



การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเมมเบรนแลกเปลี่ยนประจุที่ปรับปรุงผิวด้วยพลาสมา
และอาร์กอนไอออนบีม

**Electrical Properties Measurement of Ion-Exchange Membrane with Plasma and
Ar Ion- Beam Surface Modification**

วิสรุต พวยพุ่ง

Wissarut Puaypung

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Science in Physics

Prince of Songkla University

2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเมมเบรนแลกเปลี่ยนประจุที่ปรับปรุงผิวด้วย
พลาสมาและอาร์กอน ไอออนบีม

ผู้เขียน นายวิศรุต พวยพุง

สาขาวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

.....
(ดร.ประจักษ์ แซ่อึ้ง)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ เกษราริคุณ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิกุล วนิชากิชาติ)

.....กรรมการ
(ดร.วิรัช ทวีปรีดา)

.....กรรมการ
(ดร.ประจักษ์ แซ่อึ้ง)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิกุล วนิชากิชาติ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์คารา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเมมเบรนแลกเปลี่ยนประจุที่ปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาและอาร์กอนไอออนบีม
ผู้เขียน	นายวิศรุต พวยพุ่ง
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคอิมพิแดนซ์สเปกโทรสโกปีในการวัดความเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบางแลกเปลี่ยนประจุด้วยความสัมพันธ์กับความถี่จากสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ โดยสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้กับเยื่อบางมีขนาด 2 โวลต์จากแหล่งจ่าย และใช้ช่วงของความถี่ของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับในช่วง 0.1-300 kHz ในที่นี้ได้ศึกษาเยื่อบางไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 400,000 MW และมีการกำจัดหมู่อะซิติกเป็น 78% (DDA) ซึ่งเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุมมีความหนา 0.048 มิลลิเมตร และใช้เยื่อบางไคโตซานนี้ในการปรับปรุงผิวจากอาร์กอนไอออนบีมที่พลังงาน 120 keV จากนั้นนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับเยื่อบางทางการค้า (Nafion® N324 หรือ เยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิคแอซิด) ซึ่งมีความหนา 0.275 มิลลิเมตร นอกจากนี้ได้ศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิคแอซิดที่มีการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมาแตกต่างกันและเยื่อบางชุดควบคุม ซึ่งกำลังของพลาสมาที่ใช้ปรับปรุงผิวเยื่อบางจะถูกควบคุมโดยใช้เทคนิคการควบคุมสัญญาณเปิดปิดของศักย์ไฟฟ้าแรงสูงเป็นช่วงๆ (Pulse-Density-Modulated) ซึ่งเทคนิคนี้สามารถควบคุมกำลังของพลาสมาที่ต้องการได้ โดยจะเลือกใช้กำลังของพลาสมาที่ 1, 5 และ 10 วัตต์เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (0 วัตต์) นอกจากนั้นในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าในระบบการวัดของเทคนิคอิมพิแดนซ์สเปกโทรสโกปีเพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของเยื่อบางที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร, 0.5 เซนติเมตร และ แนบชิดเยื่อบาง (0 เซนติเมตร)

ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าขนาดอิมพิแดนซ์ของเยื่อบางไคโตซานที่ได้รับการปรับปรุงและชุดควบคุมเป็น 2.44 และ 3.68 กิโลโอห์ม ตามลำดับ ในส่วนของค่าความนำประจุไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางไคโตซานที่ได้รับการปรับปรุงมีขนาดมากกว่าเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุม นอกจากนี้ผลที่ได้เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและโครงสร้างของเยื่อบางจากเทคนิคอิมพิแดนซ์ ศักย์การแพร่ของเยื่อบาง ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ

ATR–FTIR เสปคตรัม ยืนยันว่าการปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมส่งผลทำให้มวลโมเลกุลของไคโตซานลดลงและมีการเพิ่มขึ้นของประจุบริเวณพื้นผิวของเยื่อบางเนื่องจากอาร์กอนไอออนที่มาจากไอออนบีม ซึ่งสาเหตุเหล่านี้ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการแพร่และแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อบางซึ่งผลที่ได้ทั้งหมดมีความสอดคล้องกัน และสำหรับผลที่ได้จากเยื่อบางไคโตซานที่ได้รับการปรับปรุงได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับเยื่อบางทางการค้า พบว่าเยื่อบางทางการค้าให้ผลที่ดีกว่าเยื่อบางไคโตซานที่ได้รับการปรับปรุงในส่วนของ ค่าความนำประจุไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุไฟฟ้าอยู่ 20% ทุกความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์ ส่วนผลจากการศึกษาอิมพีแดนซ์ของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิคแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงที่กำลังของพลาสติก 1, 5, 10 วัตต์ และ ชุดควบคุม (0 วัตต์) มีค่าเป็น 9.76, 7.30, 8.04 และ 11.45 กิโลโอห์ม ตามลำดับ และ พบว่าค่าความนำประจุไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางที่ได้รับการปรับปรุงจากพลาสติกให้ผลที่ดีกว่าเยื่อบางชุดควบคุมที่มากที่สุดอยู่ 36% นอกจากนี้ผลที่ได้เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและ โครงสร้างของเยื่อบางจากเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ศักย์การแพร่ของเยื่อบาง ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และ ATR–FTIR เสปคตรัม ยืนยันว่าการปรับปรุงผิวด้วยพลาสติกที่ความดันบรรยากาศส่งผลทำให้มีการเพิ่มขึ้นของหมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิลบนผิวของเยื่อบางซึ่งหมู่เหล่านี้ค่อนข้างมีประจุเป็นลบ นอกจากนี้ยังทำให้มีการเพิ่มขึ้นของประจุบริเวณพื้นผิวของเยื่อบางด้วยเนื่องจากพลาสติก ซึ่งสาเหตุเหล่านี้ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการแพร่และแลกเปลี่ยนของโพแทสเซียมไอออน (K⁺) และคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ผ่านเยื่อบางหลังปรับปรุงด้วยพลาสติก โดยการปรับปรุงที่กำลังของพลาสติก 5 วัตต์ เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุด โดยผลทั้งหมดมีความสอดคล้องกัน นอกจากนี้ผลการทดสอบแต่ละวิธีของระบบการวัดที่มีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร, 0.5 เซนติเมตร และ แนบชิดเยื่อบาง (0 เซนติเมตร) พบว่าศักย์การแพร่และอัตราส่วนสภาพการซาบซึมได้ของไอออนมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากเทคนิคอิมพีแดนซ์โดยผลทดสอบชี้ให้เห็นว่าระบบการวัดที่มีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าแนบชิดเยื่อบางมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบการวัดที่มีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง อยู่ 90% เนื่องจากการปรับตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบที่อยู่ใกล้เยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มาก ส่งผลทำให้ความต้านทานส่วนเกินที่มาจากละลายอิเล็กโทรไลต์ ลดลงตามไปด้วย ทำให้อัตราการแพร่และแลกเปลี่ยนไอออนผ่านเยื่อบางไปยังขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตรวจสอบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลนี้ได้ยืนยันจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ลดลง โดยลดลงเป็น 1.58 กิโลโอห์ม/มิลลิเมตร และ 2.56 กิโลโอห์ม/มิลลิเมตรในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM และ 0.01mM ตามลำดับ และ ศักย์การแพร่รวมถึงอัตราส่วนสภาพการซาบซึมได้ของไอออนที่เพิ่มขึ้นสำหรับระบบการวัดที่ปรับตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าให้แนบชิดเยื่อบาง

Thesis Title	Electrical Properties Measurement of Ion-Exchange Membrane with Plasma and Ar Ion- Beam Surface Modification
Author	Mr. Wissarut Puaypung
Major Program	Physics
Academic year	2011

Abstract

This thesis aims to study an electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) technique was used to measure electrical properties of membranes as a function of frequency. A small signal of AC potential was applied to a charged membrane with amplitude of 2 V over a range of 100-300 kHz frequency. The membrane made from 400K MW chitosan with 78% DDA and was modified by Ar-ion beams with energy of 120 keV. The properties were compared among chitosan in various KCl concentrations, ranging from 0.1- 10 mM. In addition, perfluorosulfonic acid (PFSA) membranes were modified by atmospheric plasma discharge at power of plasma form PDM 1, 5 and 10W were measured of changing in electrical properties and compared the control membrane (0w). The properties were compared among perfluorosulfonic acid (PFSA) membranes in KCl concentrations. Moreover, this thesis aims to study influence of adjusting positions of electrode in electrochemical impedance spectroscopy (EIS) technique by distances between electrode and membrane were 1 cm, 0.5 cm and closer membrane (0cm).

The results showed that the impedance of modified membrane and the control were 2.44 and 3.68, respectively. The conductance and capacitance of the modified membrane were greater than that of the control membrane. In addition, the result of EIS technique was according from dielectric constants, diffusion potential and ATR FT-IR spectra that chitosan membranes are modified argon beams of 120 keV reduced the molecular weight of chitosan and positive charges brought by Ar⁺ ions accumulated on membrane, resulting in a greater permeation of charge driven through the polymer chains of chitosan. Results from the modified membrane were also compared with those obtained from Nafion - a commercial cation exchange membrane. It was found that Nafion membrane possessed greater conductance and capacitance by 26%, in every electrolyte tested and vice versa was the case for membrane impedance. Moreover, The results showed that the impedance of modified membrane at power of plasma 1, 5, 10W and

the control membrane were 9.76, 7.30, 8.04 and 11.45, respectively. Ionic conductivity and Capacitance values of PFSA membranes were modified by atmospheric plasma discharge at power of plasma 5W greater than PFSA membranes 10W about 10%, 1W about 25% and controls (0W) about 36%, respectively. In addition, the result of EIS technique was according from diffusion potential, dielectric constants and ATR-FTIR spectra in changing of membrane-structure has been affected the increasing of hydroxyl and carboxyl groups accumulated on modified PFSA membranes. Therefore, ionic diffusion rate through the membrane after modified by atmospheric plasma was greater than the control membrane. In additions, The results showed that the impedance obtained from adjusting positions between electrode and membrane at 1 cm, 0.5 cm and closer membrane (0cm) was 17.2, 9.35 and 1.3 k Ω , respectively, in 0.1 mM salt concentration. When the salt concentration was reduced by tenfold to 0.01 mM, the measured value for the former and the latter was 30.1, 16.61 and 4.5 k Ω , respectively and deceasing of impedance were 1.58 k Ω /mm in KCl 0.1mM and 2.56 k Ω /mm in KCl 0.01mM, respectively. At positions of electrode closer membrane, the conductance and capacitance of membranes were also greater than distance between electrode and membrane at 1 cm by 90 % approximately. Moreover, the membranes exhibited much greater diffusion potential and ionic permeability ratios at positions of electrode closer membrane.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตหาดใหญ่ และ ทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาจากบุคคลหลายท่าน และจากหลายหน่วยงานดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ประจักษ์ แซ่อึ้ง และ รองศาสตราจารย์ ดร.พิกุล วนิษาภิชชาติที่กรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ และชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา ฐิระวนิชย์กุล และ นายอาหลี คำหมั่น สำหรับอุปกรณ์กำเนิดพลาสมา และ คำแนะนำทางเทคนิคต่างๆ ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ คุณจรัส ณ สุวรรณ ที่กรุณาให้คำแนะนำการสร้างอุปกรณ์และซ่อมแซมอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย และขอขอบคุณสมาชิกสถานวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเมมเบรน สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือต่างๆ

ขอขอบคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านและคณาจารย์ทุกๆท่านที่อบรมสั่งสอนและให้ความรู้ จนประสบความสำเร็จในวันนี้

วิศรุต พวยพุ่ง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(12)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำตั้งเรื่อง	1
1.2 การตรวจเอกสาร	2
1.3 วัตถุประสงค์	9
2. ทฤษฎี	10
2.1 เมมเบรนเทคโนโลยี	10
2.2 ทฤษฎีการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมา (Surface modification with plasmas)	13
2.3 พลาสมาดีสชาร์จแบบโคโรน่า (Corona discharge) และพลาสมาดีสชาร์จที่ความถี่สูง (High frequency discharge)	13
2.4 ทฤษฎีอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (Electrical impedance spectroscopy (EIS))	15
2.5 ทฤษฎีอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของเยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์	21
2.6 ศักย์การแพร่ของเยื่อบาง (Membrane Diffusion Potentials)	25
2.7 เทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)	28
2.8 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3. วิธีการวิจัย	31
3.1 วัสดุ	31
3.2 อุปกรณ์	31
3.3 วิธีดำเนินการ	33
3.3.1 การเตรียมเยื่อบางไคโตซาน และ เยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิด	33
3.3.2 ปรับปรุงผิวเยื่อบางด้วยพลาสมาและไอออนบีม	34
3.3.3 ศึกษาคุณลักษณะของเยื่อบาง	36
3.3.3.1 การวัดศักย์การแพร่ของเยื่อบาง	36
3.3.3.2 วัดค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ความนำไฟฟ้า (G_{eff}) และความจุไฟฟ้า (C_{eff})	37
3.3.3.3 การศึกษาโครงสร้างและพันธะของเยื่อบางด้วยเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (FT-IR)	39
3.3.3.4 การศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเยื่อบาง	40
4. ผลและการอภิปรายผล	41
4.1 การวิเคราะห์เยื่อบางไคโตซานที่มีการปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี	41
4.1.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) 1 mM	42
4.1.2 อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีผลต่อคุณสมบัติของเยื่อบาง	46
4.1.3 Nyquist plots ของเยื่อบาง	50
4.1.4 ศักย์การแพร่ของเยื่อบาง	53
4.1.5 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเยื่อบาง	55
4.1.6 หมู่ฟังก์ชันจากสเปกตรัม ATR-FTIR ของเยื่อบาง	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การวิเคราะห์เยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิด ที่มีการปรับปรุงผิว ด้วยพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี	58
4.2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) 0.1 mM	59
4.2.2 Nyquist plots ของเยื่อบาง	63
4.2.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเยื่อบาง	64
4.2.4 ศักย์การแพร่ของเยื่อบาง	65
4.2.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันจากสเปกตรัม ATR-FTIR ของเยื่อบาง	68
4.3 การศึกษาอิทธิพลของการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าในการวัดของ เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีสำหรับวิเคราะห์คุณลักษณะของเยื่อ บางไลโตซาน	71
4.3.1 อิมพีแดนซ์ของเยื่อบาง (Z)	72
4.3.2 ค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบาง (G_{eff})	73
4.3.3 ค่าการเก็บประจุของเยื่อบาง (C_{eff})	74
4.3.4 Nyquist plots ของเยื่อบาง	76
4.3.5 ศักย์การแพร่ของเยื่อบาง	78
5. สรุปผลการทดลอง	80
บรรณานุกรม	83
ภาคผนวก	86
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์	111
ประวัติผู้เขียน	116

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 ค่าอิมพีแดนซ์ ค่าความนำประจุไฟฟ้า และ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า ของเยื่อบาง ทั้งสามชนิดในสารละลายอิเล็กโตไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้นที่ 1mM	45
4.2 ค่าอิมพีแดนซ์ ค่าความนำประจุไฟฟ้า และ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า ของเยื่อบาง ทั้งสามชนิดในสารละลายอิเล็กโตไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้นที่ 0.1mM, 1mM และ 10m	50
4.3 อัตราส่วนสภาพการซาบซึมได้ของไอออน, $\beta = P_{Cl} / P_K$ ที่ได้มาจาก เยื่อบาง โคลโตซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอน ไอออนบีมและเยื่อบาง โคลโตซานชุดควบคุม	54
4.4 ค่าอิมพีแดนซ์ ค่าความนำประจุไฟฟ้า และ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า ของเยื่อบาง ในสารละลายอิเล็กโตไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้นที่ 0.1mM	63
4.5 อัตราส่วนสภาพการซาบซึมได้ของไอออน ($\alpha = P_K / P_{Cl}$) ของเยื่อบาง เพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิคแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 1, 5, 10 วัตต์ ตามลำดับ และ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (0 วัตต์)	67
4.6 เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านที่หุ้มฟังก์ชันต่างๆของของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิคแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 1, 5, 10 วัตต์ ตามลำดับ และ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (0 วัตต์)	70
4.7 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบางโคลโตซานที่ระบบการมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร, 0.5 เซนติเมตร และ แนบชิดเยื่อบาง (0 เซนติเมตร)ในสารละลายอิเล็กโตไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM และ 0.01mM	76
4.8 อัตราส่วนสภาพการซาบซึมได้ของไอออน, ที่ได้มาจากเยื่อบางโคลโตซานที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร (Distance 1cm), 0.5 เซนติเมตร (Distance 0.5 cm) และ แนบชิดเยื่อบาง (Closer membrane)	79

รายการรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างทางเคมีของเยื่อบาง Perfluorosulfonic acid (PFSA)	4
1.2 โครงสร้างโมเลกุลของไคตินและไคโตซาน	5
1.3 โครงสร้างทางเคมีของเยื่อบางโพลีเมอร์	7
(a) BAM®	
(b) DAIS	
(c) ETFE-g-PSSA	
(d) Nafion®	
2.1 โครงสร้างทางเคมีของเยื่อบาง Perfluorosulfonic acid (PFSA)	11
2.2 โครงสร้างทางเคมีของและไคโตซาน	11
2.3 การแบ่งประเภทของเมมเบรนตามโครงสร้างของเมมเบรน	12
2.4 Discharge regions of a DC glow discharge	14
2.5 Direct AC High Voltage connection to parallel plate reactor with unequal electrodes	14
2.6 แสดงวงจรสมมูลแบบ Randle Cell	19
2.7 แสดงวงจรสมมูลแบบ Randle Cell โดยรวม Warburg Impedance	20
2.8 แสดงแบบจำลอง Maxwell–Wagner ของโครงสร้างทางไฟฟ้าภายในของเยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์	21
2.9 แสดงแบบจำลองโครงสร้างทางไฟฟ้าภายในของเยื่อบางโดยใช้ค่ายังผล (Effective value)	22
2.10 แสดงวงจรเทียบเท่าในเมมเบรน	23
2.11 แสดงเฟสเซอร์โคอะแกรมของวงจรในรูปที่ 2.8	24
2.12 แสดงความเข้มข้นมวลสารระหว่างสองด้านของเยื่อบางแบบระนาบ ในกรณีนี้สมมติว่าเยื่อบางมีเกรเดียนต์ความเข้มข้นคงที่	26
2.13 แสดงการสั่นของพันธะรูปแบบต่างๆในโมเลกุลเมื่อถูกกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด	29
3.1 แผ่นเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิก โฟนิคแอซิด (Nafion N324, EW 1100)	33
3.2 แผ่นเยื่อบางไคโตซานที่มีมวลโมเลกุล 400,000	34

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 แสดงไดอะแกรมของชุดอุปกรณ์กำเนิดพลาสมาดิสชาร์จที่ความดันบรรยากาศ	35
3.4 ขนาดกำลังของพลาสมาต่างๆ ที่ควบคุมด้วยเทคนิค Pulse-density-modulated	35
3.5 ระบบไอออนบีมที่ใช้ความถี่ย่านไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ของความหนาแน่นของไอออนอยู่ในช่วง ions/cm ²	36
3.6 อุปกรณ์วัดศักย์การแพร่ของเยื่อบาง	37
3.7 อุปกรณ์การวัดค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ที่ประกอบด้วย Differential Amplifier, Oscilloscope และ Function Generator	38
3.8 อุปกรณ์ทดลองที่บรรจุเยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อวัดค่าอิมพีแดนซ์ (Z) สภาพนำไฟฟ้า (G_{eff}) และความจุทางไฟฟ้า (C_{eff}) ของเยื่อบางโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับที่เปลี่ยนตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าไม่ได้	38
3.9 อุปกรณ์ทดลองที่บรรจุเยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อวัดค่าอิมพีแดนซ์ (Z) สภาพนำไฟฟ้า (G_{eff}) และความจุทางไฟฟ้า (C_{eff}) ของเยื่อบางโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับที่เปลี่ยนตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าได้	39
4.1 อิมพีแดนซ์ของเยื่อบาง (Z) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 1mM	43
4.2 ค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบาง (G_{eff}) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 1mM	44
4.3 ค่าการเก็บประจุของเยื่อบาง (C_{eff}) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 1mM	45
4.4 อิมพีแดนซ์ของเยื่อบาง (Z) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้นที่ 0.1mM, 1mM และ 10mM	47
4.5 ค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบาง (G_{eff}) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้นที่ 0.1mM, 1mM และ 10mM	48
4.6 ค่าการเก็บประจุของเยื่อบาง (C_{eff}) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้นที่ 0.1mM, 1mM และ 10mM	49
4.7 Nyquist plots ของเยื่อบางที่ทดสอบทั้งสามชนิด (a) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น	52

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ที่ 0.1mM (b) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น ที่ 1mM (c) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น ที่ 10 mM	
4.8 สักยภาพแปรของเยื่อบางไคโตซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมและ เยื่อบางไคโตซานชุดควบคุมในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความแตกต่างของความเข้มข้น; 100/0.01, 100/0.1, 100/1.0, 100/10 และ 100/100 mM	54
4.9 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเยื่อบางทั้งสามชนิด	55
4.10 สเปกตรัม ATR-FTIR ของเยื่อบางไคโตซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอน ไอออนบีมและเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุม	57
4.11 อิมพีแดนซ์ของเยื่อบาง (Z) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM	60
4.12 ค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบาง (G_{eff}) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียม คลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM	61
4.13 ค่าการเก็บประจุของเยื่อบาง (C_{eff}) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอ ไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM	62
4.14 Nyquist plots ของของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับ ปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 1, 5, 10 วัตต์ และ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (0 วัตต์)	63
4.15 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับ ปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 1, 5, 10 วัตต์ ตามลำดับ และ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (0 วัตต์)	65
4.16 สักยภาพแปรของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุง ด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 1, 5, 10 วัตต์ ตามลำดับ และ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (0 วัตต์) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียม	66

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
เชื่อมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความแตกต่างของความเข้มข้น; 100/0.01, 100/0.1, 100/1.0, 100/10 และ 100/100 mM	
4.17 สเปกตรัม ATR-FTIR ของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 1, 5, 10 วัตต์ ตามลำดับ และ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (0 วัตต์)	69
4.18 อิมพีแดนซ์ (Z) ของเยื่อบางไคโตซานที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร (Distance 1cm) , 0.5 เซนติเมตร (Distance 0.5 cm) และ แนบชิดเยื่อบาง (Closer membrane) ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM และ 0.01mM	72
4.19 ค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบาง (G_{eff}) ไคโตซานที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร (Distance 1cm) , 0.5 เซนติเมตร (Distance 0.5 cm) และ แนบชิดเยื่อบาง (Closer membrane) ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM และ 0.01mM	74
4.20 ค่าการเก็บประจุของเยื่อบาง (C_{eff}) ไคโตซานที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร (Distance 1cm) , 0.5 เซนติเมตร (Distance 0.5 cm) และ แนบชิดเยื่อบาง (Closer membrane) ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM และ 0.01mM	75
4.21 Nyquist plots ของเยื่อบางไคโตซานที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร (Distance 1cm) , 0.5 เซนติเมตร (Distance 0.5 cm) และ แนบชิดเยื่อบาง (Closer membrane) ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM และ 0.01mM	77
4.22 ศักย์การแพร่ของเยื่อบางไคโตซานที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร (Distance 1cm) , 0.5 เซนติเมตร (Distance 0.5 cm) และ แนบชิดเยื่อบาง (Closer membrane) ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความแตกต่างของความเข้มข้น; 100/0.01, 100/0.1, 100/1.0, 100/10 และ 100/100 mM	78

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

เนื่องจากในปัจจุบันการพัฒนาอุตสาหกรรมและพลังงานทดแทนเป็นที่น่าสนใจมากและมีมาอย่างต่อเนื่อง เทคโนโลยีเอ็บบางก็เป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมและพลังงานทดแทน ในตอนนี้ ในด้านการพัฒนาอุตสาหกรรม เอ็บบางสามารถนำไปใช้ในกระบวนการแยกต่างๆ เช่นเอ็บบางแลกเปลี่ยนประจุถูกใช้ในกระบวนการการแยกที่สำคัญที่เรียกว่าอิเล็กโตรไดอไลซิส[Baker, 2004] ในด้านการพัฒนาพลังงานทดแทน สามารถนำไปใช้ในการทำเซลล์เชื้อเพลิง แต่เทคโนโลยีเอ็บบาง ประสิทธิภาพของเอ็บบางที่ใช้ได้ยังไม่เต็มที่ มีข้อจำกัดหลายอย่างและอาจจะมีปัญหาเรื่องราคาด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นที่มาของปัญหาและหัวข้อของงานวิจัยที่จะพัฒนาเอ็บบาง วิเคราะห์วิจารณ์ผลของการพัฒนาว่าปัจจัยใดที่ทำให้เอ็บบางมีประสิทธิภาพดีขึ้นหรือลดลง ด้วยเหตุนี้พลาสติกและไอออนบีมจึงถูกใช้ปรับปรุงเอ็บบางแลกเปลี่ยนประจุเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานให้สูงขึ้น [Charles และ คณะ, 2007]ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมของการปรับปรุงผิวนี้และเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพของเอ็บบางในอนาคต (เช่น เอ็บบางสำหรับไบโอรีแอกเตอร์เอ็บบางแลกเปลี่ยนประจุที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงและกระบวนการอิเล็กโตรไดอไลซิส ฯลฯ)

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เอ็บบางแลกเปลี่ยนประจุสองชนิดโดยมีเอ็บบางไคโตซานและเอ็บบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่เป็นเอ็บบางทางการค้ามาปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้งาน [Matsuoka และ คณะ, 2008]สำหรับเอ็บบางไคโตซานเนื่องจากในประเทศไทยมีวัตถุดิบสำหรับผลิตไคโตซานคือเปลือกกุ้งและกระดองปูจำนวนมากจากวัสดุเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมอาหารทะเลที่มีมากและมีราคาถูก ไคโตซานสามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์ทำให้ขึ้นรูปเป็นเอ็บบางได้ง่าย นอกจากนี้ไคโตซานยังเป็นสารที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพสูงและย่อยสลายได้ตามธรรมชาติและเอ็บบางไคโตซานยังมีคุณสมบัติเป็นเอ็บบางแลกเปลี่ยนประจุด้วย[Wan และ คณะ, 2003] สำหรับเอ็บบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่เป็นเอ็บบางทางการค้าเป็นเอ็บบางที่มีประสิทธิภาพสูงที่ประกอบด้วยอนุพันธ์พื้นฐานของ โพลีเมอร์หลักของ Sulfonatedtetrafluoroethylene หรือ Perfluorosulfonic acid (PFSA)[Lueและ คณะ, 2007] ซึ่งเอ็บบางชนิดนี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานกับเอ็บบางไคโตซานที่เตรียมขึ้น นอกจากนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของเอ็บบางทั้งสองการอาบด้วยพลาสติกและไอออนบีมจึงถูกเลือกมาใช้งานโดยการปรับปรุง

ผิวด้วยพลาสมาและไอออนบีมเป็นการเพิ่ม การเกาะติด หรือตัดหมู่ฟังก์ชันกรุปของอนุพันธ์โพลิเมอร์ที่ผิวของวัตถุที่ได้รับการปรับปรุง [Ru และ Jie-rong, 2006] ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลต่ออนุพันธ์ของโพลิเมอร์บริเวณผิวของเยื่อบางเกิดการเปลี่ยนแปลงและทำให้คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของผิวเยื่อบางเปลี่ยนไปด้วยเช่นคุณสมบัติทางไฟฟ้า ฯลฯ [Kim และ คณะ, 2006] ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้อาจทำให้ประสิทธิภาพของเยื่อบางเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ผลจาก เยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิคแอซิดที่ถูกปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาที่ความดันบรรยากาศและ เยื่อบางไคโตซานที่ถูกปรับปรุงด้วยไอออนบีมโดยการศึกษาคุณลักษณะเชิงไฟฟ้าซึ่งใช้เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีและศักย์การแพร่ของเยื่อบางเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพและเปรียบเทียบ นอกจากนี้ได้ใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) และ เทคนิค Dielectric Constant ในการศึกษาวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติสภาพพื้นผิวและไฟฟ้าเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยพลาสมาและไอออนบีมสำหรับเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิคแอซิดและ เยื่อบางไคโตซาน

[Bae และ คณะ, 2006] และ เนื่องด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีเป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ การเกิดปรากฏการณ์ทางกายภาพและไฟฟ้าในเยื่อบาง Coster และ คณะ (1996) กล่าวว่าเมื่อเยื่อบางแลกเปลี่ยนประจุอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยสามารถแสดงแบบจำลองวงจรทางไฟฟ้าของเยื่อบางแลกเปลี่ยนประจุที่อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยเสมือนว่ามีตัวเก็บประจุไฟฟ้าต่อขนานกับความนำประจุไฟฟ้าหรือความต้านทานประจุไฟฟ้าของเยื่อบางและต่ออนุกรมความนำประจุไฟฟ้าหรือความต้านทานประจุไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ด้วยเหตุผลดังกล่าวตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้าในการวัดของเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีจึงน่าจะมีผลความต้านทานประจุไฟฟ้าและค่าอิมพีแดนซ์ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีผลต่อค่าที่วัดได้ของคุณสมบัติของเยื่อบาง [Wanichapichart และ คณะ, 2007] ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้าในการวัดของเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีด้วย

1.2 การตรวจเอกสาร

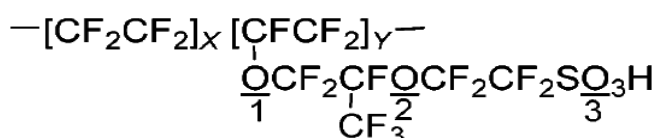
Canast และ Benavente (2002) ได้ศึกษาค่าอิมพีแดนซ์ของเยื่อบาง PES-10 โดยใช้ impedwnce analyzer (solartron 1260) ความถี่ที่ทำการศึกษาอยู่ในช่วง $10-10^6$ Hz ความต่างศักย์สูงสุดเท่ากับ 0.01 V โดยให้เยื่อบางอยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และโพแทสเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้นช่วง $10^{-3}-5 \times 10^{-2}$ M และความเข้มข้นของสารละลายสองด้านของเยื่อบางเท่ากัน พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายทั้งสองชนิดเท่ากับ 10^{-3} M เมื่อความถี่ที่ใช้ในการวิเคราะห์เพิ่มขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ของเยื่อบางมีค่าเพิ่มขึ้นและค่าอิมพีแดนซ์ของเยื่อบางเมื่ออยู่ในสารละลายโซเดียม

คลอไรด์มีค่าสูงกว่าเมื่อเชื่อมบางอยู่ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสองด้านของเชื่อมบางเพิ่มขึ้นความต้านทานของเชื่อมบางมีค่าลดลงเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายเพิ่มขึ้น และเชื่อมบางแบบมีรูมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าเชื่อมบางแบบแน่น

Alkan และ คณะ(2008) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงเชื่อมบางแลกเปลี่ยนประจุลบด้วยพลาสติกและผลต่อการแยกไอออนของ Fluoride โดยที่มาของงานวิจัยนี้มาจาก Fluoride ที่มีระดับความเข้มข้นที่มากกว่า 1.5 mg/L จะทำให้เกิดผลกระทบต่อกระดูกและฟัน ต่อมาไรท์ทอ ไทรอยด์ และตับ มันจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องนำ Fluoride ไอออน ออกจากน้ำดื่ม ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการขนส่งของ Fluoride ไอออนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Fluoride ในด้านสารป้อนในความเข้มข้นเหล่านี้การนำ Fluoride ไอออนออกผ่านเชื่อมบางที่ถูกปรับปรุงด้วยพลาสติกจะมีค่าสูงกว่าเชื่อมบางที่ไม่ถูกปรับปรุงการปรับปรุงด้วยพลาสติกทำให้ไปปรับเปลี่ยนโครงสร้างของเชื่อมบาง มันยืนยันว่าพื้นผิวที่ชอบน้ำจะเพิ่มประสิทธิภาพโดยฟลักซ์ของ Fluoride ที่ถูกพบเป็น $391.00 \times 10^{-11} \text{ mol cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ สำหรับเชื่อมบางที่ถูกปรับปรุงด้วยพลาสติก ในทางตรงกันข้ามโดยฟลักซ์ของ Fluoride ที่ถูกพบเป็น $309.97 \times 10^{-11} \text{ mol cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ สำหรับเชื่อมบางที่ไม่ถูกปรับปรุงด้วยพลาสติก การปรับปรุงด้วยไนโตรเจนพลาสติกจะไปเพิ่ม Surface wettability และ ความชอบน้ำของเชื่อมบาง ดังนั้นวิธีการปรับปรุงด้วยพลาสติกจึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีอื่น ๆ และสรุปได้ว่าค่าฟลักซ์(J) และ recovery factor (RF) สำหรับ AFX anion-exchange membranes ที่ถูกปรับปรุงด้วยพลาสติกจะมีค่าสูงกว่าเชื่อมบางที่ไม่ได้ถูกปรับปรุง สิ่งนี้สามารถอธิบายได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของ wettability และ โครงสร้างในเชื่อมบางที่ถูกปรับปรุงด้วยไนโตรเจนพลาสติกและ โครงสร้างพื้นผิวของของเชื่อมบางที่ถูกปรับปรุงด้วยพลาสติกและไม่ถูกมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากไอออนของพลาสติก

Wanichapichart และ Yu (2007) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติการถ่ายโอนประจุด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีและศักย์การแพร่ของเชื่อมบางไอโซนที่ปรับปรุงด้วยไนโตรเจนไอออนบีมที่มีพลังงานในช่วง 15-30 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และมีความเข้มข้นของไอออนอยู่ในช่วง 1.5×10^{14} ถึง $3.0 \times 10^{14} \text{ ions/cm}^2$ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์มีค่าลดลงสำหรับเชื่อมบางไอโซนที่ปรับปรุงด้วยไนโตรเจนไอออนบีมส่งผลต่อค่าความนำประจุไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้นด้วยเมื่อเทียบกับเชื่อมบางไอโซนชุดควบคุม นอกจากนี้เมื่อความเข้มข้นของเกลือสูงขึ้นส่งผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่มีค่าลดลงซึ่งทำให้ค่าความนำประจุไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งผลของอิมพีแดนซ์ได้สอดคล้องกับอัตราส่วนสภาพการซาบซึมของไอออนจากศักย์การแพร่ว่าเชื่อมบางไอโซนที่ปรับปรุงด้วยไนโตรเจนไอออนบีมมีอัตราส่วนสภาพการซาบซึมของไอออนมากกว่าชุดควบคุมถึง 3 เท่า

Bae และ คณะ (2006) ได้ศึกษาเกี่ยวกับ คุณสมบัติพื้นผิวของเยื่อบาง Perfluorosulfonic Acid (Nafion) ที่ถูกปรับปรุงด้วยอาร์กอนพลาสมา โดยที่มาของงานวิจัยนี้ได้อธิบายว่าเยื่อบาง Perfluorosulfonic acid (PFSA) เป็นเมมเบรนที่ใช้มากในการทำเป็นเยื่อบางแลกเปลี่ยนโปรตอนซึ่งใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง แต่มีปัญหาหลายอย่างเกี่ยวกับเยื่อบางทำให้การใช้งานมีประสิทธิภาพที่ต่ำ จำต้องมีการเพิ่มประสิทธิภาพเยื่อบางการปรับปรุงด้วยพลาสมาจึงน่าสนใจที่จะเพิ่มประสิทธิภาพเยื่อบาง โดยการปรับปรุงด้วยพลาสมาจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างพื้นผิวและคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของเยื่อบางและ คุณสมบัติการขนถ่ายประจุซึ่ง Nafion ที่ถูกปรับปรุงด้วยพลาสมาที่กำลังของอาร์กอนพลาสมา 5 วัตต์, 10 วัตต์, 50 วัตต์ และ 200 วัตต์ถูกวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของ โครงสร้างพื้นผิวคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของเยื่อบางและ คุณสมบัติการขนถ่ายประจุในการทดลองจะใช้เยื่อบาง Nafion ที่มีโครงสร้างทางเคมีดังรูป 1.1

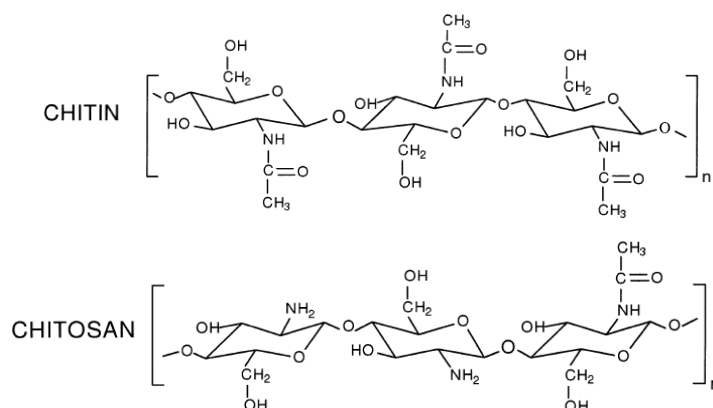


รูปที่ 1.1 โครงสร้างทางเคมีของเยื่อบาง Perfluorosulfonic acid (PFSA) [Bae, (2006)]

ผลที่ได้พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่กำลังของพลาสมาต่างๆที่ 5 วัตต์ และ 10 วัตต์ ส่วนที่ 50 วัตต์ขึ้นไปพื้นผิวเริ่มมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น โดยวัดความขรุขระได้เป็น 2.842, 6.048, และ 14.23 nm สำหรับ Nafion ธรรมชาติ, เยื่อบางที่ถูกปรับปรุงด้วยกำลังพลาสมา 50 วัตต์ และ เยื่อบางที่ถูกปรับปรุงด้วยกำลังพลาสมา 200 วัตต์ตามลำดับโดยที่ contact angle ลดลงเมื่อเพิ่มการปรับปรุงด้วยพลาสมา สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าเยื่อบางที่ถูกปรับปรุงด้วยพลาสมาจะชอบน้ำกว่าเยื่อบางที่ไม่ถูกปรับปรุงด้วยพลาสมา อย่างไรก็ตามที่ Contact time เท่ากับ 25 contact angle เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มการปรับปรุงด้วยพลาสมา จากการทดลองนี้อธิบายได้ว่าเมื่อ Ar พลาสมาได้ปรับปรุงบนพื้นผิวเยื่อบางจะทำให้โซ่ของโพลีเมอร์ถูกทำลายและทำให้เกิดหมู่ที่ชอบน้ำใหม่ขึ้นมาเช่น peroxide ซึ่งถูกสร้างในบริเวณ fluorocarbon ในเยื่อบางส่วนผลของ ATR-FTIR spectra ของเยื่อบางที่ถูกปรับปรุงด้วยพลาสมา แสดงให้เห็นว่าการลดลงของความเข้มของ sulfonic acid group เมื่อเพิ่มกำลังของพลาสมาและเวลา ความไม่สมมาตรที่ขยายออกไปของ sulfonic acid group เกิดขึ้นที่ 1220 cm^{-1} สิ่งนี้ชี้ให้เห็นว่าการลดลงของ sulfonic acid group โดยการปรับปรุงด้วยพลาสมา มีผลจากรายงานของตำแหน่งของสัญญาณมีส่วนที่สมมาตรที่ขยายออกไปของ sulfonic acid group ที่ 1050 cm^{-1} ที่ได้ถูกเปลี่ยนแปลง

อย่างไรก็ตามการปรับปรุงด้วยพลาสมาที่ไม่สามารถทำให้ปฏิกิริยาระหว่าง sulfonic acid groups และโซโพลิเมอร์ข้างเคียงหรือ functional groups อื่นๆเปลี่ยนไปมาก ผลคุณสมบัติการขนถ่ายประจุของเยื่อบางที่ปรับปรุงด้วยพลาสมาแสดงให้เห็นถึงmethanol permeability และ proton conductivity ลดลงเมื่อเพิ่มเวลาและกำลังของพลาสมา เมื่อเยื่อบางได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาที่พลาสมากำลังต่ำๆ (5และ10วัตต์) ที่เวลาน้อยกว่า 150 วินาที proton conductivity และ methanol permeability จะค่อยๆเพิ่มขึ้นเนื่องจากภายใต้เงื่อนไขที่พลาสมาที่มีความเข้มข้นน้อย oxygen groups อาจจะเข้าไปรวมยังพื้นผิวเยื่อบางที่ปราศจากการ reduction ของออกซิเจนในส่วนที่บรรจุใน sulfonic acid groups สิ่งนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นที่ปรารถนาในพื้นที่เชิงเคมี อีกส่วนหนึ่งอาจจะต้องปรับปรุงการชอบน้ำเพื่อ proton conductivity และ methanol permeability อย่างไรก็ตามการปรับปรุงด้วยพลาสมากำลังสูงมีผลที่แย่มากของคุณสมบัติการขนถ่าย มีความเป็นไปได้ของการลดลงที่มากนี้ว่าในส่วนที่บรรจุ sulfonic acid groups และ น่าจะเป็นไปได้ว่าเกิดการ cross-linking ระหว่างโซโพลิเมอร์ในพื้นที่เยื่อบาง จึงทำให้มีการเพิ่มความต้านทานของการขนถ่ายมวลสาร(เช่น proton หรือ methanol)ที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวของเยื่อบาง

Wan และคณะ (2003) ได้ศึกษาเกี่ยวกับ การนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบางไคโตซาน โดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรเคมีเคลอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีในการวิเคราะห์ โดยงานวิจัยนี้ได้อธิบายว่า ไคโตซานก็คือลดของ N-deacetylated ดังรูปที่ 1.2 คือโครงสร้างโมเลกุลของไคตินและไคโตซาน



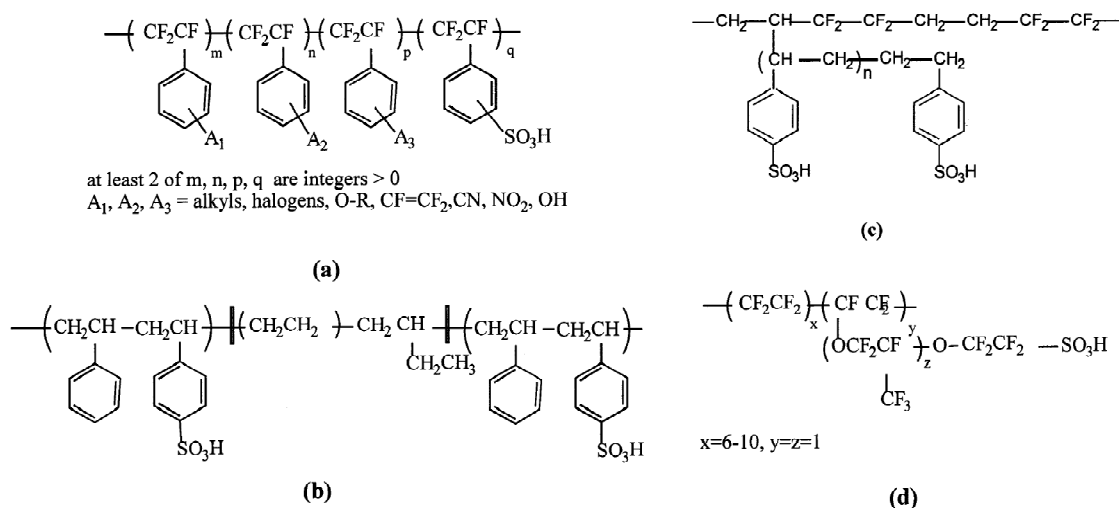
รูปที่ 1.2 โครงสร้าง โมเลกุลของไคตินและไคโตซาน[Wan, (2003)]

ในงานวิจัยนี้รายงานผลจากค่าความนำประจุไฟฟ้าภายในของเยื่อบางที่ชุ่มน้ำและความสัมพันธ์ของ DDA,MW และ สมบัติทางฟิสิกส์ ของเยื่อบาง โดยค่าความนำประจุไฟฟ้าภายในของเยื่อบางไคโต

ษานที่ชุ่มน้ำถูกตรวจสอบด้วยการใช้เทคนิคอิเล็กโตรเคมีเคลอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี ค่าความนำประจุไฟฟ้าภายในการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาถึงระดับที่แตกต่างของการลดลงของหมู่ Acetyl และความแตกต่างของน้ำหนักโมเลกุล (MW) ถึงแม้ว่าสมบัติทางฟิสิกส์อย่างเช่นการแตกหัก อัตรการบวม น้ำ tensile strength และ elongation จะเป็นฟังก์ชันของระดับที่แตกต่างของการลดลงของหมู่ Acetyl DDA และ MW ของไคโตซานในการทดลองนี้ได้ใช้เยื่อบางไคโตซานที่ถูกแยกจาก MW เป็น Ch-I (high MW), Ch-II (medium MW) และ Ch-III (low MW) ส่วน Deacetylation เพื่อที่จะเพิ่มหมู่ amine ของ ไคโตซาน มันต้องเพิ่มการลดลงของหมู่ Acetyl อีกหนึ่งวิธีที่ทำให้มีการลดลงของหมู่ Acetyl สูง คือ alkaline treatment บน Ch-I, Ch-II และ Ch-III จากนั้นจุ่มในสารละลาย 50% NaOH 1 ชม ที่ 100 องศา หลังจากนั้นล้างซ้ำๆ และทำให้แห้งจะโดยตัวอย่างของไคโตซานจะถูกลดลงของหมู่ Acetyl ที่ 80 ถึง 96% เขียนแทนด้วย Ch-H, Ch-M และ Ch-L และ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าความนำประจุไฟฟ้าภายในของเยื่อบางไคโตซานที่ชุ่มน้ำถูกตรวจสอบด้วยการใช้ Impedance spectroscopy มันถูกพบว่าคุณค่าความนำประจุไฟฟ้าภายในของเยื่อบางไคโตซานมีค่าสูงถึง $10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$ หลังจากทำให้ชุ่มน้ำ 1 ชม ซึ่งมากกว่าความนำประจุไฟฟ้าภายในของเยื่อบางไคโตซานไม่ถูกทำให้ชุ่มน้ำมากและค่าความนำประจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อลด DDA ของไคโตซาน (Ch-L) ส่วน MW ของไคโตซานที่สูง (Ch-I, high MW) จะทำให้ ค่าความนำประจุไฟฟ้าสูงด้วย ด้วยค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบางไคโตซานนี้อาจนำมาใช้แทนเยื่อบางใน alkaline polymer electrolyte fuel cell ซึ่งในนี้ เป็นเยื่อบางที่ขนส่ง hydroxide ion เช่นเดียวกับเยื่อบางไคโตซาน

Beattie และ คณะ (2001) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้เทคนิคอิเล็กโตรเคมีเคลอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีวัดความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบางแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มาของงานวิจัยเนื่องจากเยื่อบางแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นส่วนที่สำคัญในการประกอบเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นถ้ามีความนำประจุไฟฟ้าที่ดี ก็ทำให้ กระบวนการและใช้ประโยชน์ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเยื่อบางแลกเปลี่ยนโปรตอนที่เป็นที่ยอมรับในด้านการนำประจุไฟฟ้าที่ดีคือ Nafion หรือเยื่อบาง perfluorosulfonate ionomer แต่ Nafion ราคาค่อนข้างแพง เยื่อบางทางเลือกจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่นำมาทำเซลล์เชื้อเพลิง โดยเยื่อบางทางเลือกนี้รวมถึง (BAM®) ด้วย โดยที่ (BAM®) องค์ประกอบพื้นฐานเป็น sulfonated *abb*-trifluorostyrene-*co*-substituted-*abb*trifluorostyrenes และ DAIS® มีองค์ประกอบพื้นฐานเป็น sulfonated styrene-(ethylene-butylene)-styrene triblock copolymers โดยเยื่อบางทั้งสองจะถูกเตรียมจากตัวแปรของมวลโมเลกุล และจากตัวแปรโดยควบคุมด้วยระดับของ sulfonation ที่เป็นองค์ประกอบของโพลีเมอร์ โดยค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบาง BAM® และ DAIS® จะถูกเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากห้องปฏิบัติการของ (ETFE-*g*-PSSA) เยื่อบาง

(ETFE-g-PSSA) เชื้อบางถูกเตรียมโดย Lovell และ คณะที่ Cranfield University, UK, โดย post-irradiation grafting of styrene ลงบน ETFE โดยลักษณะโครงสร้างของเชื้อบางทั้ง 4 ชนิดได้ถูกแสดงในรูปที่ 1.3 และศึกษาสภาพการนำประจุไฟฟ้าบวกของเชื้อบางเหล่านี้โดยการวัดการนำประจุไฟฟ้าจากเทคนิคอิเล็กโตรเคมีเคลอิมพิแคนซ์สเปกโตสโคปี



รูปที่ 1.3 โครงสร้างทางเคมีของเชื้อบางโพลิเมอร์ (a) BAM®; (b) DAIS; (c) ETFE-g-PSSA และ (d) Nafion® [Beattie, 2001]

ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าความนำประจุไฟฟ้าของเชื้อบาง BAM® DAIS® ETFE-g-PSSA และ Nafion ถูกแสดงให้เห็นว่า (ETFE-g-PSSA) มีค่าความนำประจุไฟฟ้าสูงที่สุดในสภาวะที่เชื้อบางไม่ชอบน้ำ และ DAIS® มีค่าความนำประจุไฟฟ้าน้อยที่สุดโดยผลของ $\text{H}_2\text{O}:\text{SO}_3$ ไม่ส่งผลต่อค่าความนำไฟฟ้าต่อ DAIS® ส่วน BAM® จึงชี้ให้เห็นว่าเชื้อบางชอบที่น้ำมากขึ้นค่าความนำประจุไฟฟ้าจะลดลง และ Nafion E มีค่าความนำประจุไฟฟ้าใกล้เคียงกันกับ BAM® ที่ EW 455 ซึ่งสูงกว่า Nafion N และสรุปว่าเชื้อบางที่ไม่ชอบน้ำจะทำให้ค่าความนำประจุไฟฟ้าที่ดีที่สุดเช่นเดียวกับการเพิ่มของ EW และ H^+

Shi และ คณะ (2006) ได้ศึกษาการใช้อาร์กอนพลาสมาเปลี่ยนแปลงผิวของ polyethylene (PE) อุปกรณ์กักเก็บพลาสมาใช้ขั้วอิเล็กโตรดแบบภายใน (inner-capacity) การดิซชาร์จใช้ความถี่ 13.56 MHz โดยใช้ก๊าซอาร์กอนความดัน 25-30 Pa พบว่าอัตราการสูญเสียน้ำหนักของ PE เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของเวลาที่อาบอาร์กอนพลาสมา โดยมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดที่เวลา 70-120 วินาทีแล้วค่อยๆลดลงจนกระทั่งคงที่เมื่อเวลาอาบพลาสมานานกว่า 120 วินาที และอัตราการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของพลังงานที่ใช้ด้วยเมื่อพลังงานสูงกว่า 62 W

อัตราตราการสูญเสียน้ำหนักจะลดลงอย่างรวดเร็วนอกจากนี้จากการวิเคราะห์โดยใช้ ATR-FTIR พบว่า polyethylene (PE) ที่อาร์กอนพลาสมายังเกิดโครงสร้างผิวใหม่

Ru และ Jie-rong (2006) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงผิวของ poly(vinyl chloride) (PVC) ที่ใช้ทางการแพทย์ด้วยอาร์กอนพลาสมาระยะไกล (Remote plasma คือการวางตัวอย่างห่างจากบริเวณที่เกิดพลาสมาที่ระยะต่างๆ) และอาร์กอนพลาสมาโดยตรง (direct plasma คือการวางตัวอย่างในบริเวณที่เกิดพลาสมา) โดยใช้อาร์กอนที่มีความบริสุทธิ์ 99.99 % การกำเนิดพลาสมาทำที่ความถี่วิทยุ พลังงานช่วง 30-180 W อัตราการจ่ายอาร์กอนเท่ากับ $20 \text{ cm}^3/\text{min}$ และช่วงเวลาในการอาบพลาสมาของฟิล์มเท่ากับ 0.5-3.5 นาทีที่ศึกษาลักษณะโครงสร้างผิวของ PVC โดยใช้การวัดมุมสัมผัส X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) และ Scanning electron microscopy (SEM) พบว่าความชอบน้ำของฟิล์ม PVC เพิ่มขึ้นหลังจากอาบอาร์กอนพลาสมาระยะไกลและเพิ่มขึ้นมากกว่าการใช้อาร์กอนพลาสมาโดยตรง นอกจากนี้อาร์กอนพลาสมาระยะไกลไม่สร้างรอยความเสียหายบนผิวของฟิล์ม PVC ขณะที่อาร์กอนพลาสมาโดยตรงทิ้งร่องรอยความเสียหายบนผิวฟิล์มสูง ความชอบน้ำของฟิล์มขึ้นกับตำแหน่งของตัวอย่าง พลังงานที่ใช้ และเวลาอาบพลาสมา การเปลี่ยนแปลงผิวโดยใช้อาร์กอนพลาสมาทำให้อะตอมคลอรีนหลุดออกจากฟิล์ม PVC โดยมีอัตราส่วนของอะตอม Cl/C เท่ากับ 0.01 และ 0.03 ตามลำดับ นั่นคืออาร์กอนพลาสมาระยะไกลมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนผิวฟิล์ม PVC มากกว่าอาร์กอนพลาสมาโดยตรง นอกจากนี้อาร์กอนพลาสมายังทำให้เกิดหมู่ออกซิเจนบนผิวฟิล์ม โดยหมู่ออกซิเจนส่วนใหญ่คือ C-O การเปลี่ยนแปลงของผิวที่เกิดขึ้นมีประโยชน์ในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์ทางการแพทย์ที่มีความสามารถในการเข้ากันได้ทางชีวภาพกับเนื้อเยื่อมีชีวิต

Kim และ คณะ (2006) ได้ศึกษาการใช้ออกซิเจนพลาสมาบำบัดเพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของเยื่อบาง polysulfone ให้เป็นคุณสมบัติความชอบน้ำของเยื่อบางผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่า Contact Angle ของน้ำลดลงเพื่อเพิ่มเวลาการบำบัดด้วยออกซิเจนพลาสมาของเยื่อบาง polysulfone และอิมิตัวที่ 20s ของเวลาในการบำบัดด้วยออกซิเจนพลาสมา โดย Functional groups ถูกเพิ่มเข้ามาโดยการบำบัดด้วยออกซิเจนพลาสมา ซึ่งทดสอบได้จากการใช้ X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) และ zeta potential ของการบำบัดด้วยออกซิเจนพลาสมาของเยื่อบาง polysulfone ถูกวัดด้วย electrophoretic light scattering (ELS) spectrometer โดย อัตราของ O/C เพิ่มขึ้นจาก 33% เป็น 50% และ isoelectric point (IEP) ของผิวเยื่อบางจากค่า PH 3 เป็น PH 4.5 สำหรับ ออกซิเจนพลาสมาที่ใช้บำบัดเยื่อบาง polysulfone อัตราการไหลของน้ำบริสุทธิ์และในสารละลายเจลาตินเพิ่มขึ้นในช่วง PH ทั้งหมด เยื่อบางที่ถูกบำบัดด้วยพลาสมาแสดงให้เห็นว่ามี

ความสกรปรกน้อยลงที่ผิวเยื่อบาง กลไกของการลดการสกรปรกและถูกปรับปรุงให้มีความสะอาดของเยื่อบางนั้นมาจากการใช้ออกซิเจนพลาสมาบำบัด polysulfone เยื่อบางตามที่ศึกษา

Hakenjos และ คณะ (2006) ได้ศึกษาเกี่ยวกับ การใช้เทคนิคอิเล็กโตรเคมีเคลือบผิวแคโทดสเปกโตรสโกปีวัดค่าอิมพีแดนซ์สเปกตรัมพร้อมๆกันของเซลล์เดี่ยวในสแตคของ PEM fuel cell เนื่องจากการวัดรวมทั้ง สแตค จะไม่ได้รับข้อมูลเกี่ยวกับเซลล์เดี่ยว หลายๆเซลล์ที่อยู่ใน สแตค การวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ เซลล์เดี่ยว หลายๆเซลล์ที่อยู่ใน สแตค โดยประเมินที่สถานะการทำงานภายในเซลล์เดี่ยวพร้อมๆกันและนอกจากนั้น ยังอธิบายประสิทธิภาพทั้งหมดของสแตคได้ ซึ่งการวัดอิมพีแดนซ์สามารถอธิบายข้อมูลหลายอย่างเกี่ยวกับเงื่อนไขของเซลล์มากกว่าการวัด IV โดยเฉพาะการนำไฟฟ้าของเยื่อบาง การกระตุ้น และ จำกัดการส่งถ่ายไอออนประจุ สามารถที่จะอธิบายและสังเกตได้อย่างชัดเจน และ สรุปได้ว่าการวัดในสถานะต่างๆ แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในเฉพาะแต่ละเซลล์ โดยเหตุการณ์นี้ว่าทวมในเซลล์เดี่ยวเราใช้การวัดอิมพีแดนซ์ในการตรวจหาและวัดในเวลาต่างๆซึ่งแสดงถึงการตรกร้อมของศักย์ไฟฟ้าผ่านความต้านทานของเยื่อบาง มีผลน้อยมาก ต่อการสูญเสียประสิทธิภาพภายในเซลล์เมื่อเปรียบเทียบกับ การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานที่มาจาก การแพร่ของประจุผ่านเยื่อบาง

2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดและเยื่อบางไคโตซาน
2. ศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของคุณลักษณะเชิงไฟฟ้าด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี และศักย์การแพร่ของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดและไคโตซานก่อนและหลังปรับปรุงด้วยพลาสมาและไอออนบีมภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด
3. ศึกษาคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงของเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดและไคโตซานเยื่อบางก่อนและหลังปรับปรุงด้วยพลาสมาและไอออนบีมด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) และ เทคนิค Dielectric Constant
4. เพื่อศึกษาอิทธิพลของการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าในการวัดของเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี

บทที่ 2

ทฤษฎี

งานวิจัยนี้มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเมมเบรนแลกเปลี่ยนประจุที่มีการปรับปรุงด้วยพลาสมาโดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรเคมีเคลือบฟิล์มโพลีเอทิลีนและสัณฐานวิทยาของเยื่อบาง ทั้งที่ยังไม่ปรับปรุงการวัดและที่มีการปรับปรุงการวัดได้ ดังนี้

2.1 เมมเบรนเทคโนโลยี

เมมเบรน คือ แผ่นฟิล์มบางๆ ของสารอินทรีย์สังเคราะห์หรือสารอนินทรีย์ ที่จะทำให้เกิดการแยกตัวอย่างละเอียดของอนุภาคในของไหล ซึ่งของไหลในที่นี้คือก๊าซและของเหลว เมมเบรนมีได้หลายรูปร่าง เช่น แผ่นเรียบ หลอดซึ่งมีหลายขนาด และ Hollow fiber ซึ่งที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในน้อยกว่าสิบเท่าของมิลลิเมตร โดยทั่วไปแล้ว เมมเบรนที่ทำจากสารอนินทรีย์จะมีความต้านทานต่อความดันและสารเคมี โดยเฉพาะการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน แต่มีความยุ่งยากและราคาแพงกว่า เมมเบรนที่ทำจากสารอินทรีย์จะมีความยืดหยุ่นดีกว่า และสามารถใส่ไว้ในระบบที่มีเนื้อที่จำกัด ซึ่งจะได้พื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก ปัจจุบันได้มีการผลิตเมมเบรนขึ้นมาหลายชนิด เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะการนำไปใช้งานประเภทต่างๆ โดยเราสามารถแบ่งประเภทของเมมเบรนได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่

2.1.1 Isotropic Membranes

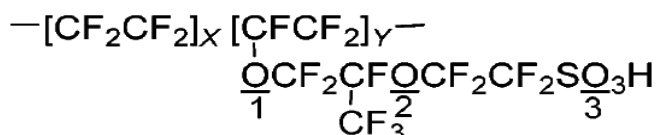
เป็นเมมเบรนที่มีส่วนประกอบโครงสร้างสม่ำเสมอ สามารถแบ่งได้อีก 3 ประเภท ได้แก่

2.1.1.1 Microporous Membranes เมมเบรนประเภทนี้จะมีรูพรุนกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น แยกสารโดยอาศัยการกรองดัดโค้งเช่นเดียวกับการกรองด้วยทราย แต่รูพรุนมีขนาดเล็กกว่าถึงกรองทรายมากคือ จะอยู่ที่ 0.01 – 10 ไมครอน กลไกหลักในการทำงานคือ การกรองดักสารที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของตัวเมมเบรน เมมเบรนชนิดนี้ได้แก่ ไมโครฟิลเตรชันอัลตราฟิลเตรชัน และนาโนฟิลเตรชัน

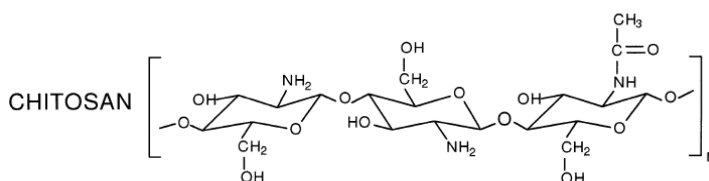
2.1.1.2 Nonporous Dense Membranes เป็นเมมเบรนที่เนื้อแน่นไม่มีรูพรุน แยกสารด้วยการแพร่ผ่าน กลไกหลักคือ จะอาศัยความสามารถในการแพร่ผ่านเมมเบรนของ

สารละลาย 2 ชนิด ที่อยู่แต่ละด้านของเมมเบรน เมมเบรนประเภทนี้ี้จะมีความแน่นสูง ใต้แก่ กระบวนการออสโมซิสผกกลับ เมมเบรนสำหรับแยกก๊าซ และ pervaporation membrane

2.1.1.3 Electrically Charge Membranes เมมเบรนประเภทนี้อาจจะมีรูพรุนหรือไม่ มีรูพรุนก็ได้ แต่โดยทั่วไปจะมีรูพรุนขนาดเล็กมาก โดยที่ผนังของรูพรุนจะมีไอออนที่มีประจุลบ หรือบวกติดแน่นอยู่ เมมเบรนที่มีประจุบวกติดอยู่เรียกว่า Anion Exchange Membranes เพราะว่าไอออนลบในน้ำจะเข้ามาจับ ส่วนเมมเบรนที่มีประจุลบเรียกว่า Cation Exchange Membrane การแยกสารจะต้องอาศัยความแตกต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อน และขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและชนิด ประจุของไอออนที่อยู่ในน้ำเป็นหลัก โดยจะใช้ในการกำจัดไอออนเป็นหลัก เมมเบรนประเภทนี้ ใต้แก่ เพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิคแอซิดเมมเบรน (Nafion) ซึ่งประกอบด้วยอนุพันธ์พื้นฐานของโพลิเมอร์หลักของ Sulfonated tetrafluoroethylene หรือ Perfluorosulfonic acid (PFSA) แสดงในรูปที่ 2.1 และ ไคโตซานเมมเบรนซึ่งประกอบด้วยอนุพันธ์พื้นฐานของโพลิเมอร์หลักของไคตินหรือเป็นโพลิเมอร์ธรรมชาติ หรือในที่รู้จักไคโตซานแสดงในรูปที่ 2.2 ฯลฯ ประโยชน์เมมเบรนประเภทนี้จะนำไปประยุกต์ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงและกระบวนการอิเล็กโตรไดโวลซิส ฯลฯ และ ในส่วนของเมมเบรนประเภทนี้จะถูกใช้ในงานวิจัยนี้ด้วย



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของเอ็อบาง Perfluorosulfonic acid (PFSA) [Bae, (2006)]

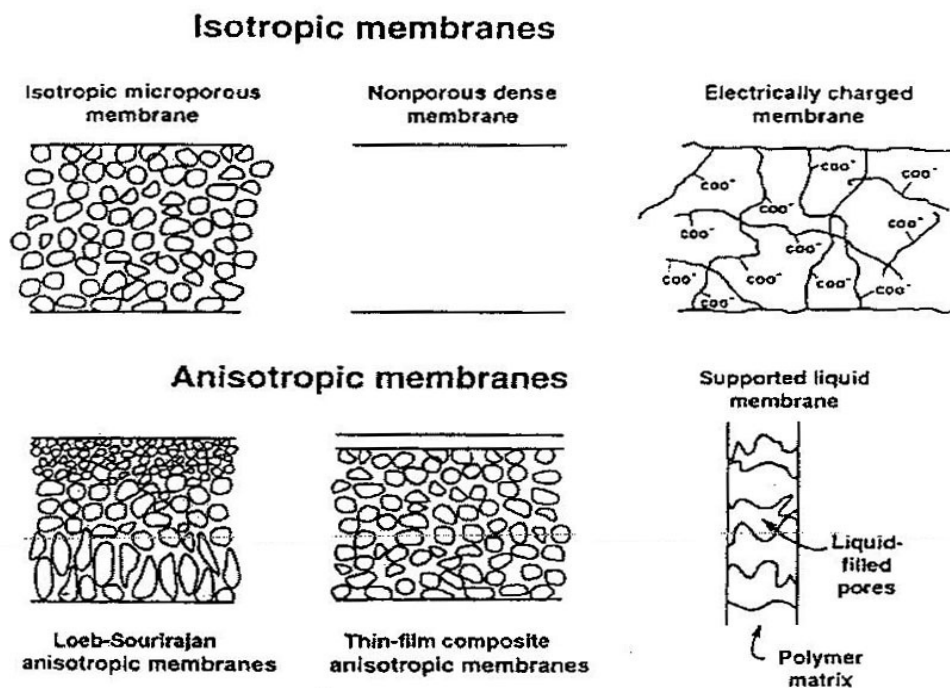


รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของและไคโตซาน [Wan, (2003)]

2.1.2 Anisotropic Membranes

อัตราการถ่ายเทมวลสารต่างๆ ผ่านเมมเบรนนั้น จะแปรผกผันกับความหนาแน่นของเยื่อแผ่นเมมเบรน สำหรับการกรองน้ำเพื่อให้ได้น้ำที่ผลิตมีปริมาณมากพอสมควรนั้น ความหนาแน่นของชั้นเมมเบรนที่มีประสิทธิภาพไม่ควรเกิน 20 ไมครอน การพัฒนาระบบผลิต การ

ประกอบเมมเบรนนั้นต่างๆ เข้าด้วยกันช่วยให้สามารถบรรลุเป้าหมายในการนำมาใช้งานจริงได้มากขึ้น โดยใช้เทคนิคของโครงสร้างแบบ Anisotropic ซึ่งวางแผ่นฟิล์มเมมเบรนขนาดที่บางมากบนแผ่นฟิล์มรองรับ ซึ่งมีรูพรุนและมีความหนามากกว่า ซึ่งเรียกว่าเยื่อบางประกอบ (Thin Film Composite, TFC) ซึ่งแผ่นฟิล์มทั้งสองชั้นทำมาจากวัสดุโพลีเมอร์คนละชนิดกัน ประโยชน์ที่ได้จากเมมเบรนประเภทนี้คือ ได้อัตราการกรองน้ำสูงขึ้น ซึ่งในเชิงธุรกิจมักจะผลิตเมมเบรนประเภทนี้



รูปที่ 2.3 การแบ่งประเภทของเมมเบรนตามโครงสร้างของเมมเบรน (Baker, 2004)

2.1.3 Ceramic Metal and liquid Membranes

โดยปกติแล้ววัสดุที่ใช้ผลิตเมมเบรนส่วนใหญ่จะเป็นโพลีเมอร์ที่เป็นสารอินทรีย์ แต่เร็วๆ นี้ได้มีการผลิตเมมเบรนที่ใช้วัสดุอย่างอื่น เช่น เซรามิก โดยใช้เมมเบรนที่มีรูพรุน เช่น ไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน เพื่อให้ทนทานต่อสารตัวทำละลาย และมีความเสถียรภาพต่อความร้อน โลหะ เช่น พัลลาเดียม สามารถที่จะใช้ผลิตเมมเบรนเนื้อแน่นสำหรับแยกก๊าซไฮโดรเจนเพื่อทำให้บริสุทธิ์ได้ ฟิล์มชั้นของเหลวก็สามารถที่จะนำมาผลิตเป็นเมมเบรนเหลว (Liquid Membranes) ได้เช่นกัน

2.2 ทฤษฎีการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมา (Surface modification with plasmas)

พลาสมาคือสสารในสถานะที่ 4 ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออะตอมของก๊าซเกิดการแตกตัวเนื่องจากถูกชนโดยอิเล็กตรอนหรือโฟตอนที่มีพลังงานสูง ดังนั้นในพลาสมาจึงประกอบด้วยอะตอมของก๊าซ ไอออนบวก ไอออนลบ รั้งสี และโฟตอน โดยในพลาสมาอนุภาคที่มีประจุบวกจะเท่ากับประจุลบ พลาสมาจึงเป็นกลางทางไฟฟ้า ผลเนื่องจากแรงทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาคและการเคลื่อนที่ของอนุภาคบวกและลบทำให้พลาสมามีคุณสมบัติเฉพาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน เช่น ทางวัสดุศาสตร์คือนำพลาสมามาปรับปรุงผิววัสดุให้มีคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ตามความต้องการใช้งานในด้านพลังงาน (ปฏิกิริยาฟิวชั่น) ฯลฯ ในงานวิจัยนี้ได้นำพลาสมามาปรับปรุงผิวเมมเบรนแลกเปลี่ยนประจุเนื่องจากในพลาสมาอนุภาคที่มีประจุบวกและประจุลบด้วยเหตุนี้พื้นผิวของเมมเบรนแลกเปลี่ยนประจุจึงมีประจุที่ตรงอยู่มากขึ้นทำให้เมมเบรนมีประสิทธิภาพของอัตราการแพร่และการแลกเปลี่ยนประจุได้มากขึ้น

โดยการใช้งานของพลาสมาหรือกระบวนการทางพลาสมาสามารถแบ่งเป็น 2 แบบคือ Non-Thermal หรือ Glow Plssama และ Thermal plasma

2.2.1 Non-Thermal หรือ Glow Plasmas

โดย Non-Thermal หรือ Glow Plasmas เป็นพลาสมาที่มีอุณหภูมิต่ำ นั่นคืออุณหภูมิของอิเล็กตรอนมากกว่าอุณหภูมิของไอออน ซึ่ง Non-Thermal หรือ Glow Plasmas แบ่งการเกิดอีก 2 ชนิด คือ Low pressure glow plasmas และ Atmospheric pressure glow plasmas ซึ่ง Glow Plasmas จะนำไปใช้ประโยชน์ในด้านทางด้านวัสดุ เช่น นำพลาสมามาปรับปรุงผิววัสดุ

2.2.2 Thermal plasma

Thermal plasma เป็นพลาสมาที่มีอุณหภูมิสูง นั่นคืออุณหภูมิของอิเล็กตรอนเท่ากับอุณหภูมิของไอออน ซึ่ง Thermal plasma จะนำไปใช้ประโยชน์ในการทำเครื่องเชื่อมและเครื่องตัด

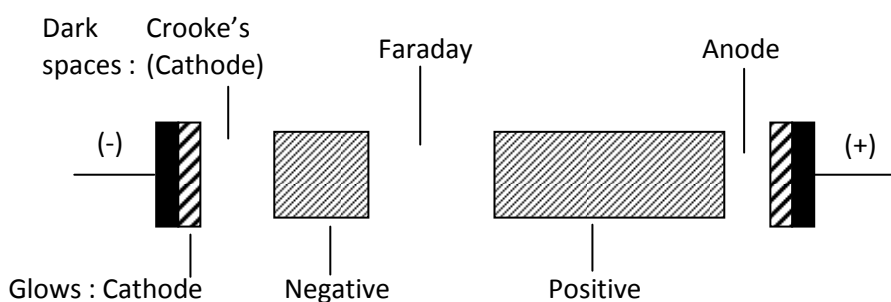
ในงานวิจัยนี้ได้นำพลาสมาชนิดที่มีอุณหภูมิต่ำแบบ Atmospheric pressure glow plasmas ไปใช้ประโยชน์ในด้านทางด้านปรับปรุงผิววัสดุ

2.3 พลาสมาดีสชาร์จแบบโคโรน่า (Corona discharge) และ พลาสมาดีสชาร์จที่ความถี่สูง (High frequency discharge)

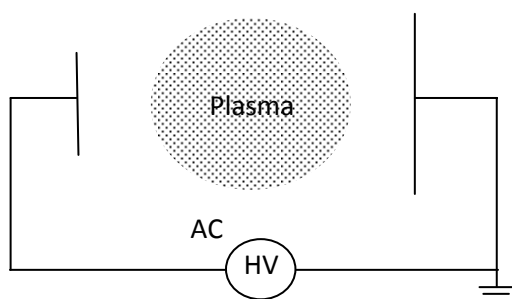
การดีสชาร์จแบบโคโรน่าเป็นการแตกตัวในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่ความดันสูง ลักษณะดีสชาร์จเรืองแสง ดีสชาร์จโคโรน่าสามารถนำกระแสไฟฟ้าในระดับมิลลิแอมแปร์และเกิดได้ต่อเนื่องโดยลำพัง โคโรน่าดีสชาร์จในอากาศมีผลทำให้เกิดโอโซนและออกไซด์ของ

ไนโตรเจน สำหรับจุดขั้วบวก (positive point) ในอากาศ กระแสไฟฟ้าจะไหลสม่ำเสมอ เพิ่มขึ้นตาม ศักย์จะมีค่าประมาณ 1 mA ก่อนการเกิดเบรกดาวอย่างสมบูรณ์ อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นโดยรอบจุดจะทำให้เกิด avalanche ค่าสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าแผ่นขนานมีค่าประมาณ 30 kV cm^{-1}

การคิซาร์จที่ความถี่สูงอิเล็กตรอนจะสั้นในสนามไฟฟ้าด้วยอัมพลิจูดน้อยกว่า ระยะทางคิซาร์จและไม่มีการสูญเสียไปยังขั้วไฟฟ้า แต่อาจสูญเสียไปโดยการแพร่กระจาย อิเล็กตรอน เบรกดาวจะเกิดขึ้นถ้าอัตราการผลิตอิเล็กตรอนมากกว่าการสูญเสียโดยการแพร่กระจาย ขั้วไฟฟ้าในคิซาร์จความถี่สูงมี 3 ลักษณะ คือ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบแผ่นขนาน โดยวิธีเหนี่ยวนำ ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้กล่องโลหะ และโดยขั้วไฟฟ้าแบบแผ่นขนานทรงกลมอยู่ ภายในหลอดคิซาร์จแล้วต่อศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับความถี่สูงกับขั้วไฟฟ้า[Conrads และ Schmidt, 2000] แสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5



รูปที่ 2.4 Discharge regions of a DC glow discharge



รูปที่ 2.5 Direct AC High Voltage connection to parallel plate reactor with unequal electrodes

อันตรกิริยาระหว่างไอออนในพลาสมากับผิวของสารเป่า เมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งชนผิวหน้าของ สารเป่าจะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆดังนี้

- ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิว ส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิว
- การชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอน เมื่อไอออนมีพลังงานสูงพอ
- ไอออนอาจฝังตัวในผิว (ion implantation) ระดับความลึกของการฝังตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานของไอออน
- การชนของไอออนทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมใหม่และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (lattice defect)
- การชนของไอออนทำให้เกิดการชนแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมออกมา ซึ่งเรียกว่าขบวนการสปัตเตอริง(sputtering)

2.4 ทฤษฎีอิเล็กทรอนิกส์เคมีเคลอิมพิแดนซ์สเปกโทรสโคปี (Electrical impedance spectroscopy (EIS))

เทคนิคอิมพิแดนซ์สเปกโทรสโคปีเป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ การเกิดปรากฏการณ์ทางกายภาพ และไฟฟ้า เช่นปรากฏการณ์การเก็บประจุบริเวณดับเบิลเลเยอร์ ปฏิกิริยาการถ่ายโอนประจุ และ ปฏิกิริยาที่เกิดจากการแพร่ ฯลฯ ซึ่งเทคนิคอิมพิแดนซ์สเปกโทรสโคปีสามารถบอกถึงปรากฏการณ์พวกนี้ [Park และ คณะ, 2006]

ปกติในกระแสไฟฟ้าแบบตรงความต้านทานสามารถหาได้จากสมการ

$$R = \frac{V}{I} \quad (1)$$

ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าหาได้จากกฎของโอห์ม และ สังเกตว่าความต้านทานในไฟฟ้ากระแสนี้จะเป็นอิสระต่อทุกช่วงความถี่ แต่ในไฟฟ้ากระแสสลับความต้านทานจะเปลี่ยนไปตามความถี่ต่างๆ ซึ่งความต้านทานของไฟฟ้ากระแสสลับจะเรียกว่า อิมพิแดนซ์ ซึ่งจะได้เป็น

$$Z = \frac{E(t)}{I(t)} \quad (2)$$

ซึ่ง $E(t) = E_0 \cos \omega t$, $E(t)$ คือ ศักย์ไฟฟ้าในกระแสสลับที่ขึ้นอยู่กับความถี่ ωt

และ $I(t) = I_0 \cos(\omega t - \phi)$, $I(t)$ คือ กระแสไฟฟ้าในไฟฟ้ากระแสสลับที่ขึ้นอยู่กับความถี่ ωt แต่จะช้ากว่าศักย์ไฟฟ้าในกระแสสลับ $E(t)$ อยู่หนึ่งเฟส นำไปแทนในสมการ (2) จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ [Veziroglu, 2005]

$$Z = \frac{E_0 \cos \omega t}{I_0 \cos(\omega t - \phi)} = Z_0 \frac{\cos \omega t}{\cos(\omega t - \phi)} \quad (3)$$

ซึ่งเราจะใช้ความสัมพันธ์ของออยเลอร์ คือ $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$

ดังนั้นเราจะได้ความสัมพันธ์ใหม่ดังนี้ $E(t) = E_0 e^{i\theta}$, $\theta = \omega t$ และ $I(t) = I_0 e^{i\theta - i\phi}$

จากสมการออยเลอร์จะได้ศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่มีทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพเมื่อนำไปแทนใน สมการ(3) จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่มีสองส่วนคือส่วนจริงและส่วนจินตภาพดังสมการ

$$Z = \frac{E(t)}{I(t)} = Z_0 e^{i\theta} = Z_0 \cos \theta + Z_0 i \sin \theta \quad (4)$$

ซึ่งเขียนเป็นสองส่วนได้ $\text{Re}(Z) = Z' = |Z| \cos \theta$, $\text{Im}(Z) = Z'' = |Z| \sin \theta$ ซึ่งจะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ของส่วนจริงและส่วนจินตภาพเมื่อนำค่าอิมพีแดนซ์ไปพลอตกราฟระหว่างส่วนจริงกับส่วนจินตภาพจะได้กราฟที่เรียกว่า Nyquist Plot โดยที่ $|Z| = [(Z')^2 + (Z'')^2]^{1/2}$ และ $\theta = \tan^{-1}(Z''/Z')$

2.4.1 ทฤษฎีเคมีเชิงฟิสิกส์และวงจรสมมูลในธรรมชาติ

2.4.1.1 ความต้านทานของอิเล็กโทรไลต์หรือความต้านทานของเมมเบรน

ความต้านทานของอิเล็กโทรไลต์หรือความต้านทานของเมมเบรน R_s, R_m, R_Ω

หาได้จากสมการ

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (5)$$

แต่ $\rho = \frac{1}{\sigma}$ แทนใน (10) จะได้ $R = \frac{l}{\sigma A}$

โดยที่ ρ คือสภาพความต้านทานของเมมเบรนหรืออิเล็กโทรไลต์

σ คือสภาพการนำไฟฟ้าของเมมเบรนหรืออิเล็กโทรไลต์

R คือความต้านทานของเมมเบรนหรืออิเล็กโทรไลต์

I คือความยาวของเมมเบรนหรืออิเล็กโทรไลต์

A คือพื้นที่หน้าตัดของเมมเบรนหรืออิเล็กโทรไลต์

2.4.1.2 ตัวเก็บประจุระหว่างพื้นผิวคู่

กระแสไฟฟ้าระหว่างพื้นผิวคู่คือพื้นที่ที่ติดต่อกันระหว่างบริเวณอิเล็กโทรดและเมมเบรนหรืออิเล็กโทรไลต์สิ่งนั้นทำให้เกิดเสมือนเป็นตัวเก็บประจุโดยสามารถประมาณค่าการเก็บประจุนี้คือ $30 \mu F$ สำหรับทุกๆตารางเซนติเมตรของบริเวณอิเล็กโทรด ค่าของตัวเก็บประจุของสองพื้นผิวขึ้นอยู่กับหลายอย่างจะไมคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับ ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณ อุณหภูมิ ความเข้มข้นของประจุ ชนิดของประจุ ชั้นของออกไซด์ ความเรียบของขั้วอิเล็กโทรด ฯลฯ

2.4.1.3. ความต้านทานเนื่องจากโพราไลต์เซชัน

เมื่อใดก็ตามที่ศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดถูกทำให้หมดไปมันจะกลายเป็นวงจรเปิดสิ่งนี้เรียกว่าการโพราไลต์เซชันของขั้วอิเล็กโทรด เมื่อขั้วอิเล็กโทรดถูกโพราไลต์เซชัน มันจะทำให้กระแสไหลผ่านปฏิกิริยาเคมีเชิงไฟฟ้าสิ่งนี้จะเกิดในบริเวณขั้วอิเล็กโทรดเท่านั้น ซึ่งจะทำให้จำนวนของกระแสถูกควบคุมโดยพลังงานของปฏิกิริยาและการแพร่ของปฏิกิริยาทั้งสองทางและจากขั้วอิเล็กโทรด และ ศักย์ไฟฟ้าที่วงจรปิดถูกควบคุมโดยสภาพสมดุลระหว่างความแตกต่างของสองปฏิกิริยาเคมีหนึ่งในนั้นคือการสร้างกระแสที่ขั้วแอโนดและแคโทดซึ่งอธิบายจากความสัมพันธ์ของกระแสดังนี้

$$I = I_{corr} \left(10^{\frac{(E-E_{OC})}{\beta_A}} - 10^{\frac{-(E-E_{OC})}{\beta_C}} \right) \quad (6)$$

โดยที่ I คือกระแสที่วัดในเซลล์

I_{corr} คือกระแสที่ลดทอนหรือกักร่อน

E_{OC} คือศักย์ไฟฟ้าในวงจรปิด

β_A คือค่าคงที่ขั้วแอโนด

β_C คือค่าคงที่ขั้วแคโทด

ถ้าจ่ายสัญญาณน้อยจะประมาณให้ $E - E_{OC}$ น้อยมากๆจะได้เป็น

$$I_{corr} = \frac{\beta_A \beta_C}{2.303(\beta_A + \beta_C)} \left(\frac{1}{R_p} \right) \quad (7)$$

โดยที่ R_p คือความต้านทานเนื่องจากโพราไลต์เซชัน

2.4.1.4 ความต้านทานการถ่ายโอนประจุ

เป็นความต้านทานที่เกิดขึ้นในทำนองเดียวกันกับโพราไลต์เซชันคือเกิดขึ้นโดยถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาเคมีเชิงไฟฟ้าการที่อิเล็กตรอนเข้าไปในส่วนของโลหะที่ขั้วและไอออนก็แพร่เข้าสู่เมมเบรนหรืออิเล็กโตรไลต์ประจุก็มีการถ่ายเทเกิดขึ้น

ปฏิกิริยาการถ่ายโอนประจุนี้มีความเร็วที่แน่นอนความเร็วนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยา อุณหภูมิ ความเข้มข้นของผลผลิตของปฏิกิริยา และ ศักย์ไฟฟ้าอธิบายด้วยสมการดังนี้

$$R_{ct} = \frac{RT}{nFi_0} \quad (8)$$

โดยที่ R_{ct} คือความต้านทานการถ่ายโอนประจุ

F คือค่าคงที่ฟาราเดย์

i_0 คือความหนาแน่นกระแสที่เปลี่ยนไป

2.4.1.5 การแพร่

การแพร่สามารถทำให้เกิดอิมพีแดนซ์ซึ่งเรียกว่าค่า Warburg Impedance ซึ่งอิมพีแดนซ์ชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่ของศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งในช่วงความถี่สูง Warburg Impedance จะมีค่าน้อยมากด้วยเหตุที่ปฏิกิริยาการแพร่ไม่ได้เคลื่อนที่ได้ไม่ไกลมากนัก ในช่วงความถี่ต่ำปฏิกิริยาการแพร่จะมีการแพร่ได้มากขึ้นด้วยเหตุนี้ Warburg Impedance จึงมีค่าสูงขึ้นตามสมการ

$$Z_w = \frac{\sigma}{\sqrt{\omega}} (1 - i) \quad (9)$$

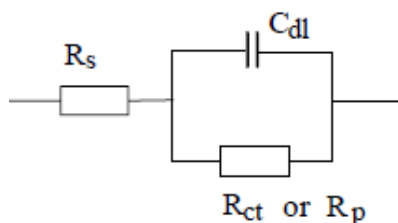
โดยที่ Z_w คือค่า Warburg Impedance

σ คือค่าคงที่ Warburg

2.4.2 รูปแบบวงจรสมมูลในธรรมชาติ

การเกิดปรากฏการณ์ทางกายภาพและไฟฟ้าเคมีในธรรมชาติของเซลล์ สามารถแสดงแบบจำลองวงจรทางไฟฟ้าได้ดังนี้

2.4.2.1 วงจรสมมูลแบบ Randle Cell



รูปที่ 2.6 แสดงวงจรสมมูลแบบ Randle Cell

จากรูปที่ 2.6 จะได้อิมพีแดนซ์ดังนี้

$Z_s = R_s, Z_{ct} = R_{ct}, Z_{C_{dl}} = \frac{1}{i\omega C_{dl}}$ พิจารณาจากวงจรจะเห็นว่า R_{ct} จะต่อแบบขนานกับ C_{dl} และ

ไปต่ออนุกรมกับ R_s เมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจรนี้จะได้ดังนี้ $Z = Z_s + [Z_{ct} + Z_C]$ จะได้

[Orazem, 2008]

$$Z = R_s + \left[\frac{1}{\frac{1}{R_{ct}} + \frac{\omega C}{i}} \right] = R_s + \frac{R_{ct}}{1 + R_{ct} C_{dl} i \omega} \quad (10)$$

โดยที่ถ้าทำ (Complex conjugate) จะได้

$$Z = R_s + \frac{R_{ct}}{1 + (R_{ct} C_{dl} \omega)^2} - i \frac{R_{ct}^2 C_{dl} \omega}{1 + (R_{ct} C_{dl} \omega)^2} \quad (11)$$

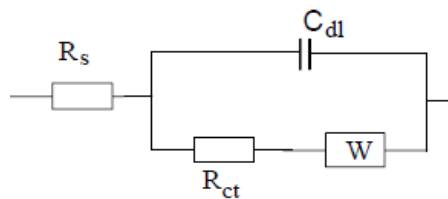
จากสมการที่ (11) จะเห็นว่ามีส่วนจริงและจินตภาพ

$Z' = R_s + \frac{R_{ct}}{1 + (R_{ct} C_{dl} \omega)^2}$ สมการนี้เป็นส่วนจริง และ $Z'' = \frac{R_{ct}^2 C_{dl} \omega}{1 + (R_{ct} C_{dl} \omega)^2}$ สมการนี้เป็นส่วน

ของจินตภาพ

จากนั้นนำเข้าสู่สมการ $|Z| = [(Z')^2 + (Z'')^2]^{1/2}$ และ $\theta = \tan^{-1}(Z''/Z')$ เพื่อนำไปสร้าง Nyquist Plot ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริงและส่วนจินตภาพ

2.4.2.2 วงจรสมมูลแบบ Randle Cell โดยรวม Warburg Impedance



รูปที่ 2.7 แสดงวงจรสมมูลแบบ Randle Cell โดยรวม Warburg Impedance

จากรูปที่ 2.7 จะได้อิมพีแดนซ์ดังนี้

$Z_s = R_s, Z_{ct} = R_{ct}, Z_{C_{dl}} = \frac{1}{i\omega C_{dl}}, Z_W = \frac{\sigma}{\sqrt{\omega}}(1-i)$ พิสูจน์จากวงจรจะเห็นว่า R_{ct} จะต่ออนุกรมกับ W และ แบบขนานกับ C_{dl} และ ไปต่ออนุกรมกับ R_s เมื่อคิดค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจรนี้จะได้ $Z = Z_s + [(Z_{ct} + Z_W) + Z_C]$ แทนค่าจะได้

$$Z = R_s + \frac{(R_{ct} + Z_W)}{1 + (R_{ct} + Z_W)C_{dl}i\omega} \quad (12)$$

โดยที่ถ้าทำ (Complex conjugate) จะได้

$$Z = R_s + \frac{(R_{ct} + Z_W)}{1 + \{(R_{ct} + Z_W)C_{dl}\omega\}^2} - i \frac{(R_{ct} + Z_W)^2 C_{dl}\omega}{1 + \{(R_{ct} + Z_W)C_{dl}\omega\}^2} \quad (13)$$

จากสมการที่ (13) จะเห็นว่ามีส่วนจริงและจินตภาพ

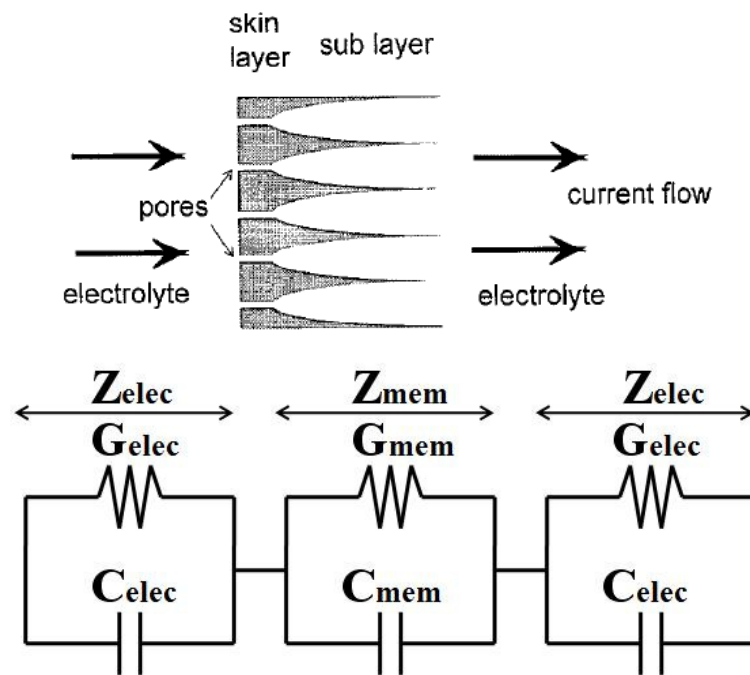
$$Z' = R_s + \frac{(R_{ct} + Z_W)}{1 + \{(R_{ct} + Z_W)C_{dl}\omega\}^2} \quad \text{สมการนี้เป็นส่วนจริงและ} \quad Z'' = \frac{(R_{ct} + Z_W)^2 C_{dl}\omega}{1 + \{(R_{ct} + Z_W)C_{dl}\omega\}^2}$$

สมการนี้เป็นส่วนของจินตภาพจากนั้นนำเข้าสู่สมการ $|Z| = [(Z')^2 + (Z'')^2]^{1/2}$ และ

$\theta = \tan^{-1}(Z''/Z')$ เพื่อนำไปสร้าง Nyquist Plot ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริงและส่วนจินตภาพ

2.5 ทฤษฎีอิเล็กโทรเคมีเคลอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีของเยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

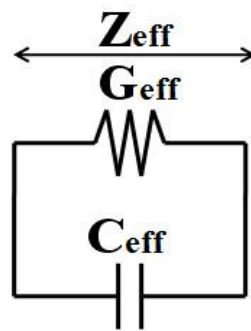
เยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ [Alcaraz และคณะ, 1998] จะแสดงคุณสมบัติเป็นสารไดอิเล็กตริก มีสภาพนำไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าจะเกิดไดโพลไรเซชันของประจุไฟฟ้าระหว่างผิวของเยื่อบางจะทำหน้าที่เหมือนตัวเก็บประจุไฟฟ้า Coster และ คณะ (1996) ได้จำลองเยื่อบางแบบไม่สมมาตร ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ดังรูป



รูปที่ 2.8 แสดงแบบจำลอง Maxwell-Wagner ของโครงสร้างทางไฟฟ้าภายในของเยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ [Coster, 1996]

โดยเยื่อบางประกอบด้วยชั้นผิวสองชั้น คือ ชั้นผิว (Skin layer) และชั้นรอง (sub layer) มีค่าความนำประจุไฟฟ้า (G) (หรือ ความต้านทานประจุไฟฟ้า, R โดย $G=1/R$) และ ค่าความจุไฟฟ้า (C) ของเยื่อบางแต่ละชั้น โดยค่าของ $G_{\text{electrolyte}}$ กับ $C_{\text{electrolyte}}$ และ G_{membrane} กับ C_{membrane} ต่อขนานกัน โดยที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าความนำประจุไฟฟ้า $G_{\text{electrolyte}}$ ที่ต่อขนานกับ $C_{\text{electrolyte}}$ ทั้งสองข้างต่ออนุกรมกับเยื่อบาง โดยในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงการวัดโดยเพื่อให้อิทธิพลของค่าความนำประจุไฟฟ้าหรือความต้านทานประจุไฟฟ้าและค่าอิมพีแดนซ์ของเมมเบรนส่วนเกินของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ต่ออนุกรมกับเมมเบรนที่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของเมมเบรนได้ พิจารณาจากรูปที่ 2.8

จากงานวิจัยที่ผ่านมาเมื่อไม่นานมานี้โดย พิกุล วนิชภิชชาติ และ วราวุฒิ พุทธิให้ (2005)กล่าวไว้ว่าเมื่ออยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะไม่สามารถวัดค่าความนำประจุไฟฟ้า สภาพต้านทานประจุไฟฟ้า และ ความจุประจุไฟฟ้า ของเยื่อบางจากอุปกรณ์การวัดทางไฟฟ้า กระแสตรง DC ได้โดยตรง แต่จะใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ AC ที่ความถี่ต่างๆเพื่อวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบางเมื่ออยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยทั้งนี้การวัดจะพิจารณาเนื่องจากเยื่อบาง สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์จึงพิจารณารวมทั้งระบบซึ่งประกอบด้วยค่าของเยื่อบางและของ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ได้จึงจรไฟฟ้าใหม่ดังรูป 2.9[Putthaiและ คณะ, 2005]



รูปที่ 2.9แสดงแบบจำลองโครงสร้างทางไฟฟ้าภายในของเยื่อบางโดยใช้ค่ายังผล (Effective value)

โดยใช้แทนเป็นค่ายังผล (Effective Value) แทนด้วยค่าความต้านทานรวมของเยื่อบางและ สารละลายหรือเรียกว่า อิมพีแดนซ์(Z) โดยมีความนำประจุไฟฟ้ารวม (G_{eff}) (หรือ ความต้านทาน ประจุไฟฟ้า, R_{eff} โดย $G_{eff}=1/R_{eff}$) และ ความจุประจุไฟฟ้ารวม (C_{eff}) ต่อขนานกันโดยเขียน อิมพี แคนซ์(Z) ใหม่ได้ตามสมการของ[Chilcottและ คณะ, 2002]

$$Z = \frac{1}{G_{eff} + j\omega C_{eff}} \quad (14)$$

โดยที่ถ้าทำ (Complexconjugate) จะได้

$$Z = \frac{1}{G_{eff} + j\omega C_{eff}} \times \frac{G_{eff} - j\omega C_{eff}}{G_{eff} - j\omega C_{eff}} = \frac{G_{eff} - j\omega C_{eff}}{G_{eff}^2 + \omega^2 C_{eff}^2} \quad (15)$$

จัดรูปแล้วจะได้

$$Z = \frac{G_{eff}}{G_{eff}^2 + \omega^2 C_{eff}^2} - j \frac{\omega C_{eff}}{G_{eff}^2 + \omega^2 C_{eff}^2} \quad (16)$$

จากสมการที่ (16) จะเห็นว่ามีส่วนจริงและจินตภาพ
สมการนี้เป็นส่วนจริง

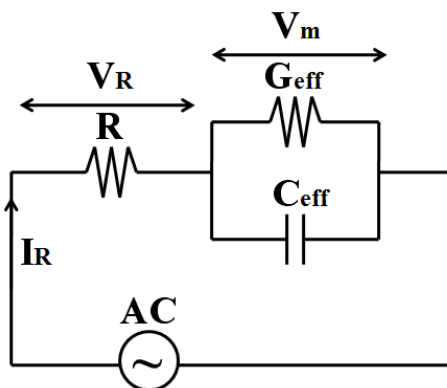
$$Z' = \frac{G_{eff}}{G_{eff}^2 + \omega^2 C_{eff}^2} \quad (17)$$

สมการนี้เป็นส่วนของจินตภาพ

$$Z'' = j \frac{-\omega C_{eff}}{G_{eff}^2 + \omega^2 C_{eff}^2} \quad (18)$$

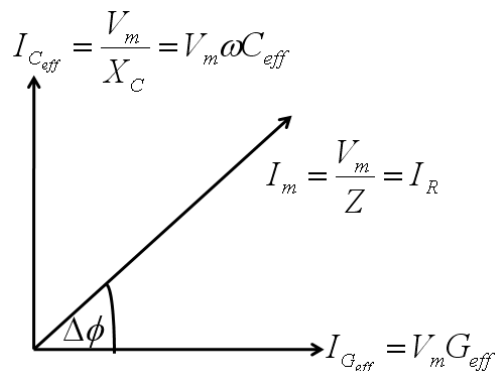
โดยค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้ระหว่างส่วนจริงกับส่วนจินตภาพเมื่อนำไปพล็อตกราฟระหว่างส่วนจริงกับส่วนจินตภาพจากสมการที่ (17) และ (18) จะได้กราฟที่เรียกว่า Nyquist Plot

การหาค่า C_{eff} และ G_{eff} โดยการแช่เยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งประกอบด้วยความสภาพความต้านทานประจุไฟฟ้าหรือความนำประจุไฟฟ้า ต่อขนานกับความจุประจุทางไฟฟ้า และเมื่อต่ออนุกรมกับตัวต้านทานภายนอก R ($12k \Omega$) เพื่อคำนวณหากระแสไฟฟ้าในวงจร เมื่อจ่ายสัญญาณกระแสไฟฟ้าสลับที่มีความถี่ค่าต่างๆสามารถวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า V_R และ V_m และผลต่างเฟสระหว่าง V_R กับ V_m สามารถคำนวณหา C_{eff} และ G_{eff} ได้ตามรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงวงจรเทียบเท่าในเมมเบรน

จากภาพประกอบข้างต้นสามารถเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมเพื่อคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์(Z) ความนำไฟฟ้า (G_{eff}) และ ความจุไฟฟ้าของเยื่อบาง (C_{eff}) ของเยื่อบางได้ดังนี้



รูปที่ 2.11 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจรในรูปที่ 2.10

จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมสามารถคำนวณหาค่า Z G_{eff} และ C_{eff} ได้ดังนี้

$$I_R = \frac{V_R}{R} \quad (19)$$

$$|Z| = \frac{V_m}{I_R} = \frac{V_m R}{V_R} \quad (20)$$

$$G_{eff} = \frac{\cos \Delta\phi}{|Z|} \quad (21)$$

$$C_{eff} = \frac{\sin \Delta\phi}{\omega |Z|} \quad (22)$$

- เมื่อ R คือ ความต้านทานภายนอก
 I_R คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานภายนอก
 V_R คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมตัวต้านทาน
 V_m คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมเยื่อบาง
 ω คือ ความถี่เชิงมุมที่ความถี่ต่างๆ
 $\Delta\phi$ คือ มุมต่างเฟสกันของ V_R และ V_m

2.6 ศักย์การแพร่ของเยื่อบาง(Membrane Diffusion Potentials)

เมมเบรน (Membrane) หรือเรียกว่า “เยื่อบาง” ทำหน้าที่คัดเลือกและยอมให้สารบางชนิดผ่าน จึงทำหน้าที่กั้นบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารต่างกัน การที่สารจะเคลื่อนผ่านเยื่อบางได้นั้นต้องอาศัยแรงขับจำนวนหนึ่ง หากมีการแพร่เกิดขึ้นหมายถึงจะมีการเคลื่อนที่ของมวลสารจากด้านที่มีความเข้มข้นสูงไปยังด้านที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ในที่นี้ผลต่างความเข้มข้นระหว่างสองด้านของเยื่อบางจึงเสมือนเป็นแรงขับ แต่การแพร่นี้มีปัจจัยความหนาของเยื่อที่ก็เป็นตัวกำหนดความเร็วที่จะพบมวลสารอีกด้านหนึ่งของเยื่อบางด้วย ในทางฟิสิกส์นิยามแทนการเปลี่ยนแปลงเทียบกับระยะทางเรียกว่า “เกรเดียนท์”(Gradient, $\Delta Y / \Delta X$) ซึ่งมวลสารในเยื่อบางย่อมมีความเข้มข้นเทียบกับระยะทางในเยื่อบางที่ไม่เท่ากัน เรียกว่าเกิด “เกรเดียนท์ความเข้มข้น” (Concentration gradient) ดังรูปที่ 2.10

2.6.1 กรณีที่เยื่อบางไม่มีประจุ

มวลสารสามารถเคลื่อนผ่านช่องว่างของเยื่อบางได้ หากขนาดของมวลสารเล็กกว่าขนาดของช่องว่าง ทั้งนี้ไม่คำนึงถึงการสั้นของโซ่พอลิเมอร์ในเยื่อบางซึ่งทำให้ช่องว่างขยับไปมา ทำให้ช่องว่างกว้างขึ้นได้บางโอกาส (ขนาดของช่องว่างขึ้นกับ Thermal energy ของระบบ) จึงกล่าวได้ว่าเยื่อบางไม่คัดเลือก ซึ่งเป็นจริงกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ด้วย

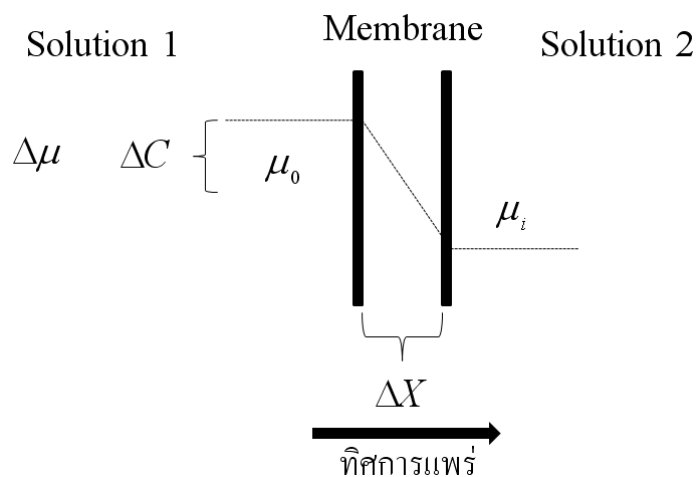
2.6.2 กรณีที่เยื่อบางมีประจุ

การคัดเลือกมวลสารจะเกิดขึ้น 2 วิธี โดยแบ่งตามชนิดของมวลสาร

- มวลสารไม่มีประจุ การแพร่ผ่านเยื่อบางเกิดขึ้นได้เมื่อขนาดของมวลสารเล็กกว่าช่องภายในเยื่อบาง เช่นในกระบวนการไดอะไลซิส(Dialysis) ในไตเทียม หากต้องใช้ความดันช่วยแยกเพื่อความรวดเร็วและต้องการฟลักซ์จำนวนมาก เรียกกระบวนการแยกนี้ว่า “รีเวอร์สออสโมซิส” (Reverse Osmosis)
- มวลสารมีประจุ เช่นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เมื่อเกลือแตกตัวในน้ำ จะเกิดไอออนชนิดบวกและชนิดลบ ไอออนทั้งสองชนิดจะพยายามแพร่ตามเกรเดียนท์ความเข้มข้น แต่เยื่อบางชอบให้ไอออนที่มีประจุต่างชนิดผ่านได้และผลักไอออนที่มีประจุชนิดเดียวกันไม่ให้ผ่านได้ง่าย เมื่อมีการแยกของอนุภาคมีประจุจะมีศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้น ส่งผลต่อการแพร่ เรียกแรงขับเคลื่อนชนิดนี้ว่า “เกรเดียนท์ศักย์ไฟฟ้าเคมี” (Electrochemical gradient, $\Delta\mu / \Delta X$) ซึ่งจะปรากฏชัดที่ผิวทั้งสองด้านของเยื่อบาง ในเบื้องต้นจะเกิดฟลักซ์ไอออนผ่านเยื่อบางปริมาณหนึ่ง (ปริมาณไอออนที่เคลื่อนพื้นที่แนวตั้งฉากเทียบกับเวลา) มีหน่วยเป็น mole.m⁻².s⁻¹ และจะเข้าสู่สมดุลใหม่อีกครั้งในกระบวนการปรับเข้าสู่สมดุลนี้ไอออนบวกและไอออนลบจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน (โดยจะมีระยะห่างน้อยๆ ค่าหนึ่งเสมอ) เรียกว่าสภาพ

เป็นกลางทางไฟฟ้า (Electro neutrality) ตัวอย่างเช่น หากเยื่อบางยอมให้เฉพาะประจุลบผ่านเท่านั้น (อูคมคติ) ข้างที่มีความเข้มข้นสูงจะสูญเสียประจุลบไปยังข้างที่เข้มข้นน้อยกว่า ทำให้เยื่อบางมีความต่างศักย์ไฟฟ้าเคมีติดลบ ($\mu_i - \mu_0 = \Delta\mu$, มีค่าติดลบ) ในทางตรงกันข้าม หากเยื่อบางยอมให้เฉพาะประจุบวกผ่านเท่านั้น ศักย์ไฟฟ้าที่ตก คร่อมจะมีค่าบวก ดังนั้นศักย์มีค่าลบหรือมีค่าบวกจะบอกชนิดของไอออนที่เคลื่อนผ่านเยื่อบาง และที่สมดุลใหม่นี้เรียกว่าเกิด “ศักย์นิ่ง” (Resting potential)

ปรากฏการณ์ข้างต้นเป็นไปในทำนองเดียวกันกับที่เกิดขึ้นในเยื่อเซลล์มีชีวิตทั่วไป และหากเยื่อบางสูญเสียการคัดเลือก หรือไม่สามารถทำหน้าที่เป็นเยื่อกั้นอีกต่อไป สารภายในที่เข้มข้นกว่าจะแพร่ออกจากเซลล์อย่างง่ายดายและจะทำให้เซลล์ตายในที่สุด



รูปที่ 2.12 แสดงความเข้มข้นมวลสารระหว่างสองด้านของเยื่อบางแบบระนาบ ในกรณีนี้ สมมุติว่าเยื่อบางมีเกรเดียนต์ความเข้มข้นคงที่

การที่เยื่อบางที่มีประจุสัมพันธ์กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีการแตกตัวของไอออนเกลือ ผิวทั้งสองด้านของเยื่อบางจึงทำหน้าที่เหมือนเป็นตัวเก็บประจุจึงมีศักย์นิ่งขนาดหนึ่งเสมอ ศักย์นิ่งดังกล่าวนี้เกิดในระยะทางน้อยๆที่บริเวณใกล้ผิวเยื่อบางและส่งผลต่อกันที่ระยะต่อๆห่างจากผิวเยื่อบางด้วย ตามสมมุติของ Gouy & Chapman Model ดังนั้นหากต้องการให้ประจุเคลื่อนที่ออกจากผิวเยื่อบางได้ ต้องใช้ขั้วไฟฟ้าช่วยและให้พลังงานไฟฟ้าแก่ระบบกระบวนการเช่นนี้ใช้มากในระบบแยกด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis) เช่นการทำน้ำกร่อยให้จืด

จากรูปที่ 2.10 หากจัดเยื่อบางชนิดมีประจุตรงกันสองด้านของอิเล็กโทรไลต์ให้มีความเข้มข้น ในกรณี ที่ Solutions เป็น Na^+, K^+ และ Cl^- ไอออน จะได้

$$J_K = -eD_K \frac{dC_K}{dx} - \frac{e^2 D_K C_K}{kT} \frac{d\psi}{dx} \quad (23)$$

$$J_{Na} = -eD_{Na} \frac{dC_{Na}}{dx} - \frac{e^2 D_{Na} C_{Na}}{kT} \frac{d\psi}{dx} \quad (24)$$

$$J_{Cl} = +eD_{Cl} \frac{dC_{Cl}}{dx} - \frac{e^2 D_{Cl} C_{Cl}}{kT} \frac{d\psi}{dx} \quad (25)$$

โดยที่ e = จำนวนของอิเล็กตรอน k = ค่าคงที่ของ Boltzmann = 1.38×10^{-23} J.K⁻¹

D_K, D_{Na} และ D_{Cl} = ค่าคงที่การแพร่ K⁺, Na⁺ และ Cl⁻ ไอออนในเมมเบรน

ψ เป็นศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง x

C_K, C_{Na} และ C_{Cl} เป็นความเข้มข้นของ K⁺, Na⁺ และ Cl⁻

สำหรับสถานะสมดุล ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างเมมเบรนจะมีค่าคงที่ และดังนั้นจะไม่มี การถ่ายเทประจุจากด้านหนึ่งของเมมเบรนไปยังอีกด้านจะได้

$$J = J_K + J_{Na} + J_{Cl} = 0 \quad (26)$$

สมการเหล่านี้ไม่สามารถแก้ปัญหาการวิเคราะห์ในกรณีทั่วไป ถ้าสมมุติให้สนามภายในเมมเบรนมีค่าคงที่ ($\frac{d\psi}{dx}$ = ค่าคงที่) จะสามารถแก้สมการที่ 23 ถึง 26 ได้ และจะได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเมมเบรน

$$\psi^II - \psi^I = -\frac{RT}{F} \ln \left[\frac{P_K C_K^{II} + P_{Na} C_{Na}^{II} + P_{Cl} C_{Cl}^I}{P_K C_K^I + P_{Na} C_{Na}^I + P_{Cl} C_{Cl}^{II}} \right] \quad (27)$$

เมื่อ P_K, P_{Na} และ P_{Cl} เป็นค่าสภาพซาบซึมได้ของ K⁺, Na⁺ และ Cl⁻ ไอออนในเมมเบรน

R คือค่าคงที่ของก๊าซ = 8.314 J.mole⁻¹.K⁻¹

T คืออุณหภูมิในหน่วย เคลวิน

F คือค่าคงที่ของ Faraday มีค่าประมาณ $96,500$ Coulomb.mole⁻¹

สมการนี้เรียกว่า Goldman Equation นำมาใช้หาค่าศักย์เมมเบรน ในเมมเบรนสังเคราะห์ ได้เหมือนกับการใช้เมมเบรนของเซลล์ที่มีชีวิตในระบบปิด โดยเราสามารถหาอัตราส่วนค่าสภาพ ซาบซีมได้ของไอออนในเมมเบรนโดยนำค่าสภาพซาบซีมได้ของตัวเปรียบเทียบหาค่าสภาพ

ซาบซีมได้ของตัวที่สนใจในที่นี้มี K^+ , Na^+ และ Cl^- ไอออน ซึ่งเขียนแทนได้เป็น $\alpha = \frac{P_K}{P_{Cl}}$,

$$\beta = \frac{P_{Cl}}{P_K} \text{ และ } \gamma = \frac{P_{Na}}{P_{Cl}}$$

2.7 เทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

โดยทั่วไป Infrared frequency จะเขียนในรูปของ wavenumber ($1/\lambda$; cm^{-1}) ซึ่งก็คือจำนวนของคลื่นต่อเซนติเมตรตามสมการ

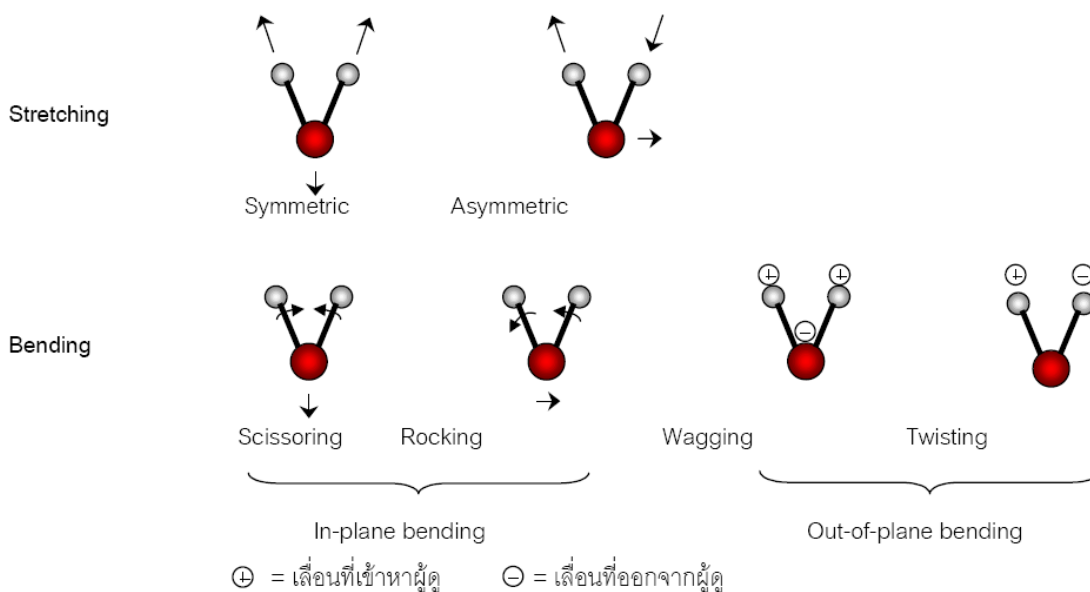
$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} \quad (28)$$

โดยที่ $\bar{\nu}$ คือ เลขคลื่น (wavenumber) มีหน่วย cm^{-1} และ λ คือ ความยาวคลื่น มีหน่วย cm ดังนั้นการเขียนเป็น

$$E = hc\bar{\nu} \quad (29)$$

โดยที่ E คือ พลังงานของคลื่นมีหน่วย จูล(J)

เครื่องมือส่วนใหญ่สามารถสแกนได้ในช่วง $400-4000 \text{ cm}^{-1}$ โดยที่ความถี่ดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับพลังงานประมาณ $2-12 \text{ kcal/mol}$ พลังงานจำนวนนี้มีค่ามากพอที่จะไปสั่นพันธะต่างๆ ในโมเลกุลเช่นเกิดการยืด-หดของพันธะ (bond stretching) หรือการโค้งงอของพันธะ (bond bending) ดังในรูปที่ 2.11 แต่พลังงานจำนวนนี้ก็ไม่สามารถทำให้พันธะแตกได้แสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.13 แสดงการสั่นของพันธะรูปแบบต่างๆ ในโมเลกุลเมื่อถูกกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด

พันธะต่างชนิดกันจะเกิดการ Stretching ในช่วงความถี่ที่ต่างกัน ดังนั้น IR spectrum จะบ่งบอกถึงชนิดของพันธะที่มีอยู่ในโมเลกุล

การทำ Infrared spectrum ของสารทำได้ไม่ยากเพียงแต่ใส่สารตัวอย่างลงในเครื่องมือเครื่องจะทำการสแกนโดยปล่อยแสง infrared ออกมาผ่านสารไปยังหัววัดหากสารไม่ดูดกลืนพลังงาน (absorbance) แสงก็จะผ่านไปสู่อุปกรณ์วัด (detector) หากแต่ถ้าหากแสงถูกดูดกลืนพลังงาน หัววัดก็จะคำนวณหาปริมาณแสงที่เหลืออยู่จากนั้นก็จะ plot ค่าระหว่างปริมาณแสงที่ถูกส่งผ่านมา (%transmission) กับ wave number ซึ่งลักษณะ infrared spectrum ที่พบโดยทั่วไป spectrum ทั้งสองมี C-H stretching ปรากฏที่ประมาณ 3000 cm^{-1} และมี C=O stretching ที่ประมาณ 1700 cm^{-1} บริเวณที่เป็น functional group band (ช่วง $1500\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$) ของทั้ง 2 สเปกตรัมจะเหมือนกันและไม่ให้รายละเอียดทางโครงสร้างมากนัก ดังนั้น cyclopentanone และ cyclohexanone จึงมี spectra ที่มี functional group band เหมือนกันแต่จะต่างกันตรงบริเวณที่เป็น fingerprint band (ช่วง $700\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$) เท่านั้น บริเวณนี้จะเกิดจากการ stretching และ bending ของอะตอมในแต่ละสารซึ่งจะมีลักษณะที่จำเพาะของแต่ละสาร

2.8 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) เป็นสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ซึ่งแสดงความสามารถของวัสดุในการกักเก็บประจุไฟฟ้าไว้ได้บนพื้นผิวหรือในเนื้อวัสดุ ทดสอบโดยนำวัสดุนั้นไปวางไว้ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับวัสดุใดมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจะกักเก็บพลังงานไฟฟ้าได้สูง ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุต่อค่าความจุไฟฟ้าของอากาศ ตามสมการที่ 30

$$K = \frac{C'}{C_0} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (30)$$

เมื่อ K คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant)

C' คือค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุนั้น มีหน่วย ฟารัด (F)

C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของสุญญากาศ มีหน่วย ฟารัด (F)

ϵ คือ สภาพการซึมซับได้ทางไฟฟ้าของวัสดุ

ϵ_0 คือ สภาพการซึมซับได้ทางไฟฟ้าในอากาศมีค่า $(8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m})$

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ ก่อนและหลังการปรับปรุงวัสดุด้วยพลาสมา และไอออนบีมจากนั้นเปรียบเทียบกับผลของเทคนิคอิมพิแดนซ์สเปกโตรสโคปีและผลอื่นๆ

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 วัสดุ

1. เยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิด (Nafion® 324 EW1100, Du Pont de Nemours, Inc.)
2. ไคโตซาน (chitosan Mw ~400,000, seafresh)
3. กรดอะซิติก (Merck)
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Merck)
5. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Merck)
6. กรดซัลฟูริก (Merck)
7. โปแทสเซียมคลอไรด์ (Merck)
8. ลวดเงินบริสุทธิ์ 99.99% ($\phi=0.37\text{mm}$)
9. น้ำกลั่น
10. วาสลีน
11. กระดาษกรอง
12. อะคริลิกใสทรงกระบอกและสี่เหลี่ยม (PAN ASIA INDUSTRIAL CO.,LTD.)

3.2 อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งสารระบบดิจิทัล 2 และ 4 ตำแหน่ง (Mettler, AE200)
2. บีกเกอร์ขนาด 1,000 500 250 50 และ 25 มิลลิลิตร
3. แท่งแม่เหล็กขนาด 1.5×0.4 นิ้ว และ 13×8 มิลลิเมตร (BibbySterilin Ltd)
4. เครื่องกวนสาร (VelpScientifica)
5. ปีเปตขนาด 10 และ 50 มิลลิลิตร (HBG)
6. ออโตปีเปตขนาด 20-200 และ 100-1,000 ไมโครลิตร (Nichiryo)
7. กระบอกตวง ขนาด 10 25 50 100 250 มิลลิลิตร (Witeg)
8. ขวดวัดปริมาตร ขนาด 250 500 และ 1000 มิลลิลิตร (Pyrex)
9. ตู้อบ (Memmert, รุ่น Schutzart DIN 40050-1D)
10. ถาดสเตนเลส ขนาด 18×24 เซนติเมตร

11. กระจก หน้า 0.5 เซนติเมตร ขนาด 20 × 25 เซนติเมตร
12. ตะกร้า ขนาด 28×30 เซนติเมตร
13. เทอร์โมมิเตอร์
14. เครื่องกรองสารละลายด้วยความดัน
15. ไมโครมิเตอร์ (Mitutoyo, YAB 02-M)
16. ปากคีบ
17. ถังมือยาง
18. แท่งแก้ว
19. อุปกรณ์การตัดเยื่อบาง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.7 เซนติเมตร
20. งานเพาะเชื้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร
21. เครื่องตัดเยื่อบางเป็นรูปคัมเบล (Wallace test equipment)
22. เครื่องวัดความแข็งแรง (Lloyd instrument data analysis package)
23. ชุดอุปกรณ์วัดศักย์การแพร่ และ อิมพีแดนซ์
24. Calomel electrode ขนาด 12×120 มิลลิเมตร 1 คู่ แบบ single junction reference probes (ActiOn, รุ่น AE111)
25. มัลติมิเตอร์ (Fluke 87)
26. กระจกน็อคยา ขนาด 25 มิลลิเมตร
27. นาฬิกาจับเวลา (Casio, รุ่น HS-5)
28. เครื่องวัดสภาพน้ำไฟฟ้าของสารละลาย (WTW, รุ่น LF 318)
29. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOS JSM, Model 5800LV)
30. อุปกรณ์ทดสอบการกรองแบบปิดตาย (Dead End)
31. เครื่องกำเนิดพลาสมาโคโรนาดีสชาร์จที่ความดันบรรยากาศ
32. เครื่องวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (iRCT, รุ่น Agilent 16452A)
33. เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและพันธะด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (Bruker, รุ่น EQUINOX55 Fourier Transform Infrared Spectrometer)
34. ออสซิลโลสโคป (Tektronix, รุ่น 2245A 100MHz)
35. เครื่องขยายสัญญาณส่วนต่างทางไฟฟ้า (Department of Biophysics school of Physics, University of New South Wales)
36. เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Stanford Research Systems, Model DS340 15MHz)

3.3 วิธีดำเนินการ

3.3.1 การเตรียมเยื่อบางไคโตซานและ เยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิด

3.3.1.1 เยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิด

การเตรียมเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิด ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมจากแผ่นเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิด(Nafion N324, EW 1100) โดยถูกซื้อจาก Du Pont de Nemoursจากนั้นตัดเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดใส่ในบีกเกอร์แล้วนำไปต้มกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์(H_2O_2) 5% (□) ปริมาตร 250 มิลลิลิตรที่ 60 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมงเพื่อกำจัดออกแกนิคและไอออนอื่นๆบนผิวเยื่อบาง จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (DI) แล้วนำเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดใส่ในบีกเกอร์แล้วนำไปต้มกับกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 1M ที่ 60 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (DI) อีกครั้ง จากนั้นนำเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้ไปทำให้แห้งโดยนำไปอบที่ 100 องศาเซลเซียสนาน 24 ชั่วโมงเมื่อเสร็จขั้นตอนนี้แล้วสามารถนำเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดไปใช้งานได้ โดยเรียกว่า PSFA หรือ Nafion แสดงในรูปแบบที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผ่นเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิด(Nafion N324, EW 1100)

3.3.1.2 การเตรียมเยื่อบางไคโตซาน

การเตรียมเยื่อบางไคโตซานใช้วิธีการเปลี่ยนเฟส โดยการระเหยตัวทำละลายในสารละลายไคโตซานจนแห้ง ได้เยื่อบางไคโตซานที่ไม่มีรูพรุน ในงานวิจัยนี้ใช้ไคโตซานที่มีมวลโมเลกุล 400,000 มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดหมู่อะซิดิล 76 % เตรียมเยื่อบางไคโตซานโดยละลายไคโตซาน 7 กรัม ในกรดอะซิดิกเข้มข้น 1 % (□) ปริมาตร 700 มิลลิลิตร กวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 48 ชั่วโมงได้สารละลายไคโตซาน 1 % (w/□) กรองด้วยเครื่องกรองแบบอัดความดันโดยใช้ความดัน 50 psi เพื่อแยกส่วนที่ไม่ละลายออก วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 27 องศาเซลเซียสในที่ปลอดฝุ่นจนกระทั่งไม่มีฟองอากาศ เทสารละลายปริมาณ 200 มิลลิลิตร ลงในถาดสแตนเลสขนาด 18×24

เซนติเมตร นำไปอบที่ 43 องศาเซลเซียส นาน 120 ชั่วโมง นำเยื่อบางที่ได้ไปปรับสภาพให้เป็นกลาง โดยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 4%(w/v) ปริมาตร 200 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วล้างด้วยน้ำจืด น้ำล้างมีค่าพีเอช 7.6 วางเยื่อบางให้แห้งในที่ปลอดฝุ่นโดยวางกระดาษทับได้เยื่อบางไคโตซานเรียกว่า (CH, Chitosan) แสดงในรูปที่ 3.2



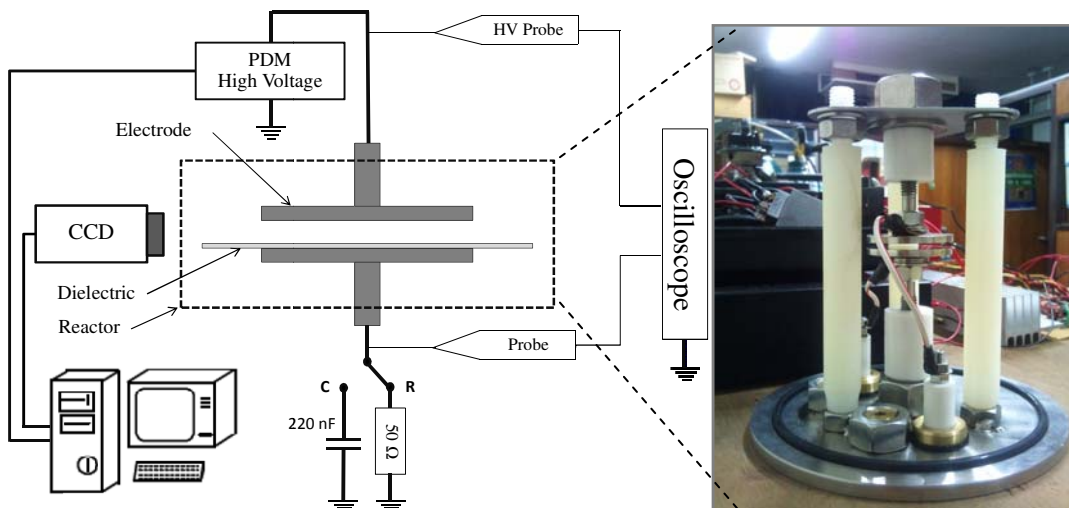
รูปที่ 3.2 แผ่นเยื่อบางไคโตซานที่มีมวลโมเลกุล 400,000

3.3.2 ปรับปรุงผิวเยื่อบางด้วยพลาสมาและไอออนบีม

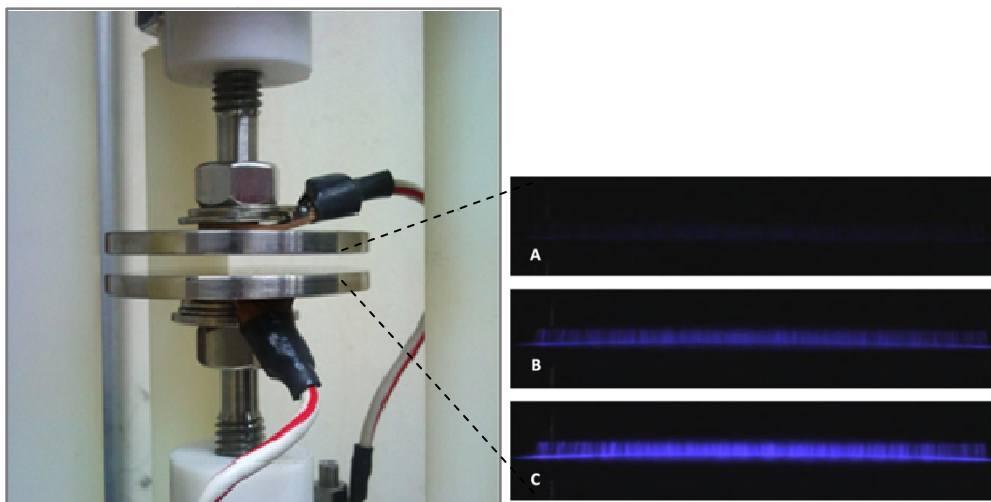
ในงานวิจัยนี้ใช้โคโรนาดีสชาร์จที่ความดันบรรยากาศในการปรับปรุงผิวเยื่อบางด้วยพลาสมา โดยการควบคุมกำลังของพลาสมาที่ใช้ของระบบพลาสมาจะใช้เทคนิคการควบคุมสัญญาณเปิดปิดของสวิตช์ไฟฟ้าแรงสูงเป็นช่วงๆ (Pulse-density-modulated-PDM) ซึ่งระบบนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ของนายอาหลิ คำหมั่น ซึ่งเทคนิคนี้สามารถควบคุมกำลังของพลาสมาที่ต้องการได้ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้กำลังของพลาสมาที่มีกำลังต่ำๆ ในการปรับปรุงเยื่อบางๆ เนื่องจากกำลังของพลาสมาที่มีกำลังสูงๆ จะไปทำให้เยื่อบางเสียหาย

ในการอบพลาสมาเยื่อบางทำโดยวางแผ่นเยื่อบางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5cm บนขั้วอิเล็กโทรดด้านล่างของชุดกำเนิดพลาสมา จากนั้นควบคุมกำลังของพลาสมาของระบบพลาสมาตามที่ต้องการ โดยต้องการกำลังของพลาสมาต่ำๆ โดยอุปกรณ์กำเนิดพลาสมาดีสชาร์จที่ความดันบรรยากาศและขนาดกำลังของพลาสมาต่างๆ ที่ควบคุมด้วยเทคนิค Pulse-density-modulated (PDM) ได้แสดงในรูปที่ 3.3 และ 3.4 โดยระบบพลาสมานี้มีความหนาของไดอิเล็กทริกที่ทำจากเทปลอนหนา 2 มิลลิเมตร มี Gas Gap 2 มิลลิเมตร และใช้ความดันและแก๊สที่บรรยากาศปกติ

โดยการควบคุมกำลังพลาสมาด้วย PDM จะสามารถเปลี่ยนแปลงกำลังของพลาสมาในช่วง 1-32 วัตต์ โดยใช้ความถี่ 10 kHz และ ศักย์ไฟฟ้า 15 kV



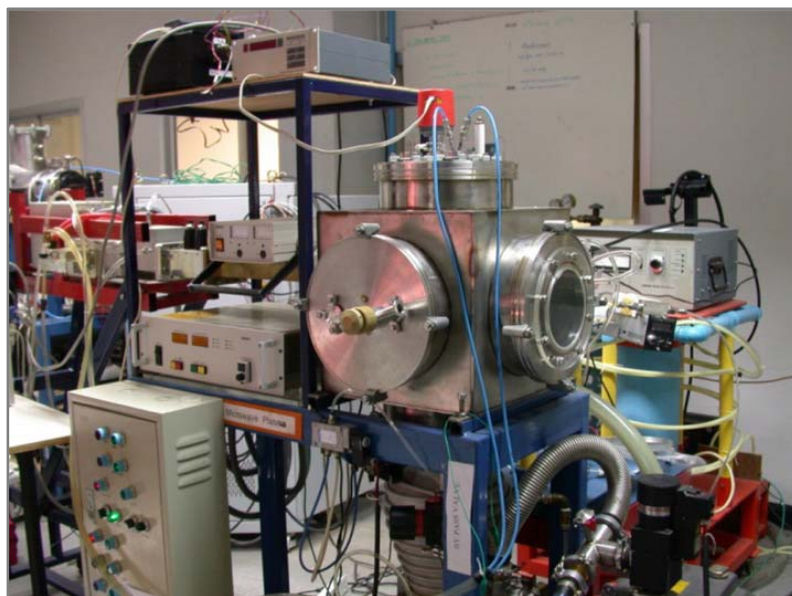
รูปที่ 3.3 แสดงไดอะแกรมของชุดอุปกรณ์กำเนิดพลาสมาอิสระที่ความดันบรรยากาศ



รูปที่ 3.4 ขนาดกำลังของพลาสมาต่างๆที่ควบคุมด้วยเทคนิคPulse-density-modulated(PDM)

ในส่วนการปรับปรุงผิวเยื่อบางใคโตซานด้วยไอออนบีมในงานวิจัยนี้ใช้อาร์กอน ไอออนจากก๊าซอาร์กอนในการปรับปรุงผิวเยื่อบาง โดยอุปกรณ์กำเนิดไอออนบีมได้ความร่วมมือ

จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ในการปรับปรุงผิวเยื่อบางโคโตซานจากไอออนบีม โดยความดันที่ใช้ภายในเป็น 10^{-4} ปาสคาล และมีช่วงของความหนาแน่นของไอออนอยู่ในช่วง $(1.5-14.0) \times 10^{14}$ ions/cm² โดยไอออนบีมที่ใช้มาจากระบบพลาสมาที่ใช้ความถี่ย่านไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ซึ่งไอออนจะมีพลังงาน 7.5 keV ในการใช้งานในการปรับปรุงผิวและ แหล่งกำเนิดไอออนถูกสร้างจากเครื่องกำเนิดที่ความถี่ 13.56 MHz แสดงในรูปที่ 3.5



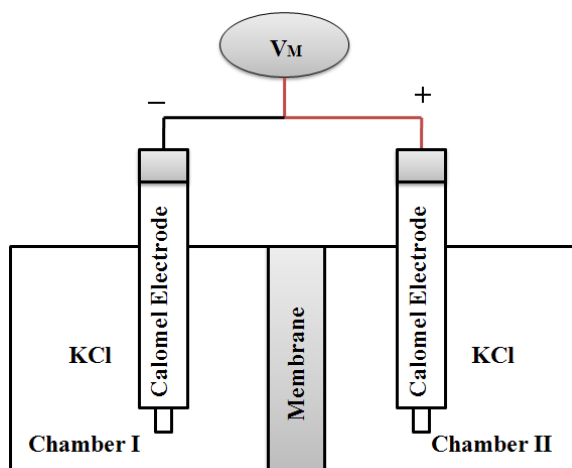
รูปที่ 3.5 ระบบไอออนบีมที่ใช้ความถี่ย่านไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ของความหนาแน่นของไอออนอยู่ในช่วง ions/cm² [Prakrajang, (2011)]

3.3.3 ศึกษาคุณลักษณะของเยื่อบาง

3.3.3.1 การวัดศักย์การแพร่ของเยื่อบาง

ตัดเยื่อบางโคโตซานเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร จัดเยื่อบางซึ่งแช่ในน้ำกลั่นจนเยื่อบางบวมน้ำสูงสุดในชุดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.6 ซึ่งเป็นชุดอุปกรณ์แบบ two chamber system โดยให้ด้านหน้าของเยื่อบางสัมผัสสารละลายด้าน C₁ ซึ่งเติมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์เข้มข้น 100 mM และคงความเข้มข้นนี้ตลอดการทดลอง ส่วนด้าน C₂ เติมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.01 mM ใส่ calomel electrode ทั้งสองด้านของชุดทดสอบจนสารละลายทั้งสองด้านอย่างสม่ำเสมอเป็นเวลา 90 วินาที บันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายด้าน C₂ เป็น 0.01, 0.1, 1, 10 และ 100 mM ตามลำดับเขียนกราฟระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าของเยื่อบางโคโตซานกับความเข้มข้นของสารละลาย

โพแทสเซียมคลอไรด์ด้าน C_{II} และคำนวณค่าอัตราส่วนสภาพซึมซ่านได้ของไอออนผ่านเยื่อบาง (B) และ (α) ตามสมการของ Goldman (สมการที่ 27 ในบทที่ 2)



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์วัดศักย์การแพร่ของเยื่อบาง

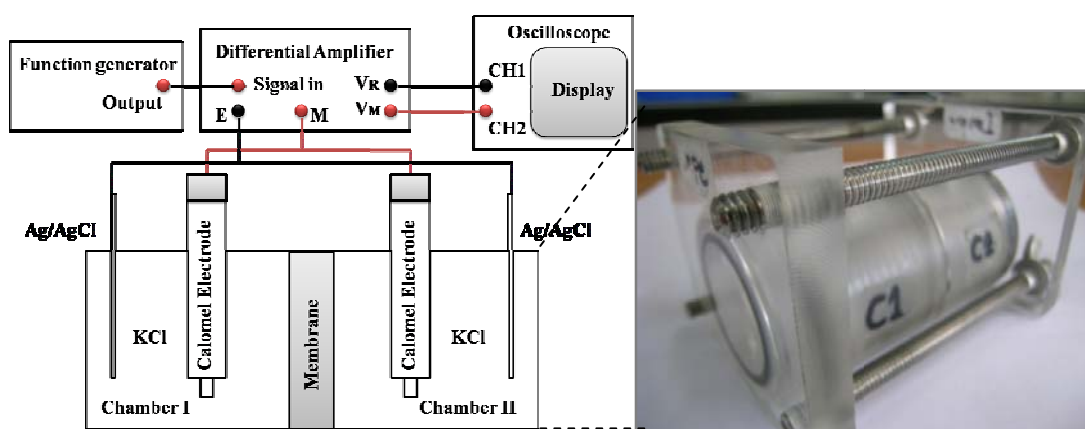
3.3.3.2 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ความนำไฟฟ้า (G_{eff}) และความจุไฟฟ้า (C_{eff}) ของเยื่อบาง

การทดลองนี้ทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ความนำไฟฟ้า (G_{eff}) และความจุไฟฟ้า (C_{eff}) ของเยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งอุปกรณ์การวัดของเทคนิคอิมพีแดนซ์ประกอบด้วย Differential Amplifier, Oscilloscope และ Function Generator แสดงในรูปที่ 3.7 โดยจัดเยื่อบางลงในชุดอุปกรณ์ที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าไม่ได้และที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 โดยชุดอุปกรณ์ที่มีการปรับปรุงการวัดตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าจะอยู่แนบกับแผ่นเยื่อบางด้วยเพื่อให้ได้ค่าที่วัดได้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้นเมื่อเทียบกับระบบเก่าที่มีการวางตำแหน่งขั้วไฟฟ้าอยู่ห่างจากตัวเยื่อบางมากด้วยเหตุนี้จากบทที่ 3 ในส่วนทฤษฎีอิมพีแดนซ์ (Z) ของเยื่อบางจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ในส่วนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพิ่มมากขึ้นตามระยะความห่างของขั้วไฟฟ้ากับเยื่อบางทำให้ค่าที่วัดได้ถูกรบกวนด้วยเหตุนี้จึงได้มีการปรับปรุงระบบวัดในส่วนการทดลองโดยเริ่มจากการเติมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 mM ลงในช่องทั้งสองด้านของเยื่อบาง ต่อปลายทั้งสองของ calomel electrode (Hg_2Cl_2) เข้ากับ Differential Amplifier เพื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเยื่อบางในสารละลายดังกล่าว โดยมีตัวต้านทาน ($R=12k\Omega$) ต่ออนุกรมกับระบบเพื่อวัดกระแสจ่ายสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ระหว่าง 0.1–300 kHz. จาก Function Generator ให้แก่ระบบ โดยผ่าน $Ag/AgCl$ แล้ววัดค่าศักย์ไฟฟ้า V_R, V_m และผลต่างมุมเฟส

($\Delta\phi$) ระหว่างศักย์ไฟฟ้าทั้งสองจากช่องสัญญาณที่ 1 และช่องสัญญาณที่ 2 ของออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

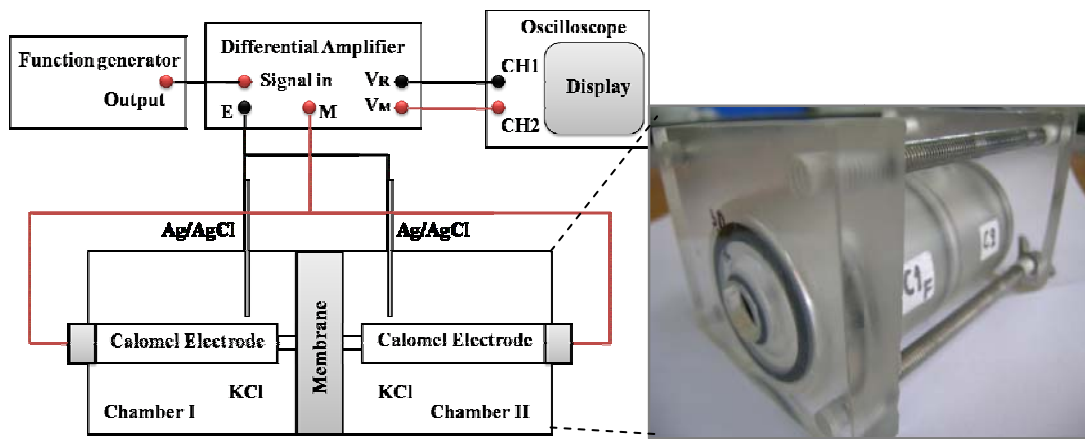


รูปที่ 3.7 อุปกรณ์การวัดค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ที่ประกอบด้วย Differential Amplifier, Oscilloscope และ Function Generator



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ทดลองที่บรรจุเยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อวัดค่าอิมพีแดนซ์ (Z) สภาพนำไฟฟ้า (G_{eff}) และความจุทางไฟฟ้า (C_{eff}) ของเยื่อบาง โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับที่เปลี่ยนตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าไม่ได้

คำนวณค่าอิมพีแดนซ์(Z) สภาพนำไฟฟ้า (G_{eff}) และความจุทางไฟฟ้า (C_{eff}) ของเยื่อบางไคโตซาน นำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Z , G_{eff} , C_{eff} กับความถี่ (f) ของสัญญาณป้อน ซึ่งค่าทั้งสามได้จากความสัมพันธ์ของสมการในทฤษฎีอิมพีแดนซ์ของเยื่อบางในบทที่ 3 จากนั้นเมื่อได้ค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ค่าความนำไฟฟ้า (G_{eff}) และค่าความจุไฟฟ้า (C_{eff}) ก็จะถูกแสดงผลในรูปแบบของ Nyquist plots ซึ่งประมวลผลมาจากโปรแกรม SCI LAB เวอร์ชัน 5.1



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ทดลองที่บรรจุเยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อวัดค่าอิมพีแดนซ์(Z) สภาพนำไฟฟ้า (G_{eff}) และความจุทางไฟฟ้า (C_{eff}) ของเยื่อบาง โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับที่เปลี่ยนตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าได้

3.3.3.3 การศึกษาโครงสร้างและพันธะของเยื่อบาง ด้วยเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (FT-IR)

เยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิด (Nafion N324, EW 1100) ที่ได้รับและไม่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมา และแผ่นเยื่อบางไคโตซาน ที่ได้รับและไม่ได้รับการปรับปรุงด้วยไอออนบีม โดยเยื่อบางทั้งสองชนิดจะถูกศึกษาและเปรียบเทียบโครงสร้างและพันธะของเยื่อบางด้วยเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (FT-IR) โดยตัวอย่างทั้งหมดจะถูกตัดเป็นชิ้นขนาด 1x1 ตารางเซนติเมตรและตรวจสอบจากเครื่อง FT-IR จากบริษัท Bruker FT-IR รุ่น EQUINOX55 Fourier Transform Infrared Spectrometer ประเทศเยอรมัน จากนั้นผลของตัวอย่างจะถูกวิเคราะห์และเปรียบเทียบ

3.3.3.4 การศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเยื่อบาง

การศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะศึกษาและเปรียบเทียบจากเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิคแอซิด(Nafion N324, EW 1100)ที่ได้รับและไม่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสติก และ แผ่นเยื่อบางไคโตซาน ที่ได้รับและไม่ได้รับการปรับปรุงด้วยไอออนบีม โดยเยื่อบางทั้งสองชนิดที่ได้รับและไม่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสติกและไอออนบีมจะถูกตัดเป็นชิ้นขนาด 1x1 ตารางเซนติเมตร และวัดด้วยเครื่องตรวจวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจากบริษัทiRCTรุ่น Agilent 16452A ประเทศสหรัฐอเมริกา จากนั้นผลของตัวอย่างจะถูกวิเคราะห์และเปรียบเทียบ

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผล

ในบทนี้ได้นำเสนอผลและการอภิปรายผลของเยื่อบางไคโตซานและเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่มีการปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคทางไอออนบีมและพลาสมา ด้วยการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคต่างๆของเยื่อบางไคโตซานและเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิด นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าในการวัดของเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีในที่นี้ด้วย

4.1 การวิเคราะห์เยื่อบางไคโตซานที่มีการปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีเพื่อวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบางด้วยความสัมพันธ์กับความถี่จากสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ โดยสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้กับเยื่อบางมีขนาด 2 โวลต์จากแหล่งจ่าย และใช้ช่วงของความถี่ของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับในช่วง 0.1-300kHz โดยเยื่อบางไคโตซานที่เตรียมมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 400,000 MW และมีการกำจัดหมู่อะซิดเป็น 78% (DDA) โดยเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุมมีความหนา 0.048 มิลลิเมตร และใช้เยื่อบางไคโตซานนี้ในการปรับปรุงผิวจากอาร์กอนไอออนบีม โดยการปรับปรุงด้วยไอออนบีมจะไปทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าและโครงสร้างของเยื่อบางมีการเปลี่ยนแปลงโดยสามารถเพิ่มการแพร่ของไอออนผ่านเยื่อบาง หรือ เพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนผ่านเยื่อบางได้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประจุที่ผิวและ โครงสร้างที่เปลี่ยนไปของเยื่อบางจากไอออนบีมที่ใช้ และ เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของเยื่อบางไคโตซานให้ดีขึ้นและนำไปใช้แทนเยื่อบางทางการค้าที่มีราคาแพงโดยอาร์กอนไอออนบีมที่ใช้ปรับปรุงผิวเยื่อบางครั้งนี้มีพลังงาน 120 keV ซึ่งคุณสมบัติทางไฟฟ้าและโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงของเยื่อบางจะถูกวิเคราะห์และเปรียบเทียบกันสำหรับเยื่อบางทางการค้า (Nafion[®] N324 หรือเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิด) ซึ่งมีความหนา 0.275 มิลลิเมตรกับเยื่อบางไคโตซานหลังการปรับปรุงผิวจากอาร์กอนไอออนบีมและเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุมในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ในช่วงความเข้มข้น 0.1-10 mM ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาในส่วนของประสิทธิภาพการแยกและแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อบางไคโตซานที่ได้รับการปรับปรุงผิวจากอาร์กอนไอออนบีมกับชุด

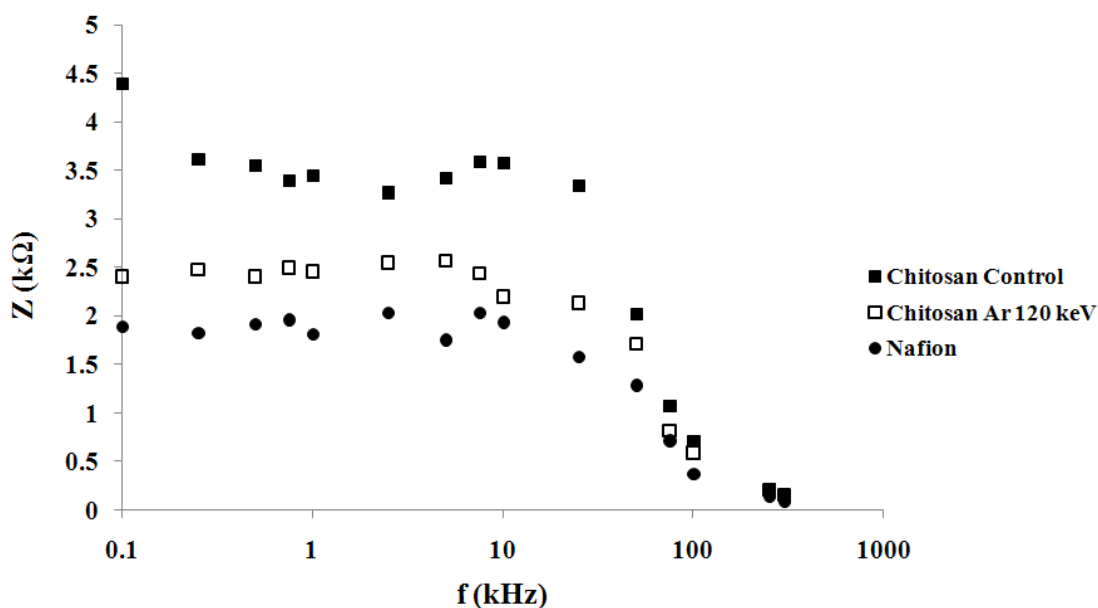
ควบคุมและเปรียบเทียบกับเยื่อบางทางการค้า (Nafion) โดยใช้เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีผลในเบื้องต้นที่ได้แสดงให้เห็นว่าขนาดอิมพีแดนซ์ของเยื่อบางไคโตซานที่ได้รับการปรับปรุงและชุดควบคุมเป็น 2.44 และ 3.68 กิโลโอห์ม ตามลำดับ ในส่วนของค่าความนำประจุไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางไคโตซานที่ได้รับการปรับปรุงมีขนาดมากกว่าเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุม นอกจากนี้ผลที่ได้เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและโครงสร้างของเยื่อบางจากเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี สักยภาพพร่องของเยื่อบาง ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ ATR-FTIR เปรียบเทียบยืนยันว่าการปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมส่งผลทำให้มวลโมเลกุลของไคโตซานลดลงและมีการเพิ่มขึ้นของประจุบริเวณพื้นผิวของเยื่อบางเนื่องจากอาร์กอนไอออน (Ar^+) ที่มาจากไอออนบีม ซึ่งสาเหตุเหล่านี้ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการแพร่และแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อบางหลังปรับปรุงด้วยอาร์กอนไอออนบีมซึ่งผลที่ได้ทั้งหมดมีความสอดคล้องกัน และสำหรับผลที่ได้จากเยื่อบางไคโตซานที่ได้รับการปรับปรุงได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับเยื่อบางทางการค้า ซึ่งเป็นเยื่อบางแลกเปลี่ยนประจุบวก และถูกพบว่าเยื่อบางทางการค้าให้ผลที่ดีกว่าเยื่อบางไคโตซานที่ได้รับการปรับปรุงในส่วนของ ค่าความนำประจุไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุไฟฟ้าอยู่ 20% ทุกความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์โดยรายละเอียดของผลทดสอบได้แสดงดังต่อไปนี้

4.1.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) 1 mM

(4.1.1.1) อิมพีแดนซ์ของเยื่อบาง(Z)

ในการศึกษาอิมพีแดนซ์ (Z) ของเยื่อบางไคโตซาน (Chitosan Control) ซึ่งผลได้ถูกเปรียบเทียบกับเยื่อบางไคโตซานที่ปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีม (Chitosan Ar 120 keV) และเปรียบเทียบกับเยื่อบางทางการค้า (Nafion[®] N324 หรือเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิด) แสดงในรูปที่ 4.1 โดยเยื่อบางที่ใช้ในการทดสอบจะถูกทดสอบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) ที่มีความเข้มข้น 1mM เท่ากันทั้งสองด้านของเยื่อบาง และใช้ศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับในการเหนี่ยวนำไอออนให้แพร่ผ่านเยื่อบางจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งเพื่อศึกษาคุณสมบัติของเยื่อบางด้วยค่าอิมพีแดนซ์ จากรูปที่ 4.1 แสดงอิมพีแดนซ์ของเยื่อบางที่มีการเปลี่ยนแปลงของความถี่ในช่วง 0.1-300 kHz เมื่อพิจารณาอิมพีแดนซ์ในช่วงที่ความถี่สูงๆ สังเกตว่าค่าอิมพีแดนซ์จะมีขนาดลดลงมากซึ่งเป็นคุณลักษณะของเยื่อบาง โดยเป็นไปตามในสมการที่ 14 ซึ่งได้อธิบายไว้บทที่ 2 และจากเสปคตรัมของอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ 0.1-1 kHz ซึ่งเป็นช่วงอิมพีแดนซ์ที่คงที่แสดงให้เห็นว่าเยื่อบางไคโตซานที่ปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมมีขนาดอิมพีแดนซ์เป็น 2.44 กิโลโอห์ม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุมที่มีขนาดของ

อิมพีแดนซ์เป็น 3.68 กิโลโอห์ม จากผลนี้ได้ชี้ให้เห็นว่าการปรับปรุงผิวด้วยไอออนจะส่งผลให้ขนาดของอิมพีแดนซ์มีค่าลดลงนั้นหมายความว่ามีความต้านทานลดลงทำให้เยื่อขางนั้นสามารถแยกและแลกเปลี่ยนให้ไอออนผ่านได้มากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประจุที่ผิวของเยื่อขางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ อย่างไรก็ตามขนาดของอิมพีแดนซ์หรือความต้านทานการถ่ายโอนไอออนของเยื่อขางไคโตซานทั้งคู่ก็มีขนาดมากกว่าขนาดอิมพีแดนซ์ของเยื่อขางทางการค้า (Nafion® N324 หรือเยื่อขางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิด) ซึ่งมีค่า 1.88 กิโลโอห์ม

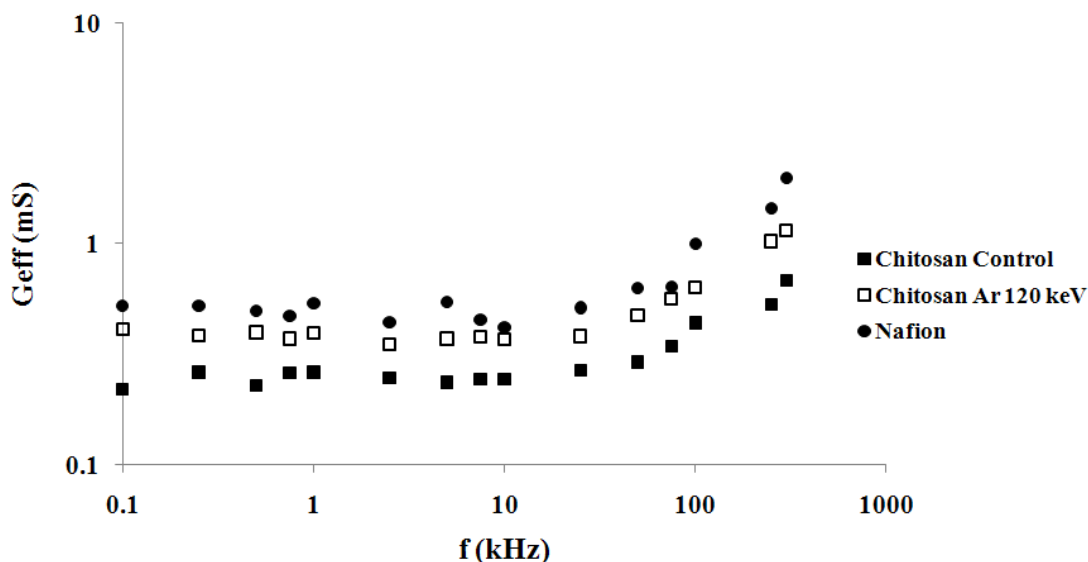


รูปที่ 4.1 อิมพีแดนซ์ของเยื่อขาง (Z) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 1mM

(4.1.1.2) ค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อขาง (G_{eff})

จากรูปที่ 4.2 แสดงค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อขางไคโตซานซึ่งผลได้ถูกเปรียบเทียบกับเยื่อขางไคโตซานที่ปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมและเปรียบเทียบกับเยื่อขางทางการค้า (Nafion® N324 หรือเยื่อขางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิด) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 1mM โดยเมื่อพิจารณาค่าความนำประจุไฟฟ้าที่ความถี่สูงๆ สังเกตว่าค่าความนำประจุไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นมากซึ่งเป็นคุณลักษณะของเยื่อขางซึ่งเป็นไปตามในสมการที่ 21 ที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 และ เมื่อพิจารณาในช่วงความถี่ 0.1-1 kHz แสดงให้เห็นว่าเยื่อขางไคโตซานที่ปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมมีค่าความนำประจุไฟฟ้าเป็น 0.391 mS ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อขางไคโตซานชุดควบคุมที่มีค่าเป็น 0.246 mS แต่ค่า

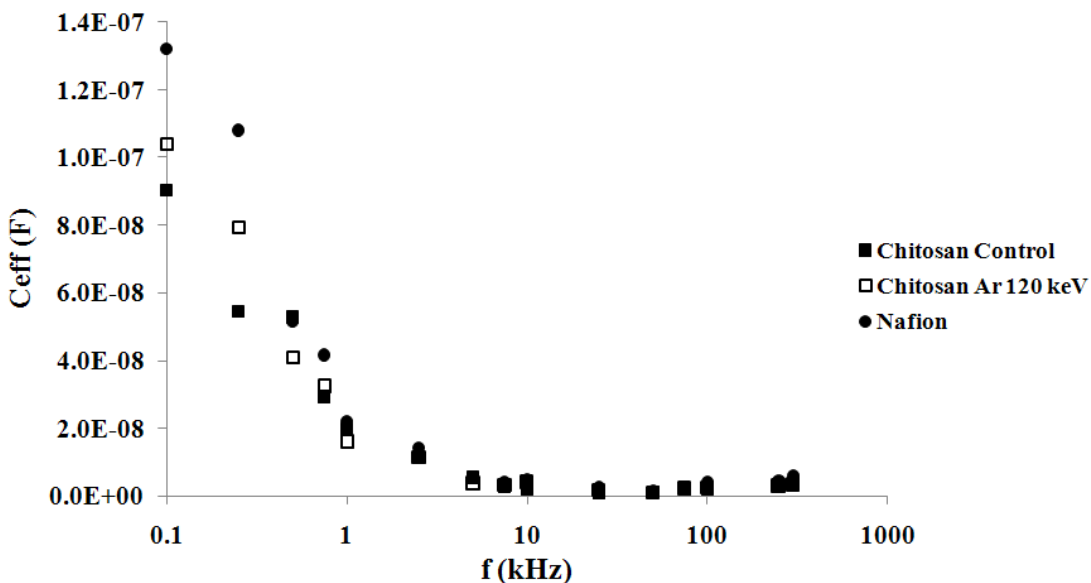
ความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบางไคโตซานทั้งคู่ก็ยิ่งน้อยกว่าเยื่อบางทางการค้าซึ่งมีค่า 0.509 mS จากผลนี้ได้ชี้ให้เห็นว่าการปรับปรุงผิวด้วยไอออนทำให้เยื่อบางมีค่าความนำประจุไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีการเพิ่มขึ้นของไอออนที่ผิวเยื่อบาง



รูปที่ 4.2 ค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบาง (G_{eff}) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 1mM

(4.1.1.3) ค่าการเก็บประจุของเยื่อบาง (C_{eff})

ผลของค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุมกับเยื่อบางไคโตซานที่ปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมและเยื่อบางทางการค้า (Nafion® N324 หรือเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิคแอซิด) ซึ่งได้ถูกแสดงและเปรียบเทียบในรูปที่ 4.3 เมื่อพิจารณาค่าการเก็บประจุไฟฟ้าที่ความถี่สูงๆ จะมีผลคล้ายกับผลของอิมพีแดนซ์ นั่นคือค่าการเก็บประจุไฟฟ้ามีค่าลดลงซึ่งเป็นคุณลักษณะของเยื่อบางซึ่งเป็นไปตามในสมการที่ 22 ที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 เช่นกันและ เมื่อพิจารณาจากกราฟก็แสดงให้เห็นว่าเยื่อบางไคโตซานที่ปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมมีค่าการเก็บประจุไฟฟ้าเป็น $5.46 \times 10^{-2} \mu\text{F}$ ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุมที่มีค่าเป็น $4.92 \times 10^{-2} \mu\text{F}$ จากผลนี้ได้ชี้ให้เห็นว่าการปรับปรุงผิวด้วยไอออนทำให้จำนวนของแคตไอออนบริเวณผิวของเยื่อบางนั้นเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าการเก็บประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางไคโตซานทั้งคู่ก็มีค่าน้อยกว่าค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางทางการค้าซึ่งมีค่า $7.09 \times 10^{-2} \mu\text{F}$ ซึ่งคิดว่ประมาณ 20%



รูปที่ 4.3 ค่าการเก็บประจุของเยื่อบาง (C_{eff}) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 1mM

ค่าอิมพีแดนซ์ค่าความนำประจุไฟฟ้า และ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า ของเยื่อบางที่ทดสอบทั้งสามชนิดได้ถูกแสดงและเปรียบเทียบในตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเยื่อบางไคโตซานที่ปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมมีประสิทธิภาพมากกว่าเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุม เนื่องจากอาร์กอนไอออนที่ใช้ในการปรับปรุงผิวมีผลต่อการเพิ่มไอออนบวกบนพื้นผิวของเยื่อบาง ด้วยเหตุผลนี้เยื่อบางจึงมีประสิทธิภาพของอัตราการแพร่และแลกเปลี่ยนไอออนผ่านเยื่อบางได้มากขึ้นและส่งผลให้ค่าความนำประจุไฟฟ้า และ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วยอย่างไรก็ตามคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบางไคโตซานที่ปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนก็ยังดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อบางทางการค้า

ตารางที่ 4.1: ค่าอิมพีแดนซ์ ค่าความนำประจุไฟฟ้า และ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางทั้งสามชนิดในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 1mM

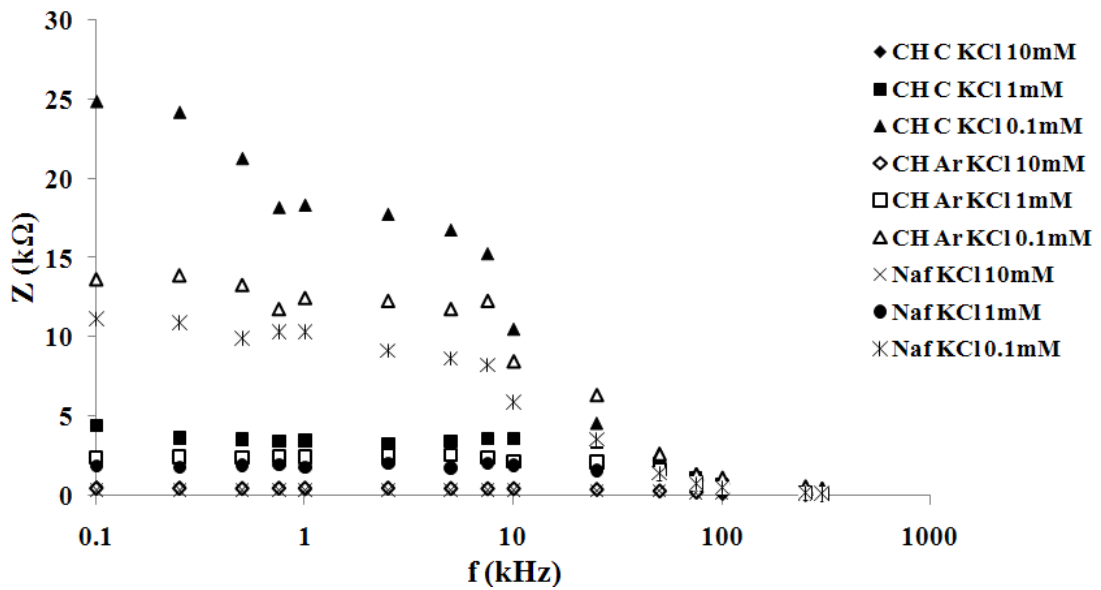
Membranes	Impedance	Ionic Conductance	Capacitance
Ar-ion beams treated chitosan 120keV	2.44 kΩ	0.391 mS	5.46×10^{-8} F
Chitosan control	3.68 kΩ	0.246 mS	4.92×10^{-8} F
Nafion [®]	1.88 kΩ	0.509 mS	7.09×10^{-8} F

4.1.2 อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) ที่มีผลต่อคุณสมบัติของเยื่อบาง

ในหัวข้อนี้ได้ใช้เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีในการศึกษาอิทธิพลของขนาดความเข้มข้นต่างๆของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบางโพลีเอทานอลที่ปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีม กับ เยื่อบางโพลีเอทานอลชุบควมคุม และ เยื่อบางทางการค้า(Nafion® N324 หรือเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟเนติกแอซิด) โดยผลที่ได้จะถูกรวบรวมและเปรียบเทียบจากค่าอิมพีแดนซ์ค่าความนำประจุไฟฟ้า และ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า ที่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl)ที่ 0.1mM, 1mM และ 10mM

(4.1.2.1) อิมพีแดนซ์ของเยื่อบาง(Z)

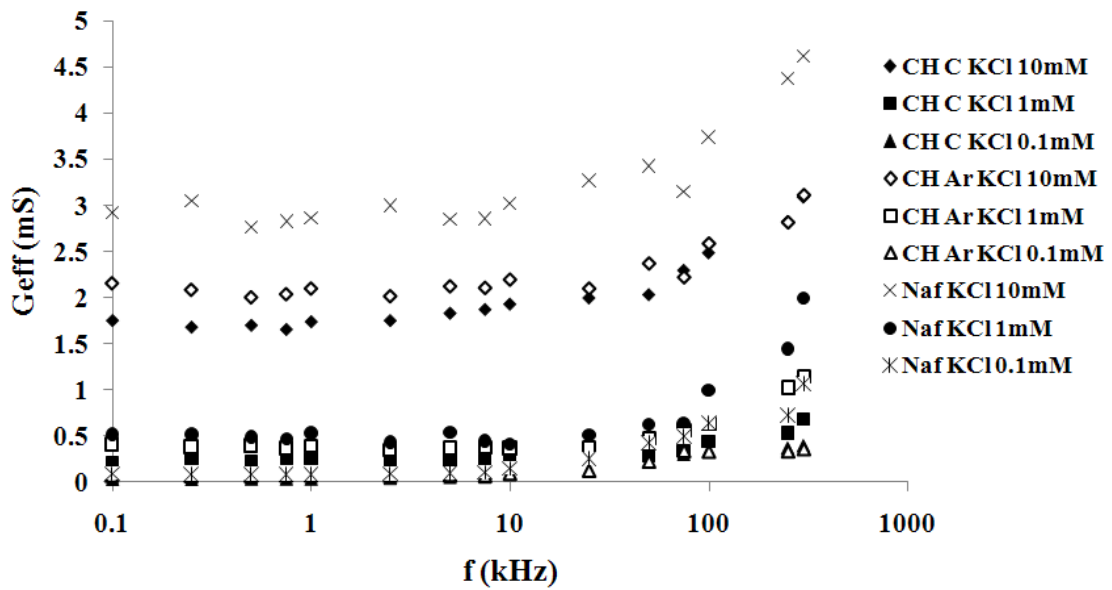
จากรูปที่4.4 แสดง อิมพีแดนซ์ของเยื่อบางทั้งสามชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) คือ 0.1mM, 1mM และ 10mM ในช่วงความถี่ 0.1-300 kHzโดยเสปคตรัมของอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ 0.1-1 kHz แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์มีขนาดของอิมพีแดนซ์ของเยื่อบางโพลีเอทานอลชุบควมคุม (CH C KCl 10mM) เยื่อบางโพลีเอทานอลที่ปรับปรุงผิวด้วยไอออนบีม(CH ArKCl 10mM) และเยื่อบางทางการค้า(NafKCl 10mM) น้อยกว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) ที่ 1mM (CH C KCl 1mM, CH ArKCl 1mM, NafKCl 1mM) และ ที่ 0.1 mM(CH C KCl 0.1 mM, CH ArKCl 0.1mM, NafKCl 0.1mM) ตามลำดับของเยื่อบางทั้งสามชนิดยกตัวอย่างของผลทดสอบ เช่น ขนาดอิมพีแดนซ์ของเยื่อบางทางการค้าที่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl)10mM มีค่าเป็น 0.51 กิโลโอห์มที่ความเข้มข้น 1mM มีค่าเป็น1.88 กิโลโอห์มและ ที่ความเข้มข้น 0.1mM มีค่าเป็น10.56 กิโลโอห์มจากผลนี้ได้ชี้ให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์มากๆจะทำให้ขนาดของอิมพีแดนซ์ของเยื่อบางมีค่าลดลง เนื่องจากที่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์มากๆแสดงว่ามีจำนวนไอออนมากตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้เยื่อบางจึงมีอัตราการแลกเปลี่ยนและการแพร่ของไอออนผ่านเยื่อบางได้มากขึ้น ทำให้ขนาดของอิมพีแดนซ์หรือความต้านทานการถ่ายโอนไอออนของเยื่อบางมีขนาดลดลงนอกจากนี้ผลทดสอบนี้ได้แสดงให้เห็นว่าเยื่อบางโพลีเอทานอลที่ปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมมีขนาดของอิมพีแดนซ์น้อยกว่าเยื่อบางโพลีเอทานอลชุบควมคุม โดยที่เยื่อบางทั้งสองชนิดก็ยังมีขนาดของอิมพีแดนซ์มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อบางทางการค้าทุกความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 4.4 อิมพีแดนซ์ของเยื่อบาง (Z) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้นที่ 0.1mM, 1mM และ 10mM

(4.1.2.2) ค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบาง (G_{cp})

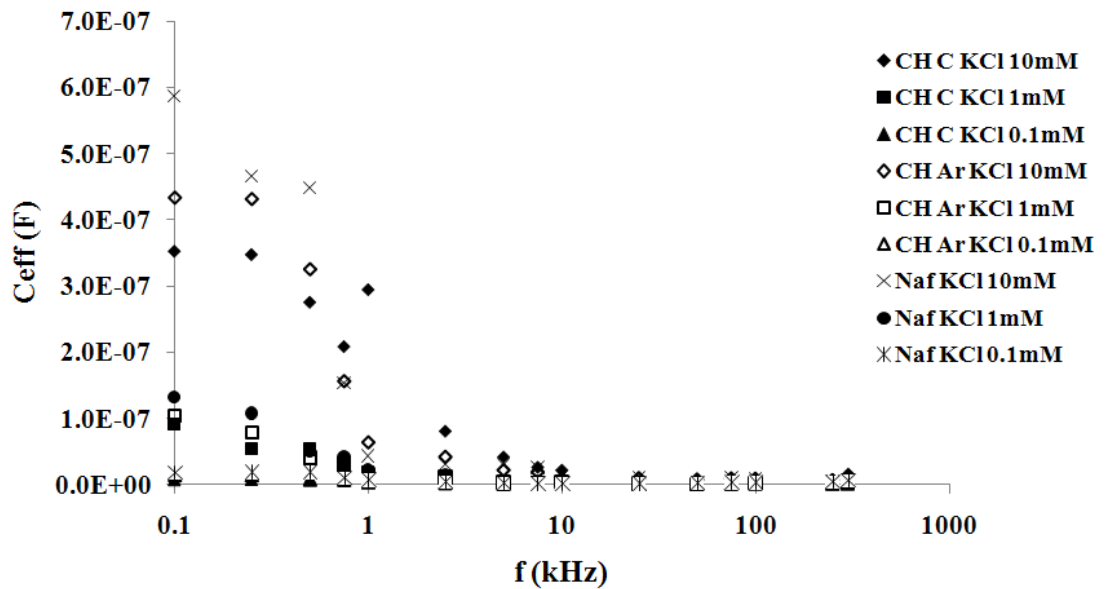
ผลของค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบางทั้งสามชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) คือ 0.1mM, 1mM และ 10mM ในช่วงความถี่ 0.1-300 kHz แสดงในรูปที่ 4.5 โดยสรุปคร่าวๆ ของความนำประจุไฟฟ้าในช่วงความถี่ 0.1-1 kHz แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่ 10mM มีค่าความนำประจุไฟฟ้ามากกว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่ 1mM และ ที่ 0.1 mM ตามลำดับของเยื่อบางทั้งสามชนิด ในที่นี้ขอยกตัวอย่างของผลทดสอบ จากค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบางโพลีเอทิลีนที่ปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีม ที่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) 10mM มีค่าเป็น 2.075 mS ซึ่งมากกว่าที่ความเข้มข้น 1mM ซึ่งมีค่าเป็น 0.391 mS และ ที่ความเข้มข้น 0.1mM ซึ่งมีค่าเป็น 0.074 mS ตามลำดับซึ่งจากผลนี้ได้ชี้ให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) มากๆ จะส่งผลให้ค่าความนำประจุไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยซึ่งให้ผลไปในทางเดียวกันกับค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งได้กล่าวไปแล้ว และ ผลทดสอบนี้ยังได้แสดงให้เห็นว่าเยื่อบางโพลีเอทิลีนที่ปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมมีค่าความนำประจุไฟฟ้าดีกว่าเยื่อบางโพลีเอทิลีนหุ้ดควบคุม โดยที่เยื่อบางทั้งสองชนิดก็ยังมีค่าความนำประจุไฟฟ้าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อบางทางการค้าทุกความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 4.5 ค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบาง (G_{eff}) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้นที่ 0.1mM, 1mM และ 10mM

(4.1.2.3) ค่าการเก็บประจุของเยื่อบาง (C_{eff})

จากรูปที่ 4.6 แสดงค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางทั้งสามชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) คือ 0.1mM, 1mM และ 10mM ในช่วงความถี่ 0.1-300 kHz ให้ผลในแนวโน้มเดียวกันกับค่าความนำประจุไฟฟ้า โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่ 10mM มีค่าการเก็บประจุไฟฟ้ามากกว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่ 1mM และที่ 0.1 mM ตามลำดับของเยื่อบางทั้งสามชนิด ตัวอย่างของผลทดสอบ เช่น ค่าการเก็บประจุของเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุมที่ความเข้มข้น 10mM มีค่าเป็น 2.29×10^{-7} F ซึ่งมากกว่าที่ความเข้มข้น 1mM ซึ่งมีค่าเป็น 4.92×10^{-8} F และ ที่ความเข้มข้น 0.1mM ซึ่งมีค่าเป็น 7.96×10^{-9} F ตามลำดับซึ่งจากผลนี้ได้ชี้ให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์มาก ๆ จะส่งผลให้จำนวนไอออนบริเวณผิวเยื่อบางที่จะแพร่ผ่านเยื่อบางมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าการเก็บประจุของเยื่อบาง (C_{eff}) เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย และนอกจากนี้ผลของค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางไคโตซานที่ปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมมีค่าการเก็บประจุไฟฟ้าดีกว่าเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุม โดยที่เยื่อบางทั้งสองชนิดก็ยังมีค่าการเก็บประจุไฟฟ้าดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อบางทางการค้าทุกความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 4.6 ค่าการเก็บประจุของเยื่อบาง (C_{eff}) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้นที่ 0.1mM, 1mM และ 10mM

จากการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์ค่าความนำประจุไฟฟ้า และ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางที่ทดสอบทั้งสามในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้นที่ 0.1mM, 1mM และ 10mM ได้ถูกแสดงและเปรียบเทียบในตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเยื่อบางไคโตซานที่ปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมมีประสิทธิภาพมากกว่าเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุมทุกความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และได้อธิบายสาเหตุไปก่อนหน้านี้แล้ว อย่างไรก็ตามคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบางไคโตซานที่ปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนก็ยังคงดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อบางทางการค้าและ จากผลนี้ได้ชี้ให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์มากๆ จะส่งผลให้จำนวนไอออนเพิ่มมากขึ้น ด้วยเหตุนี้เยื่อบางจึงมีอัตราการแลกเปลี่ยนและการแพร่ของไอออนผ่านเยื่อบางได้มากขึ้น ทำให้ค่าความนำประจุไฟฟ้า และ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และความต้านทานมีขนาดลดลงซึ่งผลทดสอบนี้ได้สอดคล้องกับผลทดสอบของ Park และ คณะ, 2005

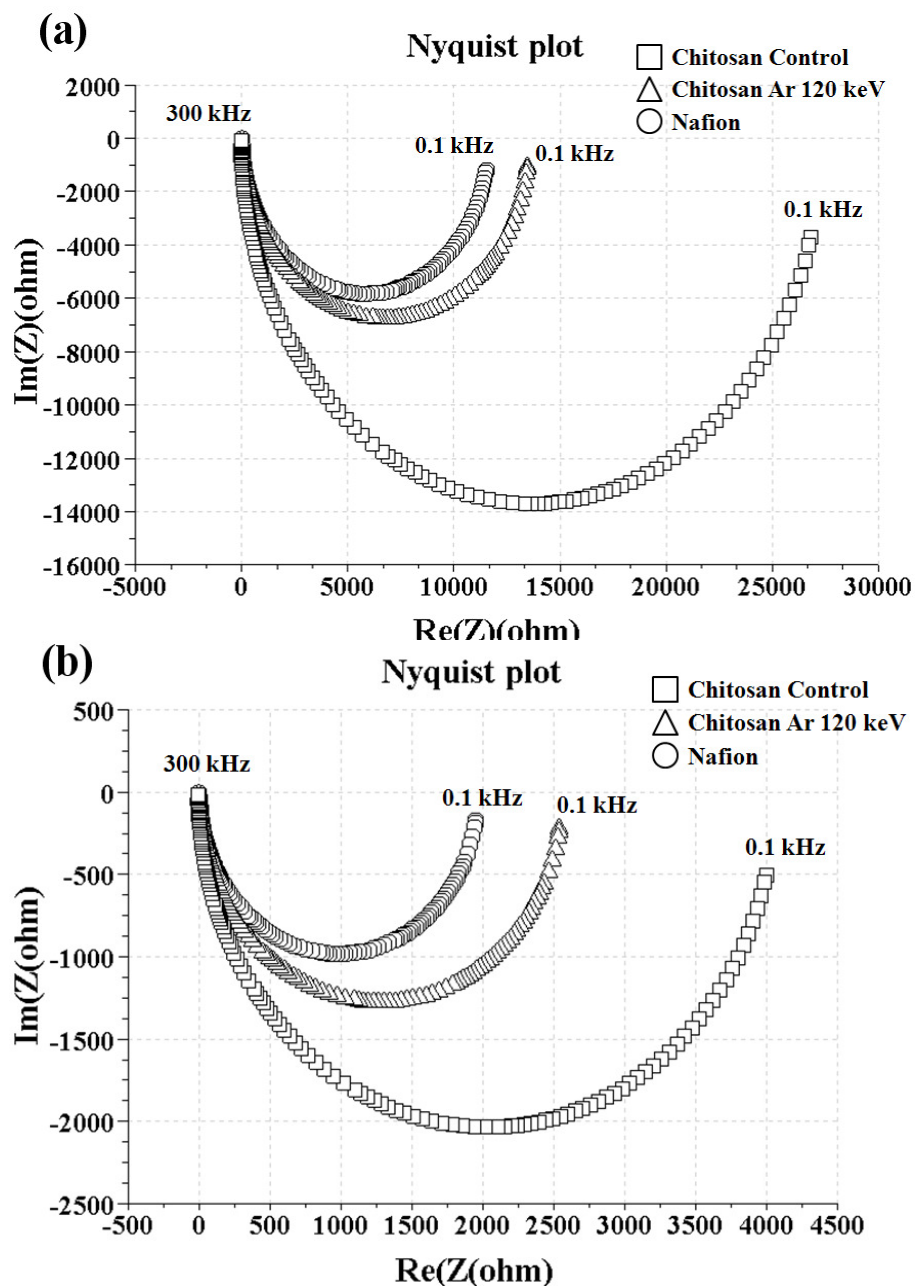
ตารางที่4.2: ค่าอิมพีแดนซ์ ค่าความนำประจุไฟฟ้า และ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางทั้งสามชนิดในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) ที่มีความเข้มข้นที่ 0.1mM, 1mM และ 10mM

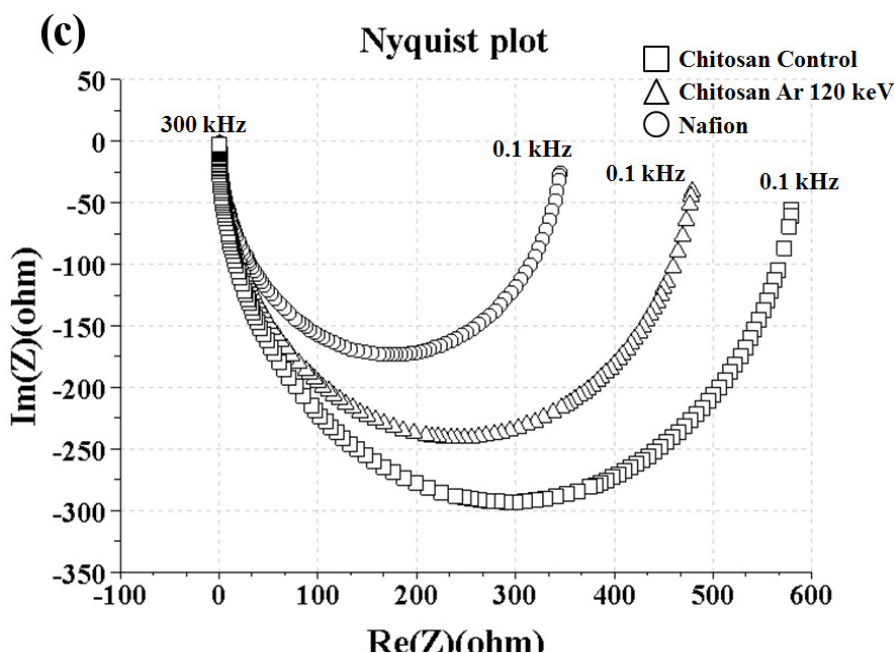
Membranes	Impedance	Ionic Conductance	Capacitance
Electrolyte concentrations (KCl)0.1mM			
Ar-ion beams treated chitosan 120keV	13.00k Ω	0.074mS	9.26×10^{-9} F
Chitosan control	21.37k Ω	0.037mS	7.96×10^{-9} F
Nafion [®]	10.56k Ω	0.086mS	1.41×10^{-8} F
Electrolyte concentrations (KCl)1mM			
Ar-ion beams treated chitosan 120keV	2.44 k Ω	0.391 mS	5.46×10^{-8} F
Chitosan control	3.68 k Ω	0.246 mS	4.92×10^{-8} F
Nafion [®]	1.88 k Ω	0.509 mS	7.09×10^{-8} F
Electrolyte concentrations (KCl)10mM			
Ar-ion beams treated chitosan 120keV	0.46k Ω	2.075mS	2.92×10^{-7} F
Chitosan control	0.34k Ω	1.709mS	2.29×10^{-7} F
Nafion [®]	0.51k Ω	2.884mS	3.41×10^{-7} F

4.1.3 Nyquist plots ของเยื่อบาง

สเปกตรัมของอิมพีแดนซ์ในรูปแบบ Nyquist plot ของเยื่อบางที่ทดสอบทั้งสามชนิดในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) ที่มีความเข้มข้นที่ 0.1mM, 1mM และ 10mM ถูกแสดงในรูปที่4.7ซึ่ง Nyquist plot ได้แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานในส่วนจริง (สัมพันธ์กับค่าความนำประจุไฟฟ้า) และส่วนจินตภาพ (สัมพันธ์กับค่าการเก็บประจุไฟฟ้า) ของเยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งความสัมพันธ์นี้ได้จากวงสมมูลของเยื่อบางซึ่งอธิบายได้จากรูปที่ 2.7 และ สมการที่16 ในบทที่ 2 เมื่อพิจารณาจากรูปที่4.7(a), (b) และ (c) ได้ชี้ให้เห็นว่าความต้านทานในส่วนจริงและส่วนจินตภาพของเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุมมีขนาดมากกว่าเยื่อบางไคโตซานที่ปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีม โดยที่เยื่อบางทั้งสองชนิดก็ยังมีค่าความต้านทานในส่วนจริงและส่วนจินตภาพมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อบางทางการค้าทุกความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และ ที่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์

(KCl) ที่สูงขึ้น ก็จะส่งผลให้ค่าความต้านทานในส่วนจริงและส่วนจินตภาพลดลงตามไปด้วยซึ่งได้พิจารณาและเปรียบเทียบที่ 10mM, 1mM และ 0.1mM ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของอิมพีแดนซ์ในรูปแบบ Nyquist plot เปรียบเทียบกันกับสเปกตรัมของอิมพีแดนซ์ในรูปแบบ bode plot ในหัวข้อที่ 4.1.1 และ 4.1.2 จะเห็นว่าข้อมูลตรงง่ายในการวิเคราะห์ผลและมีความซับซ้อนน้อยกว่า





รูปที่ 4.7 Nyquist plots ของเยื่อบางที่ทดสอบทั้งสามชนิด (a) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โพลีแซลไนด์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) ที่มีความเข้มข้นที่ 0.1mM (b) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) ที่มีความเข้มข้นที่ 1mM (c) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) ที่มีความเข้มข้นที่ 10 mM

ผลที่ได้จาก Nyquist plots มีความสอดคล้องกับสเปกตรัมในรูปแบบของ bode plot เมื่อเราพิจารณาความต้านทานในส่วนจริงของเยื่อบางทั้งสามชนิดสรุปได้ว่าเมื่อความต้านทานในส่วนจริงลดลงจะทำให้ค่าความนำประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และ เมื่อเราพิจารณาความต้านทานในส่วนจินตภาพของเยื่อบางทั้งสามชนิด ก็สามารถสรุปได้ว่าเมื่อความต้านทานในส่วนจินตภาพลดลงจะทำให้ค่าการเก็บประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอธิบายได้จากสมการที่ 16 ในบทที่ 2 และ จากการศึกษพบว่า เยื่อบางไคโตซานชุดควบคุมมีความต้านทานในส่วนจริงและส่วนจินตภาพมากกว่าเยื่อบางไคโตซานที่ปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีม และ เยื่อบางทางการค้ามีความต้านทานในส่วนจริงและส่วนจินตภาพน้อยที่สุด และสามารถสรุปได้ว่าเยื่อบางไคโตซานที่ปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมมีความนำประจุไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุไฟฟ้ามากกว่าเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุม และ เยื่อบางทางการค้ามีความนำประจุไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุไฟฟ้ามากที่สุดซึ่งสอดคล้องกันกับผลอิมพีแดนซ์ในรูปแบบของ bode plot ในหัวข้อที่ 4.1.1 และ 4.1.2

4.1.4 ศักยภาพแพร่ของเยื่อบาง

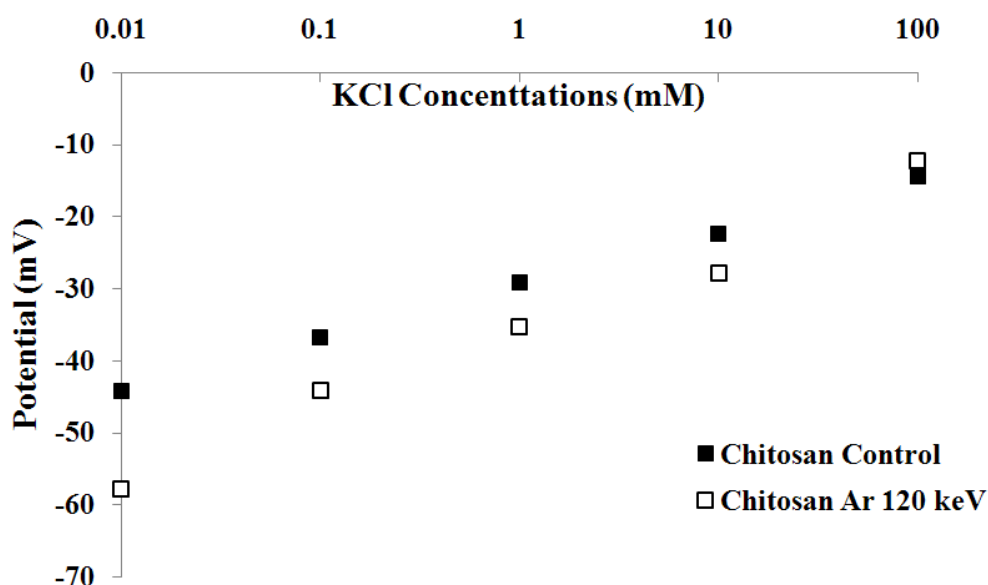
จากผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าศักย์การแพร่ของเยื่อบางไคโตซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมมีค่ามากกว่าเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุมสำหรับทุกคู่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) และ ค่าของศักย์การแพร่ของเยื่อบางจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเยื่อบางอยู่ในคู่ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันมากๆ ซึ่งผลได้แสดงในรูปที่ 4.8 จากผลนี้แสดงให้เห็นประจุบวกที่ได้รับมาจากอาร์กอนไอออน (Ar^+) ถูกสะสมบนพื้นผิวของเยื่อบางในด้านที่หนึ่งของชุดทดลองซึ่งสิ่งนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกโพแทสเซียมไอออน (K^+) จาก คลอไรด์ไอออน(Cl^-) ด้วยเหตุนี้คลอไรด์ไอออน(Cl^-) จึงเคลื่อนที่ผ่านเยื่อบางไคโตซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมได้เร็วและมากกว่าเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุม นอกจากนี้ยังอธิบายผลของศักย์การแพร่ของเยื่อบางไคโตซานที่ให้ศักย์เป็นลบได้ว่ามีสาเหตุจากคลอไรด์ไอออน(Cl^-) ที่เคลื่อนที่ผ่านจากด้านหนึ่งของชุดทดลองผ่านเยื่อบางไปยังด้านสองของชุดทดลองได้เร็วกว่าโพแทสเซียมไอออน (K^+) จึงเกิดความแตกต่างของไอออนเกิดขึ้นซึ่งสิ่งนี้ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นและมีค่าเป็นลบ โดยจากผลนี้แสดงให้เห็นเยื่อบางไคโตซานมีความประพฤติตัวเป็นเยื่อบางแลกเปลี่ยนประจุลบนั้นหมายความว่าตัวเยื่อบางไคโตซานมีความเป็นประจุบวกมากนั่นเองเนื่องจากโครงสร้างของเยื่อบางไคโตซานมีหมู่อะมิโนมาก ซึ่งมีความเป็นบวกสูงเป็นองค์ประกอบ

ศักย์การแพร่ของเยื่อบางได้อธิบายไว้ในสมการที่ 27 ในบทที่ 2 โดยศักย์การแพร่ของเยื่อบางยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และสภาพการซาบซึมน้ำได้ของไอออนในเยื่อบาง($\beta = P_{Cl}/P_K$) โดยผลของอัตราส่วนสภาพการซาบซึมน้ำได้ของไอออนในเยื่อบางไคโตซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมและเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุม ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ซึ่งผลจากตารางชี้ให้เห็นว่าเยื่อบางไคโตซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมจะมีอัตราส่วนสภาพการซาบซึมน้ำได้ของไอออนเพิ่มขึ้นซึ่งเพิ่มจาก 5.53 เป็น 9.36 ในคู่ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้น 100/0.01 mM และ มากกว่าทุกคู่ของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์สำหรับที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกันน้อยๆอัตราส่วนของสภาพการซาบซึมน้ำได้ของไอออนจะมีความน้อยตามไปด้วยเนื่องจากแรงขับเคลื่อนไอออนที่ได้มาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าลดลงนั่นเอง

ตารางที่ 4.3: อัตราส่วนสภาพการซาบซึมได้ของไอออน, $\beta = P_{Cl}/P_K$ ที่ได้มาจากเยื่อบางไคโตซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอน ไอออนบีมและเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุม

KCl concentration	$\beta = P_{Cl}/P_K$, Chitosan Control	$\beta = P_{Cl}/P_K$, Chitosan Ar 120 keV
0.01mM	5.53	9.36
0.1mM	4.15	5.56
1mM	3.17	4.07
10mM	2.98	4.03

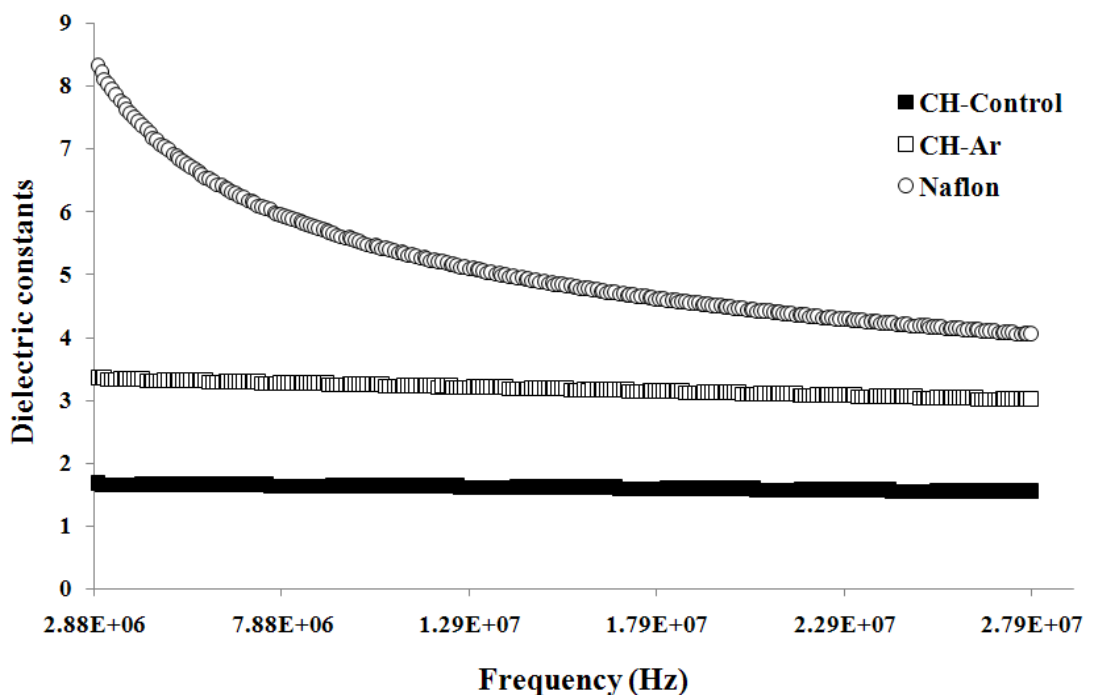
โดยสรุปผลที่ได้จากศักย์การแพร่และอัตราส่วนสภาพการซาบซึมได้ของไอออนมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยผลทดสอบชี้ให้เห็นว่าเยื่อบางไคโตซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอน ไอออนบีมมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนและการแพร่ผ่านของไอออนได้ดีกว่าเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุม โดยในส่วนของเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีได้ให้ผลทดสอบว่าเยื่อบางหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอน ไอออนบีมจะมีค่าความนำประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและค่าอิมพีแดนซ์ (ความต้านทาน) ลดลงด้วยเหตุนี้จึงทำให้ศักย์การแพร่และอัตราส่วนสภาพการซาบซึมได้ของไอออนเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเมื่อเทียบกับเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุมซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน



รูปที่ 4.8 ศักย์การแพร่ของเยื่อบางไคโตซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอน ไอออนบีมและเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุมในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความแตกต่างของความเข้มข้น; 100/0.01, 100/0.1, 100/1.0, 100/10 และ 100/100 mM

4.1.5 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเยื่อบาง

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเยื่อบางโคโตะซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมเยื่อบางโคโตะซานชุดควบคุม และ เยื่อบางทางการค้า ได้ถูกวิเคราะห์และเปรียบเทียบซึ่งได้แสดงในรูปที่ 4.9 โดยหลักการของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกได้ถูกอธิบายในสมการที่ 30 ในบทที่ 2 ซึ่งได้ทดสอบในช่วงความถี่ 2.88 ถึง 27.9 MHz จากผลทดสอบที่ได้ชี้ให้เห็นว่าเยื่อบางโคโตะซานที่ปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมมีสเปคตรัมของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมากกว่าเยื่อบางโคโตะซานชุดควบคุม เนื่องจากการปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมจะส่งผลต่อการเพิ่มไอออนบนพื้นผิวของเยื่อบางด้วยเหตุนี้ค่าความเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางจึงสูงขึ้นตามไปด้วยและด้วยเหตุนี้อัตราการแพร่ผ่านและการแลกเปลี่ยนของไอออนของเยื่อบางโคโตะซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมจึงเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเยื่อบางทั้งสองค่าน้อยกว่าเยื่อบางทางการค้า



รูปที่ 4.9 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเยื่อบางทั้งสามชนิด

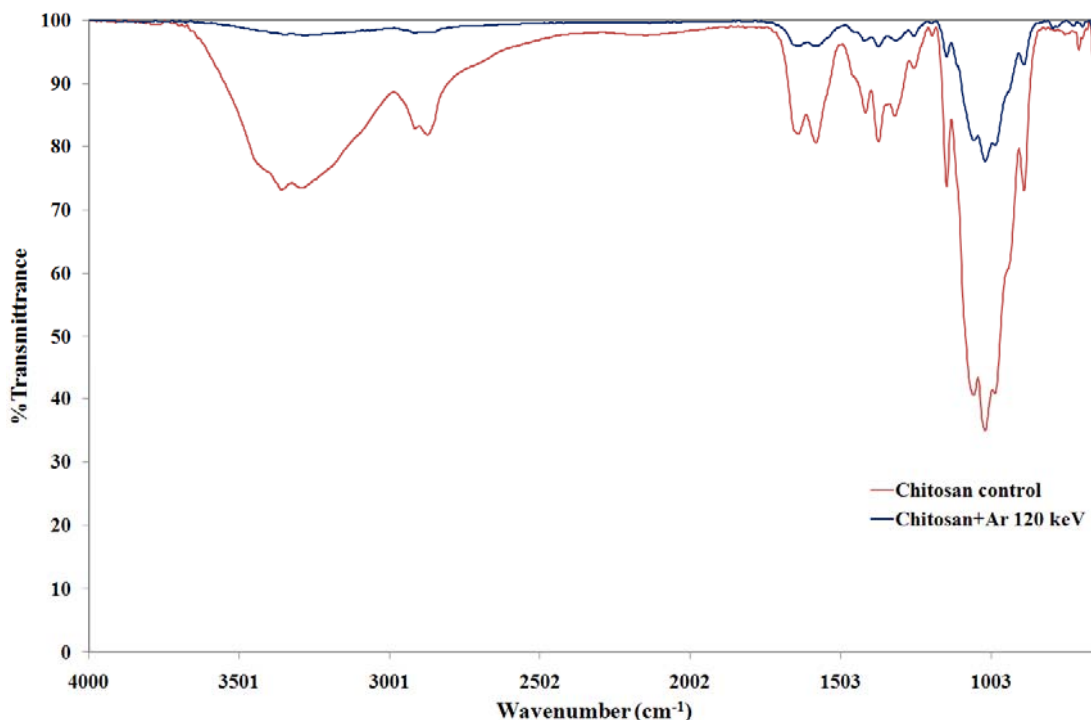
เมื่อเปรียบเทียบผลจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับผลที่ได้จากเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีและศักย์การแพร่ของเยื่อบางจะเห็นว่ามีความสอดคล้องกัน โดยผลจากเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแสดงให้เห็นว่าเยื่อบางหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมมีค่าการเก็บประจุไฟฟ้ามากกว่าเยื่อบางชุดควบคุม ด้วยเหตุนี้อัตราส่วนของสภาพขั้วซึมของไอออนจึงเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยและ จากผลทดสอบทั้งหมดได้ชี้ให้เห็นว่าเยื่อบางโคโตะซานหลัง

ปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอน ไอออนบีมมีประสิทธิภาพมากกว่าเยื่อบางไคโตซานหูดควบคุม แต่เยื่อบางทั้งสองก็ยังมีประสิทธิภาพด้อยกว่าเยื่อบางทางการค้า

4.1.6 หมู่ฟังก์ชันจากสเปกตรัม ATR-FTIR ของเยื่อบาง

จากรูปที่**4.10**แสดงสเปกตรัม ATR-FTIR และหมู่ฟังก์ชันของผลทดสอบของเยื่อบางไคโตซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอน ไอออนบีมและเยื่อบางไคโตซานหูดควบคุม โดยผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงหมู่ฟังก์ชันหลักของเยื่อบางไคโตซานหูดควบคุมที่ได้อ่านจากพีคของสเปกตรัม ATR-FTIR ซึ่งได้ชี้ให้เห็นว่า ที่เลขคลื่น 3450cm^{-1} คือหมู่ O-H (stretch), ที่เลขคลื่น 2875cm^{-1} คือหมู่ C-H (stretch), ที่เลขคลื่น 1650cm^{-1} คือหมู่ C=O (stretch of amide group), ที่เลขคลื่น 1585cm^{-1} คือหมู่ N-H (deformation of amino groups), ที่เลขคลื่น 1375cm^{-1} คือหมู่ C-O (stretch of amide group) และที่เลขคลื่น $1150, 1060, 1027\text{cm}^{-1}$ คือหมู่ C-O-C (stretch) และเกี่ยวข้องกับกระตุ้นของโครงสร้าง ของหมู่ C-O (stretching) นอกจากนี้ผลที่ได้ยังชี้ให้เห็นว่าพีคของสเปกตรัม ATR-FTIR ของเยื่อบางไคโตซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอน ไอออนบีมพบว่าที่เลขคลื่น $3450, 2875, 1375,$ และ 1060cm^{-1} มีพีคที่ลดลงซึ่งหมายความว่าหมู่ฟังก์ชันของโครงสร้างเยื่อบางไคโตซานที่เลขคลื่นนี้มีจำนวนลดลงด้วย

การลดลงของหมู่โครงสร้างของเยื่อบางไคโตซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอน ไอออนบีมได้สอดคล้องผลจากสเปกตรัมอิมพิแดนซ์ที่ลดลงซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่**4.1** และการเพิ่มขึ้นสเปกตรัมความนำประจุไฟฟ้าและสเปกตรัมการเก็บประจุไฟฟ้าซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่**4.2** และ**4.3** เนื่องจากการปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอน ไอออนบีม ที่ 120 keV ส่งผลทำให้มวลโมเลกุลของไคโตซานลดลงสังเกตจากพีคของสเปกตรัม ATR-FTIR ที่ลดลง และ อีกสาเหตุคือการเพิ่มขึ้นของประจุบริเวณพื้นผิวของเยื่อบางเนื่องจากอาร์กอน ไอออน (Ar^+) ที่มาจากไอออนบีม ซึ่งสาเหตุเหล่านี้ทำให้ไอออนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถเคลื่อนที่ผ่านและเพิ่มการแลกเปลี่ยนของไอออนผ่านโซโพลีเมอร์ของเยื่อบางไคโตซานได้มากขึ้นด้วย และ ผลนี้ยังสอดคล้องกับสัคัยการแพร่และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกด้วยว่าเยื่อบางไคโตซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอน ไอออนบีมมีอัตราส่วนของสภาพขบซึมของไอออนและค่าความเก็บประจุไฟฟ้ามากกว่าเยื่อบางไคโตซานหูดควบคุม



รูปที่ 4.10 สเปกตรัม ATR-FTIR ของเยื่อบางไคโตซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมและเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุม

จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบแต่ละวิธีสามารถสรุปได้ว่าเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีสามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบางไคโตซานที่ได้รับการปรับปรุงผิวจากอาร์กอนไอออนบีมกับชุดควบคุมและเปรียบเทียบกับเยื่อบางทางการค้าได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาค่าอิมพีแดนซ์ค่าความนำประจุไฟฟ้า และ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า โดยใช้ความถี่ในช่วง 0.1-300 kHz โดยที่ค่าเหล่านี้ยังขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ โดยที่ระดับความเข้มข้นมากๆจะทำให้ ค่าความนำประจุไฟฟ้า และ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า สูงขึ้นแต่ค่าอิมพีแดนซ์จะลดลง นอกจากนี้ผลที่ได้ก็แสดงให้เห็นว่าเยื่อบางไคโตซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมมีการแพร่ผ่านและแลกเปลี่ยนไอออนได้มากกว่าเยื่อบางไคโตซานชุดควบคุม โดยมีผลของศักย์การแพร่ และ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก รวมทั้งผลที่ได้จากสเปกตรัม ATR-FTIR ยืนยันว่าการปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมส่งผลทำให้มวลโมเลกุลของไคโตซานลดลงและมีการเพิ่มขึ้นของประจุบริเวณพื้นผิวของเยื่อบางเนื่องจากอาร์กอนไอออน (Ar^+) ที่มากจากไอออนบีม ซึ่งสาเหตุเหล่านี้ทำให้อัตราการแพร่และแลกเปลี่ยนไอออนผ่านโซโพลีเมอร์ของเยื่อบางไคโตซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามเยื่อบางไคโตซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมก็ยังมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าเยื่อบางทางการค้าอยู่ประมาณ 20%

4.2 การวิเคราะห์เยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่มีการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาที่ความดันบรรยากาศด้วยเทคนิคอิมพิแดนซ์สเปกโทรสโคปี

ในหัวข้องานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคอิมพิแดนซ์สเปกโทรสโคปีในการวัดความเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่มีการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมาแตกต่างกันและเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดชุดควบคุมโดยมีความหนา 0.25 มิลลิเมตร ซึ่งกำลังของพลาสมาที่ใช้ปรับปรุงผิวเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดจะถูกควบคุมโดยใช้เทคนิคการควบคุมสัญญาณเปิดเปิดของศักย์ไฟฟ้าแรงสูงเป็นช่วงๆ (Pulse-density-modulated) ซึ่งเทคนิคนี้สามารถควบคุมกำลังของพลาสมาที่ต้องการได้ โดยจะเลือกใช้กำลังของพลาสมาที่ 1, 5 และ 10 วัตต์ โดยการปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศสามารถทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าและโครงสร้างของเยื่อบางมีการเปลี่ยนแปลงโดยสามารถเพิ่มการแพร่ของไอออนผ่านเยื่อบาง หรือ เพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนของไอออนผ่านเยื่อบางได้ เนื่องจากการปรับปรุงด้วยพลาสมาส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของประจุบริเวณผิวของเยื่อบางซึ่งให้ผลคล้ายกับการปรับปรุงเยื่อบางโคโตนด้วยไอออนบีมซึ่งได้อภิปรายผลไปก่อนหน้านี้แล้ว โดยผลจากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถนำเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นไปประยุกต์ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง หรือ กระบวนการอิเล็กโตไดอะไลซิสให้มีประสิทธิภาพการใช้งานได้มากขึ้น และควรใช้กำลังของพลาสมาต่ำๆ เนื่องจากการปรับปรุงผิวเยื่อบางที่กำลังสูงๆ ของพลาสมาส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดต่ำลงและทำให้เยื่อบางเกิดความเสียหาย ซึ่ง Bae และ คณะ ในปี 2006 ได้กล่าวเอาไว้

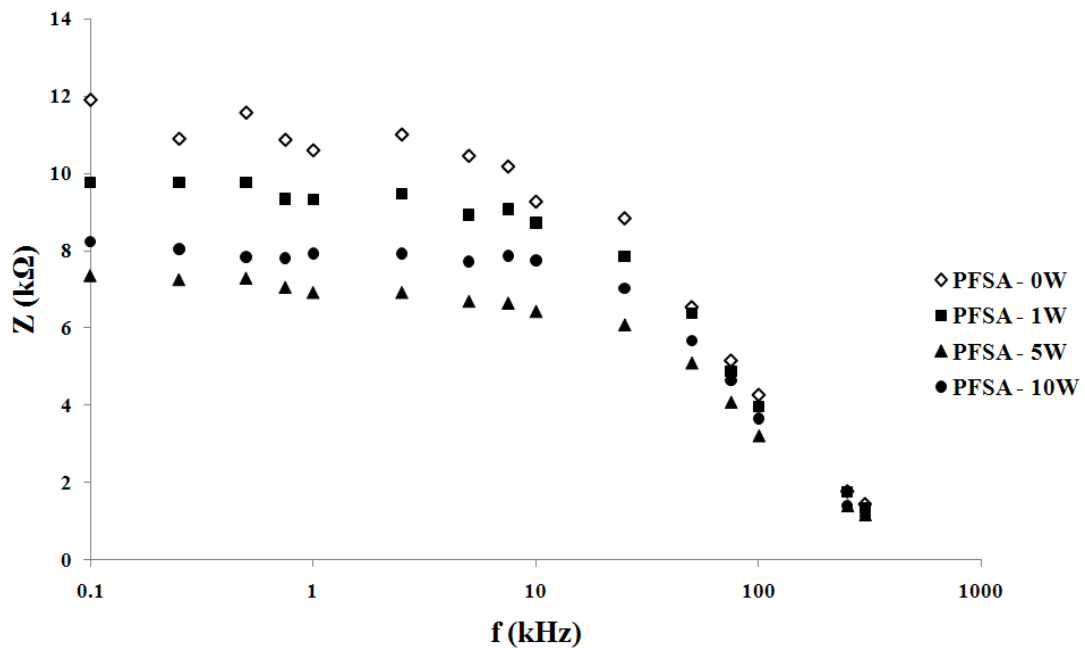
เทคนิคอิมพิแดนซ์สเปกโทรสโคปีที่ใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของเยื่อบางจะใช้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้กับเยื่อบางจะมีขนาด 2 โวลต์จากแหล่งจ่าย และใช้ช่วงของความถี่ของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับในช่วง 0.1-300 kHz โดยเยื่อบางที่ทดสอบจะถูกทดสอบใน สารละลายอิเล็กโตไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM ผลในเบื้องต้นที่ได้แสดงให้เห็นว่าขนาดอิมพิแดนซ์ของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงที่กำลังของพลาสมา 1, 5, 10 วัตต์ และชุดควบคุม (0 วัตต์) เป็น 9.76, 7.30, 8.04 และ 11.45 กิโลโอห์ม ตามลำดับ และ พบว่าค่าความนำประจุไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงจากพลาสมาให้ผลที่ดีกว่าบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดชุดควบคุมที่มากที่สุดอยู่ 36% นอกจากนี้ผลที่ได้เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและโครงสร้างของเยื่อบางจากเทคนิคอิมพิแดนซ์สเปกโทรสโคปีศึกษาการแพร่ของเยื่อบาง ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ ATR-FTIR เปรียบเทียบยืนยันว่าการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาที่ความดันบรรยากาศส่งผลทำให้มีการเพิ่มขึ้นของหมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิลบนผิวของเยื่อบางซึ่งหมู่เหล่านี้ค่อนข้างมีประจุเป็นลบ

นอกจากนี้ยังทำให้มีการเพิ่มขึ้นของประจุบริเวณพื้นผิวของเยื่อบางด้วยเนื่องจากพลาสมา ซึ่งสาเหตุเหล่านี้ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการแพร่และแลกเปลี่ยนของโพแทสเซียมไอออน (K+) และคลอไรด์ไอออน (Cl-) ผ่านเยื่อบางหลังปรับปรุงด้วยพลาสมา โดยการปรับปรุงที่กำลังของพลาสมา 5 วัตต์เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุด โดยผลทั้งหมดมีความสอดคล้องกันสำหรับรายละเอียดของผลทดสอบได้แสดงดังต่อไปนี้

4.2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) 0.1 mM

(4.2.1.1) อิมพีแดนซ์ของเยื่อบาง(Z)

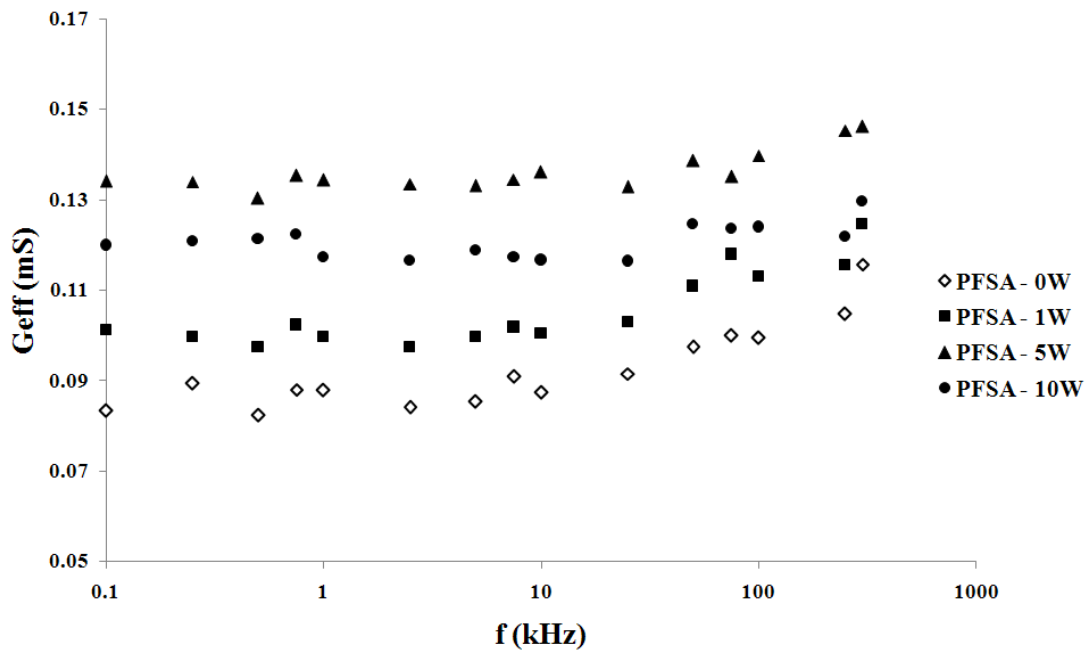
ในการศึกษาอิมพีแดนซ์ (Z) ของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 1 วัตต์ (PFSA - 1W), 5 วัตต์ (PFSA - 5W), 10 วัตต์ (PFSA - 10W) และ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (0 วัตต์, PFSA - 0W) โดยเยื่อบางที่ใช้ในการทดสอบจะถูกทดสอบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1 mM เท่ากันทั้งสองด้านของเยื่อบางเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.11 แสดง อิมพีแดนซ์ของเยื่อบางที่มีการเปลี่ยนแปลงของความถี่ในช่วง 0.1-300 kHz เมื่อพิจารณาอิมพีแดนซ์ในช่วงที่ความถี่สูงๆ สังเกตว่าอิมพีแดนซ์จะมีขนาดลดลงมากซึ่งเป็นคุณลักษณะของเยื่อบางซึ่งเป็นไปตามในสมการที่ 14 ที่ได้อธิบายไว้บทที่ 2 และเมื่อพิจารณาศึกษาจากอิมพีแดนซ์ที่คงที่ในช่วงความถี่ 0.1-1 kHz พบว่าค่าอิมพีแดนซ์ของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดหลังปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 5 วัตต์มีค่าเป็น 7.30 กิโลโอห์ม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่กำลังของพลาสมา 10 และ 1 วัตต์ซึ่งมีค่าเป็น 8.04 และ 9.76 กิโลโอห์มตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าอิมพีแดนซ์ของเยื่อบางชุดควบคุมมีค่ามากที่สุดซึ่งมีค่าเป็น 11.45 กิโลโอห์ม จากผลนี้ได้ชี้ให้เห็นว่าการปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศจะส่งผลให้ขนาดของอิมพีแดนซ์มีค่าลดลง นั่นหมายความว่ามีความต้านทานลดลงทำให้เยื่อบางนั้นสามารถแยกและแลกเปลี่ยนให้ไอออนผ่านได้มากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประจุที่ผิวของเยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์หลังปรับปรุงด้วยพลาสมา โดยการปรับปรุงที่กำลังของพลาสมา 5 วัตต์เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดเพราะเงื่อนไขดังกล่าวทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของเยื่อบาง (ความต้านทาน) มีค่าน้อยที่สุด



รูปที่ 4.11 อิมพีแดนซ์ของเยื่อบาง (Z) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM

(4.2.1.2) ค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบาง (G_{cp})

จากรูปที่ 4.12 แสดงค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 1, 5, 10 วัตต์ และเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (0 วัตต์) เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.12 แสดง ค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบางที่มีการเปลี่ยนแปลงของความถี่ในช่วง 0.1-300 kHz โดยเมื่อพิจารณาค่าความนำประจุไฟฟ้าในช่วงที่ความถี่สูงๆ จะเห็นว่าค่าความนำประจุไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นคุณลักษณะของเยื่อบางซึ่งเป็นไปตามในสมการที่ 14 ที่ได้อธิบายไว้บทที่ 2 และ เมื่อพิจารณาค่าความนำประจุไฟฟ้าในช่วงความถี่ 0.1-1 kHz พบว่าค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดหลังปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 5 วัตต์มีค่าเป็น 0.133mS ซึ่งมีค่ามากกว่าที่กำลังของพลาสมา 10 และ 1 วัตต์ซึ่งมีค่าเป็น 0.120 และ 0.099mS ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบางชุดควบคุมมีค่าน้อยที่สุดซึ่งมีค่าเป็น 0.085mS จากผลนี้ได้ชี้ให้เห็นว่าการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาทำให้เยื่อบางนั้นสามารถแลกเปลี่ยนให้ไอออนผ่านเยื่อบางได้มากขึ้น ด้วยเหตุนี้เยื่อบางจึงมีค่าความนำประจุไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์ที่ลดลงซึ่งได้กล่าวไปแล้ว นอกจากนี้ผลนี้แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงที่เงื่อนไขกำลังของพลาสมา 5 วัตต์เป็นช่วงที่มีค่าความนำประจุไฟฟ้ามากที่สุด

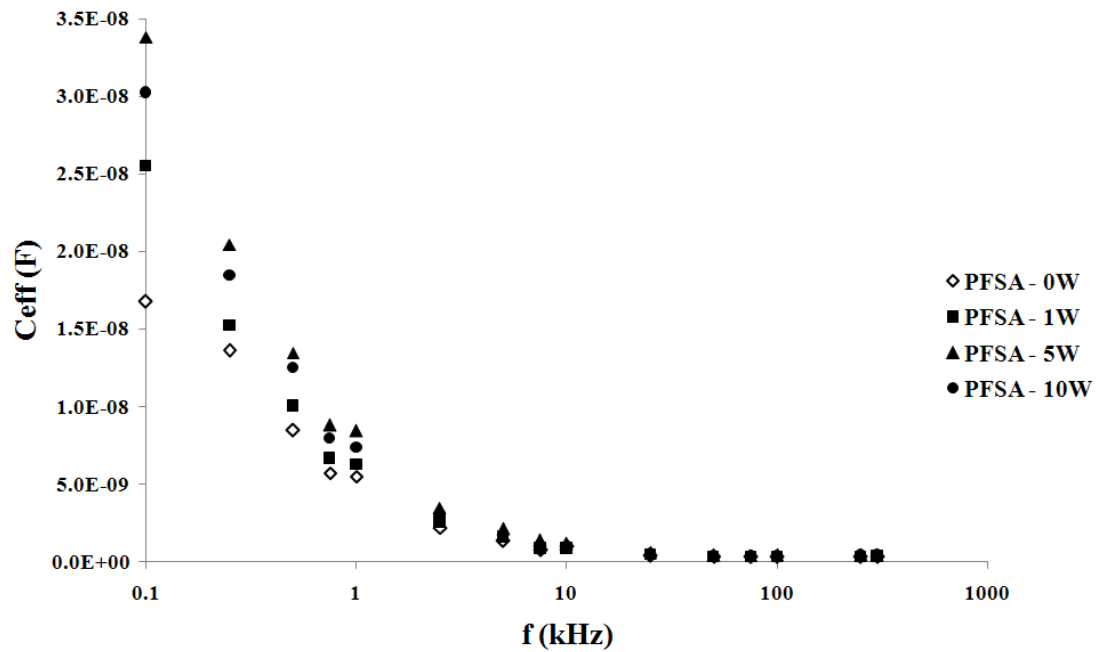


รูปที่ 4.12 ค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบาง (G_{eff}) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1 mM

(4.2.1.3) ค่าการเก็บประจุของเยื่อบาง (C_{eff})

ผลของค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 1, 5, 10 วัตต์ และ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (0 วัตต์) ได้ถูกแสดงและเปรียบเทียบในรูปที่ 4.13 จากรูปชี้ให้เห็นว่าค่าการเก็บประจุไฟฟ้าที่ความถี่สูงๆ จะมีผลคล้ายกับผลของอิมพีแดนซ์คือค่าการเก็บประจุไฟฟ้ามีค่าลดลงซึ่งอธิบายได้สมการที่ 22 ในบทที่ 2 และ เมื่อพิจารณาค่าการเก็บประจุในรูปที่ 4.13 พบว่าค่าการเก็บประจุไฟฟ้าให้ผลคล้ายกับค่าความนำประจุไฟฟ้าโดยเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดหลังปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 5 วัตต์มีค่าการเก็บประจุไฟฟ้าเป็น 2.26×10^{-8} F ซึ่งมีค่ามากกว่าที่กำลังของพลาสมา 10 และ 1 วัตต์ซึ่งมีค่าการเก็บประจุไฟฟ้าเป็น 2.04×10^{-8} และ 1.69×10^{-8} F ตามลำดับ และยังพบว่าค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางชุดควบคุมมีค่าน้อยที่สุดซึ่งมีค่าเป็น 1.29×10^{-8} F จากผลนี้ชี้ให้เห็นว่าการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาทำให้จำนวนของแคโทดรีโอออนบริเวณผิวของเยื่อบางและอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนผ่านเยื่อบางนั้นเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการเก็บประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วยซึ่งสอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์ที่ลดลงและค่าความนำประจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นซึ่งได้อธิบายผลไปแล้ว และนอกจากนี้ผลได้แสดงให้เห็นว่า

การปรับปรุงที่ถี่ของกำลังของพลาสมา 5 วัตต์เป็นช่วงที่มีค่าการเก็บประจุไฟฟ้ามากที่สุดซึ่งคล้ายกับค่าความนำประจุไฟฟ้า



รูปที่ 4.13 ค่าการเก็บประจุของเยื่อบาง (C_{eff}) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM

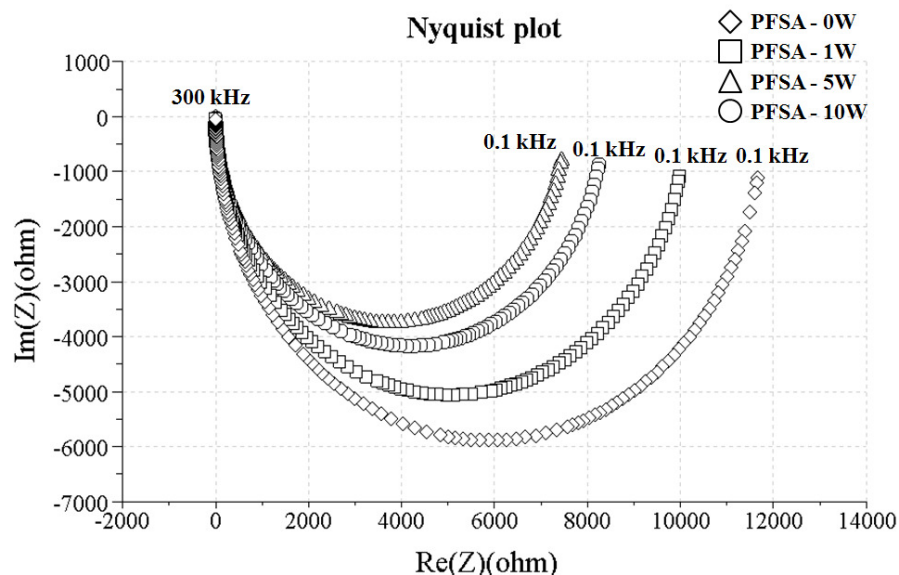
การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางไฟฟ้าในรูปแบบของ ค่าอิมพีแดนซ์ค่าความนำประจุไฟฟ้า และ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า ของเยื่อบางที่ทดสอบได้ถูกแสดงและเปรียบเทียบในตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิคแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมา ความดันบรรยากาศมีประสิทธิภาพมากกว่าเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิคแอซิดชุดควบคุม เนื่องจากไอออน อิเล็กตรอน และรังสี ที่อยู่ในพลาสมาที่ใช้ในการปรับปรุงผิวมีผลต่อการเพิ่มประจุ และความเป็นขั้วบนพื้นผิวของเยื่อบาง ด้วยเหตุผลนี้เยื่อบางจึงมีประสิทธิภาพของอัตราการแพร่ และแลกเปลี่ยนไอออนผ่านเยื่อบางได้มากขึ้นและส่งผลให้ค่าความนำประจุไฟฟ้า และ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4.4: ค่าอิมพีแดนซ์ ค่าความนำประจุไฟฟ้า และ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) ที่มีความเข้มข้นที่ 0.1mM

Membranes	Impedance	Ionic Conductance	Capacitance
PFSA-0W	11.45 k Ω	0.085 mS	1.29×10^{-8} F
PFSA-1W	9.76 k Ω	0.099 mS	1.69×10^{-8} F
PFSA-5W	7.30 k Ω	0.133 mS	2.26×10^{-8} F
PFSA-10W	8.04 k Ω	0.120 mS	2.04×10^{-8} F

4.2.2 Nyquist plots ของเยื่อบาง

สเปกตรัมของอิมพีแดนซ์ในรูปแบบNyquist plot ของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 1, 5, 10 วัตต์ และ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (0 วัตต์) ตามลำดับในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้นที่ 0.1mM แสดงในรูปที่ 4.14 เมื่อพิจารณาจะเห็นว่าความต้านทานในส่วนจริงและส่วนจินตภาพของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดชุดควบคุมมีขนาดใหญ่กว่าเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 1, 10, 5 วัตต์ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 Nyquist plots ของของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 1, 5, 10 วัตต์ และ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (0 วัตต์)

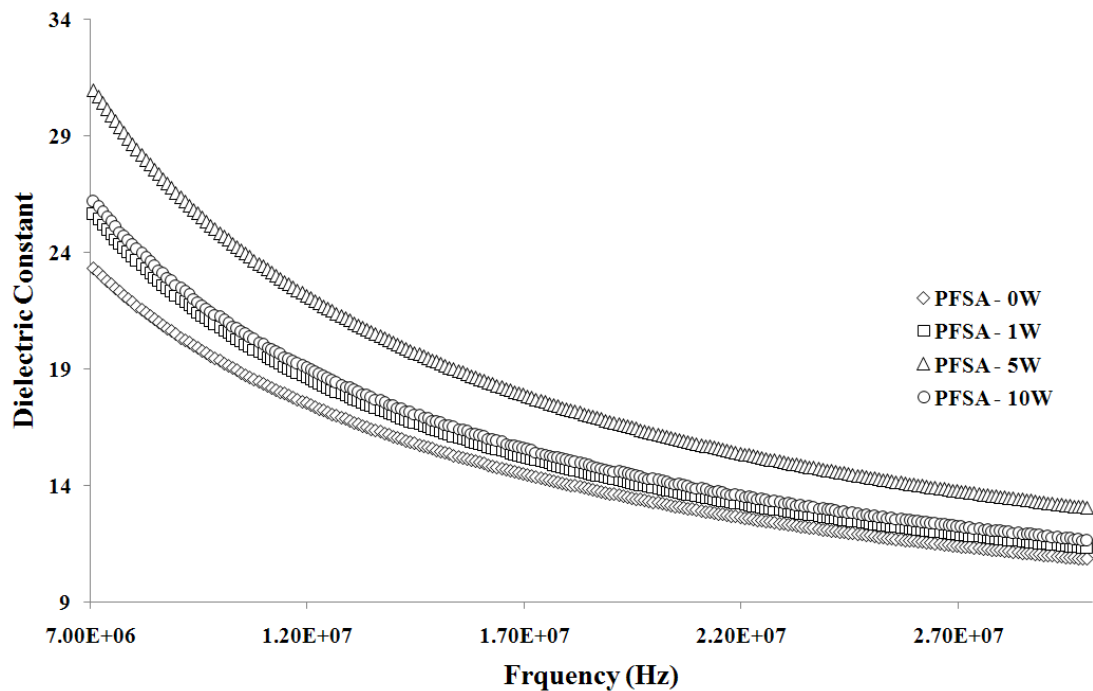
รูปแบบ Nyquist plot ที่แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานในส่วนจริง (สัมพันธ์กับค่าความนำประจุไฟฟ้า) และส่วนจินตภาพ(สัมพันธ์กับค่าการเก็บประจุไฟฟ้า)ของเยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งความสัมพันธ์นี้มาจากวงจรสมมูลของเยื่อบางในรูปที่ 2.7 และได้จากสมการที่ 16 ในบทที่ 2 และสรุปได้ว่าเมื่อความต้านทานในส่วนจริงลดลงจะทำให้ค่าความนำประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และ เมื่อเราพิจารณาความต้านทานในส่วนจินตภาพของเยื่อบางก็สามารถสรุปได้ว่าเมื่อความต้านทานในส่วนจินตภาพลดลงจะทำให้ค่าการเก็บประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จากการศึกษาพบว่าเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดซูดควบคุมมีต้านทานในส่วนจริงและส่วนจินตภาพมากกว่าเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 1 และ 10 วัตต์ ตามลำดับโดยที่กำลังของพลาสมา 5 วัตต์มีต้านทานในส่วนจริงและส่วนจินตภาพน้อยที่สุด จากเหตุผลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 10 และ 1 วัตต์ มีค่าความนำประจุไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุไฟฟ้ามากกว่าเยื่อบางควบคุมตามลำดับและที่กำลังของพลาสมา 5 วัตต์เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดเพราะเป็นช่วงที่มีค่าความนำประจุไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุไฟฟ้ามากที่สุดซึ่งสอดคล้องกันกับอิมพีแดนซ์ในรูปแบบของbode plotในหัวข้อที่ 4.2.1

4.2.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเยื่อบาง

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 1, 5, 10 วัตต์ ตามลำดับ และ เปรียบเทียบกับซูดควบคุม(0 วัตต์)ได้ถูกวิเคราะห์และเปรียบเทียบซึ่งได้แสดงในรูปที่ 4.15 ได้ทดสอบในช่วงความถี่ 7.00 ถึง 27.0 MHz จากผลทดสอบที่ได้ชี้ให้เห็นว่าเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 5, 10 และ 1 วัตต์มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมากกว่าเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดซูดควบคุมตามลำดับเนื่องจากการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมามีผลคล้ายผลของอาร์กอนไอออนบีมคือการปรับปรุงนี้จะส่งผลต่อการเพิ่มไอออนบนพื้นผิวของเยื่อบางด้วยเหตุนี้เคาท์เตอร์ไอออนบริเวณผิวเยื่อบางจึงมากขึ้นทำให้ค่าความเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางจึงสูงขึ้นตามไปด้วย จากผลที่ได้นี้จะส่งผลต่ออัตราการแพร่ผ่านและการแลกเปลี่ยนของไอออนของเยื่อบางที่เพิ่มขึ้นหลังปรับปรุงด้วยพลาสมา และจากสาเหตุนี้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจึงมีค่าสูงขึ้นอธิบายได้จากสมการที่ 30 ในบทที่ 2

เมื่อเปรียบเทียบผลจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับผลที่ได้จากเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเยื่อบางจะเห็นว่ามีค่าสอดคล้องกัน โดยผลจากเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแสดงให้เห็นว่าเยื่อบางหลังปรับปรุงผิวพลาสมามีค่าการเก็บประจุไฟฟ้า

มากกว่าเยื่อบางชุดควบคุม และ นอกจากนี้ยังสรุปได้ว่าการปรับปรุงที่กำลังของพลาสมา 5 วัตต์เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดเพราะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมากที่สุด จากเหตุผลที่ได้อภิปรายไปตั้งนั้น อัตราการแพร่ผ่านและการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อบางจะมีมากที่สุดเช่นกัน

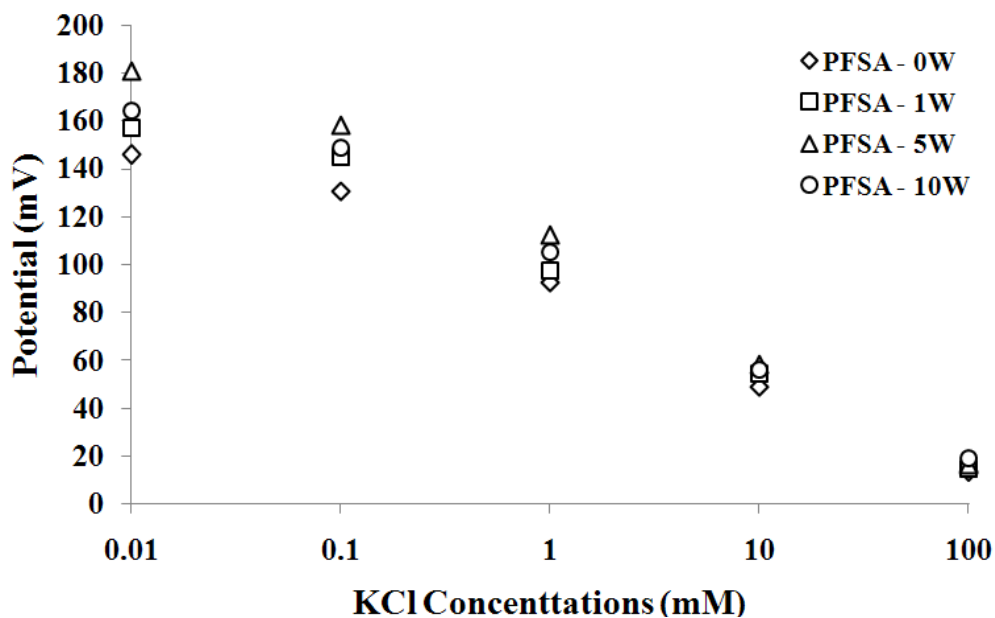


รูปที่ 4.15 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 1, 5, 10 วัตต์ ตามลำดับ และเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (0 วัตต์)

4.2.4 ศักยภาพการแพร่ของเยื่อบาง

ศักยภาพการแพร่ของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 1, 5, 10 วัตต์ ตามลำดับ และเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (0 วัตต์) โดยค่าของศักยภาพการแพร่ของเยื่อบางจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเยื่อบางอยู่ในคู่ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันมากๆ ซึ่งผลได้แสดงในรูปที่ 4.16 และพบว่า ศักยภาพการแพร่ของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 5, 10 และ 1 วัตต์มีศักยภาพการแพร่มากกว่าเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดชุดควบคุม (0 วัตต์) ตามลำดับ เนื่องจากการปรับปรุงด้วยพลาสมาจะทำให้เพิ่มความเป็นขั้ว (ประจุ) และถูกสะสมบนพื้นผิวของเยื่อบางเพิ่มขึ้นส่งผลต่ออัตราการแพร่และการแลกเปลี่ยนของโพแทสเซียมไอออน (K+) และคลอไรด์ไอออน (Cl-) ผ่านเยื่อบางเพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ยัง

อธิบายผลของศักย์การแพร่ของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ให้ศักย์การแพร่เป็นบวกซึ่งแตกต่างกับเยื่อบางไคโตซานที่ให้ที่ให้ศักย์การแพร่เป็นลบซึ่งได้อธิบายสาเหตุไปก่อนหน้านี้แล้ว ในหัวข้อ 4.1.4 โดยศักย์การแพร่เป็นบวกนี้มีสาเหตุจากโพแทสเซียมไอออน (K^+) ที่เคลื่อนที่ผ่านจากด้านหนึ่งของชุดทดลองผ่านเยื่อบางไปยังด้านสองของชุดทดลองได้เร็วกว่าคลอไรด์ไอออน (Cl^-) จึงเกิดความแตกต่างของไอออนเกิดขึ้น ซึ่งสิ่งนี้ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นและมีค่าเป็นบวกโดยจากผลนี้แสดงให้เห็นเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดมีความประพฤติตัวเป็นเยื่อบางแลกเปลี่ยนประจุบวก นั้นหมายความว่าตัวเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดมีความเป็นประจุลบมากนั่นเองเนื่องจากโครงสร้างของเยื่อบางมีหมู่ซัลโฟนิกแอซิด (SO_3^-) ซึ่งมีความเป็นลบสูงเป็นองค์ประกอบ



รูปที่ 4.16 ศักย์การแพร่ของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมา ความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 1, 5, 10 วัตต์ ตามลำดับ และ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (0 วัตต์) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความแตกต่างของความเข้มข้น;

100/0.01, 100/0.1, 100/1.0, 100/10 และ 100/100 mM

ศักย์การแพร่ของเยื่อบางได้อธิบายไว้ในสมการที่ 27 ในบทที่ 2 โดยศักย์การแพร่ของเยื่อบางยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และสภาพการซาบซึมได้ของไอออนในเยื่อบาง ($\alpha = P_{K^+} / P_{Cl^-}$) โดยผลของอัตราส่วนสภาพการซาบซึมได้ของไอออนของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของ

พลาสติก 1, 5, 10 วัตต์ ตามลำดับ และ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม(0 วัตต์) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 ซึ่งผลจากรายงานชี้ให้เห็นว่าเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสติก ความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสติก 5, 10 และ 1 วัตต์ จะมีอัตราส่วนของสภาพการซาบซึมของ ไอออนมากกว่าเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดชุดควบคุม (0 วัตต์) ตามลำดับ ตัวอย่างเช่น อัตราส่วนของสภาพการซาบซึมของ ไอออนของเยื่อบางชุดควบคุมที่เพิ่มขึ้นเมื่อปรับปรุงด้วย พลาสติกกำลัง 5 วัตต์ ซึ่งเพิ่มจาก 2.90×10^2 เป็น 12.34×10^2 ในกลุ่มของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้น $100/0.01$ mM และ มากกว่าทุกกลุ่มของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของเยื่อ บางที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสติก สำหรับที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกันน้อยๆอัตราส่วนของ สภาพการซาบซึมของ ไอออนจะมีค่าน้อยตามไปด้วยเนื่องจากแรงขับเคลื่อนไอออนที่ได้มาจาก ความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าลดลงนั่นเอง

ตารางที่ 4.5: อัตราส่วนสภาพการซาบซึมได้ของไอออน ($\alpha = P_{Kl} / P_{Cl}$) ของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสติกความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสติก 1, 5, 10 วัตต์ ตามลำดับ และ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม(0 วัตต์)

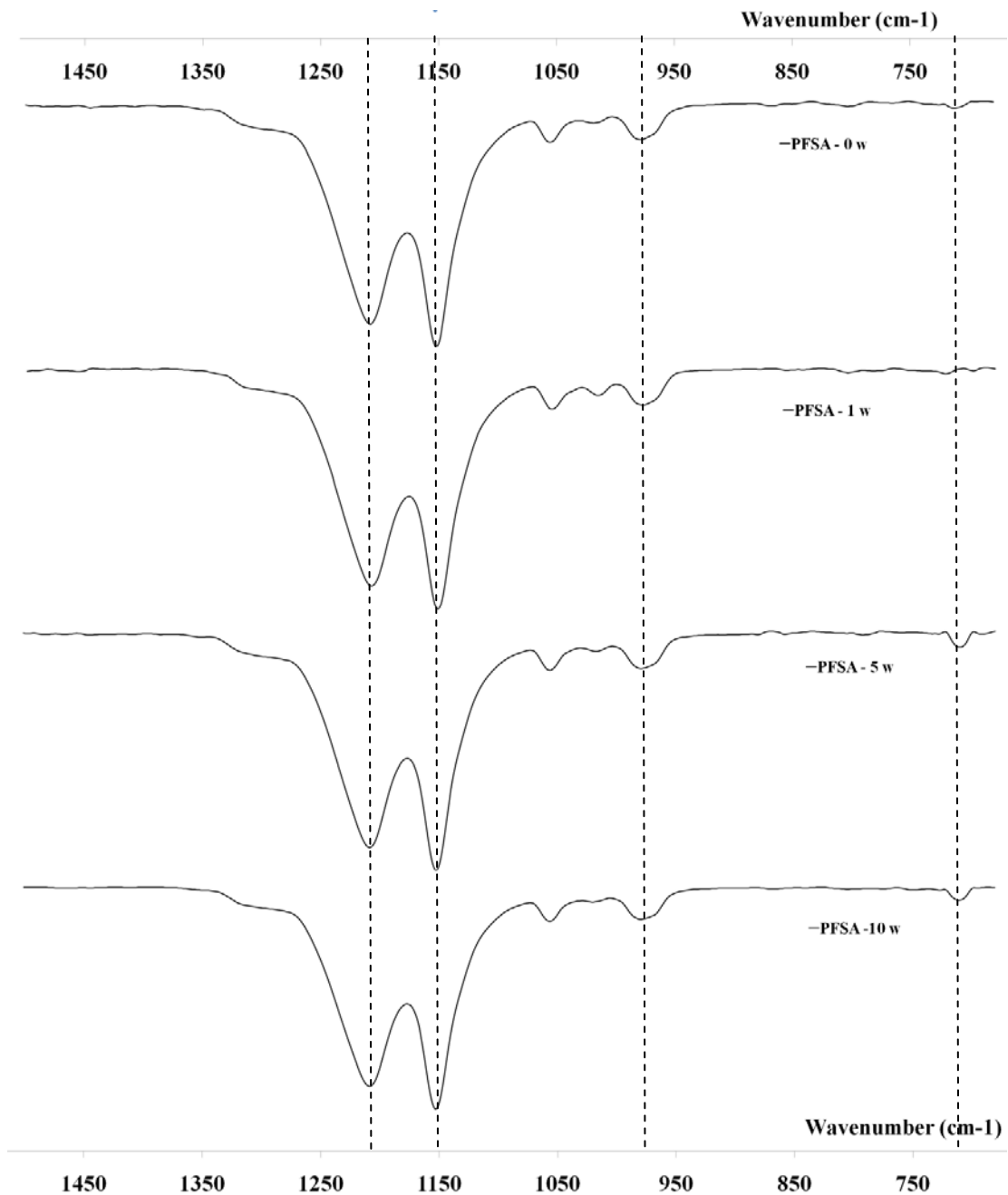
KCl concentration	$\alpha = P_K/P_{Cl}$, PSFA - 0W	$\alpha = P_K/P_{Cl}$, PSFA - 1W	$\alpha = P_K/P_{Cl}$, PSFA - 5W	$\alpha = P_K/P_{Cl}$, PSFA - 10W
0.01mM	2.90×10^2	4.56×10^2	12.34×10^2	6.09×10^2
0.1mM	1.86×10^2	3.75×10^2	8.47×10^2	4.68×10^2
1mM	0.54×10^2	0.74×10^2	3.20×10^2	1.44×10^2
10mM	0.20×10^2	0.43×10^2	2.45×10^2	0.72×10^2

จากผลที่ได้จากสัปดาห์การแพร่และอัตราส่วนสภาพการซาบซึมได้ของไอออนมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยผลทดสอบชี้ให้เห็นว่าเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสติกความดันบรรยากาศมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนและการแพร่ผ่านของไอออนได้ดีกว่าเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดชุดควบคุม โดยในส่วนของเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีได้ให้ผลทดสอบว่าเยื่อบางหลังปรับปรุงผิวพลาสติกจะมีค่าความนำประจุไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ส่วนค่าอิมพีแดนซ์(ความต้านทาน)มีค่าลดลง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สัปดาห์การแพร่และอัตราส่วนสภาพการซาบซึมได้ของ ไอออนเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเมื่อเทียบกับเยื่อบางชุดควบคุมและจากผลพบว่าการปรับปรุงที่กำลังของพลาสติก 5 วัตต์เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน

4.2.6 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันจากสเปกตรัม ATR-FTIR ของเยื่อบาง

จากรูปที่ 4.17 แสดงสเปกตรัม ATR-FTIR และหมู่ฟังก์ชันของผลทดสอบของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 1, 5, 10 วัตต์ ตามลำดับ และ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (0 วัตต์) โดยผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงหมู่ฟังก์ชันหลักของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดชุดควบคุมที่ได้อ่านจากพีคของสเปกตรัม ATR-FTIR ซึ่งได้ชี้ให้เห็นว่า ที่เลขคลื่น 980cm^{-1} คือหมู่ $-\text{COC}-$ (symmetric stretching), ที่เลขคลื่น 1055cm^{-1} คือหมู่ $-\text{SO}_3-$ (symmetric stretching), ที่เลขคลื่น 1160 และ 1200cm^{-1} คือหมู่ $-\text{CF}_2-$ (symmetric stretching), ที่เลขคลื่น 1220cm^{-1} คือหมู่ $-\text{SO}_3-$ (asymmetric stretching) และ ที่เลขคลื่น 1305cm^{-1} คือหมู่ $-\text{CF}_3-$ (stretching) ส่วนผลของพีคสเปกตรัม ATR-FTIR ของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าหมู่ของซัลโฟนิกแอซิด ($-\text{SO}_3-$ asymmetric stretching) ที่เลขคลื่น 1220cm^{-1} และหมู่ $-\text{CF}_2-$ (symmetric stretching) ที่เลขคลื่น 1160cm^{-1} และ 1200cm^{-1} มีความหนาแน่นของพีคลดลงเมื่อเพิ่มกำลังของพลาสมาที่ใช้ปรับปรุงเยื่อบางนอกจากนี้ยังพบว่ามีหมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นมาคือ หมู่ $-\text{OH}$ (bending) ที่เลขคลื่น 711cm^{-1} เฉพาะเยื่อบางที่ปรับปรุงด้วยพลาสมาที่กำลังของพลาสมา 5 และ 10 วัตต์ ส่วนที่กำลังของพลาสมา 1 วัตต์และ เยื่อบางชุดควบคุมมีหมู่ $-\text{OH}$ (bending) น้อยมากหรือแทบจะไม่ปรากฏเลย และ นอกจากนั้นยังพบว่ามีหมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มสูงขึ้นมาจากเดิมอีกคือ หมู่ C-O (stretching) ที่เลขคลื่น 1017cm^{-1} โดยพบว่าเยื่อบางที่ปรับปรุงด้วยพลาสมาที่กำลังของพลาสมา 1 วัตต์ มีหมู่ C-O (stretching) มากที่สุด ส่วนที่กำลังของพลาสมา 5 วัตต์และ ชุดควบคุมมีปริมาณใกล้เคียงกัน และที่กำลังของพลาสมา 10 วัตต์มีปริมาณน้อยสุด

จากผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าการปรับปรุงด้วยพลาสมาได้ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิลบนผิวของเยื่อบางเพิ่มขึ้นซึ่งหมู่เหล่านี้ก่อนข้างมีประจุเป็นลบ และ ถูกสะสมบนพื้นผิวของเยื่อบางเพิ่มขึ้นด้วย ด้วยเหตุนี้อัตราการแพร่และการแลกเปลี่ยนของโพแทสเซียมไอออน (K^+) และคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ผ่านเยื่อบางจึงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.17 สเปกตรัม ATR-FTIR ของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสมา 1, 5, 10 วัตต์ ตามลำดับ และเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (0 วัตต์)

เมื่อพิจารณาผลที่ได้นี้จะสอดคล้องกับผลจากสเปกตรัมอิมพีแดนซ์ที่ลดลงซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.11 และการเพิ่มขึ้นสเปกตรัมความนำประจุไฟฟ้าและสเปกตรัมการเก็บประจุไฟฟ้าซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.12 และ 4.13 โดยผลที่ได้ดังกล่าวยังสอดคล้องกับสัคัยการแพร่และ

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกด้วยว่าเยื่อบางปรับปรุงด้วยพลาสติกมีอัตราส่วนของสภาพขั้วของไอออน และค่าความเก็บประจุไฟฟ้ามากกว่าเยื่อบางชุดควบคุมและจากผลพบว่าการปรับปรุงที่กำลังของพลาสติก 5 วัตต์เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดซึ่งสรุปจากเหตุผลข้างต้นนี้

ตารางที่ 4.6:เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านที่หุ้มฟังก์ชันต่างๆของของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิด ที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสติกความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสติก 1, 5, 10 วัตต์ ตามลำดับ และ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (0 วัตต์)

Wavenumber (cm ⁻¹)	Functional group	% Transmittance			
		PFSA - 0W	PFSA - 1W	PFSA - 5W	PFSA - 10W
1220	-SO ₃ -	75.1092	75.5166	76.0306	77.0648
1200	-CF ₂ -	74.3012	74.8922	75.0931	76.1764
1160	-CF ₂ -	69.1789	69.5621	70.0497	71.2195
1017	-C-O	97.2329	96.4182	97.3708	97.9804
711	-OH	99.1374	99.8087	97.8911	98.1613

จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบแต่ละวิธี สามารถสรุปได้ว่าเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีสามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบางเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสติกความดันบรรยากาศที่กำลังของพลาสติก 1, 5, 10 วัตต์ ตามลำดับ และ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (0 วัตต์) โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาค่าอิมพีแดนซ์ค่าความนำประจุไฟฟ้า และ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า โดยใช้ความถี่ในช่วง 0.1-300 kHz โดยผลที่ได้จากเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีพบว่าเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสติกมีอัตราการแพร่และแลกเปลี่ยนไอออนโพแทสเซียมไอออน (K⁺)และคลอไรด์ไอออน (Cl⁻)ได้มากกว่าเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดชุดควบคุม โดยมีผลของศักย์การแพร่ และ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก รวมทั้งผลที่ได้จากสเปกตรัม ATR-FTIR ยืนยันว่าการปรับปรุงผิวด้วยพลาสติกมีผลการเพิ่มขึ้นของประจุบริเวณพื้นผิวของเยื่อบางเนื่องจากพลาสติกซึ่งสาเหตุเหล่านี้ทำให้การแพร่และแลกเปลี่ยนไอออนผ่านเยื่อบางได้มากขึ้นและจากผลที่ได้สรุปได้ว่าเยื่อบางที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพลาสติกที่กำลังของพลาสติก 5 วัตต์เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุด โดยมีประสิทธิภาพดีกว่าเยื่อบางชุดควบคุมอยู่ 36%

4.3 การศึกษาอิทธิพลของการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าในการวัดของเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีสำหรับวิเคราะห์คุณลักษณะของเยื่อบางโคไลซาน

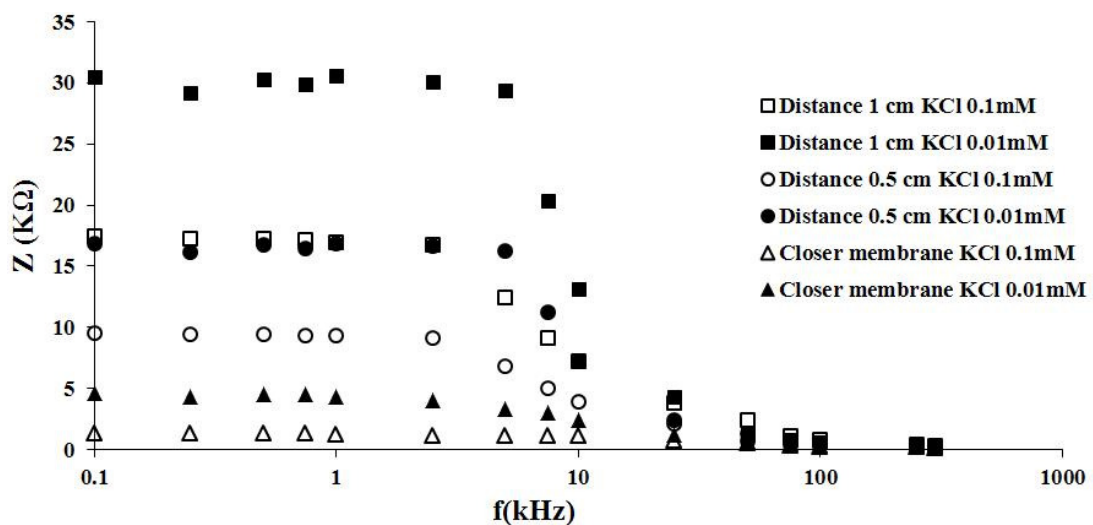
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าในระบบการวัดของเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีเพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของเยื่อบางโคไลซานก่อนและหลังการเปลี่ยนตำแหน่งการวัดโดยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีจะใช้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้กับเยื่อบางจะมีขนาด 2 โวลต์จากแหล่งจ่าย และใช้ช่วงของความถี่ของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับในช่วง 0.1-300 kHz ในการทดสอบ โดยเยื่อบางโคไลซานที่เตรียมมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 400,000 MW และมีการกำจัดหมู่อะซิดิลเป็น 78% (DDA) โดยเยื่อบางโคไลซานชุดควบคุมมีความหนา 0.05 มิลลิเมตรจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ามีหลายงานที่ประสบปัญหาการวัดอิมพีแดนซ์ของเยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เนื่องจากการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบนั้นมีระยะห่างจากตัวเยื่อบางที่ต้องการทดสอบ ทำให้เกิดอิมพีแดนซ์ส่วนเกินที่มาจากละลายอิเล็กโทรไลต์ (Z_{eff}) ซึ่งส่งผลต่อการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของเยื่อบาง (Z_{mem}) ที่ไม่ถูกต้องและแม่นยำสามารถพิจารณาได้จากวงจรสมมูลของเยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ได้แสดงในรูปที่ 2.6 ในบทที่ 2 ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาอิทธิพลของการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าของเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีในการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบให้อยู่ใกล้เยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มากที่สุดเพื่อลดค่าอิมพีแดนซ์ส่วนเกินทำให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ของเยื่อบาง (Z_{mem}) ที่ถูกต้องและแม่นยำ และนอกจากนั้นแล้วยังทำการทดสอบศักย์การแพร่ของเยื่อบางเพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลกับเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีเกี่ยวกับอัตราการแพร่และแลกเปลี่ยนไอออนผ่านเยื่อบางไปยังขั้วไฟฟ้าที่ไว้วัดที่การวางของตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าที่ต่าง ๆ กัน

สำหรับเยื่อบางโคไลซานที่ใช้ในการทดสอบจะถูกทดสอบใน สารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM และ 0.01mM สำหรับศึกษาอิทธิพลของการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าในการวัดของเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี ซึ่งผลที่ได้ในเบื้องต้นพบว่าขนาดอิมพีแดนซ์ของเยื่อบางโคไลซานที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร, 0.5 เซนติเมตร และแนบชิดเยื่อบาง (0 เซนติเมตร) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM มีขนาดเป็น 17.2 และ 9.35 และ 1.3 กิโลโอห์ม ส่วนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.01mM มีขนาดเป็น 30.1 และ 16.61 และ 4.5 กิโลโอห์ม นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความนำประจุไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางโคไลซานที่ประชิดเยื่อบางมีค่ามากกว่าเยื่อบางโคไลซานที่ตำแหน่งของขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตรอยู่ประมาณ 90% นอกจากนี้ผลทดสอบศักย์การแพร่ของเยื่อบางได้ยืนยันว่าเยื่อบางโคไลซานที่มีขั้วไฟฟ้าแนบชิดเยื่อบาง มีอัตราการแพร่และแลกเปลี่ยนโพแทสเซียมไอออน (K^+) และคลอ

ไรต์ไอออน (Cl⁻)ไปยังขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตรวจสอบได้มากกว่าระบบการวัดที่มีขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตรและ 0.5 เซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีโดยรายละเอียดของผลทดสอบได้แสดงดังต่อไปนี้

4.3.1 อิมพีแดนซ์ของเยื่อบาง (Z)

ในการศึกษาอิมพีแดนซ์ (Z) ของเยื่อบางโคโคซานที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร (Distance 1cm) , 0.5 เซนติเมตร (Distance 0.5 cm) และ แนบชิดเยื่อบาง (Closer membrane) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM และ 0.01mM ได้แสดงในรูปที่ 4.18 เมื่อพิจารณาศึกษาจากอิมพีแดนซ์ที่คงที่ในช่วงความถี่ 0.1-1 kHz พบว่าค่าอิมพีแดนซ์ของเยื่อบางโคโคซานที่ตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร, 0.5 เซนติเมตร และ แนบชิดเยื่อบาง (0 เซนติเมตร) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM มีขนาดเป็น 17.2 และ 9.35 และ 1.3 กิโลโอห์มตามลำดับ

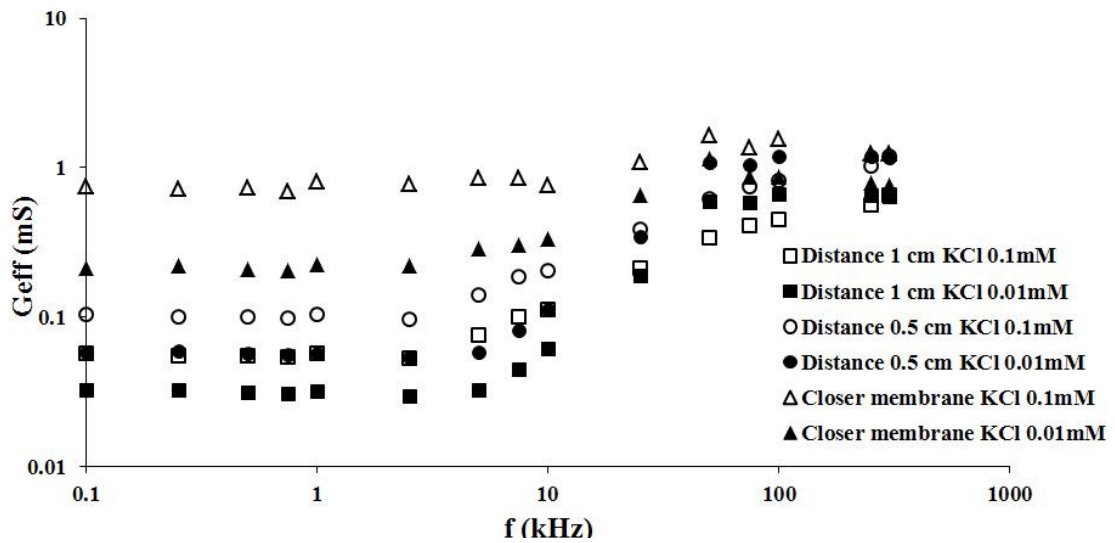


รูปที่ 4.18 อิมพีแดนซ์ (Z) ของเยื่อบางโคโคซานที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร (Distance 1cm) , 0.5 เซนติเมตร (Distance 0.5 cm) และ แนบชิดเยื่อบาง (Closer membrane) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM และ 0.01mM

ส่วนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.01mM มีขนาดเป็น 30.1 และ 16.61 และ 4.5 กิโลโอห์ม ตามลำดับ และ ที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ความเข้มข้น 0.1mM มีค่าอิมพีแดนซ์น้อยกว่าที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ความเข้มข้น 0.01mM ซึ่งให้ผลที่เหมือนกันกับ 4.1.2.1 ที่ได้อภิปรายผลไปแล้ว จากผลที่ศึกษาได้ชี้ให้เห็นว่าระบบการวัดที่ตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าแบบชิดเยื่อบางจะมีค่าอิมพีแดนซ์ (ความต้านทาน) ที่ลดลงอย่างมาก เนื่องจากตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบที่อยู่ใกล้เยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มากๆ ส่งผลทำให้อิมพีแดนซ์ส่วนเกินที่มาจากละลายอิเล็กโทรไลต์ (Z_{eff}) ลดลงตามไปด้วย ทำให้อัตราการแพร่และแลกเปลี่ยนไอออนผ่านเยื่อบางไปยังขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตรวจสอบเพิ่มมากขึ้น

4.3.2 ค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบาง (G_{eff})

จากรูปที่ 4.19 แสดงค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบางไคโตซานที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร (Distance 1cm) , 0.5 เซนติเมตร (Distance 0.5 cm) และ แนบชิดเยื่อบาง (Closer membrane) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM และ 0.01mM เมื่อพิจารณาศึกษาจากค่าความนำประจุไฟฟ้าในช่วงความถี่ 0.1-1 kHz พบว่าค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบางไคโตซานที่ตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร, 0.5 เซนติเมตร และ แนบชิดเยื่อบาง (0 เซนติเมตร) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM มีค่าเป็น 0.056 และ 0.102 และ 0.74mS ตามลำดับ ส่วนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.01mM มีขนาดเป็น 0.032 และ 0.058 และ 0.21 mS ตามลำดับ และ ที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ความเข้มข้น 0.1mM มีค่าความนำประจุไฟฟ้ามากกว่าที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ความเข้มข้น 0.01mM ซึ่งให้ผลที่เหมือนกันกับ 4.1.2.2 ที่ได้อภิปรายผลไปแล้ว จากผลที่ได้ศึกษาชี้ให้เห็นว่าระบบการวัดที่ตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าแบบชิดเยื่อบางจะมีค่าความนำประจุไฟฟ้ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการวัดที่ตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง เนื่องตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มากขึ้น ส่งผลต่อการตรวจจับการแพร่และแลกเปลี่ยนไอออนที่ผ่านเยื่อบางของขั้วไฟฟ้าได้มากขึ้นซึ่งผลนี้สอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์ (ความต้านทาน) ที่ลดลงจะส่งผลให้ค่าความนำประจุไฟฟ้าสูงขึ้นด้วยสำหรับระบบการวัดที่ตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าแบบชิดเยื่อบาง

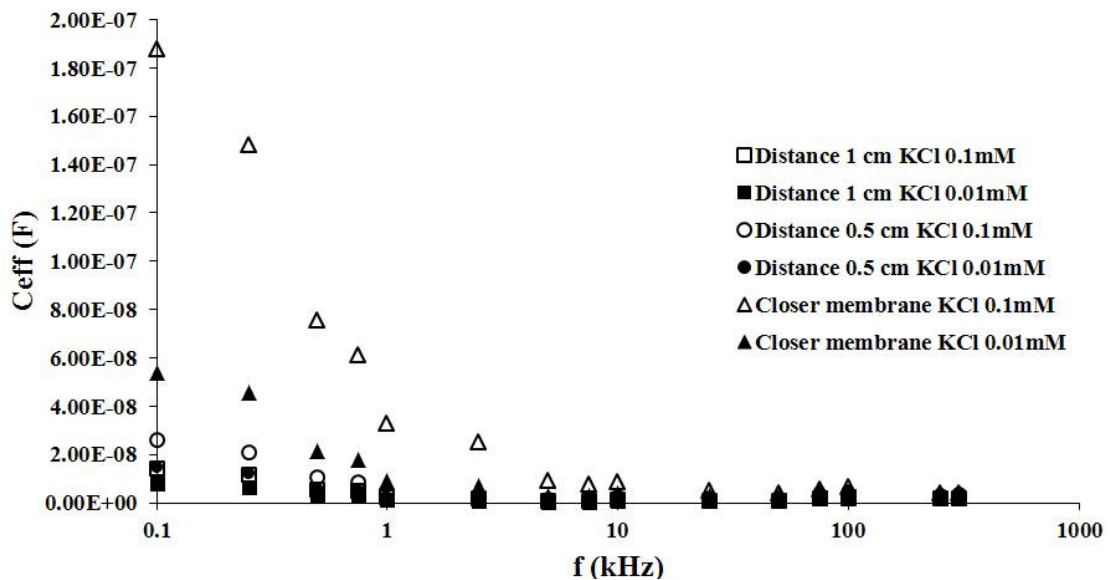


รูปที่ 4.19 ค่าความนำประจุไฟฟ้าของเยื่อบาง (G_{eff}) ไคโตซานที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร (Distance 1cm) , 0.5 เซนติเมตร (Distance 0.5 cm) และ แนบชิดเยื่อบาง (Closer membrane) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM และ 0.01mM

4.3.3 ค่าการเก็บประจุของเยื่อบาง (C_{eff})

ผลของค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางไคโตซานที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร (Distance 1cm) , 0.5 เซนติเมตร (Distance 0.5 cm) และ แนบชิดเยื่อบาง (Closer membrane) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM และ 0.01mM ได้แสดงในรูปที่ 4.20 เมื่อพิจารณาศึกษาพบว่าค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางไคซานที่ตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร, 0.5 เซนติเมตร และ แนบชิดเยื่อบาง (0 เซนติเมตร) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM มีค่าเป็น 1.29×10^{-8} F และ 2.35×10^{-8} F และ 1.68×10^{-7} F ตามลำดับ ส่วนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.01mM มีค่าเป็น 7.46×10^{-9} F และ 1.35×10^{-8} F และ 4.97×10^{-8} F ตามลำดับ และ ที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM มีค่าการเก็บประจุไฟฟ้ามากกว่าที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.01mM ซึ่งให้ผลที่เหมือนกันกับ 4.1.2.3 ที่ได้อภิปรายผลไปแล้วจากผลที่ได้ศึกษาชี้ให้เห็นว่าระบบการวัดที่ตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าแนบชิดเยื่อบางจะมีค่าการเก็บประจุไฟฟ้ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการวัดที่ตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง เมื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากค่าอิมพีแดนซ์และค่าความนำประจุไฟฟ้าพบว่าอัตราการแพร่และแลกเปลี่ยนไอออนผ่านเยื่อบางไปยังขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตรวจสอบเพิ่มมากขึ้นซึ่งหมายความว่าค่าที่

เตอร์ไอออนบริเวณที่ใกล้ผิวเยื่อบางต้องมีมากด้วยเช่นกันด้วยเหตุนี้ค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางไคโตซานจึงสูงขึ้นด้วยสำหรับระบบการวัดที่ตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าแนบชิดเยื่อบาง



รูปที่ 4.20 ค่าการเก็บประจุของเยื่อบาง (C_{eff}) ไคโตซานที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร (Distance 1cm) , 0.5 เซนติเมตร (Distance 0.5 cm) และ แนบชิดเยื่อบาง (Closer membrane) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM และ 0.01mM

คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปของเยื่อบางไคโตซานที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร, 0.5 เซนติเมตร และ แนบชิดเยื่อบาง (0 เซนติเมตร) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM และ 0.01mM ได้ถูกแสดงและเปรียบเทียบในตารางที่ 4.7 พบว่าค่าความนำประจุไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางไคโตซานที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าแนบชิดเยื่อบางมีค่ามากกว่าระบบการวัดที่ตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง เนื่องจากระบบการวัดที่ตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบที่อยู่ใกล้เยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มากส่งผลทำให้อิมพีแดนซ์ส่วนเกินที่มาจากละลายอิเล็กโทรไลต์ (Z_{cp}) ลดลงตามไปด้วยส่งผลต่ออัตราการแพร่และแลกเปลี่ยนไอออนผ่านเยื่อบางไปยังขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตรวจสอบเพิ่มมากขึ้นด้วยเหตุนี้ค่าความนำประจุไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุไฟฟ้าจึงมีค่าที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าอิมพีแดนซ์ส่วนเกินที่มาจากละลายอิเล็กโทรไลต์ (Z_{cp}) ลดลงเป็น 1.58 กิโลโอห์ม/มิลลิเมตร และ 2.56 กิโลโอห์ม/มิลลิเมตร ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM และ 0.01mM ตามลำดับและผลการทดสอบที่ผ่านมาช่วย

ยืนยันว่าตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้าของระบบวัดมีผลต่อการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบาง

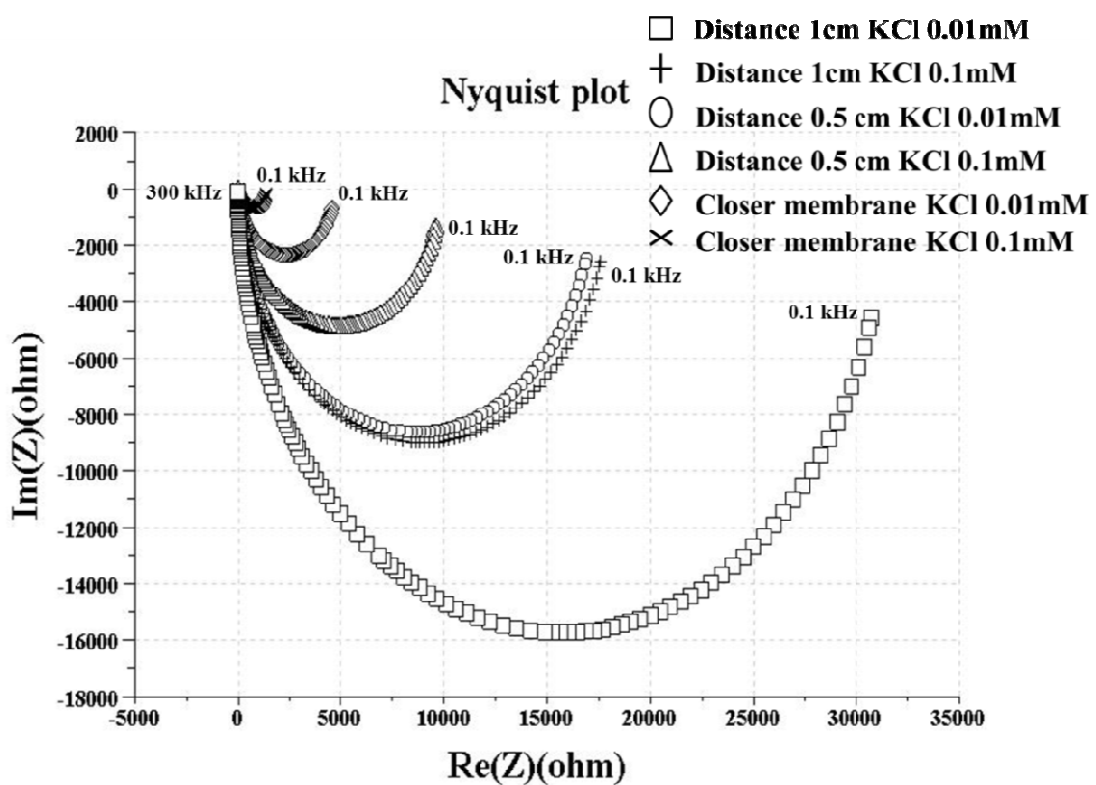
ตารางที่ 4.7: คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบางโพลีเอทิลีนที่ระบบการมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร, 0.5 เซนติเมตร และ แนบชิดเยื่อบาง (0 เซนติเมตร) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM และ 0.01mM

Electrical properties	KCl 0.1mM	KCl 0.01mM
Distance 1 cm		
Impedances	17.19 k Ω	30.10 k Ω
Conductance	0.056 mS	0.032 mS
Capacitance	1.29×10^{-8} F	7.46×10^{-9} F
Distance 0.5 cm		
Impedances	9.35k Ω	16.61k Ω
Conductance	0.102mS	0.058mS
Capacitance	2.35×10^{-8} F	1.35×10^{-8} F
Closer membrane (0 cm)		
Impedances	1.31 k Ω	4.47 k Ω
Conductance	0.74 mS	0.21 mS
Capacitance	1.68×10^{-7} F	4.97×10^{-8} F

4.3.4 Nyquist plots ของเยื่อบาง

สเปกตรัมของอิมพีแดนซ์ในรูปแบบ Nyquist plot ของเยื่อบางโพลีเอทิลีนที่ระบบการมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร, 0.5 เซนติเมตร และ แนบชิดเยื่อบาง (0 เซนติเมตร) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM และ 0.01mM ได้แสดงในรูปที่ 4.21 เมื่อพิจารณาจะเห็นว่าความต้านทานในส่วนจริงและส่วนจินตภาพของเยื่อบางโพลีเอทิลีนที่ตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตรและ 0.5 เซนติเมตรจะมีขนาดใหญ่กว่าเยื่อบางโพลีเอทิลีนที่ตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าแนบชิดเยื่อบางทุกค่าความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ นอกจากนี้พบว่าที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) 0.01mM จะมีความต้านทานในส่วนจริงและส่วนจินตภาพมากกว่าที่ความเข้มข้น 0.1mM จากผลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าเยื่อบางโพลีเอทิลีนที่ระบบวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าแนบชิดเยื่อบางมีค่าความนำ

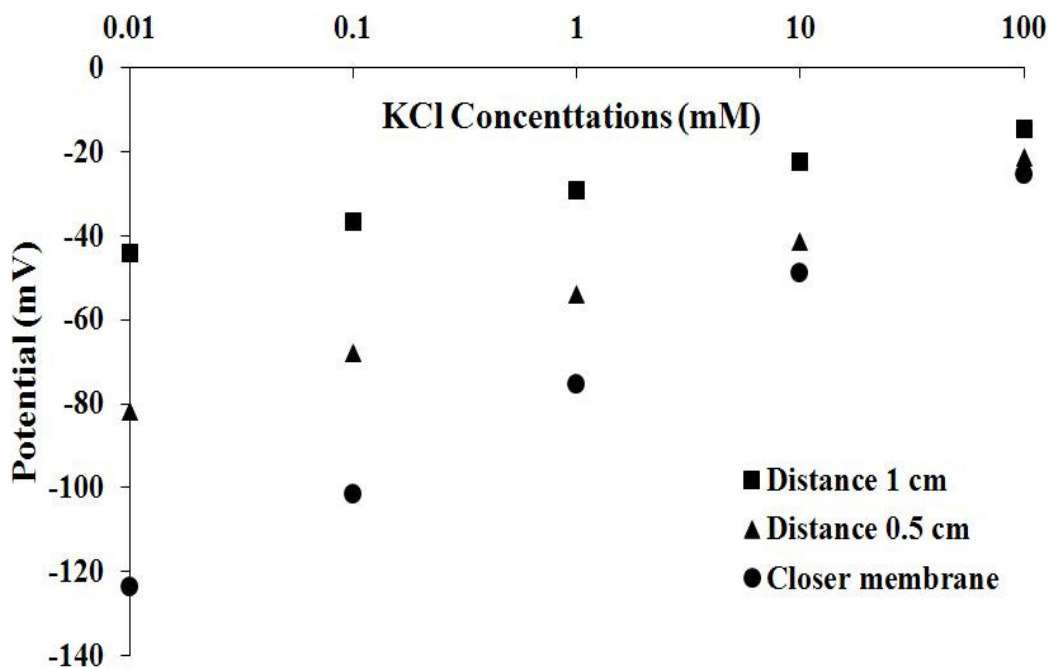
ประจุไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุไฟฟ้ามากกว่าเยื่อบาง ไลโคซานที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตรและ 0.5 เซนติเมตร และ ที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคลอไรด์(KCl)0.1mM มีค่าความนำประจุไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุไฟฟ้ามากกว่าที่ความเข้มข้น 0.01mMจากเหตุผลในหัวข้อ 4.1.3 และ 4.2.2 ที่ได้อภิปรายผลไปแล้วโดยผลที่ได้จากสเปกตรัมของอิมพีแดนซ์ในรูปแบบNyquist plotมีความสอดคล้องกันกับค่าอิมพีแดนซ์ ค่าความนำประจุไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุไฟฟ้าในรูปแบบของbode plot



รูปที่ 4.21 Nyquist plots ของเยื่อบาง ไลโคซานที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร (Distance 1cm) , 0.5 เซนติเมตร (Distance 0.5 cm) และ แนบชิดเยื่อบาง (Closer membrane) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM และ 0.01mM

4.3.5 ศักย์การแพร่ของเยื่อบาง

จากผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าศักย์การแพร่ของเยื่อบางโคโตซานที่ระบบวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าแนบชิดเยื่อบางมีค่ามากกว่าเยื่อบางโคโตซานที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตรและ 0.5 เซนติเมตรสำหรับทุกคู่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) และ ค่าของศักย์การแพร่ของเยื่อบางจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเยื่อบางอยู่ในคู่ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันมากๆ ซึ่งผลได้แสดงในรูปที่ 4.22 เนื่องจากระบบวัดที่มีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าแนบชิดเยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มากส่งผลต่ออัตราการแพร่และแลกเปลี่ยนไอออนผ่านเยื่อบางไปยังขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตรวจสอบเพิ่มมากขึ้นด้วยเหตุนี้จึงมีศักย์การแพร่ของเยื่อบางโคโตซานที่สูงขึ้นมาก นอกจากนี้ยังอธิบายผลของศักย์การแพร่ของเยื่อบางโคโตซานที่ให้ศักย์เป็นลบได้ว่า มีสาเหตุจากคลอไรด์ไอออน(Cl⁻) ที่เคลื่อนที่ผ่านจากด้านหนึ่งของชุดทดลองผ่านเยื่อบางไปยังด้านสองของชุดทดลองได้เร็วกว่าโพแทสเซียมไอออน (K⁺) จึงเกิดความแตกต่างของไอออนเกิดขึ้น ซึ่งสิ่งนี้ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นและมีค่าเป็นลบซึ่งเหมือนกันกับในหัวข้อที่ 4.1.4



รูปที่ 4.22 ศักย์การแพร่ของเยื่อบางโคโตซานที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร (Distance 1cm) , 0.5 เซนติเมตร (Distance 0.5 cm) และ แนบชิดเยื่อบาง (Closer membrane) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) ที่มีความแตกต่างของความเข้มข้น; 100/0.01, 100/0.1, 100/1.0, 100/10 และ 100/100 mM

อัตราส่วนสภาพการซาบซึมได้ของไอออนในเยื่อบาง ($\beta = P_{Cl}/P_K$) สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ 27 ในบทที่ 2 โดยผลของอัตราส่วนสภาพการซาบซึมได้ของไอออนของเยื่อบางไคโตซานที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร, 0.5 และ แนบชิดเยื่อบาง ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 ซึ่งผลจากตารางชี้ให้เห็นว่าเยื่อบางไคโตซานที่มีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าแนบชิดเยื่อบางมีอัตราส่วนสภาพการซาบซึมของไอออนเพิ่มขึ้นซึ่งเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 0.5 เซนติเมตร และ 1 เซนติเมตร มีค่าเป็น 120.78 และ 64.23 และ 5.53 ในกลุ่มของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้น 100/0.01 mM และ เพิ่มขึ้นทุกคู่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ด้วยเหตุนี้ระบบวัดที่มีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าแนบชิดเยื่อบางจึงมีศักย์การแพร่ที่สูงขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากระบบการวัดที่มีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตรและ 0.5 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.8: อัตราส่วนสภาพการซาบซึมได้ของไอออน, $\beta = P_{Cl}/P_K$ ที่ได้มาจากเยื่อบางไคโตซานที่ระบบการวัดมีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง 1 เซนติเมตร (Distance 1cm) , 0.5 เซนติเมตร (Distance 0.5 cm) และ แนบชิดเยื่อบาง (Closer membrane)

KCl concentration	$\beta = P_{Cl}/P_K$, Distance 1 cm	$\beta = P_{Cl}/P_K$, Distance 0.5 cm	$\beta = P_{Cl}/P_K$, Closer membrane
0.01mM	5.53	64.23	120.78
0.1mM	4.15	25.57	53.46
1mM	3.17	14.45	22.78
10mM	2.98	9.35	18.95

จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบแต่ละวิธีพบว่าศักย์การแพร่และอัตราส่วนสภาพการซาบซึมได้ของไอออนมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี โดยผลทดสอบชี้ให้เห็นว่าระบบวัดที่มีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าแนบชิดเยื่อบางมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบการวัดที่มีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง อยู่ 90% เนื่องจากการปรับตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบที่อยู่ใกล้เยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มาก ส่งผลทำให้ความต้านทานส่วนเกินที่มาจากละลายอิเล็กโทรไลต์ลดลงตามไปด้วย ทำให้อัตราการแพร่และแลกเปลี่ยนไอออนผ่านเยื่อบางไปยังขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตรวจสอบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลนี้ได้ยืนยันจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ลดลง และศักย์การแพร่รวมถึงอัตราส่วนสภาพการซาบซึมได้ของไอออนที่เพิ่มขึ้นสำหรับระบบการวัดที่ปรับตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าให้แนบชิดเยื่อบาง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

เยื่อบางโค โคซานและเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิคแอซิดที่มีการปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคทางไอออนบีมและพลาสมา ซึ่งผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบางโค โคซานและเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิคแอซิดมีผลสรุปได้ดังนี้ นอกจากนี้ผลทดสอบอิทธิพลของการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าในการวัดของเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีก็ได้แสดงให้เห็นไว้เช่นกัน

5.1 การวิเคราะห์เยื่อบางโค โคซานที่มีการปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี

จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบแต่ละวิธี สามารถสรุปได้ว่าเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีสามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบางโค โคซานที่ได้รับการปรับปรุงผิวจากอาร์กอนไอออนบีมกับชุดควบคุมและเปรียบเทียบกับเยื่อบางทางการค้าได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาค่าอิมพีแดนซ์ค่าความนำประจุไฟฟ้า และ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า โดยใช้ความถี่ในช่วง 0.1-300 kHz โดยที่ค่าเหล่านี้ยังขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์โดยที่ระดับความเข้มข้นมากๆจะทำให้ ค่าความนำประจุไฟฟ้า และ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า สูงขึ้นแต่ค่าอิมพีแดนซ์จะลดลง นอกจากนี้ผลที่ได้ก็แสดงให้เห็นว่าเยื่อบางโค โคซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมมีการแพร่ผ่านและแลกเปลี่ยนไอออนได้มากกว่าเยื่อบางโค โคซานชุดควบคุม โดยมีผลของศักย์การแพร่ และ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก รวมทั้งผลที่ได้จากสเปกตรัม ATR-FTIR ยืนยันว่าการปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมส่งผลทำให้มวลโมเลกุลของโค โคซานลดลงและมีการเพิ่มขึ้นของประจุบริเวณพื้นผิวของเยื่อบางเนื่องจากอาร์กอนไอออน (Ar⁺) ที่มาจากไอออนบีม ซึ่งสาเหตุเหล่านี้ทำให้อัตราการแพร่และแลกเปลี่ยนไอออนผ่านโซโพลีเมอร์ของเยื่อบางโค โคซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามเยื่อบางโค โคซานหลังปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนไอออนบีมก็ยังมีประสิทธิภาพที่ด้อยกว่าเยื่อบางทางการค้าอยู่ประมาณ 20%

5.2 การวิเคราะห์เยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่มีการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาที่ความดันบรรยากาศด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี

เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีที่ใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของเยื่อบางจะใช้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้กับเยื่อบางจะมีขนาด 2 โวลต์จากแหล่งจ่าย และใช้ช่วงของความถี่ของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับในช่วง 0.1-300 kHz โดยเยื่อบางที่ทดสอบจะถูกทดสอบใน สารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM ผลในเบื้องต้นที่ได้แสดงให้เห็นว่าขนาดอิมพีแดนซ์ของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงที่กำลังของพลาสมา 1, 5, 10 วัตต์ และชุดควบคุม(0 วัตต์)เป็น 9.76, 7.30, 8.04 และ 11.45 กิโลโอห์มตามลำดับ และพบว่าค่าความนำประจุไฟฟ้าและค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดที่ได้รับการปรับปรุงจากพลาสมาให้ผลที่ดีกว่าเยื่อบางเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิกแอซิดชุดควบคุมที่มากที่สุดอยู่ 36% นอกจากนี้ผลที่ได้เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและโครงสร้างของเยื่อบางจากเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี ศักยภาพพร่องของเยื่อบาง ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และ ATR-FTIR สเปกตรัมยืนยันว่าการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาที่ความดันบรรยากาศส่งผลทำให้มีการเพิ่มขึ้นของหมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิลบนผิวของเยื่อบางซึ่งหมู่เหล่านี้ค่อนข้างมีประจุเป็นลบ นอกจากนี้ยังทำให้มีการเพิ่มขึ้นของประจุบริเวณพื้นผิวของเยื่อบางด้วยเนื่องจากพลาสมา ซึ่งสาเหตุเหล่านี้ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการแพร่และแลกเปลี่ยนของโพแทสเซียมไอออน (K⁺)และคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ผ่านเยื่อบางหลังปรับปรุงด้วยพลาสมา โดยการปรับปรุงที่กำลังของพลาสมา 5 วัตต์เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดโดยมีประสิทธิภาพดีกว่าเยื่อบางชุดควบคุมอยู่ 36%

5.3 การศึกษาอิทธิพลของการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าในการวัดของเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีสำหรับวิเคราะห์คุณลักษณะของเยื่อบางไคโตซาน

จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบแต่ละวิธี พบว่าศักย์การแพร่และอัตราส่วนสภาพการซาบซึมได้ของไอออนมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีโดยผลทดสอบชี้ให้เห็นว่าระบบวัดที่มีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าแนบชิดเยื่อบางมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบการวัดที่มีตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าห่างจากเยื่อบาง อยู่ 90%เนื่องจากการปรับตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบที่อยู่ใกล้เยื่อบางในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มาก ส่งผลทำให้ความต้านทานส่วนเกินที่มาจากละลายอิเล็กโทรไลต์ ลดลงตามไปด้วย ทำให้อัตราการแพร่และแลกเปลี่ยนไอออนผ่านเยื่อบางไปยังขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตรวจสอบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลนี้ได้ยืนยันจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ลดลง โดยลดลงเป็น 1.58 กิโลโอห์ม/มิลลิเมตร และ 2.56 กิโลโอห์ม/มิลลิเมตรใน

สารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1mM และ 0.01mM ตามลำดับและ ศักย์การแพร่รวมถึงอัตราส่วนสภาพการซาบซิมได้ของไอออนที่เพิ่มขึ้นสำหรับระบบการวัดที่ปรับตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าให้แนบชิดเยื่อบาง

บรรณานุกรม

- รัชนก สังข์คำ. 2551. “คุณลักษณะของเยื่อบางโคโตซานที่ปรับปรุงผิวด้วยพลาสมา”, วิทยาศาสตร์
 มหำบัณฑิต, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- รวาวุฒิ พุทธิให้. 25๕๕. “การเตรียมและศึกษาคุณลักษณะของเยื่อบางโคโตซานโพลีเอเทอร์ซัลโฟน/
 โคโตซานเพื่อทำเป็นเยื่อกรองระดับอัลตรา”, วิทยาศาสตร์มหำบัณฑิต,
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- Charles, C., Ramdutt, D., Brault, P., Caillard, A., Bulla, D., Boswell, R., Rabat, H. and Dicks, A.
 2007. Low energy plasma treatment of a proton exchange membrane used for low
 temperature fuel cells. Plasma Phys. Control. Fusion ๕๑, A73–A79
- Lue, J.S., Hsiaw, S.Y. and Wei, T.C. 2007. Surface modification of perfluorosulfonic acid
 membranes with perfluoroheptane (C7F16)/argon plasma. Journal of Membrane Science
 305, 226–237
- Matsuoka, K., Chiba, S., Iriyama, Y., Abe, T., Matsuoka, M., Kikuchi, K. and Ogumi, Z.
 2008. Preparation of anion-exchange membrane by plasma polymerization and its use in
 alkaline fuel cells. Thin Solid Films 516, 3309–3313
- Wan, Y., Creber, K.A.M., Peppley, B. and Bui, V.T. 2003. Ionic conductivity of chitosan
 membranes. Polymer ๔๔, 1057–1065
- Coster, H.G.L., Chilcott, T.C. and Coster, A.C.F. 1996. Impedance spectroscopy of interfaces
 membranes and ultrastructures. Bioelectrochemistry and Bioenergetics ๕๐, 79-98.
- Bae, B., Kim, D., Kim, H.J., Lim, T.H., Oh, I.H. and Ha, H.Y. 2006. Surface Characterization of
 Argon-Plasma-Modified Perfluorosulfonic Acid Membranes. J. Phys. Chem. B, 110,
 ๒๕๐-๒๕๕
- Conrads, H. and Schmidt, M. 2000. Plasma generation and plasma sources. Plasma Sources Sci.
 Technol. 9, ๓๓1–๓๕๑
- Beattie, P.D., Orfino, F.P., Basura, V.I., Zychowska, K., Ding, J., Chuy, C., Schmeisser, J. and
 Holdcroft, S. 2001. Ionic conductivity of proton exchange membranes. Journal of
 Electroanalytical Chemistry 503, ๕–56
- Alkan, E., Kir, E. and Oksuz, L. 2008. Plasma modification of the anion-exchange membrane and
 its influence on fluoride removal from water. Separation and Purification Technology 61,

55–60

- Hakenjos, A., Zobel, M., Clausnitzer, J. and Hebling, C. 2006. Simultaneous electrochemical impedance spectroscopy of single cells in a PEM fuel cell stack. *Journal of Power Sources* 15, 360–363
- Veziroglu, T.N. 2005. *PEM Fuel Cells Theory and Practice Sustainable World Series*. Elsevier Inc, CHAPTER 8
- Orazem, M.E. and Tribollet, T. 2008. *Electrochemical impedance spectroscopy*. A John Wiley & Sons.
- Baker, R.W. 200. *Membrane Technology and Applications*. McGraw-Hill, Chapter 10, 373
- Wanichapichart, P., R. Sungkum, R., Taweepreda, W., Nisoa, M. 2009. Characteristics of chitosan membranes modified by argon plasmas. *Surface & Coatings Technology* 203, 2531–2535
- Wanichapichart, P. and Yu, L. 2007. Chitosan membrane filtering characteristics modification by N-ion beams. *Surface & Coatings Technology* 201, 8165–8169.
- Puthai, W., Wanichapichart, P. and Kaewpiboon, A. 2005. Effect of polyethylene glycol on characteristics of chitosan membranes. *Songklanakarin J. Sci. Technol* 27(1), 867-876.
- Canas A. and Benavente J. 2002. Electrochemical characterization of an asymmetric nanofiltration membrane with NaCl and KCl solutions: influence of membrane asymmetry on transport parameters. *Journal of Colloid and Interface Science* 26, 328-33
- Shi L.-S., Wang L.-Y. And Wang Y.-N. 2006. The investigation of argon plasma surface modification to polyethylene: Quantitative ATR-FTIR spectroscopic analysis. *European polymer Journal* 42, 1625-1633
- Ru L. and Jie-rong C. 2006. Studies on wettability of medical poly (vinyl chloride) by remote argon plasma. *Applied Surface Science* 252, 5076-5082.
- Kim, K.S., Lee, K.H., Choa, K. and Park, C.E. 2002. Surface modification of polysulfone ultrafiltration membrane by oxygen plasma treatment. *Journal of Membrane Science* 199, 135–15.
- Chilcott, T.C., Chan, M., Gaedt, L., Nantawisarakul, T., Fane, A.G. and Coster, H.G.L. 2002. Electrical impedance spectroscopy characterization of conducting membranes. *Journal of Membrane Science* 195, 153–167.

- Park, J.S., Choi, J.H., Woo, J.J. and Moon, S.H. 2006. An electrical impedance spectroscopic (EIS) study on transport characteristics of ion-exchange membrane systems. *Journal of Colloid and Interface Science* 300, 655–662.
- Alcaraz, A., Holdik, H., Ruffing, T., Ramirez, P. and Mafe, S. 1998. AC impedance spectra of bipolar membranes: an experimental study. *Journal of Membrane Science* 150, 3-56.
- Prakrajang, K., Sangwijit, K., Anuntalabhochai, S., Wanichapichart, P., Yu, L.D. 2011. Neutralized ion beam modification of cellulose membranes for study of ion charge effect on ion-beam-induced DNA transfer

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

Diffusion	Potential	CH Control		
Concentrations (mM)	V (mV) 1	V (mV) 2	V (mV) 3	CH Control
0.01	-44.5	-42.8	-45.3	-44.2
0.1	-35.7	-36.8	-37.5	-36.7
1	-29.8	-29.1	-28.5	-29.1
10	-23.4	-22.6	-21.1	-22.4
100	-14.5	-13.9	-14.7	-14.4

Diffusion	Potential	CH+Ar 120keV		
Concentrations (mM)	V (mV) 1	V (mV) 2	V (mV) 3	CH+Ar 120keV
0.01	-57.3	-59.5	-56.6	-57.8
0.1	-43.3	-45.6	-43.7	-44.2
1	-34.5	-36.7	-34.7	-35.3
10	-29.5	-27.8	-26.6	-27.9
100	-12.1	-13.3	-11.3	-12.23

Diffusion	Potential	Distance 1 cm		
Concentrations (mM)	V (mV) 1	V (mV) 2	V (mV) 3	Distance 1 cm
0.01	-44.5	-42.8	-45.3	-44.2
0.1	-35.7	-36.8	-37.5	-36.7
1	-29.8	-29.1	-28.5	-29.1
10	-23.4	-22.6	-21.1	-22.4
100	-14.5	-13.9	-14.7	-14.4

Diffusion	Potential	Closer membrane		
Concentrations (mM)	V (mV) 1	V (mV) 2	V (mV) 3	Closer membrane
0.01	-120.2	-128.9	-121.8	-123.6
0.1	-101.8	-102.2	-100.5	-101.5
1	-74.5	-76.7	-75.4	-75.5
10	-48.3	-47.9	-49.8	-48.7
100	-23.5	-26.2	-26.5	-25.4

Diffusion	Potential	Distance	0.5 cm		
Concentrations					
(mM)	V (mV) 1	V (mV) 2	V (mV) 3	Distance 0.5 cm	
0.01	-82.325	-79.18	-83.805	-81.8	
0.1	-66.045	-68.08	-69.375	-67.8	
1	-55.13	-53.835	-52.725	-53.9	
10	-43.29	-41.81	-39.035	-41.4	
100	-20.825	-21.715	-21.195	-21.2	

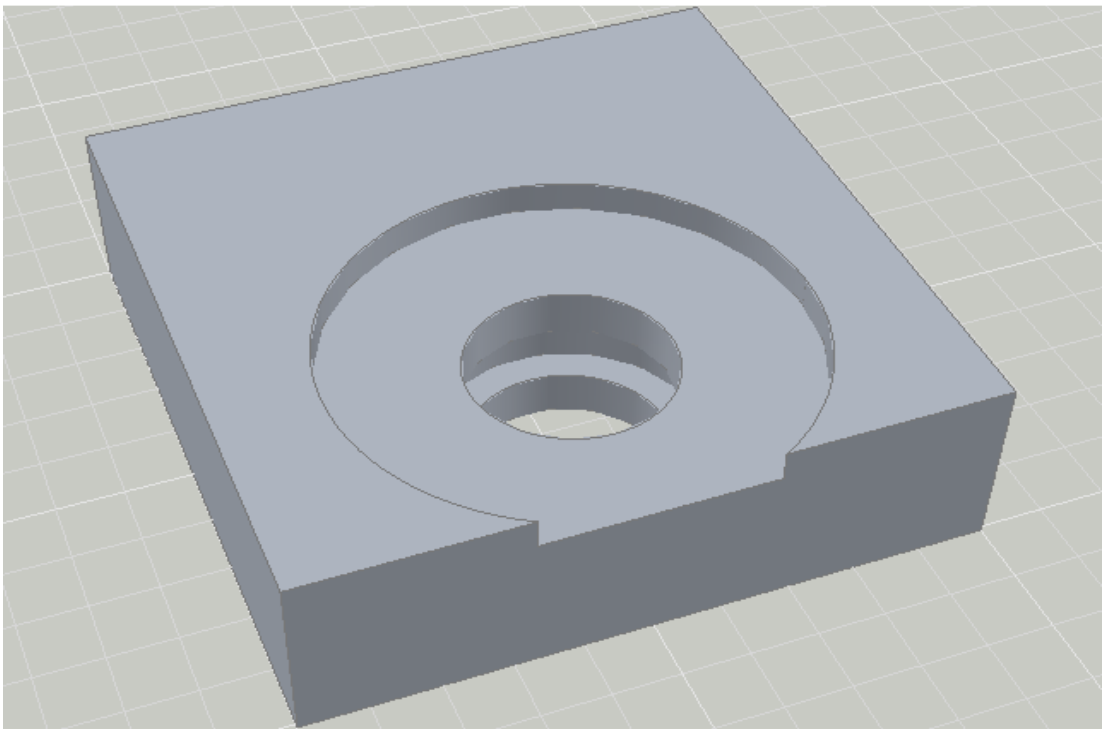
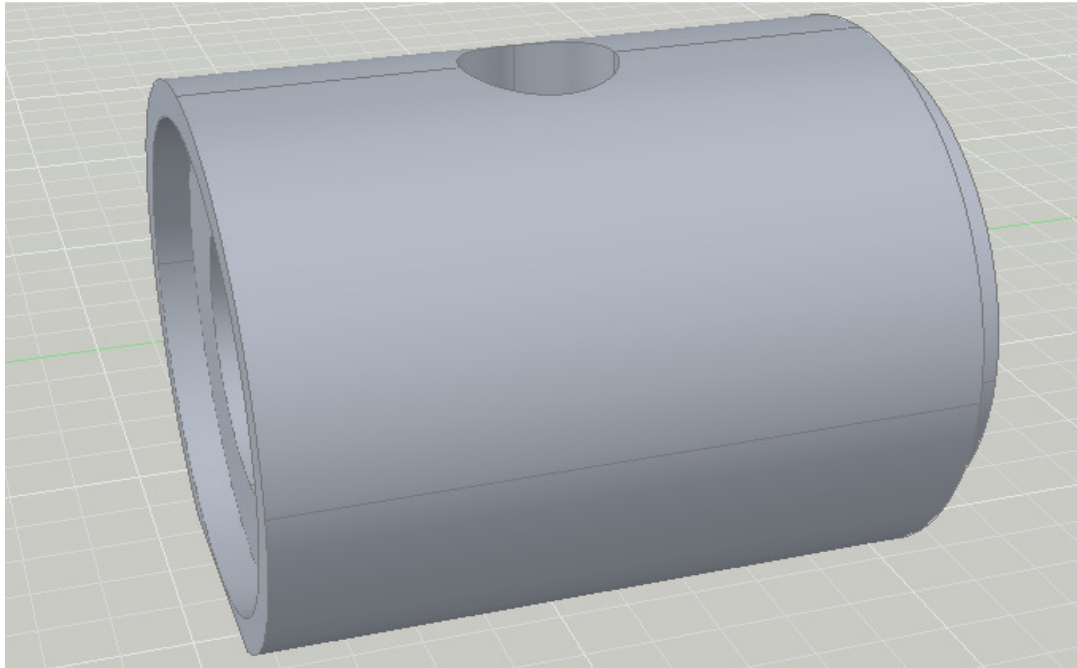
Diffusion	Potential	PSFA 0W			
Concentrations					
(mM)	V (mV) 1	V (mV) 2	V (mV) 3	PFSA - 0W	
0.01	144.8	150.5	142.3	145.8	
0.1	128.8	130.9	132.4	130.7	
1	91.7	89.3	96.6	92.5	
10	53.4	48.8	45.5	49.2	
100	17.4	8.8	14.2	13.5	

Diffusion	Potential	PSFA 1W			
Concentrations					
(mM)	V (mV) 1	V (mV) 2	V (mV) 3	PFSA - 1W	
0.01	158.6	155.3	157.4	157.1	
0.1	142.5	145.3	147.2	145	
1	94.5	100.8	97.2	97.5	
10	53.7	56.4	52.5	54.2	
100	13.6	14.3	15.9	14.6	

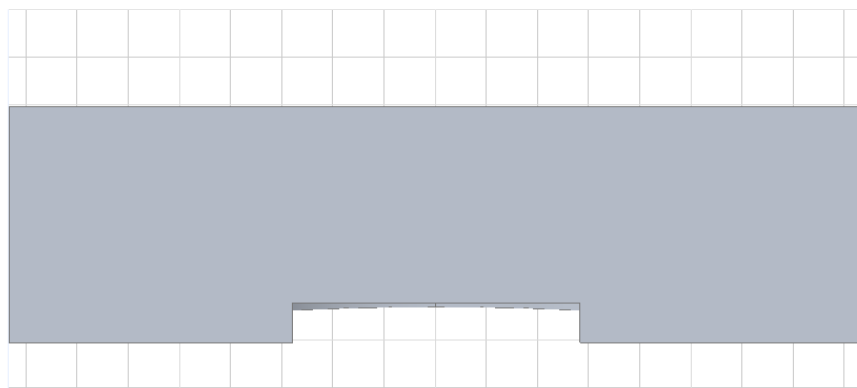
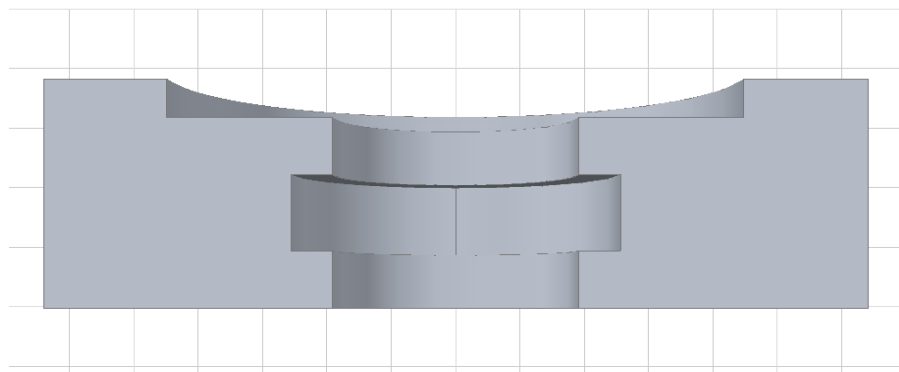
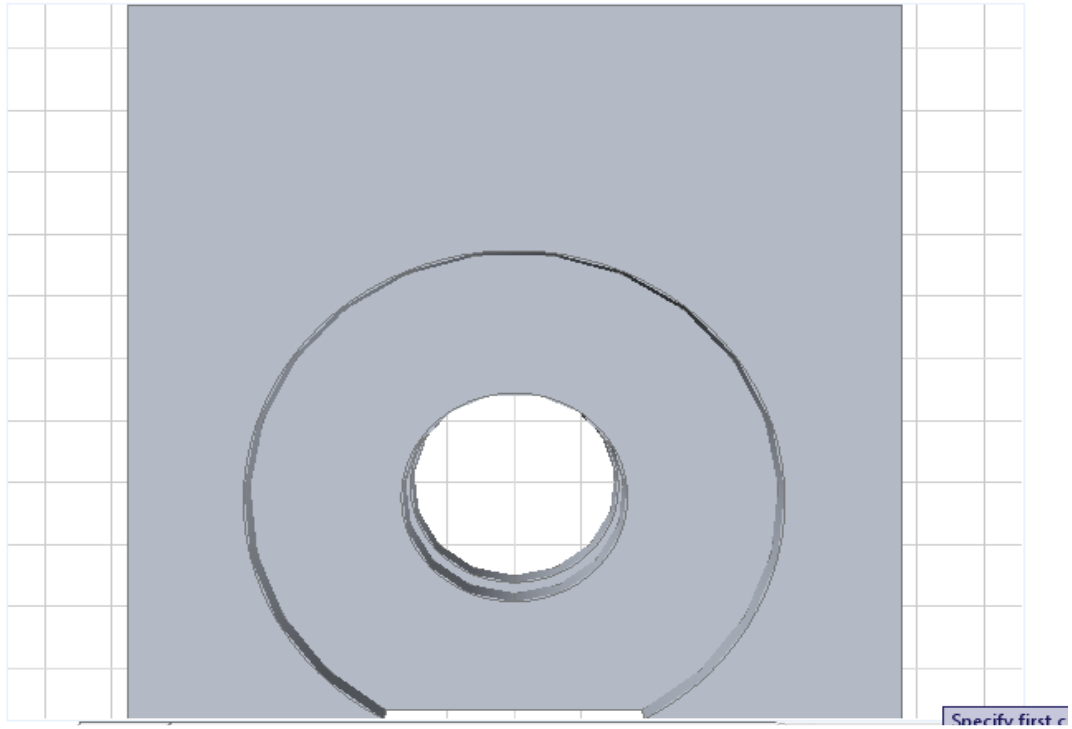
Diffusion	Potential	PSFA 5W			
Concentrations					
(mM)	V (mV) 1	V (mV) 2	V (mV) 3	PFSA - 5W	
0.01	180.4	182.7	179.9	181	
0.1	158.2	159.3	157.8	158.4	
1	109.2	113.3	115.2	112.6	
10	57.5	58.6	59.4	58.5	
100	15.3	17.3	16.5	16.4	

Diffusion	Potential	PSFA 10W			
Concentrations					
(mM)	V (mV) 1	V (mV) 2	V (mV) 3	PFSA - 10W	
0.01	164.3	159.7	168.6	164.2	
0.1	145.5	150.3	151.1	149	
1	108.3	102.6	105.3	105.4	
10	58.7	56.4	53.6	56.2	
100	19.7	21.2	16.2	19	

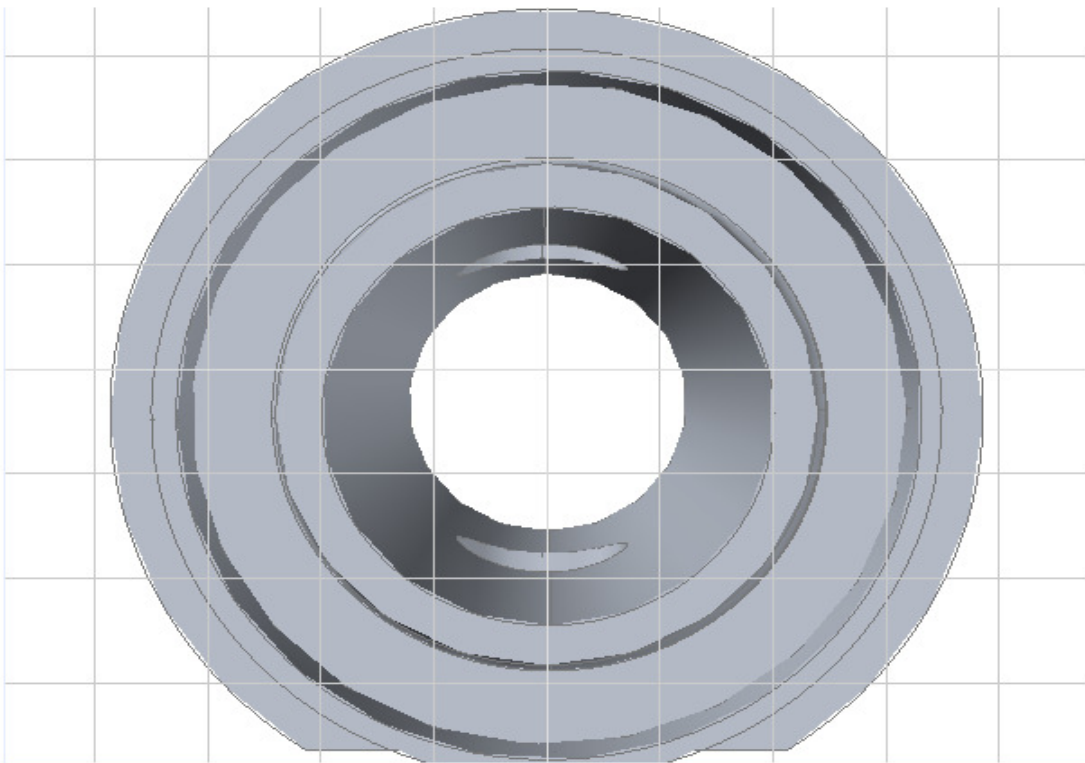
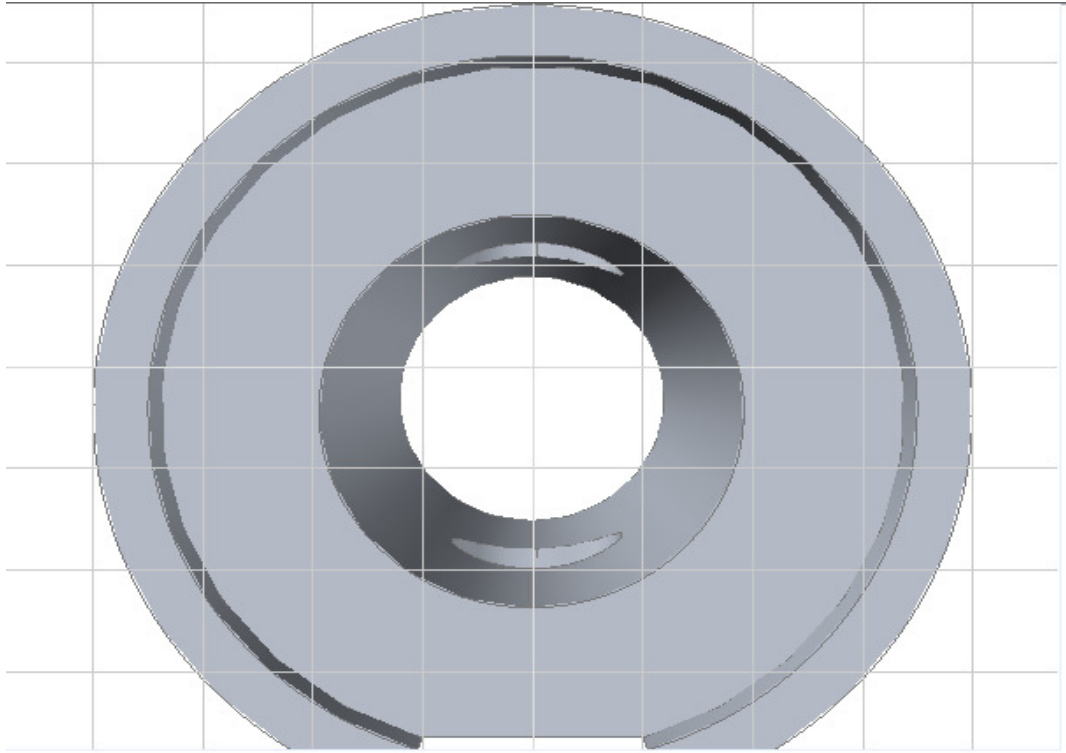
แบบชุดทดลองโดยรวมประกอบด้วยฝาปิดและตัวชุดทดลอง



ฝาปิดชุดทดลอง



ตัวชุดทดลอง



ภาคผนวก

Chitosan	R=11.93k	KCL	0.1mM	MW=4E+5	DDA=78%					
f	T	t	$\Delta\Phi$	Vm	VR	cos $\Delta\Phi$	sin $\Delta\Phi$	Geff (mS)	Ceff(F)	Z (k Ω)
100	1.00E-02	5.20E-03	3.27E+00	0.73	0.35	-0.99211	-0.12533	0.03987187	8.01662E-09	24.8825714
250	4.00E-03	2.20E-03	3.46E+00	0.71	0.35	-0.95106	-0.30902	0.03929846	8.1289E-09	24.2008571
500	2.00E-03	1.20E-03	3.77E+00	0.66	0.37	-0.80902	-0.58779	0.03801675	8.79197E-09	21.2805405
750	1.33E-03	8.40E-04	3.96E+00	0.64	0.42	-0.68383	-0.72965	0.03761612	8.51726E-09	18.1790476
1000	1.00E-03	6.30E-04	3.96E+00	0.63	0.41	-0.68455	-0.72897	0.03734274	6.32895E-09	18.3314634
2500	4.00E-04	2.40E-04	3.77E+00	0.61	0.41	-0.80902	-0.58779	0.04557967	2.1082E-09	17.7495122
5000	2.00E-04	1.10E-04	3.46E+00	0.59	0.42	-0.95106	-0.30902	0.05674965	5.86934E-10	16.7588095
7500	1.33E-04	7.50E-05	3.54E+00	0.55	0.43	-0.92045	-0.39085	0.06032082	5.43546E-10	15.2593023
10000	1.00E-04	5.60E-05	3.52E+00	0.51	0.58	-0.92978	-0.36812	0.0886331	5.58512E-10	10.4901724
25000	4.00E-05	2.60E-05	4.08E+00	0.32	0.84	-0.58779	-0.80902	0.12933246	1.13325E-09	4.5447619
50000	2.00E-05	1.30E-05	4.08E+00	0.25	1.12	-0.58779	-0.80902	0.2207274	9.67042E-10	2.66294643
75000	1.33E-05	9.10E-06	4.29E+00	0.15	1.32	-0.41054	-0.91184	0.3028268	1.42732E-09	1.35568182
100000	1.00E-05	7.90E-06	4.96E+00	0.11	1.77	0.24869	-0.96858	0.33542719	2.0792E-09	0.74141243
250000	4.00E-06	9.10E-07	1.43E+00	1.00E-01	3.10E+00	0.140901	0.990024	0.36613061	1.63775E-09	0.38483871
300000	3.33E-06	7.90E-07	1.49E+00	7.00E-02	4.10E+00	0.080105	0.996786	0.39328228	2.59625E-09	0.20368293

Chitosan	R=11.93k	KCL	1mM	MW=4E+5	DDA=78%					
f	T	t	$\Delta\Phi$	Vm	VR	cos $\Delta\Phi$	sin $\Delta\Phi$	Geff (mS)	Ceff(F)	Z (k Ω)
100	1.00E-02	5.40E-03	3.39E+00	0.41	1.21	-0.96858	-0.24869	0.23960616	9.79128E-08	4.39239669
250	4.00E-03	2.20E-03	3.46E+00	0.41	1.22	-0.95106	-0.30902	0.23721484	4.9068E-08	4.0092623
500	2.00E-03	1.20E-03	3.77E+00	0.4	1.21	-0.80902	-0.58779	0.20513633	4.7441E-08	3.94380165
750	1.33E-03	7.70E-04	3.63E+00	0.41	1.23	-0.88334	-0.46873	0.22213093	2.50129E-08	3.97666667
1000	1.00E-03	5.70E-04	3.58E+00	0.4	1.21	-0.90483	-0.42578	0.22943016	1.71826E-08	3.94380165
2500	4.00E-04	2.40E-04	3.77E+00	0.37	1.24	-0.80902	-0.58779	0.22726741	1.05118E-08	3.55975806
5000	2.00E-04	1.20E-04	3.77E+00	0.36	1.21	-0.80902	-0.58779	0.22792925	5.27122E-09	3.54942149
7500	1.33E-04	7.70E-05	3.64E+00	0.36	1.23	-0.87947	-0.47595	0.25187499	2.89254E-09	3.49170732
10000	1.00E-04	5.80E-05	3.64E+00	0.36	1.25	-0.87631	-0.48175	0.25504874	2.23158E-09	3.43584
25000	4.00E-05	2.30E-05	3.61E+00	0.35	1.25	-0.89101	-0.45399	0.26673648	8.65224E-10	3.3404
50000	2.00E-05	1.30E-05	4.08E+00	0.24	1.42	-0.58779	-0.80902	0.29151127	1.27716E-09	2.01633803
75000	1.33E-05	1.08E-05	5.09E+00	0.15	1.67	0.369308	-0.92931	0.34464577	1.84036E-09	1.07155689
100000	1.00E-05	8.00E-06	5.03E+00	1.02E-01	1.73E+00	0.309017	-0.95106	0.43932696	2.15195E-09	0.70338728
250000	4.00E-06	9.30E-07	1.46E+00	5.70E-02	3.30E+00	0.109734	0.993961	0.53252632	3.07078E-09	0.20606364
300000	3.33E-06	7.80E-07	1.47E+00	5.00E-02	4.10E+00	0.098897	0.995098	0.6797635	3.62859E-09	0.1454878

Chitosan	R=11.93k	KCL	10mM	MW=4E+5	DDA=78%					
f	T	t	$\Delta\Phi$	Vm	VR	cos $\Delta\Phi$	sin $\Delta\Phi$	Geff (mS)	Ceff(F)	Z (k Ω)
100	1.00E-02	5.20E-03	3.27E+00	7.20E-02	1.52E+00	-0.99211	-0.12533	1.75562814	3.52986E-07	0.56510526
250	4.00E-03	2.20E-03	3.46E+00	7.10E-02	1.50E+00	-0.95106	-0.30902	1.68421989	3.48381E-07	0.56468667
500	2.00E-03	1.15E-03	3.61E+00	7.10E-02	1.62E+00	-0.89101	-0.45399	1.70410796	2.76384E-07	0.52285802
750	1.33E-03	7.80E-04	3.68E+00	7.00E-02	1.61E+00	-0.86027	-0.50983	1.65853285	2.0858E-07	0.51869565
1000	1.00E-03	6.30E-04	3.96E+00	5.40E-02	1.64E+00	-0.68455	-0.72897	1.74266129	2.95351E-07	0.39281707
2500	4.00E-04	2.40E-04	3.77E+00	6.30E-02	1.63E+00	-0.80902	-0.58779	1.75454397	8.11532E-08	0.46109816
5000	2.00E-04	1.20E-04	3.77E+00	6.10E-02	1.65E+00	-0.80902	-0.58779	1.83430399	4.24212E-08	0.44104848
7500	1.33E-04	7.90E-05	3.73E+00	6.20E-02	1.67E+00	-0.83065	-0.5568	1.87543333	2.66772E-08	0.44291018
10000	1.00E-04	6.00E-05	3.77E+00	6.00E-02	1.71E+00	-0.80902	-0.58779	1.93268938	2.23482E-08	0.41859649
25000	4.00E-05	2.30E-05	3.61E+00	6.50E-02	1.74E+00	-0.89101	-0.45399	1.99929248	6.48518E-09	0.44566092
50000	2.00E-05	1.75E-05	5.50E+00	5.30E-02	1.82E+00	0.707107	-0.70711	2.03535457	6.47873E-09	0.34741209
75000	1.33E-05	1.14E-05	5.37E+00	4.30E-02	1.92E+00	0.613968	-0.78933	2.29793661	6.26917E-09	0.26718229
100000	1.00E-05	8.20E-06	5.15E+00	3.30E-02	2.30E+00	0.425779	-0.90483	2.48747078	8.41316E-09	0.17116957
250000	4.00E-06	8.60E-07	1.35E+00	2.20E-02	3.40E+00	0.218143	0.975917	2.82590498	8.04838E-09	0.07719412
300000	3.33E-06	7.80E-07	1.47E+00	1.10E-02	4.10E+00	0.098897	0.995098	3.08983411	1.64936E-08	0.03200732

Chitosan	Ar	120 keV	R=11.93k	KCL	10mM	MW=4E+5	DDA=78%			
f	T	t	$\Delta\Phi$	Vm	VR	cos $\Delta\Phi$	sin $\Delta\Phi$	Geff (mS)	Ceff(F)	Z (k Ω)
100	1.00E-02	5.20E-03	3.27E+00	7.10E-02	1.84E+00	-0.99211	-0.12533	2.15516694	4.33317E-07	4.60342E-01
250	4.00E-03	2.20E-03	3.46E+00	7.00E-02	1.83E+00	-0.95106	-0.30902	2.08410181	4.31097E-07	4.56339E-01
500	2.00E-03	1.15E-03	3.61E+00	6.90E-02	1.85E+00	-0.89101	-0.45399	2.00245644	3.24772E-07	4.44957E-01
750	1.33E-03	7.40E-04	3.49E+00	7.20E-02	1.86E+00	-0.94059	-0.33956	2.0367516	1.56032E-07	4.61806E-01
1000	1.00E-03	5.30E-04	3.33E+00	7.30E-02	1.86E+00	-0.98229	-0.18738	2.09791625	6.36936E-08	4.68220E-01
2500	4.00E-04	2.20E-04	3.46E+00	7.40E-02	1.87E+00	-0.95106	-0.30902	2.01453941	4.16708E-08	4.72096E-01
5000	2.00E-04	1.10E-04	3.46E+00	7.10E-02	1.89E+00	-0.95106	-0.30902	2.12211706	2.19480E-08	4.48164E-01
7500	1.33E-04	7.50E-05	3.54E+00	7.00E-02	1.91E+00	-0.92045	-0.39085	2.10521652	1.89699E-08	4.37225E-01
10000	1.00E-04	5.40E-05	3.39E+00	7.10E-02	1.92E+00	-0.96858	-0.24869	2.19552987	8.97182E-09	4.41161E-01
25000	4.00E-05	2.40E-05	3.77E+00	6.40E-02	1.98E+00	-0.80902	-0.58779	2.09798518	9.70384E-09	3.85616E-01
50000	2.00E-05	1.25E-05	3.93E+00	5.50E-02	2.20E+00	-0.70711	-0.70711	2.37085258	7.54666E-09	2.98250E-01
75000	1.33E-05	1.10E-05	5.18E+00	3.90E-02	2.27E+00	0.455145	-0.89042	2.2206016	9.21878E-09	2.04965E-01
100000	1.00E-05	8.20E-06	5.15E+00	3.20E-02	2.32E+00	0.425779	-0.90483	2.58751037	8.75152E-09	1.64552E-01
250000	4.00E-06	8.30E-07	1.30E+00	2.70E-02	3.44E+00	0.263873	0.964557	2.81805374	6.55786E-09	9.36366E-02
300000	3.33E-06	7.20E-07	1.36E+00	2.20E-02	3.88E+00	0.210679	0.977555	3.11451485	7.66671E-09	6.76443E-02

Chitosan	Ar	120 keV	R=11.93k	KCL	1mM	MW=4E+5	DDA=78%			
f	T	t	$\Delta\Phi$	Vm	VR	cos $\Delta\Phi$	sin $\Delta\Phi$	Geff (mS)	Ceff(F)	Z (k Ω)
100	1.00E-02	5.25E-03	3.30E+00	0.27	1.34	-0.98769	-0.15643	0.41088522	1.03575E-07	2.40380597
250	4.00E-03	2.20E-03	3.46E+00	0.28	1.35	-0.95106	-0.30902	0.38436304	7.95056E-08	2.47437037
500	2.00E-03	1.10E-03	3.46E+00	0.27	1.34	-0.95106	-0.30902	0.39564612	4.09198E-08	2.40380597
750	1.33E-03	7.50E-04	3.54E+00	0.28	1.34	-0.92354	-0.3835	0.37047805	3.2646E-08	2.49283582
1000	1.00E-03	5.40E-04	3.39E+00	0.28	1.36	-0.96858	-0.24869	0.39434592	1.61146E-08	2.45617647
2500	4.00E-04	2.30E-04	3.61E+00	0.29	1.36	-0.89101	-0.45399	0.35025259	1.13613E-08	2.54389706
5000	2.00E-04	1.10E-04	3.46E+00	0.29	1.35	-0.95106	-0.30902	0.37110914	3.8382E-09	2.56274074
7500	1.33E-04	7.50E-05	3.54E+00	0.28	1.37	-0.92045	-0.39085	0.3775061	3.40168E-09	2.43824818
10000	1.00E-04	6.00E-05	3.77E+00	0.25	1.36	-0.80902	-0.58779	0.36890632	4.26577E-09	2.19301471
25000	4.00E-05	2.40E-05	3.77E+00	0.25	1.4	-0.80902	-0.58779	0.37975651	1.75649E-09	2.13035714
50000	2.00E-05	1.20E-05	3.77E+00	0.23	1.61	-0.80902	-0.58779	0.47469564	1.09781E-09	1.70428571
75000	1.33E-05	1.10E-05	5.18E+00	0.12	1.76	0.455145	-0.89042	0.55955247	2.32297E-09	0.81340909
100000	1.00E-05	8.10E-06	5.09E+00	0.095	1.94	0.368125	-0.92978	0.63013335	2.53301E-09	0.58420103
250000	4.00E-06	8.70E-07	1.37E+00	5.50E-02	3.31	0.202787	0.979223	1.02297637	3.14475E-09	0.19823263
300000	3.33E-06	7.40E-07	1.40E+00	4.90E-02	3.84	0.173648	0.984808	1.1406829	3.43198E-09	0.15223177

Chitosan	Ar	120 keV	R=11.93k	KCL	0.1mM	MW=4E+5	DDA=78%			
f	T	t	$\Delta\Phi$	Vm	VR	cos $\Delta\Phi$	sin $\Delta\Phi$	Geff (mS)	Ceff(F)	Z (k Ω)
100	1.00E-02	5.20E-03	3.27E+00	0.72	0.63	-0.99211	-0.12533	0.07276617	1.46303E-08	13.6342857
250	4.00E-03	2.20E-03	3.46E+00	0.71	0.61	-0.95106	-0.30902	0.06849161	1.41675E-08	13.8857377
500	2.00E-03	1.10E-03	3.46E+00	0.69	0.62	-0.95106	-0.30902	0.07163223	7.40857E-09	13.2769355
750	1.33E-03	7.50E-04	3.54E+00	0.68	0.69	-0.92354	-0.3835	0.07855176	6.92187E-09	11.7571014
1000	1.00E-03	5.70E-04	3.58E+00	0.71	0.68	-0.90483	-0.42578	0.07263998	5.4402E-09	12.4563235
2500	4.00E-04	2.30E-04	3.61E+00	0.71	0.69	-0.89101	-0.45399	0.07258238	2.35438E-09	12.2757971
5000	2.00E-04	1.20E-04	3.77E+00	0.69	0.7	-0.80902	-0.58779	0.06879647	1.59103E-09	11.7595714
7500	1.33E-04	7.90E-05	3.73E+00	0.71	0.69	-0.83065	-0.5568	0.06766555	9.62512E-10	12.2757971
10000	1.00E-04	6.00E-05	3.77E+00	0.61	0.86	-0.80902	-0.58779	0.09560615	1.10552E-09	8.46197674
25000	4.00E-05	2.40E-05	3.77E+00	0.52	0.98	-0.80902	-0.58779	0.12780267	5.91127E-10	6.33020408
50000	2.00E-05	1.30E-05	4.08E+00	0.28	1.29	-0.58779	-0.80902	0.22699167	9.94487E-10	2.58945736
75000	1.33E-05	1.10E-05	5.18E+00	0.18	1.61	0.455145	-0.89042	0.34124223	1.41666E-09	1.33378882
100000	1.00E-05	8.10E-06	5.09E+00	0.18	1.94	0.368125	-0.92978	0.33257038	1.33686E-09	1.10690722
250000	4.00E-06	8.80E-07	1.38E+00	0.16	3.42	0.187381	0.982287	0.3357314	1.12043E-09	0.55812865
300000	3.33E-06	7.50E-07	1.42E+00	0.14	3.89	0.155037	0.987909	0.36108991	1.22067E-09	0.42935733

Nafion	N3245	1100EW	KCL	10mM						
f	T	t	$\Delta\Phi$	V _m	VR	cos $\Delta\Phi$	sin $\Delta\Phi$	Geff (mS)	Ceff(F)	Z (k Ω)
100	1.00E-02	5.20E-03	3.27E+00	4.90E-02	1.72E+00	-0.99211	-0.12533	2.9191325	5.86919E-07	3.39866E-01
250	4.00E-03	2.15E-03	3.38E+00	4.60E-02	1.72E+00	-0.97237	-0.23345	3.04762612	4.65796E-07	3.19058E-01
500	2.00E-03	1.15E-03	3.61E+00	4.70E-02	1.74E+00	-0.89101	-0.45399	2.76497896	4.48444E-07	3.22247E-01
750	1.33E-03	7.20E-04	3.39E+00	5.00E-02	1.74E+00	-0.96837	-0.24951	2.824756	1.54450E-07	3.42816E-01
1000	1.00E-03	5.15E-04	3.24E+00	5.10E-02	1.75E+00	-0.99556	-0.09411	2.86349036	4.30800E-08	3.47674E-01
2500	4.00E-04	2.10E-04	3.30E+00	5.00E-02	1.81E+00	-0.98769	-0.15643	2.99700905	3.02190E-08	3.29558E-01
5000	2.00E-04	1.10E-04	3.46E+00	5.10E-02	1.82E+00	-0.95106	-0.30902	2.84490058	2.94234E-08	3.34302E-01
7500	1.33E-04	7.50E-05	3.54E+00	5.00E-02	1.85E+00	-0.92045	-0.39085	2.8547177	2.57236E-08	3.22432E-01
10000	1.00E-04	5.40E-05	3.39E+00	5.00E-02	1.86E+00	-0.96858	-0.24869	3.02022578	1.23419E-08	3.20699E-01
25000	4.00E-05	2.30E-05	3.61E+00	4.30E-02	1.88E+00	-0.89101	-0.45399	3.26535072	1.05919E-08	2.72867E-01
50000	2.00E-05	1.10E-05	3.46E+00	4.40E-02	1.89E+00	-0.95106	-0.30902	3.42432526	3.54161E-09	2.77735E-01
75000	1.33E-05	1.12E-05	5.28E+00	3.00E-02	2.10E+00	0.536941	-0.84362	3.15053202	1.05042E-08	1.70429E-01
100000	1.00E-05	8.50E-06	5.34E+00	2.90E-02	2.2	0.587785	-0.80902	3.73768696	8.18770E-09	1.57259E-01
250000	4.00E-06	7.10E-07	1.12E+00	2.70E-02	3.20E+00	0.439939	0.898028	4.37057323	5.67957E-09	1.00659E-01
300000	3.33E-06	6.60E-07	1.25E+00	2.50E-02	4.30E+00	0.319764	0.947497	4.61017561	7.24711E-09	6.93605E-02

Nafion	N3245	1100EW	KCL	1mM						
f	T	t	$\Delta\Phi$	V _m	VR	cos $\Delta\Phi$	sin $\Delta\Phi$	Geff (mS)	Ceff(F)	Z (k Ω)
100	1.00E-02	5.25E-03	3.30E+00	0.23	1.45	-0.98769	-0.15643	0.52193888	1.31569E-07	1.89234483
250	4.00E-03	2.20E-03	3.46E+00	0.22	1.44	-0.95106	-0.30902	0.52180194	1.07935E-07	1.82263889
500	2.00E-03	1.10E-03	3.46E+00	0.23	1.43	-0.95106	-0.30902	0.49564883	5.12626E-08	1.91881119
750	1.33E-03	7.50E-04	3.54E+00	0.24	1.46	-0.92354	-0.3835	0.47093106	4.14978E-08	1.96109589
1000	1.00E-03	5.40E-04	3.39E+00	0.22	1.45	-0.96858	-0.24869	0.53510843	2.18667E-08	1.81006897
2500	4.00E-04	2.30E-04	3.61E+00	0.25	1.47	-0.89101	-0.45399	0.43915493	1.4245E-08	2.02891156
5000	2.00E-04	1.10E-04	3.46E+00	0.21	1.43	-0.95106	-0.30902	0.54285348	5.61447E-09	1.75195804
7500	1.33E-04	7.50E-05	3.54E+00	0.24	1.41	-0.92045	-0.39085	0.45328288	4.0845E-09	2.0306383
10000	1.00E-04	6.00E-05	3.77E+00	0.24	1.48	-0.80902	-0.58779	0.41818425	4.83558E-09	1.93459459
25000	4.00E-05	2.40E-05	3.77E+00	0.2	1.51	-0.80902	-0.58779	0.51199315	2.36813E-09	1.58013245
50000	2.00E-05	1.20E-05	3.77E+00	0.18	1.67	-0.80902	-0.58779	0.62916009	1.45503E-09	1.28586826
75000	1.33E-05	1.10E-05	5.18E+00	0.11	1.83	0.455145	-0.89042	0.63469898	2.63494E-09	0.71710383
100000	1.00E-05	8.10E-06	5.09E+00	6.50E-02	2.10E+00	0.368125	-0.92978	0.99691993	4.00741E-09	0.3692619
250000	4.00E-06	8.70E-07	1.37E+00	4.00E-02	3.40E+00	0.202787	0.979223	1.44483823	4.44161E-09	0.14035294
300000	3.33E-06	7.40E-07	1.40E+00	3.30E-02	4.50E+00	0.173648	0.984808	1.98485305	5.97184E-09	0.08748667

Nafion	N3245	1100EW	KCL	0.1mM						
f	T	t	$\Delta\Phi$	Vm	VR	cos $\Delta\Phi$	sin $\Delta\Phi$	Geff (mS)	Ceff(F)	Z (k Ω)
100	1.00E-02	5.20E-03	3.27E+00	0.77	0.82	-0.99211	-0.12533	0.08856142	1.78061E-08	11.202561
250	4.00E-03	2.20E-03	3.46E+00	0.76	0.83	-0.95106	-0.30902	0.08706235	1.80089E-08	10.9238554
500	2.00E-03	1.20E-03	3.77E+00	0.71	0.85	-0.80902	-0.58779	0.08118537	1.87754E-08	9.96505882
750	1.33E-03	7.70E-04	3.63E+00	0.73	0.84	-0.88334	-0.46873	0.08520091	9.59398E-09	10.3677381
1000	1.00E-03	5.70E-04	3.58E+00	0.72	0.83	-0.90483	-0.42578	0.08743206	6.54802E-09	10.3489157
2500	4.00E-04	2.40E-04	3.77E+00	0.66	0.86	-0.80902	-0.58779	0.08836326	4.08708E-09	9.1555814
5000	2.00E-04	1.20E-04	3.77E+00	0.64	0.88	-0.80902	-0.58779	0.09324379	2.15641E-09	8.67636364
7500	1.33E-04	7.70E-05	3.64E+00	0.63	0.91	-0.87947	-0.47595	0.10648374	1.22286E-09	8.25923077
10000	1.00E-04	5.80E-05	3.64E+00	0.56	1.13	-0.87631	-0.48175	0.14821976	1.29687E-09	5.91221239
25000	4.00E-05	2.30E-05	3.61E+00	0.36	1.21	-0.89101	-0.45399	0.25102866	8.14272E-10	3.54942149
50000	2.00E-05	1.30E-05	4.08E+00	0.15	1.29	-0.58779	-0.80902	0.42371778	1.85638E-09	1.3872093
75000	1.33E-05	1.08E-05	5.09E+00	0.091	1.47	0.369308	-0.92931	0.5000618	2.67026E-09	0.73852381
100000	1.00E-05	8.00E-06	5.03E+00	0.065	1.6	0.309017	-0.95106	0.63760035	3.12315E-09	0.48465625
250000	4.00E-06	9.30E-07	1.46E+00	0.041	3.2	0.109734	0.993961	0.71790689	4.13976E-09	0.15285313
300000	3.33E-06	7.80E-07	1.47E+00	0.035	4.5	0.098897	0.995098	1.06583128	5.68943E-09	0.09278889

PFSA	OW	KCL	0.1mM								
f	T	t	$\Delta\Phi$	V _m	V _R	cos $\Delta\Phi$	sin $\Delta\Phi$	Geff (mS)	Ceff(F)	Z (k Ω)	
100	1.00E-02	5.20E-03	3.27E+00	0.84	0.77	-0.99211	-0.12533	0.08342707	1.67738E-08	11.892	
250	4.00E-03	2.15E-03	3.38E+00	0.78	0.76	-0.97237	-0.23345	0.08931443	1.36507E-08	10.8870423	
500	2.00E-03	1.10E-03	3.46E+00	0.84	0.79	-0.95106	-0.30902	0.08225947	8.5077E-09	11.5616667	
750	1.33E-03	7.30E-04	3.44E+00	0.8	0.8	-0.95579	-0.29404	0.08800819	5.74546E-09	10.860274	
1000	1.00E-03	5.60E-04	3.52E+00	0.78	0.8	-0.92978	-0.36812	0.08780781	5.53311E-09	10.5887671	
2500	4.00E-04	2.25E-04	3.53E+00	0.81	0.81	-0.92388	-0.38268	0.08401939	2.21556E-09	10.9960274	
5000	2.00E-04	1.15E-04	3.61E+00	0.78	0.82	-0.89101	-0.45399	0.08529908	1.38344E-09	10.4456757	
7500	1.33E-04	7.50E-05	3.53E+00	0.78	0.81	-0.92388	-0.38268	0.09083656	7.98443E-10	10.1707895	
10000	1.00E-04	6.00E-05	3.77E+00	0.72	0.85	-0.80902	-0.58779	0.08730562	1.00954E-09	9.26649351	
25000	4.00E-05	2.40E-05	3.77E+00	0.74	0.96	-0.80902	-0.58779	0.09156518	4.23518E-10	8.83542169	
50000	2.00E-05	1.28E-05	4.02E+00	0.68	1.13	-0.63742	-0.77051	0.09742784	3.74874E-10	6.54252427	
75000	1.33E-05	8.85E-06	4.17E+00	0.62	1.35	-0.51579	-0.85672	0.09989669	3.5211E-10	5.16319328	
100000	1.00E-05	6.80E-06	4.27E+00	0.6	1.54	-0.42578	-0.90483	0.09953468	3.36648E-10	4.27769784	
250000	4.00E-06	2.88E-06	4.52E+00	0.5	2.85	-0.18738	-0.98229	0.10475202	3.49587E-10	1.78880866	
300000	3.33E-06	2.41E-06	4.54E+00	0.48	3.31	-0.16883	-0.98564	0.11570741	3.58362E-10	1.4591411	

PFSA	1W	KCL	0.1mM								
f	T	t	$\Delta\Phi$	Vm	VR	$\cos\Delta\Phi$	$\sin\Delta\Phi$	Geff (mS)	Ceff(F)	Z (k Ω)	
100	1.00E-02	5.25E-03	3.30E+00	0.66	0.67	-0.98769	-0.15643	0.10117591	2.55041E-08	9.76208955	
250	4.00E-03	2.15E-03	3.38E+00	0.66	0.67	-0.97237	-0.23345	0.09960674	1.52238E-08	9.76208955	
500	2.00E-03	1.10E-03	3.46E+00	0.67	0.68	-0.95106	-0.30902	0.09740175	1.00738E-08	9.76426471	
750	1.33E-03	7.30E-04	3.44E+00	0.66	0.7	-0.95579	-0.29404	0.10229262	6.678E-09	9.34371429	
1000	1.00E-03	5.60E-04	3.52E+00	0.65	0.69	-0.92978	-0.36812	0.09959571	6.27591E-09	9.33550725	
2500	4.00E-04	2.25E-04	3.53E+00	0.66	0.69	-0.92388	-0.38268	0.09746459	2.57011E-09	9.47913043	
5000	2.00E-04	1.15E-04	3.61E+00	0.64	0.71	-0.89101	-0.45399	0.09974373	1.61771E-09	8.93295775	
7500	1.33E-04	7.50E-05	3.53E+00	0.65	0.71	-0.92388	-0.38268	0.10183257	8.95097E-10	9.07253521	
10000	1.00E-04	5.80E-05	3.64E+00	0.66	0.75	-0.87631	-0.48175	0.10048467	8.79202E-10	8.7208	
25000	4.00E-05	2.40E-05	3.77E+00	0.65	0.82	-0.80902	-0.58779	0.10298749	4.76349E-10	7.8554878	
50000	2.00E-05	1.25E-05	3.93E+00	0.65	1.01	-0.70711	-0.70711	0.11087136	3.52914E-10	6.37772277	
75000	1.33E-05	8.70E-06	4.10E+00	0.6	1.22	-0.57501	-0.81815	0.11797955	3.56227E-10	4.87377049	
100000	1.00E-05	6.76E-06	4.25E+00	0.58	1.45	-0.44838	-0.89384	0.11311383	3.58878E-10	3.964	
250000	4.00E-06	2.87E-06	4.51E+00	0.51	2.88	-0.20279	-0.97922	0.11555517	3.55231E-10	1.75489583	
300000	3.33E-06	2.41E-06	4.54E+00	0.45	3.29	-0.16883	-0.98564	0.12455702	3.8577E-10	1.35547112	

PFSA	5W	KCL	0.1mM								
f	T	t	$\Delta\Phi$	V _m	V _R	cos $\Delta\Phi$	sin $\Delta\Phi$	Geff (mS)	Ceff(F)	Z (k Ω)	
100	1.00E-02	5.25E-03	3.30E+00	0.52	0.7	-0.98769	-0.15643	0.13416554	3.382E-08	7.36171429	
250	4.00E-03	2.15E-03	3.38E+00	0.52	0.71	-0.97237	-0.23345	0.13397164	2.04761E-08	7.25802817	
500	2.00E-03	1.10E-03	3.46E+00	0.53	0.72	-0.95106	-0.30902	0.13037349	1.34839E-08	7.29486111	
750	1.33E-03	7.30E-04	3.44E+00	0.52	0.73	-0.95579	-0.29404	0.13539721	8.83917E-09	7.05917808	
1000	1.00E-03	5.60E-04	3.52E+00	0.51	0.73	-0.92978	-0.36812	0.1342943	8.46241E-09	6.92342466	
2500	4.00E-04	2.25E-04	3.53E+00	0.51	0.73	-0.92388	-0.38268	0.13344256	3.51883E-09	6.92342466	
5000	2.00E-04	1.15E-04	3.61E+00	0.5	0.74	-0.89101	-0.45399	0.13306656	2.15817E-09	6.69594595	
7500	1.33E-04	7.65E-05	3.60E+00	0.51	0.76	-0.89454	-0.44698	0.13451533	1.42631E-09	6.65013158	
10000	1.00E-04	5.80E-05	3.64E+00	0.5	0.77	-0.87631	-0.48175	0.13617682	1.1915E-09	6.43506494	
25000	4.00E-05	2.40E-05	3.77E+00	0.51	0.83	-0.80902	-0.58779	0.13285928	6.14516E-10	6.08927711	
50000	2.00E-05	1.25E-05	3.93E+00	0.53	1.03	-0.70711	-0.70711	0.13866687	4.4139E-10	5.09932039	
75000	1.33E-05	8.76E-06	4.13E+00	0.49	1.19	-0.55165	-0.83408	0.13518783	4.33753E-10	4.08058824	
100000	1.00E-05	6.76E-06	4.25E+00	0.45	1.39	-0.44838	-0.89384	0.13975842	4.43414E-10	3.20827338	
250000	4.00E-06	2.87E-06	4.51E+00	0.39	2.77	-0.20279	-0.97922	0.14533903	4.4679E-10	1.39527076	
300000	3.33E-06	2.41E-06	4.54E+00	0.38	3.26	-0.16883	-0.98564	0.14615673	4.52668E-10	1.15515337	

PFSA	10W	KCL	0.1mM							
f	T	t	$\Delta\Phi$	Vm	VR	$\cos\Delta\Phi$	$\sin\Delta\Phi$	Geff (mS)	Ceff(F)	Z (k Ω)
100	1.00E-02	5.25E-03	3.30E+00	0.54	0.65	-0.98769	-0.15643	0.11996812	3.02412E-08	8.23292308
250	4.00E-03	2.15E-03	3.38E+00	0.52	0.64	-0.97237	-0.23345	0.12076317	1.84573E-08	8.051875
500	2.00E-03	1.10E-03	3.46E+00	0.53	0.67	-0.95106	-0.30902	0.12131978	1.25475E-08	7.83925373
750	1.33E-03	7.30E-04	3.44E+00	0.52	0.66	-0.95579	-0.29404	0.12241392	7.99158E-09	7.80787879
1000	1.00E-03	5.60E-04	3.52E+00	0.52	0.65	-0.92978	-0.36812	0.11727756	7.39012E-09	7.928
2500	4.00E-04	2.25E-04	3.53E+00	0.52	0.65	-0.92388	-0.38268	0.11653375	3.07295E-09	7.928
5000	2.00E-04	1.13E-04	3.55E+00	0.53	0.68	-0.91775	-0.39715	0.11881902	1.63667E-09	7.72397059
7500	1.33E-04	7.50E-05	3.53E+00	0.54	0.68	-0.92388	-0.38268	0.11739696	1.03191E-09	7.86970588
10000	1.00E-04	5.70E-05	3.58E+00	0.54	0.69	-0.90483	-0.42578	0.11666679	8.73748E-10	7.75565217
25000	4.00E-05	2.39E-05	3.75E+00	0.56	0.79	-0.81815	-0.57501	0.11646574	5.21096E-10	7.02481013
50000	2.00E-05	1.25E-05	3.93E+00	0.55	0.96	-0.70711	-0.70711	0.12454316	3.96433E-10	5.67760417
75000	1.33E-05	8.70E-06	4.10E+00	0.54	1.15	-0.57501	-0.81815	0.12356692	3.73097E-10	4.6533913
100000	1.00E-05	6.75E-06	4.24E+00	0.51	1.38	-0.45399	-0.89101	0.12396013	3.87201E-10	3.6623913
250000	4.00E-06	2.89E-06	4.54E+00	0.39	2.74	-0.17193	-0.98511	0.12188821	4.44608E-10	1.41054745
300000	3.33E-06	2.42E-06	4.56E+00	0.38	3.25	-0.15023	-0.98865	0.12964925	4.52656E-10	1.15870769

Chitosan	Distance	1 cm	KCL	0.1mM							
f	T	t	$\Delta\Phi$	Vm	VR	$\cos\Delta\Phi$	$\sin\Delta\Phi$	Geff (mS)	Ceff(F)	Z (k Ω)	
100	1.00E-02	5.25E-03	3.30E+00	0.76	0.52	-0.98769	-0.15643	0.056646	1.42791E-08	17.4361538	
250	4.00E-03	2.20E-03	3.46E+00	0.75	0.52	-0.95106	-0.30902	0.05527235	1.14331E-08	17.2067308	
500	2.00E-03	1.10E-03	3.46E+00	0.75	0.52	-0.95106	-0.30902	0.05527235	5.71655E-09	17.2067308	
750	1.33E-03	7.50E-04	3.54E+00	0.76	0.53	-0.92354	-0.3835	0.05398561	4.75714E-09	17.1071698	
1000	1.00E-03	5.40E-04	3.39E+00	0.74	0.52	-0.96858	-0.24869	0.05705163	2.33136E-09	16.9773077	
2500	4.00E-04	2.30E-04	3.61E+00	0.73	0.52	-0.89101	-0.45399	0.05320114	1.72571E-09	16.7478846	
5000	2.00E-04	1.10E-04	3.46E+00	0.68	0.65	-0.95106	-0.30902	0.07620269	7.88128E-10	12.4806154	
7500	1.33E-04	7.50E-05	3.54E+00	0.62	0.81	-0.92045	-0.39085	0.10079866	9.08289E-10	9.13160494	
10000	1.00E-04	6.00E-05	3.77E+00	0.55	0.91	-0.80902	-0.58779	0.11220079	1.29741E-09	7.21043956	
25000	4.00E-05	2.40E-05	3.77E+00	0.35	1.1	-0.80902	-0.58779	0.21312865	9.85787E-10	3.79590909	
50000	2.00E-05	1.20E-05	3.77E+00	0.25	1.25	-0.80902	-0.58779	0.33906831	7.84149E-10	2.386	
75000	1.33E-05	1.10E-05	5.18E+00	0.14	1.5	0.455145	-0.89042	0.40876398	1.69697E-09	1.11346667	
100000	1.00E-05	8.10E-06	5.09E+00	1.10E-01	1.60E+00	0.368125	-0.92978	0.44882975	1.8042E-09	0.8201875	
250000	4.00E-06	8.70E-07	1.37E+00	1.00E-01	3.30E+00	0.202787	0.979223	0.5609372	1.72439E-09	0.36151515	
300000	3.33E-06	7.40E-07	1.40E+00	9.10E-02	4.10E+00	0.173648	0.984808	0.65580127	1.97311E-09	0.2647878	

Chitosan	Closer	membrane		KCL	0.1mM						
f	T	t	$\Delta\Phi$	Vm	VR	$\cos\Delta\Phi$	$\sin\Delta\Phi$	Geff (mS)	Ceff(F)	Z (k Ω)	
100	1.00E-02	5.25E-03	3.30E+00	5.90E-02	5.30E-01	-0.98769	-0.15643	0.74370952	1.87472E-07	1.32806E+00	
250	4.00E-03	2.20E-03	3.46E+00	5.90E-02	5.30E-01	-0.95106	-0.30902	0.71612649	1.48131E-07	1.32806E+00	
500	2.00E-03	1.10E-03	3.46E+00	5.80E-02	5.30E-01	-0.95106	-0.30902	0.7284735	7.53425E-08	1.30555E+00	
750	1.33E-03	7.50E-04	3.54E+00	5.90E-02	5.30E-01	-0.92354	-0.3835	0.69540783	6.12784E-08	1.32806E+00	
1000	1.00E-03	5.40E-04	3.39E+00	5.60E-02	5.50E-01	-0.96858	-0.24869	0.79739064	3.25846E-08	1.21469E+00	
2500	4.00E-04	2.30E-04	3.61E+00	5.40E-02	5.60E-01	-0.89101	-0.45399	0.77452369	2.51235E-08	1.15039E+00	
5000	2.00E-04	1.10E-04	3.46E+00	5.30E-02	5.70E-01	-0.95106	-0.30902	0.85736326	8.86729E-09	1.10928E+00	
7500	1.33E-04	7.50E-05	3.54E+00	5.20E-02	5.70E-01	-0.92045	-0.39085	0.84573237	7.62083E-09	1.08835E+00	
10000	1.00E-04	6.00E-05	3.77E+00	5.10E-02	5.70E-01	-0.80902	-0.58779	0.7579174	8.76401E-09	1.06742E+00	
25000	4.00E-05	2.40E-05	3.77E+00	4.90E-02	7.80E-01	-0.80902	-0.58779	1.07948279	4.99295E-09	7.49449E-01	
50000	2.00E-05	1.20E-05	3.77E+00	4.90E-02	1.19E+00	-0.80902	-0.58779	1.64690323	3.80872E-09	4.91235E-01	
75000	1.33E-05	1.10E-05	5.18E+00	4.30E-02	1.53E+00	0.455145	-0.89042	1.35747667	5.63553E-09	3.35288E-01	
100000	1.00E-05	8.10E-06	5.09E+00	3.60E-02	1.82E+00	0.368125	-0.92978	1.55999508	6.27086E-09	2.35978E-01	
250000	4.00E-06	8.70E-07	1.37E+00	4.50E-02	3.29E+00	0.202787	0.979223	1.24274975	3.82036E-09	1.63176E-01	
300000	3.33E-06	7.40E-07	1.40E+00	4.40E-02	3.75E+00	0.173648	0.984808	1.24053316	3.73240E-09	1.39979E-01	

Chitosan	Distance	1 cm	KCL	0.01mM							
f	T	t	$\Delta\Phi$	Vm	VR	cos $\Delta\Phi$	sin $\Delta\Phi$	Geff (mS)	Ceff(F)	Z (k Ω)	
100	1.00E-02	5.25E-03	3.30E+00	0.69	0.27	-0.98769	-0.15643	0.03239621	8.16633E-09	30.4877778	
250	4.00E-03	2.20E-03	3.46E+00	0.66	0.27	-0.95106	-0.30902	0.03261262	6.74593E-09	29.1622222	
500	2.00E-03	1.10E-03	3.46E+00	0.66	0.26	-0.95106	-0.30902	0.03140475	3.24804E-09	30.2838462	
750	1.33E-03	7.50E-04	3.54E+00	0.65	0.26	-0.92354	-0.3835	0.03096533	2.72862E-09	29.825	
1000	1.00E-03	5.40E-04	3.39E+00	0.64	0.25	-0.96858	-0.24869	0.0317144	1.29598E-09	30.5408	
2500	4.00E-04	2.30E-04	3.61E+00	0.63	0.25	-0.89101	-0.45399	0.02963739	9.6136E-10	30.0636	
5000	2.00E-04	1.10E-04	3.46E+00	0.64	0.26	-0.95106	-0.30902	0.03238614	3.34954E-10	29.3661538	
7500	1.33E-04	7.50E-05	3.54E+00	0.53	0.31	-0.92045	-0.39085	0.04512812	4.06646E-10	20.3964516	
10000	1.00E-04	6.00E-05	3.77E+00	0.43	0.39	-0.80902	-0.58779	0.06150541	7.11205E-10	13.1535897	
25000	4.00E-05	2.40E-05	3.77E+00	0.24	0.67	-0.80902	-0.58779	0.18931314	8.75633E-10	4.27343284	
50000	2.00E-05	1.20E-05	3.77E+00	0.13	1.15	-0.80902	-0.58779	0.59989009	1.38734E-09	1.3486087	
75000	1.33E-05	1.10E-05	5.18E+00	0.095	1.45	0.455145	-0.89042	0.58230939	2.41744E-09	0.78162069	
100000	1.00E-05	8.10E-06	5.09E+00	0.084	1.8	0.368125	-0.92978	0.6612224	2.65798E-09	0.55673333	
250000	4.00E-06	8.70E-07	1.37E+00	0.086	3.3	0.202787	0.979223	0.65225255	2.0051E-09	0.31090303	
300000	3.33E-06	7.40E-07	1.40E+00	0.084	3.73	0.173648	0.984808	0.64633747	1.94464E-09	0.26866488	

Chitosan	Closer	membrane		KCL	0.01mM					
f	T	t	$\Delta\Phi$	V_m	VR	$\cos\Delta\Phi$	$\sin\Delta\Phi$	Geff (mS)	Ceff(F)	Z (k Ω)
100	1.00E-02	5.25E-03	3.30E+00	8.90E-02	2.30E-01	-0.98769	-0.15643	0.21395247	5.39324E-08	4.61639E+00
250	4.00E-03	2.20E-03	3.46E+00	8.70E-02	2.40E-01	-0.95106	-0.30902	0.21991653	4.54898E-08	4.32463E+00
500	2.00E-03	1.10E-03	3.46E+00	8.80E-02	2.30E-01	-0.95106	-0.30902	0.20835842	2.15495E-08	4.56452E+00
750	1.33E-03	7.50E-04	3.54E+00	8.60E-02	2.25E-01	-0.92354	-0.3835	0.20253486	1.78471E-08	4.55991E+00
1000	1.00E-03	5.40E-04	3.39E+00	8.50E-02	2.35E-01	-0.96858	-0.24869	0.22446333	9.17248E-09	4.31511E+00
2500	4.00E-04	2.30E-04	3.61E+00	8.30E-02	2.45E-01	-0.89101	-0.45399	0.2204593	7.15113E-09	4.04159E+00
5000	2.00E-04	1.10E-04	3.46E+00	8.00E-02	2.85E-01	-0.95106	-0.30902	0.28400158	2.93729E-09	3.34877E+00
7500	1.33E-04	7.50E-05	3.54E+00	7.80E-02	3.05E-01	-0.92045	-0.39085	0.301694	2.71854E-09	3.05095E+00
10000	1.00E-04	6.00E-05	3.77E+00	7.20E-02	3.55E-01	-0.80902	-0.58779	0.33435903	3.86629E-09	2.41961E+00
25000	4.00E-05	2.40E-05	3.77E+00	6.80E-02	6.55E-01	-0.80902	-0.58779	0.65320513	3.02128E-09	1.23853E+00
50000	2.00E-05	1.20E-05	3.77E+00	6.70E-02	1.14E+00	-0.80902	-0.58779	1.15384441	2.66845E-09	7.01149E-01
75000	1.33E-05	1.10E-05	5.18E+00	6.70E-02	1.52E+00	0.455145	-0.89042	0.86267503	3.58138E-09	5.27597E-01
100000	1.00E-05	8.10E-06	5.09E+00	6.60E-02	1.84E+00	0.368125	-0.92978	0.86025703	3.45806E-09	4.27924E-01
250000	4.00E-06	8.70E-07	1.37E+00	7.20E-02	3.31E+00	0.202787	0.979223	0.78144028	2.40224E-09	2.59505E-01
300000	3.33E-06	7.40E-07	1.40E+00	7.10E-02	3.74E+00	0.173648	0.984808	0.76673103	2.30687E-09	2.26479E-01

Chitosan	Distance	0.5cm	KCL	0.1mM						
f	T	t	$\Delta\Phi$	Vm	VR	$\cos\Delta\Phi$	$\sin\Delta\Phi$	Geff (mS)	Ceff(F)	Z (k Ω)
100	1.00E-02	5.25E-03	3.30E+00	0.415301	0.52	-0.98769	-0.15643	0.103662177	2.61308E-08	9.527952911
250	4.00E-03	2.20E-03	3.46E+00	0.409836	0.52	-0.95106	-0.30902	0.101148408	2.09226E-08	9.40258513
500	2.00E-03	1.10E-03	3.46E+00	0.409836	0.52	-0.95106	-0.30902	0.101148408	1.04613E-08	9.40258513
750	1.33E-03	7.50E-04	3.54E+00	0.415301	0.53	-0.92354	-0.3835	0.098793662	8.70556E-09	9.348180215
1000	1.00E-03	5.40E-04	3.39E+00	0.404372	0.52	-0.96858	-0.24869	0.104404492	4.26639E-09	9.277217325
2500	4.00E-04	2.30E-04	3.61E+00	0.398907	0.52	-0.89101	-0.45399	0.097358083	3.15804E-09	9.151849521
5000	2.00E-04	1.10E-04	3.46E+00	0.371585	0.65	-0.95106	-0.30902	0.13945093	1.44227E-09	6.820008399
7500	1.33E-04	7.50E-05	3.54E+00	0.338798	0.81	-0.92045	-0.39085	0.184461554	1.66217E-09	4.989948051
10000	1.00E-04	6.00E-05	3.77E+00	0.300546	0.91	-0.80902	-0.58779	0.20532744	2.37426E-09	3.940130906
25000	4.00E-05	2.40E-05	3.77E+00	0.191257	1.1	-0.80902	-0.58779	0.390025435	1.80399E-09	2.074267267
50000	2.00E-05	1.20E-05	3.77E+00	0.136612	1.25	-0.80902	-0.58779	0.620495012	1.43499E-09	1.303825138
75000	1.33E-05	1.10E-05	5.18E+00	0.076503	1.5	0.455145	-0.89042	0.74803809	3.10546E-09	0.608451729
100000	1.00E-05	8.10E-06	5.09E+00	0.060109	1.60E+00	0.368125	-0.92978	0.821358443	3.30169E-09	0.448189894
250000	4.00E-06	8.70E-07	1.37E+00	0.054645	3.30E+00	0.202787	0.979223	1.026515063	3.15563E-09	0.197549264
300000	3.33E-06	7.40E-07	1.40E+00	0.049727	4.10E+00	0.173648	0.984808	1.200116315	3.6108E-09	0.14469279

Chitosan	Distance	0.5cm	KCL	0.01mM						
<u>f</u>	<u>T</u>	<u>t</u>	<u>$\Delta\Phi$</u>	<u>V_m</u>	<u>V_R</u>	<u>cos$\Delta\Phi$</u>	<u>sin$\Delta\Phi$</u>	<u>G_{eff} (mS)</u>	<u>C_{eff}(F)</u>	<u>Z (kΩ)</u>
100	1.00E-02	5.25E-03	3.30E+00	0.381215	0.27	-0.98769	-0.15643	0.058637133	1.47811E-08	16.84407614
250	4.00E-03	2.20E-03	3.46E+00	0.364641	0.27	-0.95106	-0.30902	0.059028845	1.22101E-08	16.11172499
500	2.00E-03	1.10E-03	3.46E+00	0.364641	0.26	-0.95106	-0.30902	0.056842591	5.87895E-09	16.73140672
750	1.33E-03	7.50E-04	3.54E+00	0.359116	0.26	-0.92354	-0.3835	0.056047247	4.93881E-09	16.47790055
1000	1.00E-03	5.40E-04	3.39E+00	0.353591	0.25	-0.96858	-0.24869	0.057403065	2.34572E-09	16.87337016
2500	4.00E-04	2.30E-04	3.61E+00	0.348066	0.25	-0.89101	-0.45399	0.053643669	1.74006E-09	16.60972374
5000	2.00E-04	1.10E-04	3.46E+00	0.353591	0.26	-0.95106	-0.30902	0.058618922	6.06267E-10	16.22439438
7500	1.33E-04	7.50E-05	3.54E+00	0.292818	0.31	-0.92045	-0.39085	0.081681902	7.36029E-10	11.26875781
10000	1.00E-04	6.00E-05	3.77E+00	0.237569	0.39	-0.80902	-0.58779	0.111324801	1.28728E-09	7.267176661
25000	4.00E-05	2.40E-05	3.77E+00	0.132597	0.67	-0.80902	-0.58779	0.342656786	1.5849E-09	2.361012615
50000	2.00E-05	1.20E-05	3.77E+00	0.071823	1.15	-0.80902	-0.58779	1.085801072	2.51109E-09	0.745087673
75000	1.33E-05	1.10E-05	5.18E+00	0.052486	1.45	0.455145	-0.89042	1.053979997	4.37557E-09	0.431834636
100000	1.00E-05	8.10E-06	5.09E+00	0.046409	1.8	0.368125	-0.92978	1.196812546	4.81094E-09	0.307587478
250000	4.00E-06	8.70E-07	1.37E+00	0.047514	3.3	0.202787	0.979223	1.180577124	3.62924E-09	0.171769629
300000	3.33E-06	7.40E-07	1.40E+00	0.046409	3.73	0.173648	0.984808	1.169870809	3.5198E-09	0.148433636

Improvement of Electrochemical Impedance Spectroscopy for Evaluation Chitosan Membranes

Wissarut Pauypung¹ *, Prajak Saeung¹, Pikul Wanichapichart^{2,3}

¹*Membrane Science and Technology Research Center, Department of physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat-Yai, Songkla 90110, Thailand*

²*NANOTEC Center of Excellence at Prince of Songkla University, Prince of Songkla University,*

Hat-Yai, Songkla 90110, Thailand

³*ThEP Center, CHE, 328 Si Ayutthaya Rd., Bangkok 10400, Thailand*

**Corresponding author: E-mail address: darkmonk3@hotmail.com*

Abstract

An Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) technique was used to measure electrical properties of membranes as a function of frequency. A small signal of AC potential was applied to a charged chitosan membrane with amplitude of 2V over range of 100–300 kHz frequency. In this research, we improve experimental set up by adjusting calomel electrode from vertical become horizontal to closer membrane. The membrane made from 400K MW chitosan with 78% DDA. The properties were compared among chitosan in various KCl concentrations, ranging from 0.01-0.1 mM. The results showed that the impedance after improvement were 1.31 and 4.47 k Ω at KCl 0.1 mM and 0.01 mM, respectively. While the conductance and capacitance of membranes were greater than that before improvement about 90 % in every KCl concentrations tested and vice versa was the case for membrane impedance.

Keyword: Electrochemical Impedance Spectroscopy, Chitosan membrane, Calomel electrode

Introduction

An electrochemical impedance spectroscopy (EIS) is the method for measuring changes in the electrical properties of synthetic membranes or investigating ion-transport characteristics of ion-exchange membrane systems [1-3]. Membrane ionic conductivity and capacitance was studied by using the electrochemical impedance spectroscopy. By applying physically-sound equivalent circuit models wherein physiochemical processes occurring within the membrane in electrolyte solutions are represented by a parallel network of resistors (**R**) or ionic conductivities (**G**) and capacitors (**C**) for membrane-electrolyte or using effective value of resistors (**R_{eff}**) or ionic conductivities (**G_{eff}**) and capacitors (**C_{eff}**) connected in parallel as shown in Figure 1 [4]. An electrochemical impedance spectroscopy (EIS) can be displayed by presented with impedance, ionic conductivity

and capacitance spectrums versus frequency or Nyquist plots. Chitosan membrane is an ion-exchange membrane which is studied electrical properties with electrochemical impedance spectroscopy (EIS), before and after improved measurement. Chitosan is the N-deacetylated derivative of chitin, e.g. Figure 2 illustrates the molecular structures of segments chitosan. Chitosan can also act as a cationic polyelectrolyte because of its free amino groups. [5] So, chitosan membrane would affect anion diffusion through the membrane.

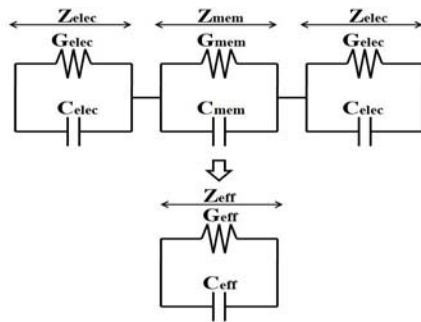


Figure 1. Equivalent circuit models of membranes in electrolyte solutions

This study aims to improve experimental set up of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) by adjusting calomel electrode from vertical become horizontal to closer membrane in order to decrease a disturbance from impedance of electrolyte solutions (Z_{elec}) and to get exact values of impedance within membrane only (Z_{mem}) [1,4]. Consultation in Figure 1. After that, chitosan membrane before and after improved measurement of EIS were investigated and compared at KCl 0.01mM and 0.1mM of electrolyte solutions.

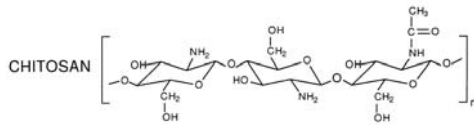


Figure 2. Segments of chitosan [5]

Materials and Methods

Membranes preparation

Chitosan membranes were prepared by chitosan flakes (MW 400,000 Fluka) which were dissolved in 1% acetic acid to make up a 1% (w/v) chitosan solution and degree of deacetylation (DDA) of chitosan at 78%. The membranes were dried at temperature about 45° and were then ready for circle samples of the membranes of a size of diameter about 4.5 cm were used to studied electrical properties by before and after improvement of EIS.

Electrochemical impedance spectroscopy measurement system

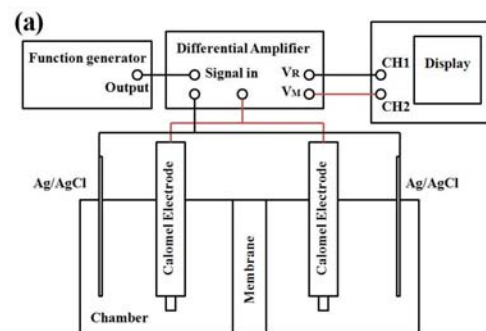
Electrochemical impedance spectroscopy measurement of equivalent circuit models of membranes in electrolyte solutions was estimated from Figure 1, so equations are:

$$Z_{eff} = \frac{1}{G_{eff} + j\omega C_{eff}} \quad (1)$$

From equations (1), it showed that Impedance value was functioned with ionic conductivities (G_{eff}) and capacitors (C_{eff}) that these can be obtained from Impedance spectrums, which were described in the following order.

Recently, P.Wanichapichart, and L.Yu have studied to verify the changed in the electrical properties of membranes, membrane electrochemical impedance spectroscopy was studied using the four-point probe method and used frequency range from 100 Hz to 300 kHz and 2 V amplitude of the applied AC signal from function generator. Before improvement of experimental set up of EIS show in Figure 3a. In this study need to improve experimental set up of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) by adjusting calomel electrode from vertical become horizontal to closer membrane in order to decrease a disturbance from impedance of electrolyte solutions (Z_{elec}) and to get exact values of impedance within membrane only (Z_{mem}). After improvement of experimental set up of EIS show in Figure 3b.

By two membrane sides were in contact with the same KCl concentration at 0.01mM and 0.1mM of electrolyte solutions A pair of calomel electrodes measured voltage across the test membrane and the Ag/AgCl electrodes conveyed a signal from a function generator to the membrane chambers.



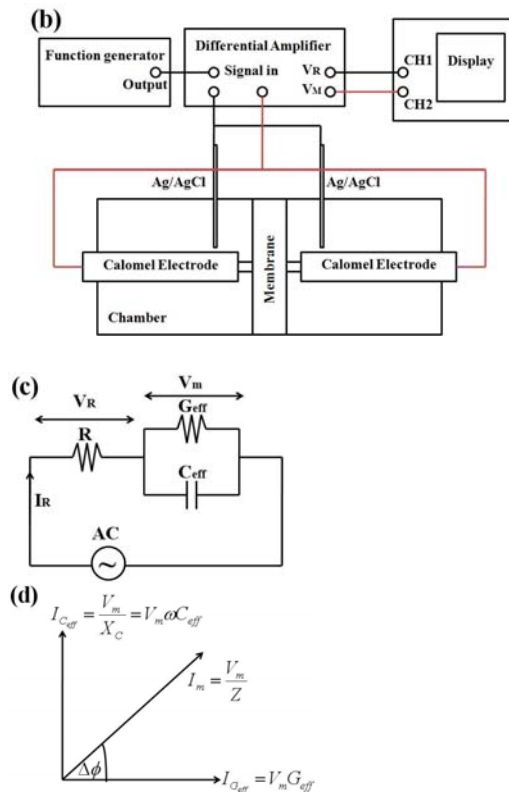


Figure 3. Electrochemical impedance spectroscopy studies. (a and b) Before and after improvement of experimental set up of EIS of a two-chamber system for Z , G_{eff} , and C_{eff} estimations. In the chamber system, the left chamber is Chamber I and the right one is Chamber II. (c) The circuit diagram of a membrane in an electrolyte. Load R is inserted in the circuit to estimate current I_m through the membrane. (d) The phase diagram for conductive and capacitive current of the membrane. $\Delta\phi$ is the phase angle between V_m and V_R , and $\omega=2\pi f$. [6–7]

The method cancelled out any stray capacitive potential at the electrode/solution interfaces. The load R of 11.93 k Ω in Figure 3c was inserted in the circuit in order to estimate current I_m from the voltage drop (V_R). The effective values of conductance and capacitance (G_{eff} and C_{eff}) represented electrical parameters of the membrane and the electrolyte between two calomel electrodes. These values were deduced from the phase diagram shown in Figure 3d. Hence, the relations obtained are:

$$|Z| = \frac{V_m}{I_m} = \frac{V_m R}{V_R} \quad (2)$$

$$G_{eff} = \frac{\cos \Delta\phi}{|Z|} \quad (3)$$

$$C_{eff} = \frac{\sin \Delta\phi}{\omega |Z|} \quad (4)$$

The impedance Z was estimated from Ohm's law, and varied with the frequency and V_m . The phase angle ($\Delta\phi$) between V_m and V_R was recorded via an oscilloscope and presentation of impedance spectrums in a Nyquist plots form by Scilab version 5.1.

Results and Discussion

Impedances of membrane.

Impedance studies were explained in equations (2) of chitosan membranes at before and after improvement of experimental set up of EIS at KCl 0.1mM and 0.01mM of electrolyte solutions were displayed in Figure 4. The results showed at frequency 0.1-1kHz; impedance membrane after improvement was about 1.31 and 4.47 k Ω , respectively that was less than before improvement about 17.19 and 30.10 k Ω at KCl 0.1 mM and 0.01 mM. Impedance membranes have been influenced by the concentration of electrolyte solutions (KCl) that impedance membranes at KCl 0.01mM were larger than KCl 0.1mM, which were displayed in Figure 4.

Conductance of membrane.

Conductance studies were explained in equations (3) of chitosan membranes at before and after upgrading experimental set up of EIS and were displayed in Figure 5. The results showed at frequency 0.1-1kHz were interested; conductance membranes after improvement were about 0.21 and 0.74 mS, respectively, which were greater than before improvement which were about 0.056 and 0.032 mS at KCl 0.1 mM and 0.01 mM and effected by the concentration of electrolyte solutions (KCl) for conductance membranes that were at KCl 0.1mM and were greater than KCl 0.01mM, that was showed in Figure 5.

Capacitance of membrane.

The results showed in Figure 6, capacitance of membrane was studied at frequency 0.1-1kHz and was explained in equations (3) of chitosan membranes at before and after improvement of experimental set up of EIS. It was found that after improvement were about 1.68×10^{-7} and 4.97×10^{-8} F, respectively, which were greater than that before improvement about 1.29×10^{-8} and 7.46×10^{-9} F at KCl 0.1mM and 0.01mM and effected by the concentration of electrolyte solutions (KCl) for capacitance membranes, which were resulted in same conductance membranes as showed in Figure 6.

Impedances spectrums in a Nyquist plots form.

Nyquist plots of before and after improvement of experimental set up of EIS were displayed in Figure 7. The results indicated that the impedance spectra at before improvement were larger than that after improvement and KCl 0.01 mM were larger than at KCl 0.1 mM were in line with results in the past. Nyquist plots can estimation from equivalent circuit models in Figure 1 and equations (1).

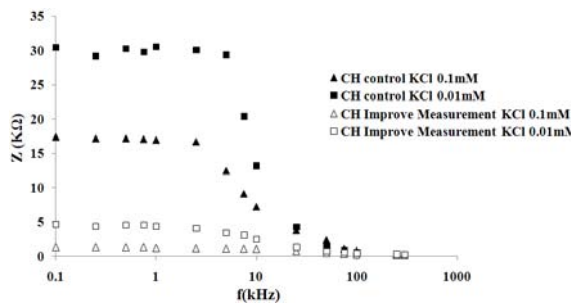


Figure 4. Impedance spectrums: before and after improvement of experimental set up of EIS at KCl 0.1mM and 0.01mM.

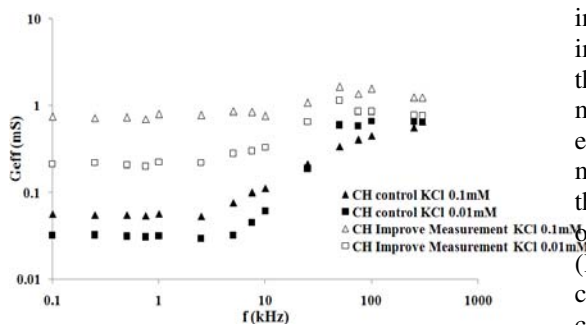


Figure 5. Conductance spectrums: before and after improvement of experimental set up of EIS at KCl 0.1mM and 0.01mM.

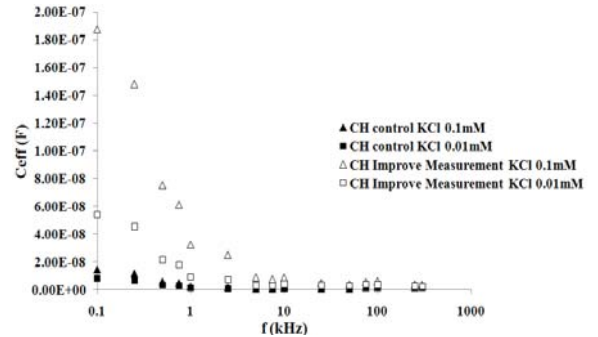


Figure 6. Capacitance spectrums: before and after improvement of experimental set up of EIS at KCl 0.1mM and 0.01mM.

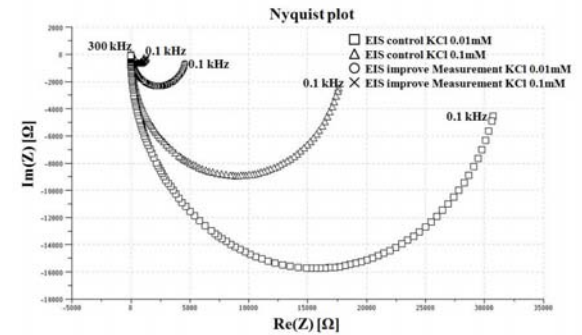


Figure 7. Nyquist plots of membranes: before and after improvement of experimental set up of EIS at KCl 0.1mM and 0.01mM.

Impedance, Conductance and Capacitance studies of chitosan membranes before and after improvement of experimental set up of EIS at KCl 0.1mM and 0.01mM were compared and were showed in Table 1. As the results, after improvement of experimental set up of EIS was more effective than that before improvement of experimental set up of EIS because of adjusting calomel electrode to closer membrane has been influenced to decreasing of disturbance from impedance of electrolyte solution (Z_{elec}) and then, exact values of impedance within membrane (Z_{mem}) are analyzed from the equivalent circuit model. Thus, Impedances of membrane after improvement were less than that before improvement and were influenced of the concentration of electrolyte solutions (KCl) by impedance, conductance and capacitance studies. In conclusion, for high concentrations of electrolyte solution were greater than that low concentrations electrolyte solution. Because at high concentrations of

electrolyte solutions have charges-density greater than low concentrations of electrolyte solutions. Therefore, the transporting charges have increased. As a result, conductance and capacitance have increased too. [8]

Table 1: Electrical properties: before and after improvement EIS.

Electrical properties	KCl 0.1mM	KCl 0.01mM
Before improvement		
Impedances	17.19 kΩ	30.10 kΩ
Conductance	0.056 mS	0.032 mS
Capacitance	1.29×10^{-8} F	7.46×10^{-9} F
After improvement		
Impedances	1.31 kΩ	4.47 kΩ
Conductance	0.74 mS	0.21 mS
Capacitance	1.68×10^{-7} F	4.97×10^{-8} F

Conclusions

An electrochemical impedance spectroscopy (EIS) for measuring changed in the electrical properties of synthetic membranes or investigating ion-transport characteristics of ion-exchange membrane systems. From results in the past, it was confirmed that, after improvement of experimental set up of EIS was more effective greater than that before improvement and effected of the concentration of electrolyte solution (KCl) was showed for a high concentration of electrolyte solution was more effective greater than a low concentration of electrolyte solution.

Acknowledgments

The authors wish to thank the Department of Physics, Membrane Science and Technology Research Center, the Graduate School, Prince of Songkla University. This work has been partially supported by the Thailand Center of Excellence in physics (ThEP).

References

1. T.C. Chilcott, M. Chan, L. Gaedt, T. Nantawisarakul, A.G. Fane, H.G.L. Coster, "Electrical impedance spectroscopy characterization of conducting membranes", *Journal of Membrane Science* 195 (2002) 153–167.
2. Jin-Soo Park, Jae-Hwan Choi, Jung-Je Woo, Seung-Hyeon Moon, "An electrical impedance spectroscopic (EIS) study on transport characteristics of ion-exchange membrane systems" *Journal of Colloid and Interface Science* 300 (2006) 655–662.
3. Antonio Alcaraz, Hans Holdik, Thomas Ruffing, Patricio Ramirez, Salvador Mafe, "AC impedance spectra of bipolar membranes: an experimental study", *Journal of Membrane Science* 150 (1998) 43-56.
4. HansG .L. Coster, Terry C. Chilcott, Adelle CF. Coster, "Impedance spectroscopy of interfaces, membranes and ultrastructures" *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* 40 (1996) 79-98.
5. Ying Wan, Katherine A.M. Creber*, Brant Peppley, V. Tam Bui, Ionic conductivity of chitosan membranes, *Polymer* 44 (2003) 1057–1065.
6. Pikul Wanichapichart, Liangdeng Yu, "Chitosan membrane filtering characteristics modification by N-ion beams", *Surface & Coatings Technology* 201 (2007) 8165–8169.
7. W. Puthai, P. Wanichapichart, A. Kaewpiboon and Songklanakarin, *J. Sci. Technol.* 27 (4) (2005), p. 867.
8. J.-S. Park, T.C. Chilcott, H.G.L. Coster, S.-H. Moon, "Characterization of BSA-fouling of ion-exchange membrane systems using a subtraction technique for lumped data", *Journal of Membrane Science* 246 (2005) 137–144.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อสกุล นายวิศรุต พวยพุง
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 5210220081

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2552

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ได้รับทุนการศึกษาและการสนับสนุนการวิจัยจากโครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (NRU)

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Wissarut Pauypung, Prajak Saeung and Pikul Wanichapichart.2011, “Improvement of Electrochemical Impedance Spectroscopy for Evaluation Chitosan Membranes”, Siam Physics Congress 2011