

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย

4.1 สมบัติของโคโตซานและซีโอไลต์

สมบัติของโคโตซานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ความหนืด (viscosity) น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) และร้อยละการกำจัดหมู่แอซีทิล (%deacetylation) แสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบกับที่สังเคราะห์ขึ้นเองในงานวิจัยก่อนหน้า [2] แสดงว่ามีสมบัติเทียบเท่ากัน กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ โคโตซานเป็นวัสดุที่มีการผลิต และจำหน่ายภายในประเทศ การพัฒนาเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนจากโคโตซานจึงเป็นหนทางหนึ่งของการพัฒนาประเทศไทยให้สามารถพึ่งพาตนเองได้ ลดการนำเข้าวัสดุจากต่างประเทศ และเป็นการเพิ่มมูลค่าของโคโตซาน

ตารางที่ 4.1 สมบัติของโคโตซาน

สมบัติ	หน่วย	โคโตซานในงานวิจัยนี้	โคโตซานในงานวิจัยก่อนหน้า [2]
น้ำหนักโมเลกุล	ดอลตัน	9.5×10^5 (*)	1.6×10^6
ความหนืด	เซนติพอยส์	$3,171 \pm 156$	3,984
ร้อยละการกำจัดหมู่แอซีทิล	%	90.6 ± 0.18	92.3 ± 3.3

*ข้อมูลจากบริษัท ELAND LTD.

สมบัติของซีโอไลต์ที่ได้รับความอนุเคราะห์ (Thai silicate LTD.) ทดสอบด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) และเครื่อง Surface Area Analyzer ได้ผลดังตารางที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติของซีโอไลต์เชิงพาณิชย์ (Aldrich) แสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์ที่ได้รับความอนุเคราะห์มีสมบัติที่ใกล้เคียงกันกับซีโอไลต์เชิงพาณิชย์ มีเพียงขนาดรูพรุนที่มีค่าต่างจากซีโอไลต์เชิงพาณิชย์อาจมีสาเหตุจากความผิดพลาดของเครื่องมือวัด โดยซีโอไลต์เชิงพาณิชย์จะมีขนาดรูพรุนกว้างที่สุดเท่ากับ 4.2 อังสตรอม

ตารางที่ 4.2 สมบัติของซีโอไลต์

สมบัติ	หน่วย	ซีโอไลต์ที่ในงานวิจัยนี้ (**)	ซีโอไลต์เชิงพาณิชย์ (***)
SiO ₂ / Al ₂ O ₃	-	1.1	1.0
ขนาดของรูพรุน	อังสตรอม (Å)	6.7	4.2
พื้นที่ผิวของซีโอไลต์	m ² /g	522.98	-
ปริมาตรของรูพรุน	cm ³ /g	0.3069	-

** บริษัท Thai silicate LTD., *** บริษัท Aldrich

4.2 โครงสร้างทางเคมี

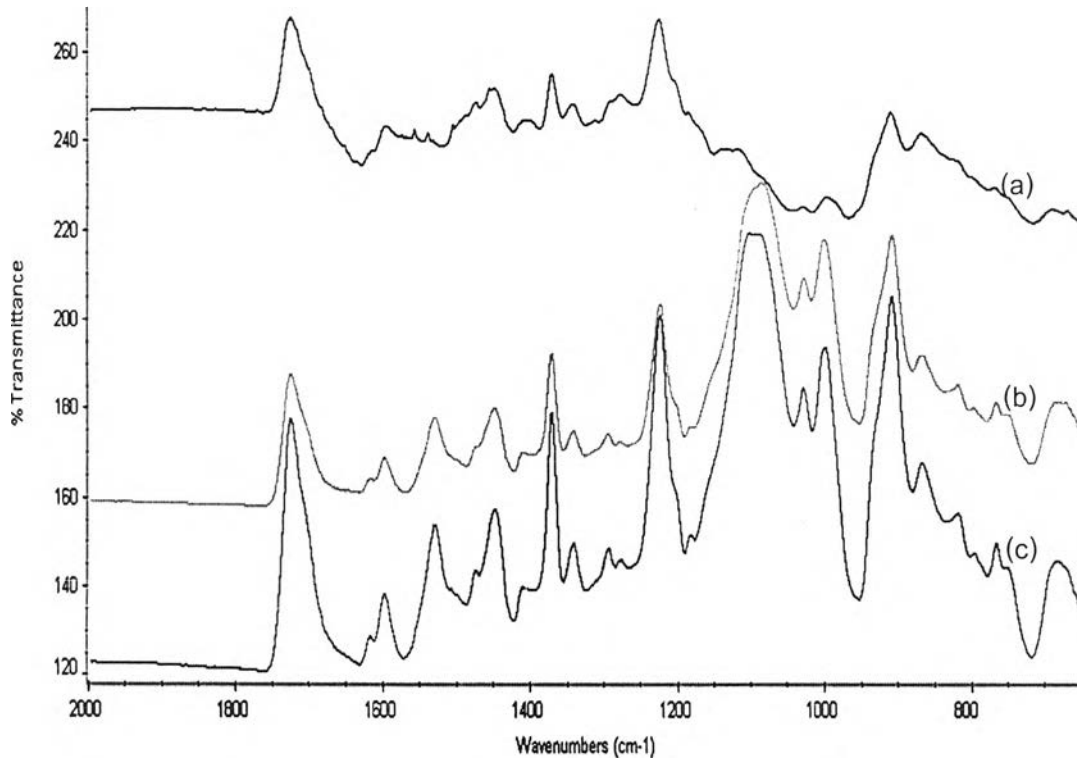
4.2.1 เมมเบรนโคโตซานคอมโพสิต

FTIR spectrum ในรูปที่ 4.1 มีพีกสำคัญแสดงหมู่ฟังก์ชันในโคโตซาน คือ Scissors deformation frequency ของหมู่ NH₂ ที่ช่วงหมายเลขคลื่น 1,660-1510 ซม⁻¹ โดยแสดงพีกเด่นที่หมายเลขคลื่นประมาณ 1,600 ซม⁻¹ และพีกแสดงหมู่ CHN ที่หมายเลขคลื่นประมาณ 1,550 ซม⁻¹ เนื่องจากเมมเบรนโคโตซานในงานวิจัยนี้มีการเชื่อมขวางด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ทำให้มีพีกแสดงหมู่กรดซัลฟอนิกได้แก่ asymmetric SO₂ stretching ที่ช่วงหมายเลขคลื่น 1,300-1,400 ซม⁻¹ พีกแสดงเกลือกรดซัลฟอนิกที่หมายเลขคลื่นประมาณ 1,230 ซม⁻¹ และ symmetric S-O-C stretching ที่หมายเลขคลื่น 720 ซม⁻¹ หากมีการเติมซีโอไลต์ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (b) และ (c) จะแสดงพีกของหมู่ซิลิกาอย่างเด่นชัดที่หมายเลขคลื่น 1,100 ซม⁻¹ โดยพีกของหมู่อลูมินาอยู่นอกสเปกตรัมที่วัด

4.2.2 เมมเบรนพอลิซัลโฟเนคอมโพสิต

FTIR spectrum ในรูปที่ 4.2 ทุกเส้น แสดงหมู่ฟังก์ชันของซัลโฟเนชัดเจน ในช่วงหมายเลขคลื่น 1,340-1,290 ซม⁻¹ และ 1,165-1,120 ซม⁻¹ เนื่องจากการ stretching ของหมู่ SO₂ แต่พีกแสดงหมู่กรดซัลฟอนิก คือ asymmetric SO₂ stretching ที่ 1,352-1,342 ซม⁻¹ และ symmetric SO₂ stretching ที่ 1,165-1,150 ซม⁻¹ ซ้ำซ้อนกับพีกแสดงหมู่ซัลโฟเน จึงไม่อาจบอกได้แน่นอนว่ามีหมู่ซัลฟอนิกติดอยู่ในโครงสร้างของพอลิซัลโฟเนหรือไม่ด้วยการวิเคราะห์ FTIR นี้ นอกจากนี้จะเห็นพีกอย่างไม่ชัดเจนของเกลือกรดซัลฟอนิก ที่หมายเลขคลื่นประมาณ 1,230-1,120 ซม⁻¹ ในรูป 4.2 (ii) และ 4.2 (iv) เท่านั้น ที่ทำให้สามารถคาดคะเนว่าการทำซัลโฟเนชันน่าจะเกิดขึ้นได้จริง ความแตกต่างของรูป 4.2 a) และ b) คือ ในรูป 4.2 b) มีพีกที่หมายเลขคลื่นประมาณ 1,100

cm^{-1} และ 800 cm^{-1} ของหมู่ซิลิกา ซึ่งในรูป 4.2 a) ไม่มี ดังนั้นในส่วนของการเกิดสารเชิงซ้อนของซีโอไลต์ในเมมเบรนพอลิซัลโฟนาคอมโพสิตน่าจะเกิดขึ้นได้จริง



รูปที่ 4.1 FTIR spectra ของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์

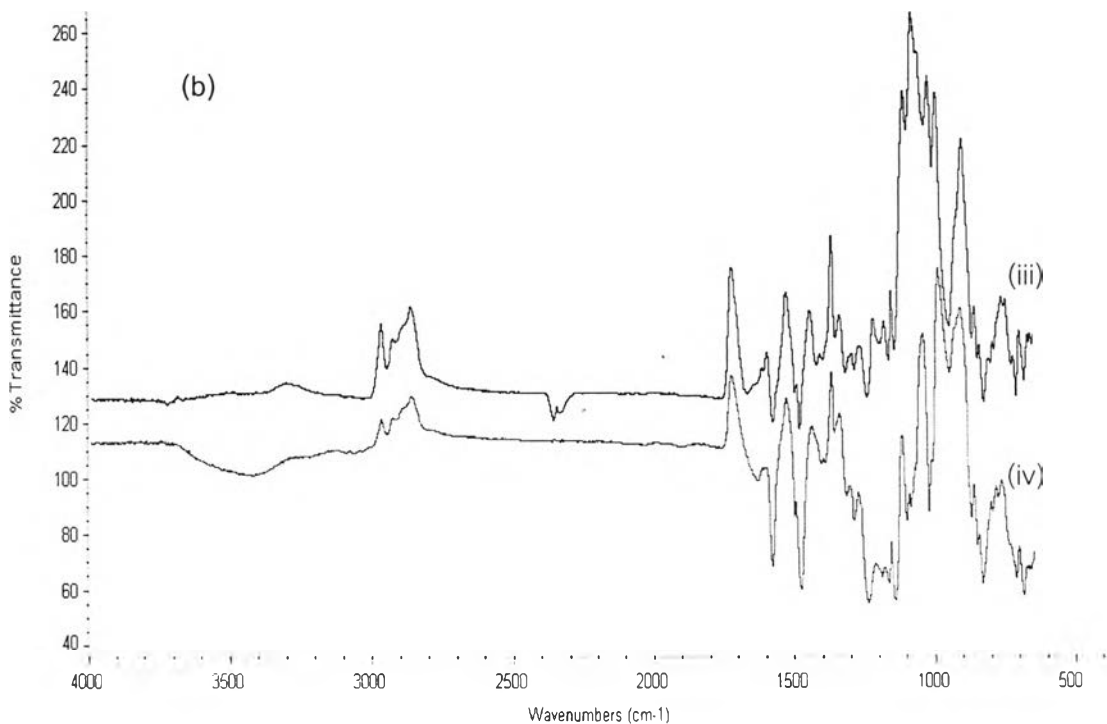
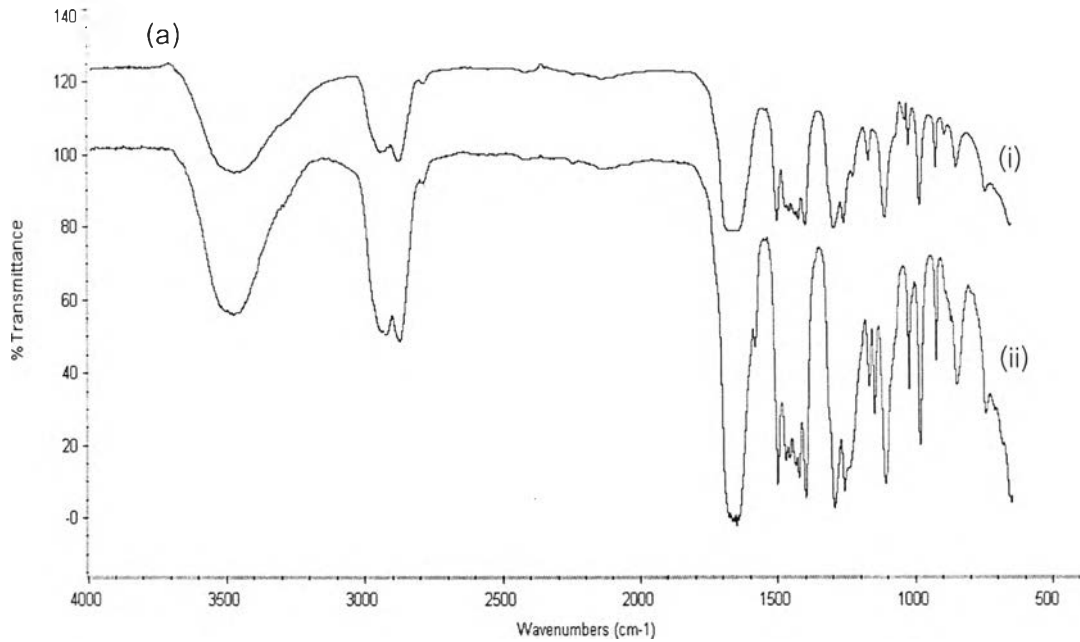
a) 0%zeolite b) 40%zeolite c) 80%zeolite

4.3 ร้อยละการดูดซับน้ำ

4.3.1 เมมเบรนไคโตซานคอมโพสิต

จากรูปที่ 4.3 เมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวางมีค่าร้อยละการดูดซับน้ำเท่ากับ 92.7 ± 1.9 เมื่อเติมซีโอไลต์ลงไป พบว่าค่าร้อยละการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น ตามปริมาณซีโอไลต์ที่เพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 125-126 ที่ปริมาณซีโอไลต์ร้อยละ 70-80 เนื่องจากซีโอไลต์เป็นสารที่มีความเป็นรูพรุนสูง (micro porous molecules) และการที่โครงสร้างของซีโอไลต์แสดงความมีขั้วเป็นผลให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลน้ำกับเมมเบรนสูงขึ้น ทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลน้ำได้ดี โดยการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางกายภาพด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals) มีค่าพลังงานความร้อนของการดูดซับต่ำ เป็นกระบวนการคายความร้อน และไม่มีการแตกของพันธะ ดังนั้นจึงสามารถเกิดได้อย่างรวดเร็ว เมื่อมีปริมาณซีโอไลต์มากขึ้นการดูดซับน้ำก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน จึงทำให้ค่าร้อยละการ

ดูดซับน้ำมากขึ้นเช่นกัน โดยเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์ที่เตรียมขึ้นทั้งหมดมีค่าร้อยละการดูดซับน้ำมากกว่าเมมเบรนเซลล์เชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 ที่มีค่าร้อยละการดูดซับน้ำเท่ากับ 17.9 ± 1.2 ความสามารถในการดูดซับน้ำที่สูงขึ้นของเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิตนี้



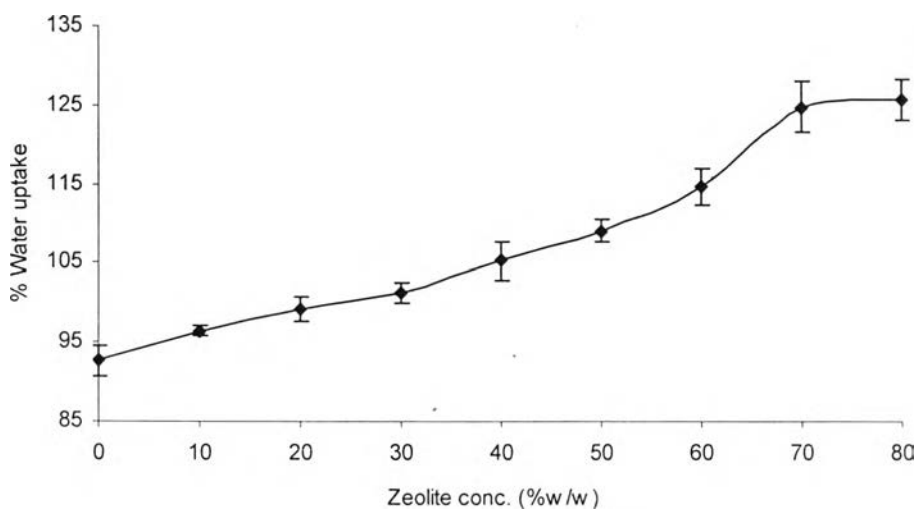
รูปที่ 4.2 FTIR spectra ของเมมเบรนพอลิซัลโฟนคอมโพสิต

(i) Polysulfone (ii) SPSF (iii) Polysulfone-50% zeolite (iv) SPSF-50%zeolite

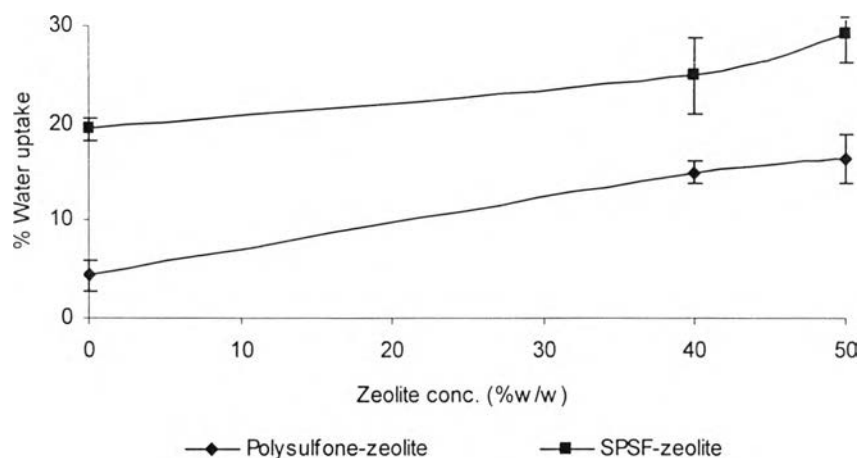
ส่งผลดีต่อการนำไปใช้เป็นเมมเบรนเซลล์เชื้อเพลิงในแง่ความต้องการน้ำในการนำโปรตอนลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการนำโปรตอนที่อุณหภูมิสูง ๆ ($>100^{\circ}\text{C}$) ซึ่งเป็นวิวัฒนาการของเมมเบรนเซลล์เชื้อเพลิงรุ่นใหม่ เพื่อลดความเป็นพิษของการมีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในสารป้อนต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมทางขั้วแอโนด อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการดูดซับน้ำที่มากขึ้นนี้ ต้องไม่ทำให้เมมเบรนบวมตัวมากขึ้น กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงความหนาต้องไม่มากขึ้น จึงจะเป็นสมบัติที่ดีของเมมเบรนเชื้อเพลิงซึ่งจะได้กล่าวต่อไป โดยค่าร้อยละการดูดซับน้ำที่ปริมาณซีโอไลต์ร้อยละ 50 มีค่าเท่ากับ 109.0 ± 1.4

4.3.2 เมมเบรนพอลิซัลโฟเนคอมโพสิต

จากรูปที่ 4.4 พบว่าเมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟเนมีความสามารถในการดูดซับน้ำมากกว่าเมมเบรนพอลิซัลโฟเน กล่าวคือ มีค่าร้อยละการดูดซับน้ำเท่ากับ 19.4 ± 1.2 และ 4.3 ± 1.5 ตามลำดับ เนื่องจากการทำซัลโฟเนชันเป็นการเพิ่มหมู่ซัลโฟนิกให้กับเมมเบรน ทำให้เมมเบรนมีความชื้นมากขึ้น เมมเบรนจึงมีความชอบน้ำมากขึ้น นอกจากนั้นค่าร้อยละการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีโอไลต์ในเมมเบรน โดยเมมเบรนพอลิซัลโฟเน-ซีโอไลต์ และเมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟเน-ซีโอไลต์ มีค่าร้อยละการดูดซับน้ำที่ปริมาณซีโอไลต์ร้อยละ 50 เท่ากับ 16.4 ± 2.5 และ 29.2 ± 3.1 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 การดูดซับน้ำของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์

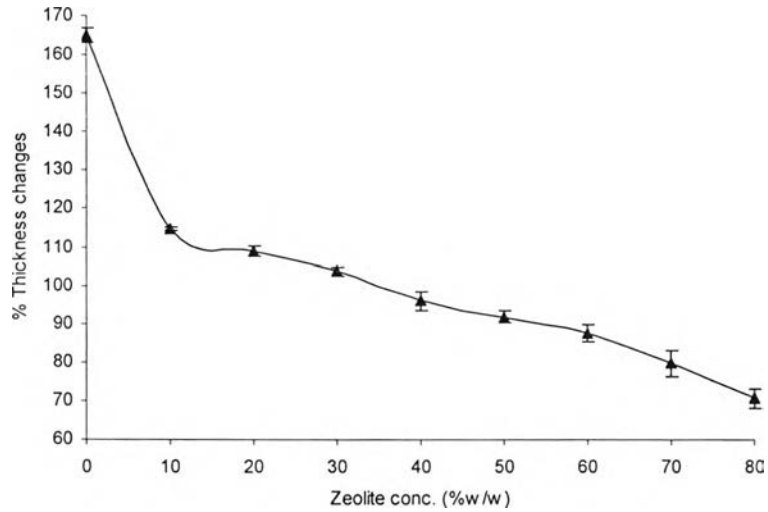


รูปที่ 4.4 การดูดซับน้ำของเมมเบรนพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์ และซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์

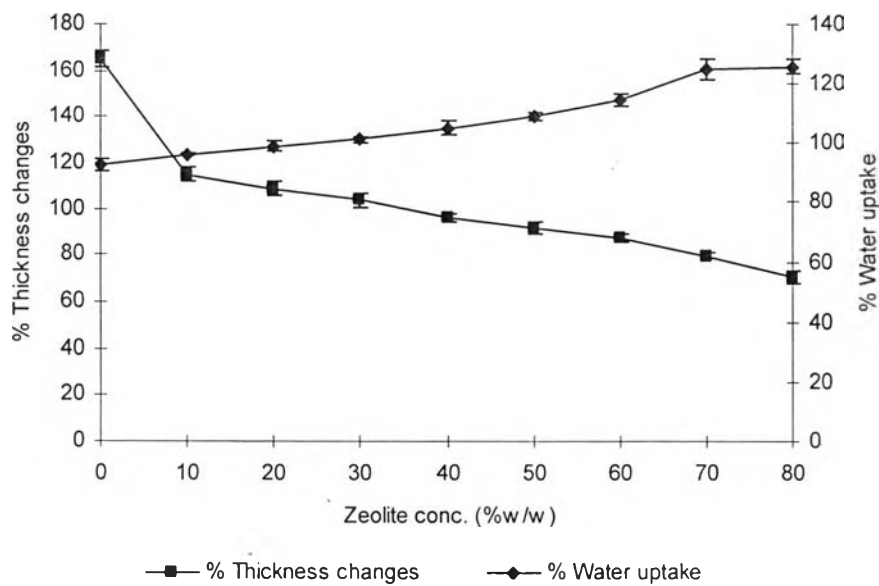
4.4 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา

4.4.1 เมมเบรนไคโตซานคอมโพสิต

ในงานวิจัยนี้ เมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวางแห้งมีความหนาเท่ากับ 11.3 ± 0.7 ไมครอน แต่เมื่อเติมซีโอไลต์ลงในสารละลายไคโตซาน และเมื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นเมมเบรนด้วยปริมาณสารละลายพอลิเมอร์ ประมาณเท่า ๆ กันทุกครั้ง ทำให้ความหนาของเมมเบรนไคโตซาน-ซีโอไลต์แห้งเพิ่มขึ้นตามลำดับเป็น 15.3 ± 0.9 ไมครอน ที่ปริมาณซีโอไลต์เท่ากับร้อยละ 50 จากรูปที่ 4.5 พบว่าเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวางเปียกมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาเท่ากับ 165.1 ± 3.5 และมีค่าน้อยลงเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์มีสมบัติในการกักเก็บน้ำได้สูง ปริมาณน้ำที่เมมเบรนสามารถดูดซับได้ส่วนหนึ่งจะเข้าไปอยู่ภายในโพรงหรือรูพรุนภายในซีโอไลต์ โดยไม่ได้ทำให้อนุภาคซีโอไลต์บวมขึ้น มีเฉพาะส่วนของโมเลกุลน้ำที่ถูกดูดซับอยู่ในเนื้อไคโตซาน ที่ทำให้เมมเบรนบวมขึ้น ดังนั้นจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยลงเมื่อมีปริมาณซีโอไลต์ภายในเมมเบรนมากขึ้น โดยที่ปริมาณซีโอไลต์ร้อยละ 50 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเมมเบรนมีค่าเท่ากับ 91.9 ± 2.5 และเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 ที่มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาเท่ากับร้อยละ 26.9 ± 2.5 แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นทั้งหมดยังคงมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาไม่เกินไป



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงความหนาของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์

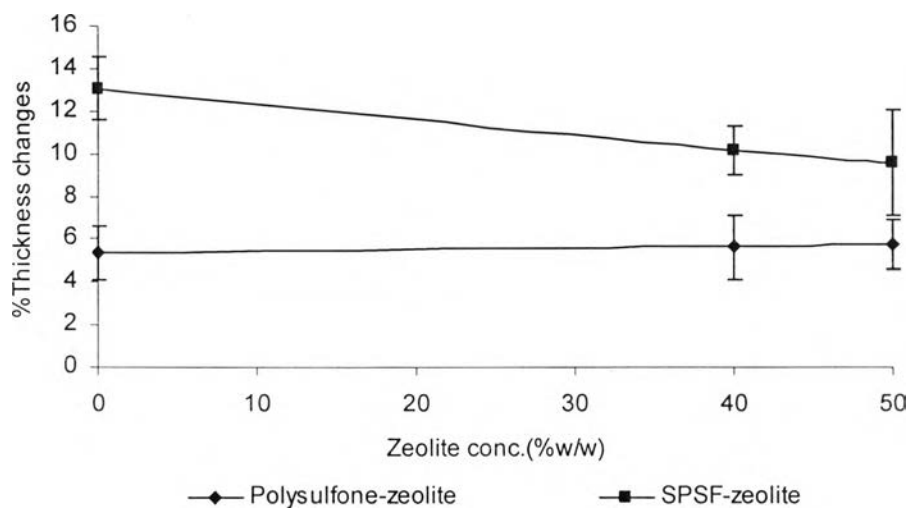


รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงความหนาและการดูดซับน้ำของ
เมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์

รูปที่ 4.6 แสดงสมบัติการดูดซับน้ำพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงความหนา เพื่อให้เห็นว่าเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิตดูดซับน้ำได้มากขึ้นแต่การเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยลง เป็นสมบัติที่ต้องการของเมมเบรนเซลล์เชื้อเพลิง อย่างไรก็ตาม ต้องตรวจสอบสมบัติอื่น ๆ ด้วยดังจะกล่าวต่อไป

4.4.2 เมมเบรนพอลิซัลโฟนคอมโพสิต

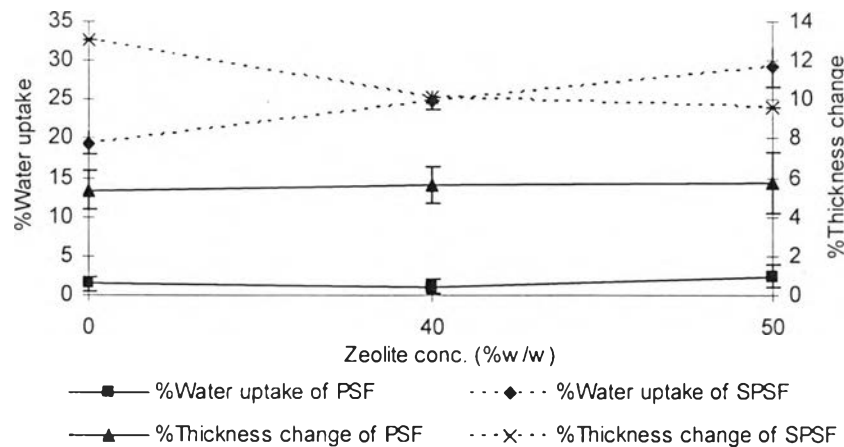
ในงานวิจัยนี้ สามารถเตรียมเมมเบรนพอลิซัลโฟนแห้ง และเมมเบรนซัลฟอนเตดพอลิซัลโฟนแห้งได้ความหนาเท่ากับ 27.3 ± 1.2 ไมครอน และ 19.0 ± 1.1 ไมครอน ตามลำดับ เนื่องจากเมมเบรนพอลิซัลโฟนเป็นเมมเบรนที่ไม่ชอบน้ำ ดังนั้นโมเลกุลน้ำที่เมมเบรนพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์ดูดซับได้ทั้งหมด จะเข้าไปอยู่ในโพรงของอนุภาคซีโอไลต์ ความหนาของเมมเบรนพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์เปียกในรูปที่ 4.7 จึงไม่เปลี่ยนแปลงจากเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่ไม่มีการเติมซีโอไลต์มากนัก เพราะความสามารถในการดูดซับน้ำได้มากขึ้นในรูปที่ 4.4 เป็นผลจากซีโอไลต์เท่านั้นต่างจากเมมเบรนซัลฟอนเตดพอลิซัลโฟน ซึ่งได้ถูกปรับปรุงให้มีความชอบน้ำมากขึ้น ดังนั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับได้จึงเป็นผลมาจากทั้ง เนื้อพอลิเมอร์ของซัลฟอนเตดพอลิซัลโฟน และอนุภาคซีโอไลต์ ในทำนองเดียวกับเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิต แต่ความชอบน้ำของซัลฟอนเตดพอลิซัลโฟนมีน้อยกว่าไคโตซาน ดังนั้นการลดลงของการเปลี่ยนแปลงความหนาของเมมเบรนซัลฟอนเตดพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์เปียก จึงมีค่าไม่สูงโดยที่ปริมาณซีโอไลต์ร้อยละ 50 ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาของเมมเบรนพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์ และเมมเบรนซัลฟอนเตดพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์มีค่าเท่ากับ 5.7 ± 0.7 และ 9.6 ± 2.1 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงความหนาของเมมเบรนพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์ และเมมเบรนซัลฟอนเตดพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์

รูปที่ 4.8 ได้แสดงสมบัติการดูดซับน้ำควบคู่กับการเปลี่ยนแปลงความหนา ของทั้งเมมเบรนพอลิซัลโฟนคอมโพสิต และเมมเบรนซัลฟอนเตดพอลิซัลโฟนคอมโพสิตไว้เพื่อการเปรียบเทียบ ซึ่งในเบื้องต้นนี้สรุปได้ว่าเมมเบรนซัลฟอนเตดพอลิซัลโฟนคอมโพสิตมีความ

น่าสนใจมากกว่าเมมเบรนพอลิซัลโฟนคอมโพสิต และอาจดีกว่าเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิต เพราะมีการบวมของเมมเบรนเบี่ยงน้อยกว่ามาก และยังสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าเมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117

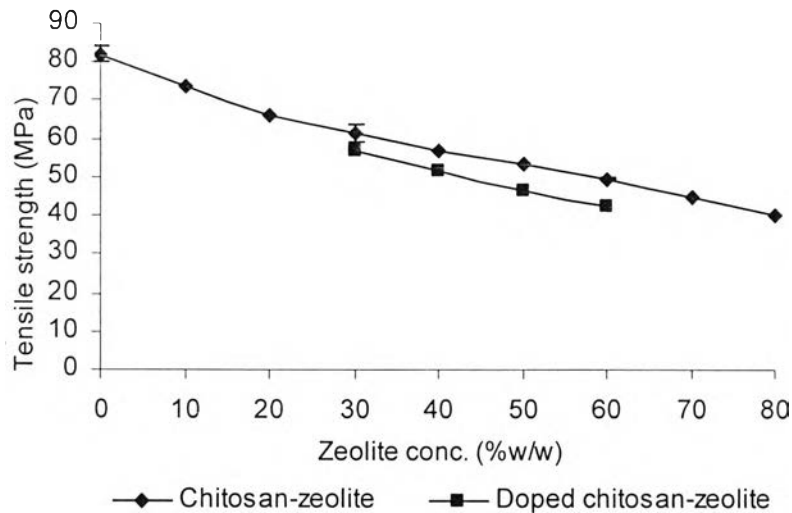


รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงความหนาและการดูดซับน้ำของเมมเบรนพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์และซัลฟอนเตดพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์

4.5 ความสามารถทนต่อแรงดึง

4.5.1 เมมเบรนไคโตซานคอมโพสิต

เมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวางมีค่าความสามารถทนแรงดึงเท่ากับ 81.9 ± 2.0 เมกะปาสกาล และมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมซีโอไลต์ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์เข้าไปแทรกอยู่ในเมทริกซ์ของเนื้อพอลิเมอร์ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นลดลง เมื่อเทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 ซึ่งมีค่าความสามารถทนต่อแรงดึงเท่ากับ 36.0 ± 1.5 เมกะปาสกาล แสดงว่าเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวางและเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์ที่เตรียมขึ้นมาทั้งหมดมีความแข็งแรงเชิงกลที่ดีกว่า โดยค่าความสามารถทนแรงดึงของเมมเบรนไคโตซาน-ซีโอไลต์ที่ปริมาณซีโอไลต์ร้อยละ 50 มีค่าเท่ากับ 53.3 ± 0.6 เมกะปาสกาล

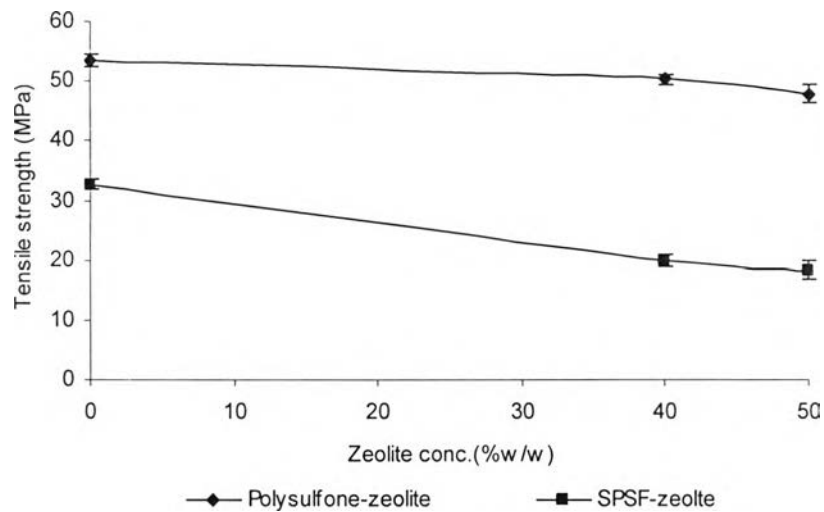


รูปที่ 4.9 ความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์

ในรูปที่ 4.9 ยังได้แสดงค่าความสามารถทนแรงดึงของเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิตที่โดปด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นไปดังที่คาดไว้ว่าความสามารถทนแรงดึงจะน้อยกว่าเมมเบรนที่ไม่ได้โดป อย่างไรก็ตามความสามารถทนแรงดึงที่ปริมาตรซีโอไลต์ร้อยละ 50 มีค่าเท่ากับ 46.2 ± 1.0 เมกะปาสกาล ทำให้เมมเบรนไคโตซานสูตรที่มีการโดปนี้มีความน่าสนใจอย่างยิ่ง

4.5.2 เมมเบรนพอลิซัลโฟนคอมโพสิต

เมมเบรนพอลิซัลโฟน และเมมเบรนซัลโฟเนตพอลิซัลโฟนมีค่าความสามารถทนต่อแรงดึงเท่ากับ 53.4 ± 9.2 และ 32.7 ± 1.0 เมกะปาสกาล ตามลำดับ และมีค่าลดลงตามปริมาณการเติมซีโอไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และพบว่าเมมเบรนซัลโฟเนตพอลิซัลโฟนคอมโพสิตที่เตรียมได้นั้นมีค่าความสามารถทนแรงดึงน้อยกว่าเมมเบรนพอลิซัลโฟนคอมโพสิต และน้อยกว่าเมมเบรนเซิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 ยกเว้นเมมเบรนซัลโฟเนตพอลิซัลโฟนที่ไม่มีการเติมซีโอไลต์ (32.7 ± 1.0 เมกะปาสกาล เทียบกับ 36.0 ± 1.5 เมกะปาสกาล ของ Nafion[®] 117) ดังนั้นเมมเบรนซัลโฟเนตพอลิซัลโฟนสูตรที่ไม่มีการเติมซีโอไลต์เท่านั้นที่มีความน่าสนใจในการใช้เป็นเมมเบรนเซลล์เชื้อเพลิง ขณะที่เมมเบรนพอลิซัลโฟนคอมโพสิตกลับมามีความน่าสนใจ หากสมบัติที่จะกล่าวต่อไป โดยเฉพาะค่าการนำโปรตอน มีความโดดเด่น



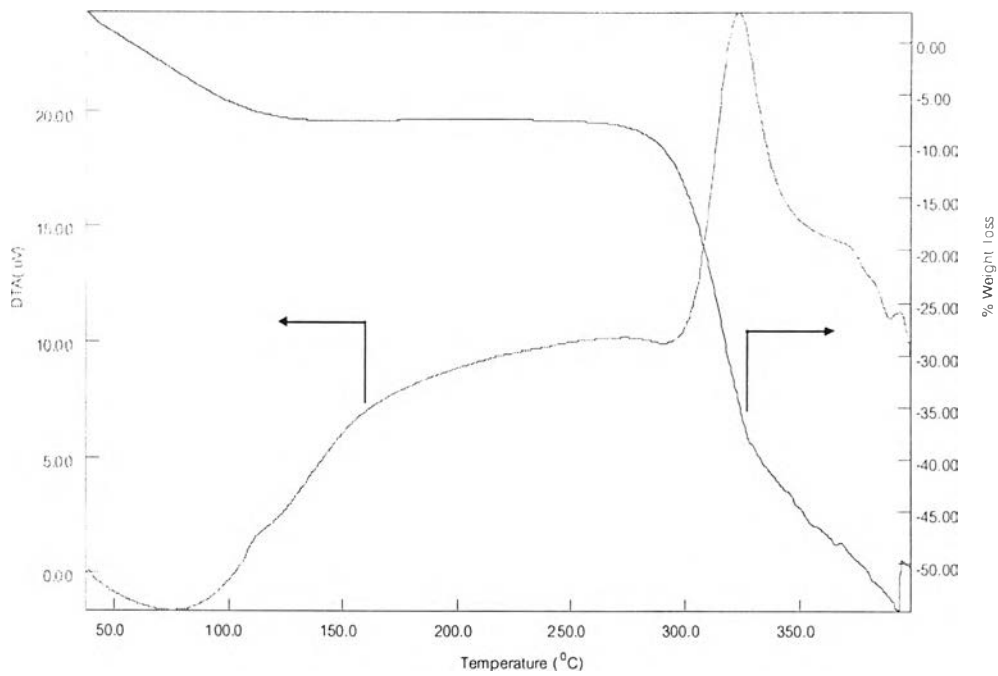
รูปที่ 4.10 ความสามารถทนแรงดึงของเมมเบรนพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์และซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์

4.6 อุณหภูมิการสลายตัวของเมมเบรน

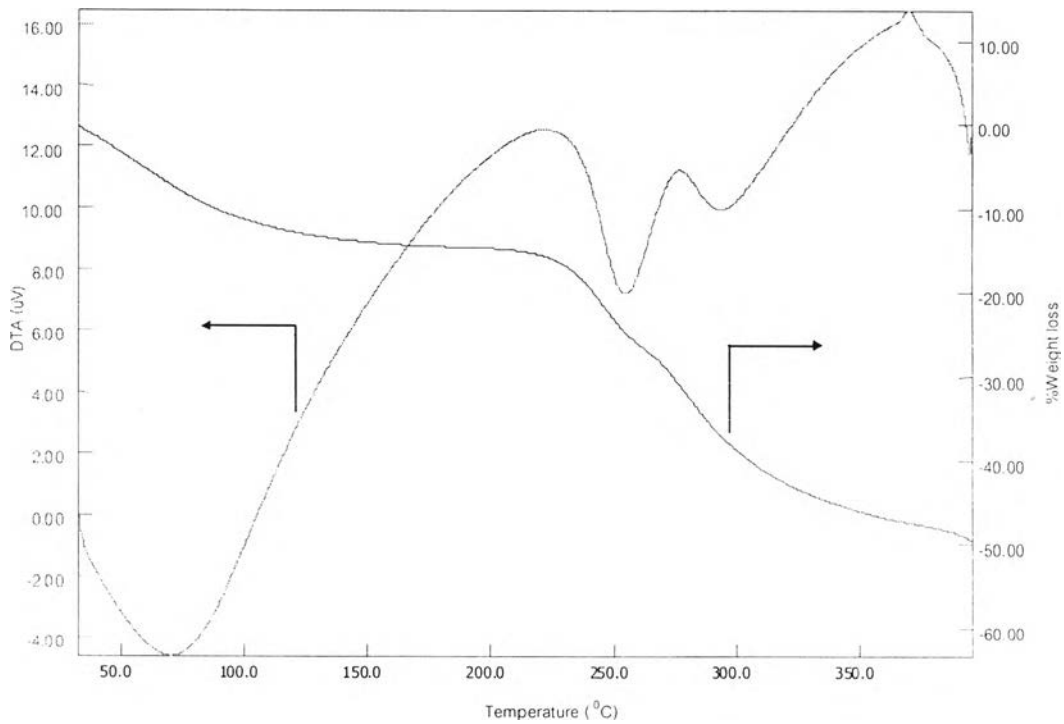
4.6.1 เมมเบรนไคโตซานคอมโพสิต

จากรูปที่ 4.11 แสดงว่าเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวางมีการลดลงของน้ำหนักเมมเบรนอย่างน้อย 4 ช่วง ช่วงแรกที่อุณหภูมิ 60-120 °ซ มีการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 12 เนื่องจากการสูญเสียน้ำในเมมเบรน ช่วงที่สองที่อุณหภูมิ 280-320 °ซ มีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มอีกร้อยละ 30 เนื่องจากการสลายตัวของหมู่ซัลฟอนิก ช่วงที่สามที่อุณหภูมิ 320-380 °ซ มีการสูญเสียน้ำหนักไปทั้งหมดร้อยละ 50 เนื่องจากการแตก (spilt) ของสายโซ่พอลิเมอร์ ก่อนที่จะเกิดการสลายตัวโดยสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 390 °ซ

จากรูปที่ 4.12 แสดงว่าเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวางที่เติมซีโอไลต์ร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก มีการลดลงของน้ำหนักเมมเบรนทั้งหมด 5 ช่วง โดยมีการสูญเสียน้ำหนักไปร้อยละ 50 ใน 4 ช่วงแรก ที่อุณหภูมิ 50-120 °ซ, 220-260 °ซ, 260-320 °ซ และ 350-400 °ซ เนื่องจากการสูญเสียน้ำในเมมเบรน การสลายตัวของหมู่ซัลฟอนิก การแตกของสายโซ่พอลิเมอร์ และการสลายตัวของเนื้อพอลิเมอร์ เหลือเพียงแต่อนุภาคของซีโอไลต์ ซึ่งจะสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 700 °ซ



รูปที่ 4.11 อุณหภูมิการสลายตัวของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง

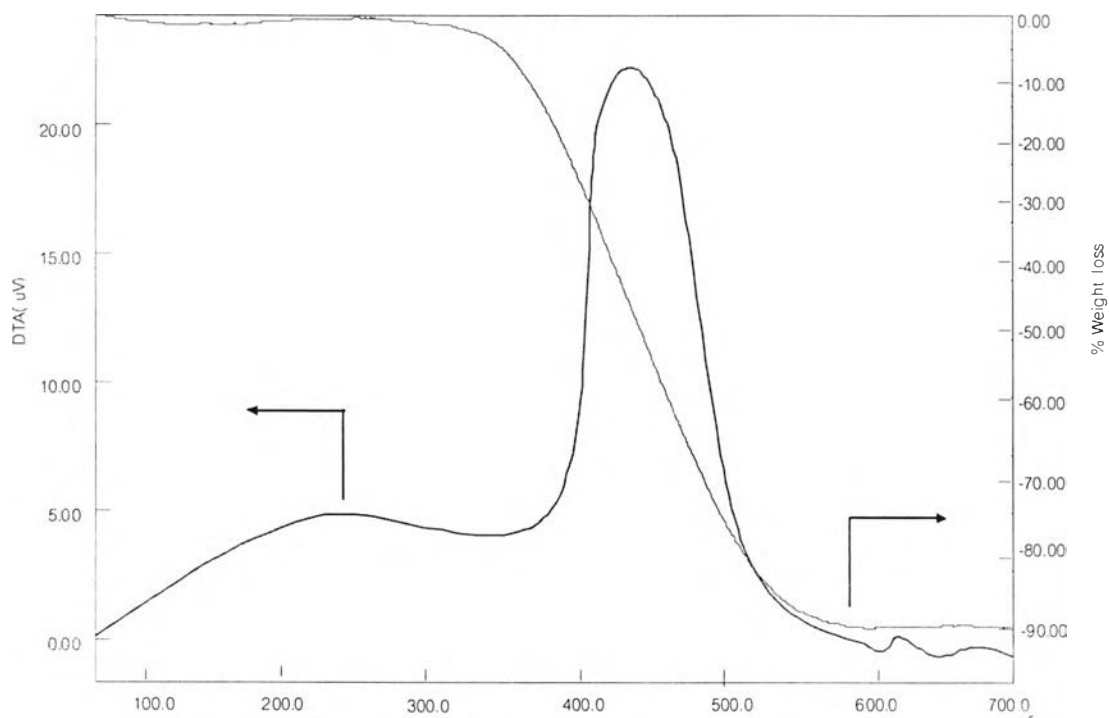


รูปที่ 4.12 อุณหภูมิการสลายตัวของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง
และเดมซีโอไลต์ร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก

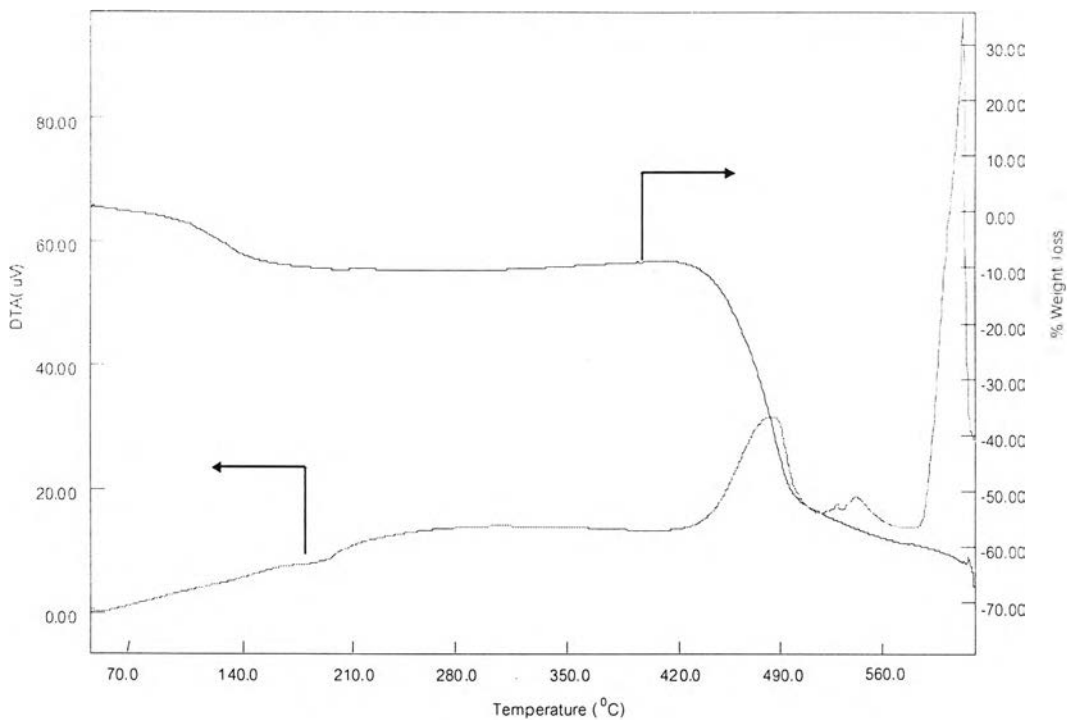
4.6.2 เมมเบรนพอลิซัลโฟนคอมโพสิต

จากรูปที่ 4.13 แสดงว่าเมมเบรนพอลิซัลโฟนมีการลดลงของน้ำหนักเมมเบรนเพียงช่วงเดียวคือ ที่อุณหภูมิ 340-560 °ซ โดยมีการสูญเสียน้ำหนักไปทั้งหมดร้อยละ 90

เมมเบรนพอลิซัลโฟนที่เติมซีโอไลต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ในรูปที่ 4.14 แสดงการลดลงของน้ำหนักเล็กน้อย น้อยกว่าร้อยละ 5 เนื่องจากการสูญเสียน้ำในเมมเบรน ที่อุณหภูมิ 70-120 °ซ ก่อนที่จะแสดงการสูญเสียน้ำหนักไปทั้งหมดร้อยละ 50 ในช่วงอุณหภูมิ 420-490 °ซ เนื่องจากการแตกของสายโซ่พอลิเมอร์ และเพิ่มอีกร้อยละ 10 ในช่วงอุณหภูมิ 490-560 °ซ เนื่องจากการสลายตัวของเนื้อพอลิเมอร์



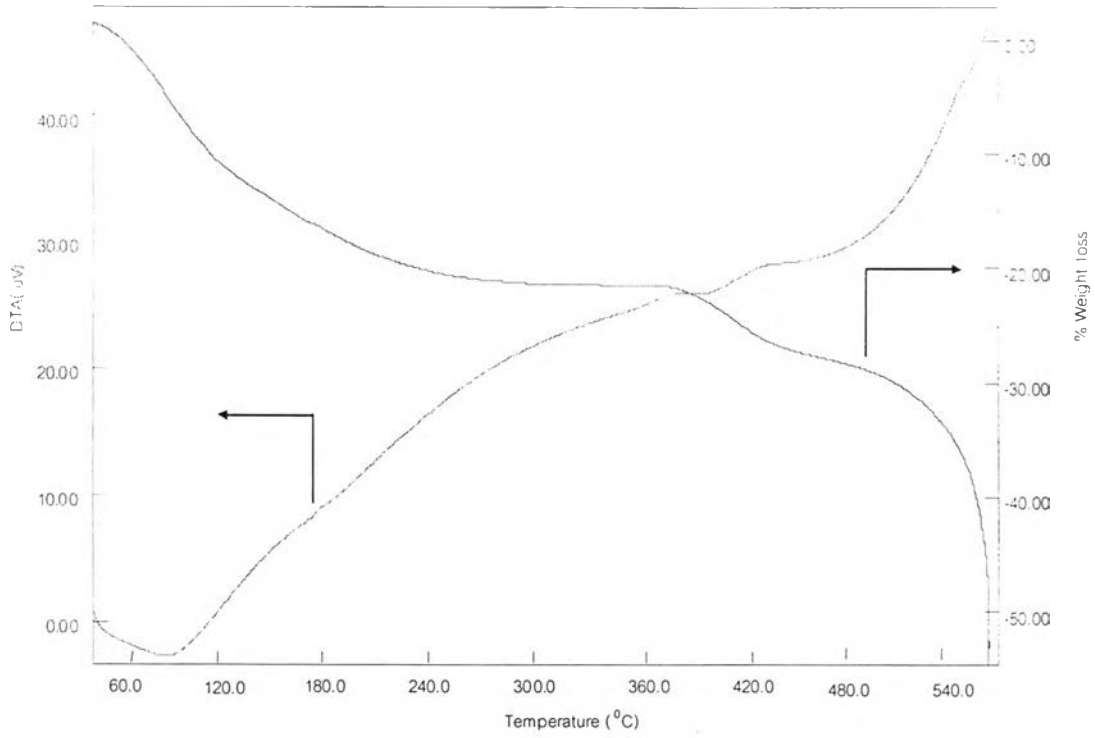
รูปที่ 4.13 อุณหภูมิการสลายตัวของเมมเบรนพอลิซัลโฟน



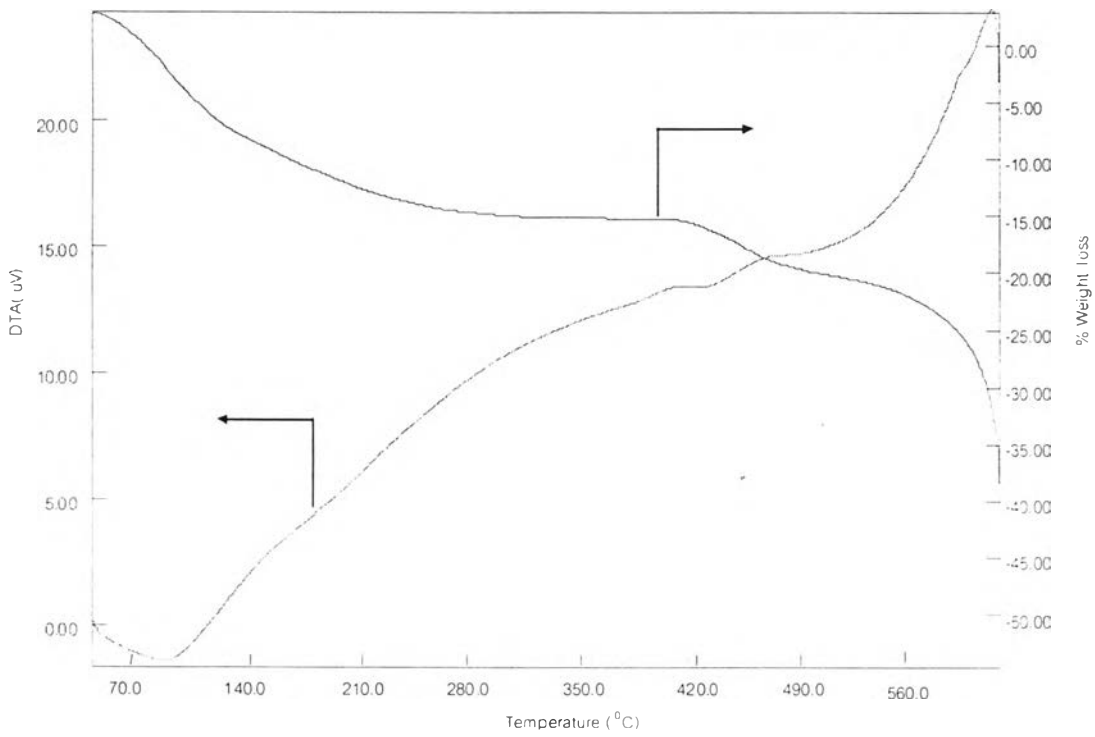
รูปที่ 4.14 อุณหภูมิการสลายตัวของเมมเบรนพอลิอะคริลไนไตรน์
ที่เติมซีโอไลต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.15 แสดงว่าเมมเบรนซัลฟอนเตดพอลิอะคริลไนไตรน์มีการลดลงของน้ำหนักเมมเบรน 4 ช่วง ช่วงแรกที่อุณหภูมิ 60-100 °ซ มีการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 12 เนื่องจากการสูญเสีย น้ำในเมมเบรน ช่วงที่สองที่อุณหภูมิ 150-250 °ซ มีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มอีกร้อยละ 10 เนื่องจากการสลายตัวของหมู่ซัลฟอนิก ช่วงที่สามที่อุณหภูมิ 360-440 °ซ มีการสูญเสียน้ำหนักไปทั้งหมดร้อยละ 30 เนื่องจากการแตกของสายโซ่พอลิเมอร์ ก่อนที่จะเกิดการสลายตัวโดยสมบูรณ์ที่ อุณหภูมิประมาณ 570 °ซ

จากรูปที่ 4.16 แสดงว่าเมมเบรนซัลฟอนเตดพอลิอะคริลไนไตรน์ที่เติมซีโอไลต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มีการลดลงของน้ำหนักเมมเบรนทั้งหมด 5 ช่วง โดยมีการสูญเสียน้ำหนักไปร้อยละ 30 ใน 4 ช่วงแรก ที่อุณหภูมิ 60-100 °ซ, 120-200 °ซ, 400-490 °ซ และ 540-600 °ซ เนื่องจากการสูญเสีย น้ำในเมมเบรน การสลายตัวของหมู่ซัลฟอนิก การแตกของสายโซ่พอลิเมอร์ และการสลายตัวของ เนื้อพอลิเมอร์ เหลือเพียงแต่อนุภาคของซีโอไลต์ ซึ่งจะสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 700 °ซ



รูปที่ 4.15 อุณหภูมิการสลายตัวของเมมเบรนซัลโฟเนตพอลิซัลโฟน



รูปที่ 4.16 อุณหภูมิการสลายตัวของเมมเบรนซัลโฟเนตพอลิซัลโฟน
ที่เติมซีโอไลต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

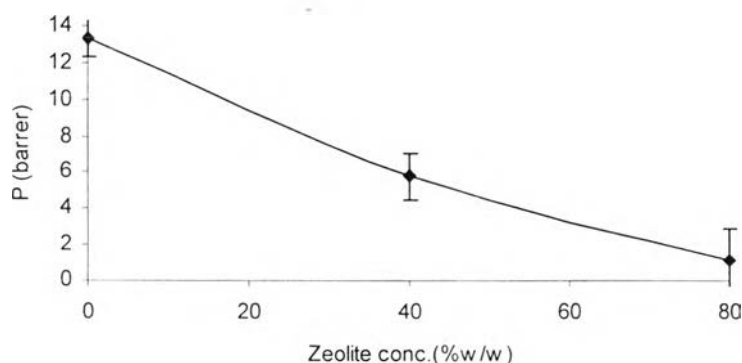
4.7 ค่าการซึมผ่านของแก๊ส

4.7.1 เมมเบรนไคโตซานคอมโพสิต

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนของเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิตซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 บาร์เรอร์ (barrer) ในขณะที่เมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 มีค่าการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 124.5 ± 18.5 บาร์เรอร์ แต่ในการดำเนินการเซลล์เชื้อเพลิง อาจใช้ตัวออกซิโดส์เป็นอากาศแทนแก๊สออกซิเจนก็ได้ จึงได้ทดสอบค่าการซึมผ่านของอากาศด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งพบว่าเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวางให้อากาศแพร่ผ่านได้ 13.4 ± 1.1 บาร์เรอร์ และมีค่าลดลงเป็น 5.8 ± 1.3 และ 1.1 ± 1.9 บาร์เรอร์ เมื่อปริมาณซีโอไลต์ในเมมเบรนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 40 เป็นร้อยละ 80 ตามลำดับ ขณะที่เมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 มีค่าการซึมผ่านของอากาศเท่ากับ 180.5 ± 17.9 บาร์เรอร์

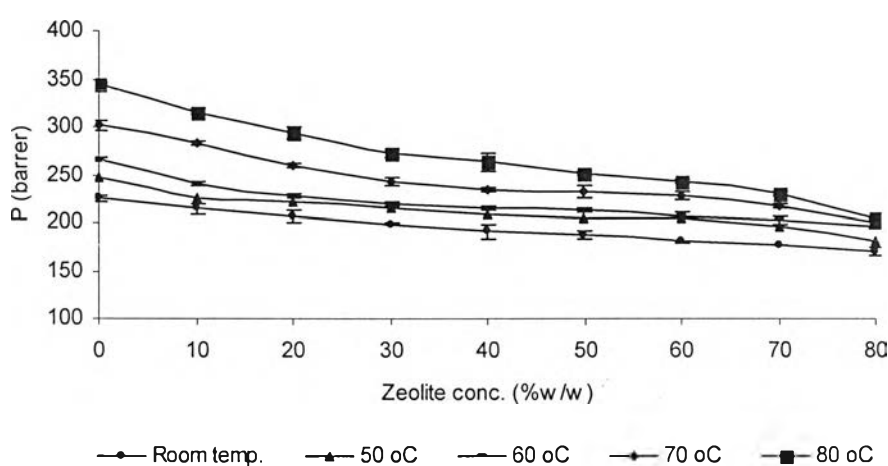
ตารางที่ 4.3 แสดงการซึมผ่านแก๊สออกซิเจน ณ อุณหภูมิห้อง

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สออกซิเจน (บาร์เรอร์)
Nafion [®] 117	124.5 ± 18.5
ไคโตซานเชื่อมขวาง	0
ไคโตซานเชื่อมขวาง- 40% ซีโอไลต์	0
ไคโตซานเชื่อมขวาง- 80% ซีโอไลต์	0



รูปที่ 4.17 การซึมผ่านอากาศของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์ ณ อุณหภูมิห้อง

ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนของเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิต ในรูปที่ 4.18 ให้ผลดังที่คาดไว้คือ ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนลดลง ตามปริมาณซีโอไลต์ที่เพิ่มขึ้น ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนมีค่าสูงกว่าค่าการซึมผ่านของอากาศ และแก๊สออกซิเจน เพราะขนาดโมเลกุลของแก๊สไฮโดรเจนเล็กกว่า ย่อมแพร่ผ่านเมมเบรนได้มากกว่า และเมื่อเทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 ที่มีค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ $1,014.4 \pm 23.0$ แบริอร์ แสดงให้เห็นถึงความปลอดภัยในการใช้เมมเบรนไคโตซานคอมโพสิตเป็นเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนในเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากมีสมบัติให้แก๊สแพร่ผ่านต่ำ จึงไม่เกิดปฏิกิริยาการรวมตัวของโมเลกุลไฮโดรเจนและออกซิเจนในเมมเบรน



รูปที่ 4.18 การซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน

ผลของการเติมซีโอไลต์ในเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวางแล้วทำให้ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนต่ำลง แสดงว่าเส้นทางการเดินของแก๊สผ่านเมมเบรนเกิดขึ้นในส่วนของเนื้อพอลิเมอร์เท่านั้น แก๊สส่วนที่เจอกับอนุภาคซีโอไลต์จะถูกซีโอไลต์ดูดซับไว้

และสำหรับผลของอุณหภูมิต่อค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน อธิบายได้ว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น (50-80 °C) พอลิเมอร์จะมีพลังงานภายในมากขึ้น ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์มีการเคลื่อนไหวได้มากขึ้น ทำให้เกิดปริมาตรหรือช่องว่างระหว่างสายโซ่เพิ่มมากขึ้น ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนจึงมีค่ามากขึ้น โดยเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นทั้งหมดให้ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนน้อยกว่าเมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 ที่ทุกช่วงอุณหภูมิ ซึ่งมีค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจาก 1014.4 ± 23.0 เป็น 1253.3 ± 26.9 , 1417.2 ± 34.6 , 1647.7 ± 16.8 และ 1896.9 ± 22.7 แบริอร์ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 การซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์ ที่ถูกโคปด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

ปริมาณซีโอไลต์ (ร้อยละ)	อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ (°C)				
	25-30	50	60	70	80
0	250.3±6.2 (225.2±1.7)	258.2±6.4 (246.0±3.1)	270.6±6.7 (265.7±1.6)	290.7±7.3 (301.2±4.7)	304.7±5.4 (345.7±1.6)
40	213.9±12.3 (191.3±2.4)	230.4±4.0 (209.2±7.4)	240.1±5.5 (215.4±5.5)	251.5±3.1 (234.8±1.9)	276.1±15.1 (263.1±9.6)
50	202.4±2.7 (187.0±1.4)	219.3±4.0 (205.3±4.0)	230.6±4.0 (212.9±4.1)	238.4±4.7 (231.9±5.7)	257.0±2.3 (251.7±2.0)
60	188.3±3.0 (180.1±4.0)	213.9±12.2 (203.7±0.9)	223.6±1.8 (207.4±2.1)	234.8±1.9 (227.6±3.7)	253.1±4.0 (243.0±1.8)

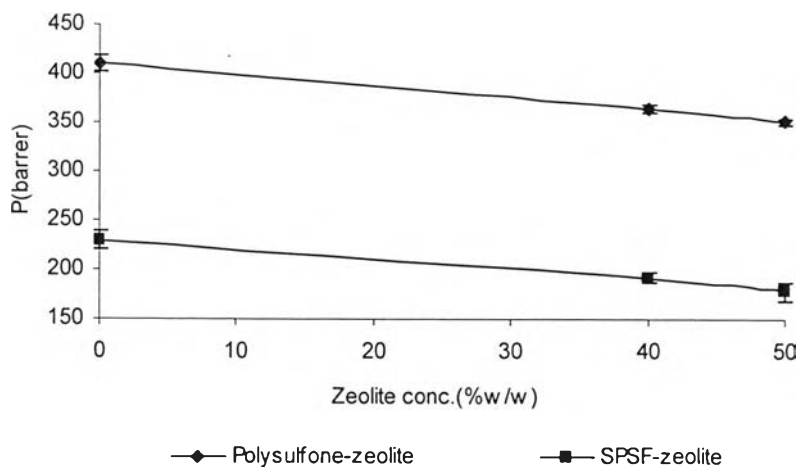
หมายเหตุ: ตัวเลขในวงเล็บคือค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์ ที่ไม่ได้ถูกโคปด้วยกรดซัลฟิวริก

ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนของเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิตที่โคปด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก แสดงในตารางที่ 4.4 พบว่ามีค่าสูงกว่าของเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิตที่ไม่ได้โคปด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเล็กน้อย เพราะว่าสารละลายกรดซัลฟิวริกในเมมเบรนที่ถูกโคปได้ไปทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ห่างกันมากขึ้น แก๊สจึงแพร่ผ่านได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ยังมีค่าต่ำกว่าของเมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 อยู่มาก

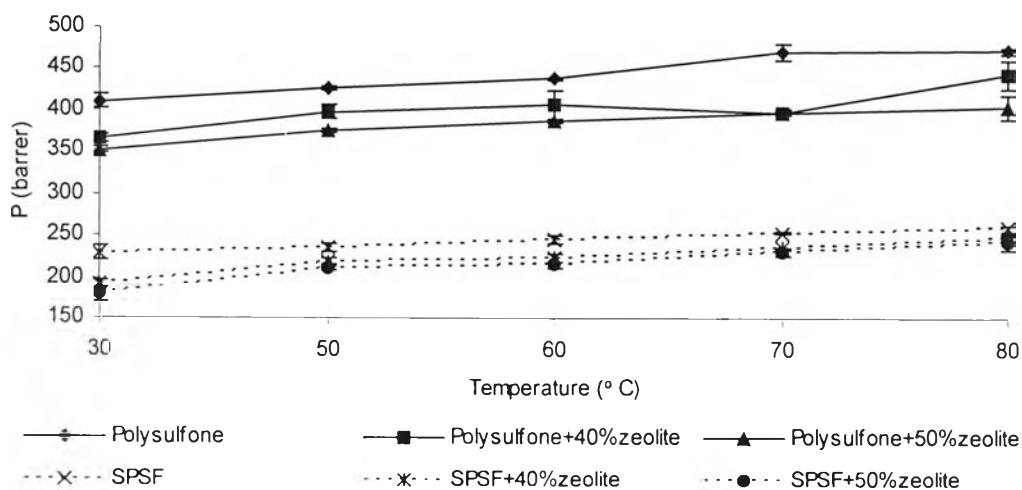
4.7.2 เมมเบรนพอลิซัลโฟเนคอมโพสิต

จากผลค่าการซึมผ่านแก๊สออกซิเจน อากาศ และไฮโดรเจน ของเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิต ข้างต้น ซึ่งพบว่าโมเลกุลแก๊สยิ่งเล็ก ค่าการซึมผ่านของแก๊สจะยิ่งสูง ดังนั้นในหัวข้อนี้ จึงดำเนินการศึกษาค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนเท่านั้น จากรูปที่ 4.19 ผลของการทำซัลโฟเนชัน ทำให้เมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟเนมีค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนต่ำกว่าเมมเบรนพอลิซัลโฟเน เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ซัลโฟนิคกับพอลิซัลโฟเนทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวแน่นขึ้นและเป็นระเบียบมากขึ้น ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนจึงมีค่าต่ำลง โดยค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนลดลงตามปริมาณซีโอไลต์ที่เพิ่มขึ้นในเมมเบรนทั้งสองชนิด นอกจากนั้นพบว่าค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนของเมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟเนมีค่าใกล้เคียงกับของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง แสดงว่าน่าจะเป็นการเกิดพันธะของหมู่ซัลโฟนิคกับสายโซ่หลักของไคโตซาน หรือพอลิซัลโฟเน คล้ายคลึงกัน

จากรูปที่ 4.20 เป็นผลของอุณหภูมิต่อค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนของเมมเบรนพอลิซัลโฟนคอมโพสิต ซึ่งให้ผลคล้ายคลึงกับเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิต เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิสูงขึ้น (50-80 °ซ) ส่งผลให้ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนสูงขึ้น แต่ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนของเมมเบรนพอลิซัลโฟนคอมโพสิตทั้งหมดยังคงต่ำกว่าเมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion® 117



รูปที่ 4.19 การซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนของเมมเบรนพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์ และซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์ ณ อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.20 การซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนของเมมเบรนพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์ และซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์ ที่อุณหภูมิต่างๆ

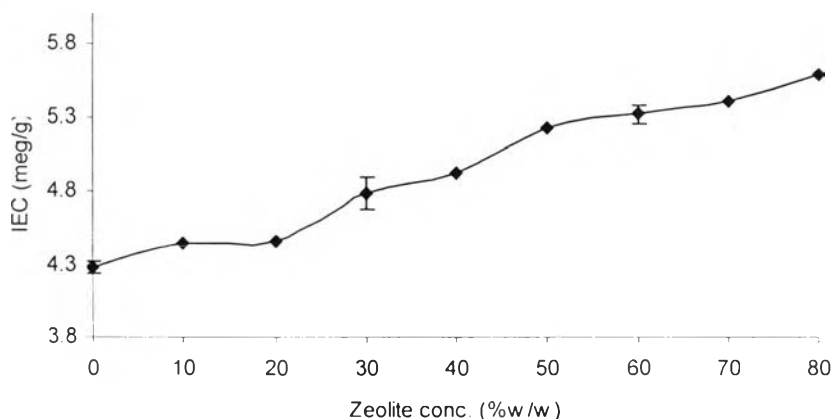
4.8 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

4.8.1 เมมเบรนไคโตซานคอมโพสิต

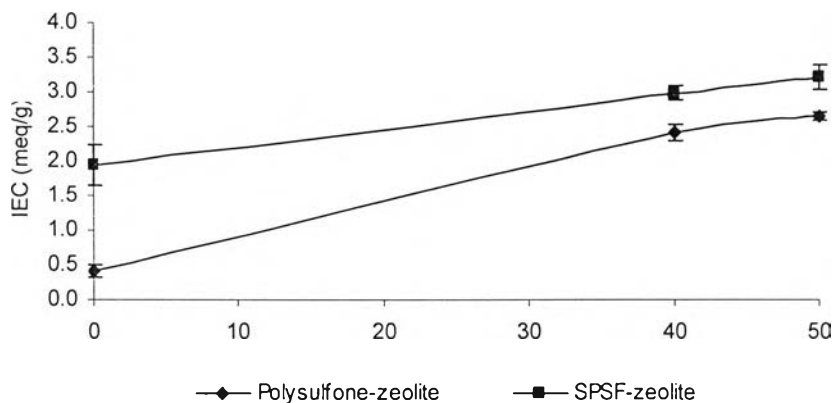
จากรูปที่ 4.21 พบว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีโอไลต์ในเมมเบรนจาก 4.28 ± 0.04 มิลลีสมมูล/กรัม ในเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวางที่ไม่มีการเติมซีโอไลต์ จนมีค่าเท่ากับ 5.24 ± 0.03 มิลลีสมมูล/กรัม ในเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวางที่เติมซีโอไลต์ร้อยละ 50 ตามผลของประจุลบสุทธิที่เกิดจากการรวมกันของหน่วย (SiO_2) และ (AlO_2) ในซีโอไลต์ ขณะที่ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 มีค่าเท่ากับ 0.87 ± 0.09 มิลลีสมมูล/กรัม แสดงว่าเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิตที่เตรียมทั้งหมด มีศักยภาพสูงในการนำมาใช้เป็นเมมเบรนเซลล์เชื้อเพลิง

4.8.2 เมมเบรนพอลิซิลโฟนคอมโพสิต

จากรูปที่ 4.22 แสดงว่าค่าการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรนซิลโฟนเตตพอลิซิลโฟนมีค่าสูงกว่าเมมเบรนพอลิซิลโฟน ทั้งนี้เนื่องจากผลของการเติมหมู่ซิลโฟนิกในเมมเบรนซิลโฟนเตตพอลิซิลโฟน อย่างไรก็ตามที่ปริมาณซีโอไลต์ร้อยละ 0 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรนพอลิซิลโฟน มีค่าต่ำมากเท่ากับ 0.41 ± 0.09 มิลลีสมมูล/กรัม ขณะที่ของเมมเบรนซิลโฟนเตตพอลิซิลโฟนมีค่าเท่ากับ 1.94 ± 0.29 มิลลีสมมูล/กรัม โดยค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรนพอลิซิลโฟน จะได้รับการปรับปรุงให้สูงขึ้นอย่างมากด้วยการเติมซีโอไลต์ในเมมเบรน ขณะที่ถ้าเมมเบรนมีหมู่ฟังก์ชันซิลโฟนิกทั้งในเมมเบรนไคโตซานและในเมมเบรนซิลโฟนเตตพอลิซิลโฟน ซีโอไลต์ช่วยทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงขึ้นไม่มากนัก แสดงว่าหมู่ซิลโฟนิกเป็นหมู่กรดที่แรงซึ่งมีบทบาทต่อการนำไอออนมากกว่าหมู่กรดอื่น ๆ



รูปที่ 4.21 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์

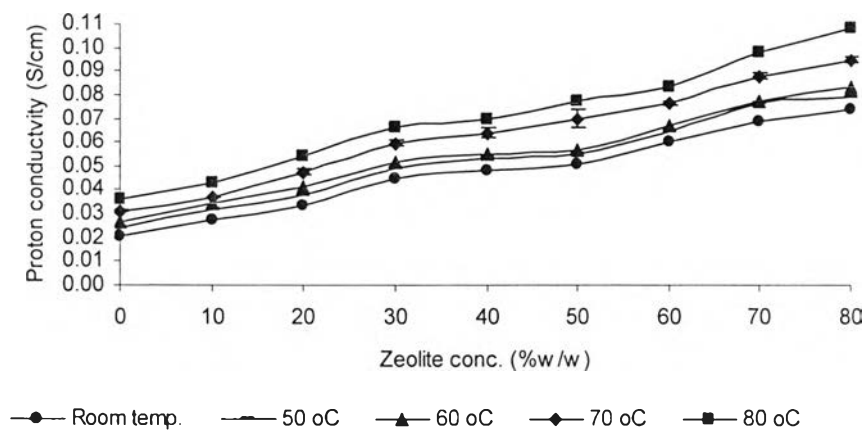


รูปที่ 4.22 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรนพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์ และซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์

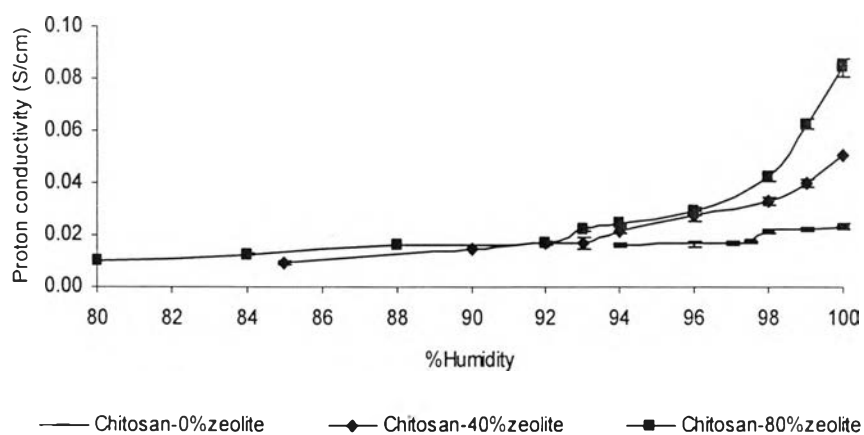
4.9 ค่าการนำโปรตอน

4.9.1 เมมเบรนไคโตซานคอมโพสิต

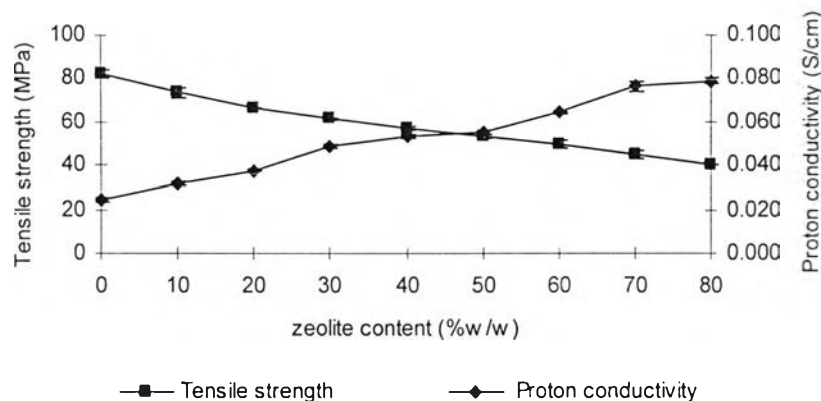
จากรูปที่ 4.23 ค่าการนำโปรตอนเพิ่มขึ้น ตามปริมาณซีโอไลต์ที่เพิ่มขึ้น จาก $2.1 \times 10^{-2} \pm 0.6 \times 10^{-3}$ ซีเมนส์/เซนติเมตร ในเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวางที่ไม่มีการเติมซีโอไลต์ จนมีค่าเท่ากับ $5.1 \times 10^{-2} \pm 0.6 \times 10^{-3}$ ซีเมนส์/เซนติเมตร ที่ปริมาณซีโอไลต์ร้อยละ 50 ที่อุณหภูมิห้อง สอดคล้องกับค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน แต่เมื่อเทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 ซึ่งมีค่าการนำโปรตอนเท่ากับ $9.2 \times 10^{-2} \pm 2.0 \times 10^{-3}$ ซีเมนส์/เซนติเมตร แสดงว่าหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุในเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิต ไม่สามารถนำโปรตอนได้ทั้งหมด แต่ประจุลบสุทธิของซีโอไลต์ ช่วยทำให้การนำโปรตอนเพิ่มขึ้นได้ นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังช่วยให้ความต้องการน้ำเพื่อการถ่ายโอนโปรตอนน้อยลงตามลำดับของปริมาณซีโอไลต์ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.24 โดยเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวางที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์ จะเริ่มนำโปรตอนได้ ถ้าเมมเบรนมีความชื้นสัมพัทธ์มากกว่าร้อยละ 94 แต่ถ้าเติมซีโอไลต์ลงในเมมเบรนร้อยละ 40 และ 80 เมมเบรนสามารถนำโปรตอนได้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 และ 80 ตามลำดับ ถึงแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น จะทำให้ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิตสูงขึ้นแต่ยังคงมีค่าต่ำกว่าของเมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 ที่อุณหภูมิเดียวกัน แม้ว่าจะเติมซีโอไลต์สูงถึงร้อยละ 80 แล้วก็ตาม โดยค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 ที่อุณหภูมิ 50 °ซ, 60 °ซ, 70 °ซ และ 80 °ซ มีค่าเท่ากับ $11.4 \times 10^{-2} \pm 0.6 \times 10^{-3}$, $11.5 \times 10^{-2} \pm 0.6 \times 10^{-3}$, $11.9 \times 10^{-2} \pm 1.5 \times 10^{-3}$ และ $12.0 \times 10^{-2} \pm 0.6 \times 10^{-3}$ ซีเมนส์/เซนติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 การนำโปรตอนของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน



รูปที่ 4.24 การนำโปรตอนของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์ที่ความชื้นต่างๆ กัน



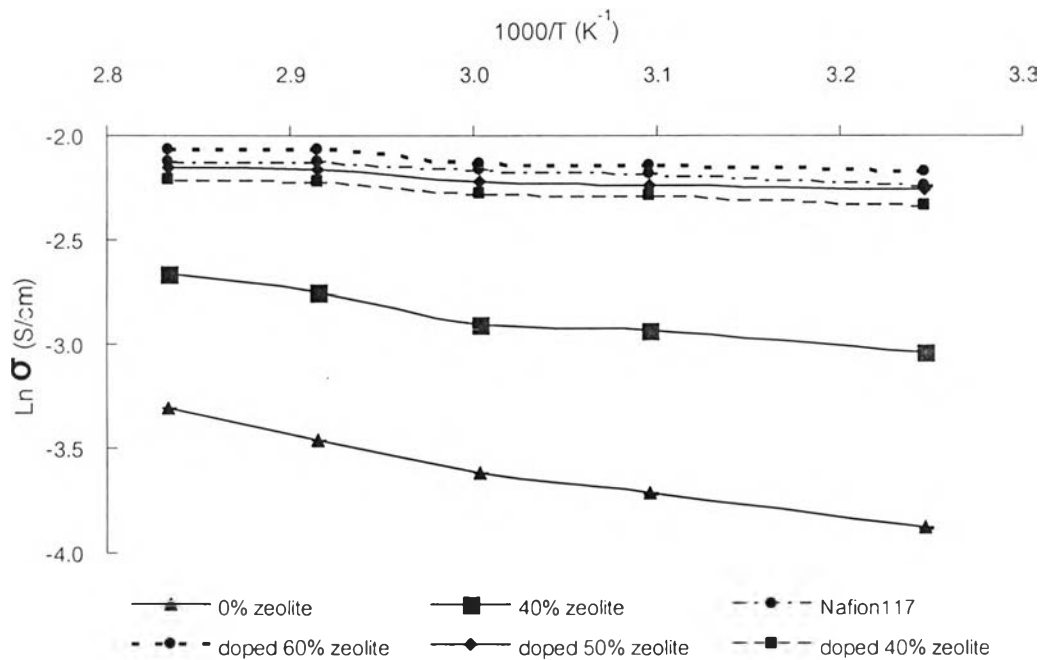
รูปที่ 4.25 การนำโปรตอนและความสามารถทนแรงดึงของ
เมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์ ณ อุณหภูมิห้อง

หากพิจารณาสมบัติค่าการนำโปรตอนและความสามารถทนแรงดึง คู่กันดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่า ปริมาณของซีโอไลต์ที่เหมาะสมน่าจะอยู่ในช่วงร้อยละ 30-60

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิตที่โดปด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ที่ปริมาณซีโอไลต์ที่เหมาะสมข้างต้น พบว่ามีค่าสูงกว่าของเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิตที่ไม่โดปด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกมาก เนื่องจากการโดปสารละลายกรดซัลฟิวริก ทำให้เกิดสารละลายกรดตามสายโซ่พอลิเมอร์ โดยสารละลายกรดที่เกิดขึ้นจะผลึกโปรตอนออกจากสายโซ่พอลิเมอร์ และสารละลายกรดซัลฟิวริกในเมมเบรนได้ไปทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ห่างกันมากขึ้น โปรตอนจึงเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างได้ง่ายขึ้น ค่าการนำโปรตอนจึงมีค่าสูงขึ้นมาก โดยเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิตที่มีปริมาณซีโอไลต์ร้อยละ 40-50 และโดปด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ให้ค่าการนำโปรตอนใกล้เคียงกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 ทุกช่วงอุณหภูมิ แม้ว่าในเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิตที่มีปริมาณซีโอไลต์ร้อยละ 60 และโดปด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก จะให้ค่าการนำโปรตอนสูงกว่าเมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 ทุกช่วงอุณหภูมิ แต่ค่าความสามารถทนแรงดึงที่น้อยลง ทำให้เมมเบรนไคโตซานคอมโพสิตที่มีปริมาณซีโอไลต์ร้อยละ 40-50 และโดปด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกจึงมีความเหมาะสมนำมาใช้เป็นเมมเบรนเซลล์เชื้อเพลิงมากกว่า

จากรูปที่ 4.26 แสดงผลความสัมพันธ์แบบอารีเนียสของค่าการนำโปรตอนในมาตราส่วนเชิงลอการิทึมธรรมชาติกับหนึ่งส่วนอุณหภูมิในหน่วยเคลวินของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์บางสูตรเทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 พบว่าค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเป็นเส้นตรง โดยเมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 อยู่ในกลุ่มเดียวกับเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์ที่ถูกโดปด้วย

สารละลายกรดซัลฟิวริก สังเกตได้ว่าเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์ที่มีสัดส่วนซีโอไลต์ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก และเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์ที่มีสัดส่วนซีโอไลต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก อยู่เหนือ และใกล้เคียงกับเส้นความสัมพันธ์ของเมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 แสดงถึงค่าการนำโปรตอนที่สูงกว่า และใกล้เคียงกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 ตามลำดับ ขณะที่เมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวางที่ไม่ได้โด๊ปด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกและไม่ได้เติมซีโอไลต์แสดงค่าการนำโปรตอนห่างจากเมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 มากที่สุด



รูปที่ 4.26 กราฟอาร์เรเนียส ของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์

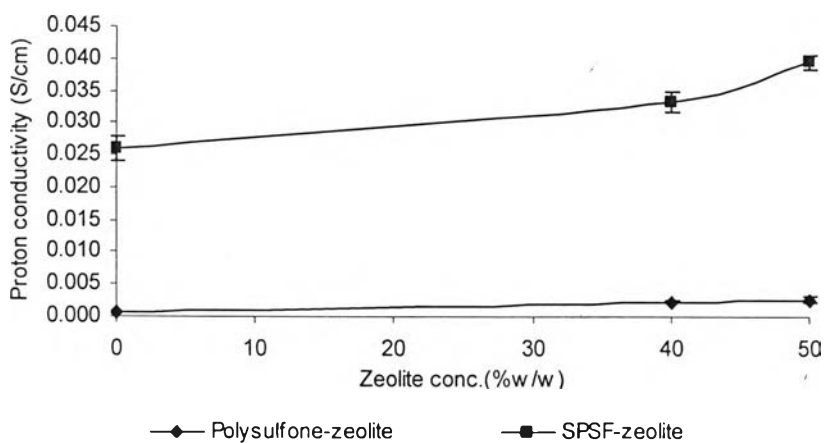
ตารางที่ 4.5 การนำโปรตอนของเมมเบรนโคโคซานเชื่อมขวาง-ซีโอดี ที่ถูกโดปด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

ปริมาณซีโอดี (ร้อยละ)	อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ (°C)				
	25-30	50	60	70	80
30	$7.7 \times 10^2 \pm 0.6 \times 10^{-3}$ ($4.5 \times 10^2 \pm 0.6 \times 10^{-3}$)	$8.2 \times 10^2 \pm 1.5 \times 10^{-3}$ ($4.9 \times 10^2 \pm 0.6 \times 10^{-3}$)	$8.6 \times 10^2 \pm 1.0 \times 10^{-3}$ ($5.1 \times 10^2 \pm 1.1 \times 10^{-3}$)	$8.9 \times 10^2 \pm 1.5 \times 10^{-3}$ ($6.0 \times 10^2 \pm 0.6 \times 10^{-3}$)	$9.2 \times 10^2 \pm 0.6 \times 10^{-3}$ ($6.6 \times 10^2 \pm 1.4 \times 10^{-3}$)
40	$9.7 \times 10^2 \pm 1.0 \times 10^{-3}$ ($4.8 \times 10^2 \pm 1.0 \times 10^{-3}$)	$10.2 \times 10^2 \pm 0.6 \times 10^{-3}$ ($5.3 \times 10^2 \pm 1.0 \times 10^{-3}$)	$10.2 \times 10^2 \pm 1.5 \times 10^{-3}$ ($5.5 \times 10^2 \pm 0.6 \times 10^{-3}$)	$10.8 \times 10^2 \pm 0.6 \times 10^{-3}$ ($6.4 \times 10^2 \pm 1.0 \times 10^{-3}$)	$11.0 \times 10^2 \pm 0.6 \times 10^{-3}$ ($7.0 \times 10^2 \pm 2.1 \times 10^{-3}$)
50	$10.4 \times 10^2 \pm 1.0 \times 10^{-3}$ ($5.1 \times 10^2 \pm 0.6 \times 10^{-3}$)	$10.7 \times 10^2 \pm 1.5 \times 10^{-3}$ ($5.5 \times 10^2 \pm 1.0 \times 10^{-3}$)	$10.8 \times 10^2 \pm 0.6 \times 10^{-3}$ ($5.7 \times 10^2 \pm 1.0 \times 10^{-3}$)	$11.5 \times 10^2 \pm 0.6 \times 10^{-3}$ ($7.0 \times 10^2 \pm 1.0 \times 10^{-3}$)	$11.6 \times 10^2 \pm 1.5 \times 10^{-3}$ ($7.8 \times 10^2 \pm 3.5 \times 10^{-3}$)
60	$11.3 \times 10^2 \pm 0.6 \times 10^{-3}$ ($6.0 \times 10^2 \pm 2.3 \times 10^{-3}$)	$11.7 \times 10^2 \pm 1.0 \times 10^{-3}$ ($6.4 \times 10^2 \pm 0.6 \times 10^{-3}$)	$11.9 \times 10^2 \pm 0.6 \times 10^{-3}$ ($6.7 \times 10^2 \pm 2.5 \times 10^{-3}$)	$12.6 \times 10^2 \pm 2.0 \times 10^{-3}$ ($7.7 \times 10^2 \pm 1.2 \times 10^{-3}$)	$12.7 \times 10^2 \pm 1.0 \times 10^{-3}$ ($8.4 \times 10^2 \pm 0.7 \times 10^{-3}$)

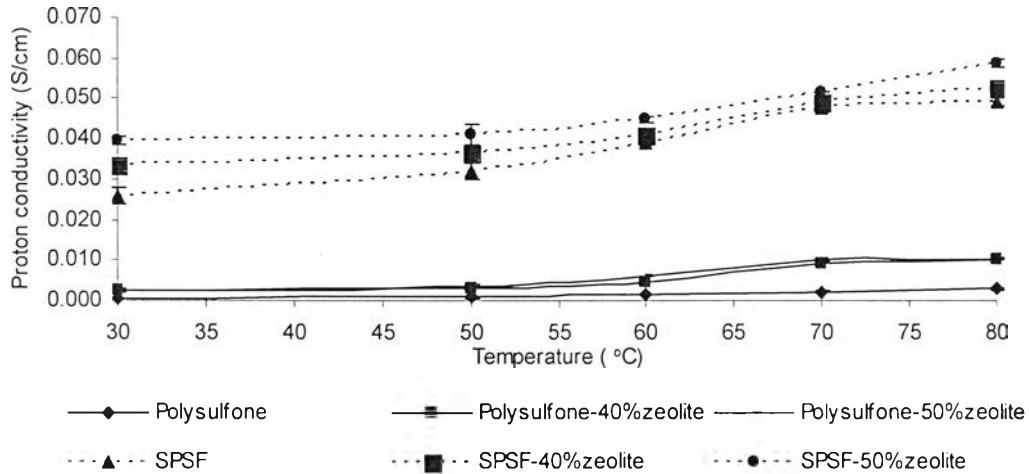
หมายเหตุ: ตัวเลขในวงเล็บคือค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนโคโคซานเชื่อมขวาง-ซีโอดี ที่ไม่ได้ถูกโดปด้วยกรดซัลฟิวริก

4.9.2 เมมเบรนพอลิซิลโฟเนคอมโพสิต

จากรูปที่ 4.27 ผลของการทำซิลโฟเนชัน ทำให้เมมเบรนซิลโฟเนเตดพอลิซิลโฟเนมีค่าการนำโปรตอนสูงกว่าเมมเบรนพอลิซิลโฟเนจาก $1.0 \times 10^{-3} \pm 0.6 \times 10^{-4}$ เป็น $2.6 \times 10^{-2} \pm 2.0 \times 10^{-3}$ ซีเมนส์/เซนติเมตร และค่าการนำโปรตอนมีค่าสูงขึ้นอีกเล็กน้อยตามปริมาณซีโอไลต์ เมื่อเทียบกับเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิต พบว่าเมมเบรนซิลโฟเนเตดพอลิซิลโฟเนมีค่าการนำโปรตอนใกล้เคียงกับเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง ($2.6 \times 10^{-3} \pm 2.0 \times 10^{-3}$ เทียบกับ $2.1 \times 10^{-2} \pm 0.6 \times 10^{-3}$ ซีเมนส์/เซนติเมตร) แต่ที่ปริมาณซีโอไลต์ร้อยละ 40 และ 50 เมมเบรนซิลโฟเนเตดพอลิซิลโฟเน-ซีโอไลต์ ให้ค่าการนำโปรตอนต่ำกว่า โดยมีค่าตามลำดับเท่ากับ $3.3 \times 10^{-2} \pm 2.0 \times 10^{-3}$ และ $3.9 \times 10^{-2} \pm 1.0 \times 10^{-3}$ ซีเมนส์/เซนติเมตร เทียบกับ $4.8 \times 10^{-2} \pm 1.0 \times 10^{-3}$ และ $5.1 \times 10^{-2} \pm 0.6 \times 10^{-3}$ ซีเมนส์/เซนติเมตร ของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์ แสดงว่าซีโอไลต์มีผลต่อการนำโปรตอนของเมมเบรนซิลโฟเนเตดพอลิซิลโฟเนไม่เหมือนกับที่มีต่อเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง ซึ่งในเบื้องต้นนี้ คาดว่าน่าจะเนื่องจากความชอบน้ำของทั้งซีโอไลต์กับไคโตซานทำให้มีความเข้ากันได้ และช่วยเสริมความสามารถในการนำโปรตอนของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์

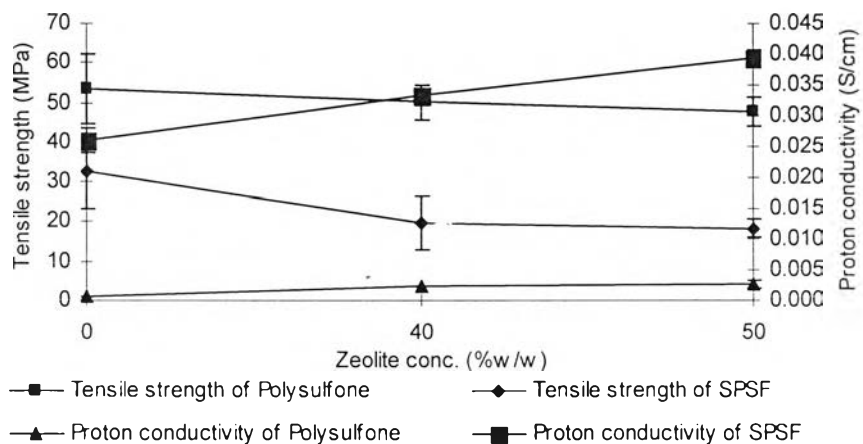


รูปที่ 4.27 การนำโปรตอนของเมมเบรนพอลิซิลโฟเน-ซีโอไลต์ และซิลโฟเนเตดพอลิซิลโฟเน-ซีโอไลต์ ณ อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.28 การนำโปรตอนของเมมเบรนพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์ และซัลฟอนเนตพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.28 เป็นผลของอุณหภูมิต่อค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนพอลิซัลโฟนคอมโพสิต ซึ่งให้ผลคล้ายคลึงกับเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิต เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิสูงขึ้น (50-80 °C) ส่งผลให้ค่าการนำโปรตอนสูงขึ้นแต่ค่าการนำโปรตอนของทั้งเมมเบรนพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์ และเมมเบรนซัลฟอนเนตพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นยังคงต่ำกว่าเมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 ที่ช่วงอุณหภูมิเดียวกันอยู่มาก

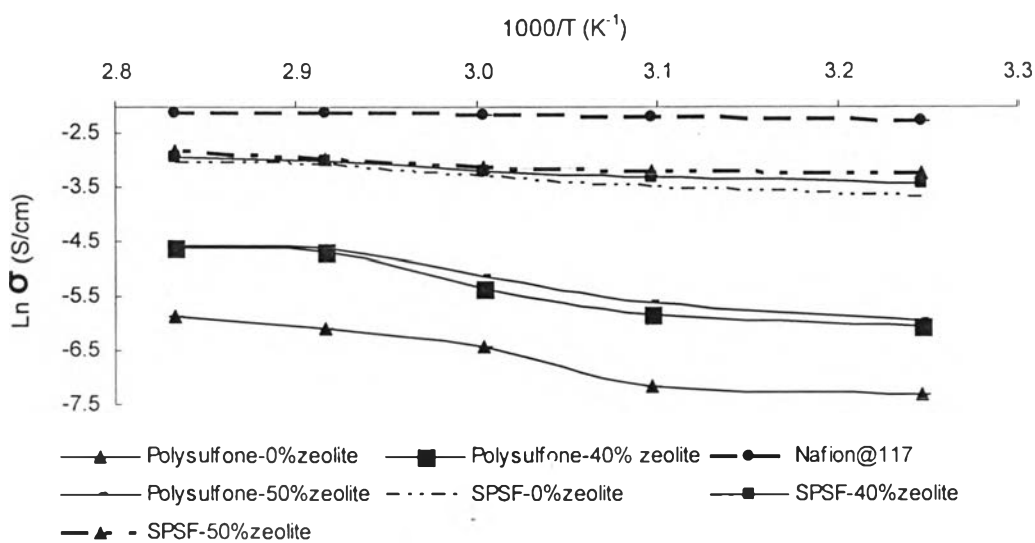


รูปที่ 4.29 การนำโปรตอนและความสามารถทนแรงดึงของเมมเบรนพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์และซัลฟอนเนตพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์

รูปที่ 4.29 แสดงค่าการนำโปรตอนคู่กับค่าความสามารถทนแรงดึงของทั้งเมมเบรนพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์และเมมเบรนซัลฟอนเนตพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์ ซึ่งคล้ายกับของเมมเบรนไคโต

ขานคอมโพสิต กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลต์มากขึ้น ค่าการนำโปรตอนมากขึ้นแต่ความสามารถทนแรงดึงลดลง สามารถสรุปได้ว่าเมมเบรนซัลฟอนเตดพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์ ไม่ควรเติมซีโอไลต์เนื่องจากเมื่อเติมซีโอไลต์จะทำให้ความสามารถทนแรงดึงลดลงเป็นอย่างมาก แต่ในเมมเบรนพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์ การเติมซีโอไลต์ไม่มีผลต่อความสามารถทนแรงดึงมากนัก ดังนั้นในเมมเบรนพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์ การเติมซีโอไลต์จะช่วยเพิ่มค่าการนำโปรตอนให้สูงขึ้นโดยที่ความสามารถทนแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ค่าการนำโปรตอนที่ได้ยังคงมีค่าต่ำอยู่

จากรูปที่ 4.30 แสดงผลความสัมพันธ์แบบอาร์เรเนียสของค่าการนำโปรตอนในมาตราส่วนเชิงลอการิทึมธรรมชาติกับหนึ่งส่วนอุณหภูมิในหน่วยเคลวินของเมมเบรนซัลฟอนเตดพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์บางสูตรเทียบกับเมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 พบว่า ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนซัลฟอนเตดพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเป็นเส้นตรง แต่อยู่ใต้เส้นความสัมพันธ์ของเมมเบรนเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 แสดงถึงค่าการนำโปรตอนที่ยังคงต่ำกว่า และเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่ไม่ได้ทำซัลฟอนชันให้ค่าการนำโปรตอนต่ำที่สุด



รูปที่ 4.30 กราฟอาร์เรเนียส ของเมมเบรนพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์ และซัลฟอนเตดพอลิซัลโฟน-ซีโอไลต์