้น้อยลง

ข. เสถียรภาพทางความร้อนของเมมเบรน

เมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวเท่ากับ 180 องศาเซลเซียส ส่วนเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวเท่ากับ 120 องศาเซลเซียสเท่ากันทั้งสองชนิด เมมเบรน Alginate มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้สามารถระบุได้ว่าเมมเบรนดังกล่าวสามารถพัฒนาเป็นเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีอุณหภูมิในการทำงานไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส

ข. ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรน

ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรนไคโตซานมีค่าเท่ากับ  $0.94 \pm 0.24$  มิลลิโมลสมมูลต่อกรัมของเมมเบรน เมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ  $2.09 \pm 0.43$ ,  $2.36 \pm 0.21$ ,  $3.52 \pm 0.13$ ,  $4.18 \pm 0.15$ ,  $4.50 \pm 0.42$  และ  $4.57 \pm 0.37$  มิลลิโมลสมมูลต่อกรัมของเมมเบรน ตามลำดับ ส่วนเมมเบรน Alginate มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ  $2.94 \pm 0.17$  มิลลิโมลสมมูลต่อกรัมของเมมเบรน ในขณะที่เมมเบรน Nafion<sup>®</sup> 117 มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 0.91 มิลลิโมลสมมูลต่อกรัมของเมมเบรน ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรนไคโตซานเกิดจากภายในหน่วยย่อยของสายโซ่พอลิเมอร์ของไคโตซานมีหมู่ไฮดรอกซิล หมู่อะมิโนและหมู่แอเซทิลที่เหลื้จากปฏิกิริยาการกำจัดหมู่แอเซทิล ซึ่งทั้งหมู่ฟังก์ชันทั้งสามเป็นหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะขั้วทางไฟฟ้า ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรนไคโตซานเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิล หมู่อะมิโนและหมู่แอเซทิล ที่มีอยู่ภายในหน่วยย่อยของสายโซ่พอลิเมอร์ของไคโตซาน ซึ่งหมู่ฟังก์ชันทั้งสามเป็นหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะขั้วทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ ส่วนเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก หมู่อะมิโนจะเกิดปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกกลายเป็นหมู่  $-NH_3^+$  โดยระหว่างหมู่  $-NH_3^+$  ทั้ง 2 หมู่จะถูกเชื่อมโยงด้วยหมู่  $-SO_4^{2-}$  ทำให้เมมเบรนที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นมากกว่ามีค่า

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่า และจากการทดลองค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรนทุกชนิดมีค่าสูงกว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของ Nafion<sup>®</sup>

ฉ. ความนำไฟฟ้าของเมมเบรน

เมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย เมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแล้ว Dope ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ฉ. ทุกๆอุณหภูมิที่ทำการทดลอง และค่าการนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิที่ทำการทดลองเพิ่มขึ้น เมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแล้ว Dope ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุด ฉ. อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรน Nafion<sup>®</sup> 117 ฉ. อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากการพลอตกราฟแบบอาร์เรเนียนส เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแล้ว Dope ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กราฟเกือบจะเป็นเส้นตรงในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา และมีพลังงานกระตุ้นของกลไกการเคลื่อนที่ (Transfer mechanism) ต่ำที่สุดคือ 13.8 กิโลจูล/โมล จากการศึกษาี้สรุปได้ว่ามีเพียงเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแล้ว Dope ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเท่านั้น ที่น่าสนใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง

ญ. ร้อยละ PTFE ในคาร์บอนเปเปอร์

สามารถเตรียมคาร์บอนเปเปอร์ที่มีค่าร้อยละ PTFE ในคาร์บอนเปเปอร์เท่ากับ  $23.68 \pm 1.00$

ฎ. ปริมาณแพลตินัมบนคาร์บอนเปเปอร์

สามารถเตรียมอิเล็กโทรดที่มีปริมาณแพลตินัมบนคาร์บอนเปเปอร์เท่ากับ  $0.91 \pm 0.09$  มิลลิกรัม/ตารางเซนติเมตร

ฎ. การเตรียม MEA

ภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการเตรียม MEA คืออุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความดัน 0.78 เมกะปาสคาล

ฐ. สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิห้องจากสูงไปต่ำคือ เซลล์เชื้อเพลิงที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตามลำดับ ส่วนเมมเบรน Alginate ไม่ได้นำมาทดสอบสมรรถนะเนื่องจากให้ค่าการนำไฟฟ้าต่ำมาก และสมรรถนะการทำงานของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้อง การศึกษาขั้นสรุปได้ว่าเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักชนิดเดียวเท่านั้น ที่มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ทั้งนี้ควรมีการปรับปรุงให้มีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- ก. ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนที่เตรียมได้มีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าของ Nafion<sup>®</sup> 117 ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของเมมเบรนให้มีค่าสูงขึ้นด้วยการเติมเกลือต่างๆ เช่นเกลือลิเทียม จากแนวความคิดเดียวกับแบตเตอรี่ลิเทียม
- ข. ในการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงควรทำการทดสอบในส่วนของอายุการใช้งานของเมมเบรนที่เตรียมขึ้นด้วย

## รายการอ้างอิง

1. อภิชัย เทอดเทียนวงษ์. เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอนเนตหลอม. การประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
2. พิษณุ เจริญสมบัติ. การศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาคฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.
3. Williams, K.R. An Introduction to Fuel Cells. Amsterdam, Elsevier Publication, 1966. อ้างถึงใน พิษณุ เจริญสมบัติ. การศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาคฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.
4. Austin, L.G. Handbook of Fuel Cell Technology. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1968. อ้างถึงใน พิษณุ เจริญสมบัติ. การศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาคฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.
5. Cairns, E.J. and Liebhafsky, H.A. The Thermodynamics of the Complete Fuel Cell. Technical Information series 63-RL-3399 C, New York, General Electric Research Laboratory, 1963. อ้างถึงใน พิษณุ เจริญสมบัติ. การศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาคฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.
6. สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์, อภิชัย เทอดเทียนวงษ์, กฤษณพงศ์ กীরติกร, ชาย สิริวัฒน์ชัยกุล, รุ่งโรจน์ สงค์ประกอบ, ธีรยุทธ เจนวิทยา และภาวดี อังควัฒนะ. เซลล์เชื้อแบบพอลิเมอร์ของแข็ง. การประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
7. Watkins, D.S. Fuel Cell Systems. New York, Plenum Press, 1993. อ้างถึงใน สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์ และคณะ. เซลล์เชื้อแบบพอลิเมอร์ของแข็ง. การประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
8. Schmidt, V.M., Ianniello, R., Reger, H., Stimming, U., and Trila, F. Proceeding of the

- First International Symposium on Proton Conducting Membrane Fuel Cells I. New Jersey, The Electrochemical Society Inc, 1995. อ้างถึงใน สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์ และคณะ. เซลล์เชื้อแบบพอลิเมอร์ของแข็ง. การประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
9. Norbeck, J. M. et al. Hydrogen Fuel for Surface Transportation. Society of Automotive Engineers Inc, 1996. อ้างถึงใน สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์ และคณะ. เซลล์เชื้อแบบพอลิเมอร์ของแข็ง. การประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
10. Srinivasan, S., Dave, B.B., Murugesamoorthi, K.A., Parthasarathy, A., Appleby, A.J. Fuel Cell system. New York, Plenum Press, 1993. อ้างถึงใน สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์ และคณะ. เซลล์เชื้อแบบพอลิเมอร์ของแข็ง. การประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
11. Appleby, A.J. and Foulkes, F.R. Fuel Cell Handbook. New York, Van Nostrand Reinhold: 1989. อ้างถึงใน สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์ และคณะ. เซลล์เชื้อแบบพอลิเมอร์ของแข็ง. การประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
12. Kinoshita, K. Electrochemical Oxygen Technology. New York, John Wiley & Sons Inc, 1992. อ้างถึงใน สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์ และคณะ. เซลล์เชื้อแบบพอลิเมอร์ของแข็ง. การประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
13. Prater, K.B. Solid Polymer Fuel Cell Developments at Ballard. Norbeck, K.M. et al, Hydrogen Fuel for Surface Transportation, Society of Automotive Engineers Inc., 1996. อ้างถึงใน สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์ และคณะ. เซลล์เชื้อแบบพอลิเมอร์ของแข็ง. การประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
14. Gottesfeld, S., Wilson, M.S., Zawodzinski, T. and lemons, R.A. Hydrogen Fuel for

- Surface Transportation. Reprinted, Society of Automotive Engineers Inc., 1996. อ้างถึงใน สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์ และคณะ. เซลล์เชื้อแบบพอลิเมอร์ของแข็ง. การประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
15. Mizuhata, M., Yasuda, K., Oguro, K. and Takenaka, H. Proton Exchange Membrane Fuel Cells. The Electrochemical Society Inc., 1995. อ้างถึงใน สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์ และคณะ. เซลล์เชื้อแบบพอลิเมอร์ของแข็ง. การประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
16. อัมพันธ์ เพ็ญโรจน์. จลนพลศาสตร์เคมี. สุภาพ บุญยะรัตเวช, เคมีทั่วไป, พิมพ์ครั้งที่ 1. เล่มที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2522. อ้างถึงใน พิษณุ เจริญสมบัติ. การศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.
17. Anand, N.K., Appleby, A.J., Dhar, H.P., Ferreira, A.C., Kim, J., Mukerjee, S., Nandi, A., Parthasarathy, A., Rho, Y.W., Somasandaran, S., Srinivasan, S., Velev, O.A. and Wakizoe, M. Hydrogen Fuel for Surface Transportation. Society of Automotive Engineers Inc., 1996. อ้างถึงใน สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์ และคณะ. เซลล์เชื้อแบบพอลิเมอร์ของแข็ง. การประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
18. Iwase, M. and Kanatsu, S. Proton Conducting Membrane Fuel Cells. The Electrochemical Society Inc., 1995. อ้างถึงใน สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์ และคณะ. เซลล์เชื้อแบบพอลิเมอร์ของแข็ง. การประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
19. รัตเกล้า ภูติวรรณ. การทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายของแผ่นฟิล์มโคโตนโดยการใช้อัลตราอัลตราไฮโดรเจน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
20. Budavi, S. An Encyclopedia of Chemicals, Drugs and Biology. The Merck Index.

- New Jersey, Merck Co., Inc., 1976. อ้างถึงใน รัตเกล้า ภูติวรรณถ. การทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายของแผ่นฟิล์มไคโตแซนโดยการใช้อัลตราอัลตราไวต์ไฮด์เป็นสารช่วยในการเกิดโครงร่างตาข่าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
21. อุดมชัย จินนะดิษฐ์. ผลกระทบจากเปลือกกุ้งกับการพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ. วารสาร สสท. 19 (สิงหาคม-กันยายน 2535): 50-54. อ้างถึงใน รัตเกล้า ภูติวรรณถ. การทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายของแผ่นฟิล์มไคโตแซนโดยการใช้อัลตราอัลตราไวต์ไฮด์เป็นสารช่วยในการเกิดโครงร่างตาข่าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
22. Muzzarelli, R.A.A. Chitin. Oxford, Pergamon press, 1977. อ้างถึงใน รัตเกล้า ภูติวรรณถ. การทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายของแผ่นฟิล์มไคโตแซนโดยการใช้อัลตราอัลตราไวต์ไฮด์เป็นสารช่วยในการเกิดโครงร่างตาข่าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
23. Lee, V. Solution and shear properties of chitin and chitosan. Ann Arbor Vol. 29, 1974, p. 446. อ้างถึงใน รัตเกล้า ภูติวรรณถ. การทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายของแผ่นฟิล์มไคโตแซนโดยการใช้อัลตราอัลตราไวต์ไฮด์เป็นสารช่วยในการเกิดโครงร่างตาข่าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
24. Knorr, D. Use of chitinous polymer in food. Food Technology Vol. 38, 1984, p. 85. อ้างถึงใน รัตเกล้า ภูติวรรณถ. การทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายของแผ่นฟิล์มไคโตแซนโดยการใช้อัลตราอัลตราไวต์ไฮด์เป็นสารช่วยในการเกิดโครงร่างตาข่าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
25. Mathur, N.K. and Narang, C.K. Chitin and chitosan, versatile polysaccharides from marine animals. Journal of Chemical Education Vol. 67, 1990, pp. 938 – 942. อ้างถึงใน รัตเกล้า ภูติวรรณถ. การทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายของแผ่นฟิล์มไคโตแซนโดยการใช้อัลตราอัลตราไวต์ไฮด์เป็นสารช่วยในการเกิดโครงร่างตาข่าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
26. Maeda, H., Yoshimura, A., Fukumoto, H., Hamano, K., and Mitsuda, K.



Development of PEFC Module for Portable Use. Proceeding of the 7<sup>th</sup> FCDIC Fuel Cell Symposium 2000, pp. 89 – 92.

27. Wakizoe, M., Watanabe, A. Study of Ion Exchange for Highly Durable PEFC's. Proceeding of the 7<sup>th</sup> FCDIC Fuel Cell Symposium 2000, pp. 106 – 113.
28. Yanagisawa, E., Kunisa, Y., Ishisaki, T., Umemura, K., Terada, I., and Yoshitake, M. Development of Flemion<sup>®</sup> Membranes for Polymer Electrolyte Fuel Cells. Proceeding of the 7<sup>th</sup> FCDIC Fuel Cell Symposium 2000, pp. 114 – 120.
29. Ota, K., Inoue, Y., Motohira, N., and Kamiya, N. Hydrogen Oxidation and Oxygen Reduction at Pt Microelectrode on Polymer Electrolytes. J. New Materials for Electrochemical Systems 2000, 3, pp. 193 – 197.
30. Takizawa, K. and Hagiwara, A. Heat-resisting Property of Polymer Electrolyte for PEFC. Proceeding of the 7<sup>th</sup> FCDIC Fuel Cell Symposium 2000, pp. 121 – 124.
31. Zaidi, S.M.J., Chen, S.F., Mikhailenko, S.D. and Kaliaguine, S. Proton Conducting Membranes Based on Polyoxadiazoles. Journal of New Materials for Electrochemical System Vol. 3, 2000, pp.27-32.
32. Bevers, D., Rogers, R. and Bradke, M. V. Examination of The Influence of PTFE Coating on The Properties of Carbon Paper in Polymer Electrolyte Fuel Cells. Journal of Power Sources Vol. 63, 1996, pp. 193-201.
33. Byun, H. S., Burford, R. P. and Fane, A. G. Sulfonation of Cross-Linked Asymmetric Membranes Based on Polystyrene and Divinylbenzene. Vol. 52, 1994, pp. 825-835.
34. Sabnis, S. and Block, L.H. Improve Infrared Spectoscopic Method for the Analysis of Degree of N-deacetylation of Chitosan. Polymer Bulletin Vol. 39, 1997, pp. 67-71.
35. ศิวาพร ไชยงค์. ผลของตัวแปรจากกระบวนการดีอะเซทิลเลชันของไคตินต่อคุณสมบัติของ
36. ผลิตภัณฑ์ไคโตแซนที่สัมพันธ์กับคุณสมบัติการเป็นสารช่วยแตกกระจายตัวในยาเม็ด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเภสัชอุตสาหกรรม คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

## ข้อมูลการทดลอง

## 1. การทดลองหาค่าร้อยละการกำจัดหมู่แอซิดิลของโคโคซาน

ตารางที่ ก.1 การหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยการไตเตรตสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลาย KHP เข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร

ตัวอย่างที่	ปริมาตร NaOH (มล.)	ปริมาตร KHP (มล.)	ความเข้มข้น NaOH (โมล/ลิตร)
1	25	11.00	0.0880
2	25	11.00	0.0880
เฉลี่ย			0.0880

ตารางที่ ก.2 การไตเตรตสารละลายโคโคซานไฮโดรคลอไรด์กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.0880 โมล/ลิตร (โคโคแซนไฮโดรคลอไรด์ 1.0130 กรัม ละลายในน้ำกลั่นจนได้สารละลาย 250 มล.)

ครั้งที่	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2	
	ปริมาตรโคโคซานไฮโดรคลอไรด์ (มล.)	ปริมาตร NaOH (มล.)	ปริมาตรโคโคซานไฮโดรคลอไรด์ (มล.)	ปริมาตร NaOH (มล.)
1	50	7.70	50	7.70
2	50	7.70	50	7.70
เฉลี่ย	50	7.70	50	7.70
ร้อยละการกำจัดหมู่แอซิดิล	66.71		66.71	
เฉลี่ย	66.71			

2. การทดลองหาค่าความสามารถทนต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดตัวสูงสุดของเมมเบรน

ตารางที่ ก.3 ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดตัวสูงสุดของเมมเบรน

ชนิดของเมมเบรน	ความหนา (มม.)	ความสามารถทนต่อแรงดึง (MPa)	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความสามารถในการยืดตัวสูงสุด (%)	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Uncrosslinked chitosan	0.0290	98.34	86.20	8.23	16.39	18.69	1.73
	0.0250	83.96			19.44		
	0.0330	82.13			18.49		
	0.0280	80.37			20.44		
1% Crosslinked chitosan	0.0230	64.85	60.88	4.14	16.93	15.35	1.82
	0.0210	63.12			16.89		
	0.0150	55.40			14.12		
	0.0200	60.12			13.45		
2% Crosslinked chitosan	0.0250	91.17	70.72	14.44	19.17	16.10	3.39
	0.0200	60.72			11.25		
	0.0180	70.64			17.13		
	0.0180	60.34			16.86		
3% Crosslinked chitosan	0.0190	65.20	66.26	2.12	22.31	20.24	3.68
	0.0180	65.04			18.21		
	0.0190	69.43			24.23		
	0.0195	65.36			16.19		
4% Crosslinked chitosan	0.0200	65.80	63.21	1.82	19.80	19.20	1.18
	0.0170	63.09			17.92		
	0.0160	62.21			18.56		
	0.0180	61.73			20.54		
5% Crosslinked chitosan	0.0190	64.11	61.41	2.25	15.24	15.92	2.96
	0.0190	59.22			16.78		
	0.0170	62.36			12.28		
	0.0175	59.94			19.37		
10% Crosslinked chitosan	0.0250	67.12	62.60	8.48	6.13	5.40	2.26
	0.0170	52.26			2.06		
	0.0210	59.54			7.06		
	0.0180	71.49			6.34		
Alginate	0.0400	70.92	76.27	5.75	21.47	24.00	4.26
	0.0310	78.70			28.86		
	0.0360	72.23			26.12		
	0.0330	83.24			19.54		

### 3. การทดลองหาค่าร้อยละการดูดซับน้ำและร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา

ตารางที่ ก.4 ความหนาและน้ำหนักของเมมเบรนชนิดต่างๆ ขณะแห้ง

ชนิดของเมมเบรน	ตัวอย่างที่	น้ำหนักแห้ง (กรัม)	ความหนาขณะแห้ง (มม.)					เฉลี่ย
			จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	
Uncrosslinked chitosan	1	0.1561	0.0190	0.0200	0.0180	0.0180	0.0180	0.0186
	2	0.2327	0.0110	0.0120	0.0120	0.0110	0.0110	0.0114
	3	0.1540	0.0110	0.0130	0.0100	0.0100	0.0120	0.0112
1% Crosslinked chitosan	1	0.2737	0.0210	0.0210	0.0200	0.0200	0.0200	0.0204
	2	0.2671	0.0200	0.0210	0.0230	0.0200	0.0200	0.0208
	3	0.2153	0.0190	0.0190	0.0180	0.0180	0.0170	0.0182
2% Crosslinked chitosan	1	0.2487	0.0180	0.0180	0.0180	0.0200	0.0200	0.0188
	2	0.2490	0.0180	0.0200	0.0160	0.0180	0.0180	0.0180
	3	0.3341	0.0200	0.0210	0.0220	0.0220	0.0220	0.0214
3% Crosslinked chitosan	1	0.2258	0.0200	0.0190	0.0180	0.0200	0.0200	0.0194
	2	0.2377	0.0210	0.0220	0.0210	0.0200	0.0210	0.0210
	3	0.2201	0.0220	0.0230	0.0210	0.0220	0.0230	0.0222
4% Crosslinked chitosan	1	0.2544	0.0220	0.0230	0.0220	0.0210	0.0220	0.0220
	2	0.2512	0.0200	0.0200	0.0210	0.0220	0.0200	0.0206
	3	0.2402	0.0200	0.0180	0.0200	0.0200	0.0210	0.0198
5% Crosslinked chitosan	1	0.2544	0.0200	0.0220	0.0200	0.0200	0.0220	0.0208
	2	0.2411	0.0180	0.0200	0.0180	0.0190	0.0200	0.0190
	3	0.3014	0.0200	0.0180	0.0220	0.0240	0.0200	0.0208
10% Crosslinked chitosan	1	0.2356	0.0200	0.0200	0.0220	0.0180	0.0180	0.0196
	2	0.2456	0.0180	0.0220	0.0200	0.0240	0.0200	0.0208
	3	0.2501	0.0250	0.0200	0.0210	0.0200	0.0200	0.0212
Alginate	1	0.4721	0.0350	0.0350	0.0400	0.0350	0.0400	0.0370
	2	0.5695	0.0400	0.0450	0.0430	0.0380	0.0400	0.0412
	3	0.6334	0.0450	0.0400	0.0400	0.0400	0.0420	0.0414

ตารางที่ ก.5 ความหนาและน้ำหนักของเมมเบรนชนิดต่างๆ ขณะเปียก

ชนิดของเมมเบรน	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก เปียก (กรัม)	ความหนาขณะเปียก (มม.)					เฉลี่ย
			จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	
Uncrosslinked chitosan	1	0.4488	0.0540	0.0530	0.0520	0.0500	0.0500	0.0518
	2	0.5990	0.0300	0.0320	0.0330	0.0300	0.0200	0.0290
	3	0.4490	0.0280	0.0300	0.0250	0.0250	0.0260	0.0268
1% Crosslinked chitosan	1	0.7468	0.0490	0.0500	0.0450	0.0450	0.0420	0.0462
	2	0.6236	0.0500	0.0520	0.0480	0.0500	0.0420	0.0484
	3	0.5899	0.0470	0.0500	0.0440	0.0400	0.0450	0.0452
2% Crosslinked chitosan	1	0.6050	0.0450	0.0440	0.0430	0.0460	0.0460	0.0448
	2	0.6301	0.0450	0.0440	0.0420	0.0430	0.0400	0.0428
	3	0.8200	0.0450	0.0500	0.0500	0.0500	0.0510	0.0492
3% Crosslinked chitosan	1	0.5611	0.0480	0.0450	0.0490	0.0450	0.0470	0.0468
	2	0.5273	0.0500	0.0460	0.0480	0.0500	0.0470	0.0482
	3	0.5685	0.0510	0.0580	0.0380	0.0520	0.0500	0.0498
4% Crosslinked chitosan	1	0.6272	0.0450	0.0500	0.0520	0.0500	0.0480	0.0490
	2	0.5780	0.0420	0.0450	0.0420	0.0500	0.0480	0.0454
	3	0.5530	0.0420	0.0450	0.0460	0.0480	0.0500	0.0462
5% Crosslinked chitosan	1	0.6020	0.0420	0.0430	0.0450	0.0480	0.0500	0.0456
	2	0.6199	0.0410	0.0400	0.0460	0.0480	0.0480	0.0446
	3	0.6155	0.0400	0.0420	0.0440	0.0450	0.0400	0.0422
10% Crosslinked chitosan	1	0.5524	0.0410	0.0410	0.0410	0.0430	0.0430	0.0418
	2	0.5611	0.0440	0.0450	0.0420	0.0400	0.0400	0.0422
	3	0.5755	0.0450	0.0400	0.0400	0.0420	0.0390	0.0412
Alginate	1	4.9196	0.2200	0.2300	0.2500	0.2300	0.2350	0.2330
	2	6.0236	0.3300	0.3500	0.3500	0.3400	0.3250	0.3390
	3	5.9316	0.3200	0.3350	0.3300	0.3300	0.3700	0.3370

ตารางที่ ก.6 ร้อยละการดูดซับน้ำและร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา

ชนิดของเมมเบรน	ตัวอย่างที่	ร้อยละการดูดซับน้ำ	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Uncrosslinked chitsan	1	187.51	178.83	18.65	178.49	157.39	19.78
	2	157.41			154.39		
	3	191.56			139.29		
1% Crosslinked chitsan	1	172.85	160.10	23.07	126.47	135.84	11.27
	2	133.47			132.69		
	3	173.99			148.35		
2% Crosslinked chitsan	1	143.26	147.25	5.14	138.30	135.33	4.70
	2	153.05			137.78		
	3	145.44			129.91		
3% Crosslinked chitsan	1	148.49	142.87	18.87	141.24	131.70	8.66
	2	121.83			129.52		
	3	158.29			124.32		
4% Crosslinked chitsan	1	146.54	135.62	9.46	122.73	125.48	6.90
	2	130.10			120.39		
	3	130.22			133.33		
5% Crosslinked chitsan	1	136.64	132.65	26.67	119.23	118.95	15.33
	2	157.11			134.74		
	3	104.21			102.88		
10% Crosslinked chitsan	1	134.47	131.01	3.10	113.27	103.50	9.48
	2	128.46			102.88		
	3	130.11			94.34		
Alginate	1	942.07	912.08	65.94	529.73	655.52	109.03
	2	957.70			722.82		
	3	836.47			714.01		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4. ค่าการแลกเปลี่ยนไอออน

ตารางที่ ก.7 การหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยการไตเตรตสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลาย KHP เข้มข้น 0.005 M

ตัวอย่างที่	ปริมาตร NaOH (มล.)	ปริมาตร KHP (มล.)	ความเข้มข้น NaOH (โมล/ลิตร)
1	25	22.2	0.0044
2	25	22.5	0.0045
เฉลี่ย			0.0045

ตารางที่ ก.8 การหาความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก โดยการไตเตรตสารละลายกรดไฮโดรคลอริกกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.0045 M

ตัวอย่างที่	ปริมาตร HCl (มล.)	ปริมาตร NaOH (มล.)	ความเข้มข้น HCl (โมล/ลิตร)
1	25	23.5	0.0042
2	25	23.7	0.0042
เฉลี่ย			0.0042

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก.9 น้ำหนักแห้งของเมมเบรนที่นำมาทดลองหาค่าการแลกเปลี่ยนไอออน

ชนิดของเมมเบรน	น้ำหนักแห้ง (กรัม)				
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5
Uncrosslinked chitosan	0.0130	0.0170	0.0120	0.0180	0.0170
1% Crosslinked chitosan	0.0120	0.0100	0.0140	0.0140	0.0120
2% Crosslinked chitosan	0.0154	0.0180	0.0120	0.0145	0.0147
3% Crosslinked chitosan	0.0101	0.0103	0.0100	0.0101	0.0104
4% Crosslinked chitosan	0.0100	0.0105	0.0102	0.0103	0.0103
5% Crosslinked chitosan	0.0075	0.0098	0.0110	0.0111	0.0102
10% Crosslinked chitosan	0.0089	0.0092	0.0101	0.0114	0.0094
Alginate	0.0101	0.0114	0.0098	0.0089	0.0099

ตารางที่ ก.10 ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.0042 โมล/ลิตร ที่ใช้ในการไตเตรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.0045 โมล/ลิตร ในการทดลองหาค่าการแลกเปลี่ยนไอออน

ชนิดของเมมเบรน	ปริมาตร HCl (มล.)				
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5
Uncrosslinked chitosan	18.90	17.80	17.60	18.10	16.70
1% Crosslinked chitosan	14.50	15.20	15.40	16.10	14.60
2% Crosslinked chitosan	13.20	12.20	13.80	12.50	12.90
3% Crosslinked chitosan	12.40	12.50	12.70	13.00	12.90
4% Crosslinked chitosan	11.50	11.00	11.40	10.70	10.50
5% Crosslinked chitosan	12.00	11.45	9.00	10.15	10.85
10% Crosslinked chitosan	10.80	10.70	10.00	10.45	11.20
Alginate	13.80	13.90	14.20	15.20	14.00

ตารางที่ ก.11 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรน

ชนิดของเมมเบรน	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (meq/g)						ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5	เฉลี่ย	
Uncrosslinked chitosan	0.74	0.84	1.26	0.72	1.11	0.94	0.24
1% Crosslinked chitosan	2.35	2.53	1.74	1.53	2.32	2.09	0.43
2% Crosslinked chitosan	2.19	2.11	2.60	2.53	2.38	2.36	0.21
3% Crosslinked chitosan	3.67	3.56	3.58	3.42	3.36	3.52	0.13
4% Crosslinked chitosan	4.09	4.09	4.05	4.30	4.38	4.18	0.15
5% Crosslinked chitosan	5.17	4.19	4.67	4.20	4.28	4.50	0.42
10% Crosslinked chitosan	4.92	4.81	4.67	3.97	4.48	4.57	0.37
Alginate	3.09	2.70	3.01	2.84	3.06	2.94	0.17

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. การปรับปรุงสมบัติของคาร์บอนเปเปอร์  
ตารางที่ ก.12 เปอร์เซนต์ PTFE บนคาร์บอนเปเปอร์

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก คาร์บอนเปเปอร์ (กรัม)	น้ำหนักหลัง ปรับปรุง (กรัม)	เปอร์เซนต์ PTFE	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก คาร์บอนเปเปอร์ (กรัม)	น้ำหนัก หลังปรับ ปรุง (กรัม)	เปอร์เซนต์ PTFE
1	0.5597	0.7384	24.20	25	0.5467	0.7110	23.11
2	0.5530	0.7287	24.11	26	0.5564	0.7280	23.57
3	0.5549	0.7243	23.39	27	0.5503	0.7208	23.65
4	0.5584	0.7169	22.11	28	0.5568	0.7328	24.02
5	0.5522	0.7165	22.93	29	0.5673	0.7390	23.23
6	0.5580	0.7203	22.53	30	0.5612	0.7409	24.25
7	0.5513	0.7188	23.30	31	0.5620	0.7450	24.56
8	0.5488	0.7103	22.74	32	0.5607	0.7275	22.93
9	0.5517	0.7156	22.90	33	0.5534	0.7194	23.07
10	0.5501	0.7112	22.65	34	0.5614	0.7188	21.90
11	0.5540	0.7304	24.15	35	0.5565	0.7341	24.19
12	0.5601	0.7294	23.21	36	0.5695	0.7400	23.04
13	0.5449	0.7126	23.53	37	0.5596	0.7210	22.39
14	0.5452	0.7151	23.76	38	0.5469	0.7308	25.16
15	0.5511	0.7202	23.48	39	0.5545	0.7295	23.99
16	0.5459	0.7249	24.69	40	0.5633	0.7364	23.51
17	0.5506	0.7128	22.76	41	0.5583	0.7362	24.16
18	0.5633	0.7596	25.84	42	0.5739	0.7602	24.51
19	0.5555	0.746	25.54	43	0.5525	0.7082	21.99
20	0.5483	0.7384	25.74	44	0.5498	0.7176	23.38
21	0.5537	0.7445	25.63	45	0.5531	0.7373	24.98
22	0.564	0.7325	23.00	เฉลี่ย			23.68
23	0.5559	0.7385	24.73	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			1.00
24	0.5590	0.7276	23.17				

## 6. การเตรียมอิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ ก.13 ปริมาณพลติ้นัมบนคาร์บอนเปเปอร์

ตัวอย่างที่	น้ำหนักคาร์บอนเปเปอร์ (กรัม)	น้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ (กรัม)	ปริมาณพลติ้นัม (มิลลิกรัม/ตร.ซม.)
1	0.4809	0.5283	0.95
2	0.4722	0.5096	0.75
3	0.4817	0.5178	0.72
4	0.4794	0.5223	0.86
5	0.4846	0.5254	0.82
6	0.4809	0.5272	0.93
7	0.4910	0.5379	0.94
8	0.4964	0.5449	0.97
9	0.4832	0.5320	0.98
10	0.4811	0.5292	0.96
11	0.4846	0.5300	0.91
12	0.4925	0.5384	0.92
13	0.4849	0.5336	0.97
14	0.4774	0.5266	0.98
15	0.4750	0.5247	0.99
16	0.4763	0.5258	0.99
เฉลี่ย			0.91
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.09

## 7. การวัดค่าการนำไฟฟ้า

ตารางที่ ก.14 ความหนาของเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 40 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0170	0.0180	0.0180	0.0180	0.0170	0.0180	0.0170	0.0190	0.0178
2	0.0250	0.0250	0.0250	0.0260	0.0260	0.0270	0.0260	0.0260	0.0258
3	0.0220	0.0210	0.0190	0.0220	0.0200	0.0190	0.0200	0.0200	0.0204
4	0.0270	0.0260	0.0270	0.0270	0.0280	0.0270	0.0270	0.0270	0.0270
5	0.0210	0.0200	0.0190	0.0200	0.0210	0.0190	0.0200	0.0200	0.0200
6	0.0230	0.0230	0.0230	0.0220	0.0230	0.0230	0.0230	0.0230	0.0229

ตารางที่ ก.15 ความหนาของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 40 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0150	0.0160	0.0140	0.0150	0.0140	0.0150	0.0150	0.0160	0.0150
2	0.0130	0.0130	0.0140	0.0130	0.0150	0.0150	0.0140	0.0130	0.0138
3	0.0180	0.0170	0.0180	0.0190	0.0180	0.0170	0.0170	0.0160	0.0175
4	0.0140	0.0140	0.0140	0.0170	0.0140	0.0180	0.0180	0.0160	0.0156

ตารางที่ ก.16 ความหนาของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 40 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0320	0.0300	0.0310	0.0290	0.0300	0.0300	0.0300	0.0310	0.0304
2	0.0200	0.0190	0.0160	0.0160	0.0170	0.0190	0.0160	0.0160	0.0174
3	0.0160	0.0170	0.0160	0.0160	0.0160	0.0160	0.0160	0.0170	0.0163
4	0.0190	0.0170	0.0180	0.0160	0.0190	0.0180	0.0180	0.0190	0.0180

ตารางที่ ก.17 ความหนาของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 40 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0180	0.0180	0.0180	0.0170	0.0180	0.0170	0.0180	0.0180	0.0178
2	0.0290	0.0290	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300	0.0298
3	0.0290	0.0270	0.0280	0.0270	0.0270	0.0290	0.0280	0.0280	0.0279
4	0.0230	0.0250	0.0240	0.0240	0.0230	0.0250	0.0230	0.0240	0.0239
5	0.0210	0.0210	0.0200	0.0200	0.0200	0.0200	0.0200	0.0210	0.0204

ตารางที่ ก.18 ความหนาของเมมเบรน Alginate ขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 40 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0160	0.0180	0.0160	0.0180	0.0180	0.0210	0.0180	0.0160	0.0176
2	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240
3	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240
4	0.0200	0.0210	0.0190	0.0200	0.0220	0.0200	0.0190	0.0190	0.0200

ตารางที่ ก.19 ความหนาของเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 50 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0200	0.0220	0.0210	0.0190	0.0220	0.0210	0.0210	0.0220	0.0210
2	0.0200	0.0210	0.0210	0.0190	0.0190	0.0180	0.0210	0.0210	0.0200
3	0.0170	0.0180	0.0170	0.0180	0.0190	0.0190	0.0180	0.0180	0.0180
4	0.0160	0.0170	0.0180	0.0180	0.0170	0.0160	0.0170	0.0160	0.0169

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.20 ความหนาของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 50 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0280	0.0280	0.0280	0.0290	0.0290	0.0270	0.0270	0.0290	0.0281
2	0.0270	0.0260	0.0250	0.0250	0.0250	0.0270	0.0270	0.0250	0.0259
3	0.0250	0.0260	0.0260	0.0260	0.0250	0.0270	0.0270	0.0260	0.0260
4	0.0250	0.0250	0.0250	0.0260	0.0260	0.0260	0.0240	0.0240	0.0251
5	0.0250	0.0270	0.0270	0.0270	0.0250	0.0250	0.0260	0.0260	0.0260

ตารางที่ ก.21 ความหนาของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 50 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0240	0.0230	0.0230	0.0250	0.0230	0.0250	0.0250	0.0240	0.0240
2	0.0230	0.0250	0.0240	0.0240	0.0230	0.0250	0.0240	0.0250	0.0241
3	0.0260	0.0250	0.0260	0.0260	0.0250	0.0250	0.0250	0.0260	0.0255
4	0.0220	0.0240	0.0240	0.0220	0.0220	0.0230	0.0240	0.0230	0.0230

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก.22 ความหนาของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 50 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0250	0.0240	0.0240	0.0250	0.0250	0.0250	0.0260	0.0260	0.0250
2	0.0260	0.0260	0.0270	0.0260	0.0270	0.0280	0.0270	0.0270	0.0268
3	0.0240	0.0230	0.0230	0.0250	0.0240	0.0230	0.0250	0.0240	0.0239
4	0.0230	0.0230	0.0220	0.0220	0.0240	0.0240	0.0220	0.0230	0.0229

ตารางที่ ก.23 ความหนาของเมมเบรน Alginate ขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 50 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0380	0.0380	0.0360	0.0350	0.0360	0.0390	0.0370	0.0370	0.0370
2	0.0300	0.0310	0.0290	0.0290	0.0300	0.0310	0.0300	0.0300	0.0300
3	0.0350	0.0360	0.0340	0.0350	0.0360	0.0340	0.0370	0.0340	0.0351
4	0.0290	0.0290	0.0300	0.0310	0.0300	0.0310	0.0320	0.0280	0.0300
5	0.0290	0.0300	0.0290	0.0280	0.0280	0.0290	0.0300	0.0290	0.0290

ตารางที่ ก.24 ความหนาของเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 60 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0180	0.0180	0.0170	0.0190	0.0180	0.0180	0.0180	0.0180	0.0180
2	0.0180	0.0170	0.0190	0.0190	0.0190	0.0200	0.0200	0.0190	0.0189
3	0.0230	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0239
4	0.0160	0.0160	0.0150	0.0150	0.0160	0.0160	0.0160	0.0160	0.0158
5	0.0160	0.0160	0.0160	0.0150	0.0160	0.0160	0.0160	0.0160	0.0159

ตารางที่ ก.25 ความหนาของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 60 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0170	0.0160	0.0170	0.0180	0.0180	0.0170	0.0170	0.0170	0.0171
2	0.0170	0.0180	0.0180	0.0180	0.0190	0.0180	0.0170	0.0180	0.0179
3	0.0190	0.0210	0.0200	0.0200	0.0200	0.0190	0.0210	0.0200	0.0200
4	0.0180	0.0200	0.0190	0.0180	0.0180	0.0190	0.0200	0.0200	0.0190

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.26 ความหนาของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 60 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0180	0.0180	0.0180	0.0180	0.0170	0.0180	0.0190	0.0180	0.0180
2	0.0240	0.0230	0.0250	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240
3	0.0230	0.0230	0.0240	0.0220	0.0220	0.0240	0.0230	0.0230	0.0230
4	0.0240	0.0230	0.0240	0.0240	0.0230	0.0240	0.0240	0.0240	0.0238

ตารางที่ ก.27 ความหนาของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 60 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0240	0.0230	0.0240	0.0250	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240
2	0.0230	0.0220	0.0220	0.0230	0.0230	0.0230	0.0230	0.0230	0.0228
3	0.0180	0.0180	0.0160	0.0180	0.0170	0.0180	0.0180	0.0180	0.0176
4	0.0350	0.0330	0.0360	0.0350	0.0350	0.0350	0.0360	0.0350	0.0350

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.28 ความหนาของเมมเบรน Alginate ขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 60 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0230	0.0230	0.0230	0.0230	0.0230	0.0230	0.0230	0.0230	0.0230
2	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0230	0.0239
3	0.0170	0.0180	0.0180	0.0170	0.0170	0.0170	0.0170	0.0170	0.0173
4	0.0220	0.0230	0.0230	0.0240	0.0230	0.0230	0.0240	0.0230	0.0231

ตารางที่ ก.29 ความหนาของเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 68 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0180	0.0170	0.0160	0.0160	0.0150	0.0150	0.0150	0.0160	0.0160
2	0.0150	0.0130	0.0130	0.0140	0.0140	0.0140	0.0140	0.0140	0.0139
3	0.0160	0.0180	0.0170	0.0150	0.0150	0.0150	0.0160	0.0160	0.0160
4	0.0250	0.0250	0.0230	0.0240	0.0240	0.0230	0.0240	0.0240	0.0240
5	0.0250	0.0260	0.0230	0.0230	0.0240	0.0240	0.0240	0.0230	0.0240

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.30 ความหนาของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 68 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0230	0.0240	0.0220	0.0230	0.0230	0.0230	0.0230	0.0220	0.0229
2	0.0300	0.0310	0.0320	0.0320	0.0300	0.0320	0.0300	0.0310	0.0310
3	0.0300	0.0290	0.0280	0.0320	0.0310	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300
4	0.0280	0.0260	0.0300	0.0270	0.0290	0.0280	0.0290	0.0270	0.0280

ตารางที่ ก.31 ความหนาของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 68 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0260	0.0280	0.0270	0.0270	0.0260	0.0280	0.0250	0.0250	0.0265
2	0.0230	0.0260	0.0260	0.0240	0.0260	0.0250	0.0250	0.0250	0.0250
3	0.0230	0.0240	0.0250	0.0230	0.0250	0.0240	0.0230	0.0250	0.0240
4	0.0230	0.0220	0.0220	0.0230	0.0220	0.0220	0.0230	0.0230	0.0225

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.32 ความหนาของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 68 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0230	0.0240	0.0220	0.0250	0.0240	0.0250	0.0240	0.0230	0.0238
2	0.0280	0.0260	0.0270	0.0290	0.0280	0.0270	0.0290	0.0280	0.0278
3	0.0240	0.0220	0.0240	0.0240	0.0230	0.0230	0.0240	0.0250	0.0236
4	0.0240	0.0230	0.0220	0.0230	0.0250	0.0240	0.0230	0.0230	0.0234
5	0.0300	0.0320	0.0310	0.0280	0.0290	0.0280	0.0300	0.0320	0.0300

ตารางที่ ก.33 ความหนาของเมมเบรน Alginate ขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 68 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0300	0.0280	0.0320	0.0300	0.0290	0.0310	0.0300	0.0290	0.0299
2	0.0370	0.0350	0.0380	0.0360	0.0380	0.0380	0.0350	0.0360	0.0366
3	0.0340	0.0360	0.0340	0.0350	0.0330	0.0330	0.0320	0.0340	0.0339
4	0.0280	0.0280	0.0280	0.0270	0.0280	0.0300	0.0270	0.0280	0.0280

ตารางที่ ก.34 ความหนาของเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 80 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0180	0.0170	0.0180	0.0180	0.0180	0.0190	0.0190	0.0180	0.0181
2	0.0160	0.0160	0.0160	0.0170	0.0150	0.0150	0.0170	0.0160	0.0160
3	0.0130	0.0130	0.0120	0.0140	0.0130	0.0140	0.0120	0.0130	0.0130
4	0.0150	0.0160	0.0140	0.0160	0.0150	0.0140	0.0150	0.0150	0.0150

ตารางที่ ก.35 ความหนาของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 80 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0230	0.0220	0.0240	0.0230	0.0230	0.0220	0.0240	0.0220	0.0229
2	0.0210	0.0200	0.0190	0.0200	0.0200	0.0210	0.0200	0.0200	0.0201
3	0.0240	0.0230	0.0250	0.0250	0.0250	0.0230	0.0230	0.0240	0.0240
4	0.0250	0.0250	0.0260	0.0250	0.0260	0.0240	0.0250	0.0250	0.0251

ตารางที่ ก.36 ความหนาของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 80 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0250	0.0230	0.0250	0.0230	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240	0.0240
2	0.0240	0.0240	0.0240	0.0230	0.0230	0.0250	0.0250	0.0250	0.0241
3	0.0250	0.0250	0.0260	0.0260	0.0230	0.0250	0.0250	0.0250	0.0250
4	0.0240	0.0230	0.0220	0.0230	0.0230	0.0220	0.0240	0.0230	0.0230

ตารางที่ ก.37 ความหนาของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 80 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0240	0.0250	0.0230	0.0240	0.0230	0.0250	0.0240	0.0240	0.0240
2	0.0300	0.0310	0.0280	0.0290	0.0300	0.0310	0.0310	0.0300	0.0300
3	0.0510	0.0520	0.0480	0.0490	0.0490	0.0500	0.0500	0.0500	0.0499
4	0.0260	0.0250	0.0240	0.0270	0.0240	0.0250	0.0250	0.0250	0.0251

ตารางที่ ก.38 ความหนาของเมมเบรน Alginate ขณะทดลองหาค่าการนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 80 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา (มิลลิเมตร)								
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	เฉลี่ย
1	0.0380	0.0370	0.0390	0.0380	0.0390	0.0370	0.0380	0.0380	0.0380
2	0.0440	0.0440	0.0440	0.0430	0.0450	0.0450	0.0430	0.0440	0.0440
3	0.0310	0.0310	0.0310	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300	0.0304
4	0.0440	0.0420	0.0450	0.0430	0.0450	0.0440	0.0430	0.0450	0.0439

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก.39 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ณ อุณหภูมิ 40 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0178	1.0250	0.4850	0.0018	485010	0.0005
2	0.0258	1.0250	0.4850	0.0026	187081	0.0010
3	0.0204	0.9550	0.3950	0.0019	390501	0.0005
4	0.0270	1.0300	0.3950	0.0028	186501	0.0008
5	0.0200	0.9200	0.3950	0.0018	291180	0.0007
6	0.0229	0.9500	0.3950	0.0022	244371	0.0007
เฉลี่ย						0.0007
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0002

ตารางที่ ก.40 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 40 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0150	0.9450	0.4850	0.0014	24519	0.0140
2	0.0138	0.8700	0.4850	0.0012	30659	0.0132
3	0.0175	0.9700	0.4850	0.0017	18484	0.0155
4	0.0156	0.9000	0.4850	0.0014	27561	0.0125
เฉลี่ย						0.0138
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0013

ตารางที่ ก.41 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนโคโตะซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 40 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0304	0.9350	0.4850	0.0028	3773	0.0453
2	0.0174	0.9310	0.3950	0.0016	7511	0.0325
3	0.0163	0.9450	0.3950	0.0015	7624	0.0337
4	0.0180	1.0200	0.3950	0.0018	5930	0.0363
เฉลี่ย						0.0369
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0058

ตารางที่ ก.42 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนโคโตะซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 40 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0178	0.8500	0.4850	0.0015	5141	0.0625
2	0.0298	1.0500	0.3950	0.0031	2034	0.0622
3	0.0279	0.9500	0.3950	0.0026	2478	0.0602
4	0.0239	0.9550	0.3950	0.0023	2849	0.0608
5	0.0204	0.9350	0.3950	0.0019	3476	0.0597
เฉลี่ย						0.0611
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0012

ตารางที่ ก.43 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรน Alginate ณ อุณหภูมิ 40 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0176	0.9350	0.4850	0.0016	35870	0.0082
2	0.0240	0.9550	0.3950	0.0023	19260	0.0089
3	0.0240	0.9850	0.3950	0.0024	16687	0.0100
4	0.0200	1.0000	0.5000	0.0020	29273	0.0085
เฉลี่ย						0.0089
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0008

ตารางที่ ก.44 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนโคโตะซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ณ อุณหภูมิ 50 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0210	1.0000	0.5000	0.0021	22147	0.0108
2	0.0200	1.0000	0.5000	0.0020	26407	0.0095
3	0.0180	1.0000	0.5000	0.0018	30017	0.0093
4	0.0169	1.0000	0.5000	0.0017	37927	0.0078
เฉลี่ย						0.0093
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0012

ตารางที่ ก.45 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 50 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0281	1.0000	0.5000	0.0028	6309	0.0282
2	0.0259	1.0000	0.5000	0.0026	7099	0.0272
3	0.0260	1.0000	0.5000	0.0026	6843	0.0281
4	0.0251	1.0000	0.5000	0.0025	7168	0.0278
5	0.0260	1.0000	0.5000	0.0026	6862	0.0280
เฉลี่ย						0.0279
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0004

ตารางที่ ก.46 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 50 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0240	1.0000	0.5000	0.0024	5170	0.0403
2	0.0241	1.0000	0.5000	0.0024	4806	0.0431
3	0.0255	1.0000	0.5000	0.0026	4259	0.0460
4	0.0230	1.0000	0.5000	0.0023	5427	0.0401
เฉลี่ย						0.0424
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0028

ตารางที่ ก.47 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 50 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0250	1.0000	0.5000	0.0025	3169	0.0631
2	0.0268	1.0000	0.5000	0.0027	2399	0.0779
3	0.0239	1.0000	0.5000	0.0024	3446	0.0608
4	0.0229	1.0000	0.5000	0.0023	3604	0.0606
เฉลี่ย						0.0656
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0083

ตารางที่ ก.48 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรน Alginate ณ อุณหภูมิ 50 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0370	1.0000	0.5000	0.0037	10980	0.0123
2	0.0300	1.0000	0.5000	0.0030	19171	0.0087
3	0.0351	1.0000	0.5000	0.0035	14044	0.0101
4	0.0300	1.0000	0.5000	0.0030	17674	0.0094
5	0.0290	1.0000	0.5000	0.0029	16384	0.0105
เฉลี่ย						0.0102
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0014

ตารางที่ ก.49 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ณ อุณหภูมิ 60 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0250	1.0000	0.5000	0.0025	3169	0.0631
2	0.0268	1.0000	0.5000	0.0027	2399	0.0779
3	0.0239	1.0000	0.5000	0.0024	3446	0.0608
4	0.0229	1.0000	0.5000	0.0023	3604	0.0606
เฉลี่ย						0.0656
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0083

ตารางที่ ก.50 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 60 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0171	1.0200	0.3950	0.0017	5858	0.0386
2	0.0179	0.9600	0.3950	0.0017	7264	0.0317
3	0.0200	0.9650	0.3950	0.0019	6257	0.0327
4	0.0190	1.0300	0.3950	0.0020	5048	0.0400
เฉลี่ย						0.0357
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0042

ตารางที่ ก.51 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 60 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0180	0.9450	0.3950	0.0017	3719	0.0624
2	0.0240	1.1200	0.3950	0.0027	2194	0.0670
3	0.0230	0.9600	0.3950	0.0022	2663	0.0672
4	0.0238	1.0200	0.3950	0.0024	2268	0.0719
เฉลี่ย						0.0671
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0039

ตารางที่ ก.52 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 60 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0240	1.0500	0.3950	0.0025	1882	0.0833
2	0.0228	1.0400	0.3950	0.0024	1861	0.0897
3	0.0176	0.9650	0.3950	0.0017	2996	0.0775
4	0.0350	1.1400	0.3950	0.0040	1101	0.0899
เฉลี่ย						0.0851
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0059



ตารางที่ ก.53 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรน Alginate ณ อุณหภูมิ 60 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0230	1.0500	0.3950	0.0024	13445	0.0122
2	0.0239	0.9400	0.3950	0.0022	14444	0.0122
3	0.0173	0.9100	0.3950	0.0016	24606	0.0102
4	0.0231	1.0600	0.3950	0.0025	13679	0.0118
เฉลี่ย						0.0116
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0009

ตารางที่ ก.54 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ณ อุณหภูมิ 68 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0160	1.0000	0.5000	0.0016	15920	0.0196
2	0.0139	1.0000	0.5000	0.0014	17809	0.0202
3	0.0160	1.0000	0.5000	0.0016	16278	0.0192
4	0.0240	1.0000	0.5000	0.0024	10049	0.0207
5	0.0240	1.0000	0.5000	0.0024	10508	0.0198
เฉลี่ย						0.0199
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0006



ตารางที่ ก.55 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 68 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0229	1.0000	0.5000	0.0023	5415	0.0404
2	0.0310	1.1000	0.5000	0.0034	3252	0.0451
3	0.0300	1.0000	0.5000	0.0030	3827	0.0436
4	0.0280	1.0000	0.5000	0.0028	4039	0.0442
เฉลี่ย						0.0433
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0021

ตารางที่ ก.56 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 68 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0265	1.0000	0.5000	0.0027	2683	0.0703
2	0.0250	1.0000	0.5000	0.0025	2872	0.0696
3	0.0240	1.0000	0.5000	0.0024	2995	0.0696
4	0.0225	1.0000	0.5000	0.0023	3491	0.0637
เฉลี่ย						0.0683
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0031

ตารางที่ ก.57 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 68 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0238	0.9500	0.5000	0.0023	2587	0.0857
2	0.0278	0.9650	0.5000	0.0027	2072	0.0901
3	0.0236	0.9500	0.5000	0.0022	2561	0.0870
4	0.0234	1.0000	0.5000	0.0023	2518	0.0850
5	0.0300	1.0000	0.5000	0.0030	1882	0.0885
เฉลี่ย						0.0872
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0021

ตารางที่ ก.58 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรน Alginate ณ อุณหภูมิ 68 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0299	1.0000	0.5000	0.0030	14023	0.0119
2	0.0366	1.0000	0.5000	0.0037	11800	0.0116
3	0.0339	1.0000	0.5000	0.0034	10646	0.0139
4	0.0280	1.0000	0.5000	0.0028	15866	0.0113
เฉลี่ย						0.0122
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0012

ตารางที่ ก.59 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ณ อุณหภูมิ 80 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0181	1.0500	0.5000	0.0019	11847	0.0222
2	0.0160	0.9250	0.5000	0.0015	15954	0.0212
3	0.0130	0.9000	0.5000	0.0012	25172	0.0170
4	0.0150	0.9300	0.5000	0.0014	16799	0.0213
เฉลี่ย						0.0204
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0023

ตารางที่ ก.60 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 80 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0229	1.0200	0.5000	0.0023	5170	0.0414
2	0.0201	0.9600	0.5000	0.0019	5938	0.0436
3	0.0240	0.9850	0.5000	0.0024	4258	0.0497
4	0.0251	1.0000	0.5000	0.0025	4308	0.0462
เฉลี่ย						0.0452
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0035

ตารางที่ ก.61 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 80 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0240	0.9850	0.5000	0.0024	2972	0.0712
2	0.0241	0.9950	0.5000	0.0024	2948	0.0707
3	0.0250	1.0000	0.5000	0.0025	2723	0.0735
4	0.0230	0.9650	0.5000	0.0022	3361	0.0670
เฉลี่ย						0.0706
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0027

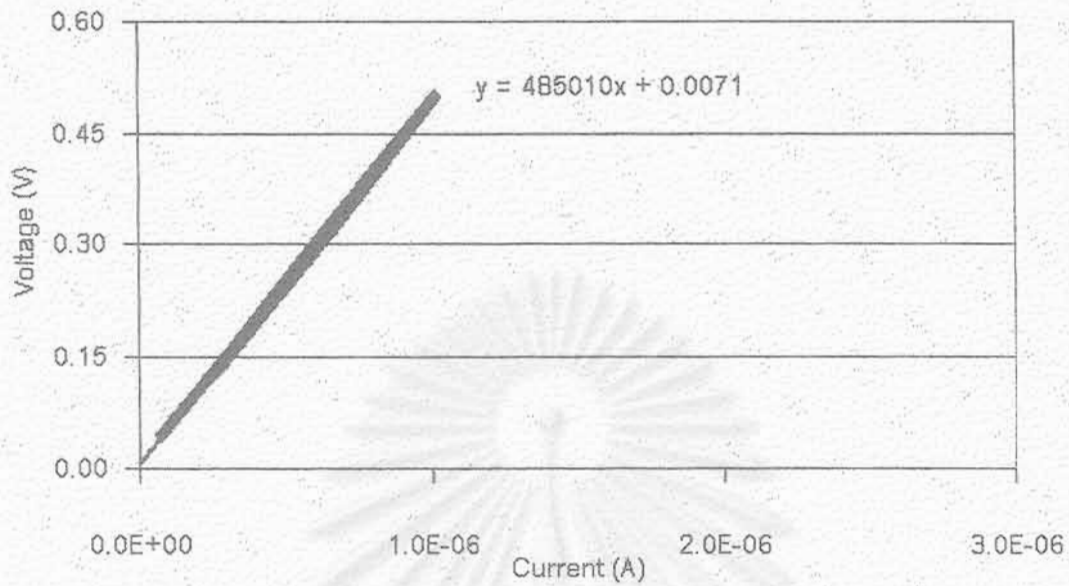
ตารางที่ ก.62 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 80 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0240	0.9550	0.5000	0.0023	2100	0.1039
2	0.0300	1.0500	0.5000	0.0032	1524	0.1042
3	0.0499	1.1500	0.5000	0.0057	687	0.1269
4	0.0251	0.9650	0.5000	0.0024	1925	0.1071
เฉลี่ย						0.1105
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0110

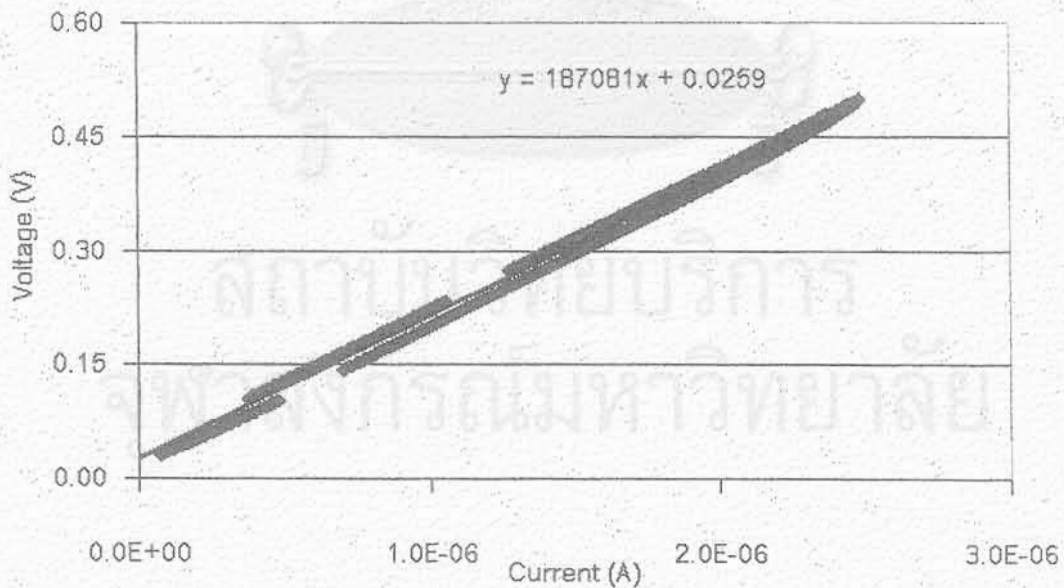
ตารางที่ ก.63 ค่าการนำไฟฟ้าของเมมเบรน Alginate ณ อุณหภูมิ 80 °C

ตัวอย่างที่	ความหนา เมมเบรน (มม.)	ความกว้าง เมมเบรน (ซม.)	ระยะลวด แพลตินัม (ซม.)	พื้นที่หน้าตัด เมมเบรน (ตร.ซม.)	ค่าความ ต้านทาน (โอห์ม)	ค่าการนำไฟ ฟ้า (โอห์ม/ ซม.)
1	0.0380	1.0500	0.5000	0.0040	8035	0.0156
2	0.0440	1.0400	0.5000	0.0046	6717	0.0163
3	0.0304	0.9100	0.5000	0.0028	12263	0.0148
4	0.0439	1.0900	0.5000	0.0048	6197	0.0169
เฉลี่ย						0.0159
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						0.0009

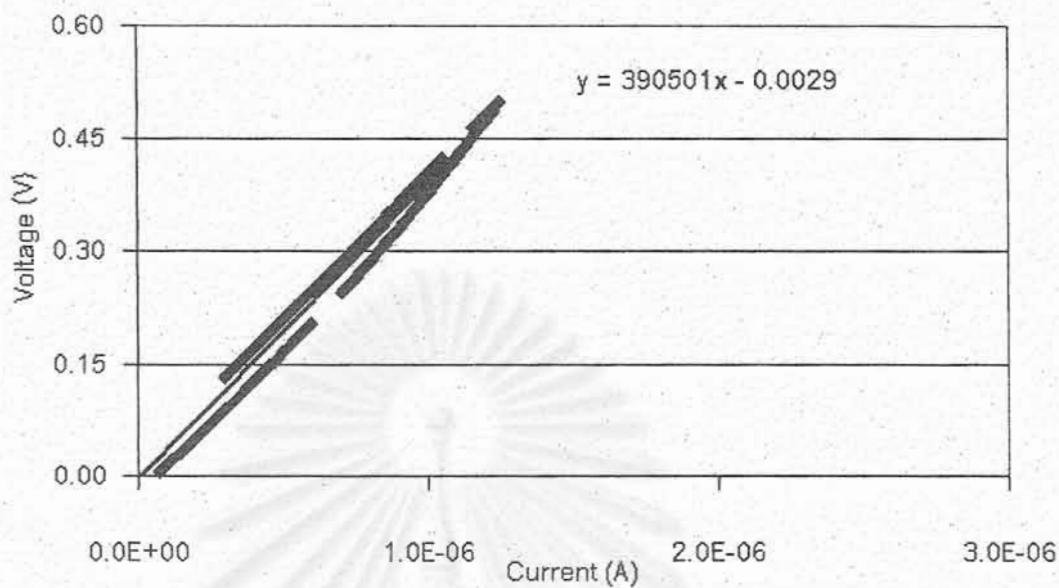
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



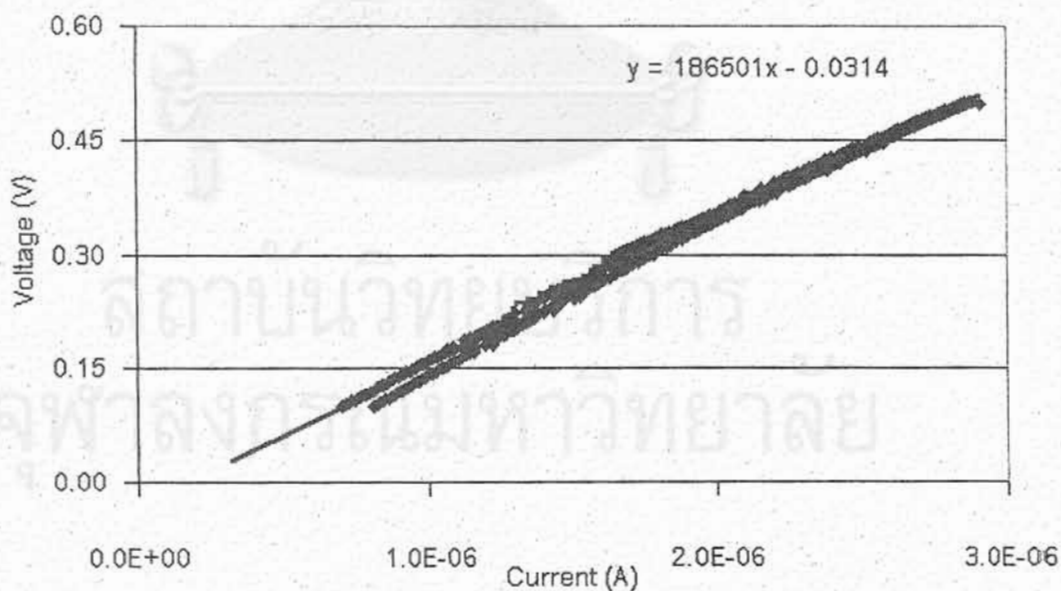
รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 40 °C



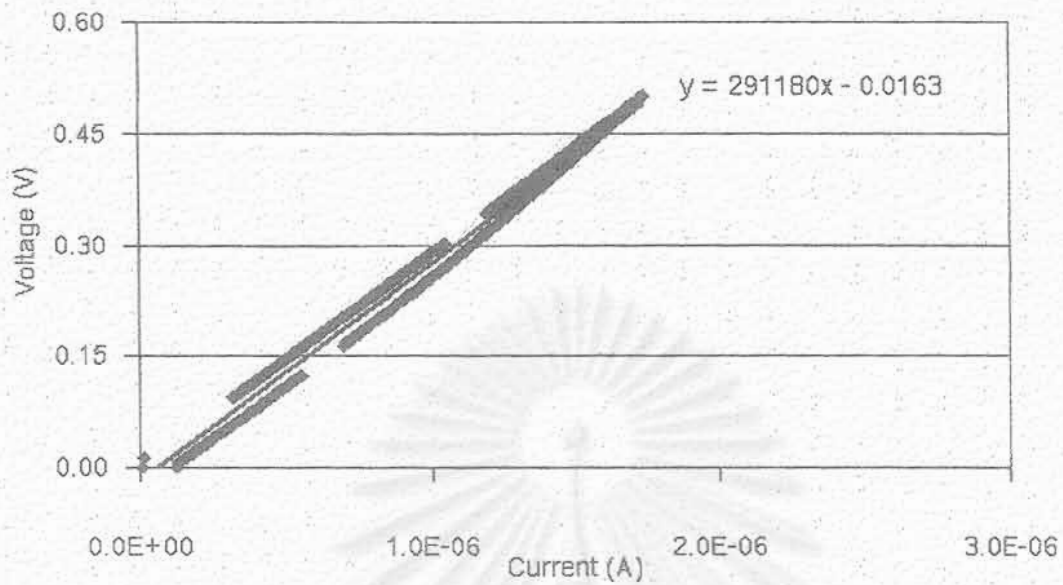
รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ 40 °C



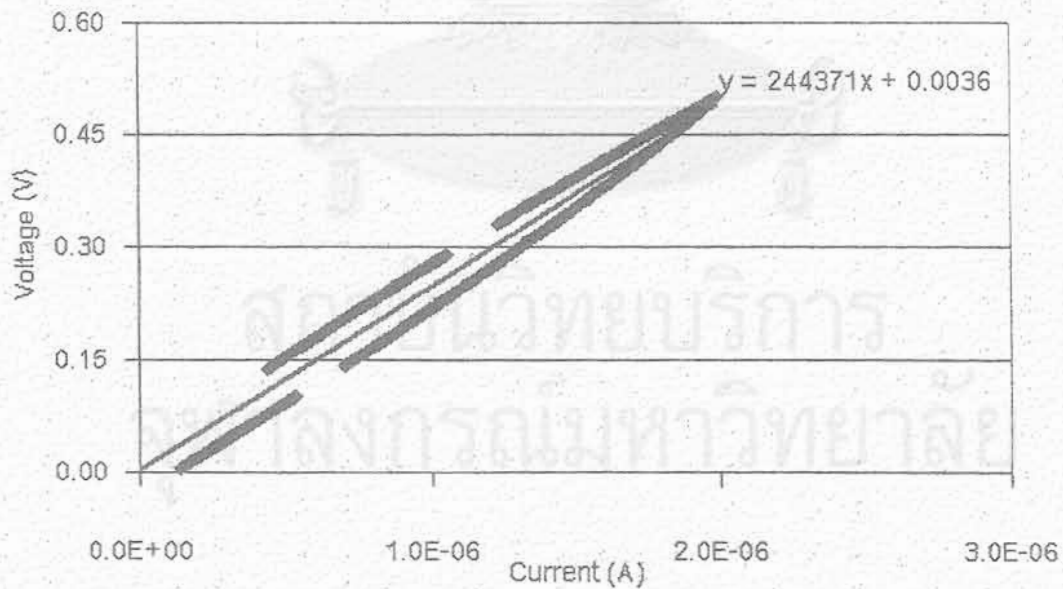
รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ไม่ถูกทำให้เกิด  
โครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 40 °C



รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ไม่ถูกทำให้เกิด  
โครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 40 °C

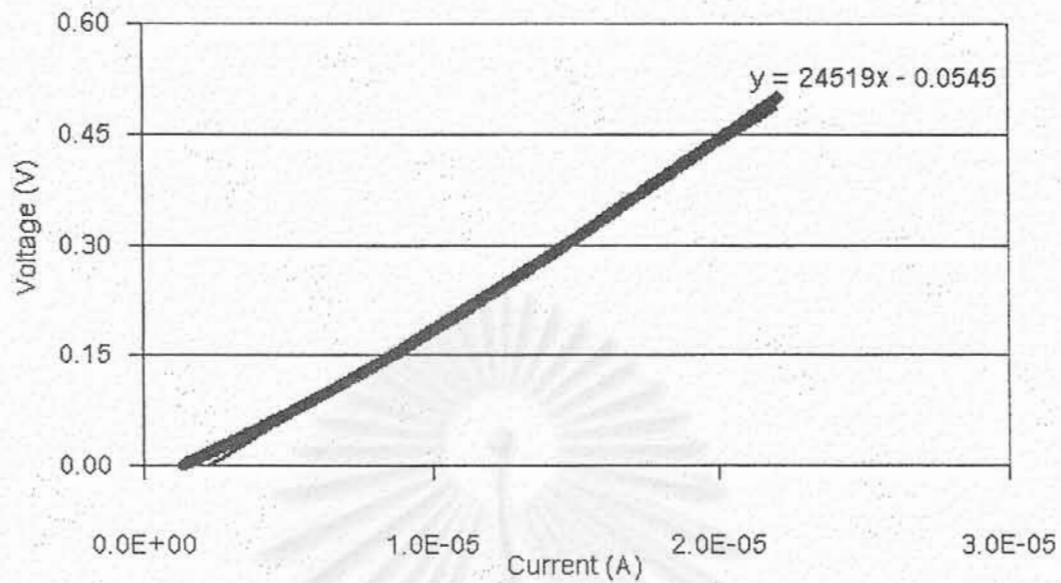


รูปที่ ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิด  
โครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 5 ณ อุณหภูมิ 40 °C

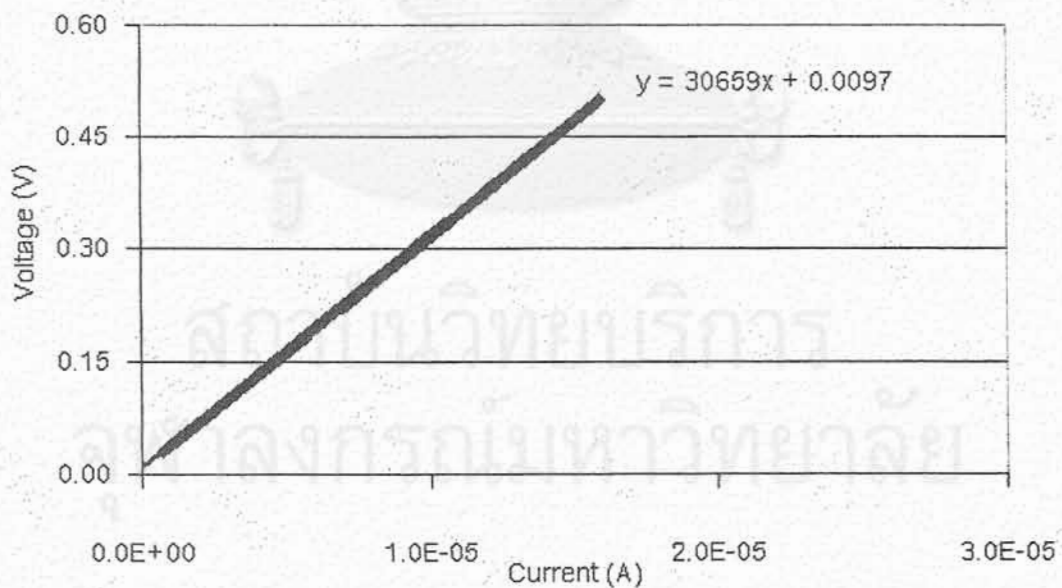


รูปที่ ก.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิด  
โครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 6 ณ อุณหภูมิ 40 °C

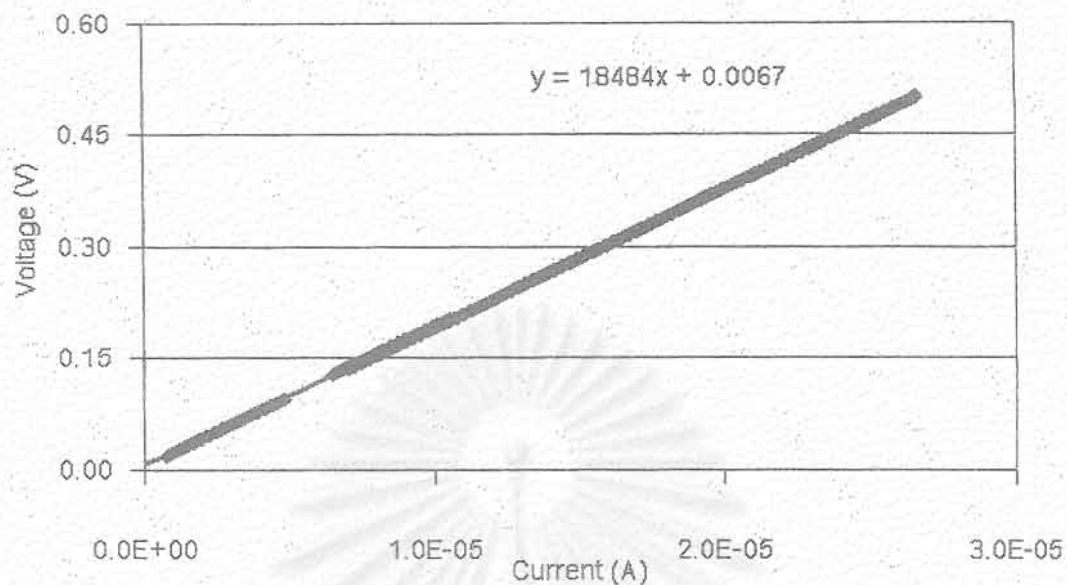




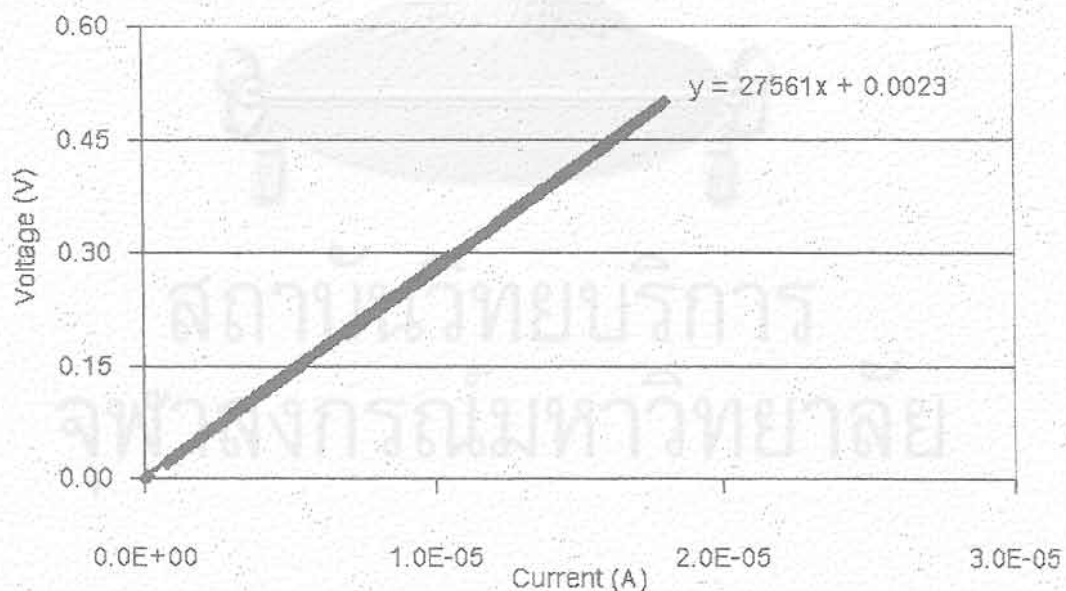
รูปที่ ก.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 40 °C



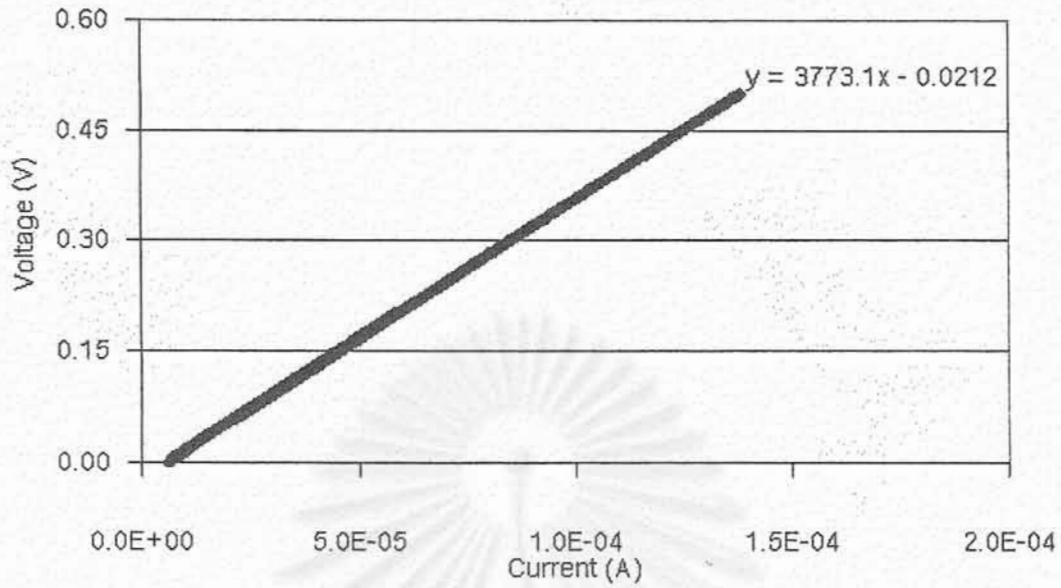
รูปที่ ก.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ 40 °C



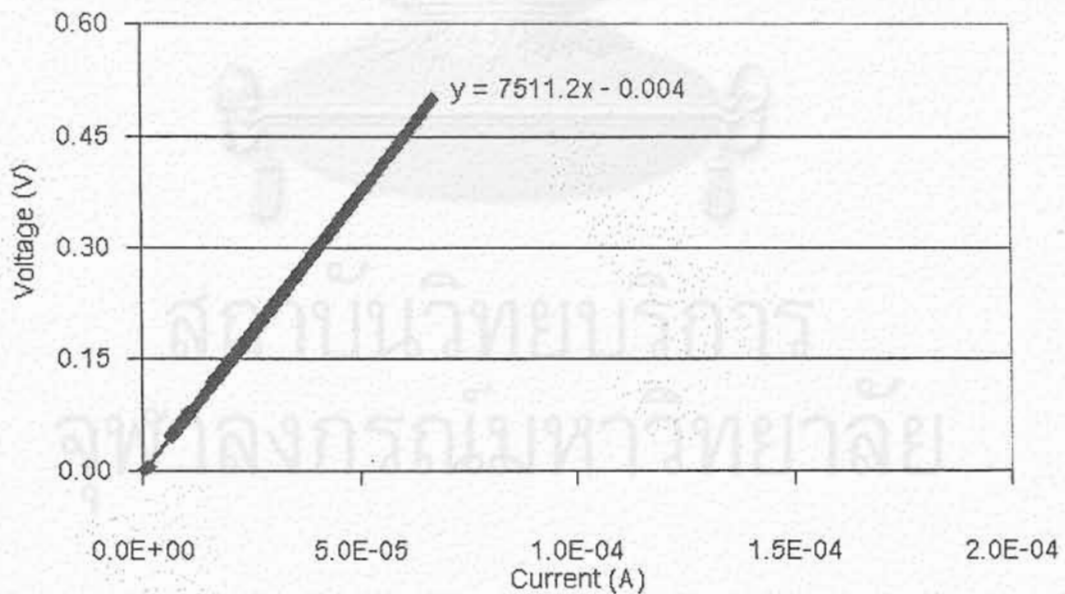
รูปที่ ก.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 40 °C



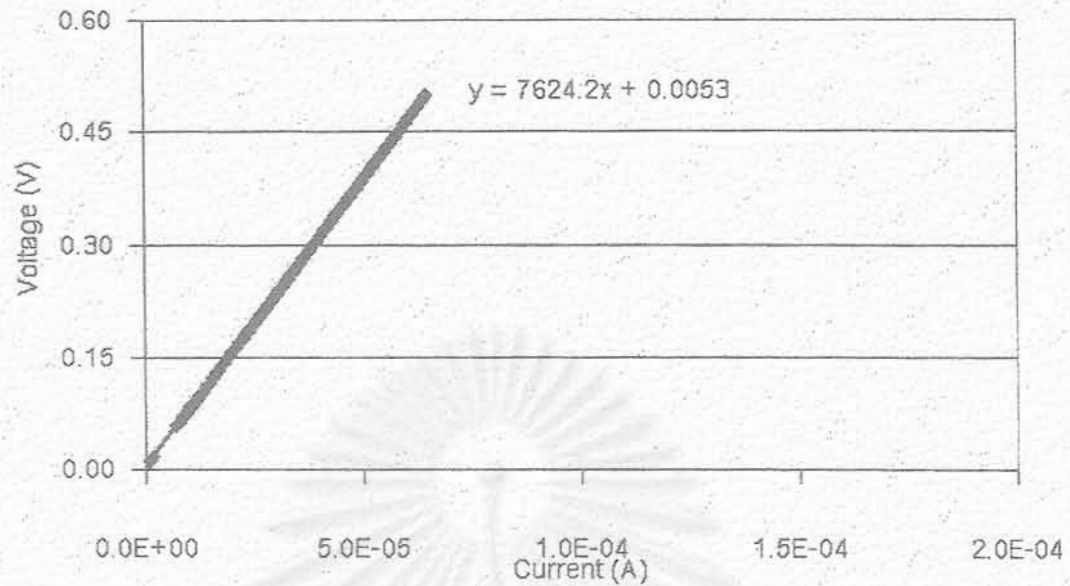
รูปที่ ก.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 40 °C



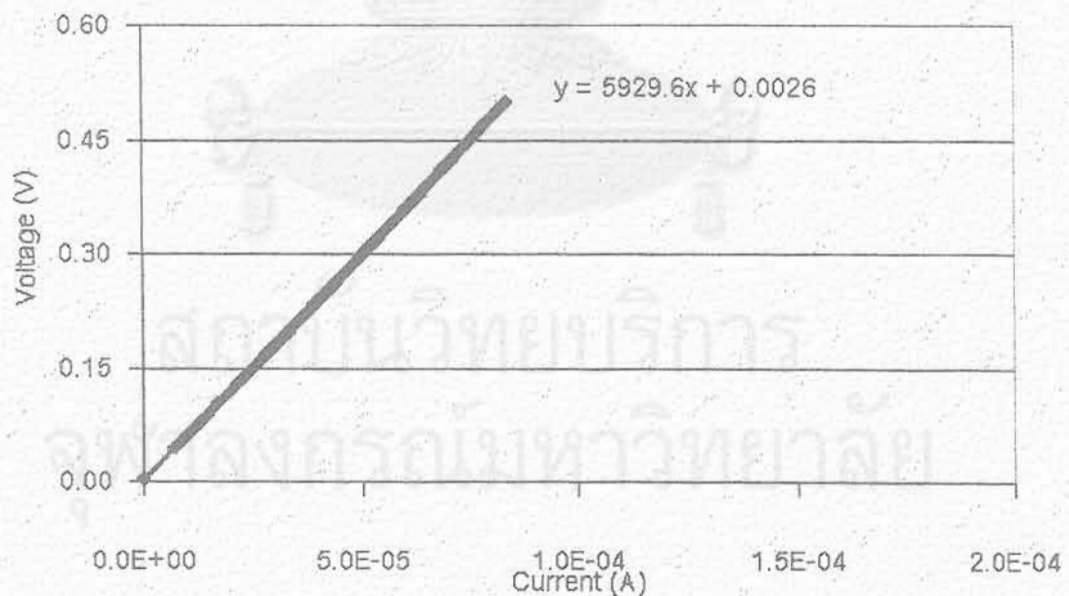
รูปที่ ก.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิด โครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 40 °C



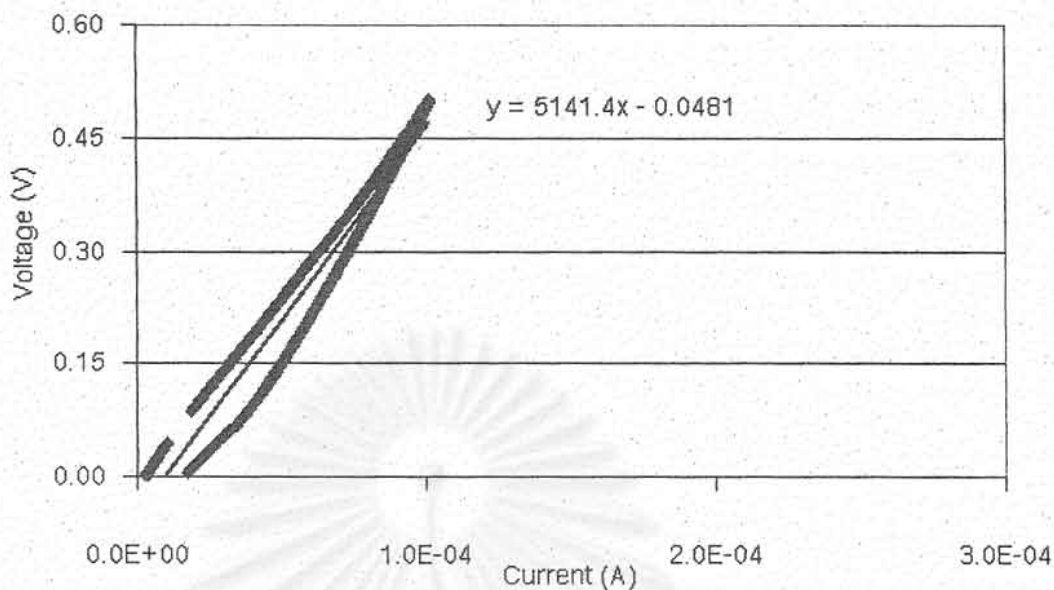
รูปที่ ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิด โครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ 40 °C



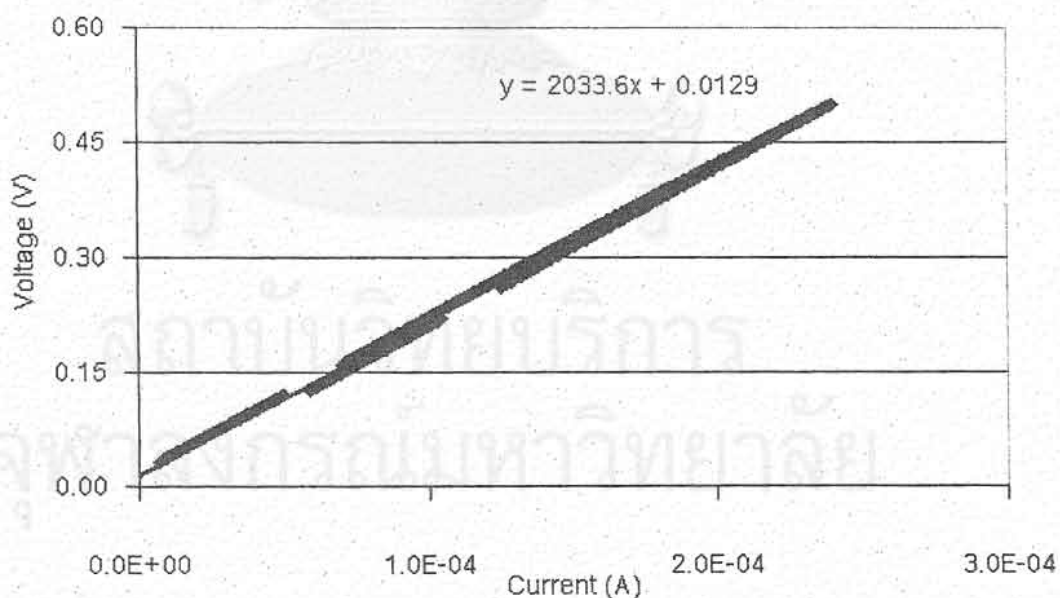
รูปที่ ก.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรอนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 40 °C



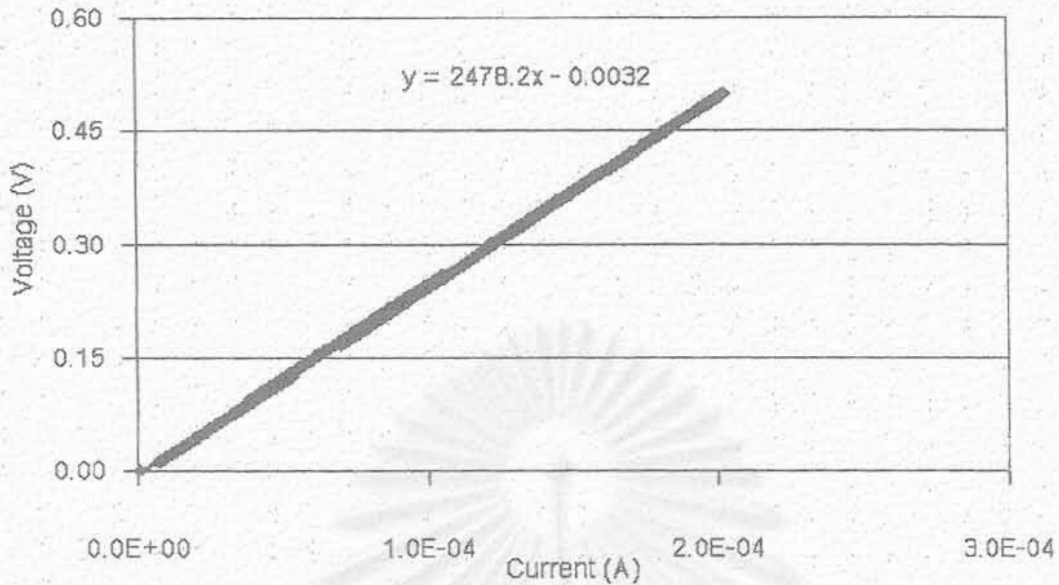
รูปที่ ก.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรอนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 40 °C



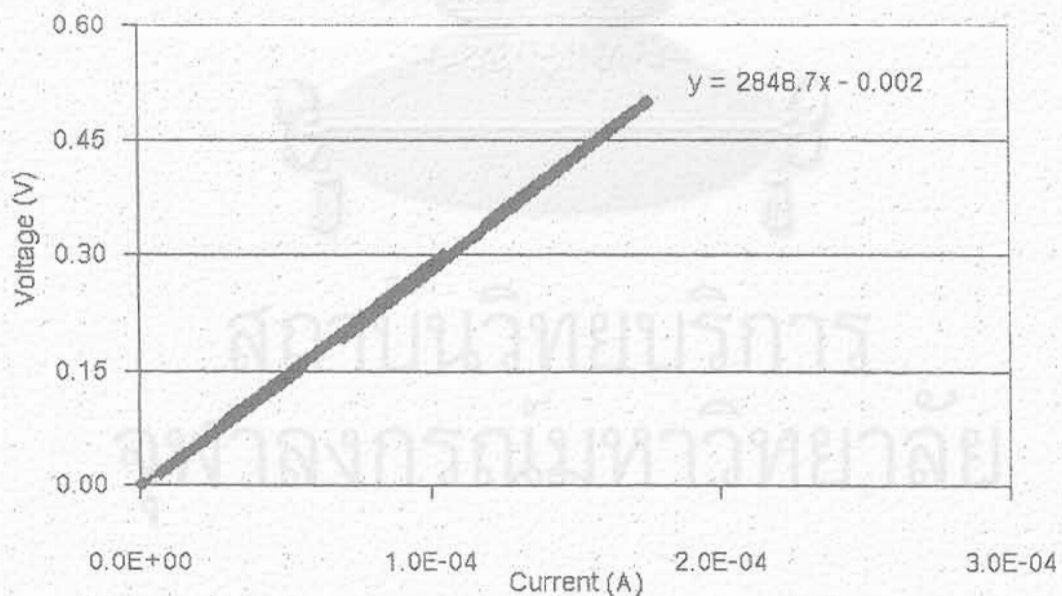
รูปที่ ก.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิด โครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 40 °C



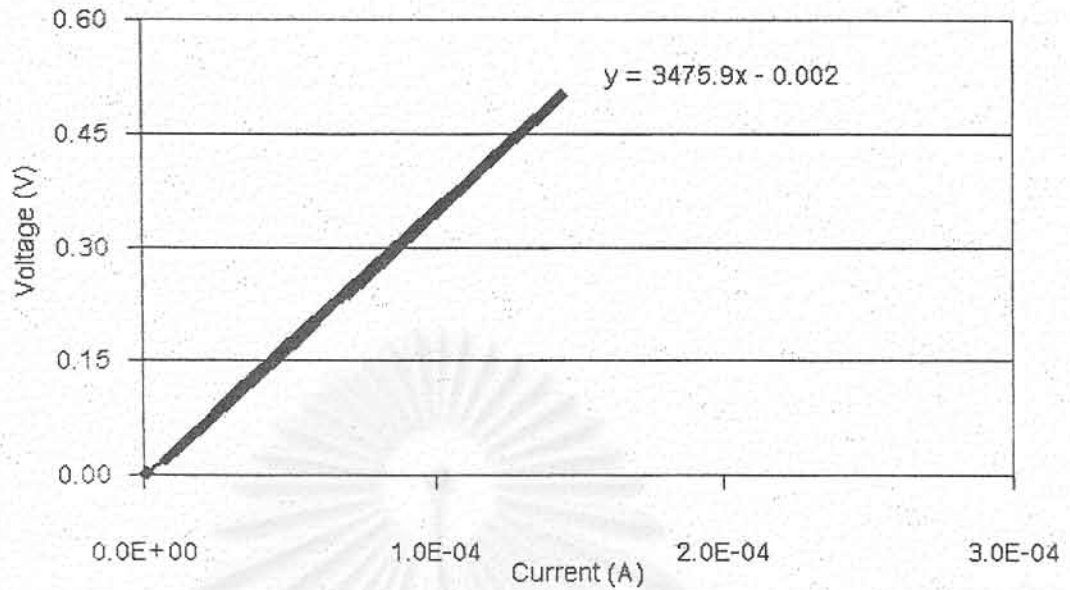
รูปที่ ก.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิด โครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ 40 °C



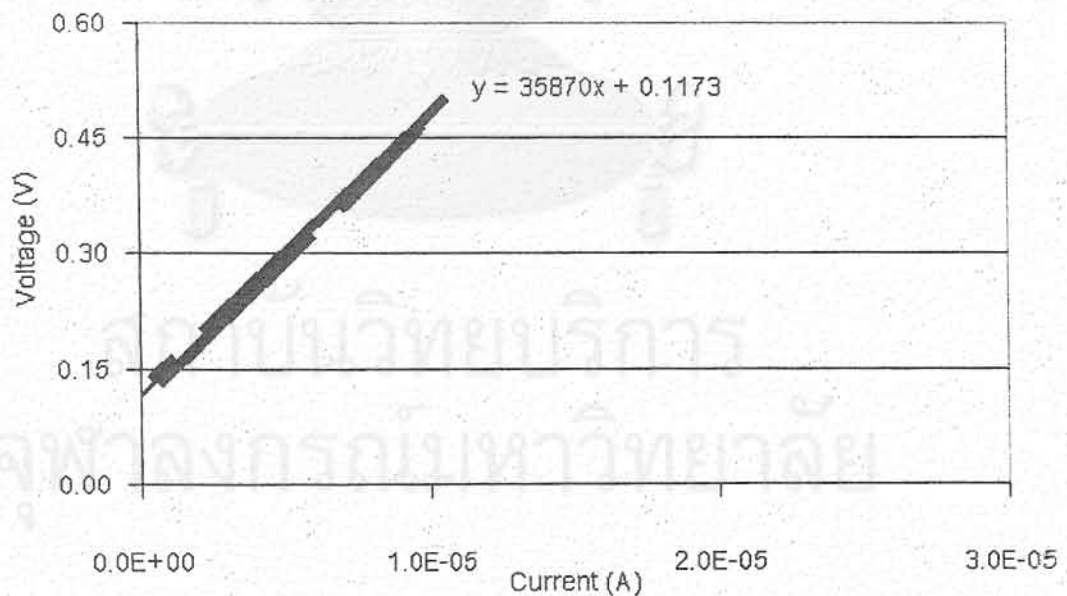
รูปที่ ก.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 40 °C



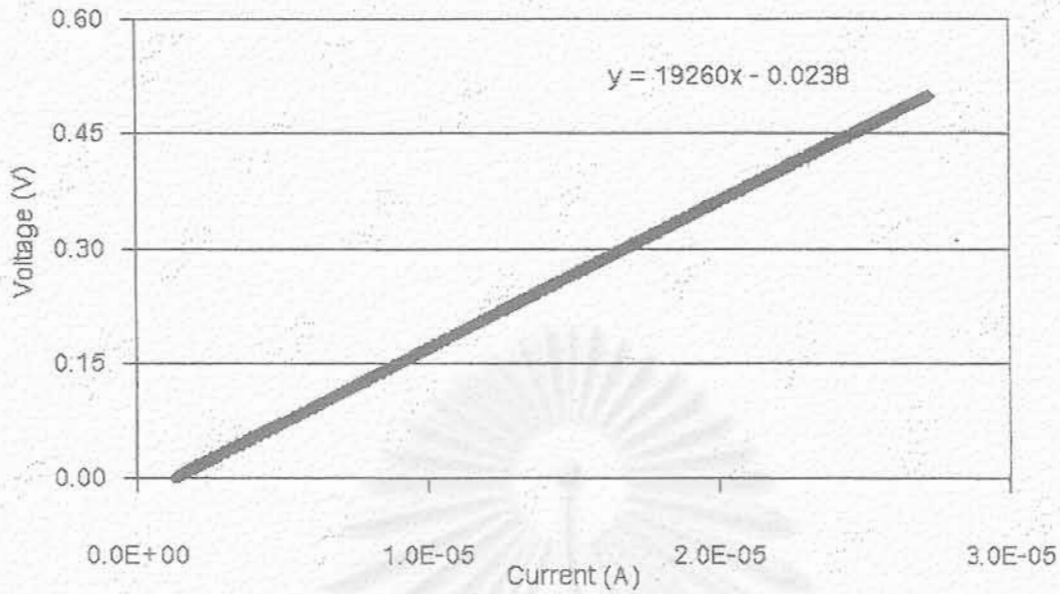
รูปที่ ก.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 40 °C



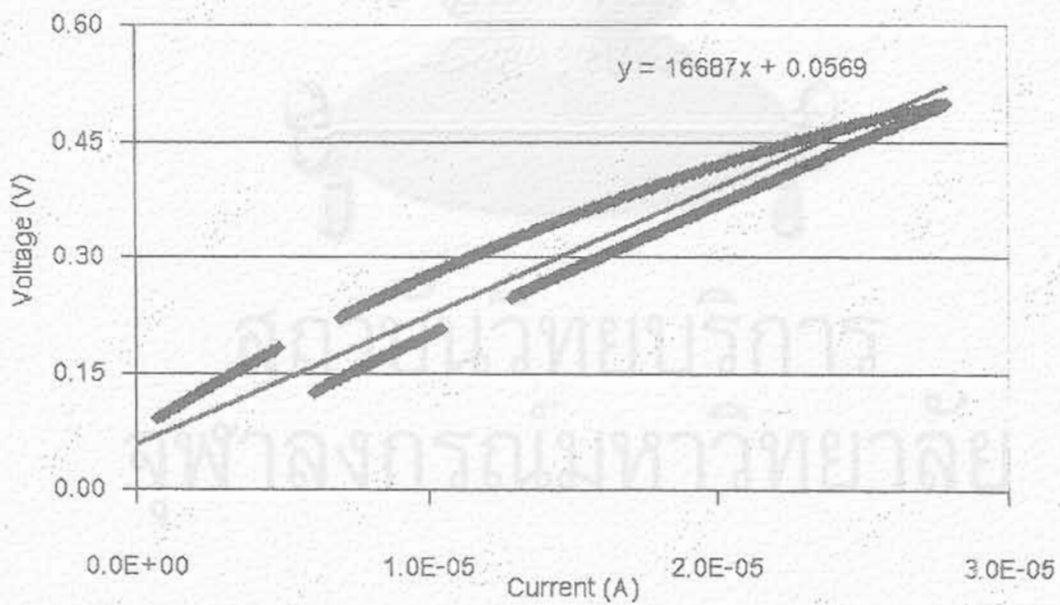
รูปที่ ก.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 5 ณ อุณหภูมิ 40 °C



รูปที่ ก.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรน Alginate ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 40 °C

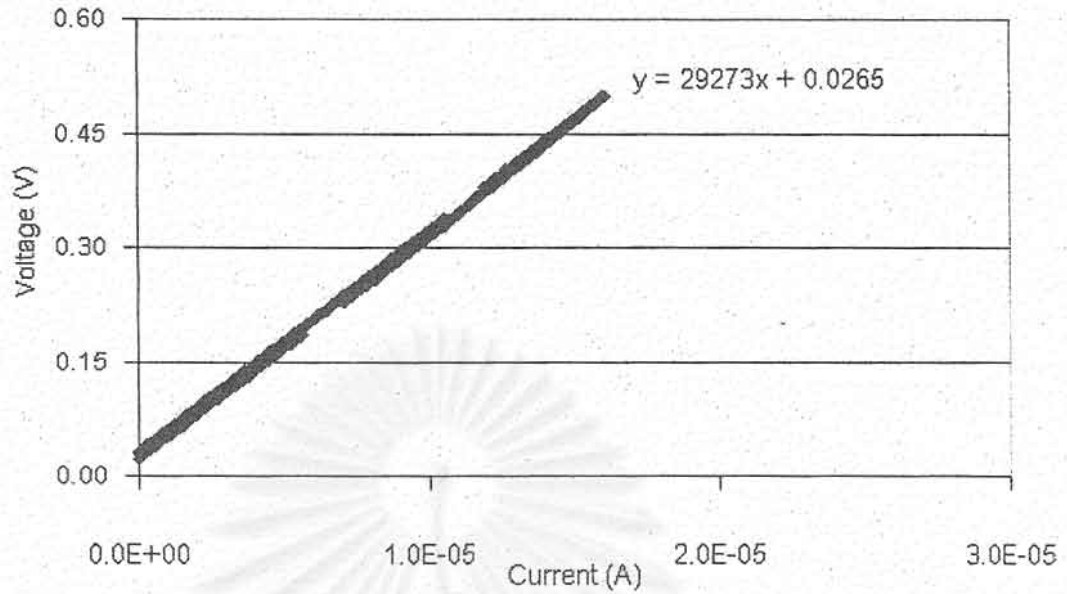


รูปที่ ก.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรน Algininate ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ 40 °C

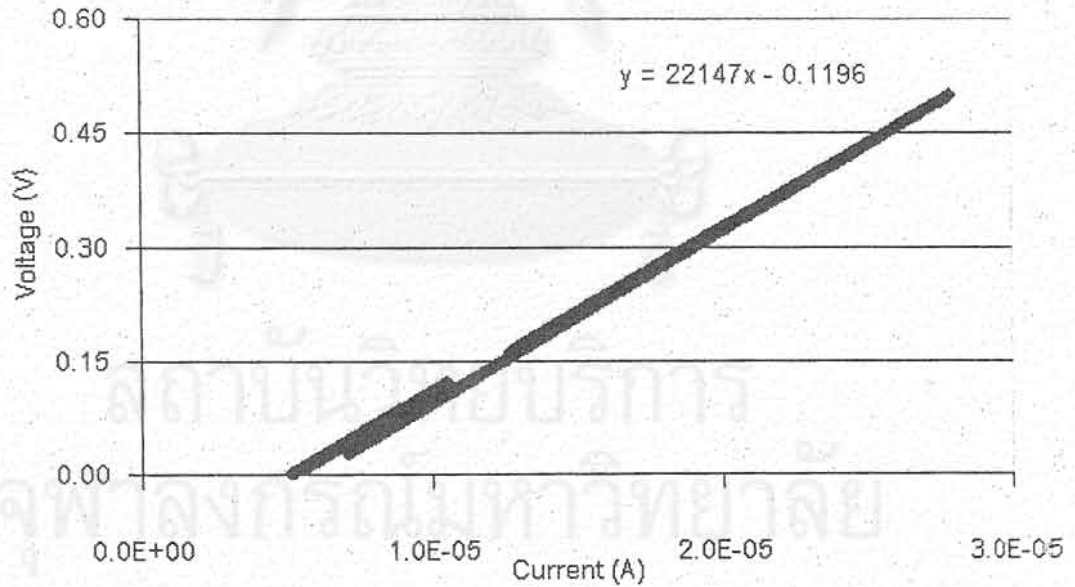


รูปที่ ก.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรน Algininate ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 40 °C

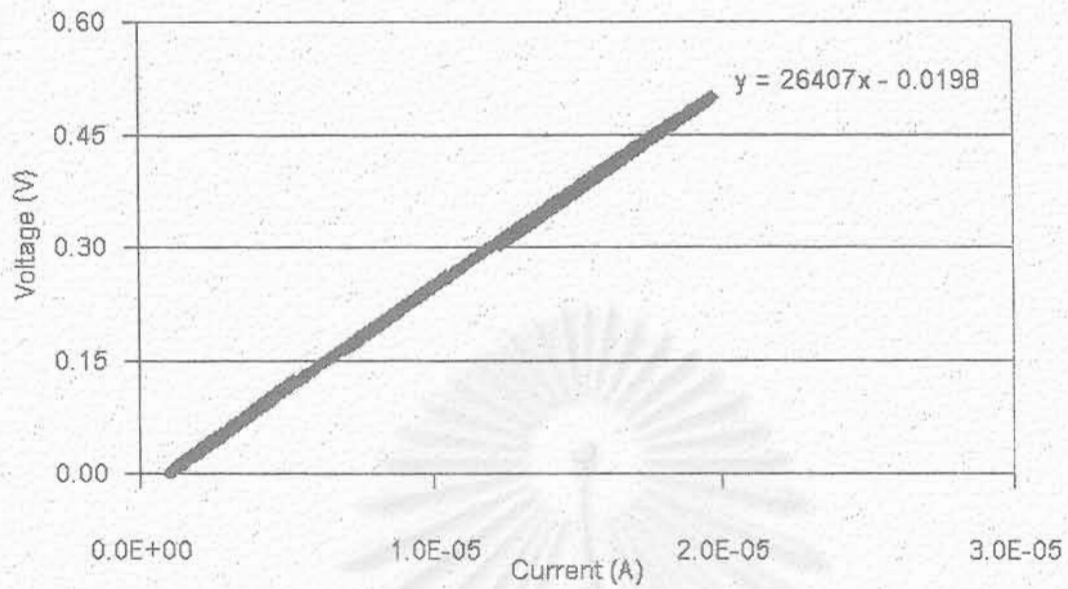




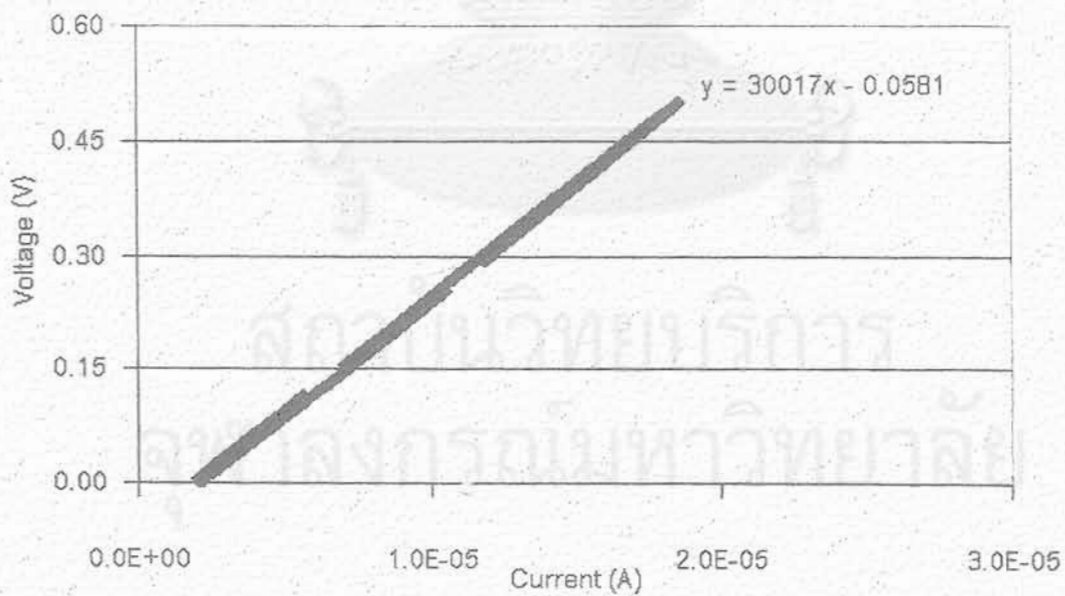
รูปที่ ก.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรน Alginate ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 40 °C



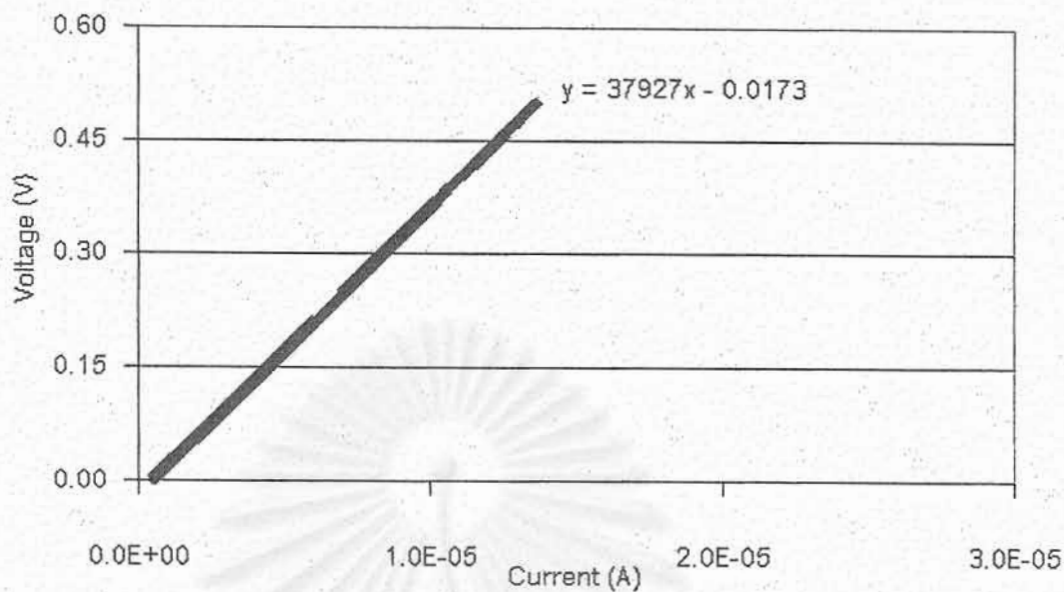
รูปที่ ก.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 50 °C



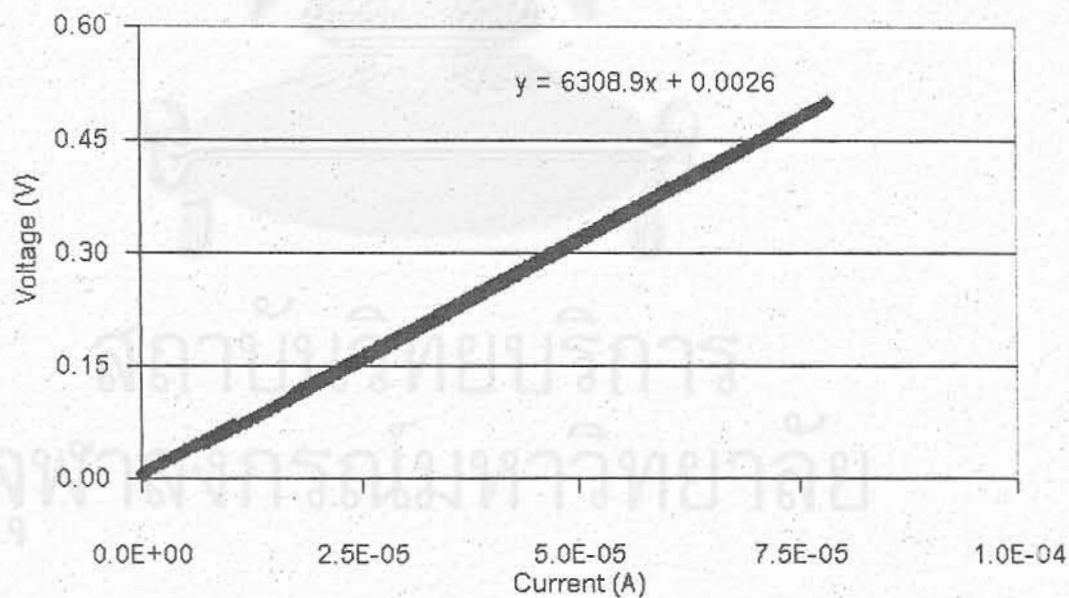
รูปที่ ก.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ 50 °C



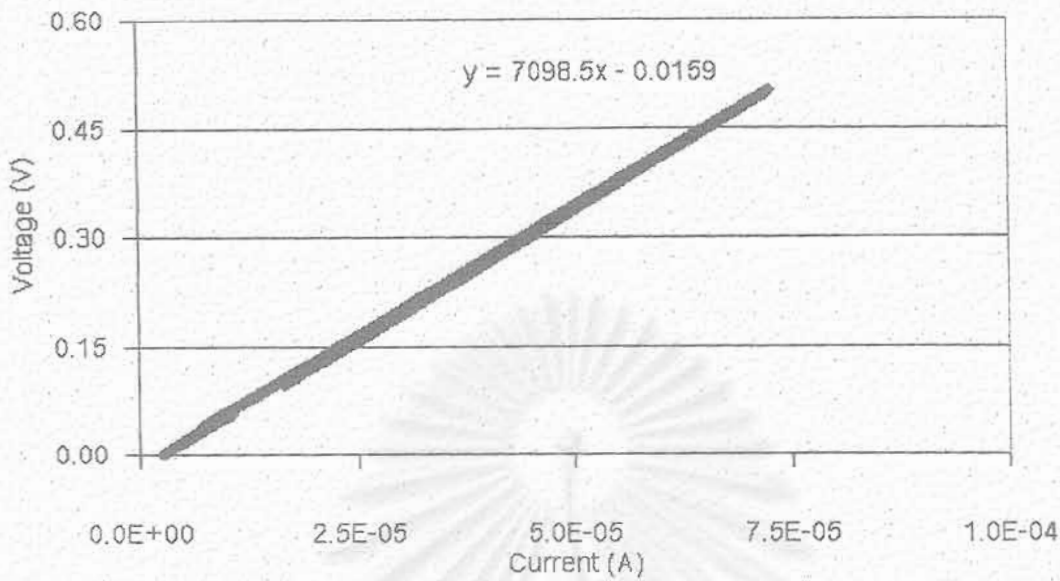
รูปที่ ก.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 50 °C



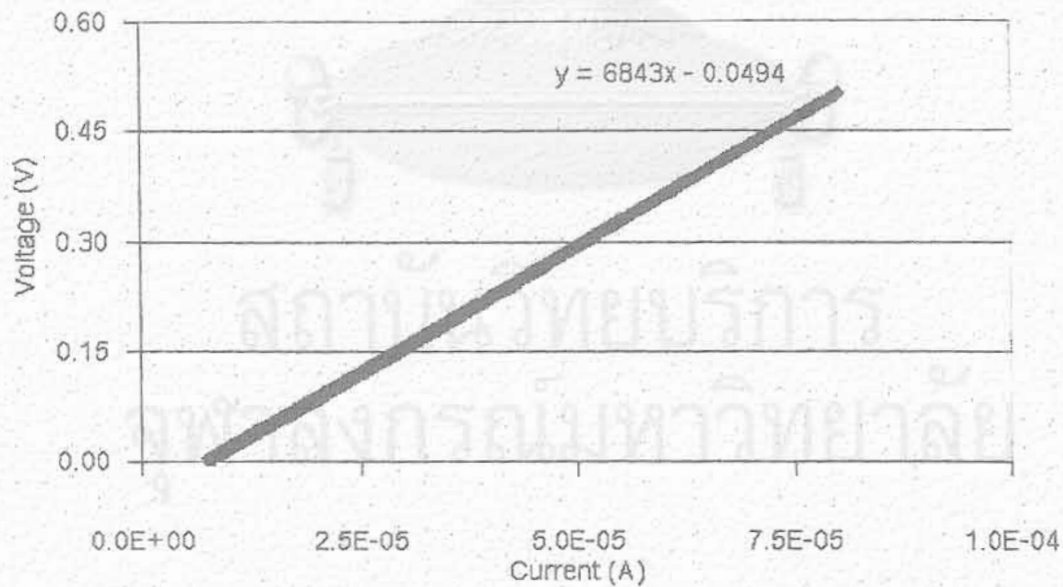
รูปที่ ก.27 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 50 °C



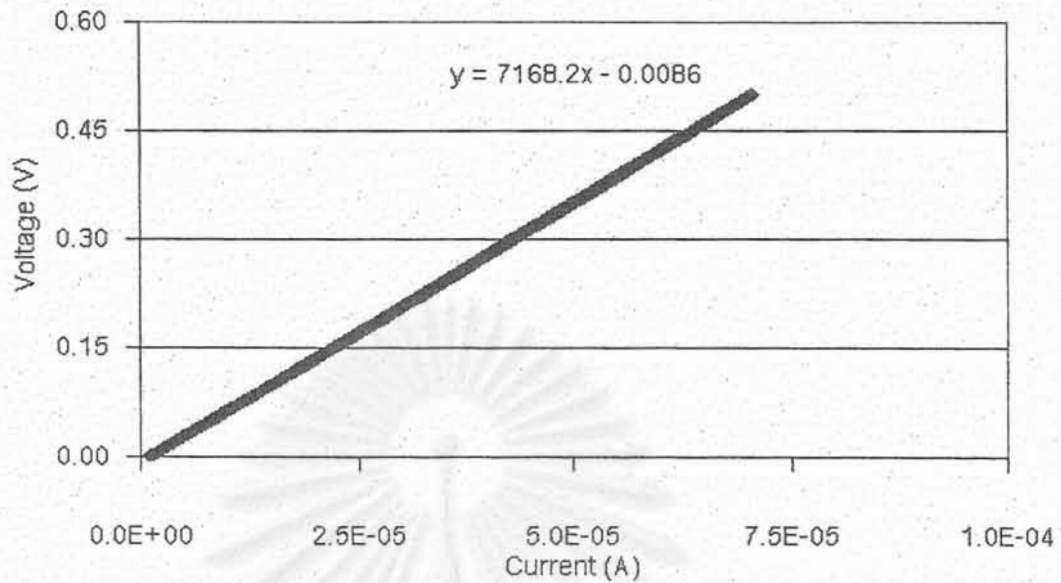
รูปที่ ก.28 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 50 °C



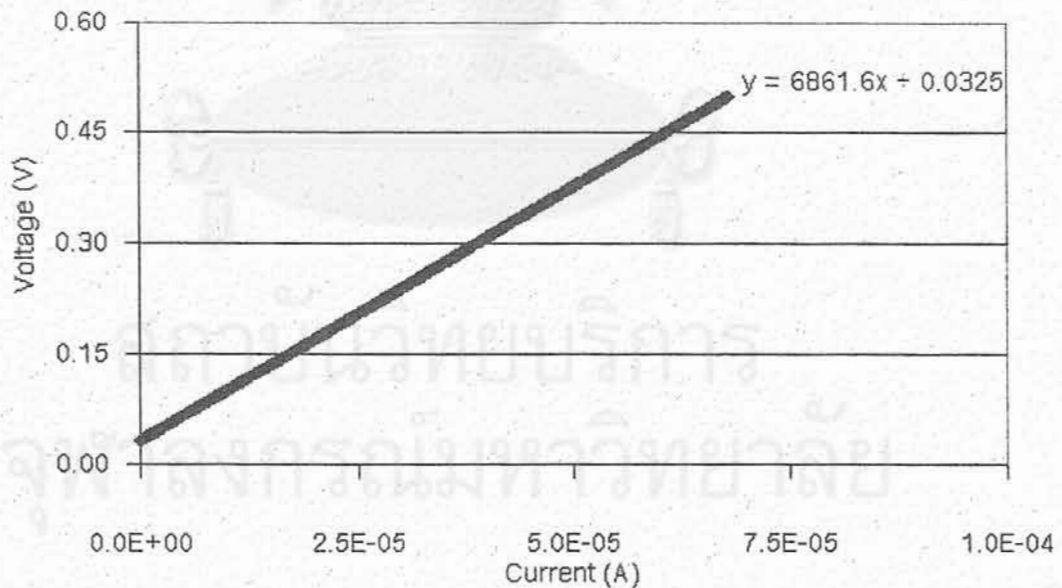
รูปที่ ก.29 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$



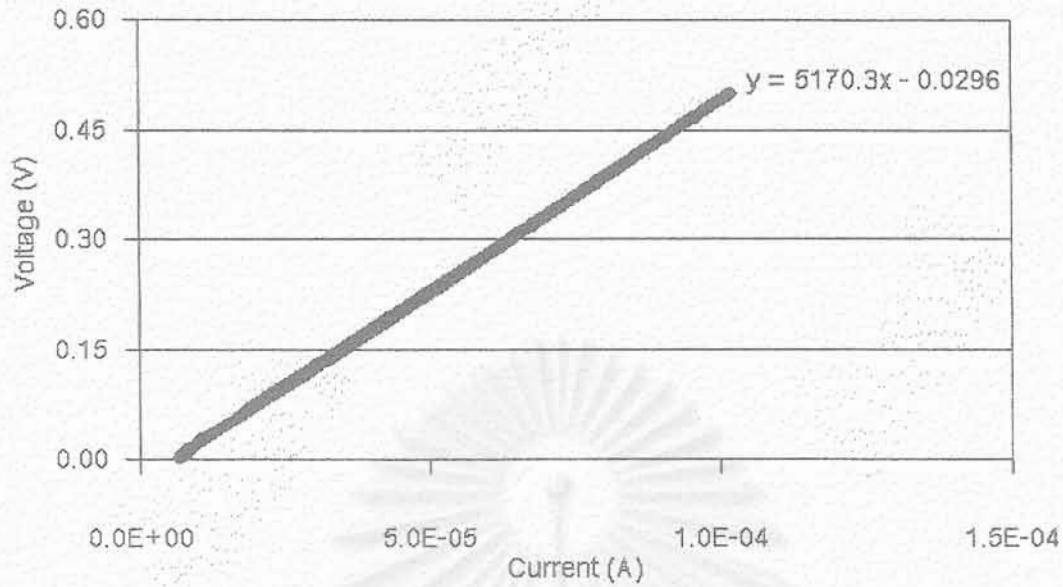
รูปที่ ก.30 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$



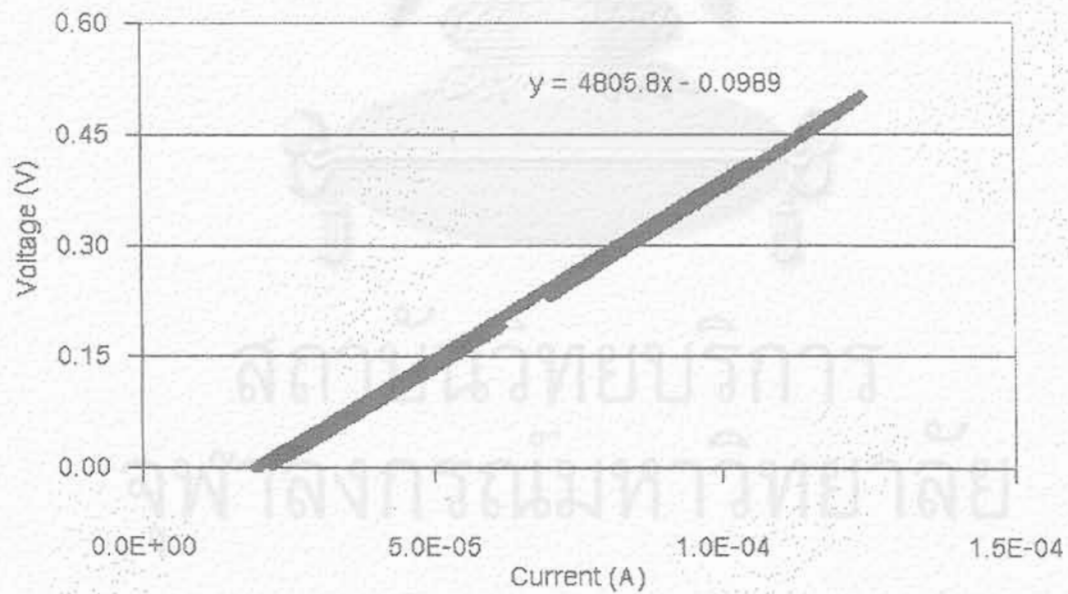
รูปที่ ก.31 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$



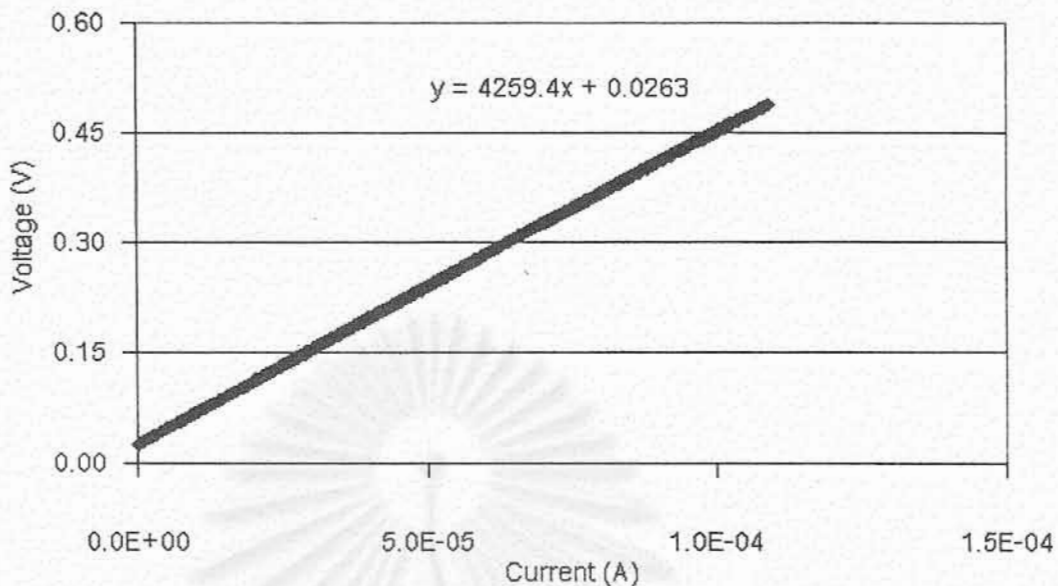
รูปที่ ก.32 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 5 ณ อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$



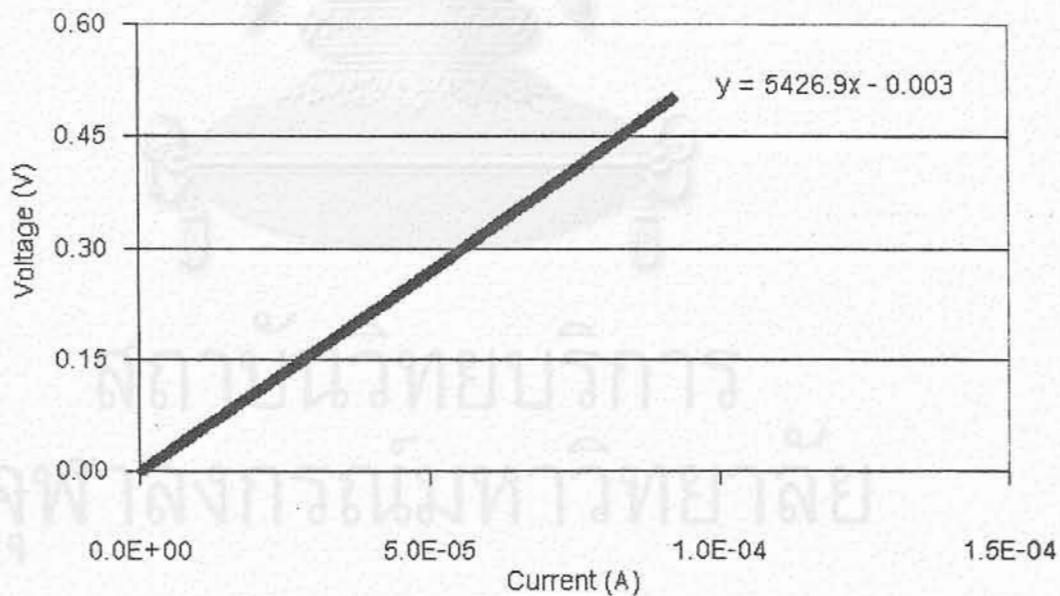
รูปที่ ก.33 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 50 °C



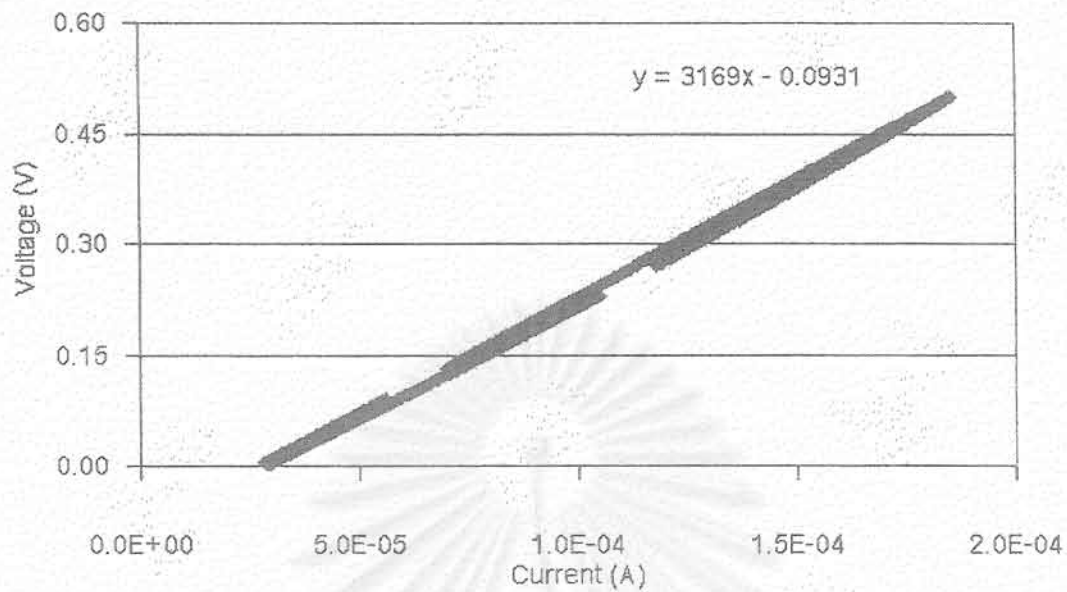
รูปที่ ก.34 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ 50 °C



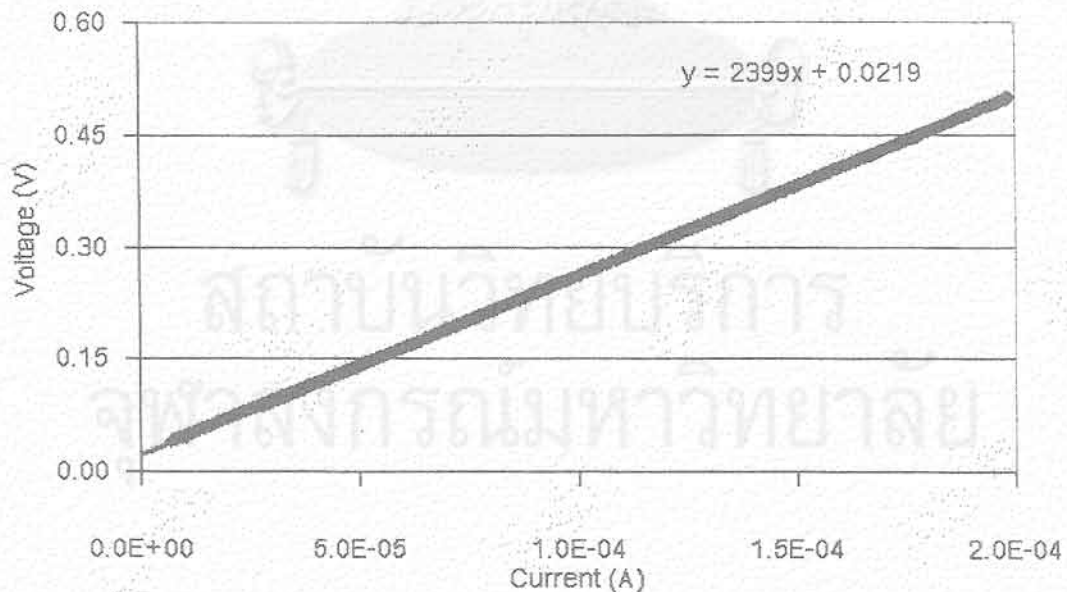
รูปที่ ก.35 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิด โครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 50 °C



รูปที่ ก.36 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิด โครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 50 °C

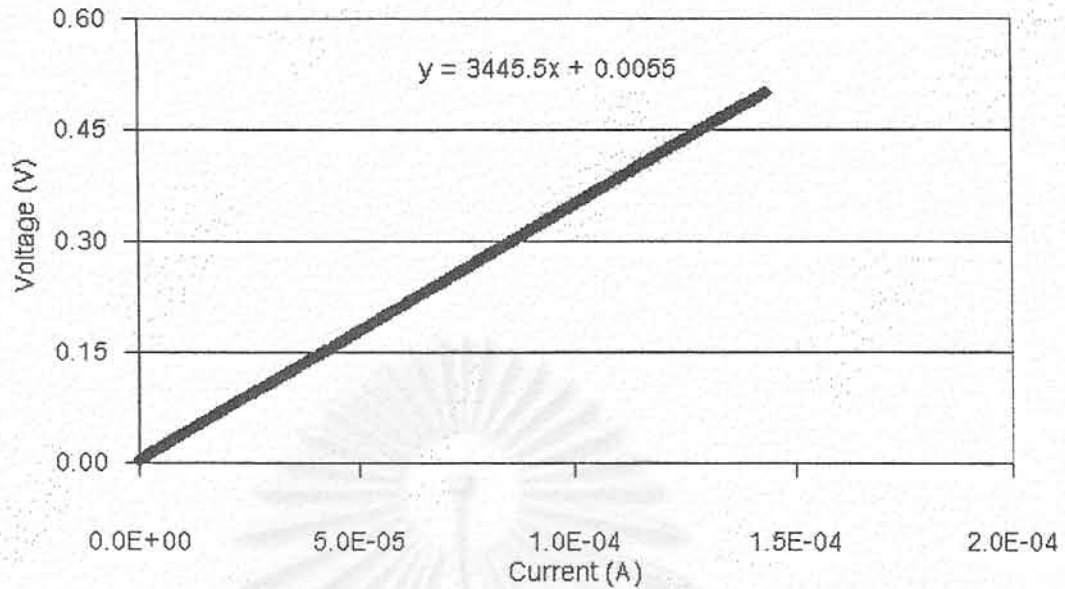


รูปที่ ก.37 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตะซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 50 °C

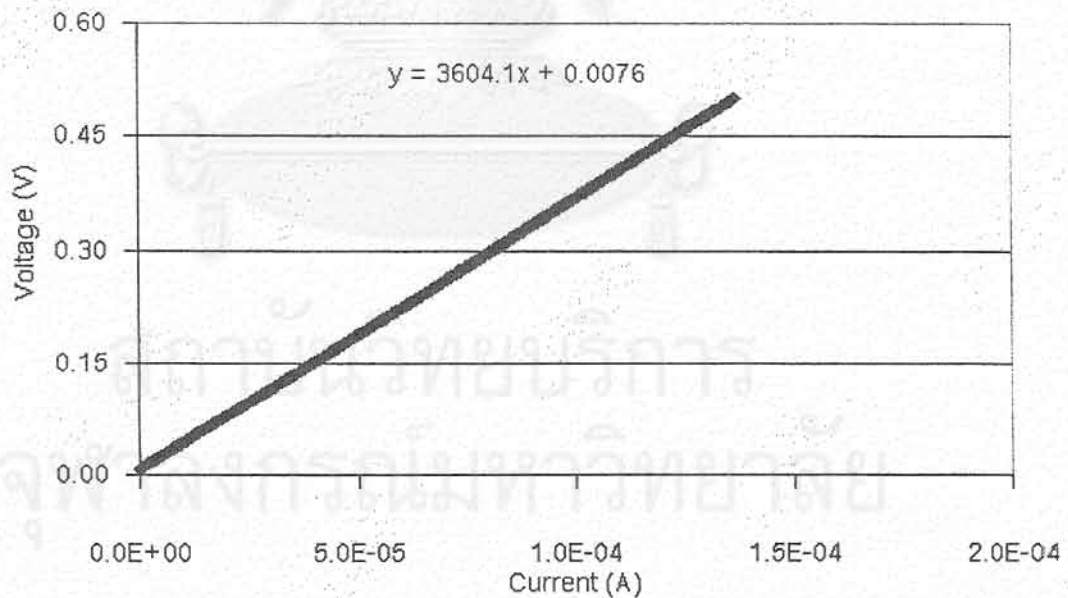


รูปที่ ก.38 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตะซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ 50 °C

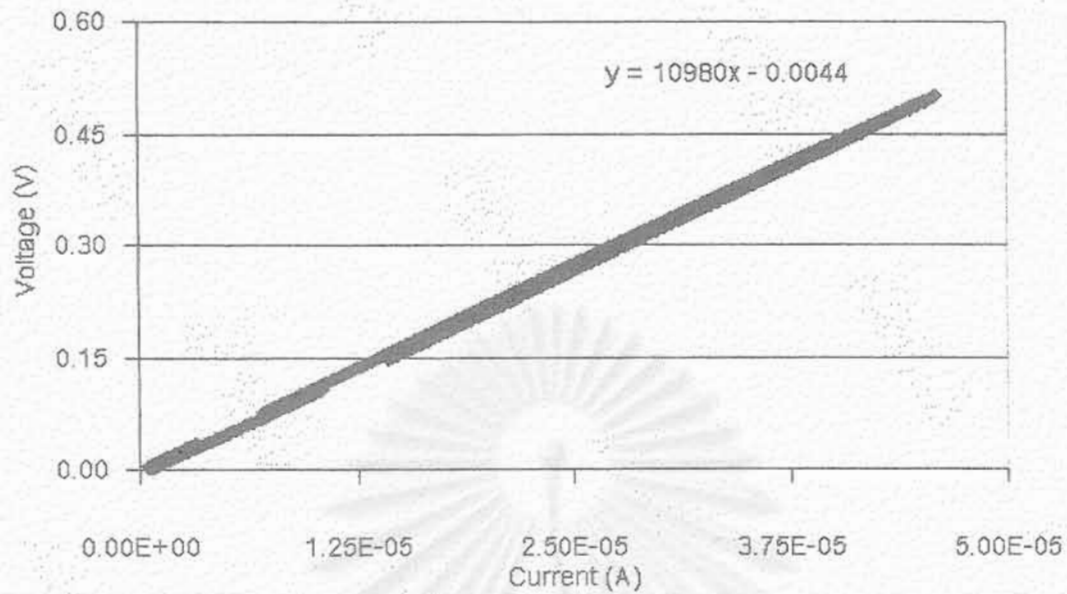




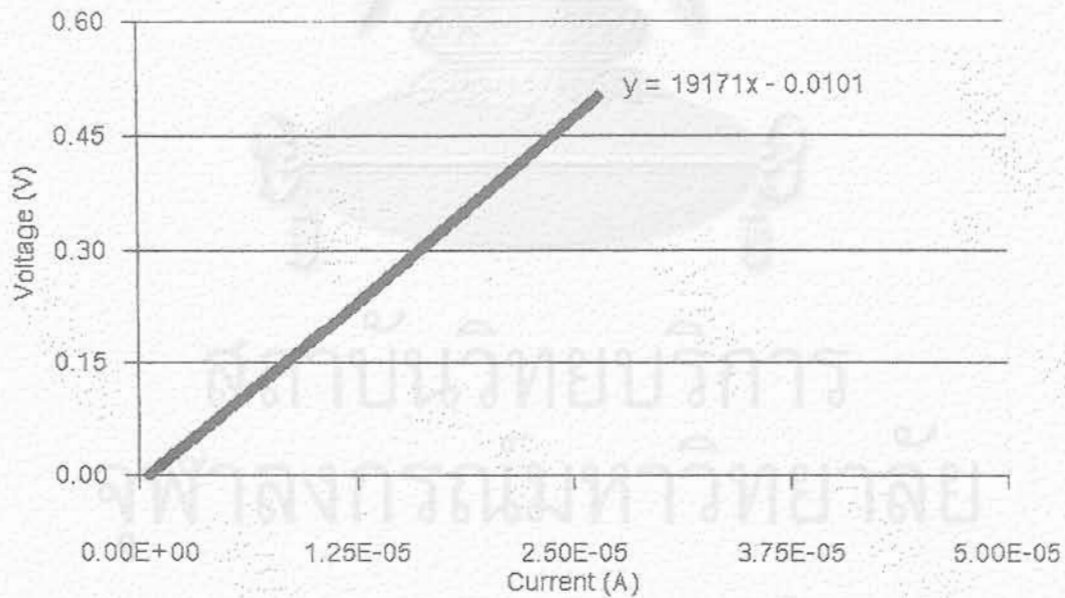
รูปที่ ก.39 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตะซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 50 °C



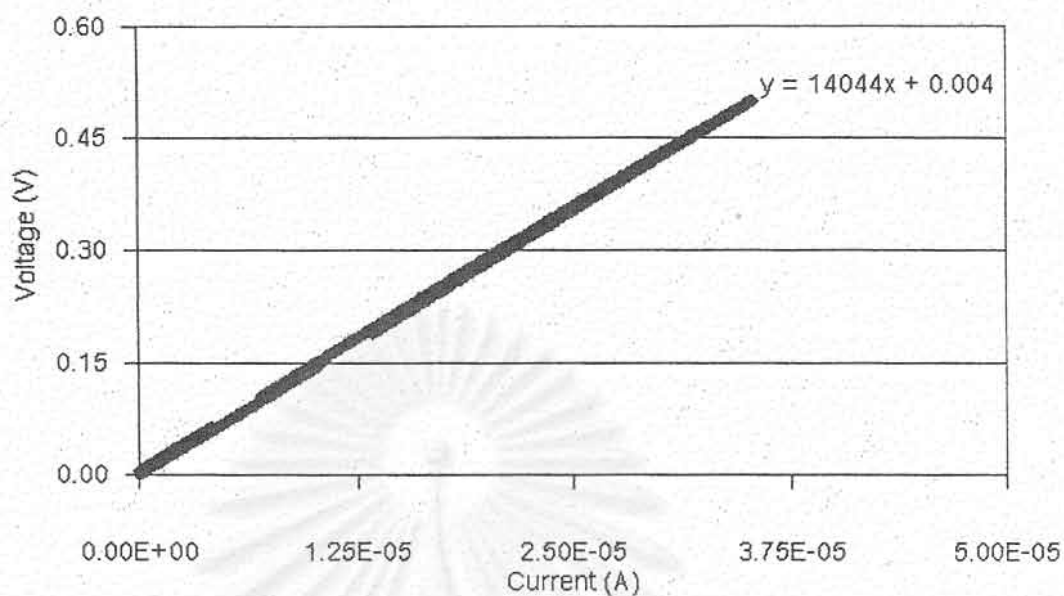
รูปที่ ก.40 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตะซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 50 °C



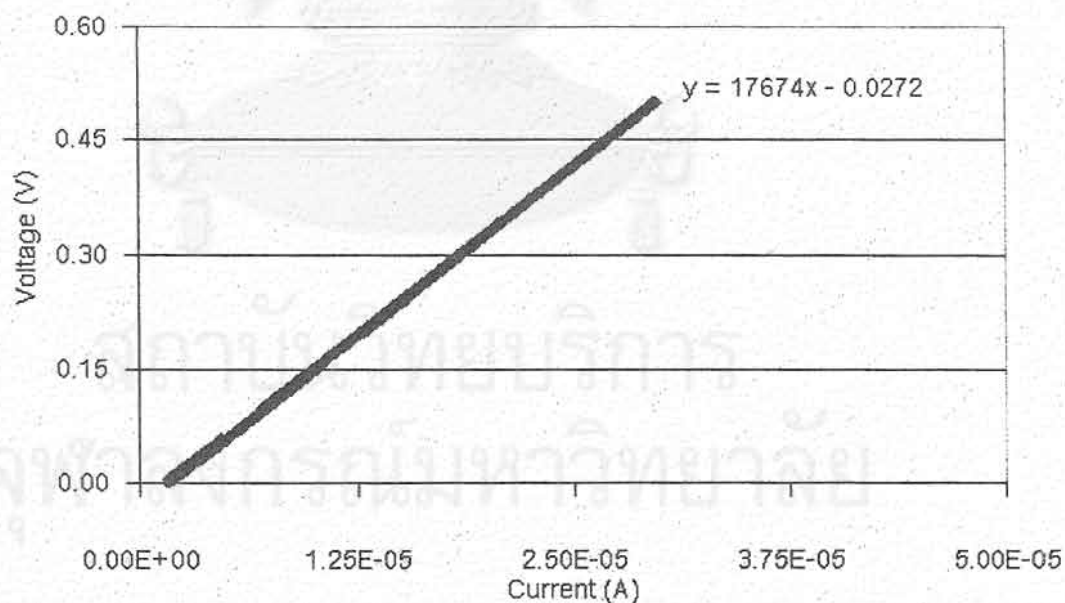
รูปที่ ก.41 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรน Alginate ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 50 °C



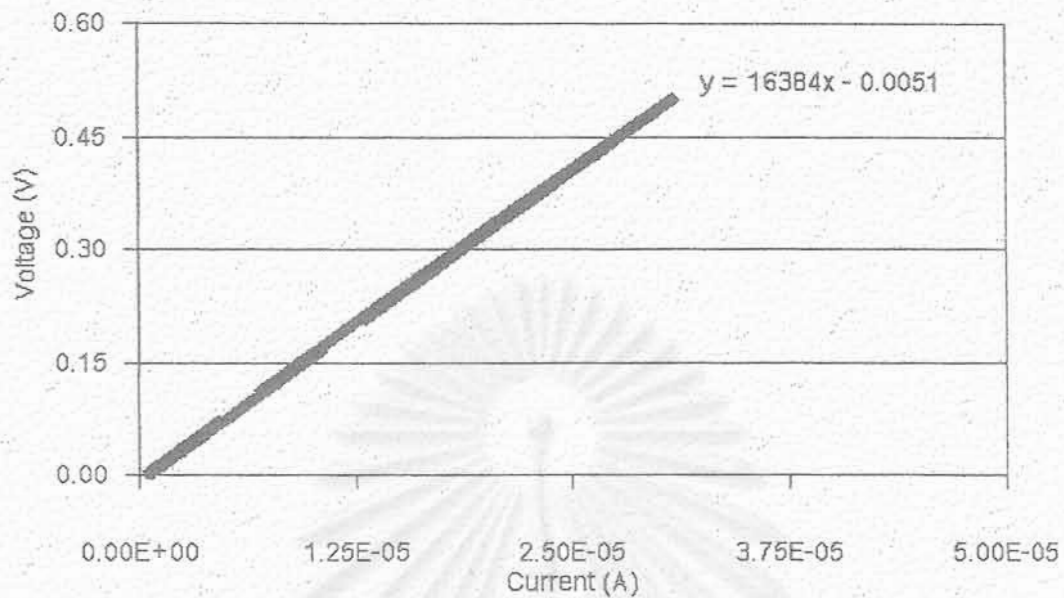
รูปที่ ก.42 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรน Alginate ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ 50 °C



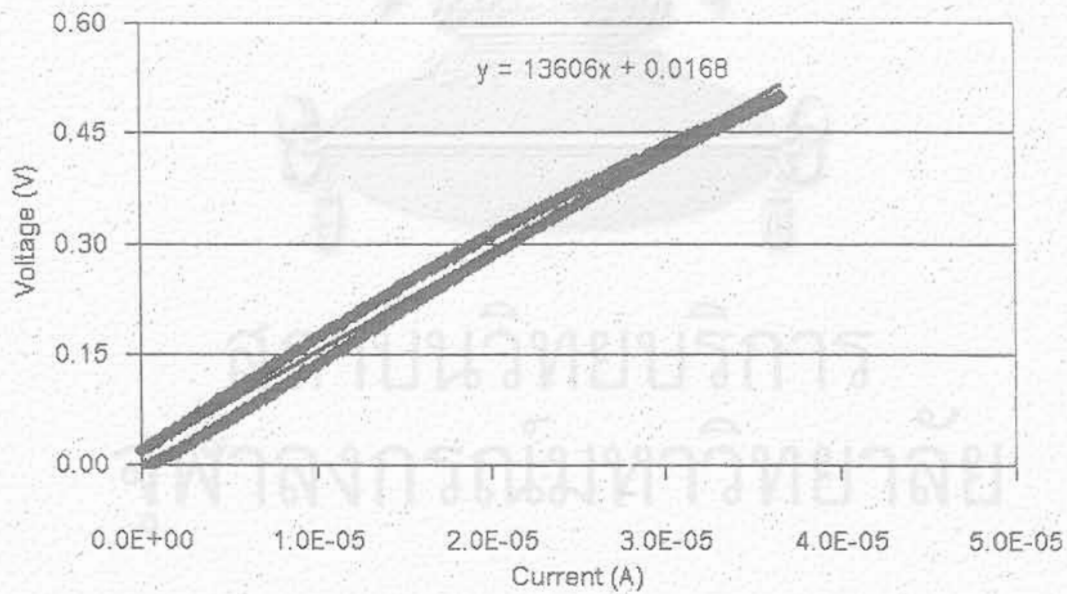
รูปที่ ก.43 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรน Alginate ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 50 °C



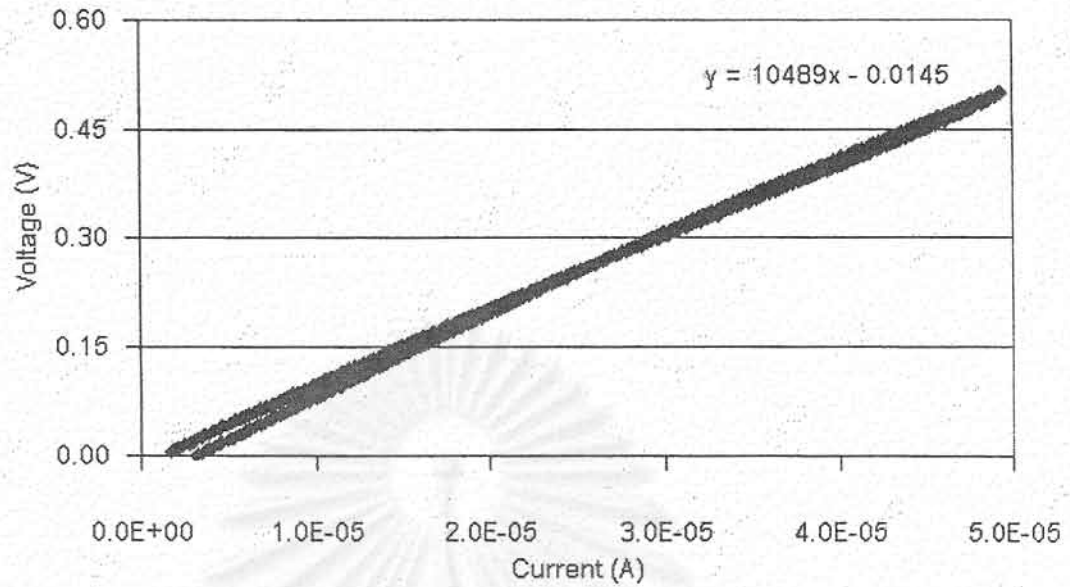
รูปที่ ก.44 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรน Alginate ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 50 °C



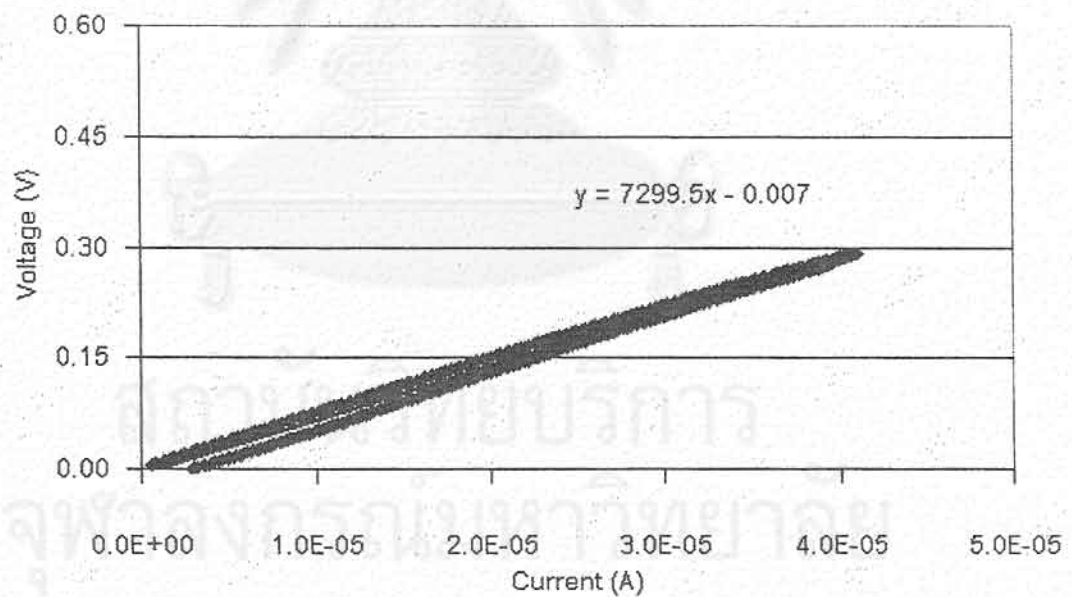
รูปที่ ก.45 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรน Alginate ตัวอย่างที่ 5 ณ อุณหภูมิ 50 °C



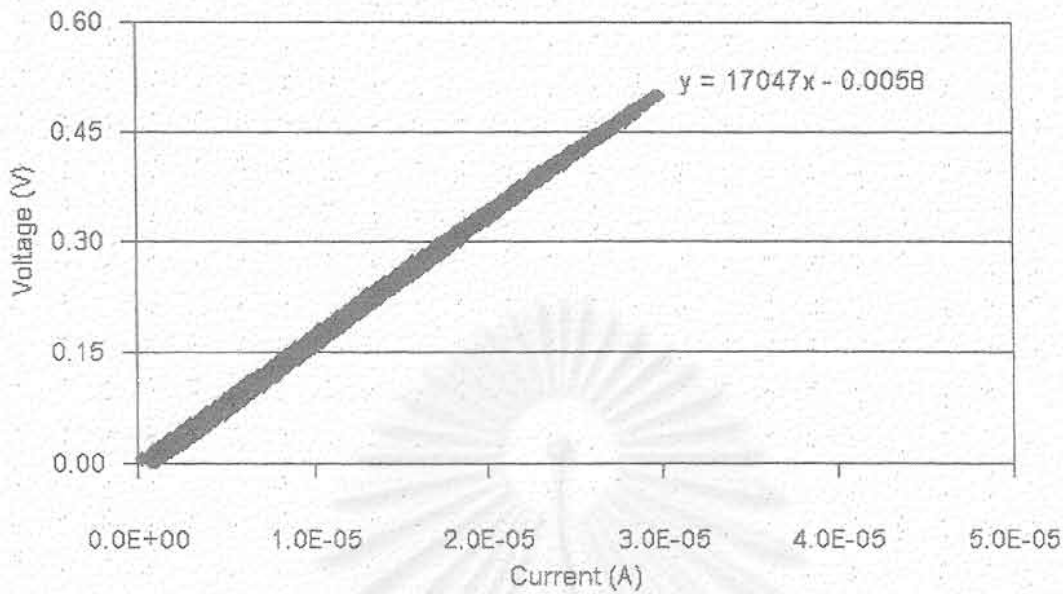
รูปที่ ก.46 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 60 °C



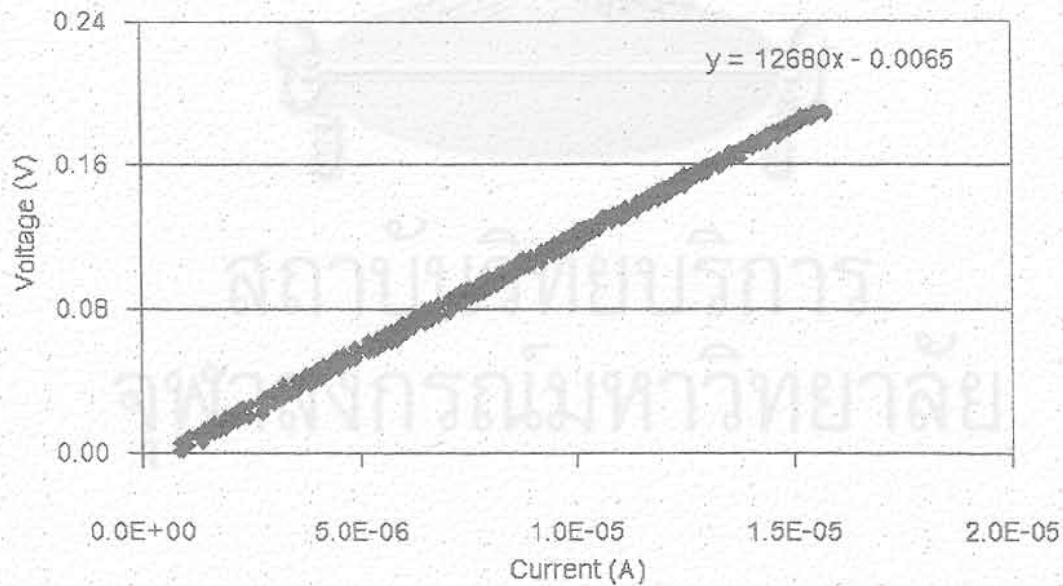
รูปที่ ก.47 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ 60 °C



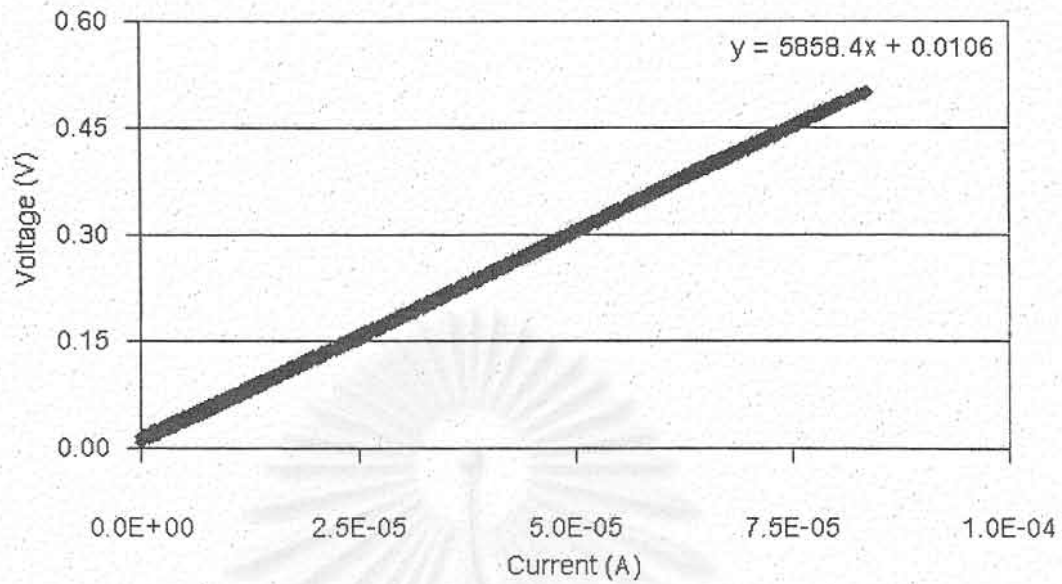
รูปที่ ก.48 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 60 °C



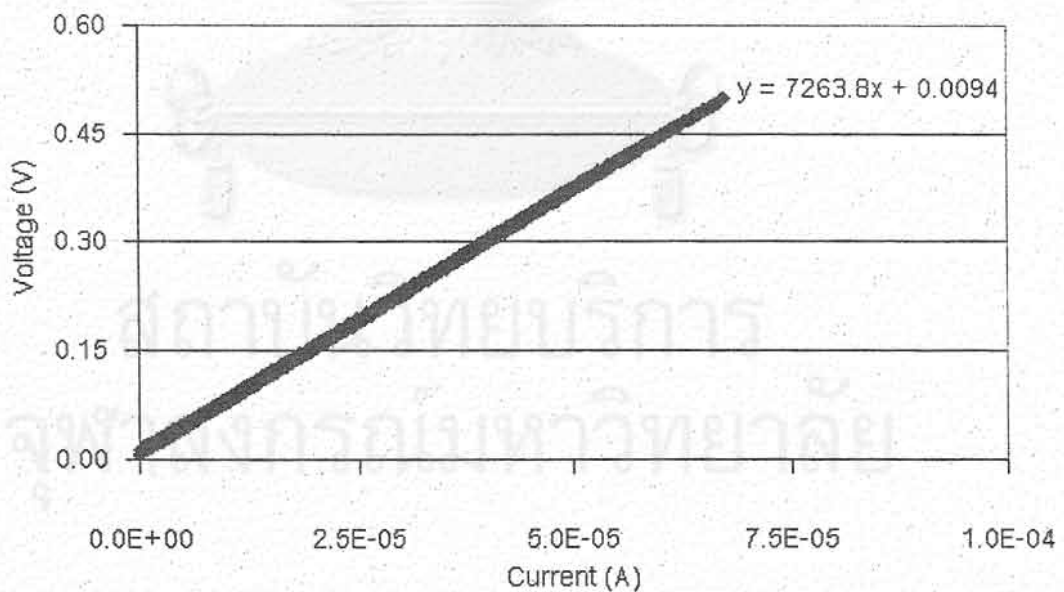
รูปที่ ก.49 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโคซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงสร้างตาข่าย ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 60 °C



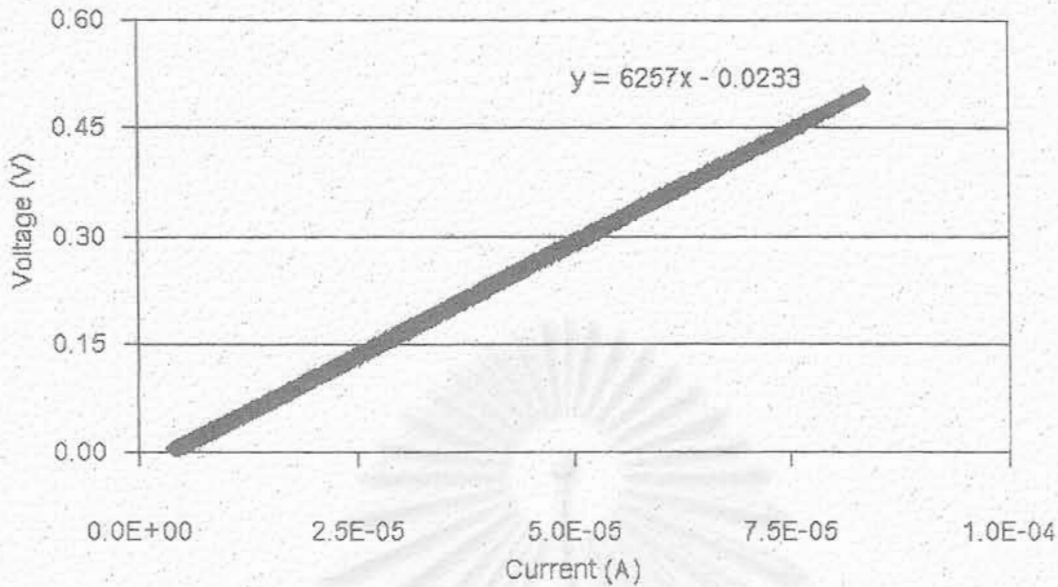
รูปที่ ก.50 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโคซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงสร้างตาข่าย ตัวอย่างที่ 5 ณ อุณหภูมิ 60 °C



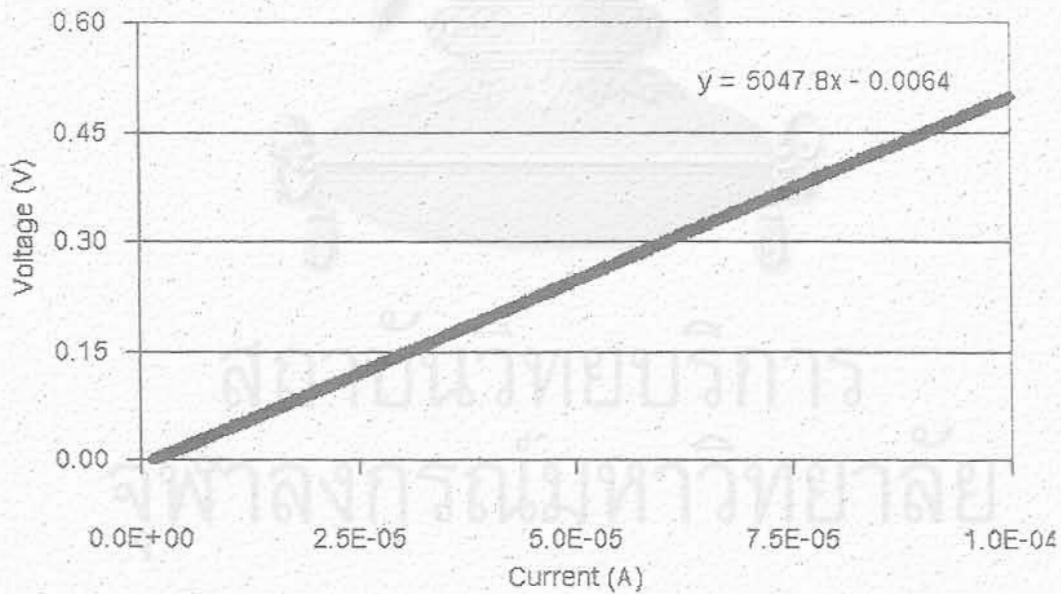
รูปที่ ก.51 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 60 °C



รูปที่ ก.52 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ ณ อุณหภูมิ 40 °C

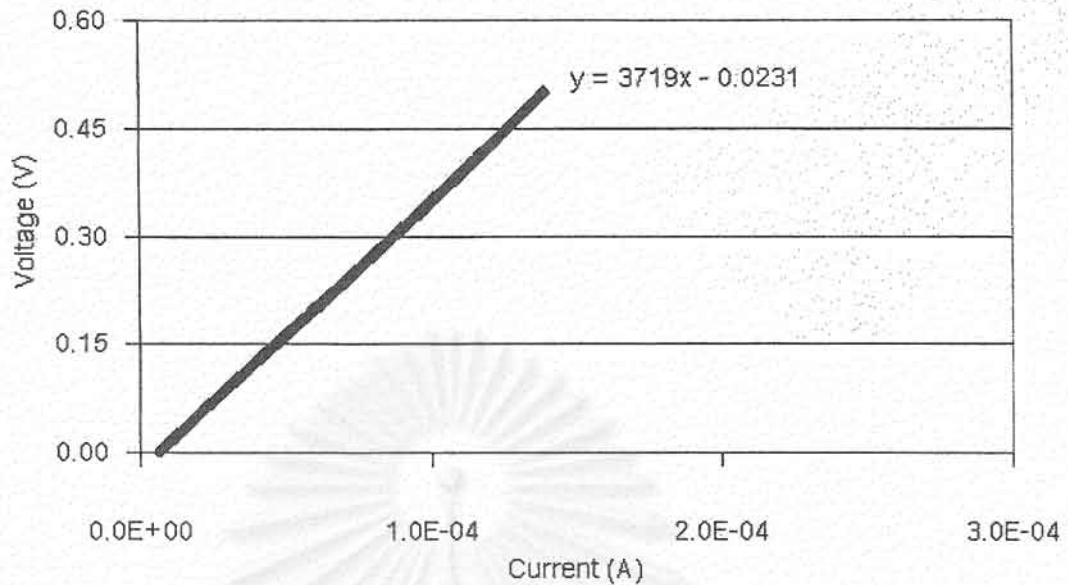


รูปที่ ก.53 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิด โครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 40 °C

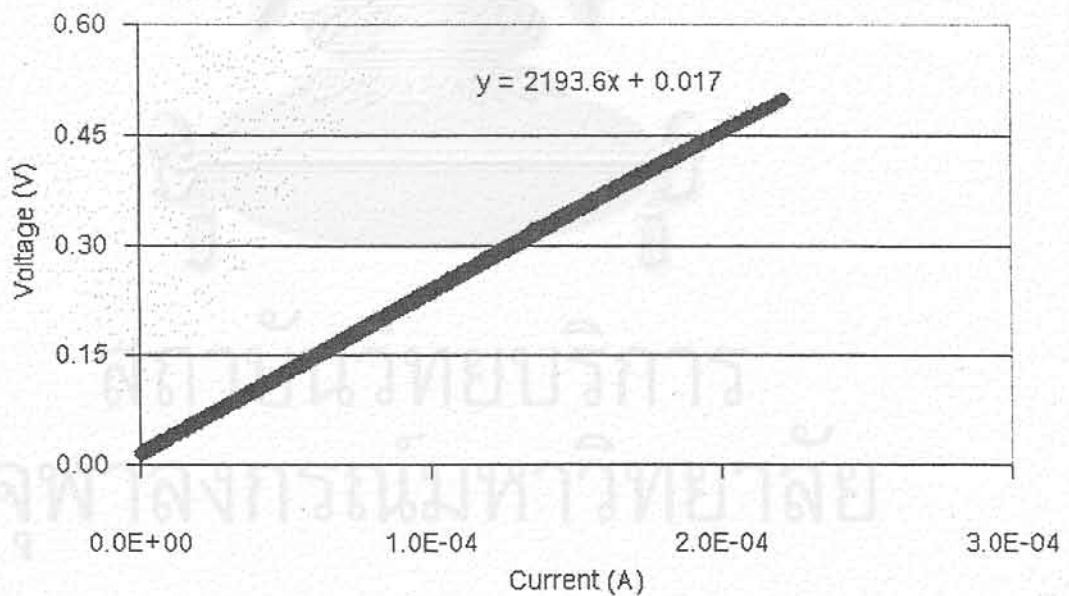


รูปที่ ก.54 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิด โครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 60 °C

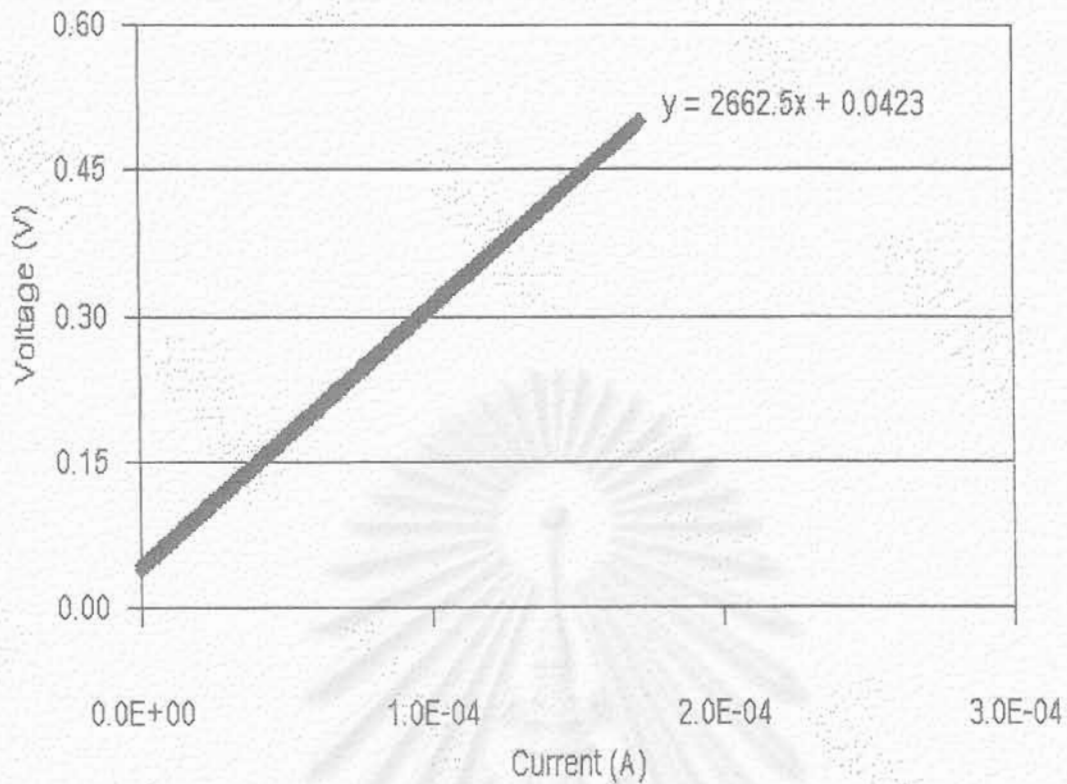




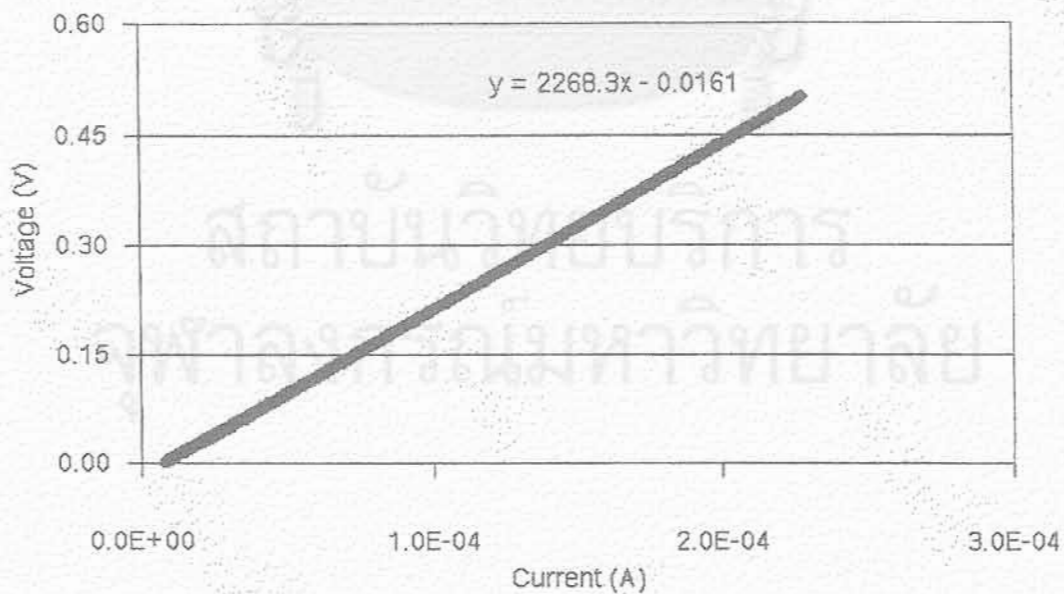
รูปที่ ก.55 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$



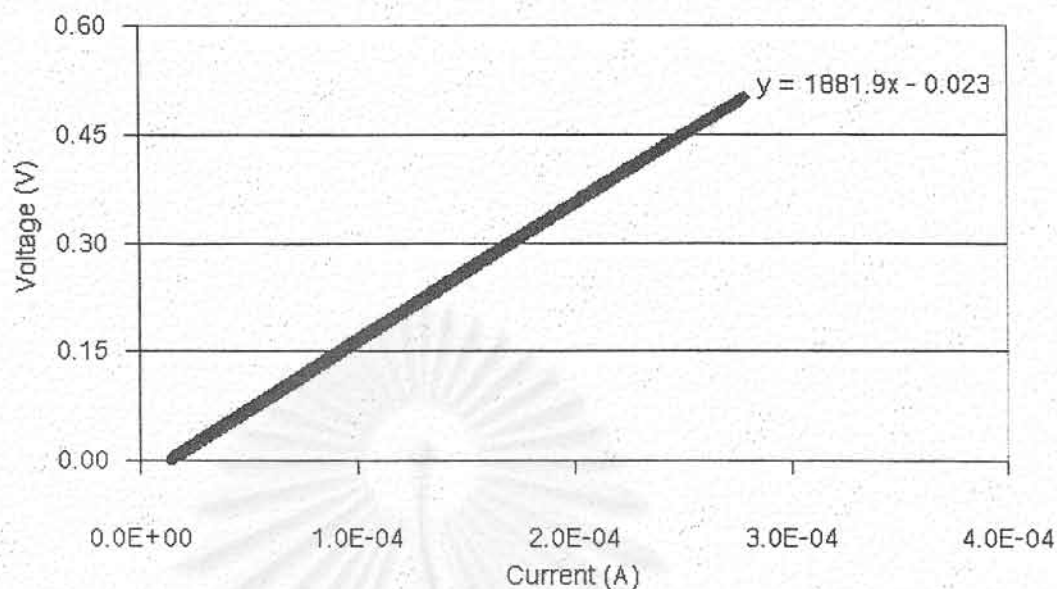
รูปที่ ก.56 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$



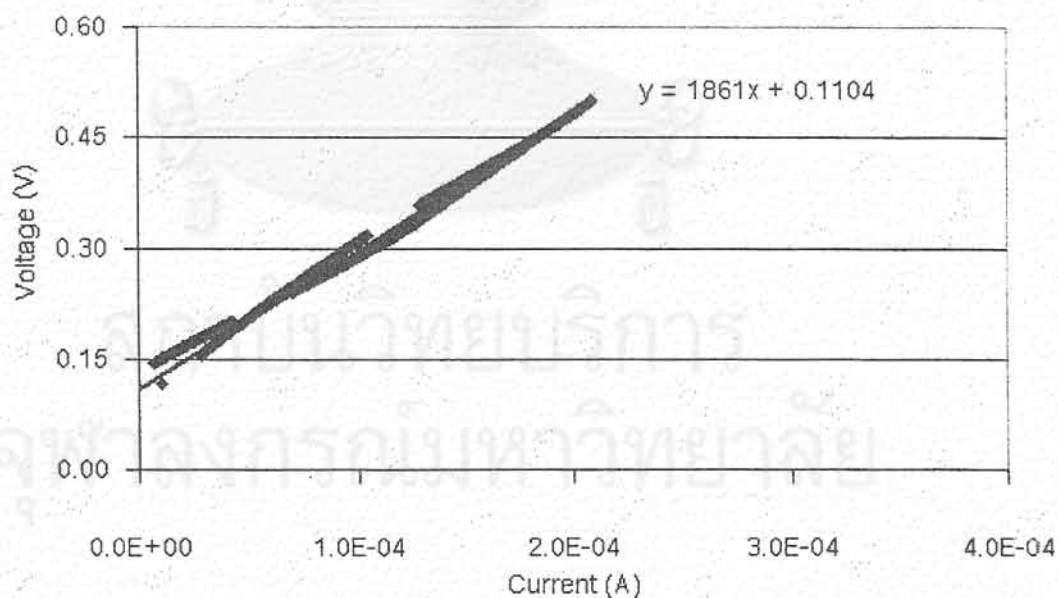
รูปที่ ก.57 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 60 °C



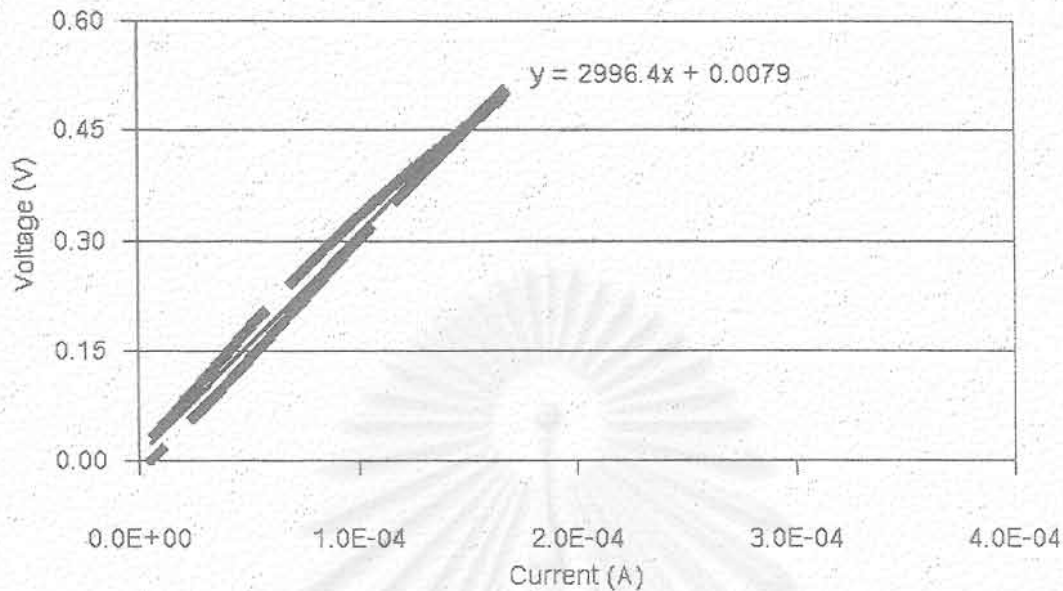
รูปที่ ก.58 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 60 °C



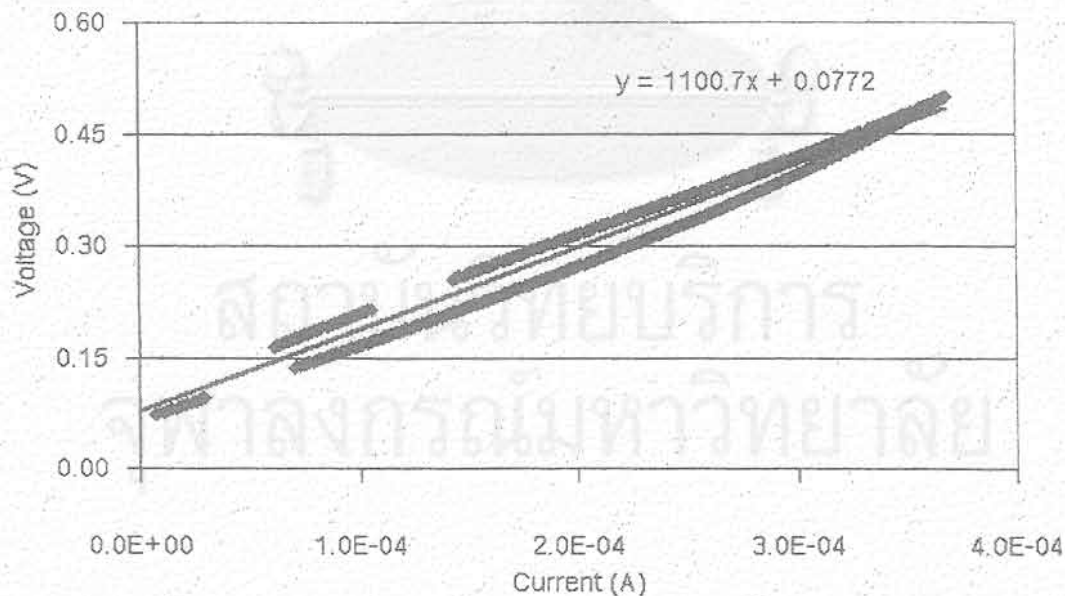
รูปที่ ก.59 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 60 °C



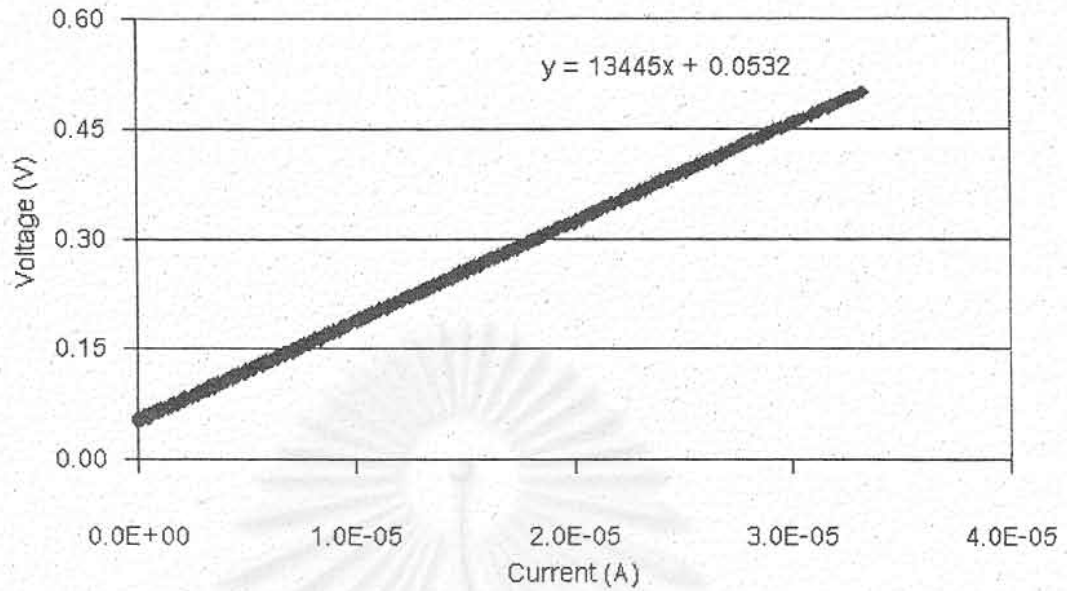
รูปที่ ก.60 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ 60 °C



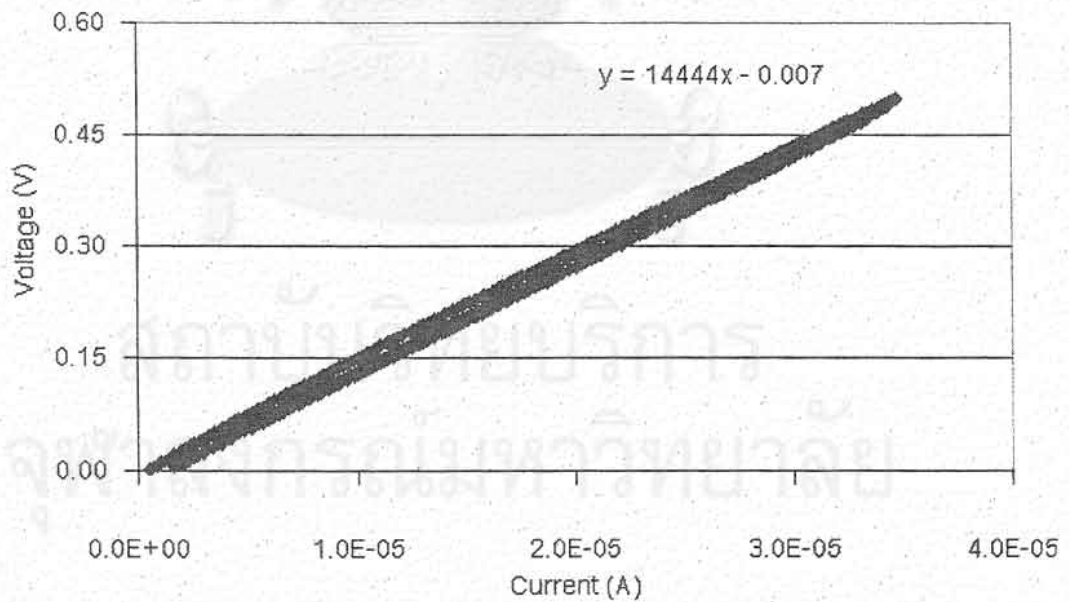
รูปที่ ก.61 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิด  
โครงสร้างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรด  
ซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 60 °C



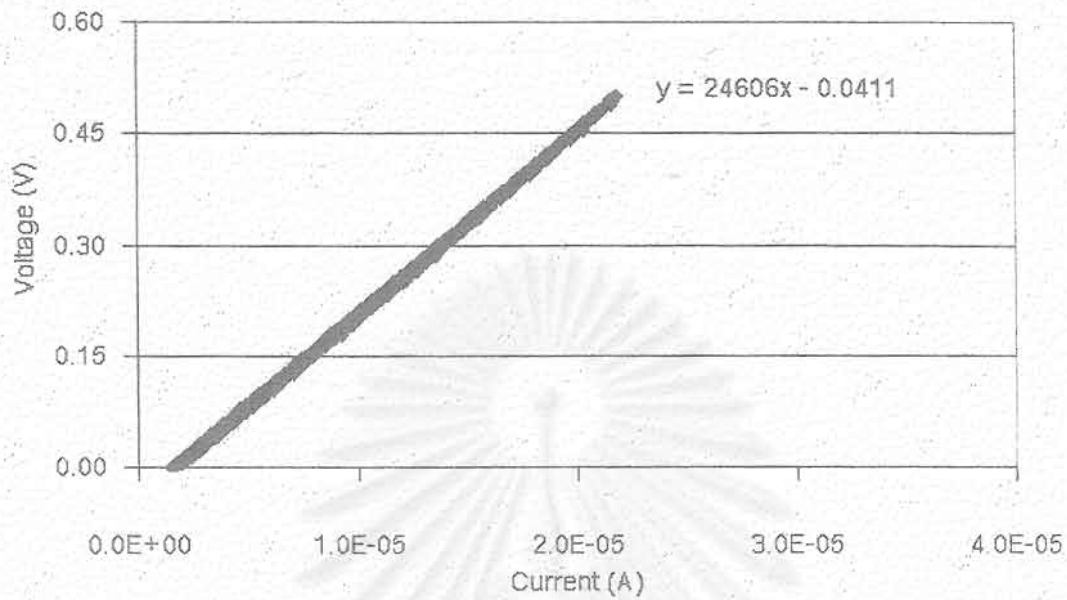
รูปที่ ก.62 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิด  
โครงสร้างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรด  
ซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 60 °C



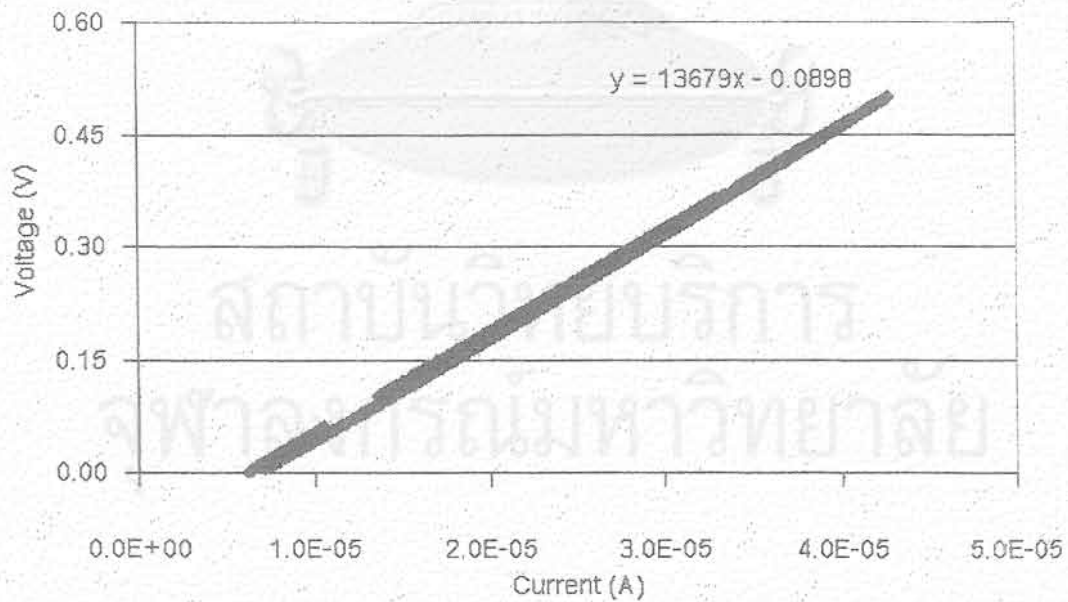
รูปที่ ก.63 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรน Alginate ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 60 °C



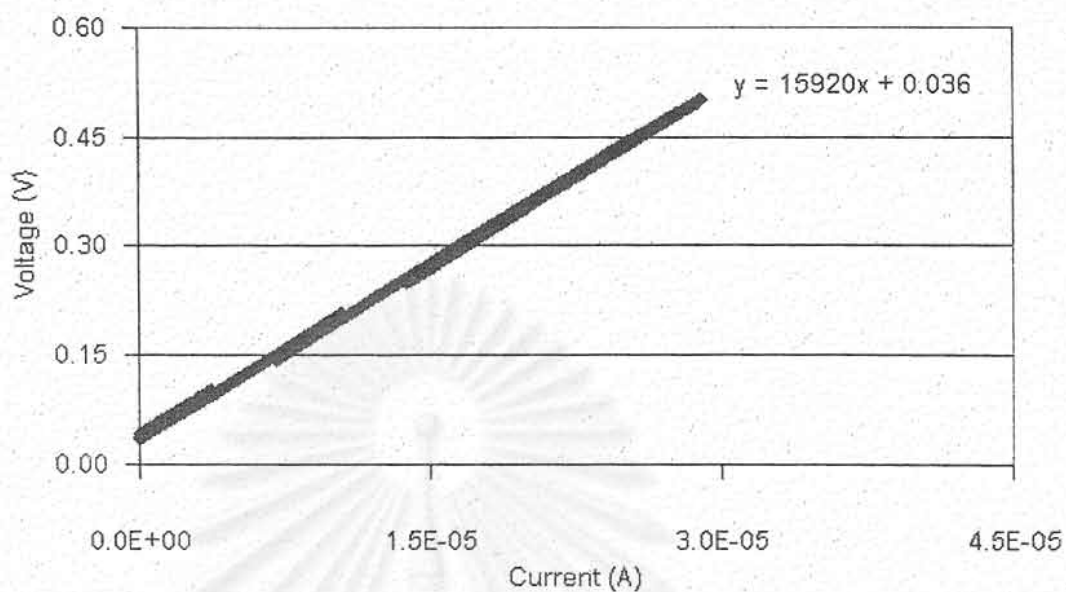
รูปที่ ก.64 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรน Alginate ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ 60 °C



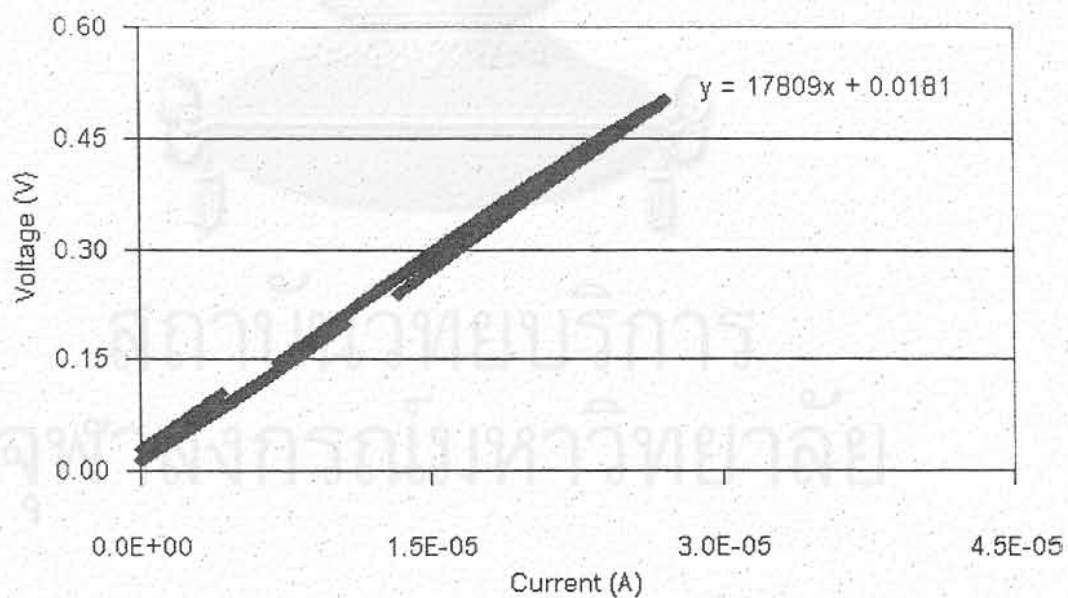
รูปที่ ก.65 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรน Alginate ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 60 °C



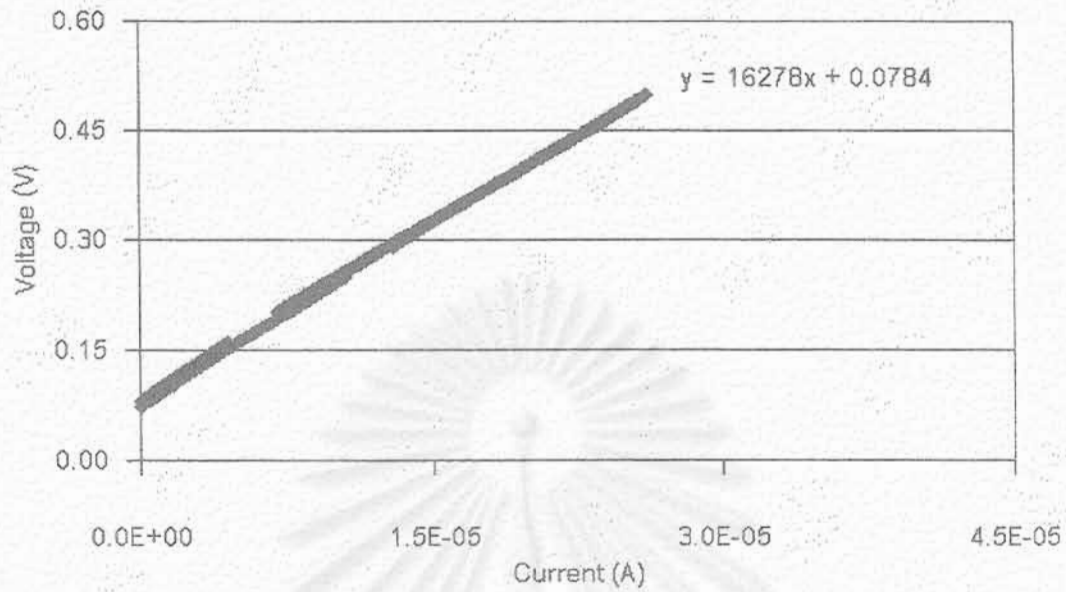
รูปที่ ก.66 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรน Alginate ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 60 °C



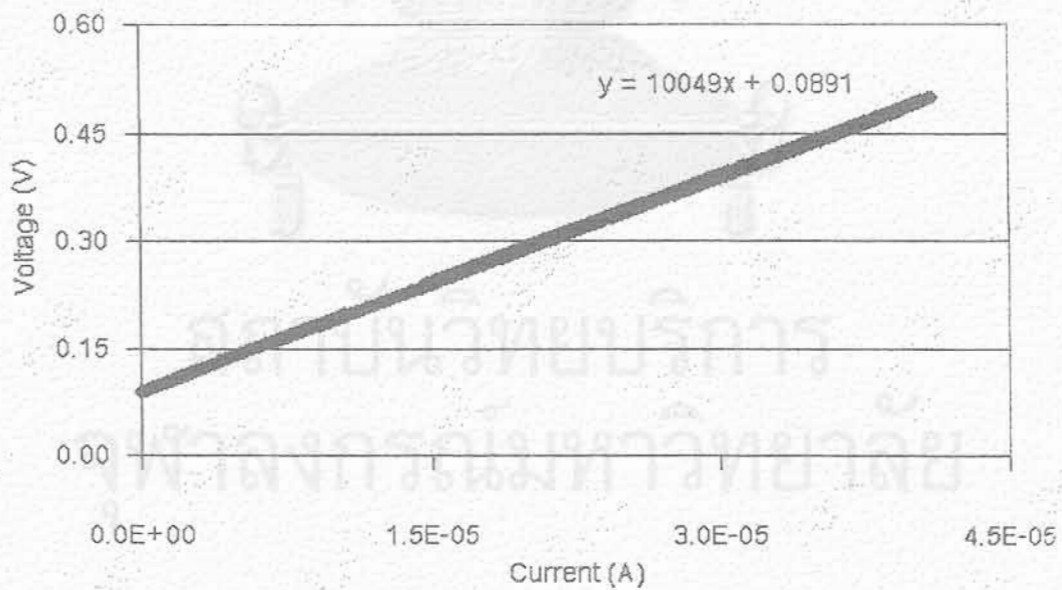
รูปที่ ก.67 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตะซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงสร้างตาข่าย ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 68 °C



รูปที่ ก.68 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตะซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงสร้างตาข่าย ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ 68 °C

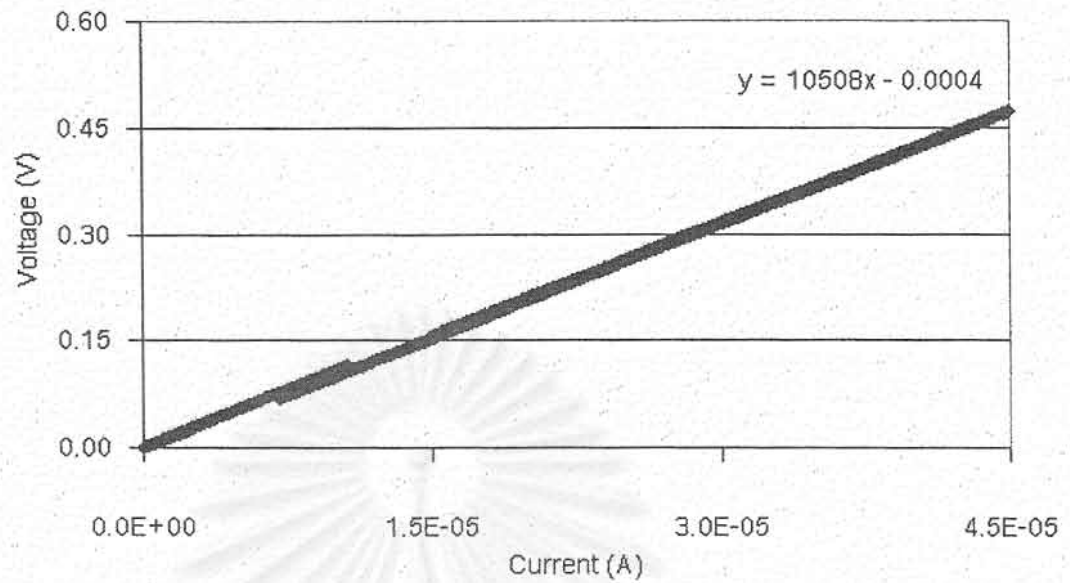


รูปที่ ก.69 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 68 °C

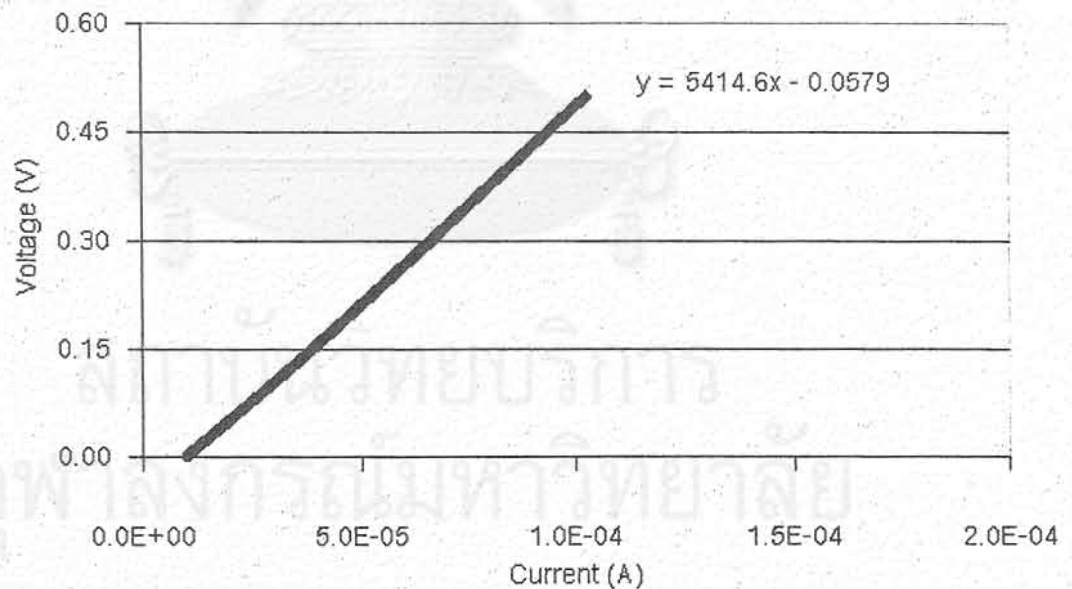


รูปที่ ก.70 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 68 °C

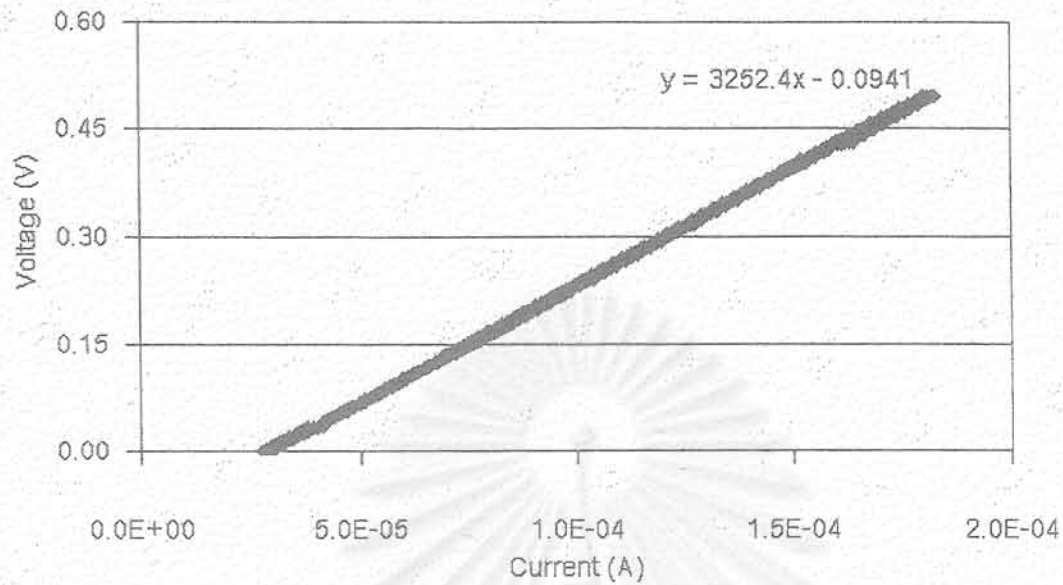




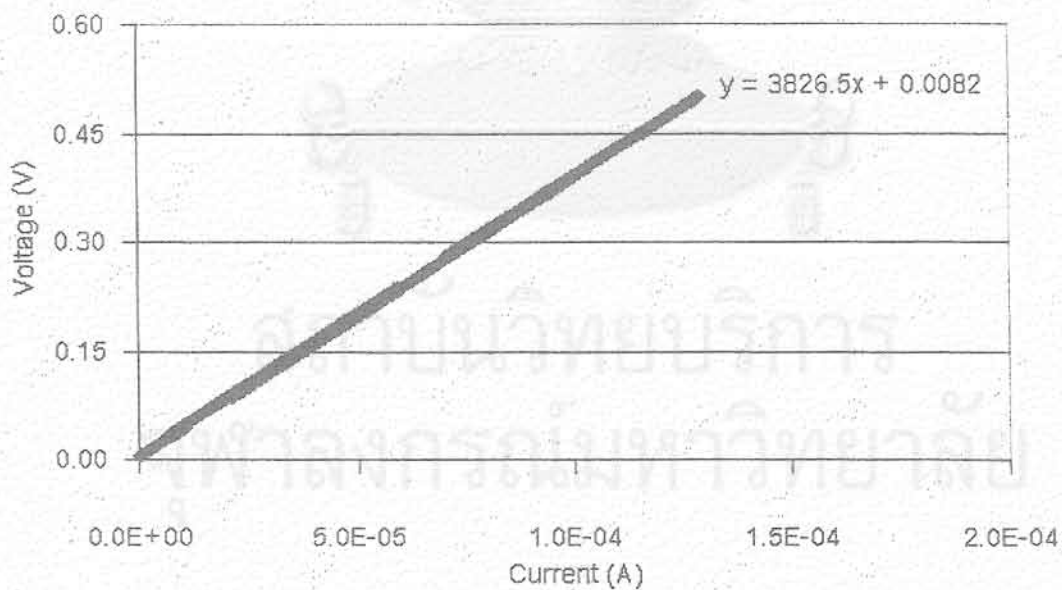
รูปที่ ก.71 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 5 ณ อุณหภูมิ 68 °C



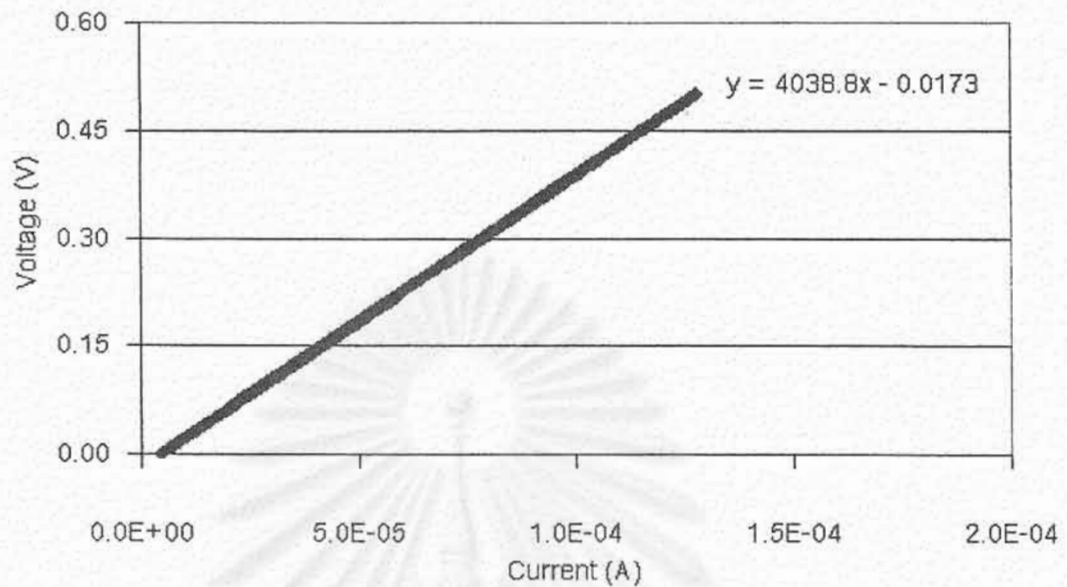
รูปที่ ก.72 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 68 °C



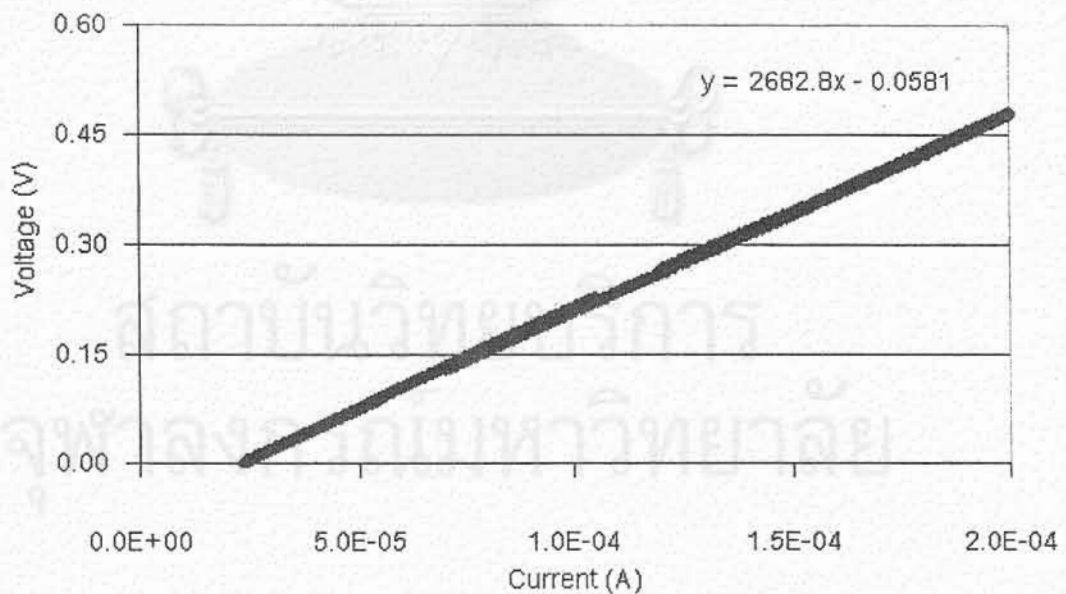
รูปที่ ก.73 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ  $68^{\circ}\text{C}$



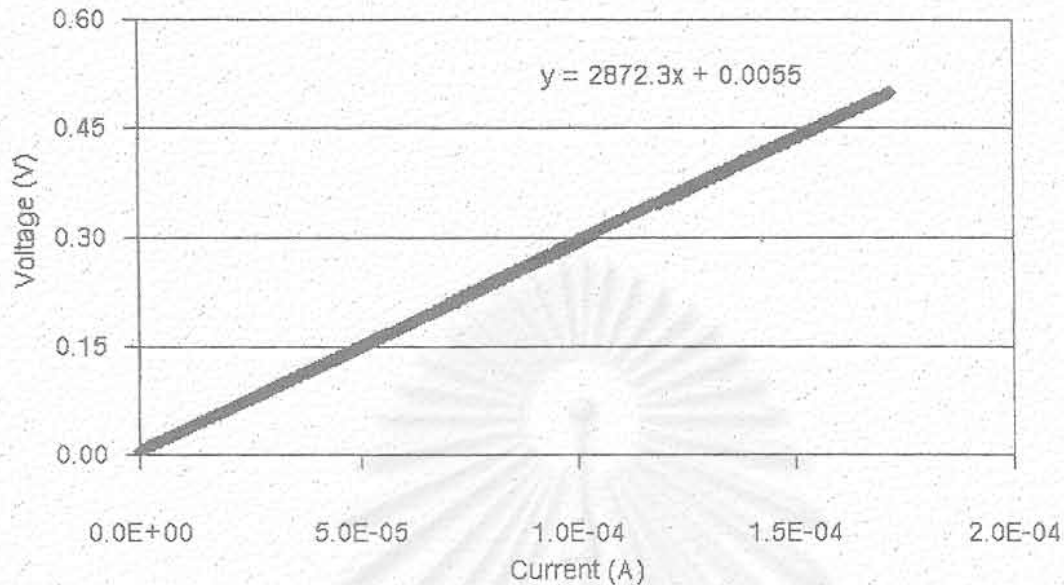
รูปที่ ก.74 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ  $68^{\circ}\text{C}$



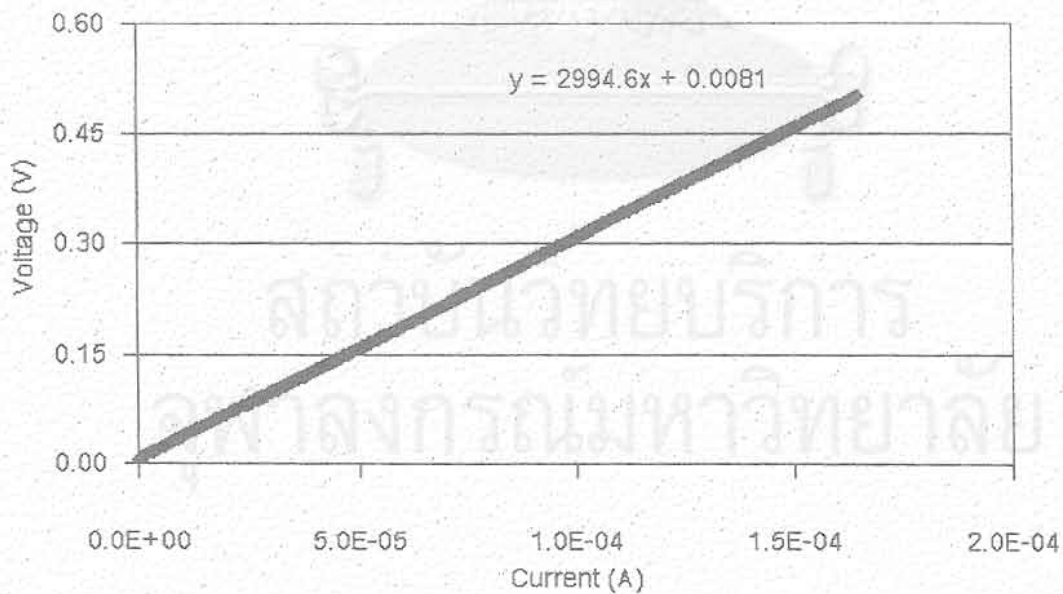
รูปที่ ก.75 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ  $68^{\circ}\text{C}$



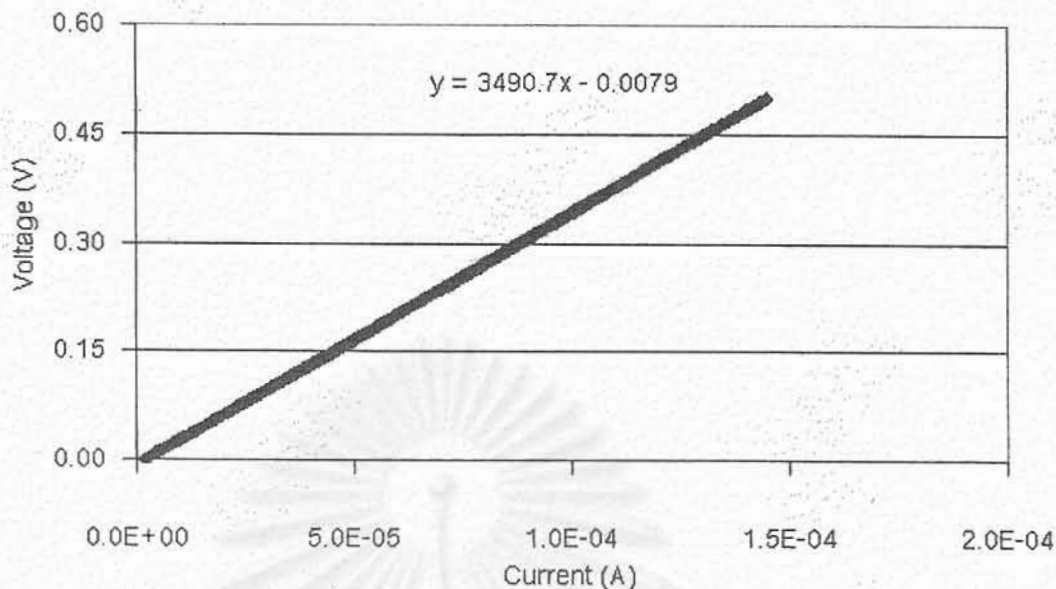
รูปที่ ก.76 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ  $68^{\circ}\text{C}$



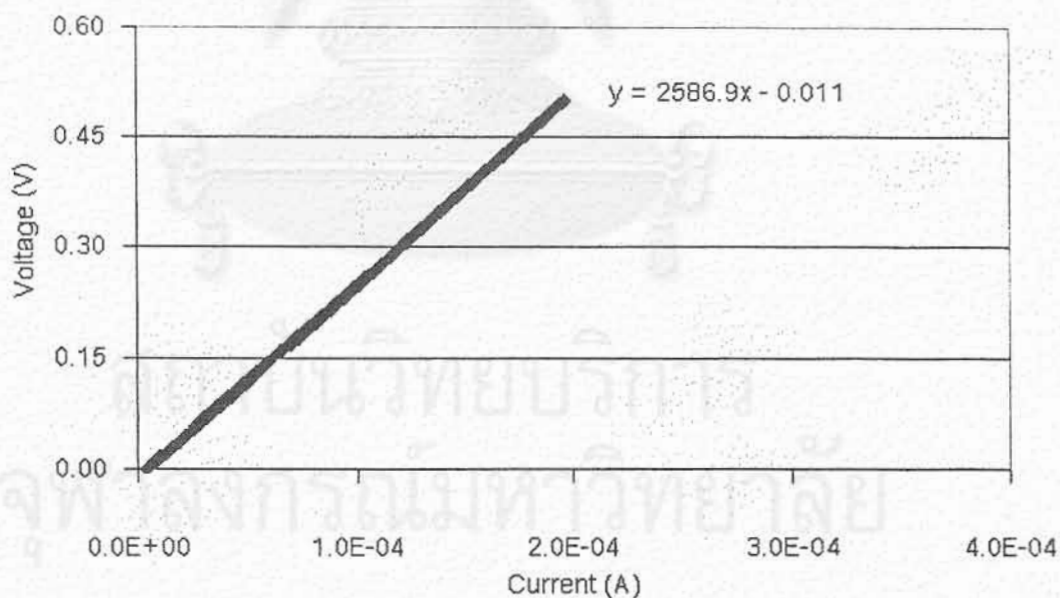
รูปที่ ก.77 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ 68 °C



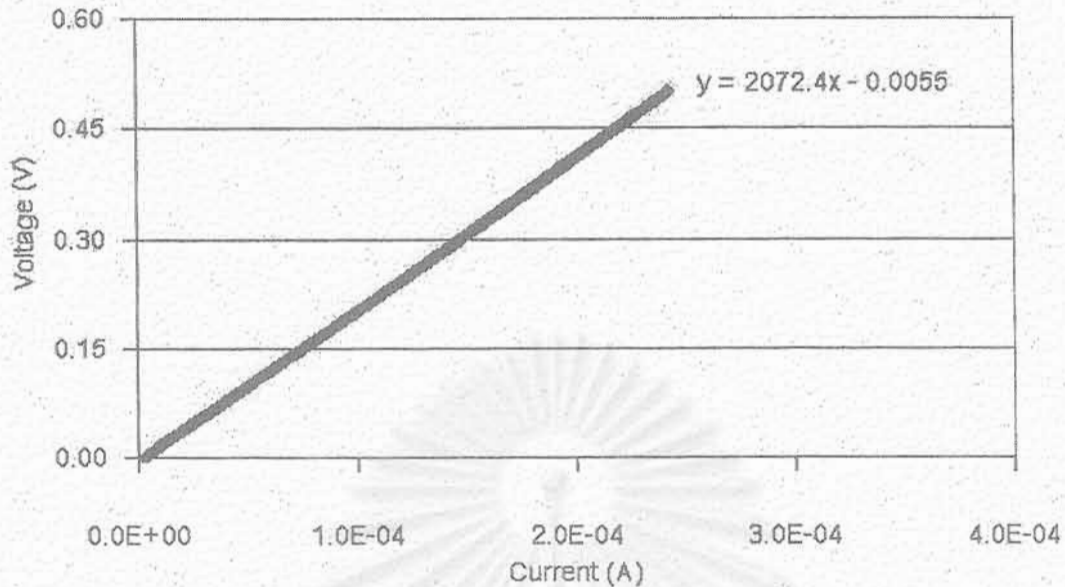
รูปที่ ก.78 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 68 °C



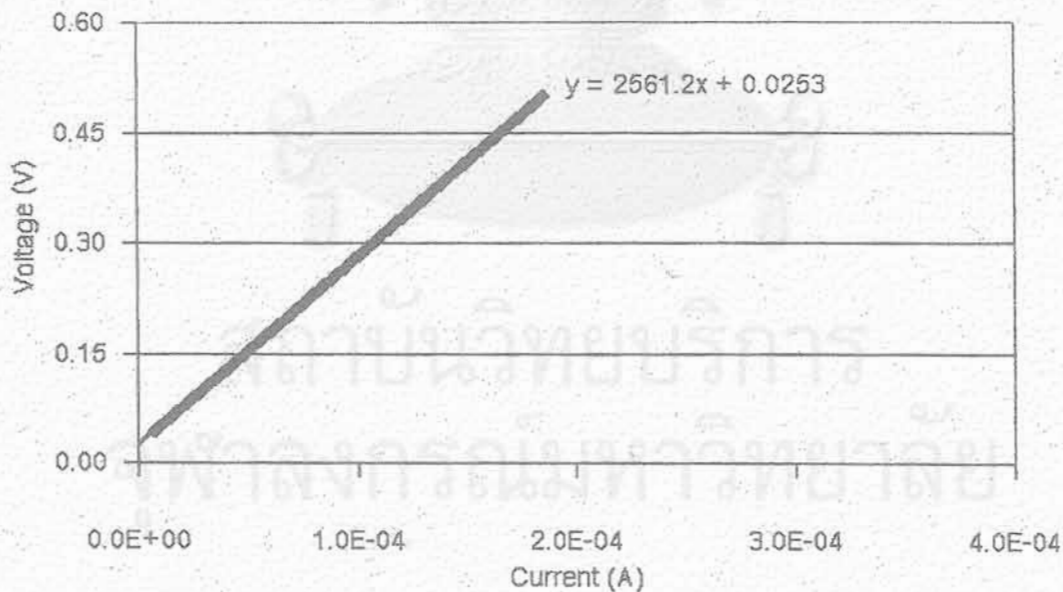
รูปที่ ก.79 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 68 °C



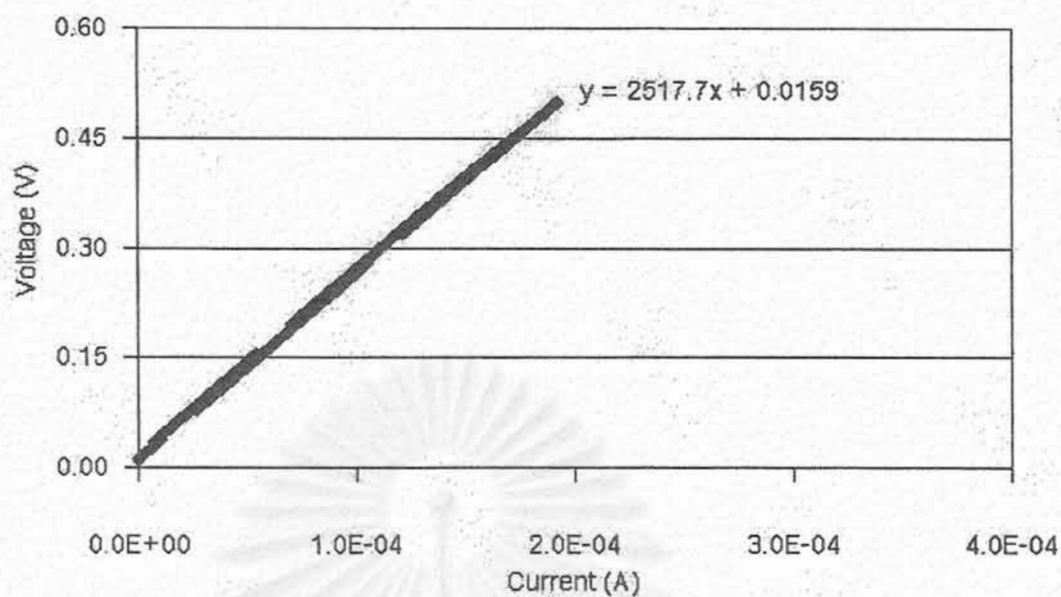
รูปที่ ก.80 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 68 °C



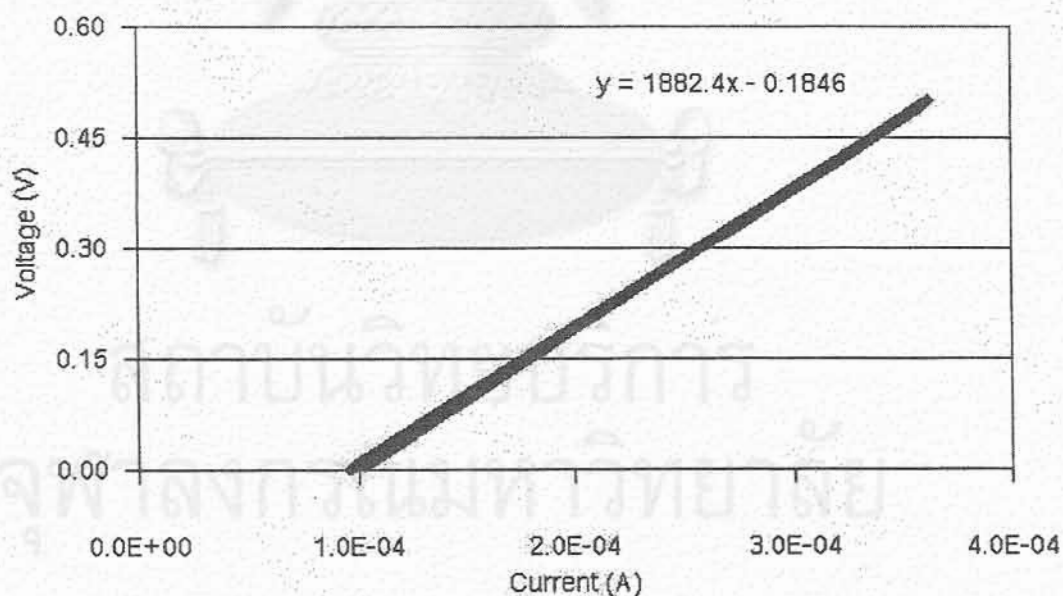
รูปที่ ก.81 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ 68 °C



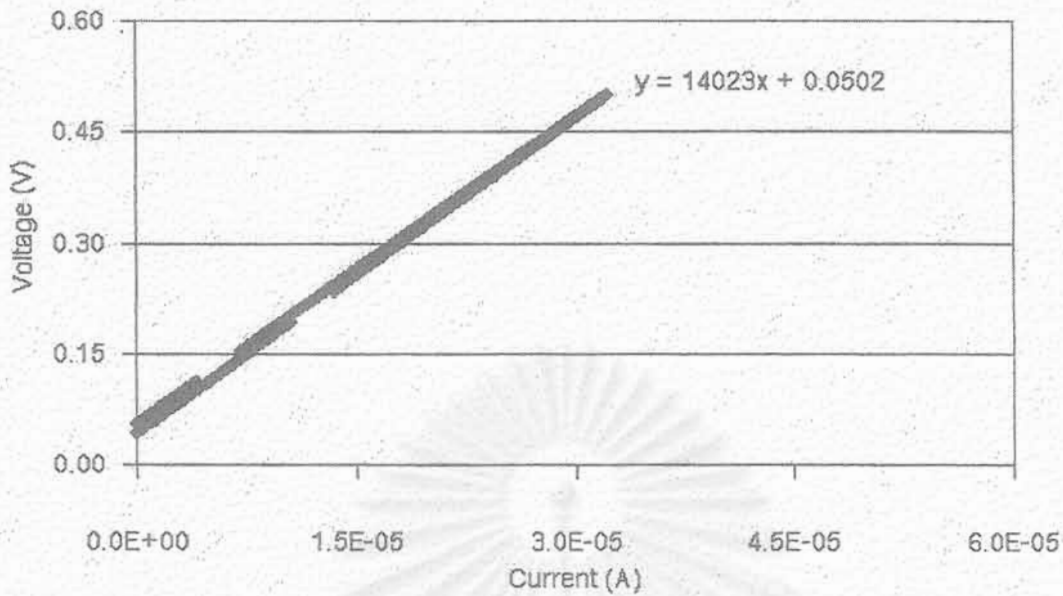
รูปที่ ก.82 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 68 °C



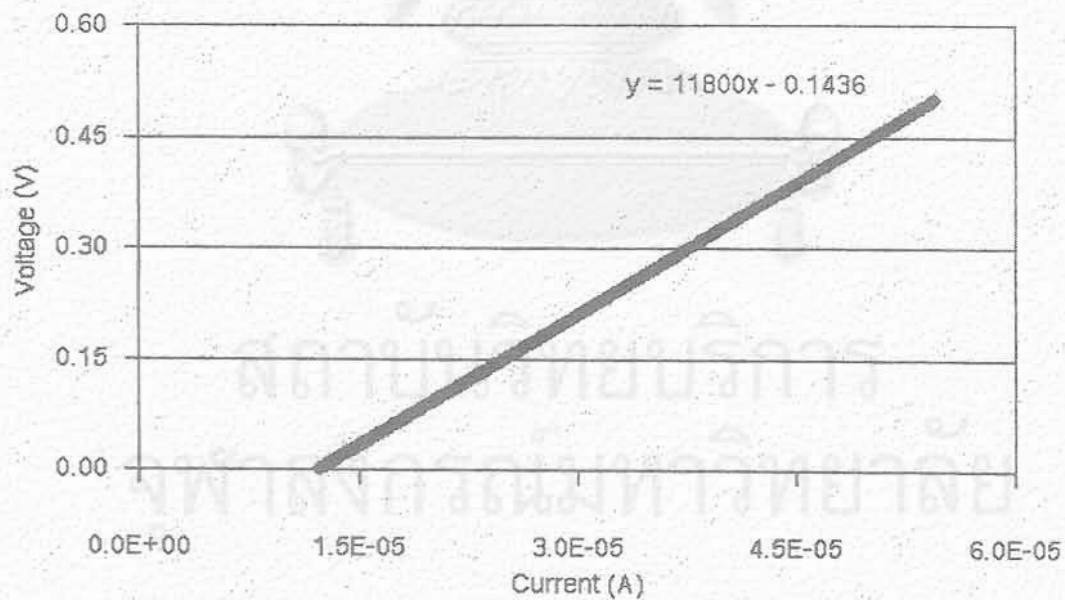
รูปที่ ก.83 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 68 °C



รูปที่ ก.84 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 5 ณ อุณหภูมิ 68 °C

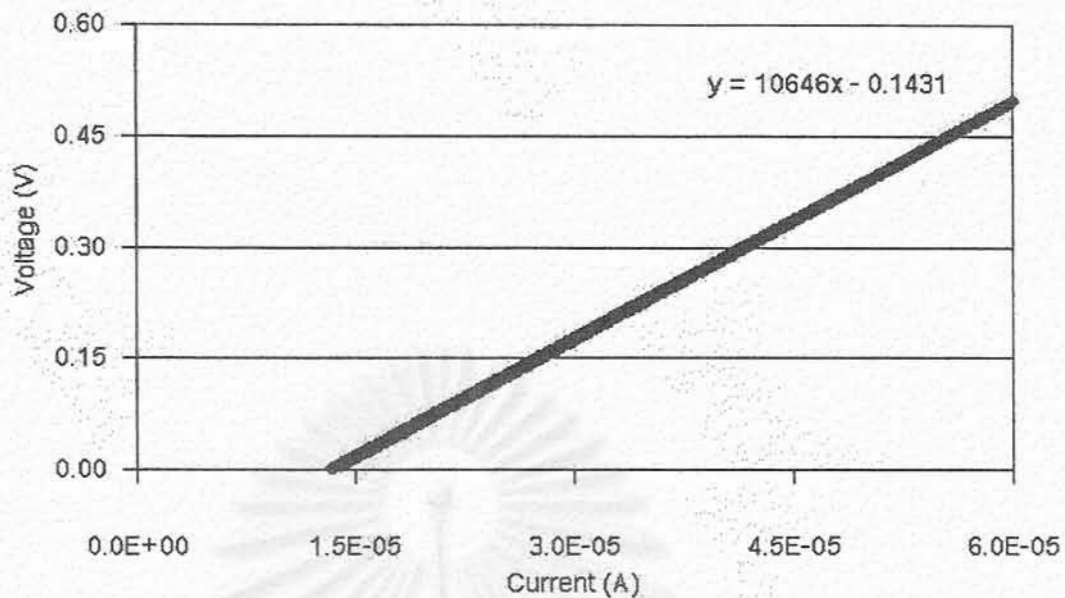


รูปที่ ก.85 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรน Alginate ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 68 °C

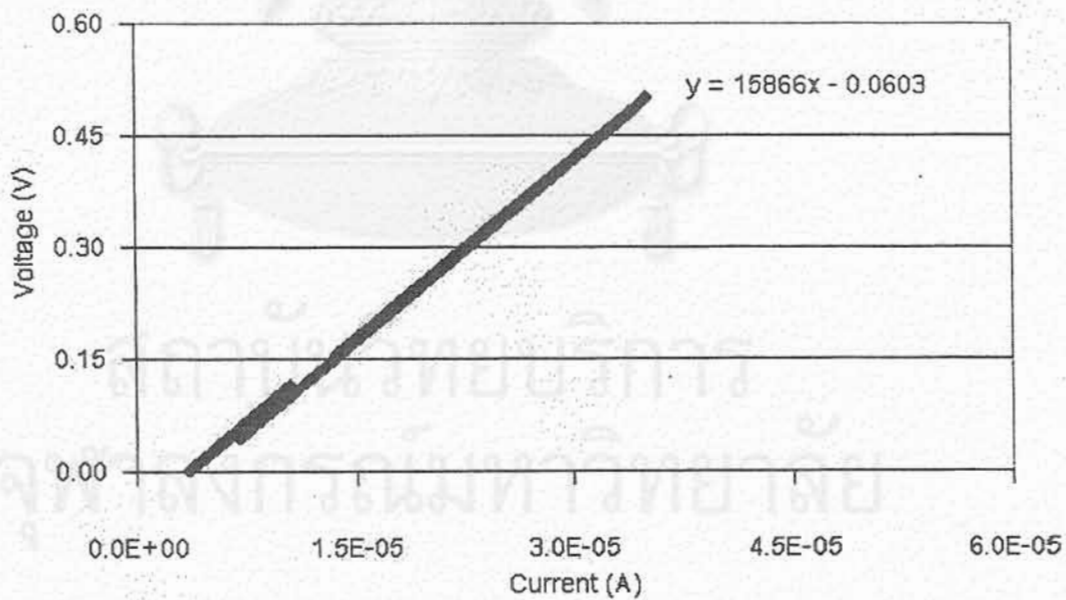


รูปที่ ก.86 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรน Alginate ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ 68 °C

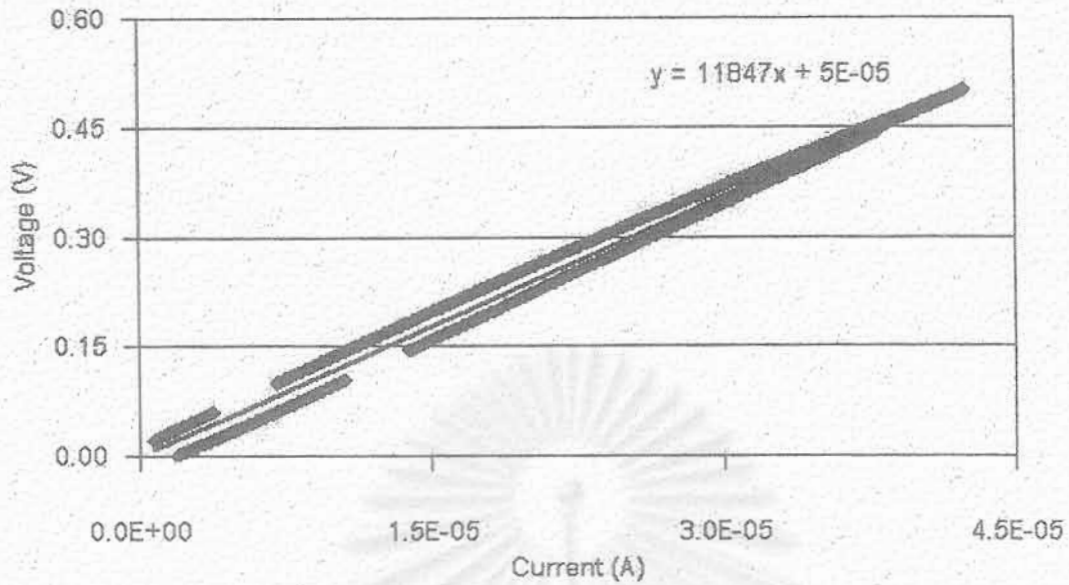




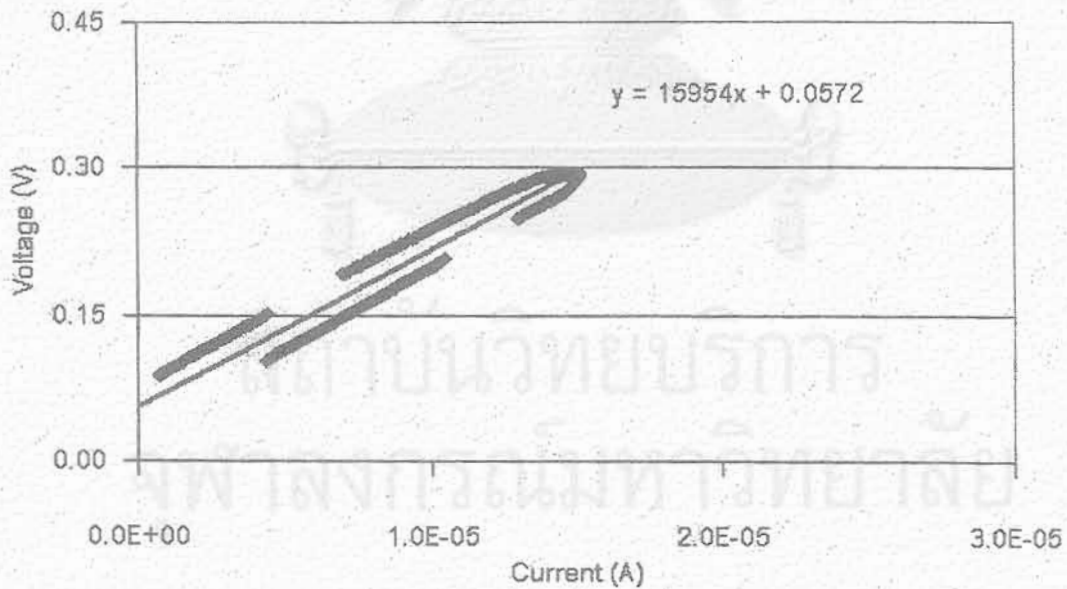
รูปที่ ก.87 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรน Alginate ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 68 °C



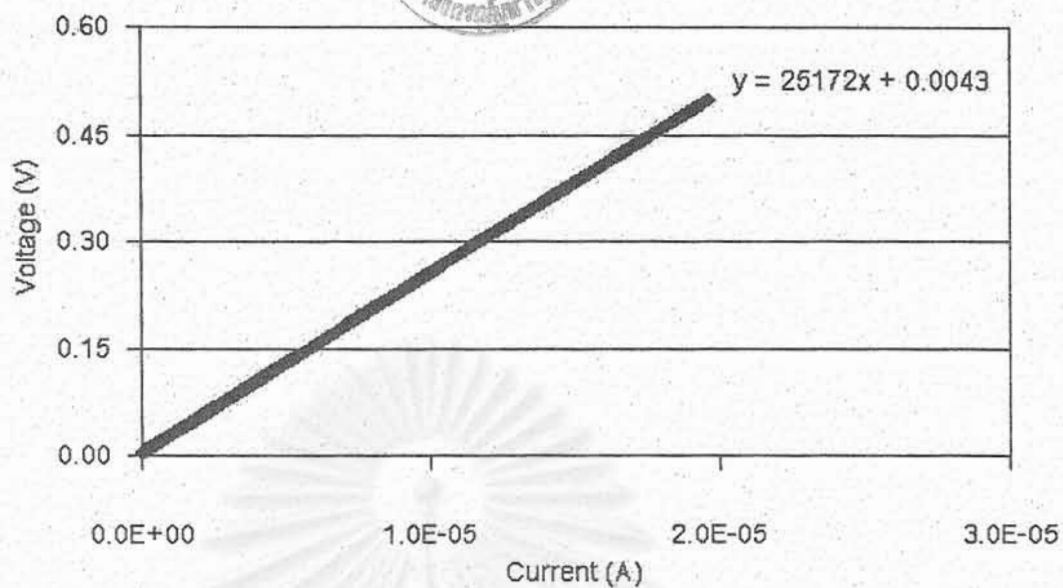
รูปที่ ก.88 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรน Alginate ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 68 °C



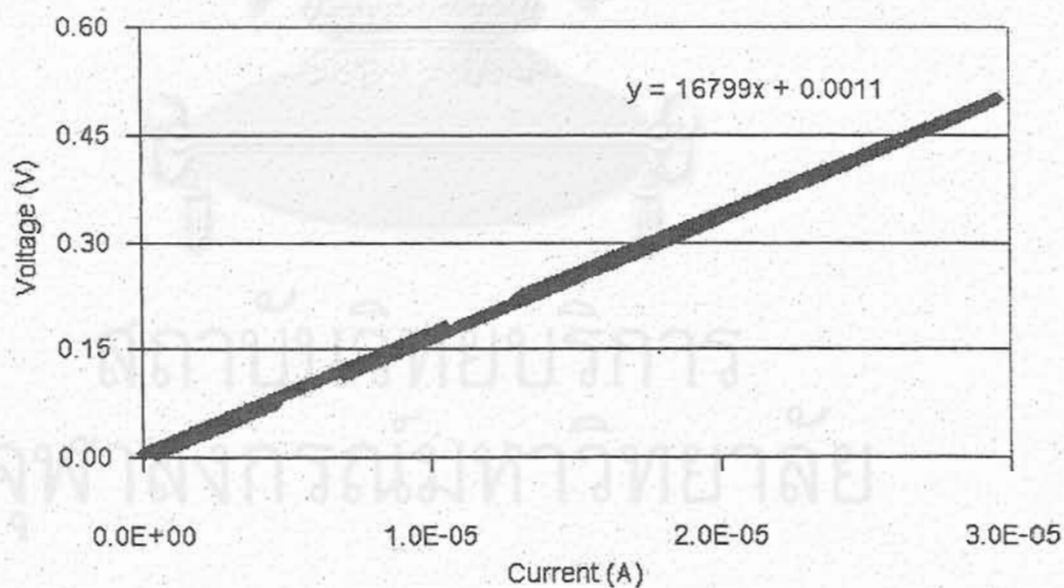
รูปที่ ก.89 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโคซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 80 °C



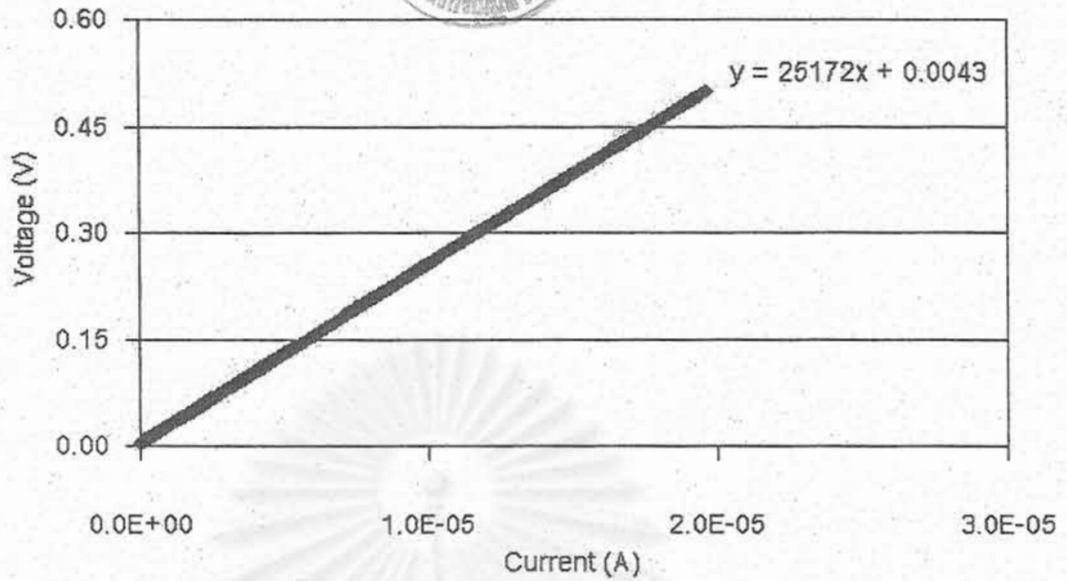
รูปที่ ก.90 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโคซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ 80 °C



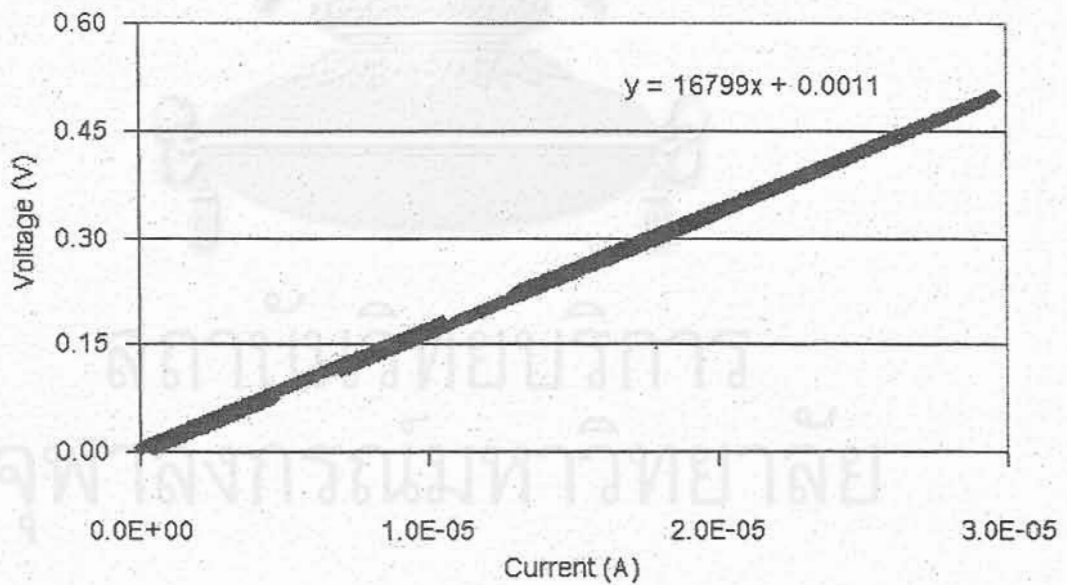
รูปที่ ก.91 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 80 °C



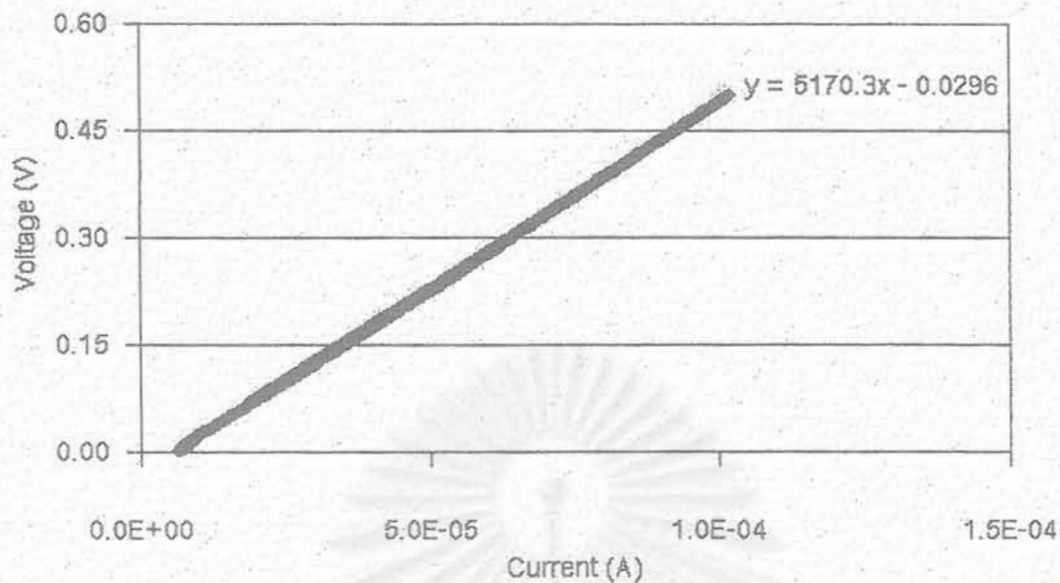
รูปที่ ก.92 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 80 °C



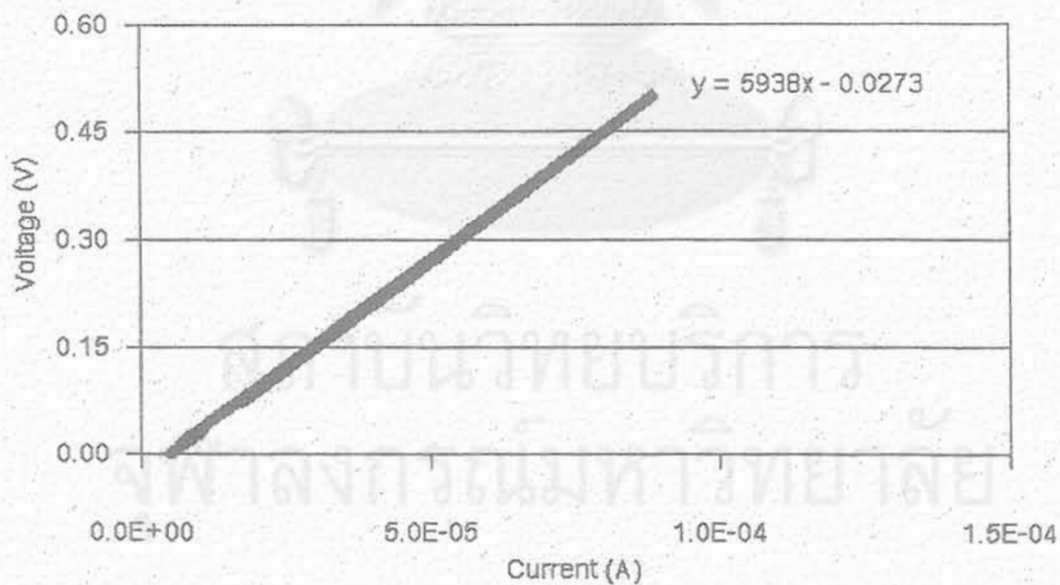
รูปที่ ก.91 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 80 °C



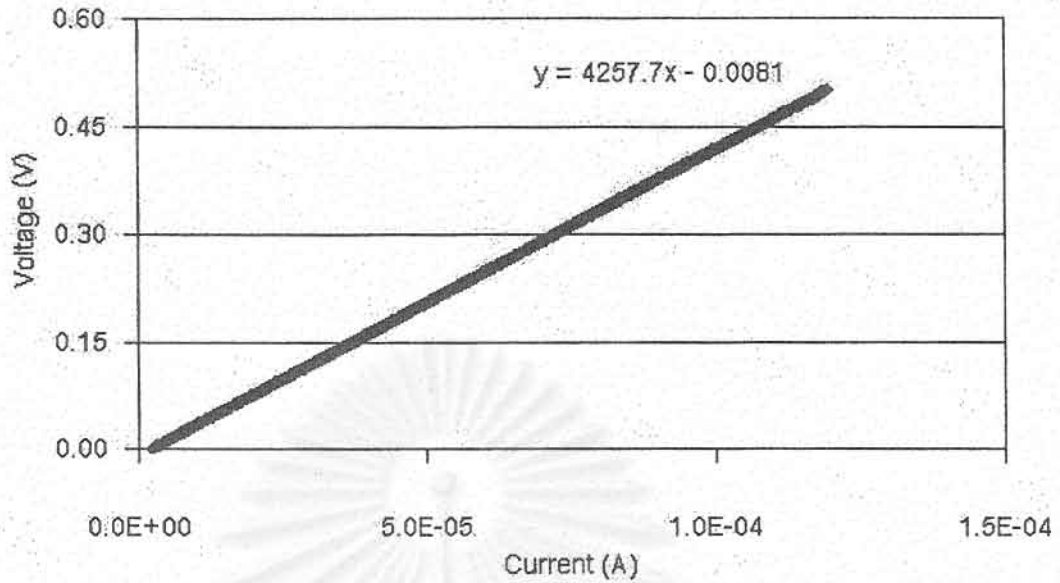
รูปที่ ก.92 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโดซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 80 °C



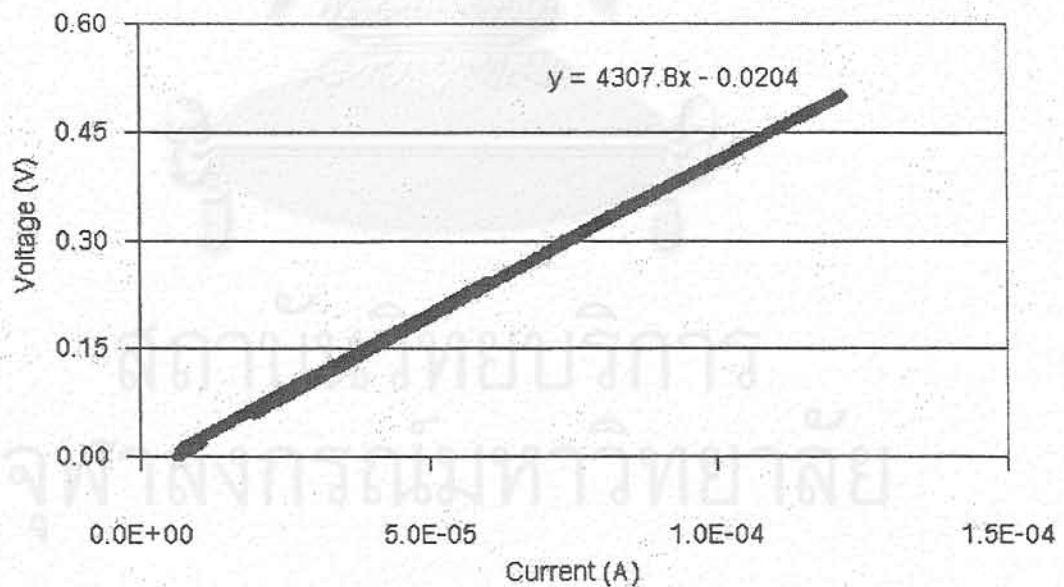
รูปที่ ก.93 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิด  
โครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ  
80 °C



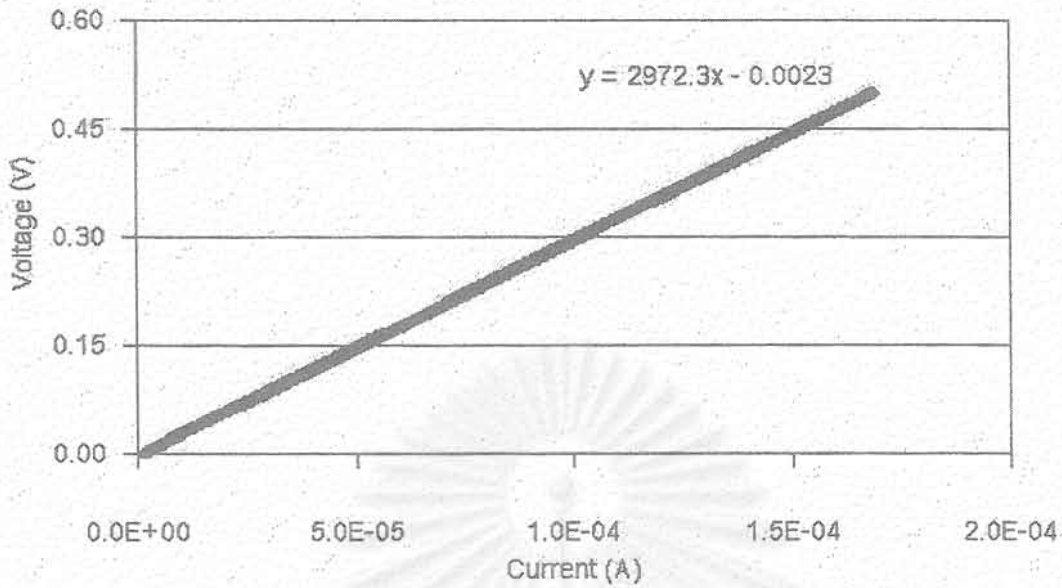
รูปที่ ก.94 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิด  
โครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ  
80 °C



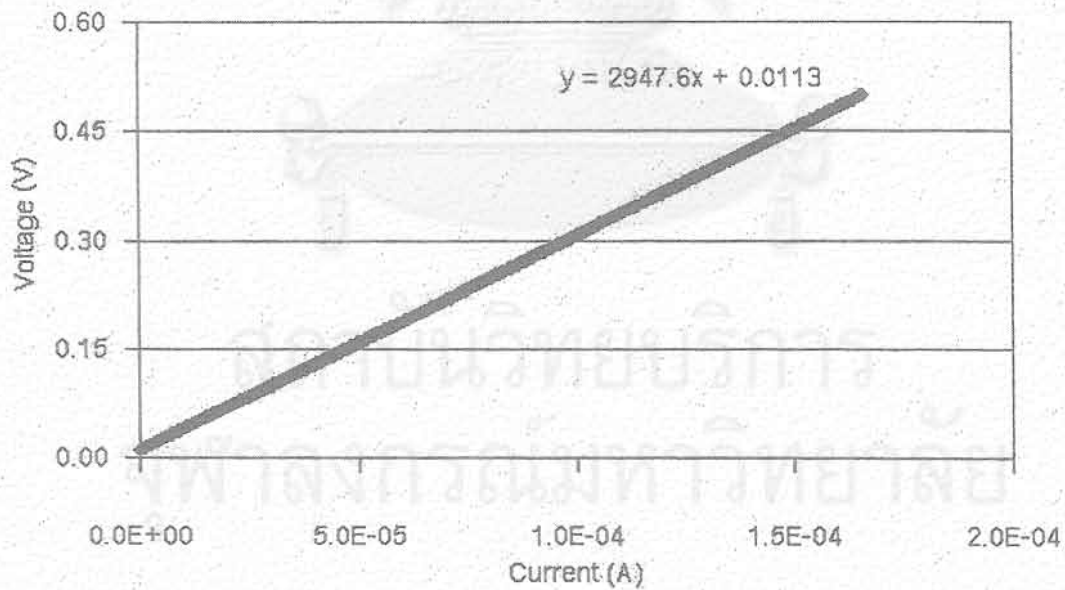
รูปที่ ก.95 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิด โครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$



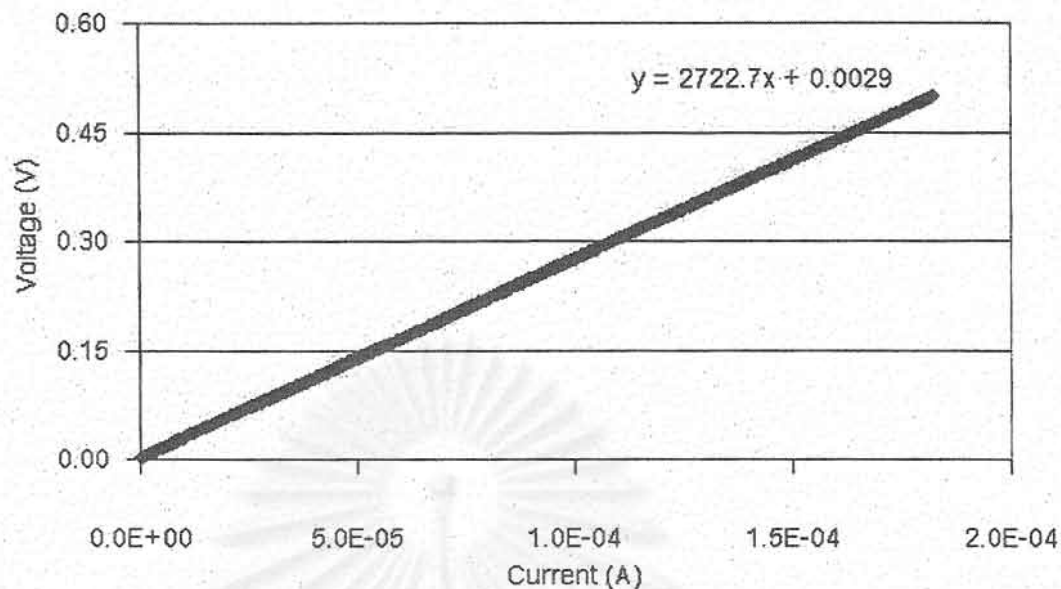
รูปที่ ก.96 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิด โครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$



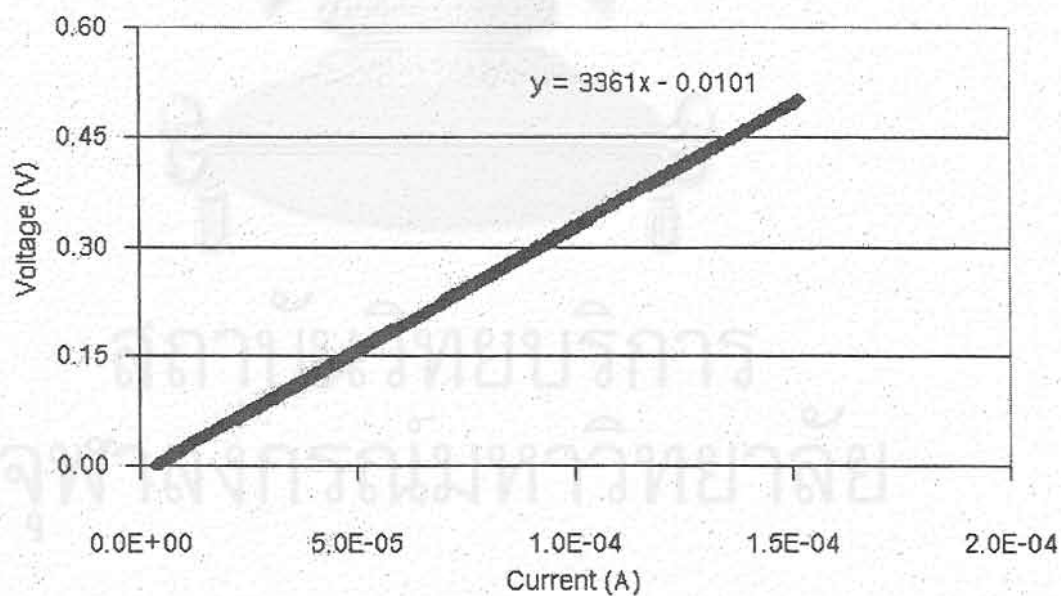
รูปที่ ก.97 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 80 °C



รูปที่ ก.98 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ 84 °C

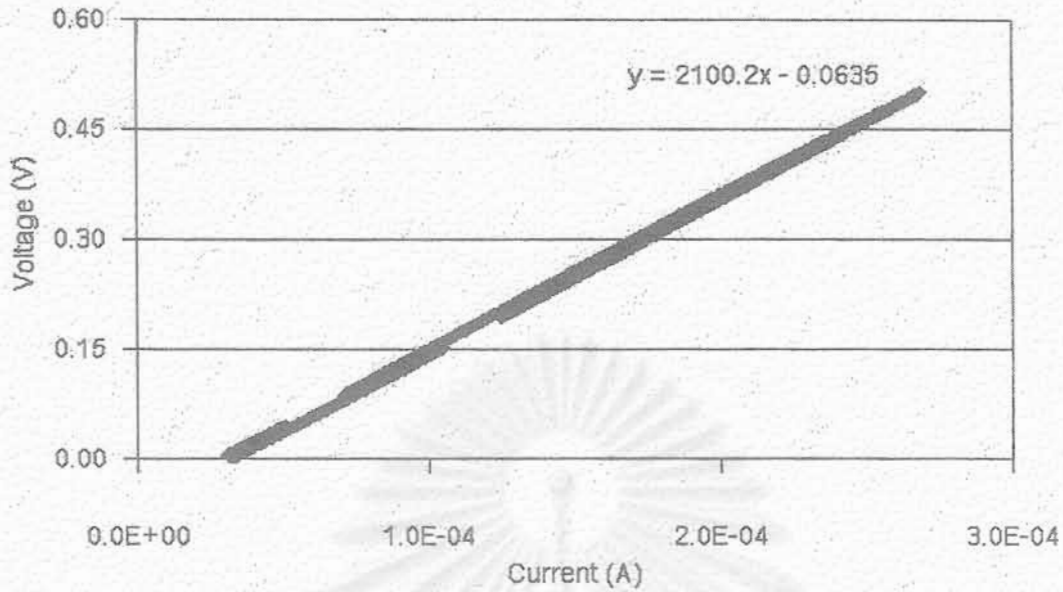


รูปที่ ก.99 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิด โครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 80 °C

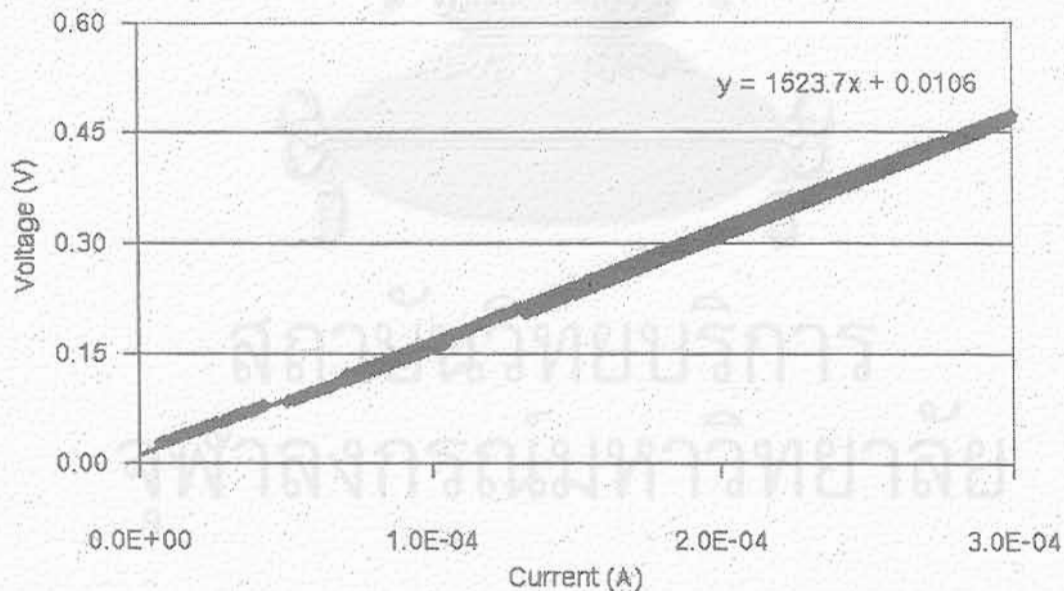


รูปที่ ก.100 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิด โครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 80 °C

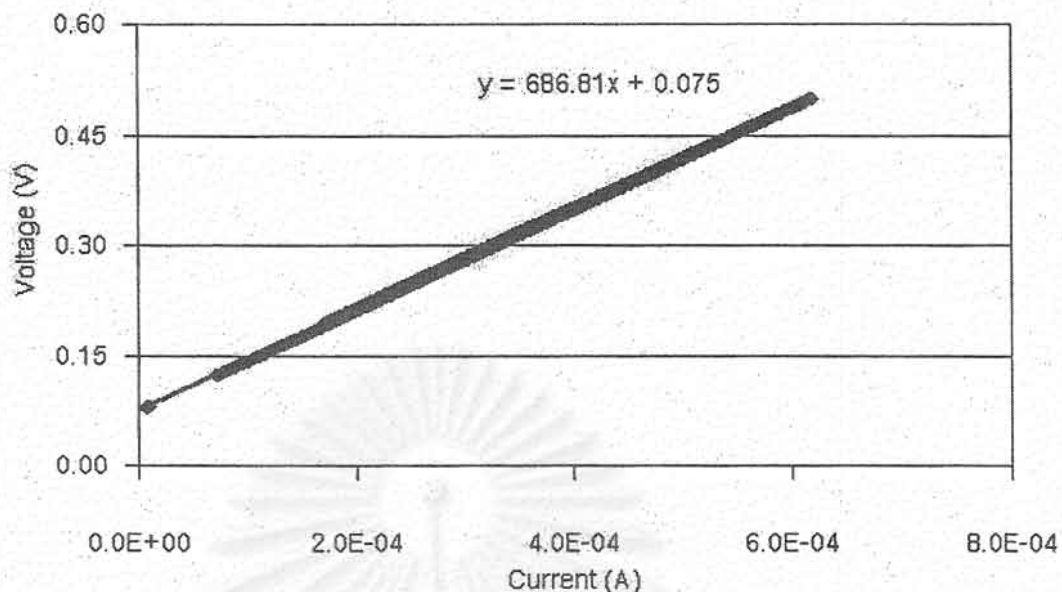




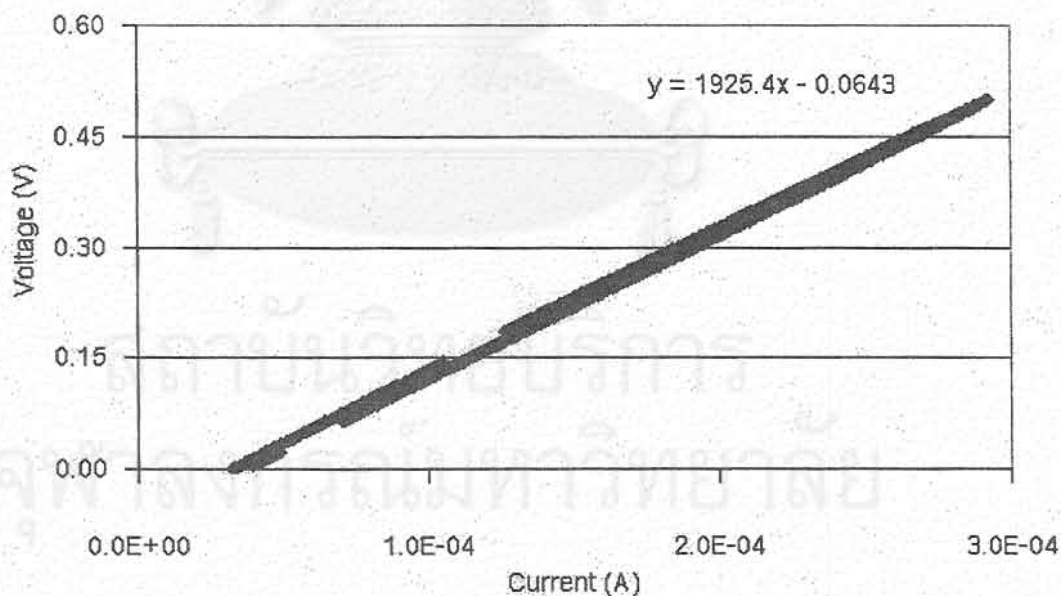
รูปที่ ก.101 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโคซานที่ถูกทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 80 °C



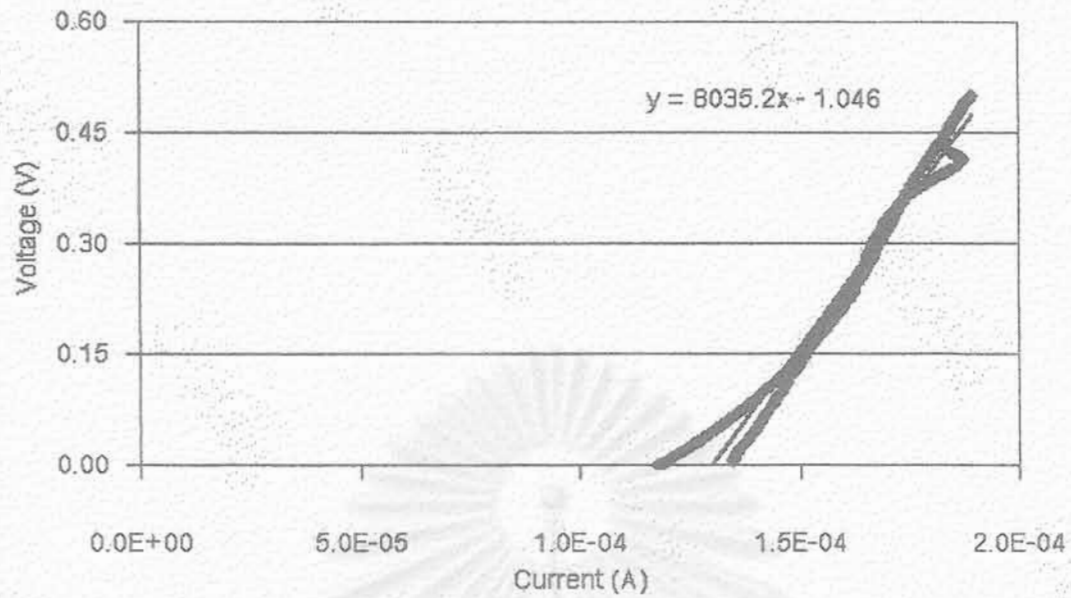
รูปที่ ก.102 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโคซานที่ถูกทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ 80 °C



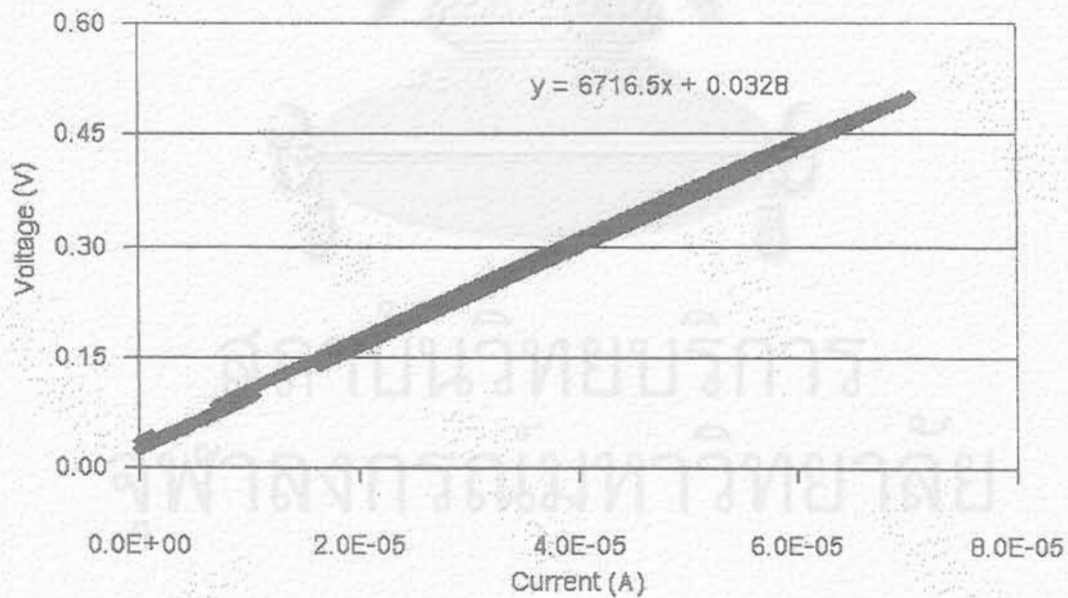
รูปที่ ก.103 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 80 °C



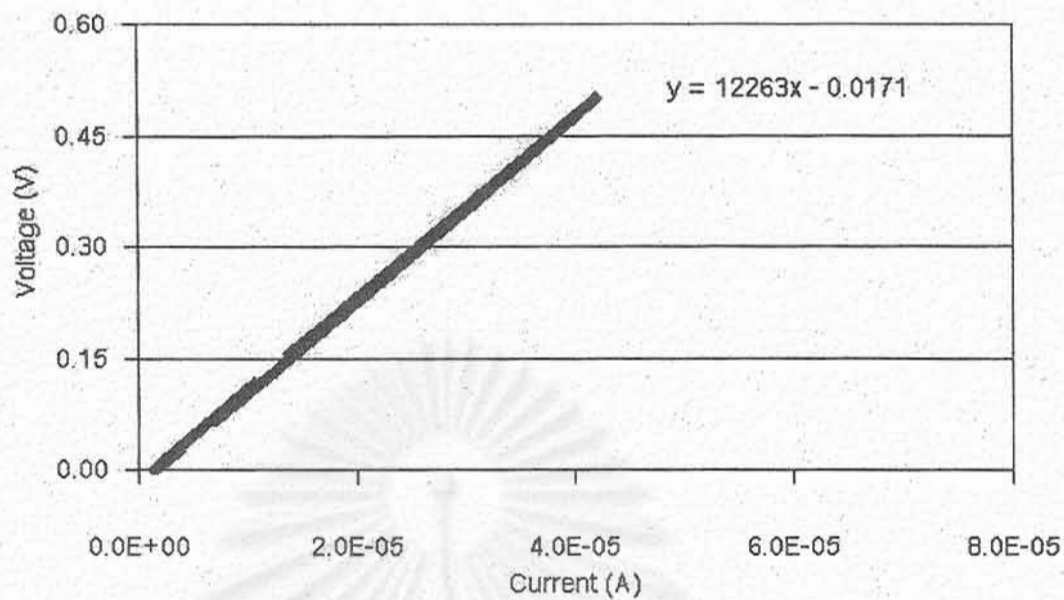
รูปที่ ก.104 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรนโคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้น Dope ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 80 °C



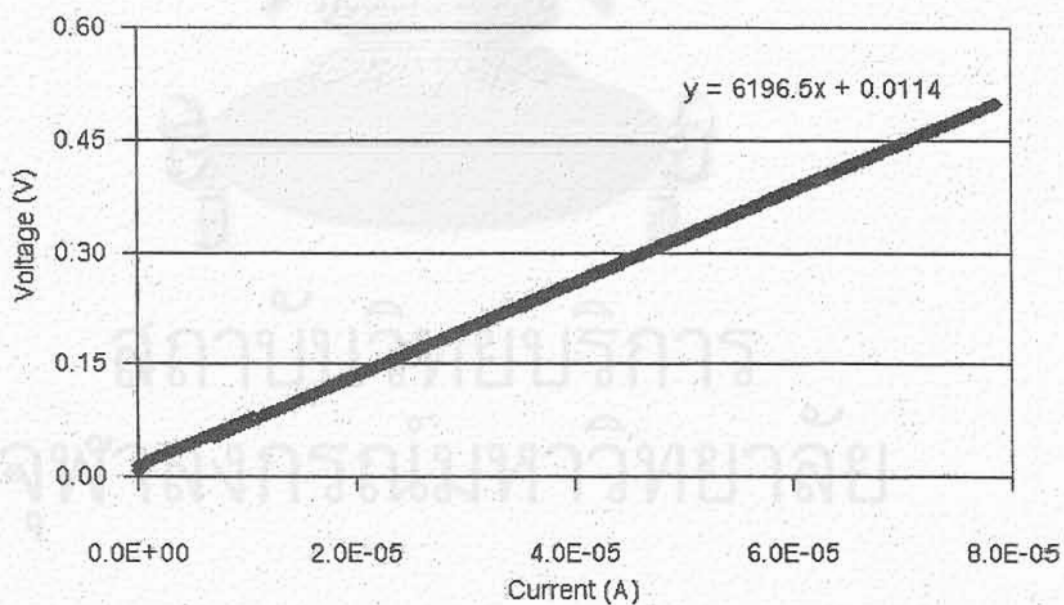
รูปที่ ก.105 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรน Alginate ตัวอย่างที่ 1 ณ อุณหภูมิ 80 °C



รูปที่ ก.106 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรน Alginate ตัวอย่างที่ 2 ณ อุณหภูมิ 80 °C



รูปที่ ก.107 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรน Alginate ตัวอย่างที่ 3 ณ อุณหภูมิ 80 °C



รูปที่ ก.108 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเมมเบรน Alginate ตัวอย่างที่ 4 ณ อุณหภูมิ 40 °C

## 8. การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

ตารางที่ ก.64 ภาวะที่ใช้ทดสอบ MEA ที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ณ อุณหภูมิห้อง

Time	H <sub>2</sub> flow rate (l/min)	O <sub>2</sub> flow rate (l/min)	H <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	O <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	H <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	H <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	H <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	O <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	O <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	O <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	Oven temp. (°C)	Anode temp. (°C)	Cathode temp. (°C)	H <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	O <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	H <sub>2</sub> humidity (%)	O <sub>2</sub> humidity (%)
16:43	210.00	205.00	71.10	72.80	81.00	78.30	119.00	76.80	75.80	120.00	52.20	35.50	28.80	45.60	45.20	100.00	100.00
16:44	211.00	206.00	75.20	73.40	80.90	78.10	119.00	76.60	75.60	120.00	50.50	32.00	33.70	44.40	44.90	100.00	100.00
16:45	210.00	205.00	79.40	76.00	80.70	77.90	119.00	76.40	75.50	120.00	49.20	32.00	34.30	43.80	44.40	100.00	100.00
16:46	209.00	207.00	80.70	77.80	80.60	77.80	119.00	76.30	75.30	120.00	48.40	32.40	32.80	43.20	43.80	100.00	100.00
16:47	209.00	206.00	83.40	79.20	80.50	77.70	119.00	76.10	75.00	120.00	47.30	32.00	30.80	42.60	43.30	100.00	100.00
16:48	211.00	205.00	99.50	99.80	79.10	76.10	119.00	74.20	73.10	120.00	29.60	28.10	28.30	28.10	27.60	99.50	95.84
16:49	210.00	205.00	99.50	100.00	79.00	75.80	119.00	73.80	72.90	120.00	29.60	28.10	28.20	28.10	27.90	99.50	98.28
16:50	213.00	206.00	100.00	99.80	78.80	75.70	119.00	73.60	72.60	120.00	29.50	28.00	28.10	28.10	27.90	100.00	98.65
16:51	210.00	206.00	99.60	100.00	78.60	75.50	119.00	73.40	72.40	120.00	29.30	27.90	28.10	28.40	27.90	100.00	98.85
16:52	211.00	208.00	99.40	99.30	78.60	75.30	119.00	73.40	72.40	120.00	29.10	27.90	28.10	28.40	27.90	100.00	98.16

ตารางที่ ก.65 ภาวะที่ใช้ทดสอบ MEA ที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ณ อุณหภูมิห้อง (ต่อ)

Time	H <sub>2</sub> flow rate (l/min)	O <sub>2</sub> flow rate (l/min)	H <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	O <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	H <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	H <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	H <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	O <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	O <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	O <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	Oven temp. (°C)	Anode temp. (°C)	Cathode temp. (°C)	H <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	O <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	H <sub>2</sub> humidity (%)	O <sub>2</sub> humidity (%)
16:53	211.00	207.00	99.50	99.50	78.40	75.20	119.00	73.40	72.50	120.00	29.10	27.90	28.00	28.70	27.90	100.00	98.93
16:54	212.00	206.00	98.90	99.60	78.20	75.10	119.00	73.50	72.60	120.00	29.10	27.90	28.00	28.70	27.90	100.00	99.03
16:55	210.00	206.00	100.00	99.90	78.10	75.00	119.00	73.60	72.80	120.00	29.00	27.90	28.00	28.70	27.90	100.00	99.32
16:56	213.00	206.00	99.90	99.60	78.00	75.00	119.00	73.90	73.10	120.00	28.80	27.90	28.00	28.70	27.90	100.00	99.03
16:57	209.00	206.00	99.80	99.40	78.00	74.90	119.00	74.00	73.30	120.00	28.90	27.80	27.90	28.70	28.20	100.00	100.00
16:58	212.00	206.00	100.00	100.00	77.90	75.00	119.00	74.30	73.60	120.00	28.70	27.80	27.90	28.70	28.20	100.00	100.00
16:59	209.00	206.00	99.50	99.80	78.00	75.10	119.00	74.60	74.10	120.00	28.70	27.80	27.90	28.70	28.20	100.00	100.00
17:00	212.00	207.00	99.80	99.90	78.00	75.30	119.00	75.00	74.40	120.00	28.70	27.70	27.90	28.70	28.20	100.00	100.00
17:01	211.00	206.00	100.00	99.30	78.20	75.40	119.00	75.20	74.60	120.00	28.60	27.80	27.90	28.70	28.20	100.00	100.00
17:02	211.00	207.00	99.10	99.50	78.40	75.50	119.00	75.60	74.90	120.00	28.40	27.80	26.00	28.70	28.50	100.00	100.00

ตารางที่ ก.66 ภาวะที่ใช้ทดสอบ MEA ที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ณ อุณหภูมิห้อง (ต่อ)

Time	H <sub>2</sub> flow rate (l/min)	O <sub>2</sub> flow rate (l/min)	H <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	O <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	H <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	H <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	H <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	O <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	O <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	O <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	Oven temp. (°C)	Anode temp. (°C)	Cathode temp. (°C)	H <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	O <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	H <sub>2</sub> humidity (%)	O <sub>2</sub> humidity (%)
17:03	211.00	204.00	99.60	100.00	78.40	75.80	119.00	75.80	75.00	120.00	28.30	27.60	24.80	28.70	28.50	100.00	100.00
17:04	213.00	206.00	99.80	100.00	78.80	76.00	119.00	76.00	75.30	120.00	28.10	27.60	24.70	28.70	28.50	100.00	100.00
17:05	209.00	205.00	99.40	99.80	79.00	76.30	119.00	76.10	75.40	120.00	28.10	27.60	24.80	28.70	28.50	100.00	100.00
17:06	210.00	206.00	99.40	99.60	79.20	76.50	119.00	76.20	75.30	120.00	28.10	27.00	25.00	28.70	28.50	100.00	100.00
17:07	209.00	205.00	99.30	99.30	79.40	76.70	119.00	76.20	75.30	120.00	28.00	26.20	25.80	28.70	28.50	100.00	100.00
17:08	211.00	207.00	99.10	99.40	79.70	76.80	119.00	76.00	75.00	120.00	27.90	25.20	25.80	28.70	28.70	100.00	100.00
17:09	211.00	204.00	99.90	99.80	79.90	77.20	119.00	75.80	74.90	120.00	27.90	25.50	25.40	28.70	28.70	100.00	100.00
17:10	211.00	206.00	99.40	99.50	80.00	77.10	119.00	75.60	74.70	120.00	27.90	24.60	25.60	28.70	28.70	100.00	100.00
17:11	211.00	205.00	99.90	99.50	80.00	77.20	119.00	75.40	74.60	120.00	27.80	25.40	25.60	28.70	28.70	100.00	100.00
17:12	211.00	206.00	99.60	99.40	80.00	77.00	119.00	75.30	74.30	120.00	27.70	27.40	25.90	28.70	28.70	100.00	100.00

ตารางที่ ก.67 ภาวะที่ใช้ทดสอบ MEA ที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิห้อง

Time	H <sub>2</sub> flow rate (l/min)	O <sub>2</sub> flow rate (l/min)	H <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	O <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	H <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	H <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	H <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	O <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	O <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	O <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	Oven temp. (°C)	Anode temp. (°C)	Cathode temp. (°C)	H <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	O <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	H <sub>2</sub> humidity (%)	O <sub>2</sub> humidity (%)
12:23	213.87	206.06	96.95	97.56	77.56	74.20	119.01	74.73	74.02	111.63	23.20	23.00	23.25	29.30	26.25	100.00	100.00
12:24	213.87	207.03	100.12	97.31	77.37	74.03	119.08	74.99	74.33	111.58	23.30	23.38	23.52	29.30	26.52	100.00	100.00
12:25	212.89	208.01	99.63	97.31	77.17	73.89	119.08	75.33	74.55	111.70	23.15	23.34	23.55	29.30	26.52	100.00	100.00
12:26	212.89	207.03	99.27	97.68	77.10	73.94	119.08	75.53	74.68	111.64	23.25	23.45	23.65	29.30	26.52	100.00	100.00
12:27	211.91	208.01	99.27	98.29	77.24	74.10	119.08	75.73	74.95	111.58	23.35	23.67	23.90	29.30	26.52	100.00	100.00
12:28	213.87	206.06	99.88	98.54	77.44	74.38	119.08	75.86	74.90	111.58	23.25	23.97	23.98	29.30	26.52	100.00	100.00
12:29	214.84	207.03	99.27	98.41	77.70	74.61	119.08	75.92	74.92	111.66	23.31	24.14	24.29	29.30	26.52	100.00	100.00
12:30	211.91	205.08	99.27	98.17	77.97	75.00	119.08	75.92	74.95	111.66	23.27	24.49	24.65	29.30	26.80	100.00	100.00
12:31	215.82	205.08	99.63	99.02	78.37	75.32	119.01	75.86	74.90	111.66	23.46	24.75	24.74	29.31	26.80	100.00	100.00
12:32	213.87	204.10	99.51	98.41	78.70	75.77	119.08	75.73	74.67	111.73	23.41	24.84	24.81	29.60	26.80	100.00	100.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก.68 ภาวะที่ใช้ทดสอบ MEA ที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิห้อง (ต่อ)

Time	H <sub>2</sub> flow rate (l/min)	O <sub>2</sub> flow rate (l/min)	H <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	O <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	H <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	H <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	H <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	O <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	O <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	O <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	Oven temp. (°C)	Anode temp. (°C)	Cathode temp. (°C)	H <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	O <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	H <sub>2</sub> humidity (%)	O <sub>2</sub> humidity (%)
12:33	212.89	207.03	99.63	98.54	79.17	76.20	119.08	75.53	74.44	111.74	23.46	24.72	24.92	29.61	26.80	100.00	100.00
12:34	212.89	208.98	99.51	99.15	79.64	76.66	119.15	75.26	74.24	111.67	23.40	24.83	24.94	29.61	27.07	100.00	100.00
12:35	212.89	208.01	99.39	98.66	80.03	77.09	119.01	75.07	74.03	111.68	23.46	24.88	25.03	29.61	27.07	100.00	100.00
12:36	212.89	206.06	99.51	98.78	80.50	77.38	119.08	74.87	73.73	111.68	23.52	24.96	25.13	29.91	27.07	100.00	100.00
12:37	212.89	208.98	100.37	98.54	80.77	77.68	119.01	74.67	73.41	111.62	23.49	25.01	25.21	29.91	27.35	100.00	100.00
12:38	213.87	205.08	99.27	99.39	80.83	77.65	119.08	74.47	73.13	111.56	23.51	25.14	25.27	29.91	27.35	100.00	100.00
12:39	211.91	207.03	99.27	98.54	80.83	77.64	119.08	74.21	72.99	111.62	23.58	25.14	25.24	29.91	27.35	100.00	100.00
12:40	210.94	207.03	99.63	98.41	80.77	77.56	119.01	74.08	72.90	111.62	23.56	25.29	25.42	29.91	27.35	100.00	100.00
12:41	213.87	206.06	100.12	98.90	80.56	77.30	119.14	73.88	72.79	111.62	23.63	25.32	25.51	29.91	27.62	100.00	100.00
12:42	210.94	207.03	99.15	98.78	80.36	77.07	119.01	73.68	72.61	111.57	23.65	25.37	25.42	29.91	27.62	100.00	100.00

ตารางที่ ก.69 ภาวะที่ใช้ทดสอบ MEA ที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิห้อง (ต่อ)

Time	H <sub>2</sub> flow rate (l/min)	O <sub>2</sub> flow rate (l/min)	H <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	O <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	H <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	H <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	H <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	O <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	O <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	O <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	Oven temp. (°C)	Anode temp. (°C)	Cathode temp. (°C)	H <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	O <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	H <sub>2</sub> humidity (%)	O <sub>2</sub> humidity (%)
12:43	212.89	208.01	99.63	98.90	80.23	76.86	119.08	73.55	72.53	111.70	23.60	25.38	25.48	29.91	27.63	100.00	100.00
12:44	211.91	208.01	99.76	98.41	79.96	76.64	119.08	73.48	72.52	111.63	23.66	25.40	25.59	29.91	27.90	100.00	100.00
12:45	212.89	207.03	99.39	98.29	79.83	76.48	119.00	73.48	72.53	111.63	23.64	25.60	25.65	29.91	27.90	100.00	100.00
12:46	212.89	208.01	100.00	98.41	79.63	76.20	119.08	73.55	72.66	111.71	23.68	25.48	25.63	29.91	27.90	100.00	100.00
12:47	213.87	206.06	99.63	98.66	79.49	76.05	119.01	73.68	72.95	111.70	23.74	25.61	25.78	29.91	27.90	100.00	100.00
12:48	213.87	207.03	100.12	98.54	79.29	75.88	119.01	73.88	73.11	111.63	23.75	25.67	25.88	29.91	28.17	100.00	100.00
12:49	211.91	208.01	99.27	98.78	79.09	75.66	119.01	74.08	73.32	111.63	23.72	25.74	25.82	29.98	28.17	100.00	100.00
12:50	211.91	205.08	99.63	98.90	78.89	75.37	119.07	74.35	73.66	111.70	23.79	25.72	25.96	30.22	28.17	100.00	100.00
12:51	211.91	208.01	99.63	98.29	78.76	75.29	119.07	74.61	74.07	111.70	23.87	25.91	25.98	30.21	28.17	100.00	100.00
12:52	213.87	207.03	99.76	98.54	78.50	75.02	119.07	74.88	74.32	111.71	23.77	25.87	26.03	30.21	28.39	100.00	100.00

ตารางที่ ก.70 ภาวะที่ใช้ทดสอบ MEA ที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิห้อง (ต่อ)

Time	H <sub>2</sub> flow rate (l/min)	O <sub>2</sub> flow rate (l/min)	H <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	O <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	H <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	H <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	H <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	O <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	O <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	O <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	Oven temp. (°C)	Anode temp. (°C)	Cathode temp. (°C)	H <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	O <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	H <sub>2</sub> humidity (%)	O <sub>2</sub> humidity (%)
12:53	212.89	208.98	99.63	98.05	78.36	74.86	119.01	75.21	74.46	111.71	23.86	25.93	25.92	30.22	28.45	100.00	100.00
12:54	213.87	207.03	99.63	99.02	78.23	74.68	119.08	75.48	74.71	111.72	23.93	25.91	26.04	30.50	28.45	100.00	100.00
12:55	417.97	208.01	99.76	98.54	77.90	74.58	119.07	75.68	74.83	111.79	24.01	26.00	25.97	30.52	28.45	100.00	100.00
12:56	416.99	207.03	99.76	98.54	77.69	74.45	119.07	75.88	75.05	111.73	24.04	26.01	26.22	30.52	28.71	100.00	100.00
12:57	211.91	208.01	99.39	98.78	77.70	74.47	119.14	75.88	75.10	111.73	24.08	26.07	26.24	30.52	28.72	100.00	100.00
12:58	213.87	208.01	99.51	98.66	77.76	74.52	119.07	75.88	75.05	111.74	23.98	26.17	26.35	30.52	28.72	100.00	100.00
12:59	212.89	206.06	99.39	98.78	77.83	74.56	119.14	75.81	74.82	111.75	24.03	26.20	26.38	30.52	28.72	100.00	100.00
13:00	211.91	207.03	99.15	99.02	77.90	74.79	119.01	75.68	74.78	111.73	24.04	26.30	26.45	30.52	28.72	100.00	100.00
13:01	212.89	208.01	99.63	98.29	78.10	75.03	119.07	75.48	74.55	111.63	24.02	26.26	26.52	30.52	29.00	100.00	100.00
13:02	212.89	208.01	99.39	98.78	78.30	75.32	119.07	75.34	74.36	111.64	24.03	26.22	26.52	30.52	29.00	100.00	100.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.71 ภาวะที่ใช้ทดสอบ MEA ที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิห้อง (ต่อ)

Time	H <sub>2</sub> flow rate (l/min)	O <sub>2</sub> flow rate (l/min)	H <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	O <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	H <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	H <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	H <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	O <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	O <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	O <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	Oven temp. (°C)	Anode temp. (°C)	Cathode temp. (°C)	H <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	O <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	H <sub>2</sub> humidity (%)	O <sub>2</sub> humidity (%)
13:03	211.91	208.01	99.51	98.29	78.57	75.66	119.07	75.08	74.08	111.65	24.19	26.55	26.54	30.52	29.00	100.00	100.00
13:04	213.87	206.06	99.02	99.15	78.83	75.84	119.07	74.88	73.84	111.72	24.13	26.43	26.50	30.52	29.00	100.00	100.00
13:05	212.89	205.08	99.88	98.90	79.03	76.20	119.07	74.75	73.62	111.72	24.07	26.41	26.56	30.52	29.26	100.00	100.00
13:06	211.91	206.06	98.90	99.02	79.36	76.42	119.01	74.55	73.41	111.73	24.12	26.50	26.63	30.81	29.27	100.00	100.00
13:07	211.91	207.03	99.63	97.80	79.56	76.67	119.01	74.35	73.21	111.72	24.09	26.61	26.73	30.82	29.27	100.00	100.00
13:08	212.89	207.03	99.63	98.29	79.89	76.79	119.01	74.15	72.96	111.71	24.06	26.51	26.57	30.82	29.27	100.00	100.00
13:09	213.87	206.06	99.27	98.54	80.03	76.97	119.07	74.02	72.87	111.78	24.19	26.63	26.68	30.82	29.27	100.00	100.00
13:10	212.89	207.03	99.51	98.66	80.09	77.09	119.01	73.82	72.76	111.69	24.23	26.78	26.71	30.82	29.54	100.00	100.00
13:11	211.91	207.03	100.24	98.54	80.16	76.98	119.01	73.68	72.61	111.76	24.18	26.67	26.80	30.82	29.54	100.00	100.00
13:12	213.87	206.06	99.88	98.17	80.09	76.96	119.01	73.55	72.75	111.76	24.22	26.76	26.90	30.82	29.54	100.00	100.00

ตารางที่ ก.72 ภาวะที่ใช้ทดสอบ MEA ที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิห้อง (ต่อ)

Time	H <sub>2</sub> flow rate (l/min)	O <sub>2</sub> flow rate (l/min)	H <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	O <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	H <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	H <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	H <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	O <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	O <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	O <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	Oven temp. (°C)	Anode temp. (°C)	Cathode temp. (°C)	H <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	O <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	H <sub>2</sub> humidity (%)	O <sub>2</sub> humidity (%)
13:13	213.87	207.03	99.76	98.54	79.96	76.68	119.07	73.55	72.54	111.75	24.14	26.69	26.73	30.82	29.54	100.00	100.00
13:14	211.91	207.03	99.39	98.41	79.76	76.62	119.07	73.55	72.63	111.73	24.27	26.84	26.83	31.12	29.55	100.00	100.00
13:15	213.87	208.01	99.88	97.80	79.56	76.23	119.07	73.62	72.83	111.74	24.15	26.70	26.86	31.12	29.54	100.00	100.00
13:16	211.91	208.01	99.63	98.05	79.43	76.12	119.01	73.75	73.08	111.81	24.25	26.63	26.82	31.12	29.82	100.00	100.00
13:17	210.94	208.01	99.39	98.54	79.16	75.93	119.14	73.95	73.12	111.74	24.20	26.73	26.79	31.12	29.82	100.00	100.00
13:18	214.84	208.01	99.76	98.29	78.96	75.72	119.01	74.16	73.45	111.74	24.26	26.75	26.93	31.12	29.82	100.00	100.00
13:19	212.89	206.06	99.63	98.41	78.83	75.47	119.14	74.42	73.80	111.79	24.27	26.81	26.98	31.12	29.82	100.00	100.00
13:20	212.89	206.06	99.63	97.80	78.69	75.30	119.14	74.68	73.99	111.66	24.24	26.84	26.85	31.12	29.82	100.00	100.00
13:21	213.87	209.96	100.24	98.29	78.50	75.05	119.07	74.95	74.38	111.66	24.25	26.78	26.94	31.12	29.82	100.00	100.00
13:22	213.87	207.03	99.88	98.29	78.29	75.02	119.14	75.22	74.51	111.71	24.36	26.94	27.03	31.12	29.82	100.00	100.00

ตารางที่ ก.73 ภาวะที่ใช้ทดสอบ MEA ที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิห้อง (ต่อ)

Time	H <sub>2</sub> flow rate (l/min)	O <sub>2</sub> flow rate (l/min)	H <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	O <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	H <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	H <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	H <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	O <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	O <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	O <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	Oven temp. (°C)	Anode temp. (°C)	Cathode temp. (°C)	H <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	O <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	H <sub>2</sub> humidity (%)	O <sub>2</sub> humidity (%)
13:23	212.89	207.03	99.39	97.92	78.09	74.81	119.08	75.48	74.67	111.59	24.18	26.85	26.90	31.12	29.82	100.00	100.00
13:24	211.91	208.01	99.27	98.54	77.96	74.76	119.07	75.68	74.96	111.59	24.35	26.95	27.06	31.12	29.82	100.00	100.00
13:25	212.89	208.01	99.76	98.05	77.83	74.66	119.01	75.88	75.00	111.59	24.31	27.01	27.00	31.12	30.09	100.00	100.00
13:26	212.89	207.03	99.88	98.05	77.76	74.72	119.08	75.88	75.13	111.66	24.33	27.09	27.00	31.12	30.09	100.00	100.00
13:27	211.91	205.08	99.63	97.92	77.76	74.69	119.01	75.89	74.95	111.66	24.25	27.04	27.15	31.12	30.09	100.00	100.00
13:28	211.91	206.06	99.63	98.90	77.90	74.93	119.14	75.75	74.87	111.65	24.37	27.10	27.13	31.12	30.09	100.00	100.00
13:29	212.89	206.06	99.27	98.17	77.96	75.12	119.01	75.62	74.66	111.65	24.33	27.07	27.06	31.12	30.09	100.00	100.00
13:30	211.91	207.03	99.63	98.78	78.23	75.28	119.08	75.42	74.47	111.65	24.34	27.10	27.03	31.12	30.09	100.00	100.00
13:31	212.89	207.03	100.00	98.41	78.37	75.51	119.08	75.29	74.15	111.72	24.31	27.00	27.12	31.12	30.09	100.00	100.00
13:32	212.89	208.01	100.00	98.05	78.63	75.85	119.07	75.09	73.98	111.65	24.38	26.91	27.08	31.12	30.09	127.37	116.61

ตารางที่ ก.74 ภาวะที่ใช้ทดสอบ MEA ที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิห้อง (ต่อ)

Time	H <sub>2</sub> flow rate (l/min)	O <sub>2</sub> flow rate (l/min)	H <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	O <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	H <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	H <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	H <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	O <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	O <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	O <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	Oven temp. (°C)	Anode temp. (°C)	Cathode temp. (°C)	H <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	O <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	H <sub>2</sub> humidity (%)	O <sub>2</sub> humidity (%)
13:33	212.89	207.03	99.88	98.41	78.83	76.09	119.07	74.89	73.75	111.65	24.37	27.07	27.09	31.12	30.09	100.00	100.00
13:34	212.89	207.03	99.15	98.05	79.10	76.32	119.01	74.69	73.55	111.71	24.43	27.04	27.22	31.12	30.09	100.00	100.00
13:35	213.87	205.08	99.39	98.78	79.43	76.57	119.01	74.55	73.32	111.78	24.44	27.02	27.15	31.12	30.09	100.00	100.00
13:36	213.87	207.03	99.15	98.41	79.70	76.79	119.07	74.35	73.29	111.71	24.44	27.09	27.16	31.12	30.26	100.00	100.00
13:37	213.87	206.06	99.51	98.90	79.90	76.96	119.08	74.16	73.02	111.70	24.49	27.10	27.16	31.12	30.37	100.00	100.00
13:38	212.89	205.08	99.51	98.90	80.03	76.93	119.01	73.95	72.80	111.76	24.38	26.94	27.08	31.12	30.37	100.00	100.00
13:39	211.91	208.01	99.39	98.41	80.03	76.98	119.08	73.76	72.67	111.74	24.46	27.01	27.23	31.12	30.37	100.00	100.00
13:40	212.89	207.03	99.27	98.54	80.03	76.85	119.08	73.69	72.56	111.74	24.44	27.09	27.04	31.12	30.37	100.00	100.00
13:41	214.84	207.03	98.90	98.17	80.03	76.81	119.01	73.56	72.67	111.65	24.44	27.22	27.22	31.12	30.37	100.00	100.00
13:42	211.91	208.01	99.39	98.41	79.83	76.69	119.08	73.56	72.66	111.58	24.44	27.05	27.24	31.12	30.37	100.00	100.00

ตารางที่ ก.75 ภาวะที่ใช้ทดสอบ MEA ที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิห้อง (ต่อ)

Time	H <sub>2</sub> flow rate (l/min)	O <sub>2</sub> flow rate (l/min)	H <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	O <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	H <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	H <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	H <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	O <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	O <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	O <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	Oven temp. (°C)	Anode temp. (°C)	Cathode temp. (°C)	H <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	O <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	H <sub>2</sub> humidity (%)	O <sub>2</sub> humidity (%)
13:43	212.89	208.01	99.88	98.41	79.63	76.45	119.08	73.63	72.76	111.57	24.45	27.09	27.25	31.12	30.37	100.00	100.00
13:44	212.89	206.06	100.00	98.41	79.49	76.37	119.01	73.69	72.94	111.63	24.50	27.08	27.28	31.12	30.37	100.00	100.00
13:45	211.91	207.03	99.15	98.41	79.29	76.05	119.14	73.83	73.04	111.48	24.43	27.12	27.23	31.12	30.64	100.00	100.00
13:46	213.87	207.03	99.88	98.17	79.16	75.89	119.08	74.04	73.37	111.54	24.58	27.08	27.11	31.12	30.64	100.00	100.00
13:47	212.89	208.01	99.63	98.17	78.96	75.64	119.07	74.29	73.60	111.53	24.42	27.00	27.27	31.42	30.64	100.00	100.00
13:48	210.94	206.06	99.39	98.29	78.76	75.41	119.07	74.49	73.75	111.53	24.43	27.18	27.17	31.42	30.64	100.00	100.00
13:49	211.91	207.03	99.51	98.17	78.62	75.32	119.08	74.76	74.16	111.47	24.68	27.24	27.28	31.42	30.64	100.00	100.00
13:50	213.87	208.01	99.63	98.78	78.49	75.14	119.07	75.02	74.29	111.53	24.59	27.20	27.36	31.71	30.64	100.00	100.00
13:51	213.87	208.98	99.27	98.17	78.29	74.93	119.07	75.29	74.68	111.59	24.58	27.08	27.23	31.72	30.64	100.00	100.00
13:52	210.94	208.01	99.39	98.90	78.09	74.83	119.08	75.56	74.83	111.52	24.64	27.17	27.38	31.72	30.64	100.00	100.00



ตารางที่ ก.76 ภาวะที่ใช้ทดสอบ MEA ที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานที่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยกรดซัลฟริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิห้อง (ต่อ)

Time	H <sub>2</sub> flow rate (l/min)	O <sub>2</sub> flow rate (l/min)	H <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	O <sub>2</sub> Sensor humidity (%)	H <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	H <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	H <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	O <sub>2</sub> humidifier temp. (°C)	O <sub>2</sub> vapor temp. (°C)	O <sub>2</sub> line heater temp. (°C)	Oven temp. (°C)	Anode temp. (°C)	Cathode temp. (°C)	H <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	O <sub>2</sub> sensor temp. (°C)	H <sub>2</sub> humidity (%)	O <sub>2</sub> humidity (%)
13:53	213.87	208.01	99.76	98.66	78.03	74.69	119.07	75.76	74.94	111.51	24.63	27.27	27.28	31.72	30.64	100.00	100.00
13:54	213.87	207.03	99.63	98.90	77.89	74.67	119.01	75.82	74.98	111.51	24.54	27.21	27.26	31.72	30.64	100.00	100.00
13:55	210.94	207.03	99.63	98.78	77.83	74.65	119.01	75.85	74.96	111.51	24.61	27.22	27.28	31.72	30.64	100.00	100.00
13:56	211.91	207.03	99.63	99.39	77.83	74.74	119.08	75.82	74.85	111.50	24.54	27.21	27.24	31.72	30.65	100.00	100.00
13:57	211.91	207.03	98.90	99.15	77.83	74.74	119.00	75.69	74.73	111.57	24.55	27.16	27.20	31.72	30.92	100.00	100.00
13:58	213.87	207.03	99.88	98.78	77.96	75.00	119.01	75.56	74.62	111.57	24.67	27.14	27.30	31.72	30.92	100.00	100.00

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

## ตัวอย่างการคำนวณ

## 1. ร้อยละการกำจัดหมู่แอสเตติล

จากข้อมูลในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างที่ 1

น้ำหนักของโคโตซานไฮโดรคลอไรด์	=	1.0130	กรัม
ละลายในน้ำเพื่อให้ได้สารละลาย	=	250	มิลลิลิตร

การไตเตรต

ปริมาตรสารละลายโคโตซานไฮโดรคลอไรด์ที่ใช้	=	50	มิลลิลิตร
ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (0.0880 N)	=	7.70	มิลลิลิตร

การคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{โคโตซานไฮโดรคลอไรด์ 1 โมล (197.61672 กรัม)} &= \text{NaOH 1 โมล} \\
 \text{มอนอเมอร์ที่มีหมู่ -NHCOCH}_3 \text{ 1 โมล} &= 203.19296 \text{ กรัม} \\
 \text{The amount of monomer having -NH}_2 \text{ group} &= \frac{5x[\text{NaOH}]xV_{\text{NaOH}}}{1000} \\
 &= \frac{5x0.0880x7.70}{1000} = 0.003388 \text{ mol} \\
 &= 0.003388 \times 197.61672 = 0.6695 \text{ g}
 \end{aligned}$$

The amount of monomer having -NHCOCH<sub>3</sub> group =

$$\frac{\text{The weight of sample} - \text{The amount of monomer having -NH}_2 \text{ group}}{203.19296}$$

$$= \frac{1.0130 - 0.6695}{203.19296} = 0.001691 \text{ mol}$$

$$\text{The degree of deacetylation} = \left( \frac{\text{The amount of monomer having -NH}_2 \text{ group}}{\text{The total amount of monomer}} \right) \times 100$$

The amount of monomer = 0.003388 + 0.001691 = 0.005079 mol

$$\text{The degree of deacetylation} = \left( \frac{0.003388}{0.005079} \right) \times 100 = 66.71\%$$

## 2. ร้อยละการดูดซับน้ำ

จากข้อมูลในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.4 และ ตารางที่ ก.5 เมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 1

$$\text{น้ำหนักของเมมเบรนเปียก} = 0.4488 \quad \text{กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักของเมมเบรนแห้ง} = 0.1561 \quad \text{กรัม}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Water content} &= \frac{(\text{Weight of wet membrane} - \text{Weight of dried membrane})}{\text{Weight of dried membrane}} \times 100 \\ &= \frac{(0.4488 - 0.1561)}{0.1561} \times 100 = 187.51 \end{aligned}$$

## 3. ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา

จากข้อมูลในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.4 และ ตารางที่ ก.5 เมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 1

$$\text{ความหนาของเมมเบรนเปียก} = 0.0518 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

$$\text{ความหนาของเมมเบรนแห้ง} = 0.0186 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Thickness change} &= \frac{(\text{Thickness of wet membrane} - \text{Thickness of dried membrane})}{\text{Thickness of dried membrane}} \times 100 \\ &= \frac{(0.0518 - 0.0186)}{0.0186} \times 100 = 178.49 \end{aligned}$$

## 4. ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

จากข้อมูลในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.9 และ ตารางที่ ก.10 เมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 1

น้ำหนักของเมมเบรนแห้ง	=	0.0130	กรัม
ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	=	0.0045	นอร์มอล
ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก	=	0.0042	นอร์มอล
ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	=	20	มิลลิลิตร
ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก	=	18.90	มิลลิลิตร
ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ปีเปตมาไตเตรตกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก	=	20	มิลลิลิตร

$$\text{Ion exchange capacity} = \frac{\left( N_1 V_1 - \left( \frac{V_1}{V_3} \right) N_2 V_2 \right)}{m}$$

เมื่อ

- $N_1$  = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (นอร์มอล)  
 $N_2$  = ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (นอร์มอล)  
 $V_1$  = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร)  
 $V_2$  = ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)  
 $V_3$  = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ปีเปตมาไตเตรตกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)  
 $m$  = น้ำหนักของเมมเบรน (กรัม)

$$\text{Ion exchange capacity} = \frac{\left( 0.0045(20) - \left( \frac{20}{20} \right) \times 0.0042(18.90) \right)}{0.0130} = 0.74 \text{ meq/g}$$

## 5. ความนำไฟฟ้า

จากข้อมูลในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.14 และตารางที่ ก.39 เมมเบรนไคโตซานที่ไม่ถูกทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย ตัวอย่างที่ 1

ความหนาของเยื่อแผ่น	=	0.0178	มิลลิเมตร
ความกว้างของเยื่อแผ่น	=	1.0250	เซนติเมตร
ระยะห่างระหว่างลวดแพลตินัม	=	0.4850	เซนติเมตร

The area of membrane = Membrane thickness X Membrane wide

$$= \left( \frac{0.0178}{10} \right) \times 1.0250 = 0.0018 \text{ cm}^2$$

$$\sigma = \frac{1}{R} \left( \frac{l}{A} \right)$$

- เมื่อ  $\sigma$  = ความนำไฟฟ้า (โอห์ม/เซนติเมตร)  
 $R$  = ความต้านทาน (โอห์ม)  
 $l$  = ระยะระหว่างลวดแพลทินัม (เซนติเมตร)  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของเมมเบรน (ตารางเซนติเมตร)

$$\sigma = \frac{1}{485010} \left( \frac{0.4850}{0.0018} \right) = 0.0005 \text{ ohm/cm}$$

#### 6. ร้อยละของพอลิเตตระฟลูออโรเอธิลีนในคาร์บอนเปเปอร์

จากข้อมูลในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.12 ตัวอย่างที่ 1

น้ำหนักของคาร์บอนเปเปอร์	=	0.5597	กรัม
น้ำหนักของคาร์บอนเปเปอร์ที่มี PTFE	=	0.7384	กรัม

$$\% \text{ PTFE} = \left( \frac{\text{Weight of carbon paper with PTFE} - \text{Weight of carbon paper}}{\text{Weight of carbon paper with PTFE}} \right) \times 100$$

$$= \left( \frac{0.7384 - 0.5597}{0.7384} \right) \times 100 = 24.20$$

#### 7. ปริมาณแพลทินัมบนคาร์บอนเปเปอร์

จากข้อมูลในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.13 ตัวอย่างที่ 1

น้ำหนักของคาร์บอนเปเปอร์ที่มี PTFE	=	0.4809	กรัม
น้ำหนักของอิเล็กโทรด	=	0.5283	กรัม
พื้นที่อิเล็กโทรด	=	25 ตารางเซนติเมตร	

$$\begin{aligned}
 \text{Pt loading} &= \left[ \frac{\frac{1}{2} \left( \frac{\text{Weight of electrode} - \text{weight of carbon paper with PTFE}}{\text{Weight of electrode}} \right)}{\text{Area of electrode}} \right] \times 100 \\
 &= \left[ \frac{\frac{1}{2} \left( \frac{0.5283 - 0.4809}{0.5283} \right)}{25} \right] \times 1000 = 0.95 \text{ mg/cm}^2
 \end{aligned}$$

### 8. ร้อยละความชื้น

จากข้อมูลในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.64 ที่ชั่วแอโนด ณ เวลา 16.43 น.

$$\text{Sensor humidity} = 71.10 \%$$

$$\text{Cell temperature} = 35.50 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Sensor temperature} = 45.60 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\varphi = \varphi' \times 10^{\{f(t') - f(t)\}}$$

$$f(t) = 2.048 \times 10^{-7} t^3 - 1.056 \times 10^{-4} t^2 + 3.056 \times 10^{-2} t + 0.6767$$

เมื่อ

$$\varphi = \text{Cell humidity (\%)}$$

$$\varphi' = \text{Sensor humidity (\%)}$$

$$t = \text{Cell temperature (}^{\circ}\text{C)}$$

$$t' = \text{Sensor humidity (}^{\circ}\text{C)}$$

$$\begin{aligned}
 f(t) &= 2.048 \times 10^{-7} (35.50)^3 - 1.056 \times 10^{-4} (35.50)^2 + 3.056 \times 10^{-2} (35.50) + 0.6767 \\
 &= 1.64
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f(t') &= 2.048 \times 10^{-7} (45.60)^3 - 1.056 \times 10^{-4} (45.60)^2 + 3.056 \times 10^{-2} (45.60) + 0.6767 \\
 &= 1.87
 \end{aligned}$$

$$\varphi = 71.10 \times 10^{\{1.87 - 1.64\}} = 121.42 \%$$

หมายเหตุ สำหรับกรณีที่คำนวณร้อยละความชื้นได้มากกว่า 100% สามารถประมาณได้ว่าค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 100%