บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิจารณ์ผลการศึกษา

การดำเนินการวิจัยนี้ เพื่อศึกษาถึงปริมาณการเติมพีวีพีที่เหมาะสมต่อเมมเบรนเส้นใยกลวงที่ผลิตจากพีวีดีเอฟ สามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการผลิตเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง ขั้นตอนการทดสอบหาคุณสมบัติเบื้องต้นของเมมเบรน และ การปรับปรุงคุณภาพน้ำผิวดินโดยการนำเมมเบรนมากรองน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองแสดงตามลำดับของการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 การผลิตเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง

การผลิตเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงโดยวิธีการเปลี่ยนเฟส (phase inversion method) มีกระบวนการที่เกี่ยวข้องคือ กระบวนการตกตะกอน (coagulation) โดยสารเติมแต่งที่ผสมลงไปในขั้นตอนการเตรียมโพลิเมอร์ในที่นี้คือโพลีไพรโรลิโดน(พีวีพี)จะทำปฏิกิริยากับสารช่วยในการตกตะกอนและละลายออกมาทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเส้นโพลิเมอร์ที่มีรูพรุน การผลิตเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงแรงดันที่ใช้ในการฉีดมีผลต่อลักษณะทางกายภาพของเมมเบรนซึ่งถ้าใช้ความดันมากเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงที่ได้ก็จะมีความหนาของผนังเมมเบรนที่มากด้วย ซึ่งในการทดลองนี้ความดันที่ใช้ฉีดโพลิเมอร์อยู่ที่ 1.8 บาร์ สารช่วยในการตกตะกอนภายใน (internal coagulant)ที่ใช้คือน้ำสะอาด โดยน้ำจะช่วยให้เกิดกระบวนการตกตะกอนภายในท่อกลวงของเมมเบรนในกรณีที่ใช้อัตราการไหลของสารช่วยในการตกตะกอนภายในมากจะทำให้เกิดกระบวนการตกตะกอนแบบเร็วทำให้โครงสร้างของผนังเมมเบรนมีลักษณะบางและไม่สามารถนำไปกรองน้ำได้ ในการทดลองนี้กำหนดอัตราการไหลอยู่ที่ 2 มิลลิลิตรต่อนาทีซึ่งเป็นอัตราการไหลที่สามารถทำให้เมมเบรนที่ผลิตออกมามีความทนทานสามารถนำไปกรองน้ำได้ จากการทดลองเมมเบรนเส้นใยกลวงที่ผลิตจากพีวีดีเอฟที่ผลิตได้จะมีลักษณะเป็นเส้นใยโพลิเมอร์กลวงสีขาวจมน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พื้นผิวด้านนอกเรียบไม่มีรอยรั่วที่เกิดจากการฉีดความยืดหยุ่นจัดอยู่ในเกณฑ์ดีในระดับหนึ่ง นำเมมเบรนที่ผลิตได้แช่ในน้ำสะอาดเพื่อให้โพลิเมอร์เกิดการคลายตัวจากนั้นจึงนำมาเก็บไว้ในตู้เก็บเมมเบรน

ลักษณะการฉีดโพลิเมอร์จะปล่อยให้เส้นโพลิเมอร์ตกลงด้านล่างของรางตกตะกอนตามแรงโน้มถ่วง จากการทดสอบการฉีดเมมเบรน พบว่ามีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความดันที่ใช้ในการฉีด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

โพลิเมอร์ซึ่งควรปรับค่าความดันให้อยู่ในช่วงเหมาะสมโดยให้โพลิเมอร์ไหลออกจากหัวฉีดโพลิเมอร์อย่างช้าๆ ซึ่งถ้าใช้ความดันในการฉีดโพลิเมอร์มากเกินไปจะมีผลทำให้เส้นใยเมมเบรนที่ฉีดออกมามีลักษณะของผิวด้านนอกไม่เรียบเสมอกันรวมไปถึงขนาดของเส้นเมมเบรนแบบแส้นใยกลวงจะมีขนาดใหญ่และผนังค่อนข้างหนา ในขณะเดียวกันถ้าใช้ความดันน้อยเกินไปเส้นเมมเบรนที่ฉีดออกมาจะมีลักษณะเส้นเมมเบรนมีขนาดที่เล็กพื้นผิวของเมมเบรนเรียบและมีผนังค่อนข้างบาง

โดยขนาดของเมมเบรนที่ผลิตได้ทั้ง 4 แบบ (No-PVP PVP1 PVP3 และ PVP5) แสดงในตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าเมมเบรนมีขนาดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งภานในและภายนอกและความหนาไม่เท่ากันเนื่องมาจากการผลของการเติมพีวีพีมีส่วนทำให้สารละลายโพลิเมอร์ที่จะใช้ในการฉีดขึ้นรูปมีความหนืดแตกต่างกันไป

ตารางที่ 0.1 แสดงขนาดของเมมเบรนเส้นใยกลวง

Membrane name	Air Gap (cm)	External diameter (mm)	Internal diameter (mm)	Thickness (mm)
No-PVP	5	0.98±0.03	0.83±0.01	0.50±0.06
PVP1	5	1.03±0.01	0.83±0.01	0.65±0.06
PVP3	5	1.11±0.01	0.85±0.02	0.81±1.11
PVP5	5	1.26±0.03	0.95±0.01	0.97±0.05

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูปที่ 0.1 เมมเบรนเส้นใยกลวงที่ผลิตจากพีวีดีเอฟโดยมีพีวีพีเป็นสารเติมแต่ง

อัตราการไหลของสารช่วยในการตกตะกอนภายในซึ่งการทดลองนี้ใช้อัตราการไหลอยู่ที่ 2 มิลลิลิตรต่อนาทีในกรณีที่อัตราการไหลของสารช่วยในการตกตะกอนภายในน้อยจะมีผลทำให้รูกลวงของเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงมีขนาดเล็กและขนาดเส้นรอบวงที่ไม่สม่ำเสมออัตราการไหลของสารช่วยในการตกตะกอนภายใน แต่ถ้าอัตราการไหลของสารช่วยในการตกตะกอนภายในมีมากก็จะทำให้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงที่ผลิตได้นั้นมีผนังเมมเบรนที่บางและไม่สามารถนำไปกรองน้ำได้ โดยที่สารช่วยในการตกตะกอนภายในเป็นตัวการทำให้เกิดโพรงและรูพรุนจำนวนมากภายในผนังด้านในของเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงโดยอาศัยกระบวนการตกตะกอนระหว่างน้ำกับพีวีพี ในกรณีที่สารช่วยในการตกตะกอนภายในมีมากเกินไปจะมีผลทำให้เมมเบรนเส้นใยกลวงที่ฉีดออกมามีผนังที่บางมากและไม่สามารถนำไปใช้ในการกรองน้ำเนื่องจากผนังของเมมเบรนทนแรงดันที่ใช้กรองน้ำที่ความดันสูงๆ ไม่ได้ ในขณะเดียวกันถ้าอัตราการไหลของสารช่วยในการตกตะกอนภายในมีน้อยเกินไปเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงที่ฉีดออกมาจะไม่มีรูกลวงตรงกลางทำให้กระบวนการกรองน้ำของเมมเบรนไม่เกิดขึ้นนำไปใช้ในการกรองน้ำไม่ได้ ซึ่ง Wang *et al.*(1999)ทำการทดลองผลิตเมมเบรนเส้นใยกลวงโดยใช้พีวีดีเอฟเป็นโพลิเมอร์ ไดเมทริลอะเซตาไมด์ (DMAc) เป็นตัวทำละลายและมีพีวีพีเป็นสารเติมแต่ง และใช้สารช่วยในการตกตะกอนภายในสองชนิดคือ น้ำสะอาดและเอทานอล โดยผลการทดลองพบว่าการใช้น้ำสะอาดเป็นสารช่วยในการตกตะกอนภายในจะทำให้ผนังเมมเบรนที่ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการวิเคราะห์ปรากฏเป็นโพรงคล้ายนิ้วมือจำนวนมากเรียงกันเป็นแนวยาวรวมไปถึงรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

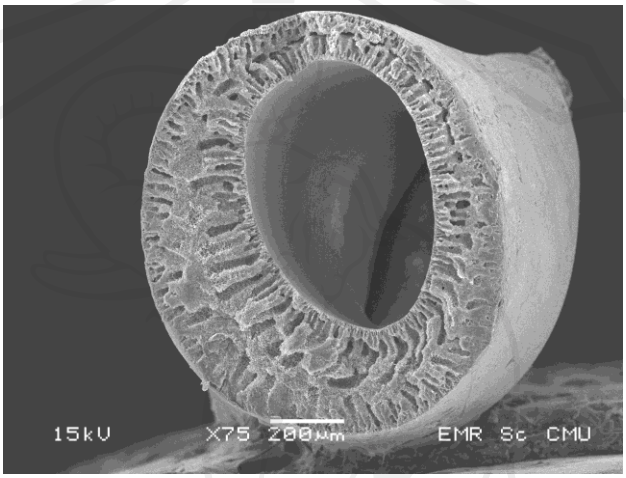
ระยะห่างของการฉีดเมมเบรน (Air gap) ในการทดลองนี้ปรับระยะห่างของการฉีดเมมเบรนของการฉีดเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงอยู่ที่ 5 เซนติเมตรทุกการทดลอง งานวิจัยของ Khayet (2003) ที่ศึกษาเกี่ยวกับระยะห่างของการฉีดเมมเบรนโดยการปรับระยะห่างของการฉีดเมมเบรนและทำการทดสอบเบื้องต้นเกี่ยวกับลักษณะภายนอกของเส้นเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงพบว่าการฉีดเมมเบรนที่มีระยะห่างของการฉีดเมมเบรนมากกว่า 5 เซ็นติเมตร สารละลายโพลิเมอร์ที่ฉีดออกมาจากหัวฉีดจะมีขนาดเล็กอันเนื่องมาจากผลของแรงโน้มถ่วงทำให้ลักษณะของเมมเบรนที่ปรากฏคือ เมมเบรนมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งด้านนอก (outer diameter) และเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน(inner diameter) ที่เล็กลงมาก โดยการทดลองผลของระยะห่างของการฉีดเมมเบรนต่อรูปร่างลักษณะทั้งภายในและภายนอกของเมมเบรนเส้นใยกลวงซึ่งโพลิเมอร์และตัวทำละลายที่ใช้คือพีวีดีเอฟ และไดเมทริลอะเซตาไมด์โดยมีโพลิเอทริลีนไกคอลล์ (PEG) เป็นสารเติมแต่ง ซึ่งผลการทดลองของ Khayet (2003) ที่ใช้ระยะห่างของการฉีดเมมเบรน 5 เซ็นติเมตร ได้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางวงในประมาณ 1.13 มิลลิเมตร และมีความหนาของผนังเมมเบรนประมาณ 0.175 มิลลิเมตร นอกจากนี้ในการทดลองของ Chung and Hu (1997) ที่ใช้ โพลิอีเทอร์ซัลโฟน (Polyethersulfone) ในการผลิตเมมเบรนเบบเส้นใยกลวง ได้ผลการทดลองในลักษณะเดียวกันคือเมื่อมีการเพิ่มระยะห่างของการฉีดเมมเบรนจะมีผลทำให้ขนาดของเมมเบรนมี ขนาดเล็กลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างของการฉีดเมมเบรนโดยที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากแรงโน้มถ่วงมีผลต่อน้ำหนักของโพลิเมอร์ขณะฉีด

4.2 การวิเคราะห์สัณฐานของเมมเบรน

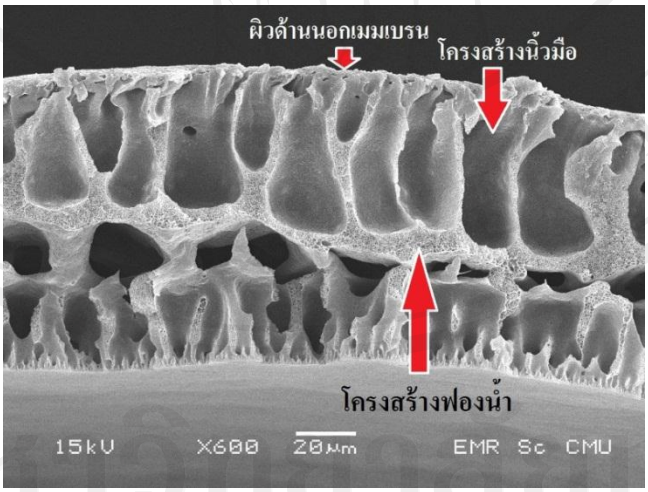
การวิเคราะห์สัณฐานของเมมเบรนโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อศึกษาโครงสร้างของเมมเบรนเส้นใยกลวงที่ผลิตจากพีวีดีเอฟโดยมีไดเมทริลอะเซตาไมด์เป็นตัวทำละลายและมีพีวีพีเป็นสารเติมแต่งซึ่งการวิเคราะห์สัณฐานของเมมเบรนจะวิเคราะห์จากรูปภาพแบบตัดขวางรวมถึงลักษณะผิวด้านนอกและด้านในซึ่งเป็นภาพรวมของเมมเบรนแสดงในรูปที่ 0.2 หัวฉีดสารช่วยในการตกตะกอนภายในที่อยู่ตรงกลางของหัวฉีดโพลิเมอร์มีผลต่อผนังของเมมเบรนมากในกรณีที่หัวฉีดสารช่วยในการตกตะกอนภายในไม่ตรงจะมีผลทำให้ผนังของเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงที่ฉีดออกมาไม่เท่ากันทำให้ความทนทานของเมมเบรนลดน้อยลง การวิเคราะห์นี้เมมเบรนที่ปรากฏของเมมเบรนซึ่งจากการวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างแบบตัดขวางของเมมเบรน ดังแสดงในรูปที่รูปที่ 0.3 ซึ่งผลิตโดยใช้วิธีการเปลี่ยนเฟสเมื่อดูภาพแบบตัดขวางจะเห็นได้ว่าโครงสร้างของเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงมีผิวที่ค่อนข้างบางโดยมีลักษณะเป็นโพรงขนาด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ใหญ่กับเป็นโพรงขนาดใหญ่คล้ายนิ้วมือที่ปรากฏเช่นนี้เกิดจากอัตราการเปลี่ยนเฟสอย่างรวดเร็วของโพลิเมอร์มีผลทำให้เกิดเป็นโพรงขนาดใหญ่คล้ายนิ้วมือซึ่งการเกิดโพรงนิ้วมือนี้จะช่วยในการกรองแยกสารแขวนลอยที่มากับน้ำและอัตราการเปลี่ยนเฟสอย่างช้าๆมีผลทำให้เกิดเป็นโพรงคล้ายฟองน้ำในโครงสร้างของเมมเบรนซึ่งการเกิดโพรงฟองน้ำจะช่วยให้โครงสร้างของเมมเบรนมีความแข็งแรงทนทานมากขึ้น [Wang *et al. (*1999)]



รูปที่ 0.2 ภาพรวมของเมมเบรน



รูปที่ 0.3 โครงสร้างแบบตัดขวางของเมมเบรน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์สัณฐานของเมมเบรน

เมมเบรน	ภาพตัดขวางของเมมเบรน	ผิวภายนอกของเมมเบรน	ผิวภายในของเมมเบรน
No-PVP	ปรากฏโพรงนิ้วมือเรียงกันและโพรงฟองน้ำมีความหนาของโพรงที่มาก	ผิวของเมมเบรนมีลักษณะเป็นผิวที่เรียบจำนวนของรูพรุนที่ปรากฏบนพื้นผิวภายนอกของเมมเบรนชนิดนี้มีน้อยมาก	ผิวของเมมเบรนมีลักษณะเป็นผิวที่เรียบจำนวนของรูพรุนที่ปรากฏบนพื้นผิวภายนอกของเมมเบรนชนิดนี้มีน้อยมาก
PVP1	ปรากฏโพรงนิ้วมือเรียงกันและโพรงฟองน้ำที่บางกว่าเมมเบรน No-PVP	ผิวภายนอกของเมมเบรนมีลักษณะผิวเรียบ จำนวนรูพรุนที่ปรากฏบนผิวเมมเบรนภายนอกประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็ก	พื้นผิวภายในของเมมเบรนมีลักษณะเป็นผิวที่เรียบรูพรุนที่ปรากฏบนพื้นผิวด้านในของเมมเบรน ประกอบด้วยรูพรุนทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่
PVP3	ปรากฏโพรงนิ้วมือเรียงกันและโพรงฟองน้ำที่บางกว่าเมมเบรน No-PVP	ผิวภายนอกของเมมเบรนมีลักษณะผิวเรียบ จำนวนรูพรุนที่ปรากฏบนผิวเมมเบรนภายนอกประกอบด้วยรูพรุนทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ปรากฏอย่างชัดเจน	พื้นผิวภายในของเมมเบรนมีลักษณะเป็นผิวที่เรียบรูพรุนที่ปรากฏบนพื้นผิวด้านในของเมมเบรน ประกอบด้วยรูพรุนทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่
เมมเบรน	ภาพตัดขวางของเมมเบรน	ผิวภายนอกของเมมเบรน	ผิวภายในของเมมเบรน
PVP5	ปรากฏโพรงนิ้วมือเรียงกันและโพรงฟองน้ำที่บางกว่าเมมเบรน No-PVP	ผิวภายนอกของเมมเบรนมีลักษณะผิวเรียบ จำนวนรูพรุนที่ปรากฏบนผิวเมมเบรนภายนอกประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็ก	พื้นผิวภายในของเมมเบรนมีลักษณะเป็นผิวที่เรียบรูพรุนที่ปรากฏบนพื้นผิวด้านในของเมมเบรน ประกอบด้วยรูพรุนทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลการวิเคราะห์สัณฐานของเมมเบรนโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงในตาราง 4.2 โดยการวิเคราะห์ถึงผลของพีวีพีที่มีผลต่อการเกิดรูพรุนและความพรุนของเมมเบรนเส้นใยกลวงซึ่งในที่นี้ คือ ผลของปริมาณการเติมพีวีพี เมื่อวิเคราะห์สัณฐานของเมมเบรนในภาพตัดขวาง พบว่า เมมเบรนที่ไม่มีการเติมพีวีพี (No-PVP) แสดงในรูปที่ รูปที่ 0.4 ก. สัณฐานที่ปรากฏของเมมเบรนชนิดนี้คือด้านบนของภาพตัดขวางของเมมเบรนไม่มีการเติมพีวีพีประกอบไปด้วยโพรงที่มีลักษณะคล้ายนิ้วมือเรียงกันและด้านล่างของภาพตัดขวางของเมมเบรน No-PVP จะประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดเล็กปรากฏอยู่เป็นจำนวนมากบนโครงสร้างเมมเบรนที่ไม่มีการเติมพีวีพี จะเห็นว่าการที่ผนังของเมมเบรน No-PVP ปรากฏเป็นโพรงฟองน้ำที่ปรากฏเช่นนี้เนื่องจากการผลิตเมมเบรนชนิดนี้ไม่มีการเติมพีวีพีซึ่งพีวีพีจะช่วยให้เกิดโพรงและรูพรุนมากขึ้นโดยที่โมเลกุลของพีวีพีจะไปแทรกตัวในโพลิเมอร์ซึ่งในที่นี้ใช้พีวีดีเอฟและละลายไปกับน้ำเมื่อเกิดกระบวนการตกตะกอนทำให้เกิดช่องว่างหรือรูพรุนปรากฏขึ้นบนเมมเบรน

ในกรณีของการวิเคราะห์สัณฐานของเมมเบรนที่มีสารเติมแต่งลงในโพลิเมอร์ที่ใช้ผลิตเมมเบรนในที่นี้คือพีวีพีในอัตราส่วน 1 เปอร์เซ็นต์ (PVP1) 3 เปอร์เซ็นต์ (PVP3) และ 5 เปอร์เซ็นต์(PVP5) โดยน้ำหนัก ซึ่งช่วยให้เกิดรูพรุนและความพรุนบนเมมเบรน พบว่า ภาพตัดขวางของเมมเบรน PVP1 แสดงในรูปที่ 0.4 ข. สัณฐานที่ปรากฏของเมมเบรนชนิดนี้คือด้านบนของภาพตัดขวางของเมมเบรน PVP1 ประกอบไปด้วยโพรงที่มีลักษณะคล้ายนิ้วมือและโพรงแบบฟองน้ำเรียงกันเป็นแนวยาวด้านล่างของภาพตัดขวางของเมมเบรน PVP1 ก็ปรากฏรูปโพรงที่มีลักษณะคล้ายนิ้วมือและโพรงแบบฟองน้ำขนาดเล็กเรียงกันเป็นแนวยาวปรากฏอยู่เป็นจำนวนมากบนโครงสร้างเมมเบรน PVP1 ซึ่งมากกว่าเมมเบรน No-PVP อย่างชัดเจน เนื่องจากโมเลกุลของพีวีพีเกิดกระบวนการตกตะกอนและละลายไปกับน้ำที่ใช้เป็นสารช่วยในการตกตะกอนภายใน

ภาพตัดขวางของเมมเบรน PVP3 แสดงในรูปที่ 0.4 ค.ประกอบไปด้วยโพรงที่มีลักษณะคล้ายนิ้วมือและโพรงแบบฟองน้ำเรียงกันเป็นแนวยาวและด้านล่างของภาพตัดขวางของเมมปรากฏรูปโพรงที่มีลักษณะคล้ายนิ้วมือและโพรงแบบฟองน้ำขนาดเล็กเรียงกันเป็นแนวยาวอยู่เป็นจำนวนมากบนโครงสร้างของเมมเบรนเหมือนกับเมมเบรน PVP1 เนื่องจากโมเลกุลของพีวีพีเกิดกระบวนการตกตะกอนและละลายไปกับน้ำที่ใช้เป็นสารช่วยในการตกตะกอนภายใน

สำหรับกรณีเมมเบรน PVP5 ซึ่งผสมเติมสารเติมแต่งมากที่สุดในการทดลอง ภาพตัดขวางแสดงในรูปที่ 0.4 ง. เมื่อวิเคราะห์สัณฐานที่ปรากฏของเมมเบรนชนิดนี้คือด้านบนของภาพตัดขวางของเมมเบรน PVP5 ประกอบไปด้วยโพรงที่มีลักษณะคล้ายนิ้วมือและโพรงแบบฟองน้ำเรียงกันเป็นแนว

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ยาวและด้านล่างของภาพตัดขวางของเมมเบรนPVP5 ประกอบไปด้วยโพรงที่มีลักษณะคล้ายนิ้วมือและโพรงแบบฟองน้ำขนาดเล็กเรียงกันเป็นแนวยาวบนโครงสร้างของเมมเบรน เนื่องจากโมเลกุลของพีวีพีเกิดกระบวนการตกตะกอนและละลายไปกับน้ำที่ใช้เป็นสารช่วยในการตกตะกอนภายใน

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์สัณฐานของเมมเบรนในภาพพื้นผิวภายนอกของเมมเบรน พบว่าลักษณะพื้นผิวภายนอกของเมมเบรน No-PVP แสดงในรูปที่ 4.5 รูป ก. ผิวของเมมเบรนมีลักษณะเป็นผิวที่เรียบไม่ปรากฏรอยรั่วที่เกิดจากกระบวนการผลิต จำนวนของรูพรุนที่ปรากฏบนพื้นผิวภายนอกของเมมเบรนชนิดนี้มีน้อยมาก เนื่องจากเมมเบรน No-PVP ไม่มีการเติมพีวีพีเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจึงมีเพียงตัวทำละลายที่ละลายออกไปกับน้ำทำให้จำนวนรูพรุนที่เกิดขึ้นมีน้อย

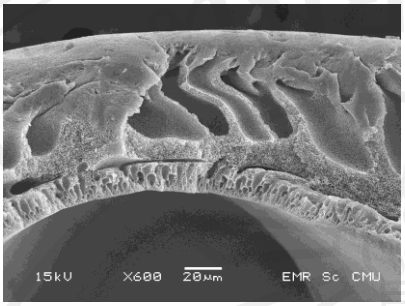
สำหรับลักษณะพื้นผิวภายนอกของเมมเบรน PVP1 แสดงในรูปที่ 4.5 รูป ข. พื้นผิวภายนอกของเมมเบรนที่ปรากฏมีลักษณะเรียบไม่ปรากฏรอยรั่วที่เกิดจากกระบวนการผลิต จำนวนรูพรุนไม่ปรากฏชัดเจนบนผิวด้านนอกของเมมเบรน PVP1 สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวภายนอกของเมมเบรน PVP3 แสดงในรูปที่ 4.5 รูป ค. พบว่าผิวภายนอกของเมมเบรนมีลักษณะผิวเรียบไม่ปรากฏรอยรั่วที่เกิดจากกระบวนการผลิต จำนวนรูพรุนที่ปรากฏบนผิวเมมเบรนภายนอกประกอบด้วยรูพรุนทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ปรากฏอย่างชัดเจน และ เมื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวภายนอกของเมมเบรน PVP5 แสดงในรูปที่ 4.5 รูป ง.พบว่าผิวภายนอกของเมมเบรนมีลักษณะเรียบไม่เกิดรอยรั่วจากกระบวนการผลิต จำนวนรูพรุนไม่ปรากฏชัดเจนบนผิวเมมเบรนเหมือนเมมเบรน PVP3

สำหรับการวิเคราะห์สัณฐานภายในของเมมเบรน พบว่า ลักษณะพื้นผิวภายในของเมมเบรน No-PVP แสดงในรูปที่ 4.6 รูป ก. ผิวภายในของเมมเบรนมีลักษณะเป็นผิวที่เรียบ จำนวนรูพรุนที่ปรากฏไม่ชัดเจนบนพื้นผิวภายในท่อกลวงของเมมเบรน ในกรณีของลักษณะพื้นผิวภายในของเมมเบรน PVP1 แสดงในรูปที่ 4.6 รูป ข. พื้นผิวภายในของเมมเบรนมีลักษณะเป็นผิวที่เรียบ จำนวนรูพรุนที่ปรากฏบนพื้นผิวด้านในของเมมเบรน ประกอบด้วยรูพรุนทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ปรากฏชัดเจนอยู่บนพื้นผิวภายในท่อกลวงเมมเบรน

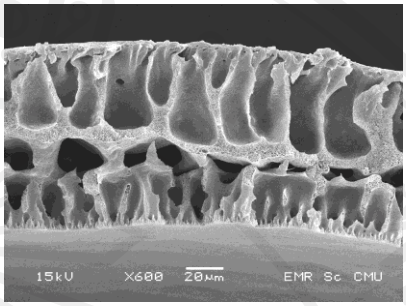
ในส่วนลักษณะพื้นผิวภายในของเมมเบรน PVP3 แสดงในรูปที่ 4.6 รูป ค. พบว่าพื้นผิวภายในมีลักษณะที่เรียบจำนวนรูพรุนที่ปรากฏบนพื้นผิวภายในของเมมเมบรนไม่ปรากฏชัดเจนอยู่บนพื้นผิวภายในท่อกลวงเมมเบรน

พื้นผิวภายในของเมมเบรน PVP5 แสดงในรูปที่ 4.6 รูป ง. ไม่ปรากฏรูพรุนชัดเจนบนพื้นผิวภายในท่อกลวงเมมเบรน

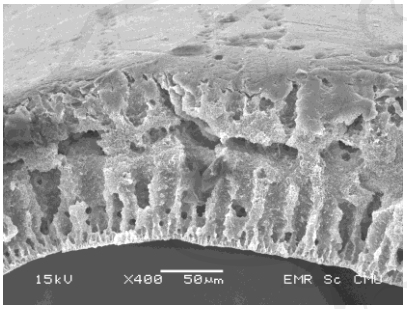
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



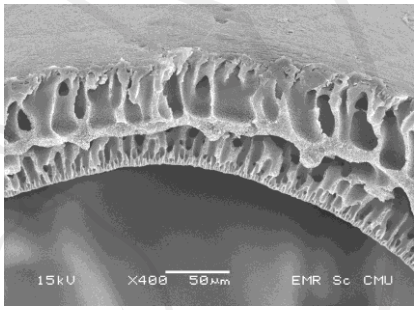
ก. ผนังเมมเบรน No-PVP



ข. ผนังเมมเบรน PVP1

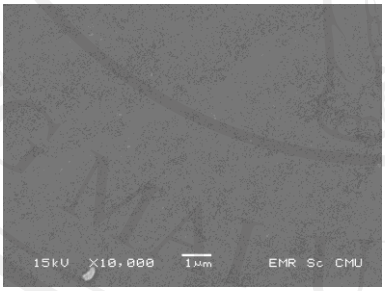


ค. ผนังเมมเบรน PVP3

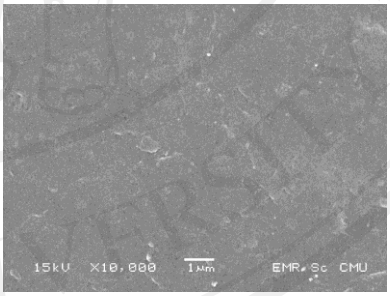


ง. ผนังเมมเบรน PVP5

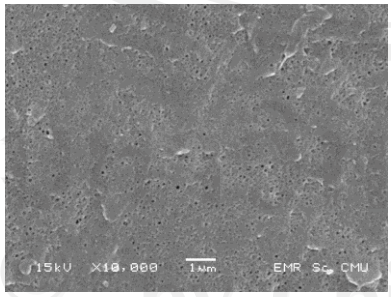
รูปที่ 0.4 โครงสร้างของเมมเบรนเส้นใยกลวงที่เตรียมจากพีวีดีเอฟ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



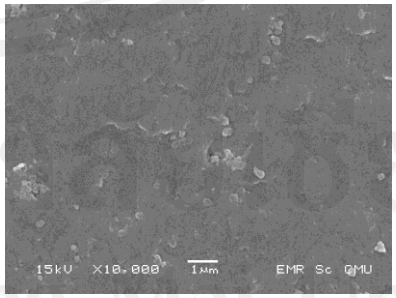
ก. ผิวภายนอกเมมเบรน No-PVP



ข. ผิวภายนอกเมมเบรน PVP1



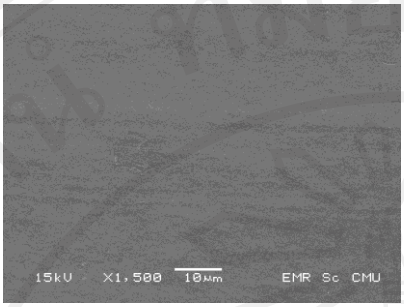
ค. ผิวภายนอกเมมเบรน PVP3



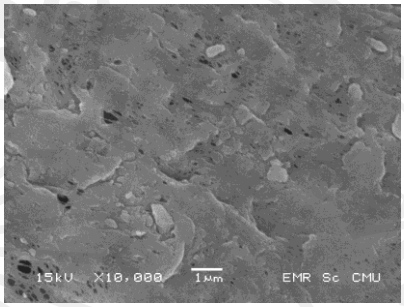
ง. ผิวภายนอกเมมเบรน PVP5

รูปที่ 0.5 ผิวภายนอกของเมมเบรนเส้นใยกลวงที่เตรียมจากพีวีดีเอฟ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

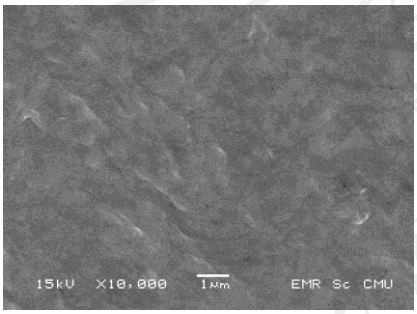
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



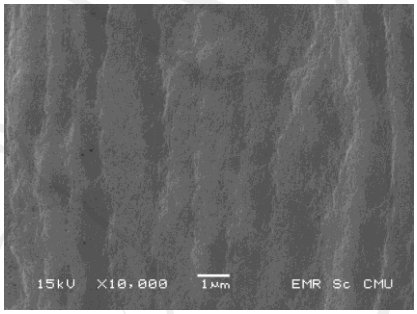
ก. ผิวภายในเมมเบรน No-PVP



ข. ผิวภายในเมมเบรน PVP1



ค. ผิวภายในเมมเบรน PVP 3



ง. ผิวภายในเมมเบรน PVP 5

รูปที่ 0.6 ผิวภายในของเมมเบรนเส้นใยกลวงที่เตรียมจากพีวีดีเอฟ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

เมื่อนำผลการวิเคราะห์สัณฐานของเมมเบรนโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของงานวิจัยเปรียบเทียบตรงภาพตัดขวางของเมมเบรนกับการทดลองของ Wang *et al*. (1999) ที่ทำการทดลองผลิตเมมเบรนเส้นใยกลวงโดยใช้พีวีดีเอฟเป็นโพลิเมอร์ โดยใช้ไดเมทริลอะเซตาไมด์เป็นตัวทำละลายและมีพีวีพีเป็นสารเติมแต่งใช้สภาวะการทดลองที่ประกอบไปด้วยปริมาณพีวีดีเอฟ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ระยะห่างการฉีดเมมเบรนเท่ากับ 10 เซ็นติเมตร และเติมพีวีพี 2 เปอร์เซ็นต์ และ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก พบว่า ลักษณะของภาพตัดขวางทั้งของเมมเบรนที่เติม พีวีพี 2 เปอร์เซ็นต์ และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปรากฏลักษณะเป็นโพรงรูปแบบนิ้วมือเรียงกันเป็นแนวยาวและด้านล่างของภาพตัดขวางของเมมเบรนไม่ปรากฏรูพรุนเป็นที่ชัดเจน

ดังนั้นกระบวนการตกตะกอนของสารละลายโพลิเมอร์กับสารช่วยในการตกตะกอนถ้าเกิดขึ้นเร็วจะทำให้เกิดโครงสร้างนิ้วมือจำนวนมากมีผลทำให้ค่าความพรุนประสิทธิผลมีมากขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้ากระบวนการตกตะกอนของสารละลายโพลิเมอร์กับสารช่วยในการตกตะกอนถ้าเกิดขึ้นช้าจะทำให้เกิดโครงสร้างฟองน้ำจำนวนมากซึ่งจะทำให้เมมเบรนที่ผลิตออกมาได้มีความแข็งแรงทนทานในการนำไปใช้งาน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อนำรูปวิเคราะห์สัณฐานของเมมเบรนโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของงานวิจัยเปรียบเทียบกับสารเติมแต่งชนิดอื่นซึ่งในการทดลองของ Yeow *et al.*(2005) ที่ผลิตเมมเบรนเส้นใยกลวงโดยวิธีการเปลี่ยนเฟสโดยใช้พีวีดีเอฟเป็นโพลิเมอร์ ไดเมทริลอะเซตาไมด์เป็นตัวทำละลาย แต่ใช้ลิเทียมเปอร์คลอเรทเป็นสารเติมแต่ง ใช้สภาวะการทดลองที่ประกอบไปด้วยปริมาณพีวีดีเอฟ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ไดเมทริลอะเซตาไมด์ เท่ากับ 74 เปอร์เซ็นโดยน้ำหนัก และ เติมลิเทียมเปอร์คลอเรท 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า ลักษณะของภาพตัดขวางทั้งด้านบนและด้านล่างของภาพตัดขวางของเมมเบรนที่เติมลิเทียมเปอร์คลอเรท 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้เมทริลไพรโรลิโดน (NMP) ผสมกับน้ำสะอาดเป็นสารช่วยในการตกตะกอนภายใน มีลักษณะเป็นโพรงรูปแบบนิ้วมือขนาดเล็กเรียงกันเป็นแนวยาว

สำหรับการเปรียบเทียบพื้นผิวด้านนอกของเมมเบรนได้ทำการเปรียบเทียบกับการทดลองของ Liu *et al*. (2009) ที่มีการทำเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงโดยใช้พีวีดีเอฟเป็นโพลิเมอร์และมีการผสม PET ลงในเมมเบรนที่ผลิตโดยภาพพื้นผิวด้านนอกเมมเบรนปรากฏรูพรุนกระจายบนผิวด้านนอกของเมมเบรนอย่างชัดเจน

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อการเกิดรูพรุนและความพรุนของเมมเบรนเส้นใยกลวง อาทิ เช่น สารช่วยในการตกตะกอนภายในที่ใช้ซึ่งโดยส่วนใหญ่ใช้น้ำสะอาดและเอทานอลซึ่งสารช่วยในการตกตะกอนภายในทั้งสองชนิดนี้ก็จะมีผลทำให้เกิดรูพรุนและความพรุนของเมมเบรนแตกต่างกันไป

4.3 คุณสมบัติของรูพรุนของเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง

4.3.1 รูพรุนใหญ่ที่สุด

การทดสอบรูพรุนขนาดใหญ่ของเมมเบรนเส้นใยกลวงเพื่ออธิบายความแตกต่างของขนาดรูพรุนใหญ่ที่สุดของเมมเบรนทั้ง 4 แบบรวมไปถึงตรวจสอบรอยรั่วที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตเมมเบรนเส้นใยกลวงโดยวิธีที่ใช้ในการทดสอบคือ Bubble point test ซึ่งสามารถคำนวณขนาดของรูพรุนได้จากสมการ $r = \frac{2\gamma}{\Delta P} cos\theta$ ของ Laplace ผลการทดสอบรูพรุนขนาดใหญ่ที่สุดของเมมเบรนเส้นใยกลวงแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนPVP5 มีขนาดรูพรุนใหญ่ที่สุด คือ 4.42±0.70 ไมครอน และ ขนาดของรูพรุนอันดับรองลงไป คือ เมมเบรนPVP3 เมมเบรนPVP1 และ เมมเบรน No-PVP เท่ากับ 3.13±0.42 1.89±0.15 1.24±0.06 ไมครอน ตามลำดับ รูพรุนเฉลี่ยของเมมเบรนทั้ง 4 แบบมีแนวโน้มของรูพรุนเฉลี่ยกว้างมากขึ้นเมื่อมีการเติมพีวีพีในปริมาณมากขึ้นเนื่องจากพีวีพีมีคุณสมบัติที่ทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วสามารถละลายไปกับน้ำ ดังนั้นเมื่อเติมพีวีพีลงไปในปริมาณมากการละลาย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ออกไปกับน้ำของพีวีพีที่ไปแทรกอยู่กับโพลิเมอร์ ก็มีมากทำให้เกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ปรากฏบนพื้นผิวภายนอกของเมมเบรน

ตารางที่ 0.3 คุณสมบัติเบื้องต้นของเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง

เมมเบรน	รูพรุนใหญ่ที่สุด (ไมครอน)	ความพรุนของเมมเบรน (เปอร์เซ็นต์)	รัศมีรูพรุนเฉลี่ย ($\times 10^{-2}$ไมครอน)	ความพรุนประสิทธิผล ε /Lp (เมตร$^{-1}$)
No-PVP	1.24±0.06	37.00±0.06	6.37±0.01	8.76±0.31
PVP1	1.89±0.15	43.00±0.08	8.49±1.23	6.10±1.82
PVP3	3.13±0.42	49.00±0.13	8.22±0.30	6.31±0.26
PVP5	4.42±0.70	50.00±0.13	8.02±0.49	7.29±1.38

เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับ Khayet and Matsuura (2001) มีการทำเมมเบรนในรูปแบบแผ่น (Flat-sheet) ซึ่งใช้พีวีดีเอฟเป็นโพลิเมอร์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีไดเมทริลอะเซตาไมด์ เป็นตัวทำละลายโดยมีการเติมน้ำเป็นองค์ประกอบ 0-6.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า เมมเบรนที่ไม่มีการเพิ่มชั้นผิวของเมมเบรน (Unsupported membranes) มีส่วนประกอบของน้ำ 5.95 เปอร์เซ็นต์นั้นสามารถวัดขนาดรูพรุนที่ใหญ่ที่สุดประมาณ 0.4 ไมครอน จะเห็นได้ว่าขนาดรูพรุนที่ใหญ่ที่สุดของ Khayet and Matsuura (2001) มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรนที่มีการเติมพีวีพีของผู้วิจัยซึ่งเมมเบรินที่มีขนาดรูพรุนที่เล็กจะสามารถแยกวารแขวนลอยได้ดีกว่าเมมเบรนที่มีขนาดของรูพรุนที่ใหญ่กว่า

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.3.2 รัศมีของรูพรุนเฉลี่ย ความพรุนของเมมเบรนและความพรุนประสิทธิผลของเมมเบรน

การทดสอบหารัศมีของรูพรุนเฉลี่ยของเมมเบรนเส้นใยกลวงโดยวิธี Gas permeation test เพื่ออธิบายผลของพีวีพีที่มีต่อขนาดของรูพรุนโดยเฉลี่ยของเมมเบรนทั้ง 4 แบบ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการเติมพีวีพี ผลการทดสอบหารัศมีของรูพรุนเฉลี่ยและความพรุนประสิทธิผลของเมมเบรนเส้นใยกลวงแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลุ่มของเมมเบรนที่มีการเติมพีวีพีคือ เมมเบรน PVP1 เมมเบรนPVP3 และ เมมเบรนPVP5 มีขนาดของรูพรุนเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน ส่วนเมมเบรนที่ไม่มีการเติมพีวีพีคือ เมมเบรนNo-PVP จะมีรัศมีของรูพรุนเฉลี่ยน้อยที่สุดเนื่องจากไม่มีโมเลกุลของพีวีพีไปแทรกในสารละลายโพลิเมอร์และเกิดปฏิกิริยาการตกตะกอนกับสารที่ช่วยในการตกตะกอนทำให้จำนวนรูพรุนที่เกิดมีน้อย จากผลการทดสอบหารัศมีรูพรุนเฉลี่ยของเมมเบรน พบว่า การเติมพีวีพีทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่เติม แต่ความแตกต่างของการเติมพีวีพีที่ปริมาณต่างๆ ในช่วง 1 -5 เปอร์เซ็นต์นั้นส่งผลต่อขนาดของรูพรุนไม่ชัดเจนโดยทั้งหมดอยู่ในช่วงของรูพรุนที่มีขนาดที่ใกล้เคียงกันเดียวกัน

ส่วนเมมเบรน No-PVP มีรัศมีของรูพรุนเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ $6.37\pm0.01\times10^{-2}$ ไมครอน ทั้งนี้เนื่องจากเมมเบรนที่ไม่มีการเติมพีวีพีมีเพียงแค่โมเลกุลของตัวทำละลายเท่านั้นที่เข้าไปแทรกซึ่งการไม่มีโมเลกุลของพีวีพีรวมอยู่ด้วยทำให้การทดสอบหารัศมีของรูพรุนเฉลี่ยของเมมเบรนผลออกมามีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนทั้ง 4 แบบ ซึ่งผลการทดลองของ Wang *et al.* (1999) ที่ทำการทดลองผลิตเมมเบรนเส้นใยกลวงโดยใช้พีวีดีเอฟเป็นโพลิเมอร์ ไดเมทริลอะเซตาไมด์เป็นตัวทำละลายและมีพีวีพีเป็นสารเติมแต่งและเปรียบเทียบผลของการเติมพีวีพีที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10000 ระหว่าง 2 เปอร์เซ็นต์ และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีน้ำหนักของมวลโมเลกุลมีขนาดของมวลโมเลกุลที่ใกล้เคียงกับของผู้วิจัยที่ใช้พีวีพีที่มีน้ำหนักโมเลกุล 30000 โดยใช้ระยะห่างการฉีดเมมเบรนเท่ากับ 10 เซ็นติเมตร พบว่ารัศมีรูพรุนฉลี่ยของการเติมพีวีพี 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีรัศมีรูพรุนประมาณ 9.12×10^{-2} ไมครอน มากกว่ารัศมีรูพรุนเฉลี่ยของการเติมพีวีพี 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีรัศมีรูพรุนประมาณ 6.94×10^{-2} ไมครอน แต่การกรองน้ำของเมมเบรนที่มีการเติมพีวีพี 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าต่ำกว่าเมมเบรนที่มีการเติมพีวีพี 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักรวมไปถึงค่าความพรุนประสิทธิผลที่มีมากกว่าด้วย

การทดสอบความพรุนเชิงปริมาตรของเมมเบรน (Volumetric porosity) ด้วยวิธีการแทนที่ด้วยเอทานอลในขวดวัดความถ่วงจำเพาะปริมาตร 25 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นการหาอัตราส่วนความพรุนของเมม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เบรนต่อปริมาตร โดยเมมเบรนที่ใช้ประกอบด้วย เมมเบรน No-PVP เมมเบรน PVP1 เมมเบรน PVP3 และ เมมเบรน PVP5 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่า ความพรุนของเมมเบรน PVP5 เท่ากับ 50±0.13 เปอร์เซ็นต์ต่อปริมาตร 25 มิลลิลิตร รองลงมาเป็นเมมเบรน PVP3 เท่ากับ 49±0.13 เปอร์เซ็นต์ต่อปริมาตร 25 มิลลิลิตร จากนั้นจึงเป็นของเมมเบรน PVP1 เท่ากับ 43±0.08 เปอร์เซ็นต์ต่อปริมาตร 25 มิลลิลิตร และ 37±0.06 เปอร์เซ็นต์ต่อปริมาตร 25 มิลลิลิตรสำหรับเมมเบรน No-PVP โดยความพรุนของเมมเบรนนั้นขึ้นกับปริมาณสารเติมแต่งที่ผสมลงในโพลิเมอร์ และเมื่อสารเติมแต่งทำปฏิกิริยากับน้ำสารเติมแต่งก็จะละลายออกจากโพลิเมอร์ทำให้เกิดความพรุนภายในโครงสร้างของเมมเบรนและเกิดรูพรุนภายนอกและภายในท่อกลวง ดังนั้นเมมเบรน PVP3 และ เมมเบรน PVP5 จึงมีความพรุนมากกว่าเมมเบรน PVP1 และ เมมเบรน No-PVP เมื่อนำการทดลองมาเปรียบเทียบกับ Khayet and Matsuura (2001) มีการทำเมมเบรนในรูปแบบแผ่น (Flat-sheet) ซึ่งใช้พีวีดีเอฟเป็นโพลิเมอร์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีไดเมทริลอะเซตาไมด์ เป็นตัวทำละลายโดยมีการใส่น้ำเป็นองค์ประกอบ 0-6.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความพรุนของเมมเบรนที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบมากขึ้นจะมีแนวโน้มของการเกิดความพรุนในเมมเบรนมากขึ้นตามไปด้วยซึ่งค่าความพรุนที่ได้ของ Khayet and Matsuura (2001) อยู่ระหว่าง26.8±3.5 ถึง 74.9±3.7 เปอร์เซ็นต์

การทดสอบหาความพรุนประสิทธิผลของเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงโดยวิธี Gas Permeation test ใช้ในการอธิบายความคดเคี้ยวของรูพรุนภายในเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า เมมเบรนNo-PVP มีค่าความพรุนประสิทธิผลมากที่สุดเท่ากับ 8.76±0.31เมตร$^{-1}$ รองลงมาได้แก่ เมมเบรนPVP5 มีค่าความพรุนประสิทธิผล เท่ากับ 7.29±1.38 เมตร$^{-1}$ และ เมมเบรน PVP3 กับ เมมเบรนPVP1 ซึ่งมีค่าความพรุนประสิทธิผลที่ใกล้เคียงกัน คือ 6.31±0.26 เมตร$^{-1}$ และ 6.10±1.82 เมตร$^{-1}$ ตามลำดับ ค่าความพรุนประสิทธิผลของเมมเบรนเกิดขึ้นเนื่องจากความดันที่ใช้ฉีดเมมเบรนและการเติมพีวีพี ถ้าใช้ความดันในการฉีดมากก็จะทำให้เมมเบรนที่ฉีดออกมามีผนังที่หนาและมีผลทำให้ความคดเคี้ยวของรูพรุนมีมากด้วยเช่นกันและการเติมพีวีพีทำให้เกิดรูพรุนบนเมมเบร-นซึ่งถ้ามีจำนวนรูพรุนมากค่าความพรุนประสิทธิผลของเมมเบรนก็จะมีแนวโน้มที่มากตามไปด้วย

ในกรณีกลุ่มเมมเบรนเมมเบรนที่มีการเติมพีวีพีคือ เมมเบรนPVP5 เมมเบรน PVP3 และ เมมเบรนPVP1 มีค่าความพรุนประสิทธิผลของเมมเบรนใกล้เคียงกันเนื่องจากการเติมพีวีพีโมเลกุลพีวีพีจะไปแทรกในสารละลายโพลิเมอร์และเมื่อเกิดกระบวนการตกตะกอนกับสารช่วยในการตกตะกอนก็จะละลายออกไปทำให้เกิดรูพรุนที่เกิดขึ้นในเมมบรน โดยกระบวนการตกตะกอนของสารละลายโพลิเมอร์กับสารช่วยในการตกตะกอนถ้าเกิดขึ้นเร็วจะทำให้เกิดโครงสร้างนิ้วมือจำนวนมากมีผลทำให้ค่า

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ความพรุนประสิทธิผลมีมากขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้ากระบวนการตกตะกอนของสารละลายโพลิเมอร์กับสารช่วยในการตกตะกอนถ้าเกิดขึ้นช้าจะทำให้เกิดโครงสร้างฟองน้ำจำนวนมากซึ่งจะทำให้เมมเบรนที่ผลิตออกมาได้มีความแข็งแรงทนทานในการนำไปใช้งาน

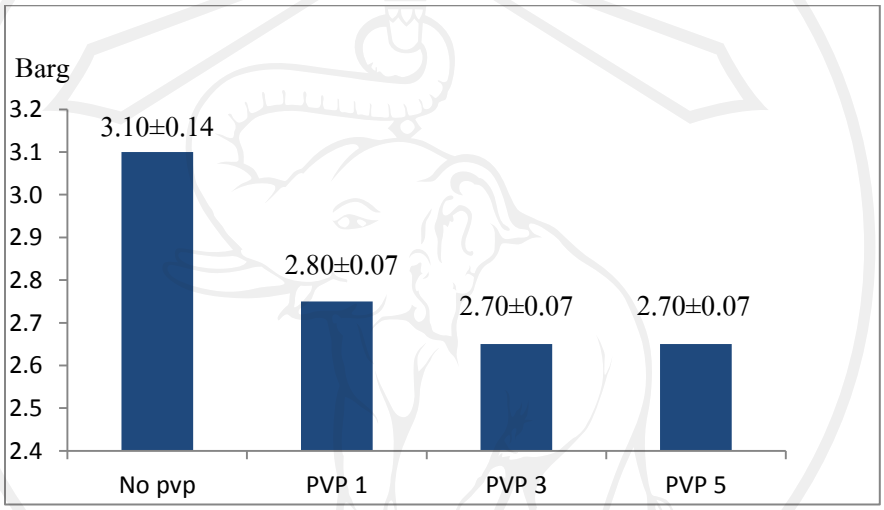
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับ Wang *et al.* (1999) ที่ทำการทดลองผลิตเมมเบรนเส้นใยกลวงโดยใช้พีวีดีเอฟเป็นโพลิเมอร์ ไดเมทริลอะเซตาไมด์เป็นตัวทำละลายและมีพีวีพีเป็นสารเติมแต่งซึ่งมีน้ำสะอาดเป็นสารช่วยในการตกตะกอนภายใน พบว่า ค่าความพรุนประสิทธิผลเมมเบรนที่ทำการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่าความพรุนประสิทธิผลของผู้วิจัยที่นำมาเปรียบเทียบอยู่มากเนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลของพีวีพีที่ผู้วิจัยใช้ทำการทดลองกับการทดลองของผู้ที่นำมาอ้างอิงนั้นมีการใช้พีวีพีที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกัน มีความสอดคล้องกับค่าน้ำหนักโมเลกุลของพีวีพีที่มีมากมีผลทำให้ค่าความพรุนประสิทธิผลของเมมเบรนมีค่าน้อยกว่าอันเนื่องมาจากโครงสร้างรูพรุนมีความคดเคี้ยวมากทำให้ค่าความพรุนประสิทธิผลของเมมเบรนที่มีการเติมพีวีพีมีค่าน้อยกว่า

4.3.3 การหาความดันสูงสุดที่เมมเบรนรองรับได้ (Bursting Pressure)

เมมเบรนเส้นใยกลวงที่ผลิตจากพีวีดีเอฟซึ่งในการนำเมมมเบรนไปใช้กรองน้ำนั้นจะมีการใช้ความดันเพื่อให้น้ำผ่านเมมเบรนแตกต่างกันไป การทดสอบหาความดันสูงสุดที่เมมเบรนรองรับได้นี้เพื่ออธิบายถึงความทนทานของเมมเบรนต่อความดันที่เพิ่มขึ้นโดยเริ่มจาก 0.1 บาร์เกจ เป็นต้นไป ผลการทดลองหาความดันสูงสุดที่เมมเบรนรองรับได้แสดงในรูปที่ 0.7 พบว่า เมมเบรน No-PVP สามารถรับความดันได้มากที่สุดที่ 3.10±0.14 บาร์เกจ(0.31±0.14 เมกะปาสคาล) รองลงมาคือเมมเบรน PVP1 สามารถรับความดันได้ที่ 2.80±0.07 บาร์เกจ(0.28±0.07 เมกะปาสคาล) ส่วนเมมเบรน PVP5 และเมมเบรน PVP3 สามารถรับความดันได้เท่ากันที่ 2.70±0.14 บาร์เกจ(0.27±0.14 เมกะปาสคาล) ซึ่งเมมเบรน PVP5 และเมมเบรน PVP3 จะเห็นได้ว่ามีความทนทานน้อยกว่าเมมเบรนPVP 1 และเมมเบรน No PVP อันเนื่องมาจากโครงสร้างของเมมเบรนที่มีการเติมพีวีพี 5 เปอร์เซ็นต์ และ 3 เปอร์เซ็นต์ นั้นมีรูปร่างเป็นโพรงขนาดใหญ่คล้ายนิ้วมือและมีค่าความพรุนของเมมเบรนมากกว่าเมมเบรนที่มีการเติมพีวีพี 1 เปอร์เซ็นต์ และไม่มีการเติมพีวีพีดังที่กล่าวมาแล้วในเบื้องต้นทำให้ความแข็งแรงทางโครงสร้างของเมมเบรนที่มีการเติมพีวีพี 5 เปอร์เซ็นต์ และ 3 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ในส่วนของผนังเมมเบรนมีความทนทานต่อความดันลดน้อยลง ทำให้เมื่อนำมาทดสอบที่ความดันสูงๆเส้นเมมเบรนจะเกิดการฉีกขาดจากกันได้ง่าย เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับ Liu *et al.* (2009) ที่มีการทำเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงโดยใช้พีวีดีเอฟเป็นโพลิเมอร์ และมีการผสม PET ลงในเมมเบรน ในส่วนของเมม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เบรนที่นำมาทดสอบความทนทานของเมมเบรนต่อความดันพบว่าเมมเบรนที่ใช้พีวีดีเอฟเป็นโพลิเมอร์ในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและไม่มีการผสม PET จะเกิดการฉีกขาดที่ความดัน 0.24 เมกะปาสคาล และ เมมเบรนที่มีการผสมPETจะเกิดการฉีกขาดที่ความดัน 0.23 เมกะปาสคาล จากผลการทดลองจะเห็นว่า PET มีผลน้อยมากในการเพิ่มความทนทานของเมมเบรนต่อความดันที่เพิ่มขึ้น



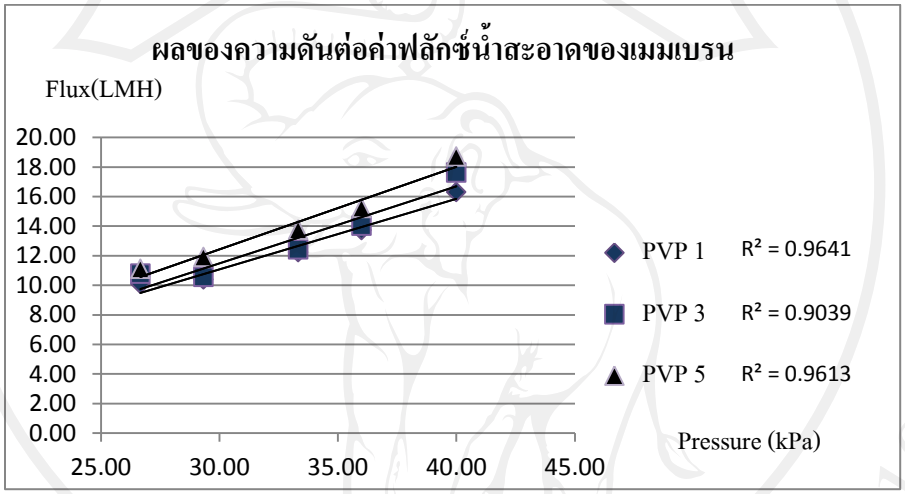
รูปที่ 0.7 ความทนทานของเมมเบรนต่อความดัน

4.3.4 การทดสอบฟลักซ์น้ำสะอาด

การทดสอบฟลักซ์น้ำสะอาดของเมมเบรนเส้นใยกลวงเพื่อทดสอบเมมเบรนเส้นใยกลวงสามารถนำไปใช้ในการกรองน้ำได้ เมมเบรนที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้ประกอบไปด้วย เมมเบรน PVP1 เมมเบรน PVP3 และ เมมเบรน PVP5 ในส่วนของเมมเบรน No-PVP ไม่สามารถนำมาใช้ในการทดสอบกรองน้ำได้เนื่องมาจากปัจจัย 2 อย่าง ได้แก่ ค่าความพรุนของเมมเบรนและรัศมีรูพรุนเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 2 โดยเมมเบรน No-PVP มีค่าความพรุนอยู่ที่อยู่ที่ 37.00±0.06 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนทั้ง 4 แบบ ซึ่งความพรุนเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดการซึมผ่านของโมเลกุล ดังนั้นค่าความพรุนถ้ามีค่ามากที่การซึมผ่านของของโมเลกุลก็มีมาก ในกรณีที่ความพรุนมีค่าน้อยการซึมผ่านของเมมเบรนก็มีค่าน้อยตามไปด้วย อีกปัจจัยคือรัศมีรูพรุนเฉลี่ยที่ปรากฏบนผิวของเมมเบรน ในกรณีที่รัศมีรูพรุนเฉลี่ยมีขนาดเล็กมากโอกาสที่โมเลกุลของน้ำสะอาดที่จะผ่านรูพรุนเมมเบรนก็จะน้อยตามไปด้วย ดังนั้นค่ารัศมีรูพรุนเฉลี่ยของเมมเบรน No-PVP ทำการทดสอบได้เท่ากับ $6.37\pm0.01\times10^{-2}$ไมครอน จึงมีผลทำให้ค่าการทดสอบกรองน้ำของเมมเบรนชนิดนี้ออกมามีค่าน้อยมาก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สำหรับผลการทดลองการนำเมมเบรนทั้ง 3 แบบ คือ เมมเบรน PVP1 เมมเบรน PVP3 และ เมมเบรน PVP5 มากรองน้ำสะอาด พบว่า ทั้งเมมเบรน PVP1 เมมเบรน PVP3 และ เมมเบรน PVP5 มีแนวโน้มของค่าฟลักซ์น้ำสะอาดเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่ารัศมีรูพรุนเฉลี่ยของเมมเบรนทั้ง 3 แบบมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราของพีวีพีที่เติมกับความดันที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากค่าความดันที่เพิ่มขึ้นสามารถดันจำนวนโมเลกุลของน้ำสะอาดให้ผ่านรูพรุนของเมมเบรนได้มากขึ้นด้วย



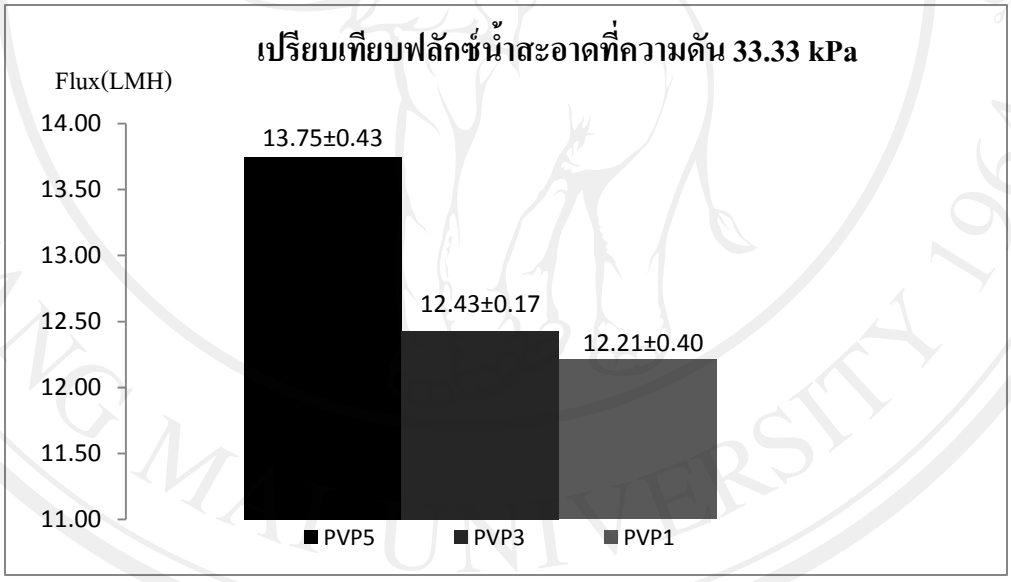
รูปที่ 0.8 ผลของความดันต่อค่าฟลักซ์น้ำสะอาดของเมมเบรน

LMH= Liter/m^2/hr (ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)

จากการทดลองเปรียบเทียบการกรองน้ำสะอาดที่ความดัน 33.33 กิโลปาสคาลแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นค่าความดันที่อยู่ในระดับปานกลางสำหรับใช้ดันโมเลกุลของน้ำให้ผ่านเมมเบรนเส้นใยกลวง ซึ่งการใช้ความดันที่สูงเกินไปจะทำให้เมมเบรนที่ทดสอบเกิดการบีบตัวจนทำให้โครงสร้างของเมมเบรนชำรุดซึ่งมีผลต่อฟลักซ์น้ำสะอาดที่วัดได้ การที่เมมเบรนจะกรองน้ำได้มากหรือน้อยขึ้นกับ 3ปัจจัย ได้แก่ ค่าความดันที่ใช้ในการกรองในกรณีที่ใช้ความดันมากก็จะมีผลทำให้เมมเบรนสามารถกรองน้ำได้มากขึ้นด้วย ค่าสภาพการซึมผ่านของเมมเบรนทำได้โดยวัดค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ไหลผ่านเมมเบรนตามความเปลี่ยนแปลงของความดันโดยมีการกำหนดว่าเมมเบรนมีรูพรุนเป็นรูปทรงกระบอกโดยใช้สมการของ Hagen-Poiseuille และค่าความต้านทานของเมมเบรนจะเป็นตัวบอกถึงคุณสมบัติการชอบน้ำของเมมเบรน ผลการทดลอง พบว่า เมมเบรน PVP5 สามารถวัดค่าฟลักซ์น้ำสะอาดได้มากที่สุด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เท่ากับ 13.75±0.43 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง สามารถวัดค่าสภาพการซึมผ่านได้เท่ากับ 1.146×10^{-10} $m^3/m^2.s.Pa$ และมีค่าความต้านทานของเมมเบรนเท่ากับ $8.73\times10^{12} m^{-1}$ รองลงไปได้แก่ เมมเบรน PVP3 เท่ากับ 12.43±0.17 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ค่าสภาพการซึมผ่านเท่ากับ 1.036×10^{-10} $m^3/m^2.s.Pa$ มีค่าความต้านทานของเมมเบรนเท่ากับ $9.65\times10^{12} m^{-1}$ และ ค่าฟลักซ์น้ำสะอาดของเมมเบรน PVP1 เท่ากับ 12.21±0.40 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ค่าสภาพการซึมผ่านที่วัดได้เท่ากับ 1.017×10^{-10} $m^3/m^2.s.Pa$ มีค่าความต้านทานของเมมเบรนเท่ากับ $9.83\times10^{12} m^{-1}$ โดยเมมเบรน PVP5 สามารถวัดค่าฟลักซ์น้ำสะอาดได้มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบนทั้ง 3 แบบที่กล่าวมาข้างต้นเนื่องจากผลของการเติมพีวีพีซึ่งมีส่วนช่วยให้โครงสร้างของเมมเบรนมีจำนวนรูพรุนกับความพรุนของเมมเบรนมากขึ้น ประกอบกับค่าความต้านทานของเมมเบรน PVP5 มีค่าน้อยกว่า เมมเบรน PVP3 และ เมมเบรน PVP1 ทำให้ค่าฟลักซ์น้ำสะอาดของเมมเบรน PVP5 ให้ค่าฟลักซ์น้ำสะอาดสูงกว่าที่ความดันเท่ากัน



รูปที่ 0.9 เปรียบเทียบฟลักซ์น้ำสะอาดที่ความดัน 33.33 กิโลปาสคาล

เมื่อนำผลการทดลองฟลักซ์น้ำสะอาดที่ความดัน 33.33 กิโลปาสคาล มาเปรียบเทียบกับ Liu *et al*. (2009) ที่มีการทำเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงโดยใช้พีวีดีเอฟเป็นโพลิเมอร์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีการผสม PET ลงในเมมเบรน เรื่องการทดสอบหาฟลักซ์น้ำสะอาดของเมมเบรนพบว่าเมมเบรนที่ผู้วิจัยผลิตได้นั้นมีความสามารถในการกรองน้ำได้น้อยกว่าเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงโดยใช้พีวีดีเอฟเป็นโพลิเมอร์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีการผสม PET ของ Liu *et al*. (2009) สามารถวัดค่าฟลัก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

น้ำสะอาดได้ประมาณ 50 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมงที่ความดัน 30 kPa ค่าสภาพการซึมผ่านที่วัดได้เท่ากับ 4.63×10^{-13} m^3/m^2.s.Pa มีค่าความต้านทานของเมมเบรนเท่ากับ 2.16×10^{12} m^{-1} และใช้ความดันที่ใช้คือประมาณ 30 กิโลปาสคาล ซึ่งในผลการทดลองได้วิเคราะห์ผลของ PET ที่ผสมในเมมเบรนว่ามีส่วนทำให้ขนาดของผนังเมมเบรนหนาขึ้น 1.76 เท่าเมื่อเทียบกับเมมเบรนที่ไม่มีการเติม PET ทำให้ค่าการถ่ายเทมวลสารเพิ่มมากขึ้นที่ผนังเมมเบรน

4.4 การผลิตน้ำสะอาดจากเมมเบรน

การทดลองในส่วนนี้ทำโดยนำเมมเบรนไปทำการกรองน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อศึกษาศักยภาพการใช้ประโยชน์เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงที่ผลิตขึ้น ซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงคุณภาพของน้ำที่ผลิตจากเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง สำหรับขั้นตอนการกรองน้ำดิบใช้เมมเบรนที่มีขนาดความยาว 15 เซ็นติเมตรจำนวน 9 เส้น ความดันที่ใช้ในการทำการกรองน้ำอยู่ที่ 33.33 กิโลปาสคาล การเดินระบบใช้เวลา 7 นาที หยุด 1 นาทีเพื่อให้เมมเบรนเส้นใยกลวงมีการคลายตัว และมีการเติมอากาศมากเกินพอ ค่าฟลักซ์ในการกรองน้ำดิบเฉลี่ยของเมมเบรน PVP1 เท่ากับ 0.23 $ม^3/ม^2$-วัน เมมเบรน PVP3 เท่ากับ 0.25 $ม^3/ม^2$-วัน และ เมมเบรน PVP5 เท่ากับ 0.29 $ม^3/ม^2$-วัน โดยมีค่าความต้านทานฟาล์วลิ่งของเมมเบรน PVP1 เท่ากับ $2.70\text{x}10^{12}$ m^{-1} เมมเบรน PVP3 เท่ากับ $1.88\text{x}10^{12}$ m^{-1} และ เมมเบรน PVP5 เท่ากับ $1.19\text{x}10^{12}$ m^{-1} ทำการวัดค่า ฟลักซ์ของน้ำทุกๆวัน และทำการล้างย้อนเป็นเวลาประมาณ 3 นาที ทุกๆ 2-3 วัน และ การวัดค่าของพารามิเตอร์ทำทั้งก่อนการกรองและหลังการกรองด้วยเมมเบรน

4.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำที่ผ่านการกรอง

คุณสมบัติทางกายภาพ เป็นคุณสมบัติของน้ำที่เกิดขึ้นจากมีอนุภาคของสารมาทำให้คุณสมบัติอันนี้เปลี่ยนแปลงไป การนำเมมเบรนมาใช้กรองน้ำดิบเมื่อทำการเดินระบบนานๆเมมเบรนที่ใช้กรองน้ำจะมีประสิทธิภาพลดลงเนื่องจากการเกิดฟาล์วลิ่ง (fouling) ที่ผิวภายนอกของเมมเบรนซึ่งการเกิดฟาล์วลิ่งเกิดจากอนุภาคของสารที่อยู่ในน้ำที่ไม่สามารถผ่านรูพรุนบนผิวภายนอกของเมมเบรนได้และเมื่อเวลาผ่านไปอนุภาคเหล่านี้จะเกาะติดที่ผิวเมมเบรนเป็นชั้นหนาขึ้นเรียกว่าเค็ก (cake) ผลที่ตามมาคือจะทำให้การกรองน้ำต้องใช้ความดันที่มากขึ้นกว่าเดิมซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก จึงต้องมีการทำความสะอาดตัวเมมเบรนซึ่งวิธีการที่ใช้ทำความสะอาดทั่วไป คือ การล้างย้อน (Backwash) และ ทำความสะอาดผิวเมมเบรนภายนอกด้วยคลอรีนน้ำเพื่อให้เมมเบรนสามารถกรองน้ำได้ดีดังเดิม ในการทดลองของผู้วิจัยตัวที่บ่งบอกถึงการอุดตันที่ผิวของเมมเบรนคือค่า Transmembrane Pressure ในกรณีที่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ความดันที่ใช้กรองมีค่าความดันที่มากกว่าค่าความดันเดิมที่ใช้กรองแสดงว่าเกิดการอุดตันที่ผิวหน้าของเมมเบรนต้องทำการล้างย้อนและถอดเมมเบรนออกมาทำความสะอาดผิวหน้าเพื่อให้เมมเบรนสามารถกรองน้ำได้มีประสิทธิภาพดังเดิม ในการทดลองนี้กำหนดการล้างย้อนทุกๆ 2 วันวันละ 3 นาทีเพื่อลดการอุดตันที่ผิวของเมมเบรน ซึ่งผลการกรองน้ำดิบทางกายภาพแสดงในตาราง 4.3

ตาราง 0.4 ผลทางกายภาพของการกรองน้ำดิบและน้ำที่ผ่านการกรองเมมเบรนเส้นใยกลวงที่ผลิตตามอัตราส่วนการเติมพีวีพี

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	PVP1	PVP3	PVP5	มาตราฐานน้ำดื่ม (WHO)
ความขุ่น (เอ็นทียู)	900.75±1.06	0.58±0.04	0.67±0.05	0.58±0.15	5
ของแข็งแขวนลอย (มก/ล.)	937.80±0.00	ND	ND	ND	-
สีในน้ำ (หน่วยแพลตตินัมโคบอลล์)	7.88±0.01	0.23±0.00	0.28±0.01	0.38±0.02	5

- ND คือค่าที่น้อยกว่า 0.01

4.4.2 ค่าความขุ่น (Turbidity)

การวัดความขุ่นของน้ำใช้วิธีการวัดปริมาณแสงที่สะท้อนออกมาในทิศตั้งฉากหลังจากที่แสงกระทบกับความขุ่น (Nephelometry) ซึ่งจากการทดลองนำน้ำดิบมาทำการทดสอบวัดค่าความขุ่น พบว่าค่าความขุ่นของน้ำดิบอยู่ที่ 900.75±1.06 เอ็นทียู ดังแสดงในตารางที่ 4.4 จะเห็นว่าค่าดังกล่าวมีค่ามากเนื่องจากระยะเวลาที่ไปเก็บน้ำเพื่อที่จะนำมาวิเคราะห์นั้นอยู่ในช่วงฤดูฝนทำให้ค่าความขุ่นที่มีค่ามากนั้นมาจาก ตะกอนดินที่อยู่บริเวณผิวหน้าน้ำเป็นส่วนใหญ่ เมื่อนำน้ำดิบมาทดสอบกรองด้วยเมมเบรนดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า การกำจัดความขุ่นของเมมเบรนทั้งสามแบบมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นอยู่ที่ 99.93 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป โดยค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการกรองโดยเมมเบรน PVP1 วัดค่าความ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ขุ่นได้เท่ากับน้ำที่ผ่านการกรองโดยเมมเบรน PVP5 ที่ 0.58±0.04 และ 0.58±0.15 เอ็นทียู ตามลำดับ และน้ำที่ผ่านการกรองโดยเมมเบรน PVP3 สามารถวัดความขุ่นได้เท่ากับ 0.67±0.05 เอ็นทียู

รูปที่ 0.10 เปรียบเทียบความขุ่นของน้ำก่อนกรองกับน้ำหลังกรองด้วยเมมเบรน

เมื่อนำผลการทดลองการกำจัดความขุ่นดังแสดงในตารางที่ 4.4 มาเปรียบเทียบกับการทดลองของนลินี (2543) ที่มีการใช้เมมเบรนไมโครฟิลเตรชั่นในการผลิตน้ำประปา ทดลองที่สภาวะกรองน้ำในช่วงความขุ่นสูงในถังควบคุมการไหล 3112 เอ็นทียู รูพรุนของเมมเบรนเท่ากับ 0.1 ไมครอน พบว่าที่ค่าฟลักซ์ 0.2 $ม^3/ม^2$-วัน สามารถวัดค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการกรองโดยเมมเบรนได้ 0.16 เอ็นทียู ซึ่งค่าที่ได้มีความต่างกันเนื่องมาจากเมมเบรนที่ผู้วิจัยทำการผลิตนั้นมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเมมเบรนใหญ่กว่านลินี (2543) ทำให้การวัดค่าความขุ่นของน้ำหลังการกรองของผู้วิจัยมีค่ามากกว่านลินี (2543)

ในกรณีนำผลการทดลองการกำจัดความขุ่นดังแสดงในตารางที่ 4.4 มาเปรียบเทียบกับ Kunikane et. al (1995) ที่ทำการทดลองใช้เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงมาผลิตน้ำสะอาดในชุมชนโดยใช้ระบบไมโครฟิลเตรชั่นจำนวน 14 ระบบ ซึ่งมีการทำการตกตะกอนด้วยโพลีอลูมินัมคลอไรด์ พบค่าความขุ่นของน้ำหลังกรองได้ประมาณ 0.17 เอ็นทียู ซึ่งค่าที่ได้มีความต่างกันมากอันเนื่องมาจากการที่ระบบเมมเบรนมีการบำบัดด้วยการตกตะกอนเบื้องต้นมาก่อนแล้วจึงเข้าระบบการกรองด้วยเมมเบรน ทำให้ค่าความขุ่นที่วัดได้มีค่าน้อย รวมไปถึงขนาดรูพรุนของเมมเบรนที่ใช้ในการกรองมีขนาดน้อยกว่าเมมเบรนของผู้วิจัยทำให้น้ำที่ผ่านการกรองมีค่าความขุ่นลดลงมาก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ความขุ่นของแหล่งน้ำผิวดินจะมีค่าสูงและแปรปรวนไปตามฤดูกาล ในอดีตมาตราฐานน้ำดื่มมักจำแนกความขุ่นรวมอยู่ในหัวข้อความน่าใช้ของน้ำและยอมให้มีปริมาณความเข้มข้นได้ถึง 5 เอ็นทียู แต่ในปัจจุบันระดับความขุ่นที่ยอมรับได้ในน้ำประปาสาธารณะของประเทศที่มีความเจริญสูงมีค่าลดลงเหลือเพียง 1 เอ็นทียูหรือต่ำกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำที่มีความขุ่นมากมีโอกาสปนเปื้อนซีสต์ที่มีตัวอ่อนของไกอาเดียและคริปโตสปอริเดียมพาวัม ซึ่งทำให้เกิดการเจ็บป่วยในระบบทางเดินอาหาร การวัดค่าความขุ่นและการวัดจำนวนอนุภาคจึงเป็นวิธีที่นิยมในการวัดทางอ้อมของปริมาณการปนเปื้อนปรสิต 2 ชนิด (มั่นสิน, 2543)

4.4.3 ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid)

การหาปริมาณของแข็งแขวนลอยสามารถทำได้โดยการกรองตัวอย่างน้ำผ่านกระดาษกรองไฟเบอร์กลาส ขนาดรู 1.2 ไมครอน โดยของแข็งที่ติดอยู่บนกระดาษกรองจะเป็นของแข็งแขวนลอย จากการทดลองวัดของแข็งแขวนลอยในน้ำวัดได้ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ปริมาณของของแข็งแขวนลอยในน้ำดิบมีค่าเท่ากับ 937.80±0.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และของแข็งแขวนลอยในน้ำที่ผ่านการกรองวัดไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากค่าที่ได้น้อยกว่า 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร การหาปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำดิบเพื่อใช้ในการบ่งบอกได้ว่าน้ำดิบที่นำมาใช้ในการทดลองกรองผ่านเมมเบรนมีสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ปะปนอยู่จนทำให้รบกวนต่อการวัดความขุ่น ซึ่งของแข็งแขวนลอยที่วัดได้จากน้ำดิบที่ยังไม่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน

4.4.4 ค่าสีในน้ำ (Colour)

สีในน้ำสามารถวัดหาค่าขนาดความเข้มข้นของสีด้วยเครื่องเทียบสีกับสีมาตรฐานที่ได้มาจากสารแพลตทินัม สำหรับการวัดค่าสีของน้ำดิบ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 สามารถวัดค่าสีได้เท่ากับ 7.875±0.0071 หน่วยแพลตตินัมโคบอลล์ และ เมื่อนำน้ำดิบมากรองผ่านเมมเบรน PVP1 เมมเบรน PVP3 และเมมเบรน PVP5 พบว่าค่าสีในน้ำวัดได้มีค่าเท่ากับ 0.2300 0.28±0.0071 และ 0.38±0.0212 หน่วยแพลตตินัมโคบอลล์ จะเห็นได้ว่าน้ำที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรนสามารถลดปริมาณของสีในน้ำได้และน้ำที่ผ่านการกรองจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

เมื่อนำผลการทดลองของการลดปริมาณของสีในน้ำด้วยเมมเบรนดังแสดงในตารางที่ 4.4 มาเปรียบเทียบกับการทดลองของนลินี (2543) ที่มีการใช้เมมเบรนไมโครฟิลเตรชั่นในการผลิตน้ำประปาโดยมีรูพรุน 0.1 ไมครอนเดินระบบที่ค่าฟลักซ์ 0.2 $ม^3/ม^2$-วัน ในน้ำที่มีค่าความขุ่นสูงในถังควบคุมการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ไหลเท่ากับ 3112 เอ็นทียู (NTU) พบว่า ค่าสีในน้ำดิบก่อนกรองของนลินี (2543) มีค่าประมาณ 1089 หน่วยแพลตตินัมโคบอลล์ เมื่อนำน้ำดิบมากรองผ่านเมมเบรนแล้วทำการวัดค่าสีในน้ำได้ประมาณ 4.4-7.6 หน่วยแพลตตินัมโคบอลล์ คำนวณเปอร์เซ็นต์ในการกำจัดสีได้ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์ สังเกตได้ว่าสีในน้ำดิบของนลินี (2543) มีค่ามากเนื่องจากการเดินระบบของนลินี (2543) เป็นการเดินระบบแบบต่อเนื่องทำให้ค่าสีสะสมในถังน้ำดิบมีค่าสูง ส่วนของผู้วิจัยเป็นการเดินระบบแบบกึ่งเท ทำให้ค่าสีในน้ำแตกต่างกันมาก แต่ในส่วนของประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำของเมมเบรนมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

4.4.5 คุณสมบัติทางเคมีของน้ำที่ผ่านการกรอง

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเป็นการวิเคราะห์เพื่อใช้ในการอธิบายการถึงสารอินทรีย์และอนินทรีย์ อาทิ เช่น แร่ธาตุและกลุ่มไอออนต่างๆที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ

ตารางที่ 0.5 ผลทางเคมีของการกรองน้ำดิบและน้ำที่ผ่านการกรองเมมเบรนเส้นใยกลวงที่ผลิตตามอัตราส่วนการเติมพีวีพี

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	PVP 1	PVP 3	PVP 5	มาตราฐานน้ำดื่ม (WHO)
ซีโอดี (มก./ล.)	33.17±3.43	7.59±2.03	8.50±2.35	6.68±2.44	-
เอฟซีโอดี (มก./ล.)	5.21±1.77	3.06±0.03	1.64±0.17	1.79±0.67	-
ทีโอซี (มก./ล.)	6.43±1.37	1.57±0.29	1.70±0.26	1.85±0.17	-
พีเอช	7.12±0.02	7.01±0.02	6.99±0.01	7.12±0.02	7.00-8.50
แคลเซียมไอออน (มก./ล.ในรูปของหินปูน)	14.03±2.83	11.36±4.72	9.03±2.35	8.95±2.46	75
คลอไรด์ไอออน (มก./ล.)	6.75±1.06	2.53±0.75	2.12±0.53	1.50±0.71	250

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.4.6 ซีโอดี (COD)

การกรองน้ำดิบในงานวิจัยชิ้นนี้มีการวัดค่าซีโอดีโดยวิธี Open reflux ซึ่งการทดลองวัดค่าซีโอดีของน้ำดิบดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าน้ำดิบมีค่าซีโอดีเท่ากับ 33.17±3.43 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อนำน้ำดิบมากรองผ่านเมมเบรนแล้วทำการวัดค่า พบว่า ค่าซีโอดีในน้ำที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน PVP5 สามารถลดค่าซีโอดีให้เหลือเพียง 6.68±2.44 มิลลิกรัมต่อลิตร คำนวณประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีอยู่ที่ 79.86% รองลงมาคือน้ำที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน PVP1วัดค่าซีโอดีในน้ำได้เท่ากับ 7.59±2.03 มิลลิกรัมต่อลิตร คำนวณประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีอยู่ที่ 77.12 เปอร์เซ็นต์ และน้ำที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน PVP3 สามารถวัดค่าซีโอดีในน้ำได้เท่ากับ 8.5±2.35 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีอยู่ที่ 74.37 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าเมมเบรน PVP5 มีประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบในเมมเบรนทั้ง 3 แบบ

4.4.7 เอฟซีโอดี (FCOD)

การวัดค่าเอฟซีโอดีจะช่วยในการวิเคราะห์คุณภาพของน้ำได้ดีในกรณีที่ค่าซีโอดีมีการแปรปรวนสูง ซึ่งการทดลองวัดค่าซีโอดีของน้ำดิบดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่ามีค่าซีโอดีเท่ากับ 5.21±1.77 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อนำน้ำดิบมากรองผ่านเมมเบรนแล้วทำการวัดค่า พบว่า ค่าซีโอดีในน้ำที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน PVP3 สามารถลดค่าซีโอดีให้เหลือเพียง 1.64±0.17 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมาคือน้ำที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน PVP5 วัดค่าซีโอดีในน้ำได้เท่ากับ 1.795±0.67 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน PVP1 สามารถวัดค่าซีโอดีในน้ำได้เท่ากับ 3.06±0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.4.8 พีเอช (pH)

จากการนำน้ำดิบมาทำการทดลองหาค่าพีเอชดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าน้ำดิบมีค่าพีเอชเท่ากับ 7.12±0.02 และ เมื่อนำน้ำดิบมากรองผ่านกระบวนการเมมเบรนทั้ง 3 แบบ พบว่า น้ำที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน PVP3 วัดค่าพีเอชได้เท่ากับ 6.99±0.01 รองลงมาคือ น้ำที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน PVP1 วัดค่าพีเอชได้เท่ากับ 6.99±0.01 และน้ำที่ผ่านการกรองด้วย เมมเบรน PVP5 วัดค่าพีเอชได้เท่ากับ 7.12±0.02 จะเห็นว่าเมมเบรนทั้ง 3 แบบวัดค่าพีเอชได้ประมาณ 7 ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.4.9 ทีโอซี (TOC)

การกรองน้ำดิบในงานวิจัยชิ้นนี้มีการวัดค่าทีโอซีในน้ำโดยวิธีเผาให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และวัดค่าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น (High Temperature Combustion Method) โดยค่าทีโอซีแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า ค่าทีโอซีในน้ำดิบมีค่าเท่ากับ 6.43±1.37 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อนำน้ำดิบมากรองผ่านกระบวนการเมมเบรน พบว่า ค่าทีโอซีของน้ำที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน PVP1 สามารถสามารถกำจัดค่าทีโอซีในน้ำได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบในเมมเบรนทั้ง 3 แบบ ซึ่งวัดค่าได้เท่ากับ 1.57±0.29 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมาคือ ค่าทีโอซีของน้ำที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน PVP3 มีค่าเท่ากับ 1.70±0.26 มิลลิกรัมต่อลิตร และ ค่าทีโอซีของน้ำที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน PVP5 มีค่าเท่ากับ 1.70±0.26 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะเห็นว่าน้ำที่ผ่านการกรองด้วยกระบวนการเมมเบรนทั้ง 3 แบบ มีประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซีโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 73 เปอร์เซ็นต์

เมื่อนำผลการทดลองของการหาค่าทีโอซีในน้ำดังแสดงในตารางที่ 4.4 มาเปรียบเทียบกับการทดลองของนลินี (2543) ที่มีการใช้เมมเบรนไมโครฟิลเตรชั่นในการผลิตน้ำประปา ความสามารถของเมมเบรนในการลดค่าทีโอซี โดยใช้เมมเบรนที่มีรูพรุน 1 ไมครอน เดินระบบที่ฟลักซ์ 0.2 $ม^3/ม^2$-วัน พบว่าค่าทีโอซีเริ่มต้นของนลินี (2543) อยู่ในช่วงประมาณ 3.7-4.8 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำน้ำมากรองผ่านกระบวนการเมมเบรนและทำการวัดค่าทีโอซีพบว่ามีค่าทีโอซีเหลืออยู่ในน้ำประมาณ 2.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งค่าทีโอซีที่ได้มีมากกว่าน้ำที่ผ่านการกรองโดยเมมเบรนทั้ง 3 แบบ

4.4.10 แคลเซียม (Calcium)

เมื่อนำน้ำดิบมาผ่านการกรองด้วยกระบวนการเมมเบรนแล้วทำการวัดค่าแคลเซียมไอออนโดยวิธี Titrimetric ดังแสดงในตาราง 4.5 พบว่า เมมเบรน PVP5 สามารถลดปริมาณแคลเซียมไอออนได้มากที่สุดในเมมเบรนทั้ง 3 แบบ โดยน้ำที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน PVP5 มีค่าแคลเซียมไอออนเท่ากับ 8.95 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของหินปูน รองลงมาคือ น้ำที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน PVP3 มีค่าแคลเซียมไอออนเท่ากับ 9.03 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของหินปูน และ เมมเบรน PVP1 มีความสามารถลดปริมาณแคลเซียมไอออนเท่ากับ 11.36 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของหินปูน จะเห็นได้ว่าเมมเบรนทั้งสามแบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคลเซียมไอออนอยู่ในเกณฑ์ที่ดีโดยค่าแคลเซียมที่วัดได้ไม่เกินมาตราฐานที่มาตราฐานน้ำดื่ม (WHO) กำหนด กลไกในการกำจัดแคลเซียมสืบเนื่องมาจากพีวีดีเอฟเป็นโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) เมื่อดูจากโครงสร้างของโพลิเมอร์พีวีดีเอฟจะเห็นว่ามีไฮโดรเจนที่สามารถแตกตัวออกไปเมื่อถูกน้ำอยู่ตลอดทำให้เมื่อนำไปผลิตเป็นเมมเบรนประจุที่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผิวของเมมเบรนจึงมีประจุลบทำให้แคลเซียมไอออนบางส่วนถูกดูดติดที่ผิวเมมเบรน ดังนั้นน้ำที่ผ่านการกรองจึงมีปริมาณแคลเซียมไอออนลดลง

4.4.11 คลอไรด์ (Chloride)

จากการทดลองหาปริมาณคลอไรด์ไอออนในน้ำดิบโดยวิธีอาร์เจนโทเมตริก (Argentometric) ได้ค่าคลอไรด์ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่ามีค่าเท่ากับ 6.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งค่าที่ได้จะเห็นว่าค่าคลอไรด์ไอออนในน้ำดิบมีค่าไม่เกินค่าที่มาตราฐานน้ำดื่ม (WHO) กำหนด และเมื่อนำน้ำดิบมาผ่านการกรองด้วยกระบวนการเมมเบรนแล้วทำการวัดค่าคลอไรด์ไอออน พบว่า เมมเบรน PVP5 สามารถลดปริมาณคลอไรด์ไอออนได้มากที่สุดในเมมเบรนทั้ง 3 แบบ โดยน้ำที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน PVP5 มีค่าคลอไรด์ไอออนเท่ากับ 1.50 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมาคือ น้ำที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน PVP3 มีค่าคลอไรด์ไอออนเท่ากับ 9.03 มิลลิกรัมต่อลิตร และ เมมเบรน PVP1 มีค่าคลอไรด์ไอออนเท่ากับ 2.53 มิลลิกรัมต่อลิตร กลไกในการกำจัดคลอไรด์ไอออนสืบเนื่องมาจากพีวีดีเอฟเป็นโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) เมื่อดูจากโครงสร้างของโพลิเมอร์พีวีดีเอฟจะเห็นว่ามีไฮโดรเจนที่สามารถแตกตัวออกไปเมื่อถูกน้ำอยู่ตลอดทำให้เมื่อนำไปผลิตเป็นเมมเบรนประจุที่ผิวของเมมเบรนจึงมีประจุลบทำให้คลอไรด์ไอออนส่วนมากถูกผลักประจุออกไป จะเห็นได้ว่าเมมเบรนทั้งสามแบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ที่ดีโดยค่าคลอไรด์ที่วัดได้ไม่เกินมาตราฐานที่มาตราฐานน้ำดื่ม (WHO) กำหนด

4.4.12 คุณสมบัติทางชีวภาพของน้ำที่ผ่านการกรอง

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางชีวภาพเป็นการวิเคราะห์เพื่อใช้ในการอธิบายการถึงสิ่งมีชีวิต อาทิ เช่น แบคทีเรีย ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำซึ่งการวิเคราะห์ทางชีวภาพนี้จะช่วยให้เราสามารถระบุได้ว่าน้ำมีคุณภาพจัดอยู่ในเกณฑ์ใดและมีความเหมาะสมในการที่จะนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 0.6 ผลทางชีวภาพของการกรองน้ำดิบและน้ำที่ผ่านการกรองเมมเบรนเส้นใยกลวงที่ผลิตตามอัตราส่วนการเติมพีวีพี

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	PVP1	PVP3	PVP5	มาตราฐานน้ำดื่ม (WHO)
โคลิฟอร์มทั้งหมด (ดัชนีเอ็มพีเอ็นต่อ100มล.)	1260.00±480.83	<1.8	<1.8	<1.8	90% of Samples MPN < 1.0
ฟีคอลล์โคลิฟอร์ม (ดัชนีเอ็มพีเอ็นต่อ100มล.)	315.00±49.50	<1.8	<1.8	<1.8	90% of Samples in year negative for coli forms

4.4.13 โคลิฟอร์มทั้งหมด (Total Coliform)

ในการวัดค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดของน้ำดิบทั้งก่อนและหลังการกรองเพื่ออธิบายถึงประสิทธิภาพในการกรองน้ำของเมมเบรนทั้ง 3 แบบที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตน้ำสะอาดโดยปราศจากโคลิฟอร์มแบคทีเรีย จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.6 วัดค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดได้เท่ากับ 1260.00±480.83 ดัชนีเอ็มพีเอ็นต่อ 100 มล. และ เมื่อนำน้ำดิบมากรองผ่านกระบวนการเมมเบรน แล้วทำการวัดค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด พบว่า น้ำที่ผ่านการกรองจากเมมเบรนทั้ง 3 แบบ ตรวจวัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดได้น้อยกว่า 1.8

เมื่อนำผลการทดลองในเรื่องการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดโดยการกรองผ่านเมมเบรนมาตามตารางที่ 5 มาเปรียบเทียบกับการทดลองของนลินี (2543) ที่มีการใช้เมมเบรนไมโครฟิลเตรชั่นในการผลิตน้ำประปาที่มีความขุ่นสูง ความสามารถของเมมเบรนในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำดิบซึ่งทำการวัดปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดได้ประมาณ 930 ดัชนีเอ็มพีเอ็นต่อ 100 มล. โดยใช้เมมเบรนที่มีรูพรุน 1 ไมครอน เดินระบบที่ฟลักซ์ 0.2 $ม^3/ม^2$-วัน พบว่า น้ำที่ทำการกรองผ่านเมมเบรนที่มีรูพรุน 1 ไมครอน ไม่สามารถตรวจพบโคลิฟอร์มทั้งหมด ดังนั้นจะเห็นว่าเมมเบรนที่ผลิตมีความสามารถในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดได้ดีเท่ากับเมมเบรนที่นลินี (2543)ใช้ในการทดลอง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.4.14 ฟีคอลล์โคลิฟอร์ม (Fecal Coliform)

ในการวัดค่าปริมาณฟีคอลล์โคลิฟอร์มแบคทีเรียของน้ำดิบทั้งก่อนและหลังการกรองเพื่ออธิบายถึงประสิทธิภาพในการกรองน้ำของเมมเบรนทั้ง 3 แบบที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตน้ำสะอาดปราศจากฟีคอลล์โคลิฟอร์มแบคทีเรีย จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.6 วัดค่าปริมาณฟีคอลล์โคลิฟอร์มแบคทีเรียได้เท่ากับ 315±49.50 ดัชนีเอ็มพีเอ็นต่อ 100 มล. และ เมื่อนำน้ำดิบมากรองผ่านกระบวนการเมมเบรน แล้วทำการวัดค่าปริมาณปราศจากฟีคอลล์โคลิฟอร์มแบคทีเรีย พบว่า น้ำที่ผ่านการกรองจากเมมเบรนทั้ง 3 แบบ ตรวจวัดปริมาณฟีคอลล์โคลิฟอร์มแบคทีเรียได้น้อยกว่า1.8

เมื่อนำผลการทดลองในเรื่องการกำจัดฟีคอลล์โคลิฟอร์มแบคทีเรียโดยการกรองผ่านเมมเบรนตามตารางที่ 4.5 มาเปรียบเทียบกับการทดลองของ นลินี (2543) ที่มีการใช้เมมเบรนไมโครฟิลเตรชั่นในการผลิตน้ำประปาที่มีความขุ่นสูง ความสามารถของเมมเบรนในการกำจัดฟีคอลล์โคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำดิบซึ่งทำการวัดปริมาณฟีคอลล์โคลิฟอร์มแบคทีเรียได้ประมาณ 210 ดัชนีเอ็มพีเอ็นต่อ 100 มล. โดยใช้เมมเบรนที่มีรูพรุน 1 ไมครอน เดินระบบที่ฟลักซ์ 0.2 $ม^3/ม^2$-วัน พบว่า น้ำที่ทำการกรองผ่านเมมเบรนที่มีรูพรุน 1 ไมครอน ไม่สามารถตรวจพบฟีคอลล์โคลิฟอร์มแบคทีเรียดังนั้นจะเห็นว่าเมมเบรนที่ผลิตมีความสามารถในการกำจัดฟีคอลล์โคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดได้ดีเท่ากับเมมเบรนที่นลินี (2543) ใช้ในการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งทาง คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางชีวภาพจะเห็นได้ว่าเมมเบรนที่ผลิตจากพีวีดีเอฟ และมีการใช้พีวีพีเป็นสารเติมแต่งในอัตรา 1 เปอร์เซ็นต์ 3 เปอร์เซ็นต์ และ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก จัดว่ามีศักยภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ดีสามารถนำไปใช้ในการผลิตน้ำสะอาดได้ เมื่อดูจากค่าพารามิเตอร์ที่ทำการวัดในน้ำดิบและน้ำที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรนทั้ง 3 แบบแล้ว จะเห็นว่าเมมเบรนทั้ง 3 แบบให้ประสิทธิภาพในการกรองที่ไม่แตกต่างกันมากโดยค่าฟลักซ์ของน้ำในเมมเบรนที่มีการเติมพีวีพี 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักจะให้ค่าฟลักซ์เฉลี่ยเท่ากับ 0.29 $ม^3/ม^2$-วัน ซึ่งมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบในเมมเบรนทั้ง 3 แบบ ถ้านำเมมเบรนที่มีการเติมพีวีพี 5 เปอร์เซ็นต์มาใช้ในการผลิตน้ำสะอาดปริมาณ 100 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะต้องใช้เมมเบรนที่มีพื้นที่ในการกรองประมาณ 0.732 ตารางเมตร(คำนวณจากการใช้เมมเบรนกรองน้ำปริมาณ 0.29 $ม^3/ม^2$-วัน มีพื้นที่ 0.002121 m^2 โดยที่โมดูลของเมมเบรนประกอบด้วยเมมเบรนเส้นใยกลวงจำนวน 9 เส้น ยาว 15 เซ็นติเมตร) สำหรับต้นทุนในการผลิตเมมเบรนข้างต้นนี้ถือว่ามีรายจ่ายน้อยมากเมื่อเทียบกับการผลิตน้ำสะอาดที่ได้โดยค่าใช้จ่ายในการซื้อวัสดุโพลิเมอร์ในการผลิตเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงนี้แบ่งออกเป็น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.5 ค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง

ในการผลิตเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงเพื่อใช้ในการผลิตน้ำสะอาดในครั้งนี้มีส่วนประกอบสำคัญ 2 อย่าง คือ

4.5.1 ค่าวัสดุโพลิเมอร์และสารเติมแต่ง

โพลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 6 คือ โพลี-ไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) ซึ่งทางตัวแทนจำหน่ายได้ตั้งราคาค่าใช่จ่ายที่กิโลกรัมละ 10,000 บาท ในส่วนของสารเติมแต่งที่ใช้คือ โพลีไวนิลไพโรลิโดนน์ (PVP) โดยที่ราคาค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อสารเติมแต่งอยู่ที่กิโลกรัมละ 4,000 บาท

4.5.2 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำละลายในงานวิจัยชิ้นนี้ คือ ไดเมทริลอะเซตาไมด์ (DMAc) แสดงในตารางที่ 6 ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ตัวทำละลายประมาณ 15 ลิตร โดยประมาณ ซึ่งราคาของตัวทำละลายบรรจุขวดปริมาตร 2.5 ลิตรราคาประมาณ 3600 บาท

ในการผลิตเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงค่าใช้จ่ายในการผลิตของเมมเบรนสามารถคำนวณได้ดังนี้
กำหนดให้
ระบบไมโครฟิลเตรชั่นมีการควบคุมความดันและมีการล้างย้อนจนทำให้ค่าฟลักซ์มีค่าคงที่ 100 LMH ต้องการกรองน้ำสำหรับดื่ม 1000 ลิตรต่อวัน จะต้องใช้เมมเบรนที่มีขนาดพื้นที่เท่าใด

หาค่าพื้นที่เมมเบรนได้ว่า ปริมาณน้ำที่กรองสำหรับดื่ม = ค่าฟลักซ์ที่ใช้กรอง×พื้นที่เมมเบรน

แทนค่า 1000 ลิตรต่อวัน = 100 ลิตรต่อตร.ม.ต่อชม.×พื้นที่เมมเบรน

ดังนั้น พื้นที่เมมเบรนที่ใช้ = 0.42 ตร.ม

กำหนดให้เมมเบรน PVP5 ปริมาณ 300 กรัม ประกอบด้วย

PVDF กก.ละ10000 บาท ปริมาณที่ใช้เท่ากับ 60 กรัม (600 บาท)

PVP กก.ละ 4000 บาท ปริมาณที่ใช้เท่ากับ 15 กรัม (60 บาท)

DMAc ขวด 2.5 ลิตรราคา 600 บาท ใช้ประมาณ 500 มล.(120 บาท)

สามารถผลิตเมมเบรน PVP5 ได้ความยาวประมาณ 30 เมตรพื้นที่เท่ากับ 0.071 ตร.ม. ในราคา 780 บาท

ดังนั้นถ้าต้องการพื้นที่ 0.42 ตร.ม.ที่ใช้ในการคำนวณการผลิตน้ำ 1000 ลิตรต่อวัน ต้องผลิตเมมเบรนให้ได้ความยาวประมาณ 180 เมตรจึงจะมีพื้นที่ที่เพียงพอต่อการผลิตน้ำ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 0.7 รวมค่าใช้จ่ายในการผลิตเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง

รายการ	ค่าใช้จ่าย (บาท)
สารละลายโพลิเมอร์	
1.ค่าวัสดุโพลิเมอร์ 360 กรัม	3,600
2.สารเติมแต่ง 90 กรัม	360
3.ค่าตัวทำละลาย 3 ลิตร โดยประมาณ	720
รวม	4,680 บาท

เมื่อนำรายละเอียดจากตาราง 4.7 มาเปรียบเทียบด้านราคากับไส้กรองน้ำยี่ห้อ Vifil ซึ่งผลิตจากวัสดุโพลีโพพิลีนที่มีความยาวของไส้กรองเท่ากับ 10 นิ้ว มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเมมเบรนเท่ากับ 0.3 ไมครอน และค่าการทดสอบฟลักซ์น้ำสะอาดจากโรงงานอยู่ที่ 150 ลิตรต่อตร.ม.ต่อชม. ที่มีราคา 300 บาท โดยประมาณ จะเห็นว่าเมมเบรนที่ผู้วิจัยทำการผลิตมีราคาที่สูงกว่าเมมเบรนที่วางขายตามท้องตลาดซึ่งสาเหตุที่แพงกว่าเนื่องมาจากโพลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเมมเบรนคือพีวีดีเอฟซึ่งเป็นโพลิเมอร์มีราคาค่อนข้างสูงจึงทำให้เกิดความแตกต่างด้านราคาของวัสดุที่ใช้ในการผลิตขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved