



การผลิตเยื่อแผ่นนาโนคอมโพสิตเพื่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำ
Preparation of Nanocomposite Membrane for Water Treatment

อดิศร รัชนิพนธ์

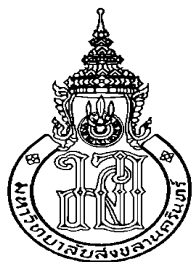
Adisorn Ratchaniphont

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Technology and Environmental Management
Prince of Songkla University**

2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การผลิตเยื่อแผ่นนาโนคอมโพสิตเพื่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำ
Preparation of Nanocomposite Membrane for Water Treatment

อดิศร รัชนิพนธ์

Adisorn Ratchaniphont

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Technology and Environmental Management
Prince of Songkla University**

2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การผลิตเยื่อแผ่นนาโนคอมโพสิตเพื่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำ
ผู้เขียน นายอดิศร รัชนิพนธ์
สาขาวิชา เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ดร.วัชรวิดี ลิ้มสกุล)

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

..... กรรมการ
(ดร.วัชรวิดี ลิ้มสกุล)

.....
(ดร.วิลาสินี ศรีพรหม)

..... กรรมการ
(ดร.วิลาสินี ศรีพรหม)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกัญญา วงศ์ธนะบุรณ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีและการ
จัดการสิ่งแวดล้อม

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(3)

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ _____

(ดร.วัชรวิดี ลิ้มสกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ _____

(นายอดิสร รัชนิพนธ์)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ _____

(นายอดิศร รัชนิพนธ์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การผลิตเยื่อแผ่นนาโนคอมโพสิตเพื่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำ
ผู้เขียน	นายอดิศร รัชนิพนธ์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการผลิตเยื่อแผ่นที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี และเพิ่มประสิทธิภาพการเลือกผ่านของเยื่อแผ่นโดยการดัดแปลงหมู่ฟังก์ชัน โดยผู้วิจัยได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิเอไมด์เพื่อใช้ผลิตเยื่อแผ่นพบว่าใช้สารเติมแต่ง LiCl ที่อุณหภูมิ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ และความเร็วการกวนที่ 940 rpm ได้ผลได้เป็นร้อยละของพอลิเอไมด์ที่ 90.52 ± 2.33 และสามารถขึ้นรูปเยื่อแผ่นได้ดี การขึ้นรูปเยื่อแผ่นโดยควบคุมความหนาสามารถขึ้นรูปเยื่อแผ่นที่มีความราบเรียบกว่าการขึ้นรูปโดยควบคุมปริมาตร การทดสอบด้วย FTIR ยืนยันได้ว่าพอลิเอไมด์ที่สังเคราะห์ได้คือ nylon 6,6 และเยื่อแผ่นเตรียมจากสารละลายพอลิเอไมด์ และเยื่อแผ่นเตรียมจากสารละลายพอลิเอไมด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนถูกเตรียมจากสารละลายพอลิเอไมด์ชนิด nylon 6,6 การทดสอบด้วย SEM พบว่า เยื่อแผ่นเตรียมจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 60 นาที มีการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนที่สม่ำเสมอ และมีผิวโดยรวมที่เรียบกว่าเยื่อแผ่นชนิดอื่น ๆ การทดสอบด้วย TGA พบว่าเยื่อแผ่นมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวระหว่าง $382.29\pm 6.97\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $432.78\pm 3.47\text{ }^{\circ}\text{C}$ การทดสอบด้วย DSC พบว่าเยื่อแผ่นมีช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวคือ $62.50\pm 2.47\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $155.01\pm 7.54\text{ }^{\circ}\text{C}$ และพบว่าเยื่อแผ่นเตรียมจากสารละลายพอลิเอไมด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที มี %crystallinity สูงที่สุดที่ร้อยละ 51.58 การทดสอบสมบัติเชิงกลของเยื่อแผ่นพบว่า เยื่อแผ่นเตรียมจากสารละลายพอลิเอไมด์มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดได้แก่ tensile strength, Elongation และ Young's Modulus คือ 6.76 ± 0.06 , 5.79 ± 4.15 และ 338.9 ± 111.54 ตามลำดับ การทดสอบประสิทธิภาพการกรองพบว่า เยื่อแผ่นเตรียมจากสารละลายพอลิเอไมด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 60 นาทีมีประสิทธิภาพการคัดเลือกผ่านของสารละลายเหล็กดีที่สุดคือร้อยละ 70.32 ± 5.79

คำสำคัญ: ไนลอน 6,6 พอลิเอไมด์ไรเซชันแบบระหว่างวัฏภาค เยื่อแผ่น

Thesis Title	Preparation of Nanocomposite Membrane for Water Treatment
Author	Mr.Adison Ratchaniphont
Major Program	Technology and Environmental Management
Academic	2013

ABSTRACT

This research aims to develop the method to produce membranes with good mechanical properties and optimize the selectivity of membrane by modifying functional groups. The researcher has studied the optimum conditions for synthesis of polyamide to produce membrane founded using LiCl at 10 °C and level of spin speed at 940 rpm, receive 90.52 ± 2.33 % of the polyamide and can be formed to flat sheet membrane. Forming membranes controlled by thickness of membranes is smoother than controlled volume. Results of FTIR confirmed that the polyamide obtained by synthesis is nylon 6,6 and membranes were prepared from a mixed solution of polyamide and carbon nanotubes are solution of nylon 6,6. Results of SEM showed the membrane prepared from mixed solution of polyamide and 1.5 % by weight of carbon nanotubes with a sonicator for 60 minutes are uniform dispersion of carbon nanotubes and overall skin are smoother than another membrane. Results of TGA showed membranes had decomposition temperature between 382.29 ± 6.97 °C to 432.78 ± 3.47 °C. Results of DSC showed membranes have melt temperature between 62.50 ± 2.47 °C to 155.01 ± 7.54 °C and membranes were prepared from mixed solution of polyamide and 1.0% by weight of carbon nanotubes with a sonicator for 30 minutes have the highest %crystallinity at 51.58 %. Results of mechanical test showed membranes were prepared from mixed solution of polyamide and 1.5% by weight of carbon nanotubes with a sonicator for 60 minutes have the best mechanical properties including tensile strength, Elongation and Young's Modulus at 6.76 ± 0.06 , 5.79 ± 4.15 and 338.9 ± 111.54 respectively. Results of filtration showed membranes were prepared from mixed solution of polyamide and 1.5% by weight of carbon nanotubes with a sonicator for 60 minutes have the best selection of Fe^{2+} solution at 70.32 ± 5.79 %.

Keywords: nylon 6,6 interfacial polymerization membrane

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร.วัชรวดี ถิ่นสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และดร.วิลาสินี ศรีพรหม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้ความรู้ ข้อเสนอแนะ ตลอดจนการสนับสนุนงานวิจัยชิ้นนี้จนสำเร็จ

ขอขอบพระคุณ คณะเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตภูเก็ต ที่ได้ให้โอกาส และสนับสนุนทุนการศึกษา

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ และบุคลากรในคณะทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ ข้อเสนอแนะ ตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาในระดับปริญญาโท

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกัญญา วงศ์ชนะบุรณ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ วงศ์นิรามย์กุล ที่กรุณาให้เกียรติเป็นกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิในการสอบปกป้องวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำปรับปรุงวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

อดิศร รัชนิพนธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	(5)
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการรูป	(11)
สัญลักษณ์คำย่อและคำย่อ	(14)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 การตรวจสอบเอกสาร	5
2.1 ความหมายเยื่อแผ่น	5
2.2 ประวัติและความเป็นมาของเยื่อแผ่น	5
2.3 เยื่อแผ่น สำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำ	8
2.4 สมบัติและการใช้ประโยชน์ของอะโรมาติกพอลิเอไมด์	15
2.5 การปรับปรุงคุณภาพของเยื่อแผ่นโดยใช้วัสดุนาโน	16
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	18
3.1 วัสดุและสารเคมี	19
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	19
3.3 วิธีการวิจัย	20
3.3.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิเอไมด์ (ไนลอน 6,6) เพื่อใช้ในการผลิตเยื่อแผ่น	20
3.3.2 การเตรียมสารละลายพอลิเมอร์และสารละลายนาโนคอมโพสิต	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.3 การขึ้นรูปเยื่อแผ่นที่สามารถควบคุมความหนาได้	22
3.3.4 การวิเคราะห์เอกลักษณ์เยื่อแผ่น	22
3.3.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเยื่อแผ่นด้วยวิธีการกรองแบบใช้แรงดัน	24
บทที่ 4 ผลการศึกษา และอภิปรายผล	25
4.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ในลอน 6,6 เพื่อใช้ในการผลิตเยื่อแผ่น	25
4.2 การเตรียมสารละลายพอลิเมอร์ และสารละลายนาโนคอมโพสิต	31
4.3 การขึ้นรูปเยื่อแผ่นที่สามารถควบคุมความหนาได้	31
4.4 การวิเคราะห์เอกลักษณ์เยื่อแผ่น	31
4.4.1 การวิเคราะห์เอกลักษณ์เยื่อแผ่นด้วย ATR-FTIR	31
4.4.2 การวิเคราะห์เอกลักษณ์เยื่อแผ่นด้วยวิธี SEM	34
4.4.3 สมบัติทางความร้อนและปริมาณท่อนานาโนคาร์บอนที่มีอยู่จริงในเยื่อแผ่น สามารถตรวจสอบได้โดยใช้ TGA	44
4.4.4 ความสามารถในการสร้างผลึกในเยื่อแผ่นที่มีท่อนานาโนคาร์บอนผสมอยู่ถูกศึกษา ได้โดยใช้ DSC	49
4.4.5 การศึกษาสมบัติเชิงกลของเยื่อแผ่นทำได้โดยใช้ Universal Testing Machine ซึ่ง เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลโดยใช้แรงดึง (Tensile Test) ในสภาวะเปียก	51
4.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกรองของเยื่อแผ่นด้วยวิธีการกรองแบบใช้แรงดัน	55
บทที่ 5 บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	58
5.1 บทสรุปผลการวิจัย	58
5.2 ข้อเสนอแนะ	61
เอกสารอ้างอิง	62
ภาคผนวก	65
ประวัติผู้เขียน	71

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อแผ่น Asymmetric Membrane	8
2.2 พอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อแผ่น Thin Film Composite Membrane	11
2.3 สมบัติของ poly(p-phenyleneterephthalamide) และ poly(m-phenylene isophthalamide)	17
4.1 ผลได้เป็นร้อยละและลักษณะเยื่อแผ่นของ nylon 6,6 ที่สังเคราะห์ที่ 26.5 °C โดยใช้ ความเร็วการกวนระดับต่าง ๆ	24
4.2 ผลได้เป็นร้อยละและลักษณะเยื่อแผ่นของ nylon 6,6 ที่สังเคราะห์ที่ความเร็วการกวน 940 rpm ณ อุณหภูมิต่าง ๆ	26
4.3 ผลได้เป็นร้อยละและลักษณะเยื่อแผ่นของ nylon 6,6 ที่สังเคราะห์ที่ความเร็วการกวน 660 rpm ณ อุณหภูมิต่าง ๆ	28
4.4 น้ำหนักคงเหลือของเยื่อแผ่นจากการทดสอบเอกลักษณ์ด้วยวิธี TGA	47
4.5 %crystallinity ของเยื่อแผ่นจากการทดสอบเอกลักษณ์ด้วยวิธี DSC	49

รายการรูป

รูปที่	หน้า
1.1 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย	2
2.1 แนวโน้มการพัฒนาสมบัติของเยื่อแผ่น	6
2.2 ประเด็นการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเยื่อแผ่น ปี 1960-1980	6
2.3 ประเด็นการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเยื่อแผ่น ปี 1980-ปัจจุบัน	7
2.4 ปฏิกริยาระหว่าง m-phenylenediamine และ trimesoyl chloride	14
2.5 โครงสร้างของ poly (p-phenyleneterephthalamide) และ poly (m-phenylene isophthalamide)	15
3.1 ชุดทดลองการกรองแบบใช้แรงดัน	23
4.1 ภาพลักษณะเยื่อแผ่น nylon 6,6 สังกะสีที่ 26.5 °C โดยใช้ความเร็วการกวนระดับต่างๆ และใช้สารเติมแต่ง LiCl หรือ CaCl ₂ ในการทำเยื่อแผ่น	25
4.2 ภาพลักษณะเยื่อแผ่น nylon 6,6 สังกะสีที่ความเร็วการกวน 940 rpm ที่อุณหภูมิต่างๆ และใช้สารเติมแต่ง LiCl หรือ CaCl ₂ ในการทำเยื่อแผ่น	27
4.3 ภาพลักษณะเยื่อแผ่น nylon 6,6 สังกะสีที่ความเร็วการกวน 660 rpm ที่อุณหภูมิต่างๆ และใช้ สารเติมแต่ง LiCl หรือ CaCl ₂ ในการทำเยื่อแผ่น	29
4.4 กราฟ ATR-FTIR ของผงพอลิเอไมด์	31
4.5 กราฟ ATR-FTIR ของผงท่อนานาโนคาร์บอน	32
4.6 กราฟ ATR-FTIR ของเยื่อแผ่นเตรียมจากสารละลายพอลิเมอร์	32
4.7 กราฟ ATR-FTIR ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนานาโนคาร์บอนร้อยละ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที	32
4.8 กราฟ ATR-FTIR ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนานาโนคาร์บอนร้อยละ 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 60 นาที	33
4.9 ภาพ SEM ของท่อนานาโนคาร์บอน	34
4.10 ภาพ SEM ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์	35
4.11 ภาพ SEM ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนานาโนคาร์บอนร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที	36

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ภาพ SEM ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที	37
4.13 ภาพ SEM ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที	38
4.14 ภาพ SEM ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที	39
4.15 ภาพ SEM ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 60 นาที	41
4.16 ภาพ SEM ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 60 นาที	42
4.17 กราฟผลการทดสอบด้วย TGA ของเยื่อแผ่นเตรียมจากสารละลายพอลิเมอร์	43
4.18 กราฟผลการทดสอบด้วย TGA ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที	44
4.19 กราฟผลการทดสอบด้วย TGA ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที	44
4.20 กราฟผลการทดสอบด้วย TGA ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที	45
4.21 กราฟผลการทดสอบด้วย TGA ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที	45
4.22 กราฟผลการทดสอบด้วย TGA ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 60 นาที	46

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 กราฟผลการทดสอบด้วย TGA ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 60 นาที	46
4.24 กราฟผลการทดสอบด้วย DSC ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์	48
4.25 กราฟผลการทดสอบด้วย DSC ของเยื่อแผ่นเตรียมจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอน ในอัตราส่วนร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที	48
4.26 กราฟผลการทดสอบด้วย DSC ของเยื่อแผ่นเตรียมจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอน ในอัตราส่วนร้อยละ 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 60 นาที	49
4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile Strength และอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนที่ผสมในเยื่อแผ่น/เวลาที่ใช้ในกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator	50
4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง elongation และอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนที่ผสมในเยื่อแผ่น/เวลาที่ใช้ในกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator	51
4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Young's Modulus และอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนที่ผสมในเยื่อแผ่น/เวลาที่ใช้ในกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator	52
4.30 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Absorbance และ ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กมาตรฐาน	54
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนท่อนาโนคาร์บอนที่ผสมในเยื่อแผ่นกับร้อยละของสารละลายที่กรองได้	54

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

ATR-FTIR	Attenuated Total Reflectance-Fourier Transform Infrared
CA	Cellulose Acetate
CBNTs	Carbon Nanotubes
DA	Dispersing Agent
DSC	Differential Scanning Calorimetry
PA	Polyamide
PTFE	Polytetrafluoroethylene
SEM	Scanning Electron Microscope
TFC	Thin Film Composite Membrane
TGA	Thermogravimetric Analysis

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

จังหวัดภูเก็ตมีแหล่งเก็บกักน้ำของทั้งจังหวัดที่ใช้ได้ในปี 2553 รวมความจุประมาณ 28.4 ล้านลูกบาศก์เมตร เมื่อรวมกับน้ำท่า น้ำทะเล และน้ำใต้ดินสามารถนำมาใช้ได้ประมาณ 46 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งแยกเป็น น้ำผิวดิน 38 ล้านลูกบาศก์เมตรหรือร้อยละ 82 ของปริมาณน้ำทั้งหมด น้ำใต้ดิน 4 ล้านลูกบาศก์เมตร หรือร้อยละ 9 ของปริมาณน้ำทั้งหมด และน้ำทะเล 4 ล้านลูกบาศก์เมตร หรือร้อยละ 9 ของปริมาณน้ำทั้งหมด ปริมาณน้ำต้นทุนที่นำมาใช้ได้ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการทั้งหมด โดยเฉพาะในพื้นที่บริเวณที่ไม่มีระบบประปาจำเป็นต้องใช้น้ำจากบ่อน้ำตื้น บ่อน้ำบาดาลและประปาชนบทขนาดเล็ก (สำนักงานจังหวัดภูเก็ต, 2553) นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร และการเติบโตทางด้านอุตสาหกรรมท่องเที่ยวอย่างรวดเร็ว รวมทั้งพฤติกรรมที่ขาดจิตสำนึกของประชาชนบางกลุ่ม ส่งผลให้เกิดมลภาวะแก่น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน ที่นับวันจะทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น และยังพบว่าน้ำขุมเหมืองซึ่งเป็นแหล่งผลิตน้ำประปามีการปนเปื้อนของเหล็ก (Suteerasak and Bhongsuwan, 2008) จากปัญหาเหล่านี้ ทำให้มีการบัญญัติกฎหมายขึ้นเพื่อคุ้มครองแหล่งน้ำต่าง ๆ และกระตุ้นให้เกิดเทคโนโลยีใหม่ ๆ ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำจากแหล่งน้ำต่าง ๆ เพื่อรองรับการอุปโภค บริโภคที่เพิ่มมากขึ้น

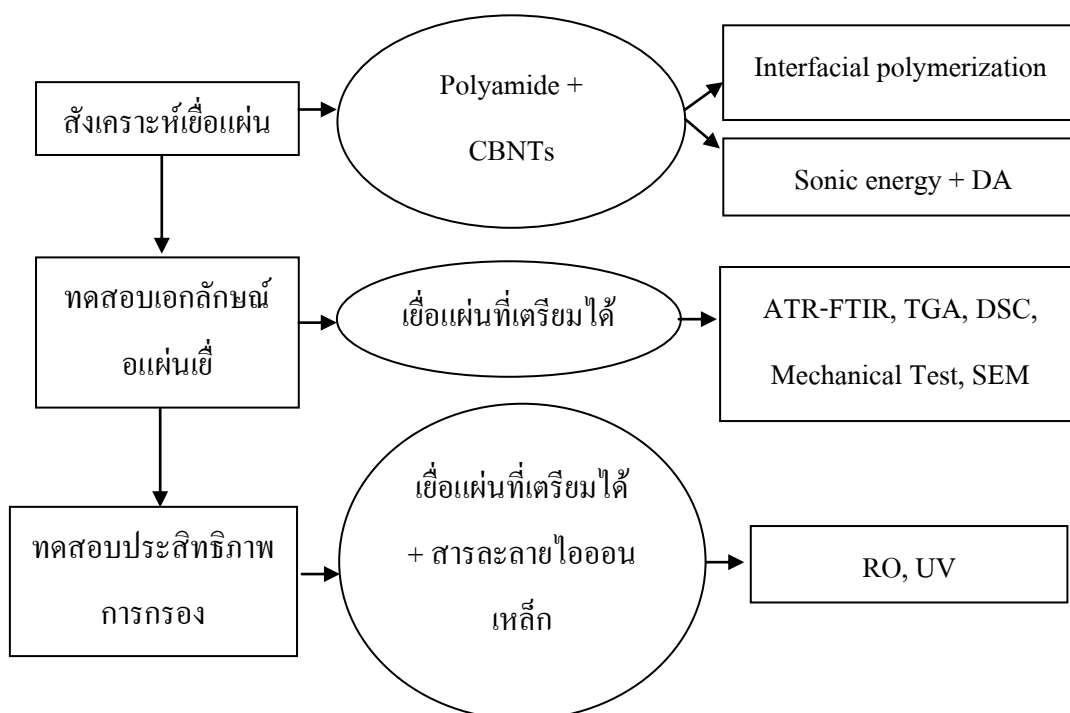
ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยจำนวนมากจึงให้ความสำคัญต่อการคิดค้นเทคโนโลยีในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจมาก คือ กระบวนการเยื่อแผ่น กระบวนการเยื่อแผ่นเป็นการกรองน้ำโดยอาศัยแผ่นกรองที่มีลักษณะพิเศษ คือ สามารถกรองสารที่มีขนาดเล็กระดับจุลภาคหรือระดับโมเลกุลได้ ทำให้น้ำที่ได้ออกมามีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง (มันสิน ตันทุลเวศม์ และคณะ, 2554; ทวีศักดิ์ วังไพศาล, 2554)

กระบวนการเยื่อแผ่น สามารถผลิตน้ำจืดที่มีคุณภาพ และมีสารปนเปื้อนน้อย แต่เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายทางด้านต้นทุนในกระบวนการสังเคราะห์เยื่อแผ่นค่อนข้างสูง และปัญหาด้านความคงทนของเยื่อแผ่น จากการอุดตัน และการสึกกร่อนจากอนุภาค และสารอินทรีย์ ส่งผลให้เกิดการคิดค้นเพื่อพัฒนาเยื่อแผ่นที่มีความแข็งแรง และต้นทุนในการผลิตต่ำ (Kevin, *et al.* 1996; Kah Peng Lee, *et al.* 2010)

งานวิจัยชิ้นนี้จึงสนใจศึกษาการพัฒนาวิธีการสังเคราะห์เยื่อแผ่นที่มีสมบัติเชิงกลที่สูง และสามารถใช้กรองน้ำได้จริง โดยเยื่อแผ่นที่จะสังเคราะห์ขึ้นนั้นผลิตมาจากสารพอลิเมอร์และอนุภาคนาโนเกิดเป็นเยื่อแผ่นนาโนคอมโพสิต

1.2 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นเพื่อใช้ในการบำบัดคุณภาพน้ำ โดยเริ่มจากการสังเคราะห์เยื่อแผ่นพอลิเอไมด์ (polyamide, PA) ที่สังเคราะห์ขึ้นจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบระหว่างวัฏภาค และทำการเสริมความแข็งแรงโดยการใส่อนุภาคของท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes, CBNTs) โดยใช้เทคนิคการสั่นด้วยคลื่นเสียง และเติมสารช่วยกระจายตัว (dispersing agent, DA) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายตัวของ CBNTs ใน PA หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เอกลักษณ์ของเยื่อแผ่น โดยใช้เทคนิค Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์และเยื่อแผ่น, Thermal Gravimetric Analysis (TGA) เพื่อวิเคราะห์สัดส่วนท่อนาโนคาร์บอนในเยื่อแผ่น, Differential Scanning Calorimetry (DSC) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นในเยื่อแผ่น, Mechanical Test เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเยื่อแผ่น และ Scanning Electron Microscopy (SEM) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะผิวหน้า และภาพตัดขวางของเยื่อแผ่น แล้วจึงทำการทดสอบการกรองน้ำตัวอย่าง โดยใช้ตัวอย่างของสารละลายเหล็กเข้มข้น 2,000 mg/L เพื่อเป็นตัวแทนของสารละลายที่ปนเปื้อนในน้ำชุมชน และใช้เทคนิคการกรองโดยอาศัยความดัน (Reverse Osmosis, RO) จากนั้นวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกรองด้วยวิธี Ultraviolet-Visible Spectroscopy (UV) ดังรูปที่ 1.1 แสดงวิธีการสังเคราะห์เยื่อแผ่น การทดสอบเอกลักษณ์เยื่อแผ่น และการทดสอบประสิทธิภาพการกรองเยื่อแผ่น



รูปที่ 1.1 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาวิธีการผลิตเยื่อแผ่น CBNTs/PA ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี และมีประสิทธิภาพในการเลือกผ่านของเยื่อแผ่น

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- 1) Polyamide (PA) ถูกสังเคราะห์จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบระหว่างวัฏภาค
- 2) เยื่อแผ่นนาโนคอมโพสิต ถูกเตรียมจาก polyamide (PA) ซึ่งเป็น matrix phase และ carbon nanotubes (CBNTs) เป็น reinforcing phase
- 3) การเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับ carbon nanotubes/polyamide (CBNTs/PA) เยื่อแผ่นนาโนคอมโพสิต ทำได้โดยการเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายตัวของ CBNTs reinforcing phase ใน PA matrix phase โดยการใช้เทคนิคทางกายภาพ ได้แก่ sonic energy ควบคู่กับเทคนิคทางเคมี ได้แก่ การใช้ dispersing agents (DA)

- 4) การศึกษาเอกลักษณ์ของ CBNTs/PA เยื่อแผ่นนาโนคอมโพสิต ทำได้โดยใช้เครื่อง ATR-FTIR, TGA, DSC
- 5) การศึกษาประสิทธิภาพการกระจายตัวของ CBNTs reinforcing phase ใน PA matrix phase ทำได้โดยใช้เครื่อง SEM
- 6) การทดสอบสมบัติเชิงกลของ CBNTs/PA เยื่อแผ่นนาโนคอมโพสิต ในสถานะเปียก ทำได้โดยใช้เครื่อง Instron Machine
- 7) การศึกษาประสิทธิภาพในการเลือกผ่านของ CBNTs/PA เยื่อแผ่นนาโนคอมโพสิต ทำได้โดยการกรองน้ำตัวอย่างของสารละลายเหล็กโดยใช้ RO จากนั้นวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกรองด้วย UV

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยไปใช้เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อของผู้ที่สนใจ และสามารถนำไปต่อยอดเพื่อพัฒนาเยื่อแผ่นกรองน้ำเพื่อใช้ในการอุปโภคบริโภค

บทที่ 2

การตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความหมายของเยื่อแผ่น

การกรองมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับขนาดของสารที่อยู่ในของเหลว เมื่อแบ่งตามลักษณะการมองเห็นสามารถแบ่งออกได้เป็น การกรองของแข็งที่ตามองเห็นหรือเรียกว่าของแข็งแขวนลอย (suspended solids) และการกรองของแข็งที่ตามองไม่เห็นหรือของแข็งละลาย (dissolved solids) เมื่อแบ่งตามขนาดของของแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 5 ประเภท คือ สารแขวนลอยขนาดใหญ่ คอลลอยด์ สี สารประกอบอินทรีย์ สารประกอบอนินทรีย์ และไอออน การกรองจำเป็นต้องพิจารณาถึงขนาดของสาร การกรองสารขนาดใหญ่เรียกว่าการกรองหยาบซึ่งขนาดรูของแผ่นกรองอาจมีขนาดใหญ่ การกรองสารขนาดเล็กระดับโมเลกุลหรือไอออนเรียกว่าการกรองละเอียด ซึ่งจำเป็นต้องใช้ขนาดรูของแผ่นกรองที่มีขนาดเล็กพิเศษ แผ่นกรองที่กล่าวถึงนี้เรียกว่า “เยื่อแผ่น” (membrane) และกระบวนการที่ใช้แผ่นกรองนี้เรียกว่า “กระบวนการเยื่อแผ่น” (membrane process) กระบวนการเยื่อแผ่น สามารถแบ่งได้ 2 แบบคือ แบบที่ใช้ไฟฟ้า ซึ่งใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงดันในการคัดแยกไอออนต่าง ๆ และแบบที่ใช้ความดัน ซึ่งอาศัยความแตกต่างของความดันเพื่อแยกอนุภาคต่าง ๆ กระบวนการเยื่อแผ่น ที่ใช้ความดันที่เป็นที่นิยมคือ Reverse Osmosis (มันติน ตันทุลเวสม์ และคณะ. 2554; ทวีศักดิ์ วังไพศาล, 2554)

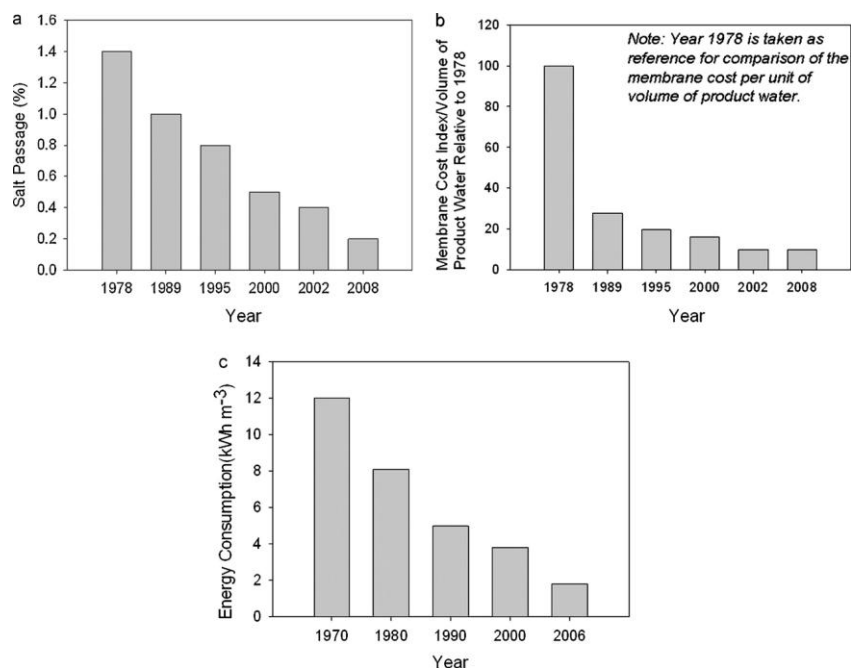
2.2 ประวัติ และความเป็นมาของเยื่อแผ่น

แนวคิดการนำน้ำทะเลมากรองเป็นน้ำจืดเริ่มมีในปี 1949 ต่อมาในปี 1950 Reid และ Breton ได้ศึกษาการผลิตเยื่อแผ่น จาก Cellulose Acetate (CA) พบว่ามีความสามารถในการกรองเกลือออกที่ร้อยละ 98 แต่ยังมีอัตราเร็วในการกรองช้าคือน้อยกว่า 10 มิลลิลิตรต่อตารางเมตร ชั่วโมง การศึกษาในระหว่างปี 1950-1960 ใช้ CA เป็นพอลิเมอร์หลักในการผลิตเยื่อแผ่น จนในปี 1960 เริ่มมีการใช้สารชนิดอื่น ๆ ในการผลิตเยื่อแผ่น เช่นในปี 1963 Bodell ได้ใช้ซิลิโคนในการผลิต เยื่อแผ่น เพื่อใช้กรองน้ำ แต่พบว่าคุณภาพของน้ำที่กรองได้ไม่ดี และมีอัตราการกรองช้า

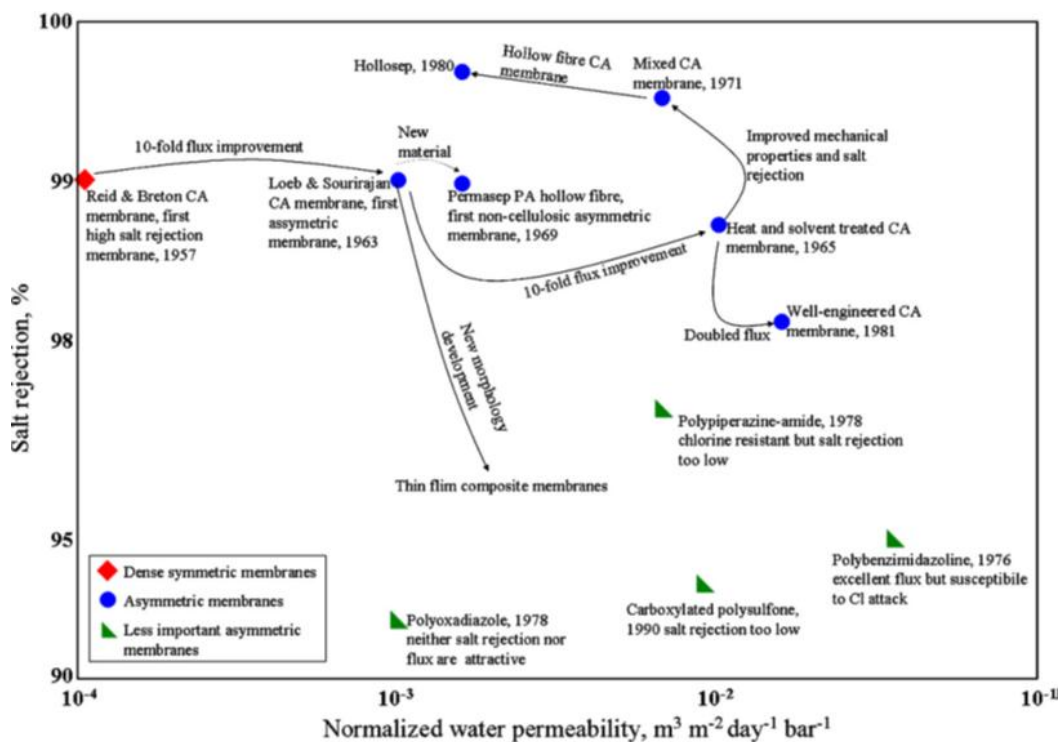
ในปี 1967 Weyl ได้เสนอแนวคิดในการผลิตเยื่อแผ่น เพื่อลดต้นทุนในการผลิต

เพิ่มความคงทนของเยื่อแผ่น เพิ่มอัตราเร็วในการกรอง และสมบัติการทนต่อความร้อน ซึ่งพบว่าสมบัติของเยื่อแผ่น ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพต่าง ๆ เช่น ความเป็นรูพรุน ความหนา การเก็บอากาศของรูพรุน เป็นต้น โดยทำการคัดเลือกวัสดุหลายชนิด และใช้วิธีการเพิ่มรูพรุนโดยการฉีดสารละลายที่ร้อน และเย็นลงบนเยื่อแผ่น พร้อมกันทำให้เกิดรูพรุนจากฟองอากาศขึ้นในเยื่อแผ่น ซึ่งเขาพบว่า polytetrafluoroethylene (PTFE) เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติที่ดีด้านความคงทน และความเป็นรูพรุนทำให้ได้เยื่อแผ่น ที่มีความสามารถในการซึมผ่านที่ดี และยังเป็นแนวทางในการพัฒนาคุณภาพของเยื่อแผ่นในปัจจุบัน

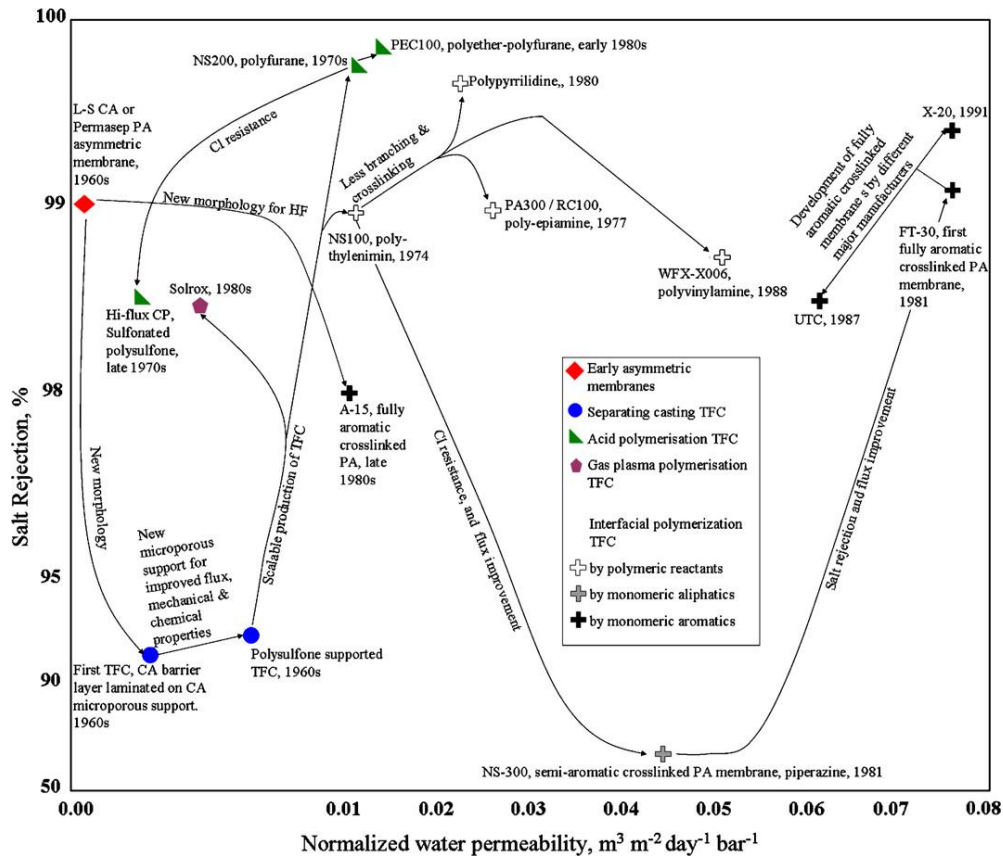
ตั้งแต่ปี 1980 เป็นต้นมาเริ่มมีเครื่องจักรที่ทันสมัยมากขึ้น และความเข้าใจถึงผลจากอุณหภูมิต่อกระบวนการผลิต และผลจากความเป็นขี้ของพอลิเมอร์ที่เป็นสารตั้งต้นในเยื่อแผ่นมีมากขึ้น ซึ่งทำให้สามารถผลิตเยื่อแผ่น ที่มีความบาง และรูพรุนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกรอง และอัตราเร็วในการกรองเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย Kah Peng Lee ได้สรุปแนวโน้มการพัฒนาเยื่อแผ่น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ ต้องการลดค่าใช้จ่ายในการผลิตเยื่อแผ่น พัฒนาประสิทธิภาพในการเลือกผ่านของเยื่อแผ่น และลดการใช้พลังงานในการกรอง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยแกนแนวนอนแสดงถึงปีที่พัฒนา และแกนแนวตั้งแสดงสมบัติที่ได้รับการพัฒนา พบว่าจากรูป 2.1a ร้อยละของปริมาณเกลือที่ผ่านเยื่อแผ่น มีแนวโน้มลดลง รูป 2.1b ต้นทุนในการผลิตเยื่อแผ่น มีแนวโน้มลดลง และรูป 2.1c พลังงานที่ใช้ในการผลิตมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ Kah Peng Lee ได้สรุปประเด็นการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเยื่อแผ่น ไว้ 2 ประเด็นคือ 1. การเลือกวัสดุ และการศึกษากลไกในการผลิตเยื่อแผ่น เป็นประเด็นสำคัญในการศึกษาวิจัยในช่วงปี 1960-1980 และ 2. การกำหนดสภาวะในการผลิตเยื่อแผ่น เพื่อพัฒนาสมบัติ และความคงทนของเยื่อแผ่น เป็นประเด็นในการศึกษาวิจัยตั้งแต่ปี 1980 จนถึงปัจจุบัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3 (Kevin W. Lawson *et al.*, 1996; Kah Peng Lee *et al.*, 2010)



รูปที่ 2.1 แนวโน้มการพัฒนาสมบัติของเยื่อแผ่น (a.) ร้อยละของปริมาณเกลือที่ผ่านแผ่นกรอง (b.) ต้นทุนในการผลิตเยื่อแผ่น (c.) พลังงานที่ใช้ในการกรอง (Kah Peng Lee *et al.*, 2010)



รูปที่ 2.2 ประเด็นการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเยื่อแผ่น ปี 1960-1980 (Kah Peng Lee *et al.*, 2010)



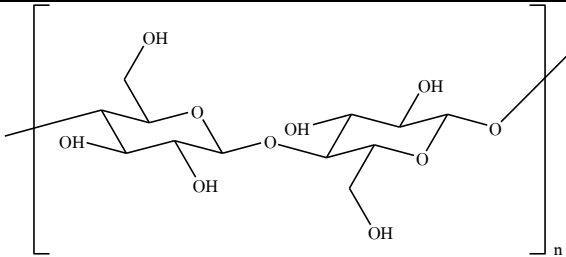
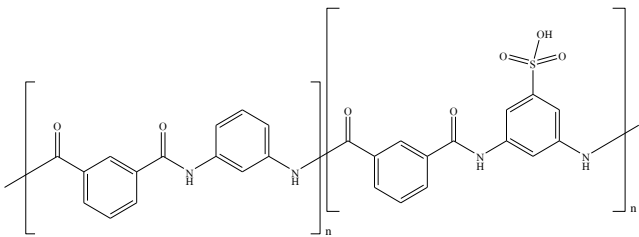
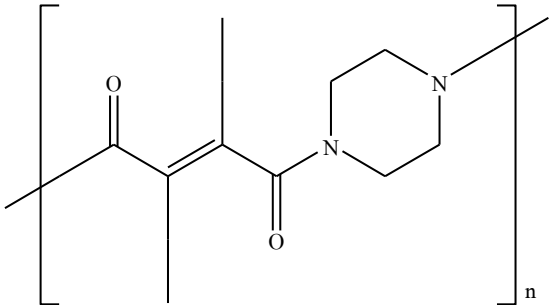
รูปที่ 2.3 ประเด็นการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเยื่อแผ่น ปี 1980-ปัจจุบัน (Kah Peng Lee *et al.*, 2010)

2.3 เยื่อแผ่นสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำ

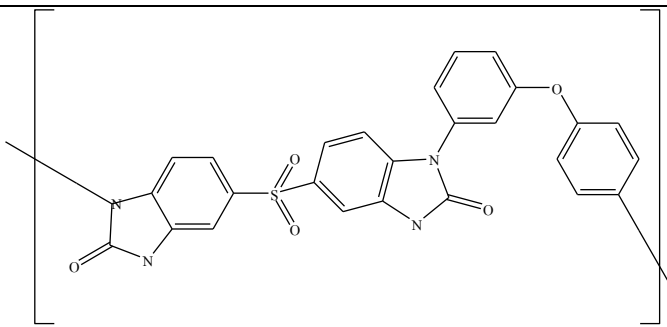
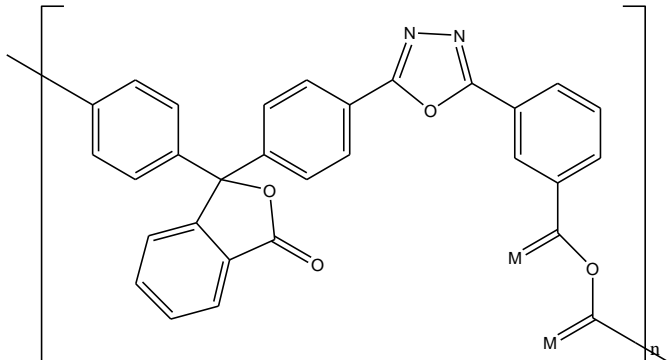
โดยทั่วไปเยื่อแผ่น ที่ใช้ในปัจจุบันมี 2 ชนิดคือ Asymmetric Membrane และ Thin Film Composite Membrane (TFC) Asymmetric Membrane สร้างจากพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียวเช่น Cellulose Acetate (CA) ประกอบด้วย 2 ชั้นคือ ชั้นทึบ (Dense Layer) ซึ่งมีความบาง และชั้นโปร่ง (Porous Layer) ซึ่งมีความหนา โดยชั้นทึบจะเป็นชั้นแรกที่สัมผัสกับของเหลวที่กรอง และทำหน้าที่สำคัญในการกรอง TFC อาศัยหลักการคล้าย ๆ กันแต่จะใช้พอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปในการผลิตเป็นเยื่อแผ่น ที่นิยมคือชั้นทึบใช้ Polyamide เป็นส่วนใหญ่ซึ่งจะมีสมบัติที่ดีกว่า CA และชั้นโปร่งใช้ Polysulfone เป็นส่วนใหญ่ (มันสิน ตันจุลเวศม์ และคณะ, 2554; ทวีศักดิ์ วังไพศาล, 2554; Kah Peng Lee *et al.*, 2010) โดยสามารถแยกวัสดุ และวิธีการผลิตพอลิเมอร์เพื่อใช้ในการผลิตเยื่อแผ่น ได้ดังนี้

ก) วัสดุที่ใช้ผลิตเยื่อแผ่น วัสดุที่ใช้ในการผลิตเยื่อแผ่นส่วนใหญ่จะใช้พอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นขั้วเพื่อช่วยในการเลือกผ่านของน้ำ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 พอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อแผ่น Asymmetric Membrane (Kah Peng Lee *et al.*, 2010)

Chemical type & description	Chemical structure
<p>1. Cellulose Acetate - Loeb-Sourirajan CA Flux: $0.35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ Salt rejection: 99% Test: > 100 bar, 4% NaCl solution</p>	
<p>2. Aromatic Polyamide - Polyamide-hydrazide Flux: $0.67 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ Salt rejection: 99.5% Test: 30 °C, > 100 bar, 3.5% NaCl solution</p>	
<p>3. Polypiperzine-amide Flux: $0.67 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ Salt rejection: 97.2% Test: > 80 bar, 0.36% NaCl solution</p>	

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) พอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อแผ่น Asymmetric Membrane (Kah Peng Lee *et al.*, 2010)

Chemical type & description	Chemical structure
<p>4. Polybenzimidazoline</p> <p>Flux: 0.13m³ m⁻² day⁻¹</p> <p>Salt Rejection: 95%</p> <p>Test: > 6 bar, 0.105% NaCl solution</p>	
<p>5. Polyoxadiazole</p> <p>Flux: 0.07m³ m⁻² day⁻¹</p> <p>Salt Rejection: 92%</p> <p>Test: > 45 bar, 0.5% NaCl solution</p>	

การผลิต TFC เยื่อแผ่น ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากสามารถนำสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์ มาผสมเข้าด้วยกันเพื่อปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพในการกรองดียิ่งขึ้น ซึ่งการผลิต TFC เยื่อแผ่น มีวิธีการผลิตที่หลากหลาย และได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เช่น Extrusion, Interfacial polymerization และ Polycondensation เป็นต้น (H.A. Shawky, 2011)

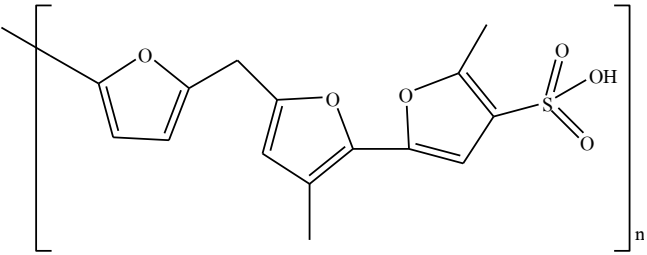
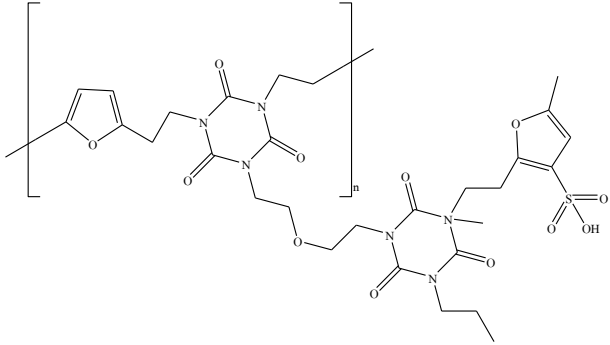
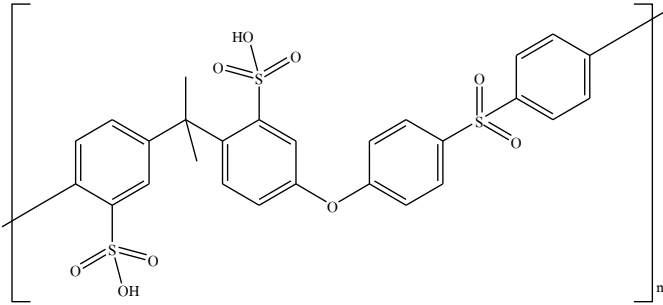
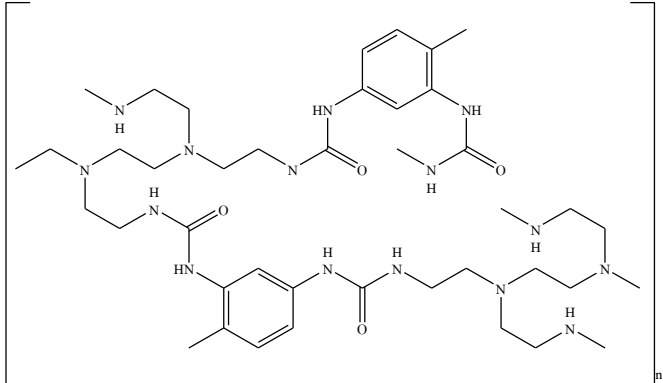
ข) วิธีการผลิตพอลิเมอร์เพื่อใช้ในการผลิตเยื่อแผ่น วิธีที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์มี 4 แบบ คือ แบบบัลค์ (bulk) แบบสารละลาย (solution) แบบแขวนลอย (suspension) และแบบอิมัลชัน (emulsion) และแบ่งตามความสามารถในการผสมกันของสารในระบบได้ 2 ระบบ คือระบบเนื้อเดียว (homogeneous system) ในระบบนี้พอลิเมอร์จะละลายเป็นเนื้อเดียวกัน และระบบเนื้อผสม (heterogeneous system) ในระบบนี้มีพอลิเมอร์อย่างน้อย 1 ชนิด ที่ไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งเทคนิคการพอลิเมอไรเซชัน แบบระหว่างวัฏภาคสารละลาย (interfacial polymerization) เป็นส่วนหนึ่งของพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย (อโนคัย รัชเวทย์, 2551)

วิธีการผลิตเยื่อแผ่น ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การ Extrusion ซึ่งบางครั้ง การผลิตเยื่อแผ่น ด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิที่สูงเพื่อหลอมเม็ดพลาสติก ซึ่งอาจก่อให้เกิดการสลายตัวของเม็ดพลาสติก และทำให้สมบัติของเยื่อแผ่นด้อยลงได้ เช่น การศึกษาการสลายตัวของพอลิเอไมด์ในระหว่างการขึ้นรูปเยื่อแผ่น (Marlene J. Cran, 2011)

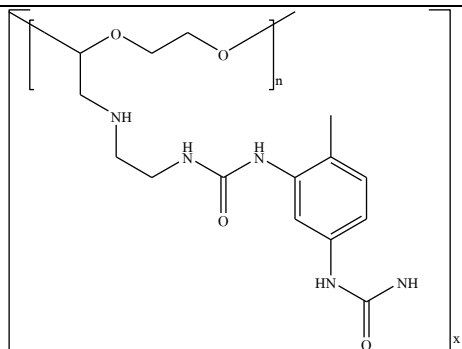
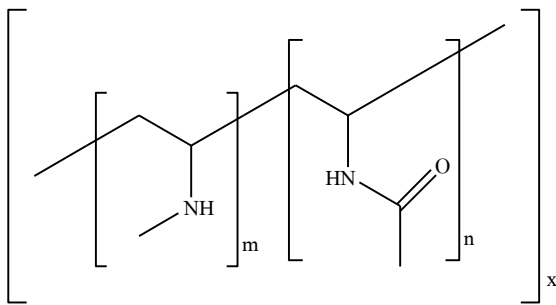
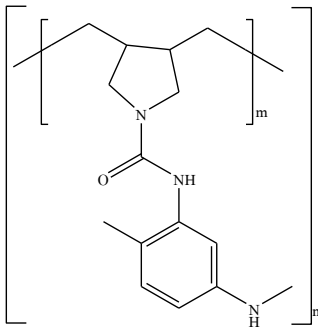
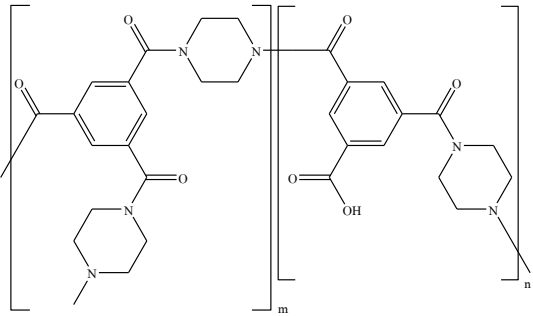
การศึกษาวิธีการผลิตเยื่อแผ่น เพื่อพัฒนาสมบัติของเยื่อแผ่น จึงมีเพิ่มมากขึ้น เช่น ในปี 1970 ได้มีการผลิตเยื่อแผ่น ผสมจากพอลิเอไมด์ และพอลิซัลโฟนโดยใช้วิธี Polycondensation (Byeong-Heon Jeong, 2007) อีกวิธีหนึ่งในการผลิตเยื่อแผ่น ที่ได้รับความสนใจสูง คือ วิธี Interfacial polymerization การสังเคราะห์เยื่อแผ่นด้วยวิธีนี้มีข้อดีคืออุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาไม่สูงทำให้ไม่เกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์, อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง, ความบริสุทธิ์สูง และได้ผลิตภัณฑ์เกือบ 100% (H.A. Shawky, 2011)

ระบบพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลายประกอบด้วยมอนอเมอร์ตัวเริ่ม และตัวทำละลายที่เหมาะสม เป็นระบบที่เป็นเนื้อเดียวหรือเป็นระบบที่เป็นเนื้อผสมก็ได้ ข้อดีของการมีตัวทำละลายอยู่ในระบบ คือ การกระจาย และการถ่ายเทความร้อนของระบบเกิดได้ดีกว่า และทำให้ความหนืดของระบบไม่สูง สามารถควบคุมความร้อนของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ง่าย พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้อาจอยู่ในรูปของสารละลายซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง หรืออาจนำพอลิเมอร์ที่ได้ไปเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ชนิดอื่นโดยทำปฏิกิริยาต่อเนื่องต่อไป ข้อเสียของการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้คือ เกิดการละลายของพอลิเมอร์จากตัวทำละลาย ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการเลือกตัวทำละลายที่ละลายพอลิเมอร์ได้น้อยที่สุด หรือการใช้ตัวทำละลายที่ระเหยได้ยากซึ่งตัวทำละลายจะปนเปื้อนกับพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ พอลิเมอร์ที่นิยมเตรียมโดยวิธีพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลายได้เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิอะครีโลไนไตรล์ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิไอโซพรีน เป็นต้น นอกจากนี้การเตรียมพอลิเมอร์โดยพอลิเมอร์ที่ได้ไม่ละลายในตัวทำละลายซึ่งมีชื่อเฉพาะว่า เทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบระหว่างวัฏภาค (interfacial polymerization) เช่น การเตรียมพอลิเอไมด์ โดยมอนอเมอร์จะแยกอยู่คนละชั้นของสารละลาย และจะทำปฏิกิริยาควบแน่นที่ระหว่างชั้น ขณะที่เกิด ปฏิกิริยาควบแน่นพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นของสารละลายถูกดึงออกมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งทำให้พอลิเมอร์เกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง แต่หากไม่ดึงพอลิเมอร์ออกมา ปฏิกิริยาจะเกิดช้าลง และถึงขั้นหยุดปฏิกิริยาในที่สุด (อโนคัย รัชเวทย์, 2551)

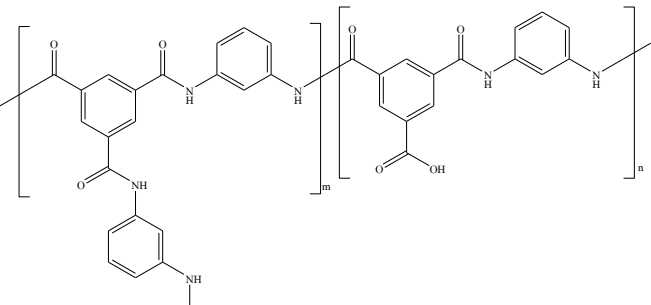
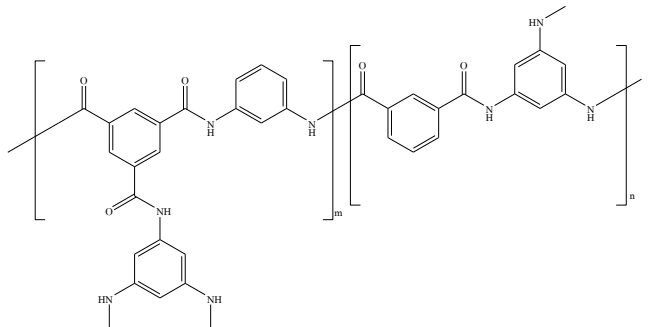
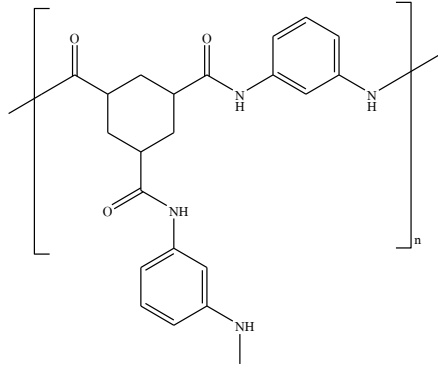
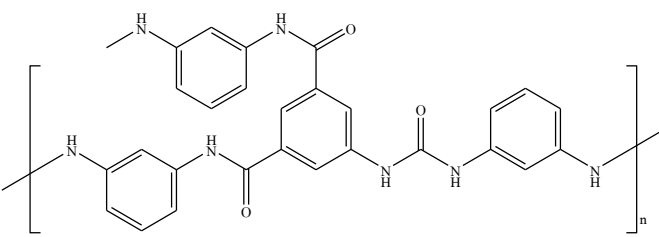
ตารางที่ 2.2 พอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อแผ่น Thin Film Composite Membrane (Kah Peng Lee *et al.*, 2010)

Chemical type & description	Chemical structure
<p>1. Polyfurane - Name: NS-200</p> <p>Flux: $0.8 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$</p> <p>Salt Rejection: 99.8%</p> <p>Test: > 100 bar, 3.5% NaCl solution</p>	
<p>2. Polyether-Polyfurane - Name: PEC-1000</p> <p>Flux: $0.5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$</p> <p>Salt Rejection: 99.9%</p> <p>Test: > 69 bar, 3.5% NaCl solution</p> <p>-Excellent organic rejection</p>	
<p>3. Sulfonated Polysulfone - Name: Hi-Flux CP</p> <p>Flux: $0.06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$</p> <p>Salt Rejection: 98%</p> <p>Test: > 69 bar, 3.5% NaCl solution</p> <p>-Excellent chlorine resistance</p>	
<p>4. Polyamide via polyethylenimine - Name: NS-100</p> <p>Flux: $0.7 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$</p> <p>Salt Rejection: 99%</p> <p>Test: > 100 bar, 3.5% NaCl solution</p>	

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) พอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อแผ่น Thin Film Composite Membrane (Kah Peng Lee *et al.*, 2010)

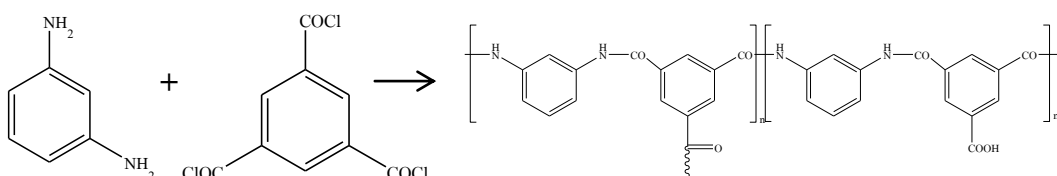
Chemical type & description	Chemical structure
<p>5. Polyamide via polyepiamine - Name: PA-300 or RC-100 Flux: $1.0\text{m}^3\text{ m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ Salt Rejection: 99.4% Test: > 69 bar, 3.5% NaCl solution</p>	
<p>6. Polyvinylamine - Name: WFX-X006 Flux: $2.0\text{m}^3\text{ m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ Salt Rejection: 98.7% Test: > 40 bar, Conductivity = $5000\ \mu\text{Scm}^{-1}$</p>	
<p>7. Polypyrrolidine Flux: $0.8\text{m}^3\text{ m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ Salt Rejection: 99.7% Test: > 40 bar, 0.5% NaCl solution</p>	
<p>8. Polypiperazine-amide - Name: NS-300 Flux: $3.3\text{m}^3\text{ m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ Salt Rejection: 68% Test: > 100 bar, 3.5% NaCl solution</p>	

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) พอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อแผ่น Thin Film Composite Membrane (Kah Peng Lee *et al.*, 2010)

Chemical type & description	Chemical structure
<p>9. Cross linked Fully Aromatic</p> <p>Polyamide - 1 - Name: FT-30</p> <p>Flux: $1.0 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$</p> <p>Salt Rejection: 99%</p> <p>Test: > 15 bar, 0.2% NaCl solution</p>	
<p>10. Cross linked Fully Aromatic</p> <p>Polyamide - 2 - Name: UTC series</p> <p>Flux: $0.8 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$</p> <p>Salt Rejection: 98.5%</p> <p>Test: > 15 bar, 0.5% NaCl solution</p>	
<p>11. Cross linked Aralkyl Polyamide</p> <p>-Name: A-15</p> <p>Flux: $0.26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$</p> <p>Salt Rejection: > 98%</p> <p>Test: > 55 bar, 3.2% NaCl solution</p>	
<p>12. Cross linked Fully Aromatic</p> <p>Polyamide - 3 - Name: X-20</p> <p>Flux: $1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$</p> <p>Salt Rejection: 99.3%</p> <p>Test: > 15 bar, 0.2% NaCl solution</p> <p>Note: The chemical structures listed</p>	

2.4 สมบัติ และการใช้ประโยชน์ของอะโรมาติกพอลิเอไมด์

โดยทั่วไปแล้วพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อแผ่น เพื่อกรองน้ำมาจากมอนอเมอร์ 2 ชนิดคือ m-phenylenediamine และ Trimesoyl chloride ซึ่งมีความสามารถเข้ากันได้ดี ปฏิกิริยาของมอนอเมอร์ทั้ง 2 ชนิดนี้ให้พอลิเมอร์ในรูปของ Aromatic polyamide (W.J. Lau, 2011) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



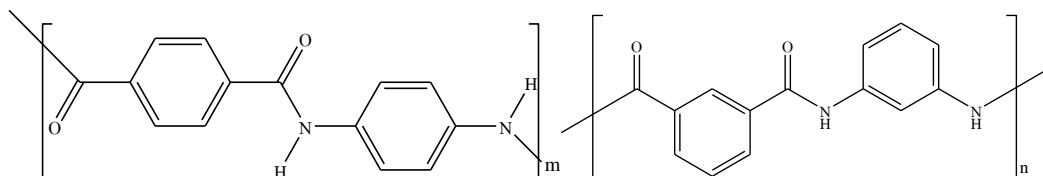
รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาระหว่าง m-phenylenediamine และ trimesoyl chloride (W.J. Lau, 2011)

อะโรมาติก พอลิเอไมด์เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างที่แข็งแรงเนื่องจากการดึงดูดกันของพันธะไฮโดรเจนทำให้เกิดโครงสร้างที่ค่อนข้างหนาแน่น และแข็งแรง ซึ่งเอื้อต่อการเกิดผลึก นอกจากนี้โครงสร้างอะโรมาติกยังทำให้มีความแข็งแรง และความทนต่อความร้อนสูงด้วย

จากสมบัติที่โดดเด่นของอะโรมาติกพอลิเอไมด์ที่กล่าวข้างต้นทำให้มีการนำพอลิเอไมด์มาใช้ในหลายอุตสาหกรรมเช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ การทำเสื่อเกราะกันกระสุน ชุดกันความร้อน ฉนวนกันไฟฟ้า ชุดกีฬา เยื่อแผ่น เป็นต้น นอกจากนี้อะโรมาติกพอลิเอไมด์ยังมีความสามารถในการละลายในสารละลายอินทรีย์ ซึ่งทำให้อเอื้อต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อีกด้วย โดยอะโรมาติก พอลิเอไมด์ ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ poly (p-phenyleneterephthalamide) และ poly (m-phenylene isophthalamide) ซึ่งมีโครงสร้าง และสมบัติดังรูปที่ 2.5 และตารางที่ 2.3 ตาม ลำดับ (Jos M. Garca, 2009)

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเพื่อปรับปรุงสมบัติของเยื่อแผ่น ในด้านต่าง ๆ เช่น การศึกษาผลกระทบต่อสมบัติของเยื่อแผ่น จากสภาวะการ Curing (Asim K. Ghosh, 2007), การศึกษาการควบคุมสภาวะของตัวทำละลายต่อสมบัติของเยื่อแผ่น (Chunlong Kong, 2010), การดัดแปลงผิวหน้าของเยื่อแผ่น ด้วยวิธีการกราฟอโนพังก์ Hydantoin (Xinyu Wei, 2009) แต่ที่ได้รับความนิยม และเป็นที่น่าสนใจในปัจจุบันคือ การใส่อนุภาคเสริมแรงลงไป การใส่อนุภาคเสริมแรงลงไป เยื่อแผ่น ทำในขั้นตอนขึ้นรูปเยื่อแผ่น โดยนำพอลิเมอร์มาละลายในสารละลายที่เหมาะสม และใส่อนุภาคเสริมแรงลงไปแล้วจึงนำไปขึ้นรูปเป็นเยื่อแผ่น อนุภาคเสริมแรงที่นิยมใช้ในการ

ปรับปรุงคุณภาพของเยื่อแผ่น ส่วนใหญ่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร (Hosam A. Shawky, 2011; Kah Peng Lee, 2010)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ poly (p-phenyleneterephthalamide) และ poly (m-phenylene isophthalamide) (Jos M. Garca, 2009)

2.5 การปรับปรุงคุณภาพของเยื่อแผ่นโดยใช้วัสดุนาโน

ริชาร์ด ไฟน์แมน (Richard Feynman) เป็นผู้ที่ได้รับการยอมรับว่าเป็นคนแรกที่แสดงความเห็นถึงความเป็นไปได้ และแนวโน้มของนาโนเทคโนโลยีในการบรรยายเรื่อง “There’s plenty of room at the bottom” ที่สถาบันเทคโนโลยีแคลิฟอร์เนีย เมื่อปี ค.ศ. 1959 โดยการแสดงความเห็นถึงความเป็นไปได้ และโอกาสของประโยชน์ที่ได้จากการจัดการในระดับอะตอม และในปี ค.ศ. 1974 ศาสตราจารย์ โนริโอะ ทานิกูชิ (Norio Taniguchi) แห่งมหาวิทยาลัยวิทยาศาสตร์โตเกียวเป็นคนแรกที่ใช้คำว่า “Nanotechnology”

คำว่า “นาโน” มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก แปลว่า 1 ในพันล้านส่วน นาโนเทคโนโลยี (Nano technology) คือ เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้างหรือการวิเคราะห์ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1-100 นาโนเมตร) รวมถึงการออกแบบหรือการประดิษฐ์เครื่องมือเพื่อใช้สร้างหรือวิเคราะห์วัสดุในระดับที่เล็กมาก ๆ เช่น การจัดอะตอม และโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุหรืออุปกรณ์มีคุณสมบัติพิเศษขึ้นไม่ว่าทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ และสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้

นาโนศาสตร์ (Nanoscience) คือ วิทยาศาสตร์แขนงหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา, วัสดุ, อินทรีย์, อนินทรีย์ และรวมไปถึงสารชีวโมเลกุล ที่มีโครงสร้างสามมิติในด้าน ยาว, กว้าง และสูง ด้านใดด้านหนึ่งอยู่ระหว่าง 1-100 นาโนเมตร โดยวัสดุชนิดใดก็ตาม ถ้ามีมิติทั้งสามเล็กกว่า 100 นาโนเมตร วัสดุนั้นถูกเรียกว่า สาม-ดี วัสดุนาโน (3-D nanomaterial) ถ้ามีแค่ สอง หรือหนึ่งมิติ ที่เล็กกว่า 100 นาโนเมตร ถูกเรียกว่าวัสดุ สอง-ดี (2-D) และหนึ่ง-ดี (1-D) ตามลำดับ

คุณสมบัติของวัสดุนาโนแตกต่างจากวัสดุนาโนขนาดใหญ่ (bulk materials) ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติ ทางฟิสิกส์ เคมีและชีวภาพ ส่วนแล้วแต่มีคุณสมบัติเฉพาะตัว ดังนั้นถ้าพูดถึง นาโนศาสตร์ จะถือเป็น การสร้างหรือศึกษาวัสดุที่มีโครงสร้างในระดับนาโนเมตร โดยผลลัพธ์ที่ได้ก็คือ ได้วัสดุชนิดใหม่ หรือรู้คุณสมบัติที่แตกต่าง และน่าสนใจ โดยคุณสมบัติเหล่านั้นถูกอธิบายด้วยทฤษฎีทางควอนตัม (quantum theory) (Ratner Mark, 2003)

การวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใส่อนุภาคนาโนเพื่อเสริมแรงให้เยื่อแผ่น นั้นเป็นที่ นิยมมากขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากอนุภาคนาโนช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเยื่อแผ่น ให้ดียิ่งขึ้น โดยอนุภาคที่เป็นที่นิยมในการศึกษาได้แก่ titanium oxide (TiO_2) (Lee et al., 2008) ซึ่งมีความสามารถในการฆ่าเชื้อ และสลายสารประกอบอินทรีย์ zeolite ช่วยให้เยื่อแผ่น มีความเรียบ มี ประจุลบบนผิว และมีความเป็นขี้ผึ้งมากขึ้น (Mahdi Fathizadeh et al., 2011) silica ช่วยให้เยื่อแผ่น มี ความสามารถในการทนต่อความร้อน และมีประสิทธิภาพในการกรองมากขึ้น (L. Jadav, 2008) และอนุภาคนาโนอีกชนิดที่ได้รับความนิยม คือ ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes) (Byeong Heon Jeong, 2007; Kah Peng Lee, 2010; Hosam A. Shawky, 2011)

ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes) คือ วัสดุที่มีรูปร่างเป็นท่อขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร ผนังท่ออาจมีเพียงแค่ชั้นเดียว (Single-walled) หรือหลายชั้น (Multi-walled) ซึ่งประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุคาร์บอนเพียงธาตุเดียว ค้นพบครั้งแรกเมื่อปี 1991 โดย นักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นชื่อ Sumio Iijima ปัจจุบันพบว่ามีสมบัติที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ ประโยชน์หลายด้าน เช่น ทำเส้นใยเสริมความแข็งแรงในวัสดุคอมโพสิต, ทำอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ไฟ, อายุการใช้งานในแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุ เป็นต้น ท่อนาโนคาร์บอนมีโครงสร้าง และ สมบัติหลากหลายซึ่งขึ้นกับวิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์

การนำท่อนาโนคาร์บอนมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของเยื่อแผ่น เนื่องมาจาก สมบัติเฉพาะตัวของท่อนาโนคาร์บอนที่สามารถให้โมเลกุลของน้ำผ่านได้ และเนื่องจากท่อนาโน คาร์บอนมีขนาดเล็กทำให้มีความสามารถในการคัดแยกโมเลกุลเกลือออกจากน้ำ นอกจากนี้ท่อนา โนคาร์บอนสามารถกระจายตัวในเยื่อแผ่น ได้ทำให้สมบัติเชิงกลของเยื่อแผ่นดีขึ้นด้วย (Hosam A. Shawky, 2011; Kah Peng Lee, 2010)

ตารางที่ 2.3 สมบัติของ poly(p-phenyleneterephthalamide) และ poly(m-phenylene isophthalamide) (Jos M. Garca, 2009)

Property	Polymer	
	PMPI	PPPT
Density (g/cm ³)	1.38	1.44
Water uptake (%). at 65% RH	5.2	3.9
Thermal properties		
Tg (°C)	275	-
Tm (°C)	365 d ²	>500 d ²
Td (°C in N ₂)	400-430	520-540
Tensile properties ^b		
Strength (GPa)	0.59-0.86	2.9-3.0
Modulus (GPa)	7.9-12.1	70-112
Elongation (%)	20-45	2.4-3.6
Crystallinity	Highly crystalline (68-95%)	Highly crystalline
Flammability (L.O.I.)	29	29

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมี

- 3.1.1 1,10-Phenanthroline hydrate ($C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$)
- 3.1.2 Acetic acid (CH_3COOH)
- 3.1.3 Ammonium acetate ($NH_4C_2H_3O_2$)
- 3.1.4 Benzoyl peroxide (BPO)
- 3.1.5 Calcium chloride ($CaCl_2$)
- 3.1.6 Carbon nanotubes (CBNTs)
- 3.1.7 Deionized water (DI)
- 3.1.8 Ferrous sulfate heptahydrate ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)
- 3.1.9 Hydrochloric acid (Conc. HCl)
- 3.1.10 Hydroxylamine hydrochloride ($NH_2OH \cdot HCl$)
- 3.1.11 Isophthaloyl chloride (IPC)
- 3.1.12 Lithium chloride (LiCl)
- 3.1.13 M-phenylenediamine (MPD)
- 3.1.14 N,N-dimethylacetamide
- 3.1.15 Sodium carbonate (Na_2CO_3)
- 3.1.16 Sulfuric acid (Conc. H_2SO_4)
- 3.1.17 Tetrahydrofuran (THF)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 3.2.1 Analytical balance
- 3.2.2 Differential scanning calorimetry
- 3.2.3 Fourier transform infrared spectrometer

3.2.4 Instron machine

3.2.5 Scanning electron microscope

3.2.6 Sonicator

3.2.7 UV-VIS Spectrophotometer

3.2.8 Thermo gravimetric analysis

3.3 วิธีการวิจัย

3.3.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิเอไมด์ (ไนลอน 6,6) เพื่อใช้ในการผลิตเยื่อแผ่น

1) ศึกษาผลของความเร็วการกวนในการสังเคราะห์ไนลอน 6,6 เพื่อใช้ในการผลิตเยื่อแผ่นที่อุณหภูมิห้อง (26.5 °C)

a) นำสาร m-phenylenediamine 4.326 กรัม (0.04 โมล) และ Na_2CO_3 8.48 กรัม (0.08 โมล) ผสมกับน้ำปราศจากไอออน 120 cm^3 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 cm^3 ความเร็วในการกวนอยู่ที่ระดับ 660 rpm โดยใช้เครื่องกวนสารของ IKA รุ่น C-MAG HS 7 เป็นเวลา 10 นาที

b) นำสาร isophthaloyl chloride 8.12 กรัม (0.04 โมล) มาละลายใน tetrahydrofuran 150 cm^3 ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 cm^3 ความเร็วในการกวนอยู่ที่ระดับ 660 rpm เป็นเวลา 10 นาที

c) เทสารละลายที่ได้จากข้อ b) ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 cm^3 ที่เตรียมไว้ในข้อ a) โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 30 นาที ในขั้นตอนนี้ทำการศึกษาโดยใช้อุณหภูมิห้อง (26.5 °C) และความเร็วการกวน 4 ระดับได้แก่ 100, 380, 660 และ 940 rpm

d) นำสารละลายที่ได้ในข้อ c) ไปกรองเพื่อแยกพอลิเมอร์ออก และล้างพอลิเมอร์ที่ได้ด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จนพอลิเมอร์แห้งสนิท นำพอลิเมอร์ที่ได้มาชั่งน้ำหนักเพื่อตรวจสอบผลได้เป็นร้อยละของพอลิเมอร์

e) นำพอลิเมอร์ที่แห้งสนิทมาขึ้นรูปเยื่อแผ่นโดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ : N,N-dimethylacetamide : สารเติมแต่งคือ LiCl หรือ CaCl_2 ในอัตราส่วน 75 : 18 : 7 กวนที่อุณหภูมิ 90 °C ความเร็วในการกวนที่ระดับ 660 rpm เป็นเวลา 90 นาที แล้วนำไปขึ้นรูปเยื่อแผ่นในงานเพาะเชื้อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ประมาณ 9 cm โดยใช้สารละลายที่เตรียมได้ข้างต้น ปริมาตร 2 cm^3 เทลงให้กระจายทั่วในงานเพาะเชื้ออย่างสม่ำเสมอ นำไปอบที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 60 นาที และแช่ในน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- 2) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการสังเคราะห์ในลอน 6,6 เพื่อใช้ในการผลิตเยื่อแผ่นที่ความเร็วการกวน 940 rpm และ 660 rpm
- วิธีการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.1 1) a)
 - วิธีการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.1 1) b)
 - วิธีการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.1 1) c) ในขั้นตอนนี้ทำการศึกษาโดยใช้อุณหภูมิ 2 ค่าคือ 10 °C และ 40 °C และใช้ความเร็วการกวน 940 rpm และทำการศึกษาโดยใช้อุณหภูมิ 4 ค่าคือ 10 °C, 20 °C, 30 °C และ 40 °C ที่ความเร็วการกวนระดับ 660 rpm
 - วิธีการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.1 1) d)
 - วิธีการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.1 1) e)

3.3.2 การเตรียมสารละลายพอลิเมอร์และสารละลายนาโนคอมโพสิต

หลังจากได้สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิเอไมด์ (ในลอน 6,6) ตามข้อ 3.3.1 แล้ว นำพอลิเอไมด์ที่สังเคราะห์ได้มาเตรียมสารละลายพอลิเมอร์และสารละลายนาโนคอมโพสิต ดังนี้

- การเตรียมสารละลายพอลิเมอร์ ทำได้โดยนำพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มาละลายโดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ : N,N-dimethylacetamide : LiCl เป็น 75 : 18 : 7 โดยกวนที่อุณหภูมิ 90 °C ด้วยความเร็วในการกวนที่ระดับ 660 rpm เป็นเวลา 90 นาที
- การเตรียมสารละลายนาโนคอมโพสิต ทำได้โดยการใช้สารละลาย N,N-dimethylacetamide ในอัตราส่วนร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก ผสมกับ LiCl ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก กวนสารละลายที่อุณหภูมิ 90 °C ด้วยความเร็วในการกวนที่ระดับ 660 rpm เป็นเวลา 15 นาที แล้วจึงเติมท่อานาโนคาร์บอนในอัตราส่วน 0.5, 1, 1.5 หรือ 2 โดยน้ำหนัก เพื่อให้ได้สารละลายนาโนคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนของท่อานาโนคาร์บอนต่อพอลิเมอร์เป็นร้อยละ 0.5, 1, 1.5 หรือ 2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากนั้นนำสารละลายนาโนคอมโพสิตไปผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 และ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 70 °C เพื่อศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายตัวของท่อานาโนคาร์บอนนำสารละลายที่ผ่านกระบวนการสั่นแล้วไปเติมผงพอลิเมอร์ที่แห้ง โดยเติมในอัตราส่วนร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก จากนั้น กวนสารละลายที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วเติมสารช่วยกระจายตัว benzoyl peroxide ในอัตราส่วนร้อยละ 0.25 ของ N,N-

dimethylacetamide กวนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วจึงกวนที่อุณหภูมิห้องต่อเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.3.3 การขึ้นรูปเยื่อแผ่นที่สามารถควบคุมความหนาได้

จากการขึ้นรูปเยื่อแผ่นโดยใช้งานเพาะเชื้อและควบคุมปริมาตรของสารละลายที่ 2 cm³ ตามวิธีการทดลองในข้อ 3.3.1 พบว่าควบคุมความหนาของเยื่อแผ่นได้ไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากการกระจายตัวของสารละลายไม่สม่ำเสมอจึงได้ทำการตัดแปลงอุปกรณ์เพื่อใช้ในการขึ้นรูปเยื่อแผ่นใหม่โดยใช้กระจกแก้วตัดทรงสี่เหลี่ยมขนาด 10x6 cm หนา 0.2 cm และควบคุมความหนาโดยใช้เทปกาวเทปลอนที่มีความหนา 0.13 mm ติดลงแผ่นกระจก 2 รอบเพื่อเป็นกรอบในการขึ้นรูปเยื่อแผ่นให้มีความหนา 0.26 mm โดยวิธีการขึ้นรูปมีดังนี้

นำสารละลายพอลิเมอร์และสารละลายนาโนคอมโพสิตที่เตรียมได้ในข้อ 3.3.2 มาเทลงบนแผ่นกระจกแก้วทรงสี่เหลี่ยมดังกล่าวข้างต้น และใช้แท่งแก้วคนปาดให้เรียบเสมอบนของเทปกาวเทปลอนที่เป็นกรอบในการขึ้นรูป จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 60 หรือ 30 นาที และแช่ในน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3.4 การวิเคราะห์เอกลักษณ์เยื่อแผ่น

1) การวิเคราะห์เอกลักษณ์เยื่อแผ่นโดย FT-IR

a) เตรียมชิ้นงานเยื่อแผ่น โดยนำชิ้นงานเยื่อแผ่นที่แช่ในน้ำปราศจากไอออนอบในตู้อบ โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 10 นาที จนแห้งสนิท

b) วิเคราะห์เอกลักษณ์เยื่อแผ่นโดยเครื่อง FT-IR Spectrophotometer รุ่น FT-IR Perkin Elmer Spectrum 2000 ใช้ความถี่ระหว่าง 600 ถึง 4000 cm⁻¹ ทำการสแกน 4 รอบและบันทึกผลทุกๆ 1 cm⁻¹

2) การวิเคราะห์เอกลักษณ์เยื่อแผ่นโดย SEM

เนื่องจากเยื่อแผ่นมีขนาดความหนาประมาณ 0.1 mm และ อยู่ในสภาวะเปียกผู้วิจัยจึงทำการทดสอบโดยเครื่อง Scanning electron microscope รุ่น Quanta400, FEI:SEM ที่สามารถดูลักษณะของชิ้นงานได้ในหลายรูปแบบและมีกำลังขยายที่สูง โดยผู้วิจัยได้ใช้กำลังขยายด้านหน้าของเยื่อแผ่นที่ 25,000 เท่า เพื่อดูลักษณะของพื้นผิวและการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอน แต่เนื่องจากเยื่อแผ่นมีความหนาแน่นของโมเลกุลมากจึงได้ทำการส่องภาพตัดขวางโดยนำเยื่อแผ่นให้ความมาเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวแล้วจึงหักเยื่อแผ่นเพื่อดูการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนที่กำลังขยาย 50,000 และ 60,000 เท่า และทำการทดสอบท่อนาโนคาร์บอนที่กำลังขยาย 25,000, 50,000 และ 60,000

3) วิเคราะห์เอกลักษณ์เยื่อแผ่นโดย DSC

วิเคราะห์เยื่อแผ่นโดยเครื่อง Differential scanning calorimeter รุ่น DSC7, PERKIN ELMER: DSC ใช้ น้ำแข็งแห้ง ในการทำความเย็นและใช้ N_2 เป็น purge gas โดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิ $25.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $55.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่อัตรา $20.00\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ และหยุดไว้เป็นเวลา 2 นาที แล้วลดอุณหภูมิจาก $55.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $0.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่อัตรา $20.00\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ แล้วเพิ่มอุณหภูมิจาก $0.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $300.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่อัตรา $20.00\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ แล้วหยุดไว้เป็นเวลา 1 นาที แล้วลดอุณหภูมิจาก $300.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $0.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่อัตรา $20.00\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$

4) วิเคราะห์เยื่อแผ่นโดย Instron Machine

a) ทำการตัดชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลโดยมีขนาดยาว 6.5 cm กว้าง 2 cm และ gauge length มีขนาดยาว 1.5 cm กว้าง 0.5 cm มีความหนาที่ประมาณ 0.1 mm และปรับสภาพชิ้นงาน โดยเก็บรักษาชิ้นงานที่อุณหภูมิ $23\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $50\pm 5\text{ \%R.H.}$ เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง

b) ทำการทดสอบโดยการดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine รุ่น Instron 55R4502, S/N H3342 โดยวัดความหนาของชิ้นงานด้วย vernier caliper และให้ระยะห่างระหว่างปากจับที่ 30 mm ความเร็วในการดึง $1\text{ mm}/\text{min}$ ที่อุณหภูมิ $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ 50 \%R.H.

5) วิเคราะห์เยื่อแผ่นโดย TGA

วิเคราะห์เยื่อแผ่นโดยเครื่อง Thermogravimetric analyzer รุ่น DMTA V, RHEOMETRIC SCIENTIFIC:DMTA ใช้ ก๊าซ N_2 เป็น purge gas โดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิ $50.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $800.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่อัตรา $10.00\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$

3.3.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเยื่อแผ่นด้วยวิธีการกรองแบบใช้แรงดัน

1) การทดสอบประสิทธิภาพการกรองสารละลายไอออนเหล็กของเยื่อแผ่นโดยใช้ชุดทดลองการกรองแบบใช้แรงดัน

a) เตรียมสารละลายไอออนเหล็กโดยใช้ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ปริมาณ 5 กรัมผสมกับน้ำปราศจากไอออนจนมีปริมาตร 500 cm^3 เติม HCl ลงไปเล็กน้อยเพื่อป้องกันการตกตะกอน

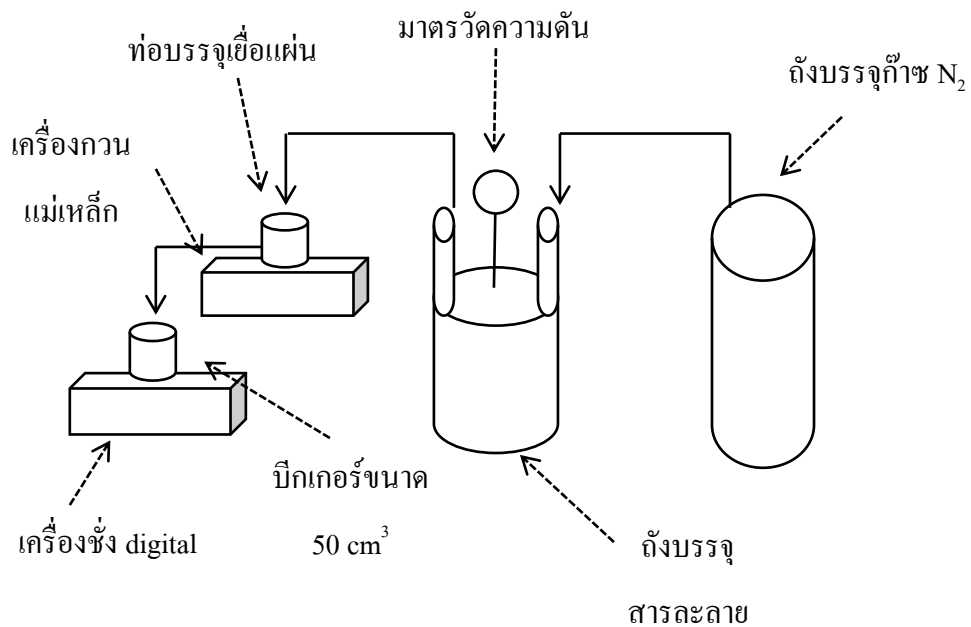
b) ตัดชิ้นงานเยื่อแผ่นเป็นรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 5.5 cm

c) ทำการทดสอบการกรองโดยต่ออุปกรณ์เข้ากับถังแก๊ส N_2 เพื่อให้ความดันดังรูปที่ 3.1 โดยทำการให้ความดันตั้งแต่ 5-20 bar เก็บสารละลายที่กรองได้

2) การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกรองไอออนเหล็กของเยื่อแผ่นโดยวิธีการ UV absorbion

ทำการวิเคราะห์ปริมาณไอออนเหล็กจากสารละลายที่กรองได้ใน 1) โดยวิธีมาตรฐาน (ASTM E 394 - 04) ซึ่งใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ โดยสร้างกราฟ

มาตรฐาน (Calibration curve) และคำนวณหาสมการเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบความเข้มค่า Absorbance ที่วัดได้จากเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์กับความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง



รูปที่ 3.1 ชุดทดลองการกรองแบบใช้แรงดัน

บทที่ 4

ผลการศึกษา และอภิปรายผล

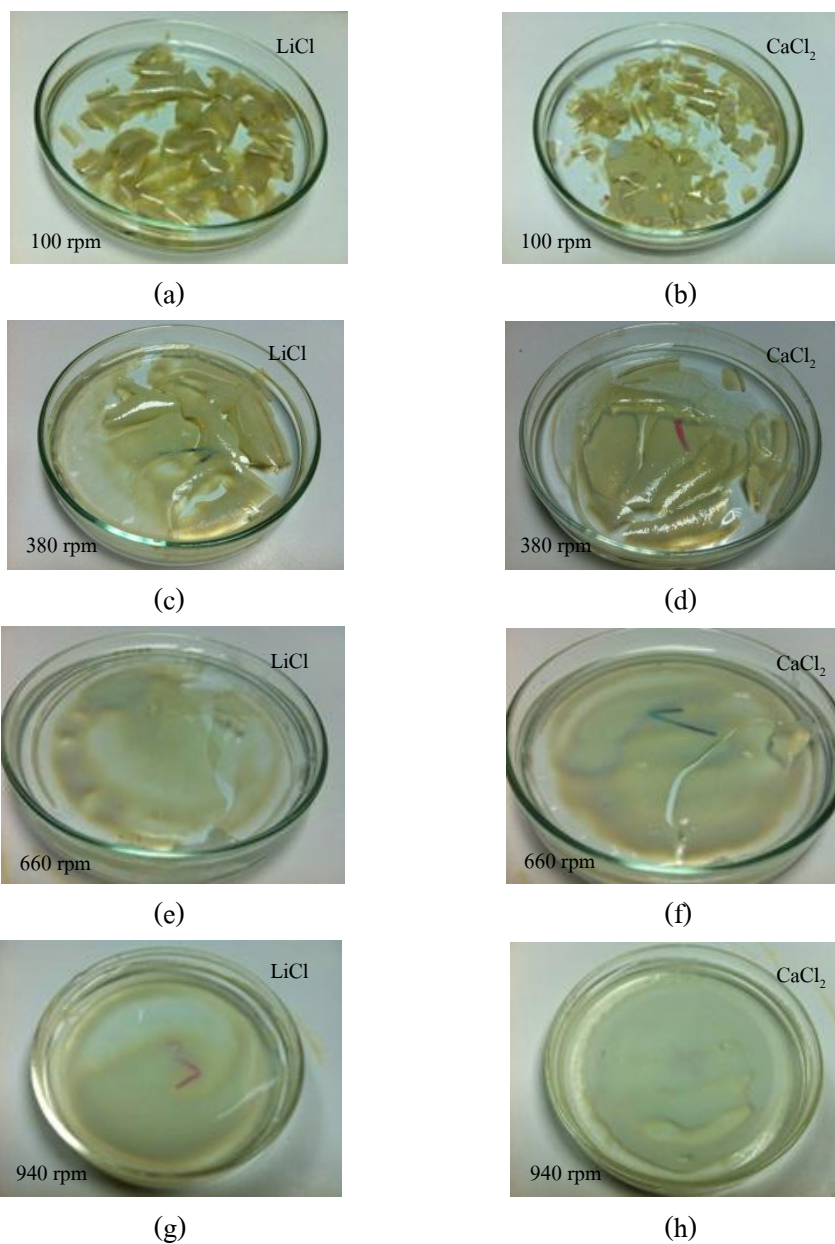
4.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไนลอน 6,6 เพื่อใช้ในการผลิตเยื่อแผ่น

พอลิเอไมด์ที่ใช้ในการทดลองคือ ไนลอน 6,6 ซึ่งสามารถเตรียมได้จากเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบระหว่างวัฏภาค (interfacial polymerization) โดยมอนอเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเป็นพอลิเมอร์อยู่ระหว่างวัฏภาคของของเหลว สภาวะในการเกิดปฏิกิริยาที่ศึกษา ได้แก่ ความเร็วในการกวน และอุณหภูมิ ซึ่งมีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน และส่งผลต่อประสิทธิภาพเยื่อแผ่นที่สังเคราะห์ได้ ผลจากการศึกษามีดังนี้

ศึกษาความเร็วการกวน 4 ระดับ ได้แก่ 100, 380, 660 และ 940 rpm เนื่องจากเป็นระดับความเร็วของเครื่องกวนสารให้ความร้อนที่ไม่เกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกันของสารละลาย โดยใช้อุณหภูมิห้องที่ 26.5 °C เป็นอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากสะดวกต่อการทำการทดลองระหว่างระดับ 100 rpm ถึง 940 rpm และได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลได้เป็นร้อยละ และลักษณะเยื่อแผ่นของ nylon 6,6 ที่สังเคราะห์ที่ 26.5 °C โดยใช้ความเร็วการกวนระดับต่าง ๆ

ความเร็วการกวน (rpm)	ผลได้เป็นร้อยละ	จึ้นรูปเป็นเยื่อแผ่นเรียบ	
		LiCl	CaCl ₂
100	57.53±2.20	ไม่ได้	ไม่ได้
380	71.22±2.83	ไม่ได้	ไม่ได้
660	84.85±1.00	ไม่ได้	ไม่ได้
940	88.26±2.14	ได้	ได้



รูปที่ 4.1 ภาพลักษณะเยื่อแผ่น nylon 6,6 สังกะหราะห์ที่ $26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยใช้ความเร็วการกวนระดับต่าง ๆ และใช้สารเติมแต่ง LiCl หรือ CaCl_2 ในการทำเยื่อแผ่น (a) LiCl ที่ 100 rpm (b) CaCl_2 ที่ 100 rpm (c) LiCl ที่ 380 rpm (d) CaCl_2 ที่ 380 rpm (e) LiCl ที่ 660 rpm (f) CaCl_2 ที่ 660 rpm (g) LiCl ที่ 940 rpm และ (h) CaCl_2 ที่ 940 rpm

จากการทดลอง เมื่อใช้อุณหภูมิห้องที่ $26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในการทำปฏิกิริยา และเปลี่ยนความเร็วการกวนที่ระดับ 100-940 rpm พบว่า เมื่อความเร็วการกวนมีค่าเพิ่มขึ้น ผลได้เป็นร้อยละของพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 57.53 ± 2.20 เป็นร้อยละ 88.26 ± 2.14 ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบระหว่างวัฏภาคจะเกิดปฏิกิริยาบริเวณผิวรอยต่อสารละลายของ

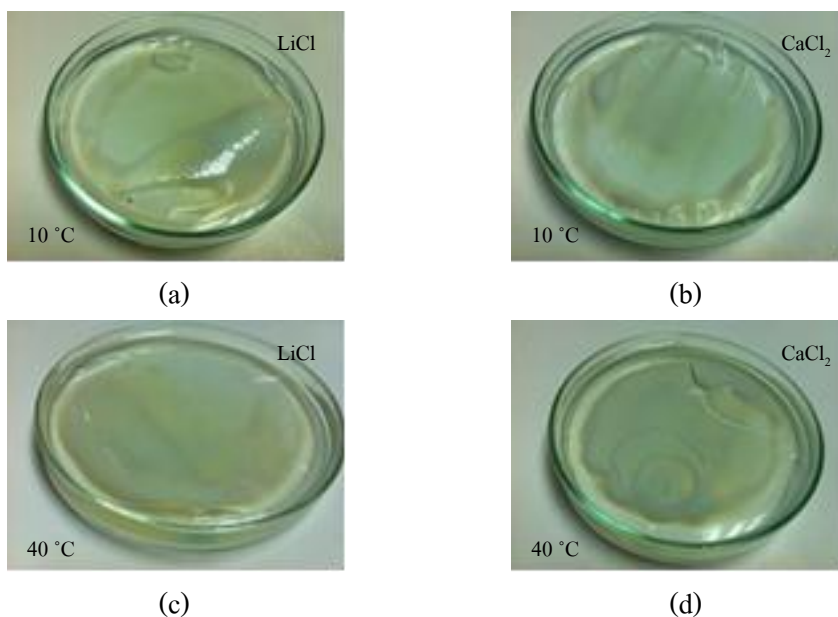
มอนอเมอร์ทั้ง 2 ชนิด การเพิ่มความเร็วการกวนจะทำให้สารละลายทั้งสองชนิดมีพื้นผิวสัมผัสกันมากขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มความเร็วการกวนยังช่วยให้พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นมีการกระจายตัวดีขึ้น ไม่จับตัวเป็นก้อน ซึ่งการจับตัวเป็นก้อนจะทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารละลาย และมอนอเมอร์ที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยา และเมื่อนำพอลิเมอร์ไปขึ้นรูปเป็นเยื่อแผ่นพบว่า เยื่อแผ่นที่ใช้พอลิเมอร์จากการสังเคราะห์โดยใช้ความเร็วการกวนสูงที่ 940 rpm นั้น จะสามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีสีขาวซึ่งเป็นสีของพอลิเมอร์ที่บริสุทธิ์ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ S.V. JOSHand A.V. RAO, 1989 และ Shawky, 2009 ซึ่งทำการทดลองสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่ใช้สำหรับทำเยื่อแผ่นกรองน้ำที่ความเร็วในการกวนสูง พบว่าผลได้เป็นร้อยละของพอลิเมอร์เกือบร้อยละ 100 และความบริสุทธิ์ของพอลิเมอร์ที่สูง ในขณะที่เยื่อแผ่นที่ใช้พอลิเมอร์จากการสังเคราะห์โดยใช้ความเร็วการกวนต่ำตั้งแต่ 100-660 rpm จะไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากเกิดการจับตัวเป็นก้อนของพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารละลาย และมอนอเมอร์ เมื่อขึ้นรูปจึงมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลซึ่งเป็นสีเดียวกับสีของมอนอเมอร์ m-phenylenediamine และแตกเป็นแผ่นเล็ก ๆ ผลจากการใช้สารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิด พบว่า การใช้สารเติมแต่ง LiCl ในการขึ้นรูปเยื่อแผ่นกรองน้ำ ได้เยื่อแผ่นกรองน้ำที่เมื่อสัมผัส และด้วยตาเปล่าพบว่ามีความยืดหยุ่น และมีสีค่อนข้างขาวมากกว่า การใช้สารเติมแต่งชนิด CaCl_2 ในการขึ้นรูป

เมื่อได้ความเร็วการกวนที่เหมาะสมที่ระดับ 940 rpm แล้วจึงทำการทดลองที่ความเร็วนี้เพื่อศึกษาหาอุณหภูมิในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่เหมาะสม โดยเลือกศึกษาอุณหภูมิ 2 ค่า คือ 10°C และ 40°C เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องซึ่งสะดวกต่อการทดลอง ได้ผลดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลได้เป็นร้อยละ และลักษณะเยื่อแผ่นของ nylon 6,6 ที่สังเคราะห์ที่ความเร็วการกวน 940 rpm ณ อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$)	ผลได้เป็นร้อยละ	ขึ้นรูปเป็นเยื่อแผ่นเรียบ	
		LiCl	CaCl_2
10	90.52±2.33	ได้	ได้
26.5*	88.26±2.14	ได้	ได้
40	87.46±1.49	เปราะ	ไม่ได้

* ใช้ผลจากตารางที่ 4.1 เพื่อเปรียบเทียบ



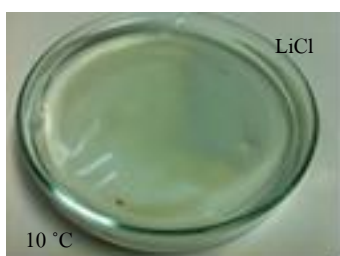
รูปที่ 4.2 ภาพ ลักษณะเยื่อแผ่น nylon 6,6 สังกะระห์ที่ความเร็วการกวน 940 rpm ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และใช้สารเติมแต่ง LiCl หรือ CaCl₂ ในการทำเยื่อแผ่น (a) LiCl ที่ 10 °C (b) CaCl₂ ที่ 10 °C (c) LiCl ที่ 40 °C และ (d) CaCl₂ ที่ 40 °C

เมื่อกำหนดความเร็วการกวนคงที่ที่ 940 rpm พบว่าที่อุณหภูมิ 10 °C และ 40 °C ผลได้ของปฏิกริยามีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย (3.06%) แต่ลักษณะของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จะแตกต่างกัน ซึ่งสังเกตได้จากเยื่อแผ่นที่อุณหภูมิ 40 °C จะมีลักษณะเป็นรอยแตก และมีสีน้ำตาลเข้มกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่าง m-phenylenediamine และ isophthaloyl chloride เป็นปฏิกริยาแบบคายความร้อน โดยมี sodium carbonate เป็นตัวดึง chloride จากปฏิกริยา เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ปฏิกริยาเกิดได้ไม่ดีเท่าที่อุณหภูมิต่ำ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ S.V. JOSHand A.V. RAO, 1989 และ Shawky, 2009 ซึ่งทำการทดลองสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่ใช้สำหรับทำเยื่อแผ่นกรองน้ำที่อุณหภูมิต่ำพบว่าผลได้เป็นร้อยละของพอลิเมอร์เกือบร้อยละ 100 และความบริสุทธิ์ของพอลิเมอร์มีค่าสูง และพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการจับกลุ่มก้อนของพอลิเมอร์ทำให้เกิดการปนเปื้อนของมอนอเมอร์ และสารละลายได้มากกว่า นอกจากนี้ พบว่า ที่อุณหภูมิ 40 °C เมื่อขึ้นรูปด้วย LiCl สามารถขึ้นรูปเป็นเยื่อแผ่นกรองน้ำได้ แต่เยื่อแผ่นกรองน้ำที่ได้มีความยืดหยุ่นที่น้อย ในขณะที่การขึ้นรูปด้วย CaCl₂ ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเยื่อแผ่นกรองน้ำได้

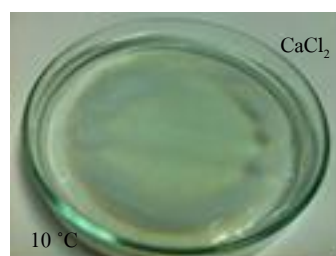
จากการทดลองที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า ผลได้ของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงทำการทดลองที่ความเร็วการกวน 660 rpm เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิให้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยทำการศึกษาอุณหภูมิ 4 ค่า คือ 10 °C, 20 °C, 30 °C และ 40 °C ได้ผลดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลได้เป็นร้อยละ และลักษณะเยื่อแผ่นของ nylon 6,6 ที่สังเคราะห์ที่ความเร็วการกวน 660 rpm ณ อุณหภูมิต่าง ๆ

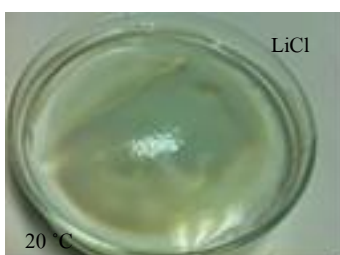
อุณหภูมิ (°C)	ผลได้เป็นร้อยละ	ขึ้นรูปเป็นเยื่อแผ่นเรียบ	
		LiCl	CaCl ₂
10	88.58±2.88	ได้	ได้
20	86.83±1.26	ได้	ได้
30	74.80±2.26	ไม่ได้	ไม่ได้
40	63.36±3.46	ไม่ได้	ไม่ได้



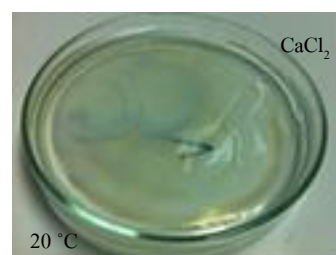
(a)



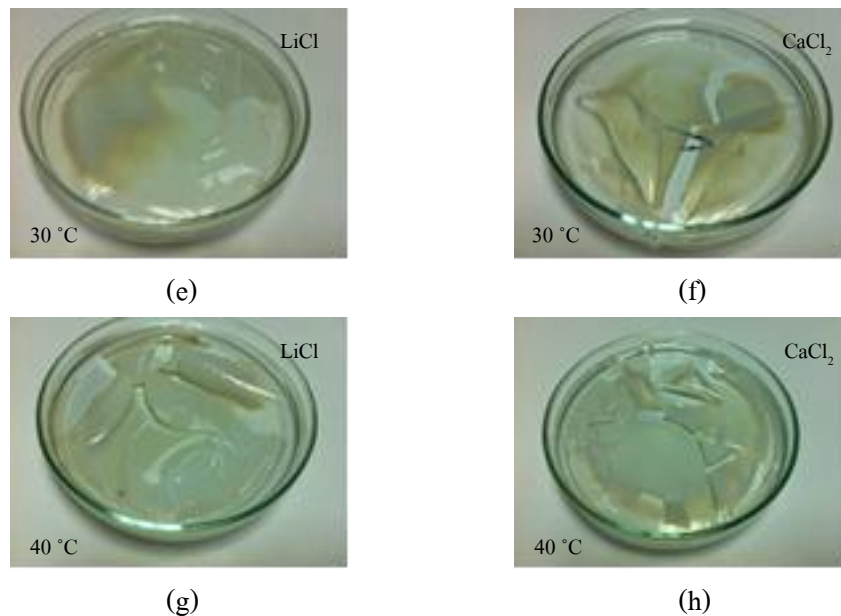
(b)



(c)



(d)



รูปที่ 4.3 ภาพลักษณะเยื่อแผ่น nylon 6,6 สังเคราะห์ที่ความเร็ว การกวน 660 rpm ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และใช้ สารเติมแต่ง LiCl หรือ CaCl_2 ในการทำเยื่อแผ่น (a) LiCl ที่ 10 °C (b) CaCl_2 ที่ 10 °C (c) LiCl ที่ 20 °C (d) CaCl_2 ที่ 20 °C (e) LiCl ที่ 30 °C (f) CaCl_2 ที่ 30 °C (g) LiCl ที่ 40 °C และ (h) CaCl_2 ที่ 40 °C

เมื่อกำหนดความเร็วการกวนคงที่ที่ 660 rpm เพื่อทดสอบผลของอุณหภูมิให้ชัดเจนยิ่งขึ้น พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 10 °C เป็น 40 °C ผลได้ของปฏิกิริยามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญจากร้อยละ 88.58 ± 2.88 เป็น 63.36 ± 3.46 และลักษณะของพอลิเมอร์มีความแตกต่างกันมาก โดยที่อุณหภูมิ 10 °C และ 20 °C สามารถขึ้นรูปได้ และเยื่อแผ่นกรองน้ำที่ใช้ LiCl เป็นสารเติมแต่งมีสีค่อนข้างขาว และมีความยืดหยุ่นที่ดีกว่าเยื่อแผ่นกรองน้ำที่ใช้ CaCl_2 เป็นสารเติมแต่ง ขณะที่อุณหภูมิ 30 °C และ 40 °C พบว่า ไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากเยื่อแผ่นกรองน้ำที่ได้เกิดรอยแตกเป็นแผ่นเล็ก และมีสีน้ำตาลทั้งจากการใช้ LiCl และ CaCl_2 เป็นสารเติมแต่ง เนื่องจากที่ความเร็วการกวน 660 rpm เป็นความเร็วที่ไม่สูงมากนักทำให้ผลของอุณหภูมิมี่ความแตกต่างอย่างชัดเจน

จากผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 10 °C และความเร็วในการกวนที่ 940 rpm ให้ผลได้เป็นร้อยละของปฏิกิริยาสูงที่สุด คือ ร้อยละ 90.52 ± 2.33 และการใช้สารเติมแต่ง LiCl สามารถขึ้นรูปเยื่อแผ่นได้ดีกว่าการใช้สารเติมแต่ง CaCl_2

4.2 การเตรียมสารละลายพอลิเมอร์ และสารละลายนาโนคอมโพสิต

ผู้วิจัยได้ใช้สภาวะที่ 10 °C ที่ความเร็วการกวน 940 rpm เพื่อผลิตพอลิเมอร์สำหรับใช้เป็นสารตั้งต้นในการขึ้นรูปเยื่อแผ่น โดยการขึ้นรูปเยื่อแผ่นผู้วิจัยได้ทำการศึกษาโดยออกแบบการทดลองเป็น 7 สภาวะคือ การขึ้นรูปเยื่อแผ่นโดยใช้สารละลายพอลิเมอร์เพียงอย่างเดียว, การขึ้นรูปเยื่อแผ่นโดยใช้สารละลายพอลิเมอร์ผสมกับท่อนาโนคาร์บอนใน 4 อัตราส่วนคือ ร้อยละ 0.5, 1, 1.5 และ 2 โดยน้ำหนัก และนำไปกระจายตัวในเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที และสารละลายพอลิเมอร์ผสมกับท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วน 1.5 และ 2 โดยน้ำหนัก และนำไปกระจายตัวในเครื่อง sonicator เป็นเวลา 60 นาที พบว่าสารละลายพอลิเมอร์เพียงอย่างเดียวจะมีลักษณะสีเหลืองใสค่อนข้างหนืด เมื่อนำสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนพบว่าพอลิเมอร์ และท่อนาโนคาร์บอนสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันเป็นลักษณะสารละลายสีดำ

4.3 การขึ้นรูปเยื่อแผ่นที่สามารถควบคุมความหนาได้

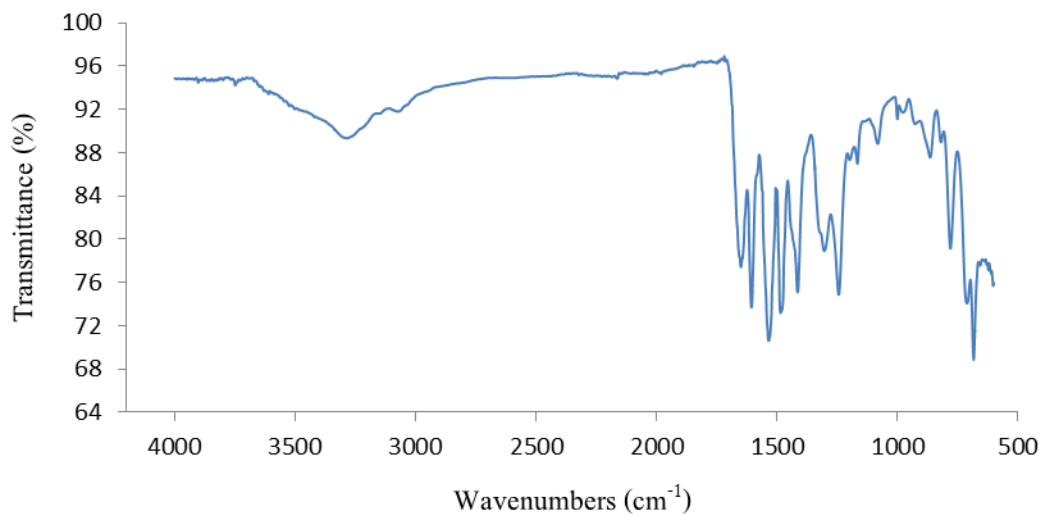
นำสารละลายที่ได้จากข้อ 4.2 ไปขึ้นรูปเยื่อแผ่นบนกระจกแก้วตัดทรงสี่เหลี่ยมขนาด 10x6 cm หนา 0.2 cm และควบคุมความหนาโดยใช้เทปกาวเทปลอนที่มีความหนา 0.13 mm ติดลงแผ่นกระจก 2 รอบเพื่อทำการขึ้นรูปเยื่อแผ่นมีความหนาคงที่มากกว่าการใช้การขึ้นรูปจากการควบคุมปริมาตรบนจากเพาะเชื้อ นอกจากนี้พบว่าการใช้สารละลายจากพอลิเมอร์เพียงอย่างเดียวจะทำการขึ้นรูปให้มีความราบเรียบยากกว่าสารละลายพอลิเมอร์ที่ผสมท่อนาโนคาร์บอน

4.4 การวิเคราะห์เอกลักษณ์เยื่อแผ่น

ทำการวิเคราะห์เอกลักษณ์โดยใช้เครื่องมือดังนี้

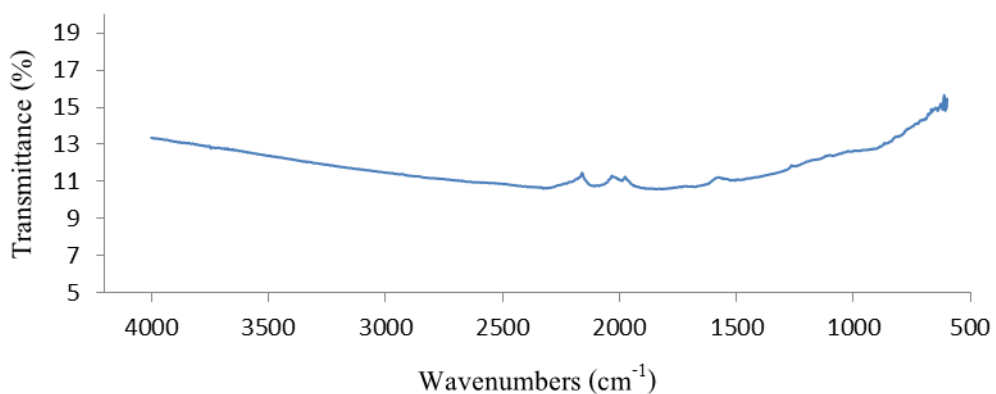
4.4.1 การวิเคราะห์เอกลักษณ์เยื่อแผ่นด้วย ATR-FTIR

ผงพอลิเอไมด์ที่สังเคราะห์ได้ และผงท่อนาโนคาร์บอน รวมทั้งเยื่อแผ่นที่ขึ้นรูปได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วย ATR-FTIR เนื่องจากเยื่อแผ่นถูกเก็บรักษาไว้ในน้ำปราศจากไอออนดังนั้นจึงทำการเตรียมชิ้นงานเยื่อแผ่นเพื่อลดการรบกวนของน้ำโดยนำเยื่อแผ่นไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 10 นาที จนแห้งสนิท ผลการทดสอบเป็นดังรูปที่ 4.4-4.8



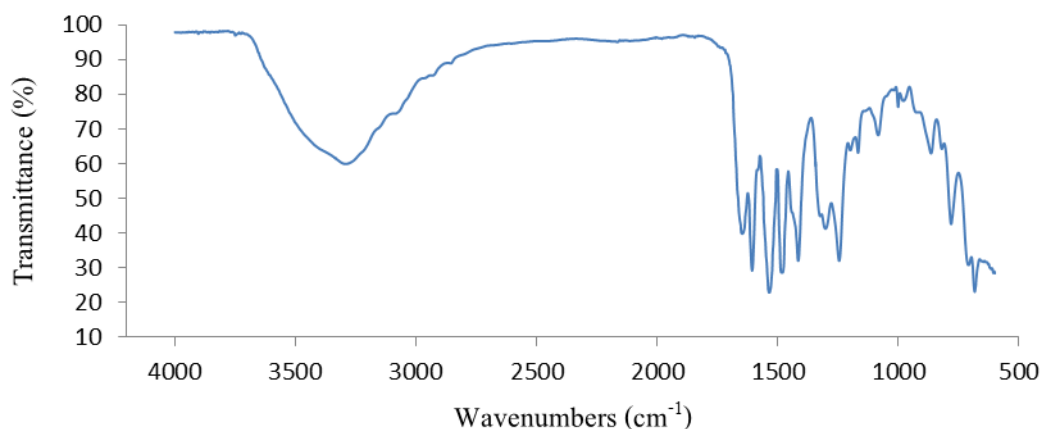
รูปที่ 4.4 กราฟ ATR-FTIR ของผงพอลิเอไมด์

รูปที่ 4.4 แสดงกราฟ ATR-FTIR ของผงพอลิเอไมด์ ซึ่งปรากฏพีกของ N-H stretching ที่เลขคลื่น $3,284\text{ cm}^{-1}$, C-H stretching ที่เลขคลื่น $3,072\text{ cm}^{-1}$ C=O stretching ที่เลขคลื่น $1,650\text{ cm}^{-1}$ C=C stretching ที่เลขคลื่น $1,606\text{ cm}^{-1}$ (amide I) N-H bending ที่เลขคลื่น $1,535\text{ cm}^{-1}$ (amide II) C-N stretching ที่เลขคลื่น $1,304\text{ cm}^{-1}$ C-N stretching N-H in plane bending C-C stretching ที่เลขคลื่น $1,244\text{ cm}^{-1}$ (amide III) และ C-H vibrations ที่ตำแหน่ง meta substituted aromatic ring ที่เลขคลื่น 780 และ 684 cm^{-1} จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าว ยืนยันได้ว่า ผงพอลิเอไมด์ เมอร์ที่สังเคราะห์ได้ คือ nylon 6,6 (Shawky, 2009; N.K. Saha and S.V. Joshi, 2009)



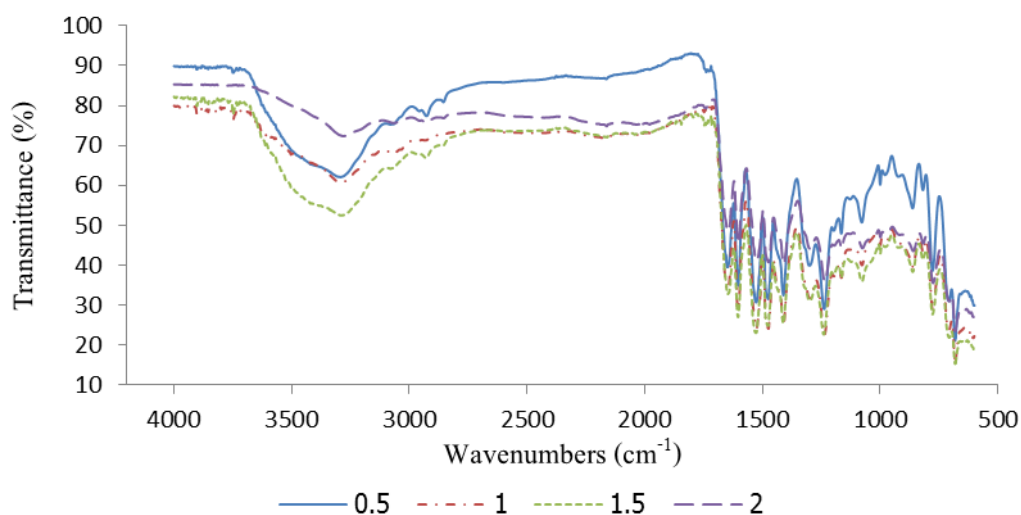
รูปที่ 4.5 กราฟ ATR-FTIR ของผงท่อนานโนคาร์บอน

รูปที่ 4.5 แสดงกราฟ ATR-FTIR ของผงท่อนาโนคาร์บอน จากกราฟพบลักษณะกราฟของท่อนาโนคาร์บอนที่เป็นเส้นตรง (Mou'ad and Sahrim, 2013) และพีก N-H bending ที่เลขคลื่น $1,535\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงการตัดแปลงหมู่ฟังก์ชันของท่อนาโนคาร์บอนที่เป็นหมู่เอไมด์

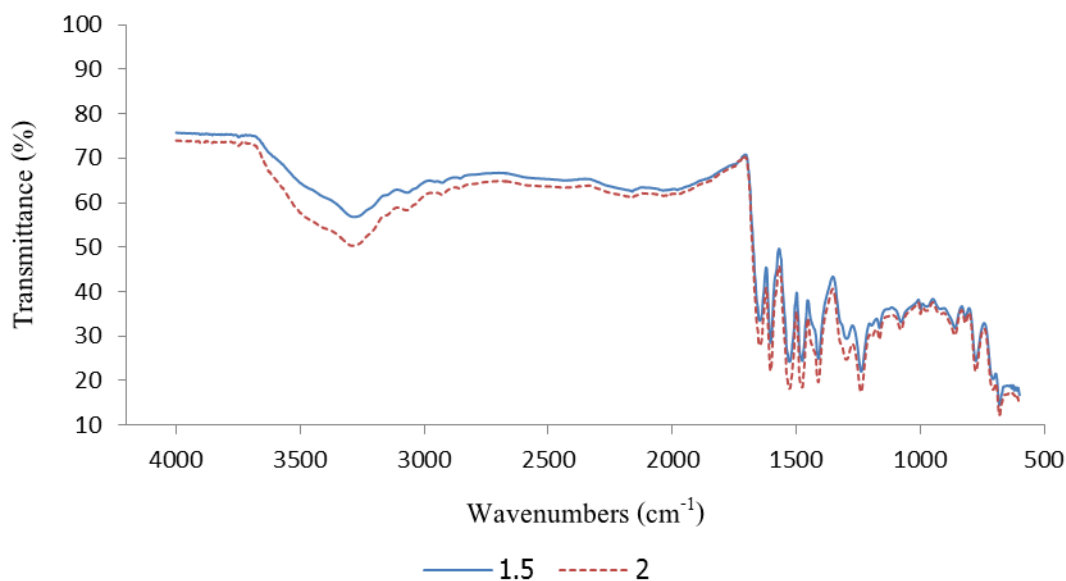


รูปที่ 4.6 กราฟ ATR-FTIR ของเชื้อแผ่นเตรียมจากสารละลายพอลิเมอร์

จากรูปที่ 4.6 แสดงกราฟ ATR-FTIR ของเชื้อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกับกราฟ ATR-FTIR ของผงพอลิเอไมด์ในรูปที่ 4.4 จากผลการทดสอบยืนยันได้ว่าเชื้อแผ่นที่ขึ้นรูปได้นั้นเป็นเชื้อแผ่นจากผงพอลิเอไมด์



รูปที่ 4.7 กราฟ ATR-FTIR ของเชื้อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที



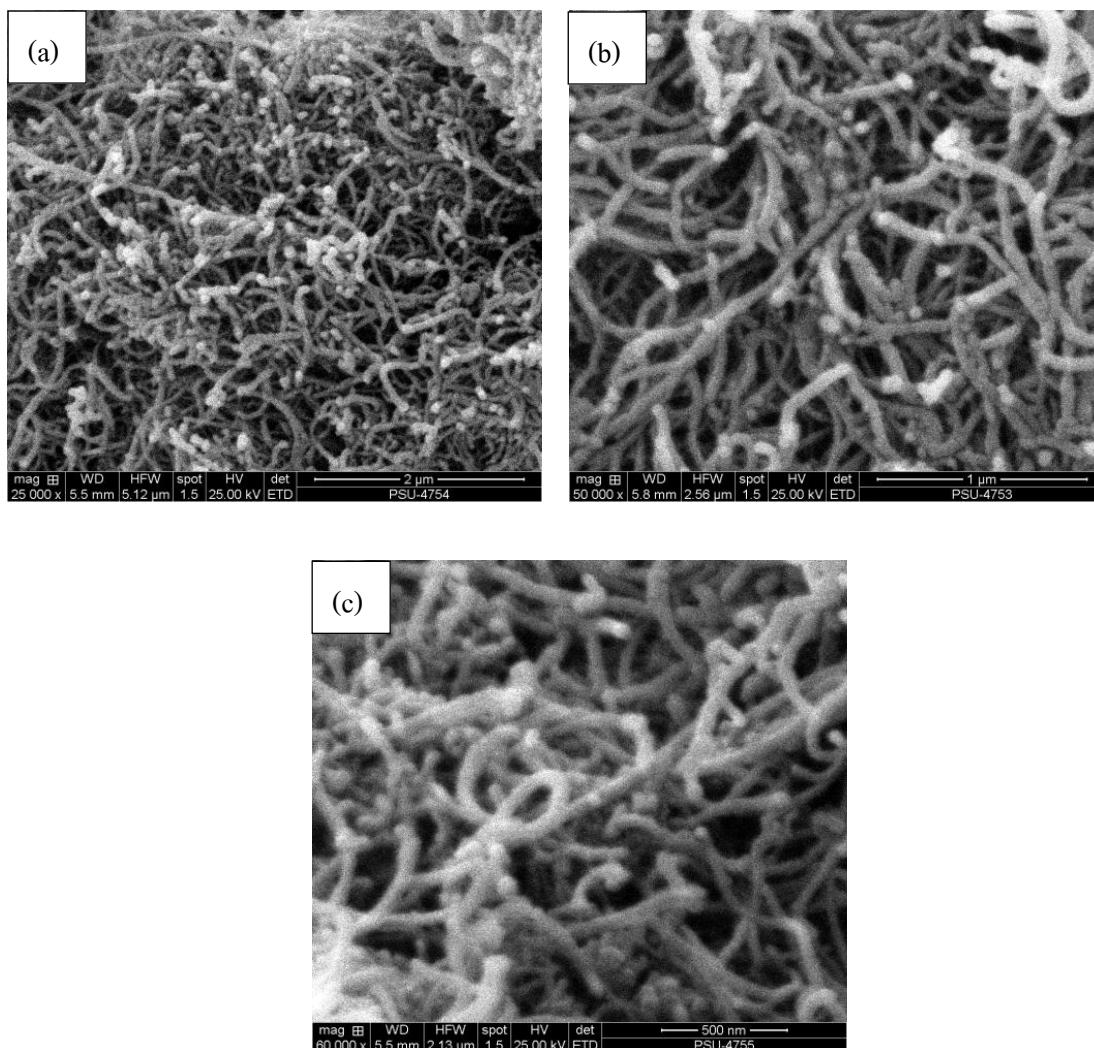
รูปที่ 4.8 กราฟ ATR-FTIR ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนานาโนคาร์บอนร้อยละ 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 60 นาที

จากรูปที่ 4.7 แสดงกราฟ ATR-FTIR ของเยื่อแผ่นสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนานาโนคาร์บอนร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนักผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที และรูปที่ 4.8 แสดงกราฟ ATR-FTIR ของเยื่อแผ่นสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนานาโนคาร์บอนร้อยละ 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนักผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 60 นาทีพบว่ามึลักษณะใกล้เคียงกับกราฟ ATR-FTIR ของเยื่อแผ่นเตรียมจากสารละลายพอลิเมอร์ในรูปที่ 4.6 จากผลการทดสอบยืนยันได้ว่าเยื่อแผ่นที่ขึ้นรูปได้นั้นเป็นเยื่อแผ่นจากผงพอลิเอไมด์

การทดสอบเอกลักษณ์ด้วย ATR-FTIR พบว่า ผงพอลิเอไมด์ที่สังเคราะห์ได้ และเยื่อแผ่นที่ขึ้นรูปจากสารละลายพอลิเอไมด์คือ nylon 6,6 กราฟ ATR-FTIR ของเยื่อแผ่นที่ขึ้นรูปจากสารละลายพอลิเอไมด์ผสมท่อนานาโนคาร์บอนนั้น ประกอบด้วยพีคหลักของ nylon 6,6 และท่อนานาโนคาร์บอนยืนยันได้ว่าเยื่อแผ่นสังเคราะห์จาก nylon 6,6 และท่อนานาโนคาร์บอน

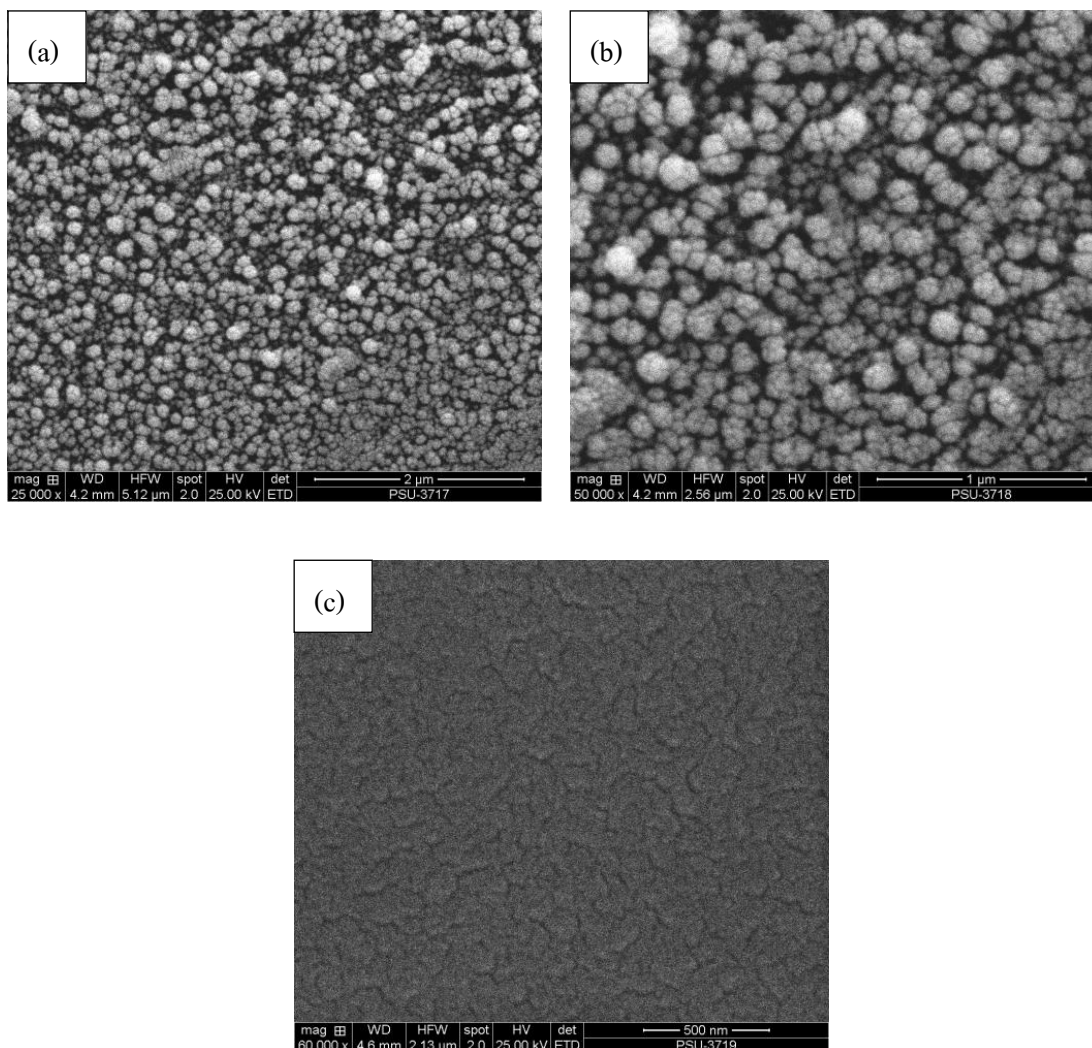
4.4.2 ผลจากการทดสอบเอกลักษณ์เยื่อแผ่นโดยวิธี SEM

ผู้วิจัยได้ใช้รูปภาพ SEM ของท่อนานาโนคาร์บอน และเยื่อแผ่นแสดงดังรูปที่ 4.9-4.16 โดยแสดงทั้งภาพพื้นผิว และภาพตัดขวางของเยื่อแผ่น



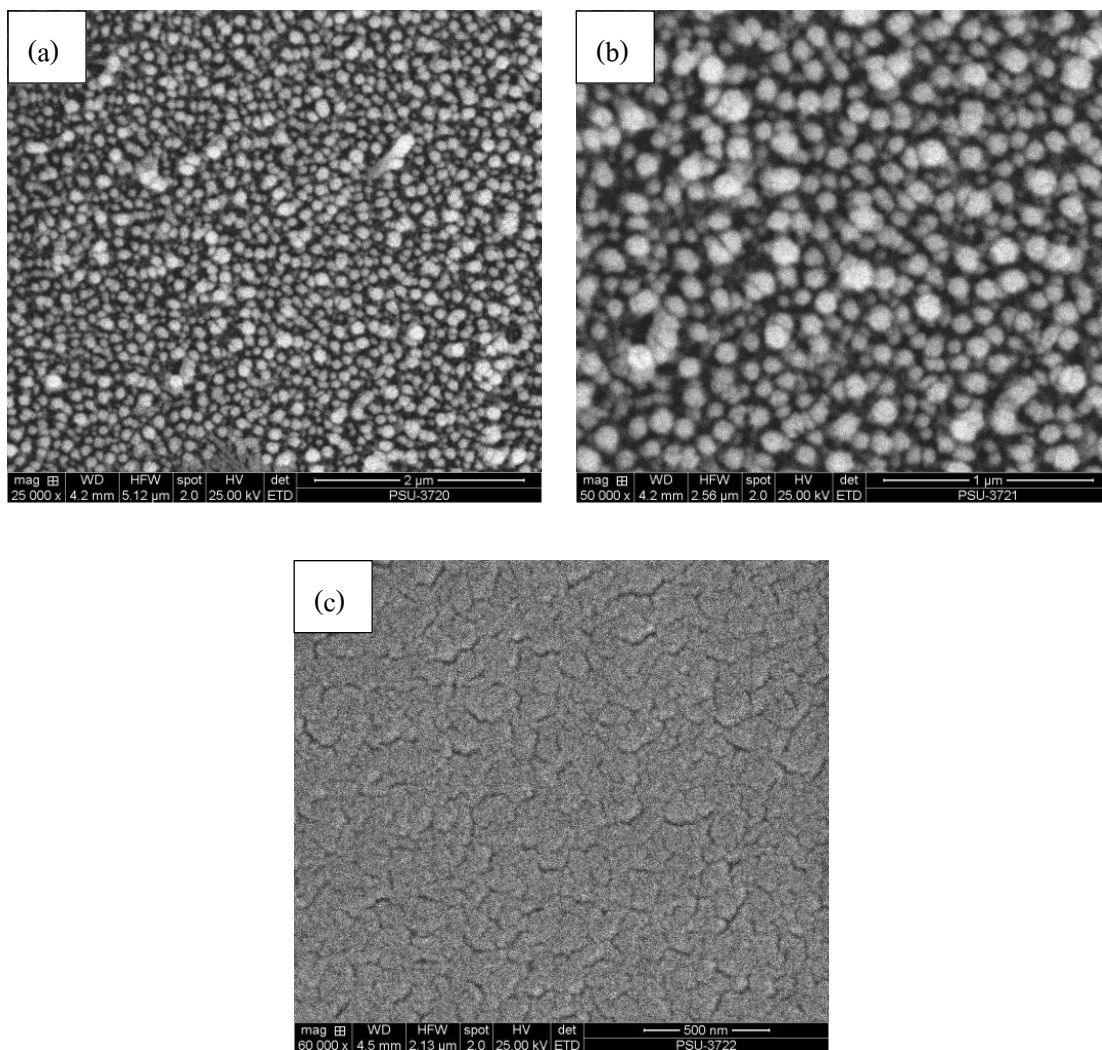
รูปที่ 4.9 ภาพ SEM ของท่อนาโนคาร์บอน (a) กำลังขยาย 25,000 (b) กำลังขยาย 50,000 และ (c) กำลังขยาย 60,000

จากรูปที่ 4.9 แสดงภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่มี aspect ratio ที่ 50-600 พบว่าลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนที่กำลังขยายต่าง ๆ มีลักษณะเป็นลักษณะเส้นยาวที่มีขนาดใกล้เคียงกัน และขดพันกันไปมาอย่างไม่เป็นระเบียบ

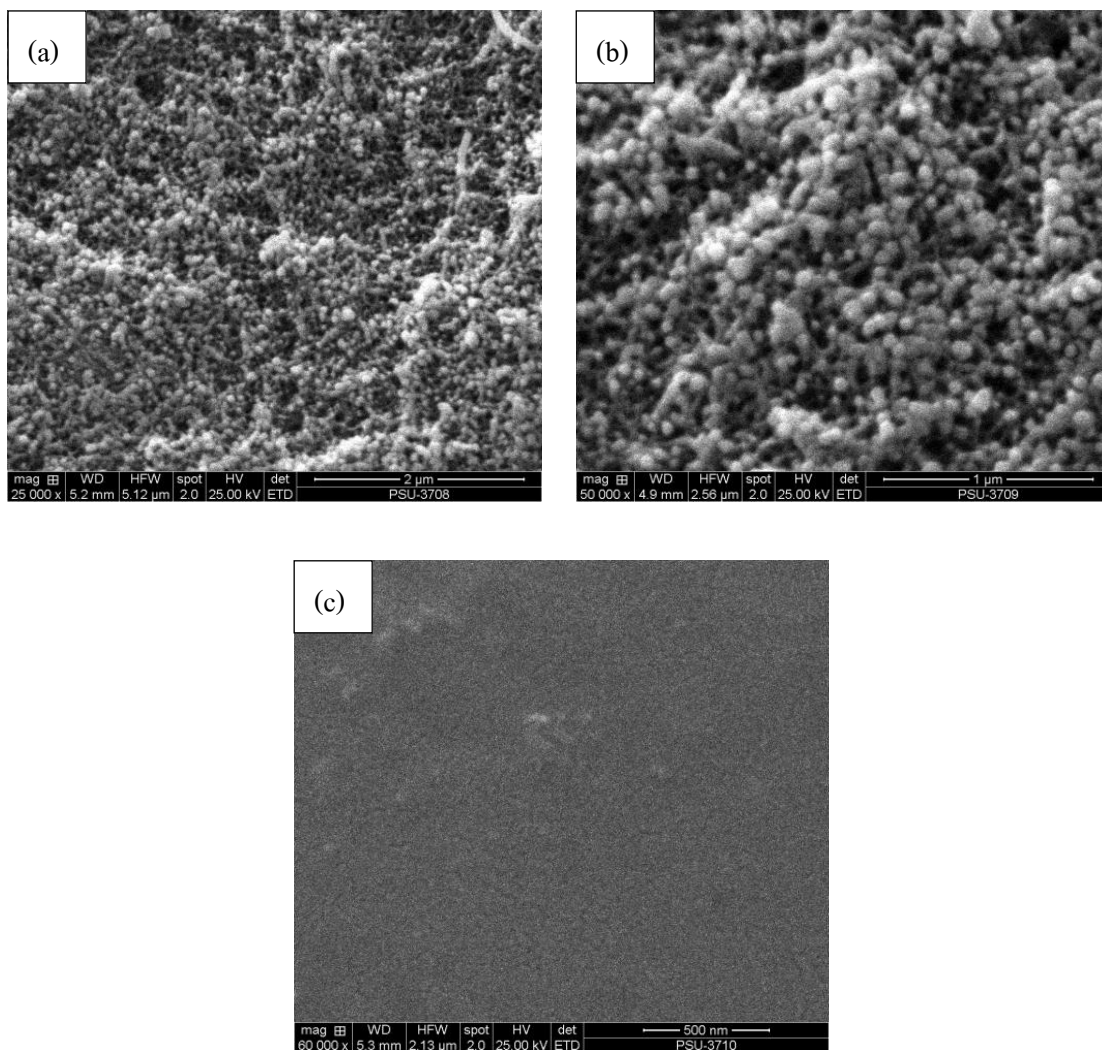


รูปที่ 4.10 ภาพ SEM ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ (a) ภาพตัดขวางกำลังขยาย 25,000 (b) ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50,000 และ (c) ภาพผิวหน้ากำลังขยาย 60,000

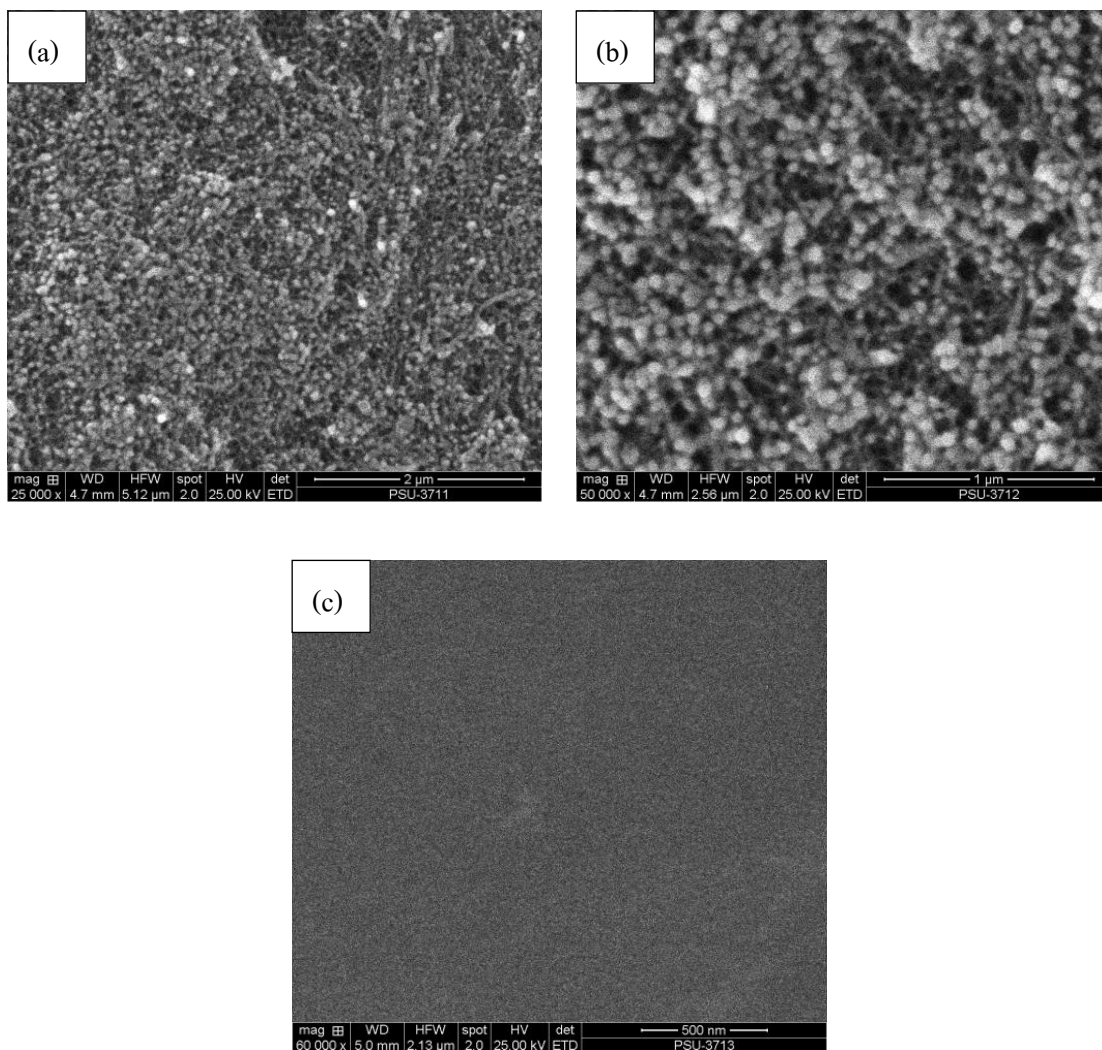
รูปที่ 4.10 แสดงภาพลักษณะเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ จากรูปพบว่า ลักษณะเยื่อแผ่นที่ขึ้นรูปจากสารละลายพอลิเมอร์ในภาพตัดขวางที่กำลังขยาย 25,000 และ 50,000 มีการกระจายตัวของอนุภาคพอลิเมอร์ที่สม่ำเสมอ มีช่องว่างระหว่างอนุภาคน้อย และในภาพผิวหน้าที่กำลังขยาย 60,000 พบว่า เยื่อแผ่นมีลักษณะโดยรวมผิวเรียบ และมีรอยที่ขรุขระเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการปาดสารละลายพอลิเมอร์ที่มีความหนืดด้วยแท่งแก้วระหว่างการขึ้นรูปทำได้อาจไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดรอยขรุขระบนพื้นผิว



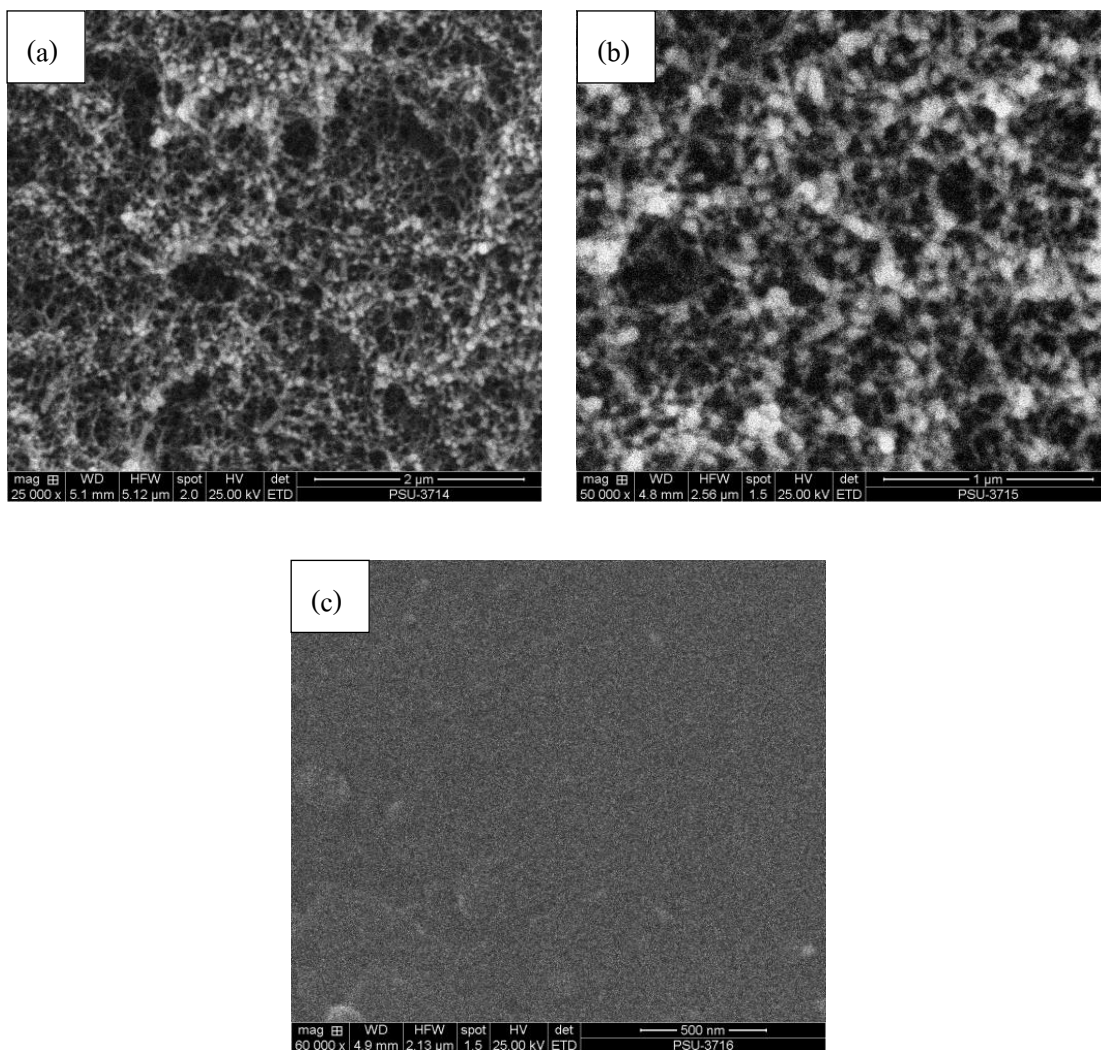
รูปที่ 4.11 ภาพ SEM ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที (a) ภาพตัดขวางกำลังขยาย 25,000 (b) ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50,000 และ (c) ภาพผิวหน้ากำลังขยาย 60,000



รูปที่ 4.12 ภาพ SEM ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักผ่านกระบวนการล้างด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที (a) ภาพตัดขวางกำลังขยาย 25,000 (b) ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50,000 และ (c) ภาพผิวหน้ากำลังขยาย 60,000

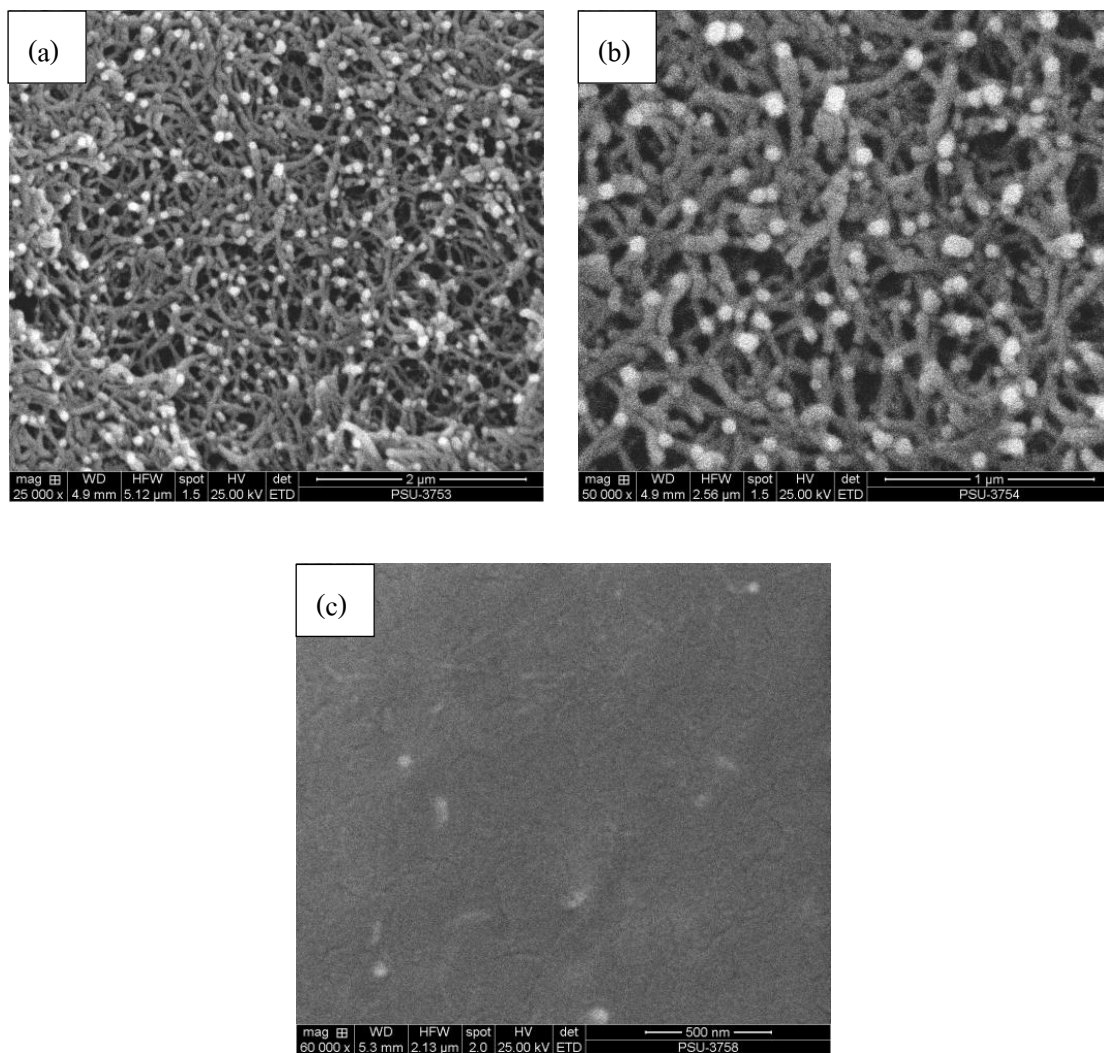


รูปที่ 4.13 ภาพ SEM ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที (a) ภาพตัดขวางกำลังขยาย 25,000 (b) ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50,000 และ (c) ภาพผิวหน้ากำลังขยาย 60,000

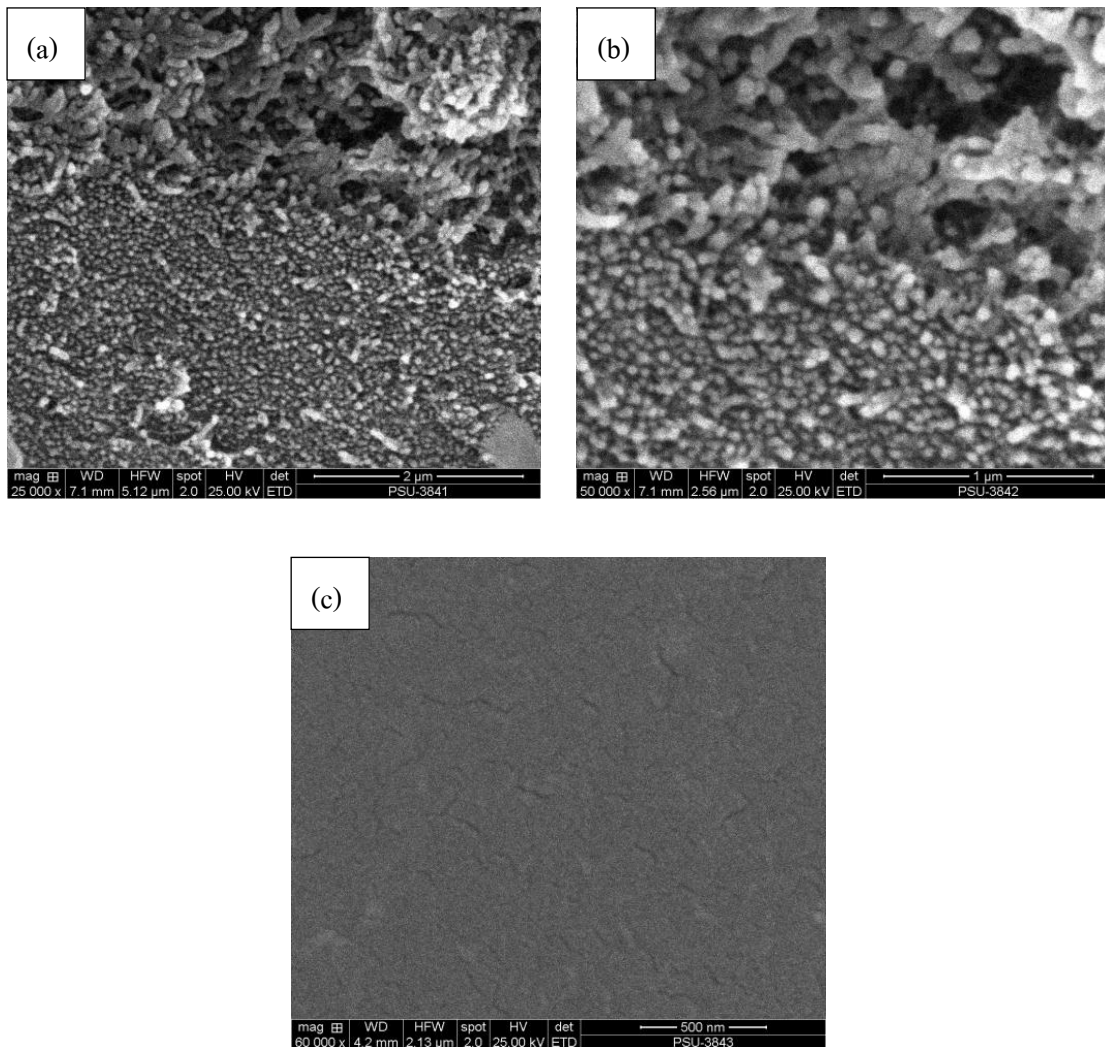


รูปที่ 4.14 ภาพ SEM ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที (a) ภาพตัดขวางกำลังขยาย 25,000 (b) ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50,000 และ (c) ภาพผิวหน้ากำลังขยาย 60,000

รูปที่ 4.11-4.14 แสดงภาพลักษณะเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนักผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที จากรูปพบว่าลักษณะเยื่อแผ่นที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ในภาพตัดขวางที่กำลังขยาย 25,000 และ 50,000 แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนที่มีลักษณะเส้น และอนุภาคพอลิเมอร์ที่เป็นจุดสีขาวอย่างสม่ำเสมอไม่เกิดการเกาะเป็นกลุ่มก้อน และในภาพผิวหน้าที่กำลังขยาย 60,000 พบว่าเยื่อแผ่นมีลักษณะผิวที่เรียบขึ้นเนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีสมบัติในการผสมเป็นเนื้อเดียวกับเยื่อแผ่นซึ่งช่วยในการขึ้นรูปที่ราบเรียบ (Ajmani, *et al.*, 2012) เยื่อแผ่นที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ในภาพตัดขวางที่กำลังขยาย 25,000 และ 50,000 แสดงให้เห็นถึงปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่มีลักษณะเพิ่มขึ้นจากเยื่อแผ่นอัตราส่วนร้อยละ 0.5 และการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนมีการเกาะกลุ่มกันเล็กน้อย และในภาพผิวหน้าที่กำลังขยาย 60,000 พบว่าเยื่อแผ่นที่ขึ้นรูปได้มีลักษณะผิวที่เรียบเนื่องจากอัตราส่วนของท่อนาโนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นทำให้การขึ้นรูปทำได้ราบเรียบขึ้น เยื่อแผ่นที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนร้อยละ 1.5 ในภาพตัดขวางที่กำลังขยาย 25,000 และ 50,000 แสดงให้เห็นถึงปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น และมีการกระจายตัวของอนุภาคพอลิเมอร์ที่สม่ำเสมอกว่าเยื่อแผ่นอัตราส่วนร้อยละ 1.0 เนื่องจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นของท่อนาโนคาร์บอนทำให้เกิดการกระจายตัวได้ทั่วสารละลายของพอลิเมอร์ และในภาพผิวหน้าที่กำลังขยาย 60,000 พบว่าเยื่อแผ่นมีลักษณะผิวที่เรียบ เยื่อแผ่นที่สังเคราะห์จากสารละลายพอลิเมอร์ที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนร้อยละ 2.0 ในภาพตัดขวางที่กำลังขยาย 25,000 และ 50,000 แสดงให้เห็นถึงปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นจากกว่าเยื่อแผ่นอัตราส่วนร้อยละ 1.5 และเกิดการเกาะกลุ่มกันของท่อนาโนคาร์บอน และในภาพผิวหน้าที่กำลังขยาย 60,000 พบว่าเยื่อแผ่นที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะผิวที่เรียบแต่มีรอยตำหนิสีขาวบริเวณผิวหน้าค่อนข้างมากเนื่องจากการเกาะกลุ่มกันของท่อนาโนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.15 ภาพ SEM ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 60 นาที (a) ภาพตัดขวางกำลังขยาย 25,000 (b) ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50,000 และ (c) ภาพผิวหน้ากำลังขยาย 60,000



รูปที่ 4.16 ภาพ SEM ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักรวบรวมการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 60 นาที (a) ภาพตัดขวางกำลังขยาย 25,000 (b) ภาพตัดขวางกำลังขยาย 50,000 และ (c) ภาพผิวหน้ากำลังขยาย 60,000

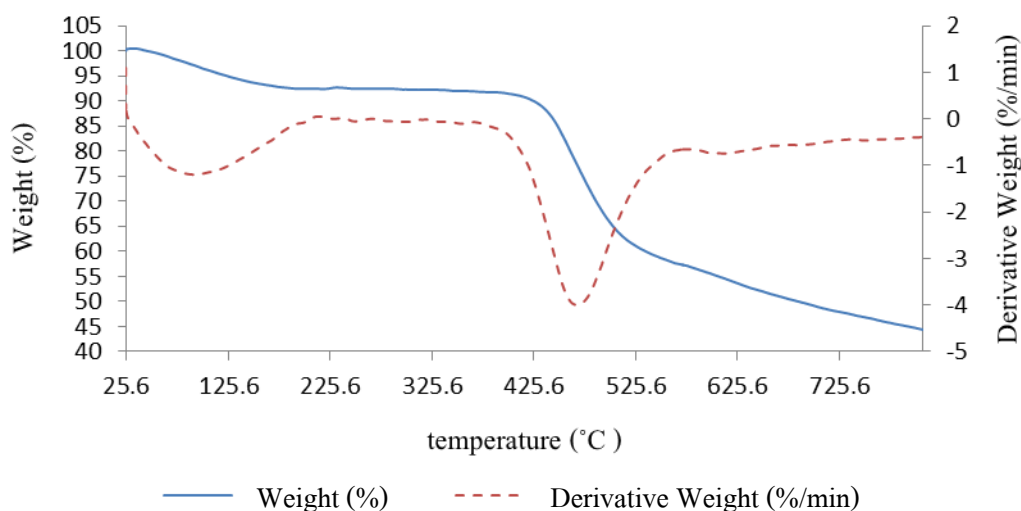
รูปที่ 4.15-4.16 แสดงภาพลักษณะเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนักรวบรวมการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 60 นาที จากรูปพบว่าลักษณะเยื่อแผ่นที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนร้อยละ 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนักรวบรวมการสั่นที่กำลังขยาย 25,000 และ 50,000 แสดงให้เห็นถึงปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่ใกล้เคียงกับเยื่อแผ่นอัตราส่วนร้อยละ 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนักรวบรวมการสั่นด้วยวิธี sonicated เป็นเวลา 30 ตามลำดับแต่มีการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนที่สม่ำเสมอมากกว่า (Park, *et al.*, 2002) และในภาพผิวหน้าที่กำลังขยาย 60,000 พบว่าเยื่อแผ่นที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วน

ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักมีลักษณะผิวโดยรวมที่เรียกว่า เชื้อแผ่นที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเชื้อแผ่นที่อัตราส่วนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักมีปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่มากจนเกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก่อนการขึ้นรูปเป็นเชื้อแผ่นเรียบจึงทำได้ไม่ดี

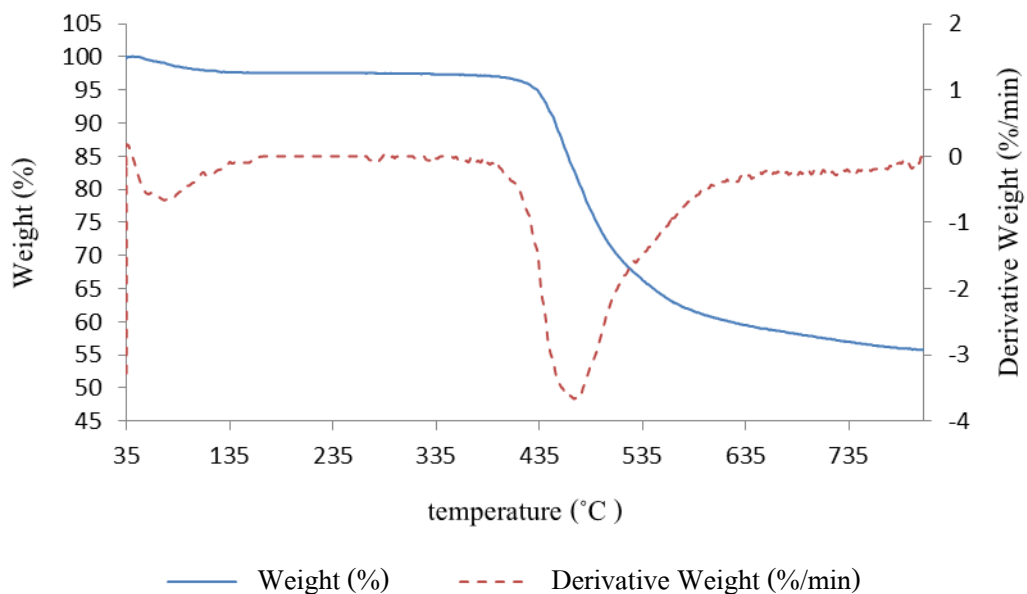
การทดสอบเอกลักษณ์โดย SEM พบว่า ท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะเป็นเส้นยาวที่มี aspect ratio ที่ 50-600 ขนาดใกล้เคียงกัน และขดพันกันไปมาอย่างไม่เป็นระเบียบ ลักษณะเชื้อแผ่นพอลิเอไมด์ที่พบว่า มีการกระจายตัวของอนุภาคพอลิเมอร์ที่สม่ำเสมอ มีช่องว่างระหว่างอนุภาคน้อย และผิวหน้าโดยรวมผิวเรียบ ในขณะที่เชื้อแผ่นพอลิเอไมด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนมีอัตราส่วนท่อนาโนคาร์บอนในเชื้อแผ่นเพิ่มจากร้อยละ 0.5 ถึง 1.5 โดยน้ำหนัก พบว่ามีการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนที่สม่ำเสมอและผิวหน้าที่ราบเรียบขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนท่อนาโนคาร์บอนเป็นร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนัก เกิดการเกาะกลุ่มของท่อนาโนคาร์บอน และผิวหน้ามีตำหนิสีขาวจากการเกาะกลุ่มของท่อนาโนคาร์บอน เมื่อเวลาที่ใช้ในกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator ท่อนาโนคาร์บอนในเชื้อแผ่นเพิ่มจาก 30 เป็น 60 นาทีพบว่ามีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ และมีผิวหน้าที่ราบเรียบขึ้น

4.4.3 สมบัติทางความร้อนและปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่มีอยู่จริงในเชื้อแผ่นสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ TGA

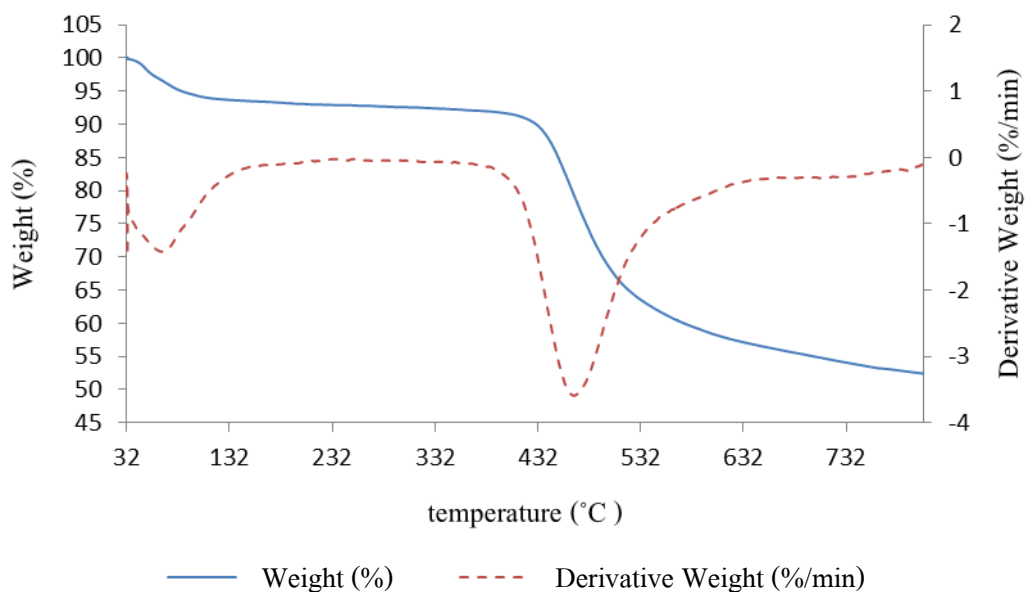
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละน้ำหนัก (% Weight) และอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเชื้อแผ่น (% Derivative Weight) เทียบกับอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.17-4.23



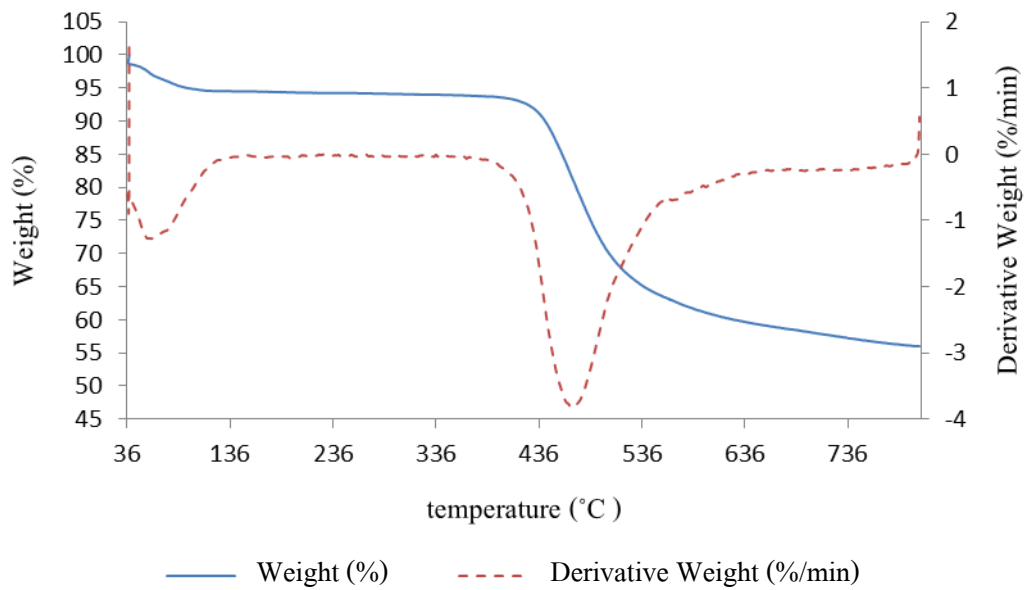
รูปที่ 4.17 กราฟผลการทดสอบด้วย TGA ของเชื้อแผ่นเตรียมจากสารละลายพอลิเมอร์



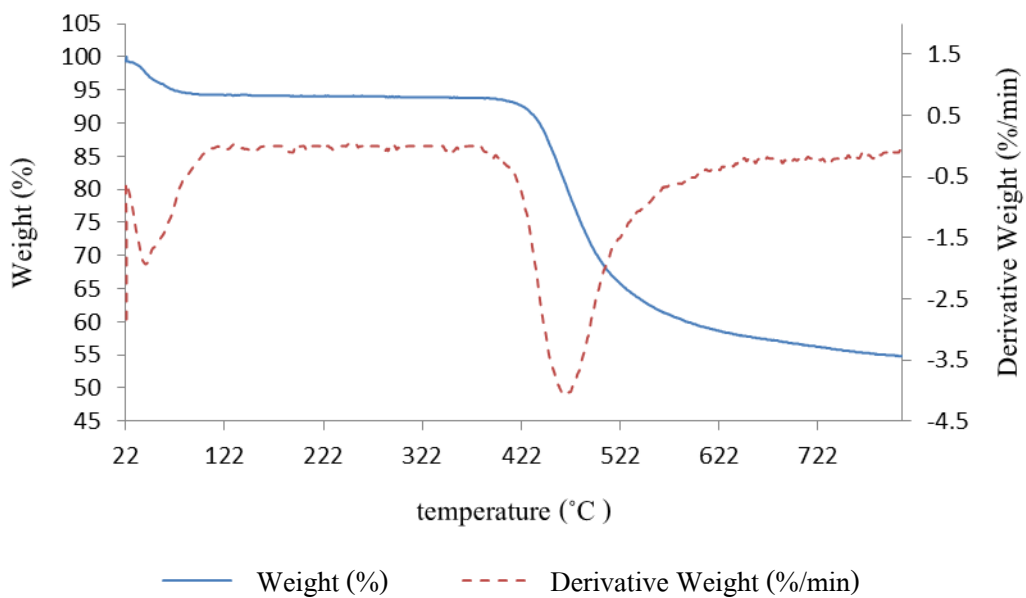
รูปที่ 4.18 กราฟผลการทดสอบด้วย TGA ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที



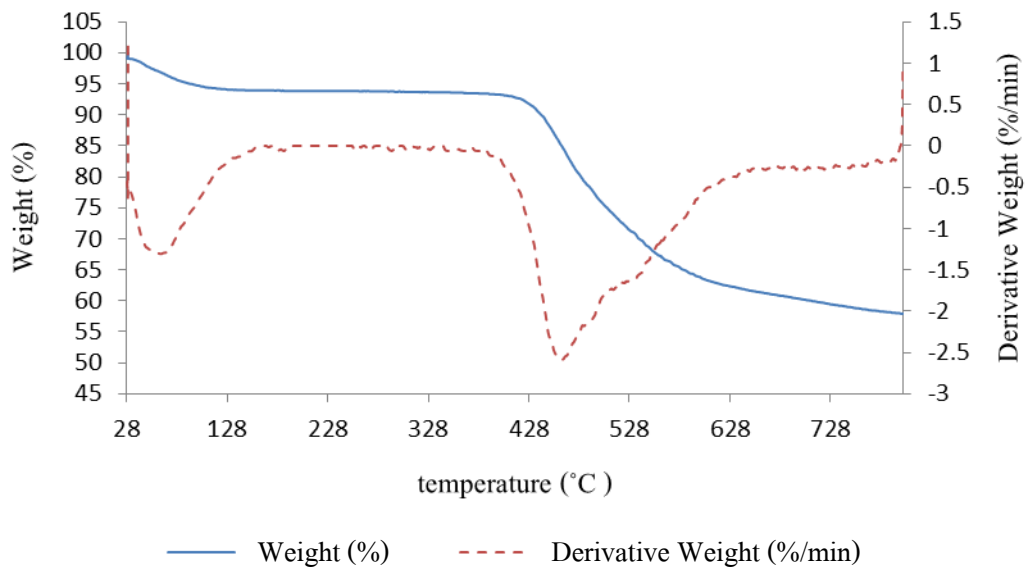
รูปที่ 4.19 กราฟผลการทดสอบด้วย TGA ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที



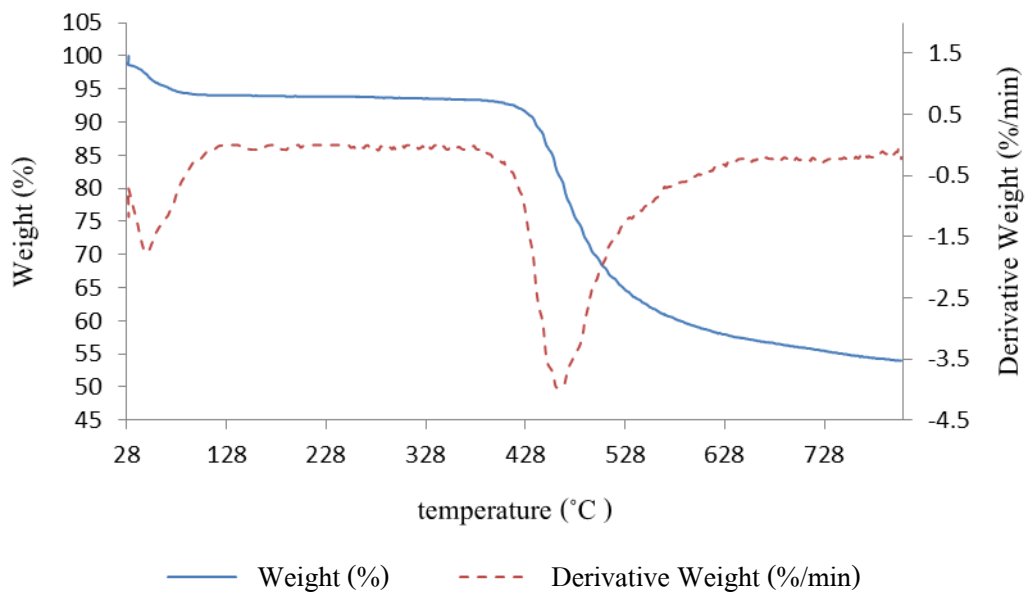
รูปที่ 4.20 กราฟผลการทดสอบด้วย TGA ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.21 กราฟผลการทดสอบด้วย TGA ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบเชื้อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 2.0 โดย น้ำหนักกระจายตัวโดย sonicated เป็นเวลา 60 นาทีด้วยวิธี



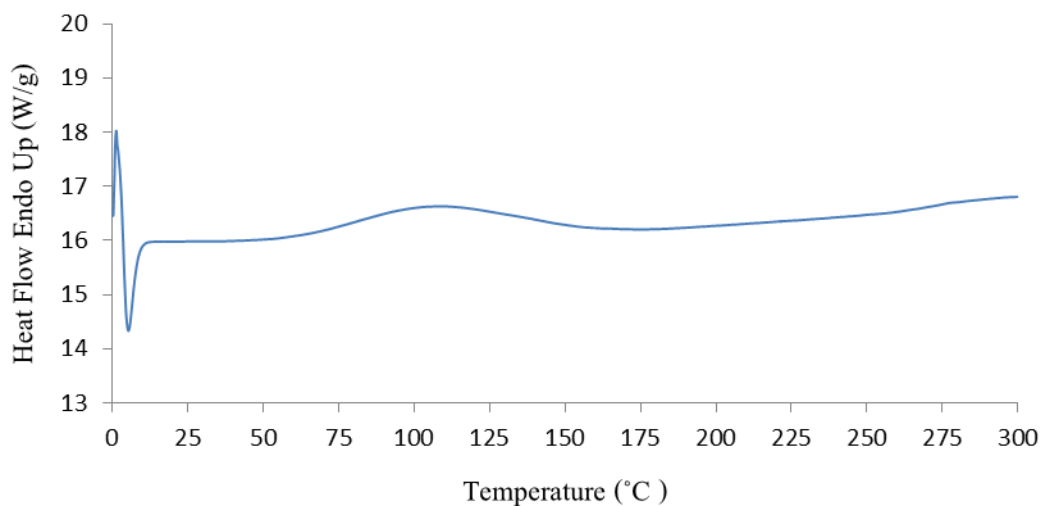
รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบเชื้อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 2.0 โดย น้ำหนักกระจายตัวโดย sonicated เป็นเวลา 60 นาทีด้วยวิธี TGA

ตารางที่ 4.4 น้ำหนักคงเหลือของเยื่อแผ่นด้วยวิธี TGA

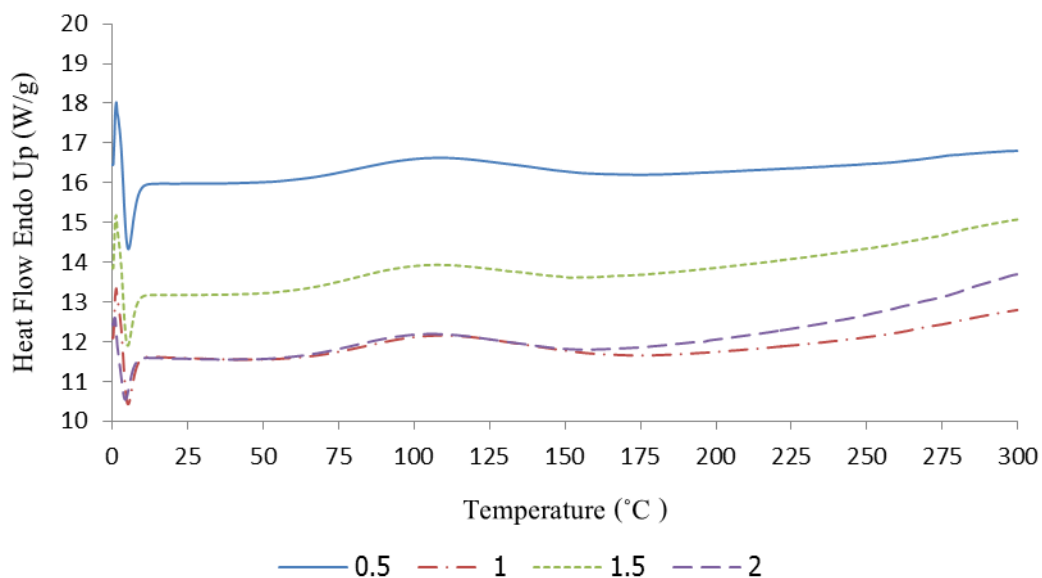
ชนิดเยื่อแผ่น	น้ำหนักคงเหลือ (%)
เยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์	44.11
เยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักกระจายตัวโดย sonicated เป็นเวลา 30	55.77
เยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักกระจายตัวโดย sonicated เป็นเวลา 30	52.35
เยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักกระจายตัวโดย sonicated เป็นเวลา 30	56.01
เยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักกระจายตัวโดย sonicated เป็นเวลา 30	54.83
เยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักกระจายตัวโดย sonicated เป็นเวลา 60	57.93
เยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักกระจายตัวโดย sonicated เป็นเวลา 60	54.01

จากผลการทดสอบเอกลักษณ์เยื่อแผ่นด้วยวิธีการ TGA พบว่าเยื่อแผ่นจะเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 382.29 ± 6.97 °C และมีอัตราการสลายตัวทางความร้อนสูงสุดที่อุณหภูมิ 432.78 ± 3.47 °C (Garca, 2009) แสดงให้เห็นถึงการสลายตัวของอนุภาคพอลิเมอร์ nylon 6,6 ในเยื่อแผ่นและความมีเสถียรภาพต่อความร้อนเยื่อแผ่น ดังนั้นการขึ้นรูปเยื่อแผ่นควรใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 380 °C เพื่อหลีกเลี่ยงการสลายตัวของพอลิเมอร์ และเนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนไม่สลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 2,800 °C จึงทำให้น้ำหนักคงเหลือของเยื่อแผ่นที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนมากกว่าน้ำหนักคงเหลือของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ แต่เนื่องจากอัตราส่วนในการผสมท่อนาโนคาร์บอนในเยื่อแผ่นมีค่าต่างกันน้อยจึงทำให้น้ำหนักคงเหลือของเยื่อแผ่นที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

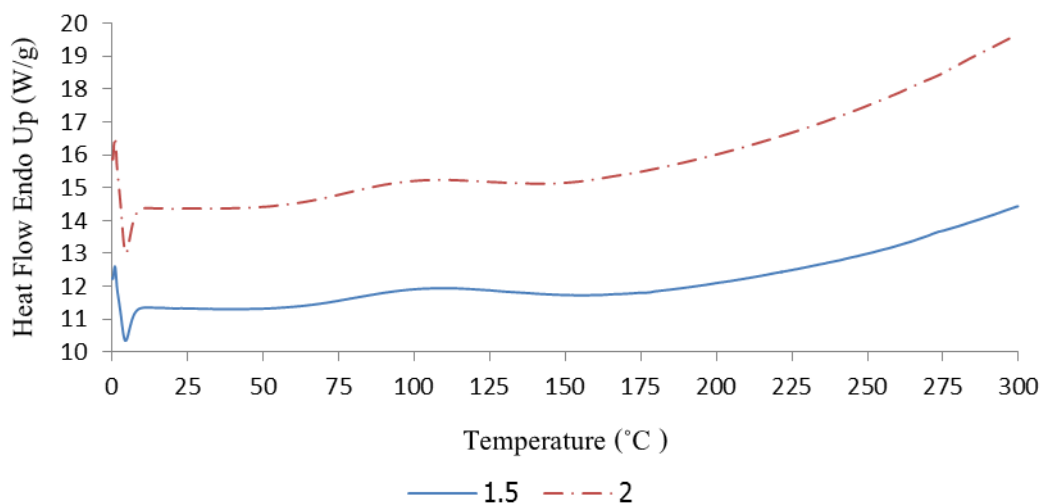
4.4.4 ความสามารถในการสร้างผลึกในเยื่อแผ่นที่มีท่อนาโนคาร์บอนผสมอยู่ ถูกศึกษาได้โดยใช้ DSC กราฟแสดงผลการศึกษาปรากฏดังรูปที่ 4.24-4.26



รูปที่ 4.24 กราฟผลการทดสอบด้วย DSC ของเยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์



รูปที่ 4.25 กราฟผลการทดสอบด้วย DSC ของเยื่อแผ่นเตรียมจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอน ในอัตราส่วนร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยนำหนัก ผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที



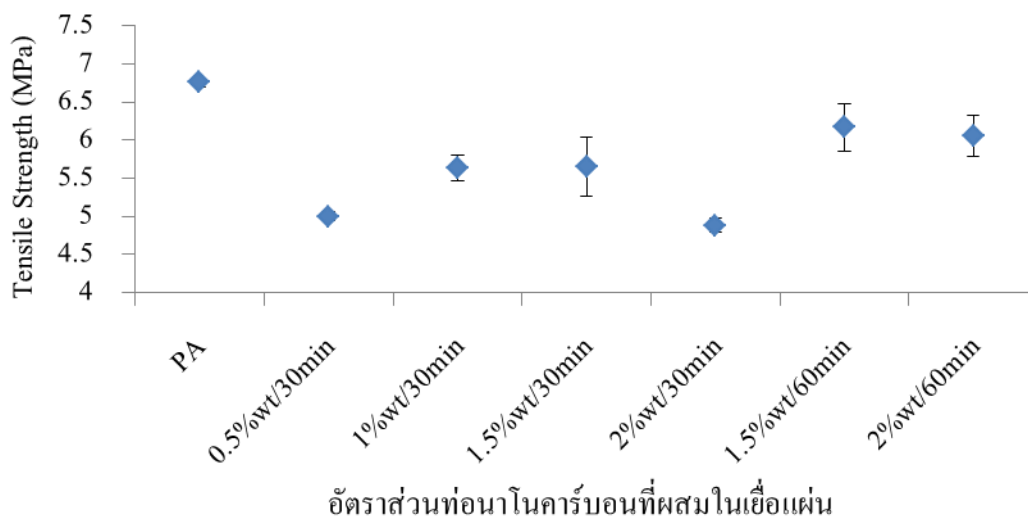
รูปที่ 4.26 กราฟผลการทดสอบด้วย DSC ของเยื่อแผ่นเตรียมจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนานาโนคาร์บอน ในอัตราส่วนร้อยละ 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการล้างด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 60 นาที

ตารางที่ 4.5 %crystallinity ของเยื่อแผ่นด้วยวิธี DSC

ชนิดเยื่อแผ่น	%crystallinity
เยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์	46.36
เยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนานาโนคาร์บอนร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักกระจายตัวโดย sonicated เป็นเวลา 30	50.59
เยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนานาโนคาร์บอนร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักกระจายตัวโดย sonicated เป็นเวลา 30	51.58
เยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนานาโนคาร์บอนร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักกระจายตัวโดย sonicated เป็นเวลา 30	42.98
เยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนานาโนคาร์บอนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักกระจายตัวโดย sonicated เป็นเวลา 30	42.58
เยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนานาโนคาร์บอนร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักกระจายตัวโดย sonicated เป็นเวลา 60	33.71
เยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนานาโนคาร์บอนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักกระจายตัวโดย sonicated เป็นเวลา 60	32.38

จากผลการทดสอบเอกลักษณ์เยื่อแผ่นด้วยวิธีการ DSC พบว่าเยื่อแผ่นจะเริ่มเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 62.50 ± 2.47 °C และสิ้นสุดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 155.01 ± 7.54 °C แสดงให้เห็นถึงช่วงอุณหภูมิที่เยื่อแผ่นสามารถนำไปใช้งานได้ก่อนเกิดการหลอมเหลว เมื่อพิจารณาจาก %crystallinity พบว่า เยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์มีค่า 46.36% และเมื่อเยื่อแผ่นมีอัตราส่วนในการผสมท่อนานาโนคาร์บอนที่ ร้อยละ 0.5 และ 1.0 จะมี %crystallinity ที่เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 50.59 และ 51.58 เนื่องจากการจับตัวเป็นโครงร่างสามมิติของท่อนานาโนคาร์บอนทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นผลึกในเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้น (Li, *et al.*, 2007) และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของท่อนานาโนคาร์บอนเป็น 1.5 และ 2.0 พบว่าเยื่อแผ่นจะมี %crystallinity ที่ลดลงเป็นร้อยละ 42.98 และ 42.58 เนื่องจากการจับตัวเป็นโครงร่างสามมิติของท่อนานาโนคาร์บอนที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ขีดขวางการเกิดผลึกของสารละลายพอลิเมอร์ในเยื่อแผ่น (Li, *et al.*, 2007) และเมื่อเพิ่มเวลาในการกระจายตัวโดย sonicated เป็น 60 นาทีพบว่าเยื่อแผ่นที่มีอัตราส่วนของท่อนานาโนคาร์บอนเป็นร้อยละ 1.5 และ 2.0 จะมี %crystallinity ลดลงเป็นร้อยละ 33.71 และ 32.38 เนื่องจากการเพิ่มเวลาในการ sonicated ทำให้เกิดการกระจายตัวของท่อนานาโนคาร์บอนที่เพิ่มมากขึ้น (Park, *et al.*, 2002) ทำให้เกิดการเกิดโครงร่างสามมิติของท่อนานาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นและเกิดการขีดขวางการเกิดผลึกของสารละลายพอลิเมอร์ในเยื่อแผ่น

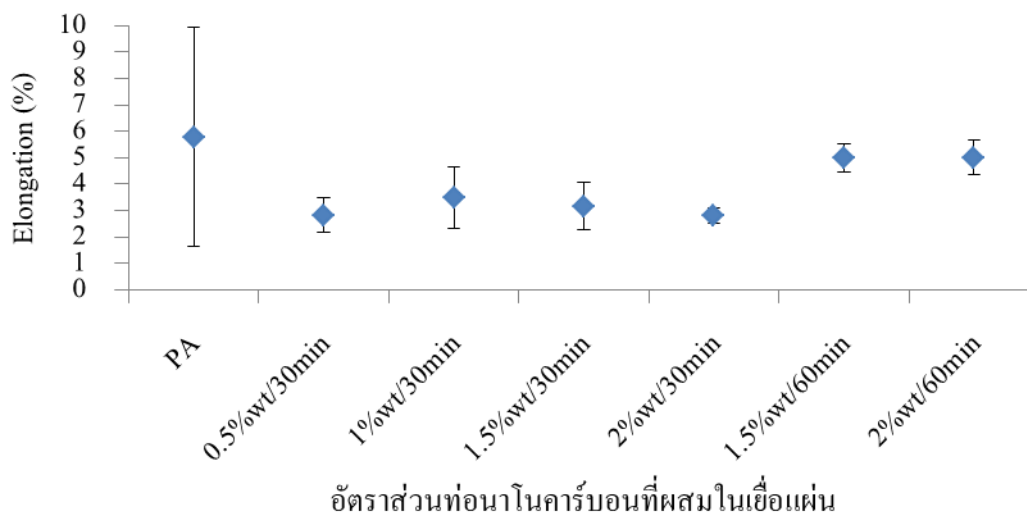
4.4.5 การศึกษาสมบัติเชิงกลของเยื่อแผ่นทำได้โดยใช้ Universal Testing Machine ซึ่งเป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลโดยใช้แรงดึง (Tensile Test) ในสภาวะเปียก ผลการศึกษาทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.27-4.30



รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile Strength และอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนที่ผสมในเยื่อแผ่น/เวลาที่ใช้ในกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator

จากรูปที่ 4.27 พบว่า เยื่อแผ่นที่ขึ้นรูปจากสารละลายพอลิเมอร์เพียงอย่างเดียวมีค่า Tensile Strength สูงกว่าเยื่อแผ่นที่ขึ้นรูปจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอน ทั้งนี้ อาจมีสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนจากการทดลองเนื่องจากทำการทดลอง 3 ซ้ำทำให้ค่าเฉลี่ยที่ได้มีค่าเบี่ยงเบนที่มาก นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่า Tensile Strength ของเยื่อแผ่นที่ผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นจาก 0.5 ถึง 1.5 และมีค่าลดลงที่อัตราส่วน 2.0 ผลที่เกิดขึ้นนี้สามารถอธิบายได้ว่าท่อนาโนคาร์บอนสามารถกระจายตัวได้ดีที่อัตราส่วนระหว่าง 0.5 ถึง 1.5 โดยน้ำหนัก (Li, *et al.*, 2007) ทำให้เกิดการกระจายแรงรับไปที่ท่อนาโนคาร์บอนเยื่อแผ่นจึงมีความสามารถทนแรงได้สูง (Shawky, *et al.*, 2011) และที่อัตราส่วนเป็น 2.0 โดยน้ำหนักเกิดการเกาะกลุ่ม (Li, *et al.*, 2007) ส่งผลให้การรับแรงของท่อนาโนคาร์บอนในเยื่อแผ่นทำได้ไม่ดี

เมื่อเปรียบเทียบค่า Tensile Strength ของเยื่อแผ่นที่ผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที และ 60 นาที พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มเวลาในการ sonicated ทำให้เกิดการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนที่เพิ่มมากขึ้นสามารถรับแรงได้มากขึ้น (Park, *et al.*, 2002) อย่างไรก็ตาม Tensile Strength ของเยื่อแผ่นที่ผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 60 นาที มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นจาก 1.5 ถึง 2.0 เช่นเดียวกับเยื่อแผ่นที่ผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที

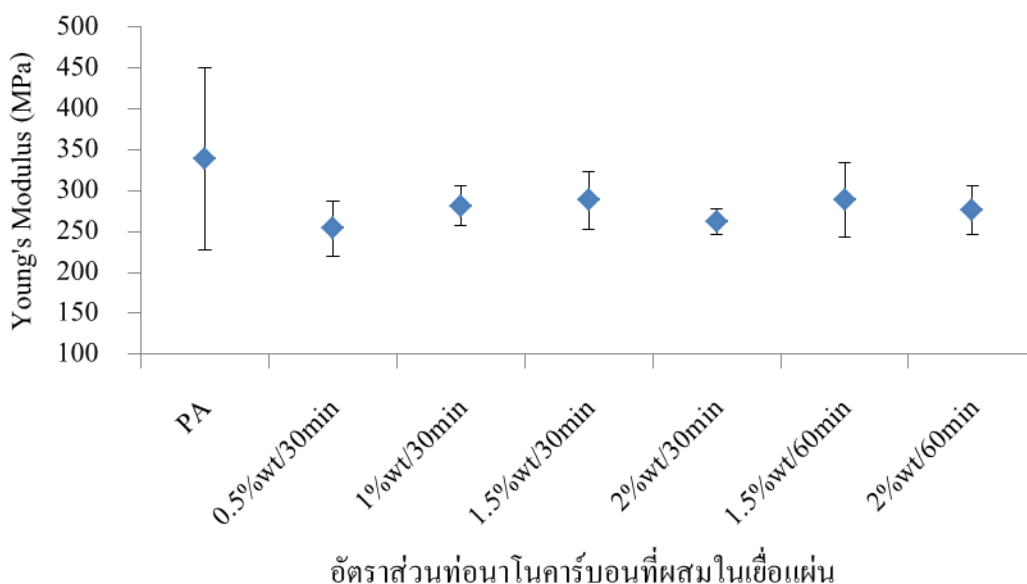


รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง elongation และอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนที่ผสมในเยื่อแผ่น/เวลาที่ใช้ในกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator

จากรูปที่ 4.28 พบว่า เยื่อแผ่นที่ขึ้นรูปจากสารละลายพอลิเมอร์เพียงอย่างเดียวมีค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Elongation สูงกว่าเยื่อแผ่นที่ขึ้นรูปจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอน ทั้งนี้ อาจมีสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่า Elongation ของเยื่อแผ่นที่ผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นจาก 0.5 ถึง 1.5 และมีค่าลดลงที่อัตราส่วน 2.0 ผลที่เกิดขึ้นนี้สามารถอธิบายได้ว่า ท่อนาโนคาร์บอนสามารถกระจายตัวได้ดีที่อัตราส่วนระหว่าง 0.5 ถึง 1.5 โดยน้ำหนัก (Li, *et al.*, 2007) และท่อนาโนคาร์บอนสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกับสารละลายพอลิเมอร์จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นค่า elongation จึงเพิ่มขึ้นตาม (Shawky, *et al.*, 2011) และที่อัตราส่วนเป็น 2.0 โดยน้ำหนักเกิดการเกาะกลุ่ม (Li, *et al.*, 2007) ส่งผลเกิดการแยกชั้นของท่อนาโนคาร์บอนในเยื่อแผ่นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีค่าลดลง elongation จึงมีค่าลดลงด้วย

เมื่อเปรียบเทียบค่า elongation ของเยื่อแผ่นที่ผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที และ 60 นาที พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มเวลาในการ sonicated ทำให้เกิดการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนที่เพิ่มมากขึ้นเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น (Park, *et al.*, 2002) อย่างไรก็ตาม elongation ของเยื่อแผ่นที่ผ่านกระบวนการสันด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 60 นาที มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอน

เพิ่มขึ้นจาก 1.5 ถึง 2.0 เช่นเดียวกับเชื้อแผ่นที่ผ่านกระบวนการสั้นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Young's Modulus และอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนที่ผสมในเชื้อแผ่น/เวลาที่ใช้ในกระบวนการสั้นด้วยเครื่อง sonicator

จากรูปที่ 4.29 พบว่า เชื้อแผ่นที่ขึ้นรูปจากสารละลายพอลิเมอร์เพียงอย่างเดียวมีค่า Young's Modulus สูงกว่าเชื้อแผ่นที่ขึ้นรูปจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอน ทั้งนี้ อาจมีสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่า Young's Modulus ของเชื้อแผ่นที่ผ่านกระบวนการสั้นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นจาก 0.5 ถึง 1.5 และมีค่าลดลงที่อัตราส่วนระหว่าง 0.5 ถึง 1.5 โดยน้ำหนัก (Li, *et al.*, 2007) และท่อนาโนคาร์บอนสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกับสารละลายพอลิเมอร์จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นทำให้มีความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นค่า Young's Modulus จึงเพิ่มขึ้นตาม (Shawky, *et al.*, 2011) และที่อัตราส่วนเป็น 2.0 โดยน้ำหนักเกิดการเกาะกลุ่ม (Li, *et al.*, 2007) ส่งผลเกิดการแยกชั้นของท่อนาโนคาร์บอนในเชื้อแผ่นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีค่าลดลง Young's Modulus จึงมีค่าลดลงด้วย

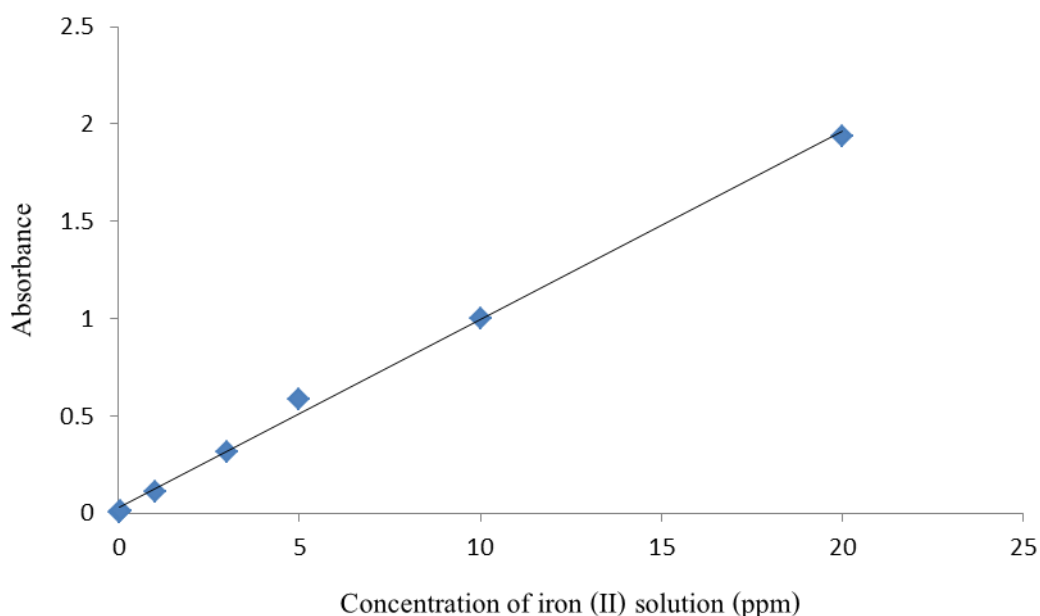
เมื่อเปรียบเทียบค่า Young's Modulus ของเชื้อแผ่นที่ผ่านกระบวนการสั้นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที และ 60 นาที พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มเวลาในการ

sonicated ทำให้เกิดการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนที่เพิ่มมากขึ้นเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น (Park, *et al.*, 2002) อย่างไรก็ตาม Young's Modulus ของเยื่อแผ่นที่ผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 60 นาที มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นจาก 1.5 ถึง 2.0 เช่นเดียวกับเยื่อแผ่นที่ผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที

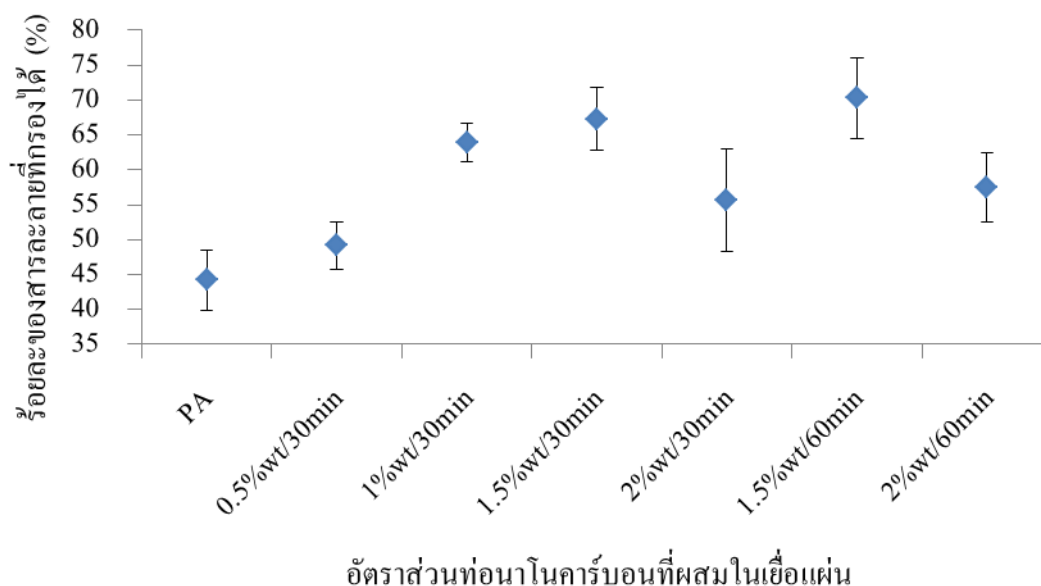
เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลกับงานวิจัยอื่น ๆ พบว่าค่า Tensile Strength และ Young's Modulus มีค่าใกล้เคียงกับเยื่อแผ่นที่มีส่วนผสมของท่อนาโนคาร์บอนที่มีอัตราส่วนใกล้เคียงกันแต่ค่า Elongation จะมีค่าน้อยกว่างานวิจัยอื่นอาจเนื่องมาจากการใช้สารละลายพอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้นสูงในการขึ้นรูป ทำให้เยื่อแผ่นมีความเปราะเพิ่มขึ้น

4.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกรองของเยื่อแผ่นด้วยวิธีการกรองแบบใช้แรงดัน

การทดสอบประสิทธิภาพการกรองของเยื่อแผ่นใช้สารละลายของ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 2,000 ppm ซึ่งมีสารละลายกรด hydrochloric ผสมอยู่ เพื่อป้องกันการเกิดตะกอนของ Fe^{3+} ตามมาตรฐาน (ASTM E 394 - 04) ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.30 และ 4.31



รูปที่ 4.30 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Absorbance และ ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กมาตรฐาน



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนท่อนานาโนคาร์บอนที่ผสมในเยื่อแผ่น กับร้อยละของสารละลายที่กรองได้

ผลจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเหล็กมาตรฐาน และค่า Absorbance ในรูปที่ 4.30 พบว่าได้สมการความสัมพันธ์ คือ $y = (0.0967 \pm 0.00023)x + (0.0273 \pm 0.00025)$ มีค่าสหสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) คือ 0.9976 จากสมการที่ได้สามารถนำไปคำนวณหาความเข้มข้นไอออนเหล็กในสารละลายที่ผ่านการกรองแบบใช้แรงดัน

การทดสอบประสิทธิภาพการกรองของเยื่อแผ่นโดยใช้สารละลายเหล็ก ให้ผลดังรูปที่ 4.31 พบว่า เยื่อแผ่นที่ขึ้นรูปจากสารละลายพอลิเมอร์เพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพการกรองไอออนเหล็กอยู่ที่ร้อยละ 44.18 ± 4.37 ซึ่งต่ำกว่าประสิทธิภาพการกรองเหล็กของเยื่อแผ่นที่ขึ้นรูปจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนานาโนคาร์บอนที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 49.13 ± 3.47 ถึง 67.30 ± 4.58 ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างท่อนานาโนคาร์บอนมีขนาดเล็กระดับนาโน ซึ่งทำให้เยื่อให้เกิดโครงสร้างแบบโครงข่ายเมื่ออัตราส่วนท่อนานาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกรองจึงเพิ่มขึ้น (Shawky, *et al.*, 2011) และจากการตัดแปลงหมู่ฟังก์ชันของท่อนานาโนคาร์บอนเป็นเอไมด์ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุบวกของหมู่เอไมด์ และไอออนเหล็กในสารละลายมาตรฐานจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกรอง (Goh, *et al.*, 2012) นอกจากนี้ ประสิทธิภาพการกรองเหล็กของเยื่อแผ่นที่ขึ้นรูปจาก

สารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอน ผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนร้อยละ 0.5-1.5 โดยน้ำหนัก แต่ลดลงที่อัตราส่วนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีสาเหตุมาจาก ท่อนาโนคาร์บอนสามารถกระจายตัวได้ดีที่อัตราส่วนระหว่าง 0.5 ถึง 1.5 โดยน้ำหนัก (Li, *et al.*, 2007) และท่อนาโนคาร์บอนสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกับสารละลายพอลิเมอร์จึงทำให้เอื้อต่อการเกิดโครงสร้างแบบโครงข่าย ประสิทธิภาพการกรองจึงเพิ่มขึ้น และที่อัตราส่วนเป็น 2.0 โดยน้ำหนักเกิดการเกาะกลุ่ม (Li, *et al.*, 2007) ส่งผลให้เกิดการแยกชั้นของท่อนาโนคาร์บอนทำให้การเกิดโครงสร้างแบบโครงข่ายลดลงประสิทธิภาพการกรองจึงลดลง

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกรองหลักของเยื่อแผ่นที่ขึ้นรูปจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอน ผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที และ 60 นาที พบว่า การสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 60 นาที ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกรองหลักของเยื่อแผ่นดีกว่า ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 57.46 ± 4.89 ถึง 70.32 ± 5.79 เนื่องจากการเพิ่มเวลาในการ sonicated ทำให้เกิดการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนที่เพิ่มมากขึ้นเอื้อต่อการเกิดโครงสร้างแบบโครงข่าย (Park, *et al.*, 2002) อย่างไรก็ตาม เมื่ออัตราส่วนปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.5 เป็น 2.0 พบว่า ประสิทธิภาพการกรองหลักของเยื่อแผ่นมีค่าลดลง เช่นเดียวกับเยื่อแผ่นที่ผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator เป็นเวลา 30 นาที

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกรองกับงานวิจัยอื่น ๆ พบว่า เยื่อแผ่นที่ขึ้นรูปจากสารละลายพอลิเมอร์เพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพการกรองที่ต่ำกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ความหนาใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของเยื่อแผ่นมีผลค่อนข้างมาก โดยจากงานวิจัยของ Shawkyy ปี 2009 พบว่า ที่ความหนา 0.2 mm เยื่อแผ่นจะมีประสิทธิภาพการกรองที่ประมาณร้อยละ 79.7 และที่ความหนา 0.3 mm จะมีประสิทธิภาพการกรองที่ประมาณร้อยละ 55.6 นอกจากนี้พบว่าเยื่อแผ่นที่ขึ้นรูปจากสารละลายเยื่อแผ่นผสมท่อนาโนคาร์บอนจะมีประสิทธิภาพการกรองที่ต่ำกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเยื่อแผ่นที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ความหนาในการขึ้นรูป และความเข้มข้นของสารละลายเยื่อแผ่นที่ต่างกันจึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการกรองด้วย

บทที่ 5

บทสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปผลการวิจัย

การหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์พอลิเอไมด์ เพื่อใช้ในการเตรียมเยื่อแผ่นด้วยวิธีระหว่างวัฏภาค พบว่า ที่อุณหภูมิ 10 °C และความเร็วในการกวนที่ 940 rpm ให้ผลได้เป็นร้อยละของปฏิกิริยาสูงที่สุด คือ ร้อยละ 90.52 ± 2.33 และการใช้สารเติมแต่ง LiCl สามารถขึ้นรูปเยื่อแผ่นได้ดีกว่าการใช้สารเติมแต่ง CaCl_2

การควบคุมความหนาของเยื่อแผ่นในขณะที่ทำการขึ้นรูปสามารถทำได้โดยใช้เทปกาวเทปลอนที่มีความหนา 0.13 mm ติดลงบนแผ่นกระจก 2 ชั้น เพื่อให้เยื่อแผ่นที่ได้มีความหนา 0.26 mm และใช้แท่งแก้วคนปาดสารละลายให้เรียบเสมอขอบของเทปกาวเทปลอนที่เป็นกรอบในการขึ้นรูป ซึ่งวิธีการนี้สามารถขึ้นรูปเยื่อแผ่นที่มีความราบเรียบมากกว่าการขึ้นรูปจากการควบคุมปริมาตรสารละลายบนจานเพาะเชื้อ

การทดสอบเอกลักษณ์ด้วย ATR-FTIR พบว่า ผงพอลิเอไมด์ที่สังเคราะห์ได้ และเยื่อแผ่นที่ขึ้นรูปจากสารละลายพอลิเอไมด์คือ nylon 6,6 สำหรับกราฟ ATR-FTIR ของเยื่อแผ่นที่ขึ้นรูปจาก สารละลายพอลิเอไมด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนนั้น ประกอบด้วยพิกหลักของ nylon 6,6 และท่อนาโนคาร์บอน

การทดสอบเอกลักษณ์โดย SEM พบว่า ท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะเป็นเส้นยาวที่มี aspect ratio ที่ 50-600 ขนาดใกล้เคียงกัน และขดพันกันไปมาอย่างไม่เป็นระเบียบ ลักษณะเยื่อแผ่นพอลิเอไมด์ที่ตรวจสอบจาก SEM พบว่า มีการกระจายตัวของอนุภาคพอลิเมอร์ที่สม่ำเสมอ มีช่องว่างระหว่างอนุภาคน้อย และ ผิวหน้าโดยรวมผิวเรียบ แต่มีรอยที่ขรุขระเพียงเล็กน้อย ในขณะที่เยื่อแผ่นพอลิเอไมด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะผิวที่เรียบขึ้นเนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนผสมเป็นเนื้อเดียวกับเยื่อแผ่น และช่วยให้ขึ้นรูปราบเรียบ เมื่ออัตราส่วนท่อนาโนคาร์บอนในเยื่อแผ่นเพิ่มจากร้อยละ 0.5 ถึง 1.5 โดยน้ำหนัก พบว่ามีการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนที่สม่ำเสมอ และผิวหน้าที่ราบเรียบขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนท่อนาโนคาร์บอนเป็นร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนัก เกิดการเกาะกลุ่มของท่อนาโนคาร์บอน และผิวหน้ามีตำหนิสีขาวจากการเกาะกลุ่มของท่อนาโนคาร์บอน เมื่อเวลาที่ใช้ในกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator ท่อนาโนคาร์บอนในเยื่อแผ่นเพิ่มจาก 30 เป็น

60 นาทีพบว่ามีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ และมีผิวหน้าที่ราบเรียบขึ้นเนื่องจากเวลาที่เพิ่มขึ้นช่วยให้เกิดการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในเยื่อแผ่นดีขึ้น

การทดสอบเอกลักษณ์เยื่อแผ่นด้วย TGA พบว่า เยื่อแผ่นจะเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 382.29 ± 6.97 °C และมีอัตราการสลายตัวทางความร้อนสูงสุดที่อุณหภูมิ 432.78 ± 3.47 °C การขึ้นรูปเยื่อแผ่นควรใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 380 °C เพื่อหลีกเลี่ยงการสลายตัวของพอลิเมอร์ นอกจากนี้พบว่า เยื่อแผ่นที่เตรียมจากสารละลายพอลิเมอร์มีน้ำหนักคงเหลือน้อยที่สุดที่ร้อยละ 44.11 และเยื่อแผ่นที่เตรียมจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนต่าง ๆ มีน้ำหนักคงเหลือที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

การทดสอบเอกลักษณ์เยื่อแผ่นโดย DSC พบว่าเยื่อแผ่นจะเริ่มเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 62.50 ± 2.47 °C และสิ้นสุดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 155.01 ± 7.54 °C นอกจากนี้พบว่า เยื่อแผ่นพอลิเอไมด์มี %crystallinity ที่ร้อยละ 46.6 ในขณะที่เยื่อแผ่นพอลิเอไมด์ผสมท่อนาโนคาร์บอนมี %crystallinity ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่ออัตราส่วนท่อนาโนคาร์บอนในเยื่อแผ่นเพิ่มจากร้อยละ 0.5 เป็น 1.0 โดยน้ำหนัก พบว่า %crystallinity เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 50.59 เป็น 51.58 เนื่องจากการจับตัวเป็นโครงร่างสามมิติของท่อนาโนคาร์บอนทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นผลึกในเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนท่อนาโนคาร์บอนในเยื่อแผ่นเพิ่มเป็น 1.5 และ 2.0 พบว่าเยื่อแผ่นมี %crystallinity ลดลงเป็นร้อยละ 42.98 และ 42.58 เนื่องจากการจับตัวเป็นโครงร่างสามมิติของท่อนาโนคาร์บอนขัดขวางการเกิดผลึกของพอลิเอไมด์ในเยื่อแผ่น และเมื่อเวลาที่ใช้ในกระบวนการขึ้นด้วยเครื่อง sonicator ของท่อนาโนคาร์บอนในเยื่อแผ่นเพิ่มจาก 30 เป็น 60 นาทีพบว่า %crystallinity ลดลงเป็นร้อยละ 33.71 และ 32.38 เนื่องจากเกิดการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้น ซึ่งเอื้อต่อการเกิดโครงร่างสามมิติของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้น และเกิดการขัดขวางการเกิดผลึกของพอลิเอไมด์ในเยื่อแผ่น

การทดสอบสมบัติเชิงกลของเยื่อแผ่นด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ซึ่งเป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลโดยใช้แรงดึง (Tensile Test) พบว่า เยื่อแผ่นที่เตรียมจากสารละลายพอลิเอไมด์เพียงอย่างเดียวมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด คือ มีค่า Tensile strength Elongation และ Young's Modulus อยู่ที่ 6.76 ± 0.06 MPa 5.79 ± 4.15 % และ 338.9 ± 111.54 MPa ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาจากเยื่อแผ่นที่เตรียมจากสารละลายพอลิเอไมด์เมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอน พบว่า มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง นอกจากนี้เมื่ออัตราส่วนท่อนาโนคาร์บอนในเยื่อแผ่นเพิ่มจากร้อยละ 0.5 เป็น 1.5 โดยน้ำหนัก พบว่าค่า Tensile strength Elongation และ Young's Modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 5.00 ± 0.06 MPa 2.82 ± 0.65 % และ 253.74 ± 33.56 MPa เป็น 5.65 ± 0.38 MPa 3.17 ± 0.89 % และ 288.38 ± 35.48 MPa ตามลำดับ และมีค่าลดลงที่

อัตราส่วน 2.0 โดยน้ำหนักเป็น 4.88 ± 0.09 MPa 2.81 ± 0.27 % และ 262.15 ± 16.04 MPa เนื่องจากท่อนานาโนคาร์บอนสามารถกระจายตัวได้ดีที่อัตราส่วนร้อยละ 0.5 ถึง 1.5 โดยน้ำหนักซึ่งช่วยในการกระจายแรงรับของเยื่อแผ่น และเกิดการเกาะกลุ่มที่อัตราส่วนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักการกระจายแรงรับทำได้น้อยลง และเมื่อเวลาที่ใช้ในกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator ของท่อนานาโนคาร์บอนในเยื่อแผ่นเพิ่มจาก 30 เป็น 60 นาทีพบว่าค่า Tensile strength Elongation และ Young's Modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการกระจายตัวของท่อนานาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นการกระจายแรงรับทำได้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลที่ศึกษาได้ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น ๆ พบว่า ค่า Tensile strength และ Young's Modulus มีค่าใกล้เคียงกับเยื่อแผ่นที่มีส่วนผสมของท่อนานาโนคาร์บอนที่มีอัตราส่วนร้อยละ โดยน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน แต่ค่า Elongation จะมีค่าน้อยกว่างานวิจัยอื่น อาจเนื่องมาจาก การใช้สารละลายพอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้นสูงในการขึ้นรูป ทำให้เยื่อแผ่นมีความเปราะเพิ่มขึ้น

การทดสอบประสิทธิภาพการกรองของเยื่อแผ่น โดยใช้สารละลายของ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 2,000 ppm ตามวิธีมาตรฐาน ASTM E 394 - 04 พบว่า เยื่อแผ่นที่เตรียมจากสารละลายพอลิเอไมด์เพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพการกรองที่ร้อยละ 44.18 ± 4.37 ในขณะที่เยื่อแผ่นพอลิเอไมด์ผสมท่อนานาโนคาร์บอนมีประสิทธิภาพการกรองดีกว่าเนื่องจาก โครงสร้างท่อนานาโนคาร์บอนมีขนาดเล็กระดับนาโนซึ่งทำให้อื้อให้เกิดโครงสร้างแบบโครงข่ายประสิทธิภาพการกรองกรองจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่ออัตราส่วนท่อนานาโนคาร์บอนในเยื่อแผ่นเพิ่มจากร้อยละ 0.5 เป็น 1.5 โดยน้ำหนัก พบว่าประสิทธิภาพการกรองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 49.13 ± 3.47 เป็น 55.65 ± 7.44 เนื่องจากท่อนานาโนคาร์บอนสามารถกระจายตัวได้ดีที่อัตราส่วนร้อยละ 0.5 ถึง 1.5 โดยน้ำหนักซึ่งอื้อให้เกิดโครงสร้างแบบโครงข่าย และเมื่อเวลาที่ใช้ในกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator ของท่อนานาโนคาร์บอนในเยื่อแผ่นเพิ่มจาก 30 เป็น 60 นาทีพบว่า พบว่าประสิทธิภาพการกรองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการกระจายตัวของท่อนานาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้น ซึ่งอื้อต่อเกิดโครงข่ายโครงข่ายของท่อนานาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการกรองของเยื่อแผ่นที่ศึกษาได้ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น ๆ พบว่า เยื่อแผ่นที่ขึ้นรูปจากสารละลายพอลิเอไมด์เพียงอย่างเดียวและขึ้นรูปจากสารละลายพอลิเอไมด์ผสมท่อนานาโนคาร์บอนมีประสิทธิภาพการกรองที่ต่ำกว่าเล็กน้อย เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ความหนาของเยื่อแผ่นและอัตราส่วน ร้อยละ โดยน้ำหนักของท่อนานาโนคาร์บอนใกล้เคียงกัน เนื่องจากความหนา และความเข้มข้นของสารละลายพอลิเอไมด์ในการขึ้นรูปเยื่อแผ่นต่างกันจึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการกรองด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาการผสมสารเติมแต่งชนิดอื่น ๆ ในขั้นตอนการเตรียมสารละลายพอลิเอไมด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการขึ้นรูปเยื่อแผ่น

5.2.2 ควรศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง sonicator ต่อการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอน โดยศึกษาระยะเวลาที่นานขึ้น

5.2.3 ควรศึกษาประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นในการกรองน้ำตัวอย่างจากแหล่งต่าง ๆ

5.2.4 ควรศึกษาการเพิ่มความแข็งแรงให้กับเยื่อแผ่นขณะใช้งาน เช่น การใช้แผ่นพอลิซัลโฟน เพื่อเป็นชั้นรองรับและเสริมความแข็งแรงให้กับเยื่อแผ่น

เอกสารอ้างอิง

- กลุ่มงานข้อมูลสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานจังหวัดภูเก็ต (2553). "การชลประทาน." <<http://123.242.171.10/descr/introduce/dataPK53/water.php>> (28 กรกฎาคม 2554)
- ทวีศักดิ์ วัังไพศาล. (2554). วิศวกรรมการประปา:กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำแบบพิเศษ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ฝ่ายทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย (2548) "ทรัพยากรน้ำ." <<http://www.thaienvimonitor.net/Concept/priority2.htm>> (28 กรกฎาคม 2554)
- ไพพรรณ พรประภา, มั่นรัักษ์ ตันฑุลเวศม์, และ มั่นสิน ตันฑุลเวศม์. (2554). การปรุงแต่งคุณภาพน้ำ เล่ม1:กระบวนการเมมเบรน, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- อินคาศรี รัชเวทย์. (2552). พอลิเมออร์:เทคนิคพอลิเมอไรเซชัน, กรุงเทพฯ
- Ajmani, G. S., Goodwin, D., Marsh, K., Fairbrother, D. H., Schwab, K. J., Jacangelo, J. G., and Huang, H. (2012). "Modification of low pressure membranes with carbon nanotube layers for fouling control." *Water research*, 46(17), 5645-5654.
- APHA, AWWA-WPCF. (1989). *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 20th, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, Washington, D.C.
- Cran, M. J., Bigger, S. W., and Gray, S. R. (2011). "Degradation of polyamide reverse osmosis membranes in the presence of chloramine." *Desalination*, 283, 58-63.
- Fathizadeh, M., Aroujalian, A., and Raisi, A. (2011). "Effect of added NaX nano-zeolite into polyamide as a top thin layer of membrane on water flux and salt rejection in a reverse osmosis process." *Journal of Membrane Science*, 375(1-2), 88-95.
- García, J. M., García, F. C., Serna, F., and de la Peña, J. L. (2010). "High-performance aromatic polyamides." *Progress in Polymer Science*, 35(5), 623-686.
- Ghosh, A. K., Jeong, B. H., Huang, X., and Hoek, E. M. V. (2008). "Impacts of reaction and curing conditions on polyamide composite reverse osmosis membrane properties." *Journal of Membrane Science*, 311(1-2), 34-45.
- Jadav, G. L., and Singh, P. S. (2009). "Synthesis of novel silica-polyamide nanocomposite membrane with enhanced properties." *Journal of Membrane Science*, 328(1-2), 257-267.

- Jeong, B. H., Hoek, E. M. V., Yan, Y., Subramani, A., Huang, X., Hurwitz, G., Ghosh, A. K., and Jawor, A. (2007). "Interfacial polymerization of thin film nanocomposites: A new concept for reverse osmosis membranes." *Journal of Membrane Science*, 294(1-2), 1-7.
- Jin, Y., and Su, Z. (2009). "Effects of polymerization conditions on hydrophilic groups in aromatic polyamide thin films." *Journal of Membrane Science*, 330(1-2), 175-179.
- Kong, C., Kanezashi, M., Yamamoto, T., Shintani, T., and Tsuru, T. (2010). "Controlled synthesis of high performance polyamide membrane with thin dense layer for water desalination." *Journal of Membrane Science*, 362(1-2), 76-80.
- Lau, W. J., Ismail, A. F., Misdan, N., and Kassim, M. A. (2012). "A recent progress in thin film composite membrane: A review." *Desalination*, 287, 190-199.
- Lee, H. S., Im, S. J., Kim, J. H., Kim, H. J., Kim, J. P., and Min, B. R. (2008). "Polyamide thin-film nanofiltration membranes containing TiO₂ nanoparticles." *Desalination*, 219(1-3), 48-56.
- Lee, K. P., Arnot, T. C., and Mattia, D. (2011). "A review of reverse osmosis membrane materials for desalination Development to date and future potential." *Journal of Membrane Science*, 370(1-2), 1-22.
- Li, L., Li, C. Y., Ni, C., Rong, L., and Hsiao, B. (2007). "Structure and crystallization behavior of Nylon 66/multi-walled carbon nanotube nanocomposites at low carbon nanotube contents." *Polymer*, 48(12), 3452-3460.
- Park, C., Ounaies, Z., Watson, K. A., Crooks, R. E., Smith, J., Lowther, S. E., Connell, J. W., Siochi, E. J., Harrison, J. S., and Clair, T. L. St. (2002). "Dispersion of single wall carbon nanotubes by in situ polymerization under sonication." *Chemical Physics Letters*, 364, 303-308.
- Saha, N. K., and Joshi, S. V. (2009). "Performance evaluation of thin film composite polyamide nanofiltration membrane with variation in monomer type." *Journal of Membrane Science*, 342(1-2), 60-69.
- Shawky, H. A. (2009). "Performance of aromatic polyamide RO membranes synthesized by interfacial polycondensation process in a water-tetrahydrofuran system." *Journal of Membrane Science*, 339(1-2), 209-214.

- Shawky, H. A., Chae, S. R., Lin, S., and Wiesner, M. R. (2011). "Synthesis and characterization of a carbon nanotube/polymer nanocomposite membrane for water treatment." *Desalination*, 272(1-3), 46-50.
- Suteerasak, T. and Bhongsuwan, T. (2006). "Concentration of heavy metal As, Pb, Mn, Ni, Sn, Zn, Cr, Fe and radon gas in bottom sediment from abandoned tin mines in the Phuket Province." *Songklanakarin J. Sci. Technology*. 28(3), 641-654.
- Wei, X., Wang, Z., Chen, J., Wang, J., and Wang, S. (2010). "A novel method of surface modification on thin-film-composite reverse osmosis membrane by grafting hydantoin derivative." *Journal of Membrane Science*, 346(1), 152-162.
- Zhu, H., Szymczyk, A., and Balanec, B. (2011). "On the salt rejection properties of nanofiltration polyamide membranes formed by interfacial polymerization." *Journal of Membrane Science*, 379(1-2), 215-223.

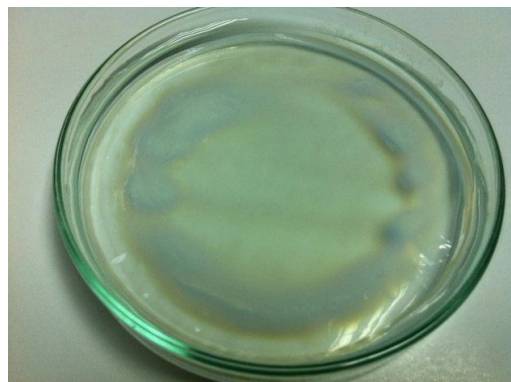
ภาคผนวก



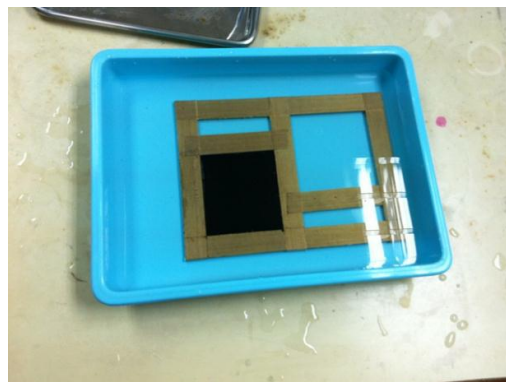
(a)



(b)



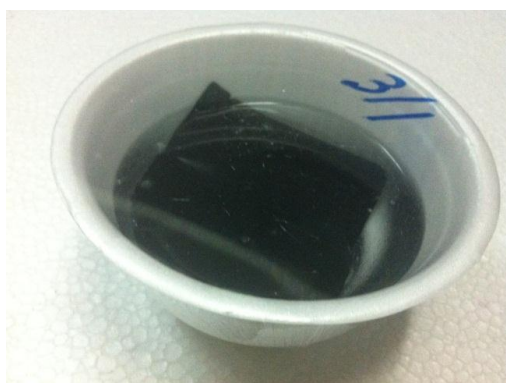
(c)



(d)



(e)



(f)

รูปภาคผนวกที่ 1 รูปแสดงการสังเคราะห์เยื่อแผ่น (a) พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ (b) การเตรียมสารละลายพอลิเมอร์ (c) เยื่อแผ่นสังเคราะห์โดยวิธีกำหนดปริมาตร (d) เยื่อแผ่นสังเคราะห์โดยวิธีกำหนดความหนาที่ 0.26 mm (e) เยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ (f) เยื่อแผ่นจากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนานาโนคาร์บอน



(a)

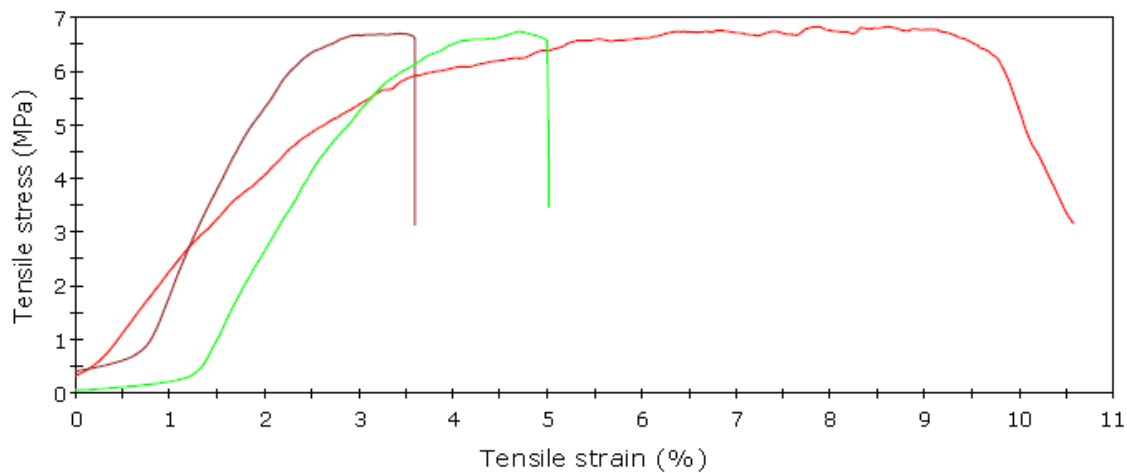


(b)

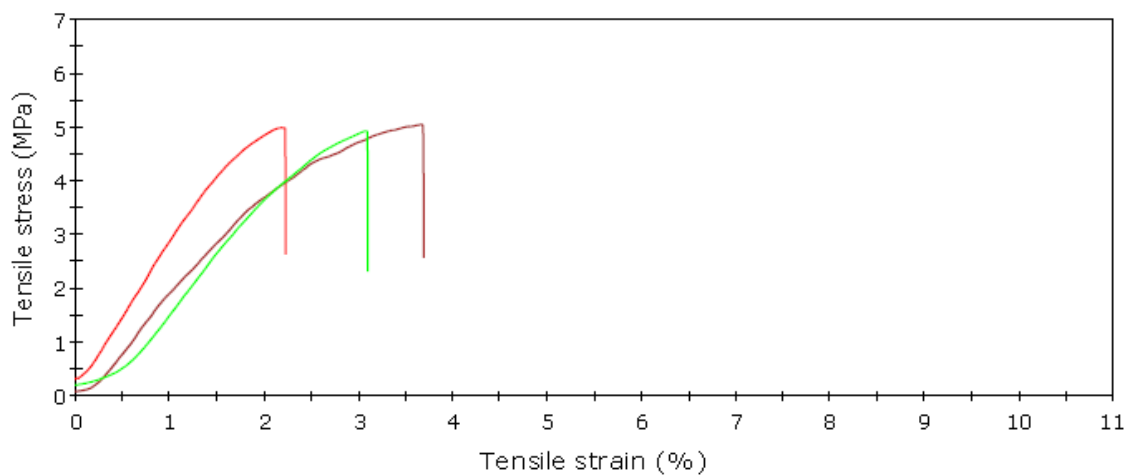


(c)

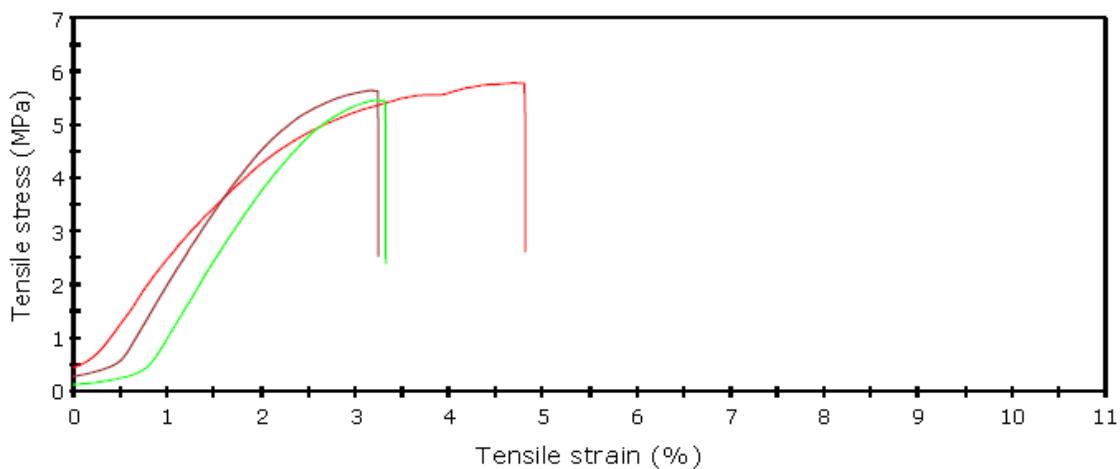
รูปภาคผนวกที่ 2 รูปแสดงการทดสอบประสิทธิภาพเยื่อแผ่นด้วยวิธีการกรองแบบใช้แรงดัน (a) ชุดทดลองการกรองแบบใช้แรงดัน (b) ฝาบนประกอบชั้นรองรับ (c) ฝาล่างประกอบชั้นรองรับภายในบรรจุเยื่อแผ่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 5.5 cm



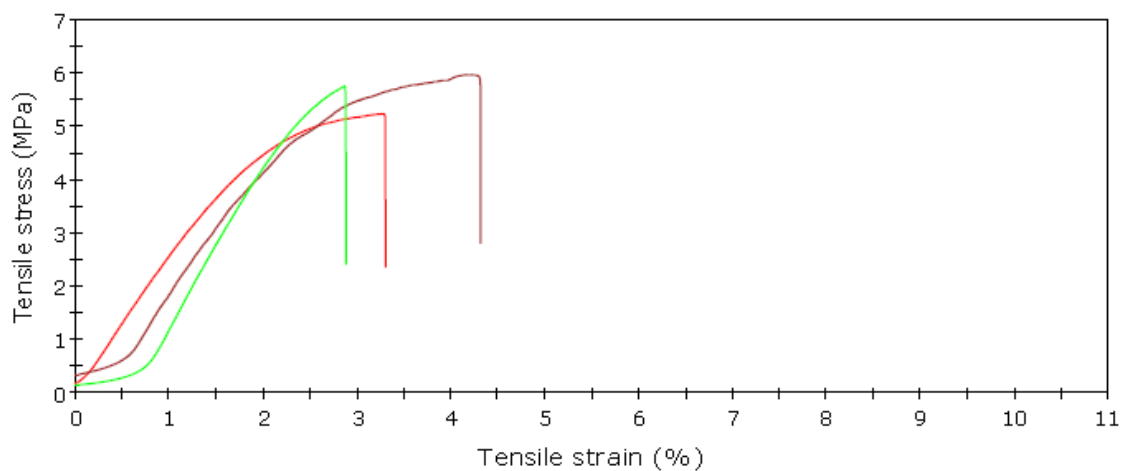
รูปภาคผนวกที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile stress และ Tensile strain ของเยื่อแผ่นที่สังเคราะห์จากสารละลายพอลิเมอร์



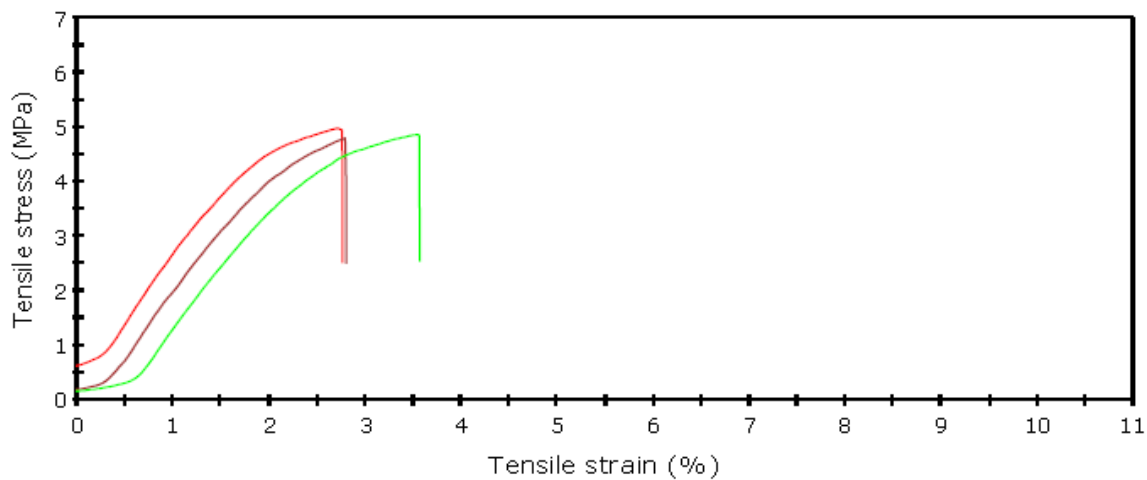
รูปภาคผนวกที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile stress และ Tensile strain ของเยื่อแผ่นที่สังเคราะห์จากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนร้อยละ 0.5 โดยนำหนักกระจายตัวด้วยวิธี sonicated ที่ 30



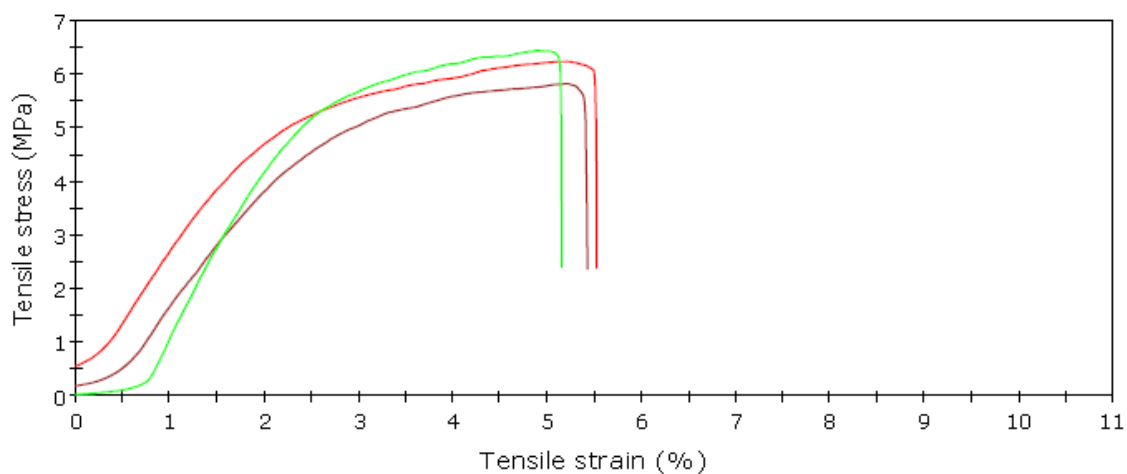
รูปภาคผนวกที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile stress และ Tensile strain ของเยื่อแผ่นที่สังเคราะห์จากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนร้อยละ 1.0 โดยนำหนักกระจายตัวด้วยวิธี sonicated ที่ 30



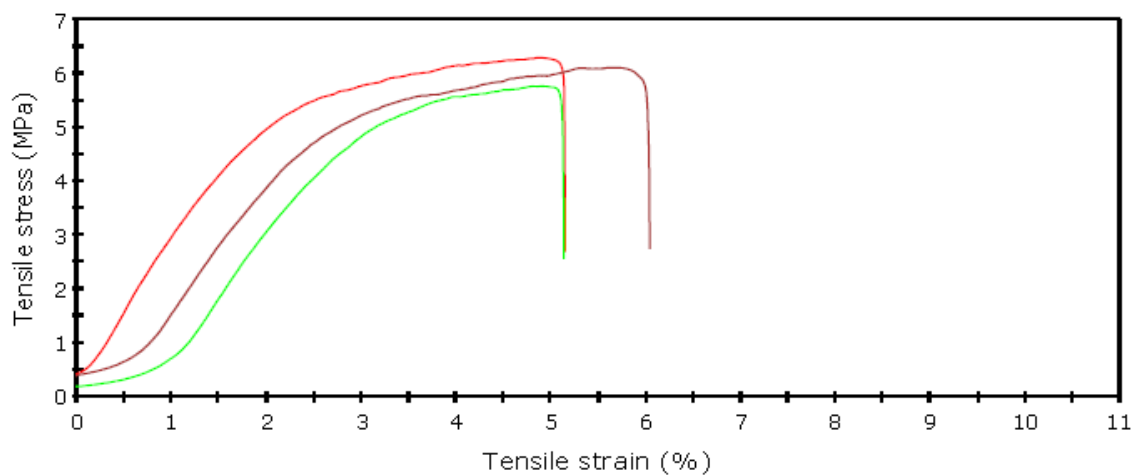
รูปภาคผนวกที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile stress และ Tensile strain ของเยื่อแผ่นที่สังเคราะห์จากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนร้อยละ 1.5 โดยนำหนักกระจายตัวด้วยวิธี sonicated ที่ 30



รูปภาคผนวกที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile stress และ Tensile strain ของเยื่อแผ่นที่สังเคราะห์จากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนร้อยละ 2.0 โดยนำหนักกระจายตัวด้วยวิธี sonicated ที่ 30



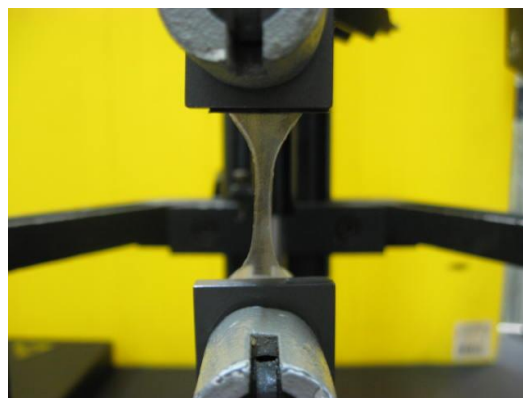
รูปภาคผนวกที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile stress และ Tensile strain ของเยื่อแผ่นที่สังเคราะห์จากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนร้อยละ 1.5 โดยนำหนักกระจายตัวด้วยวิธี sonicated ที่ 60



รูปภาคผนวกที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile stress และ Tensile strain ของเยื่อแผ่นที่สังเคราะห์จากสารละลายพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักกระจายตัวด้วยวิธี sonicated ที่ 60



(a)



(b)

รูปภาคผนวกที่ 10 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกล (a) ขนาดชิ้นงานทดสอบ (b) ชิ้นงานถูกดึงด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายอดิศร รัชนิพนธ์

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5430220014

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีการศึกษาที่สำเร็จ
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (ปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์)	มหาวิทยาลัยศิลปากร	2552

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

A. Ratchaniphont, W. Limsakul, and W. Sriprom, "Effects of Temperature and Spin Speed on the Synthesis of Nylon 6,6 Used for Membrane Production Via Interfacial Polymerization Method" Proceedings of The 14th graduate Research Conference, Khon Kaen University 2013, Khon Kaen, Thailand, 2013.