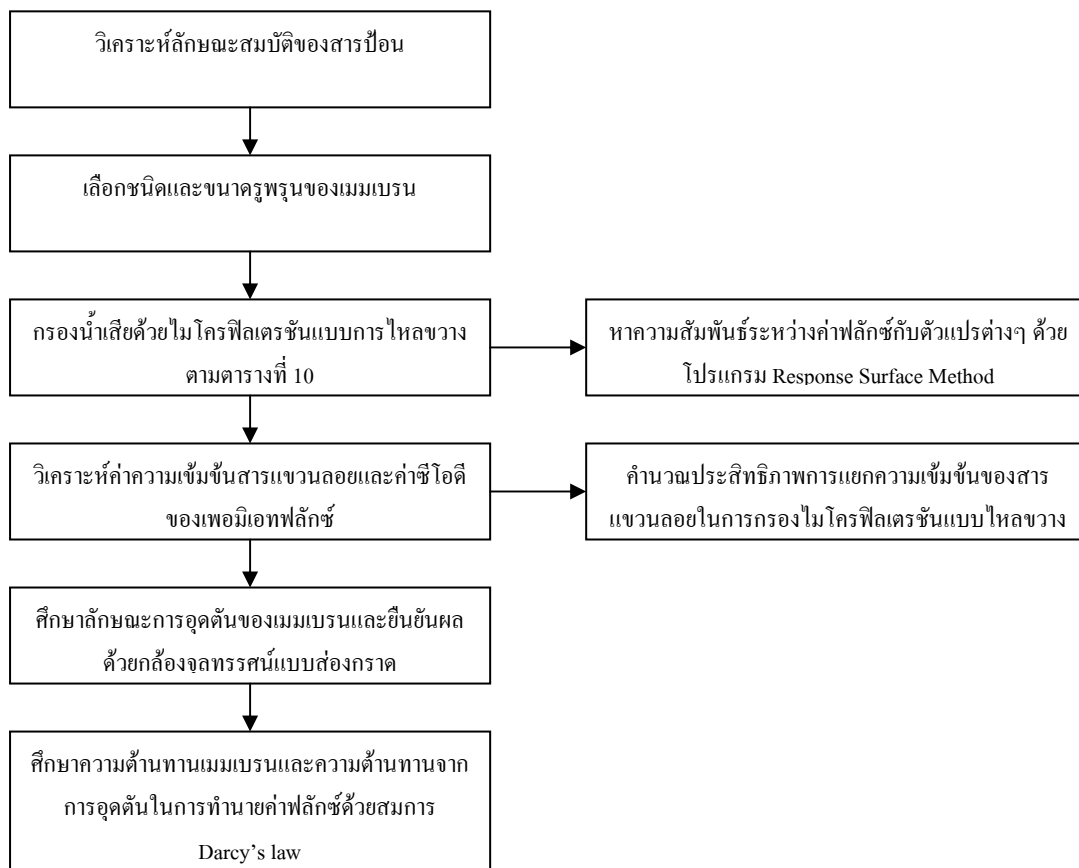


บทที่ 3

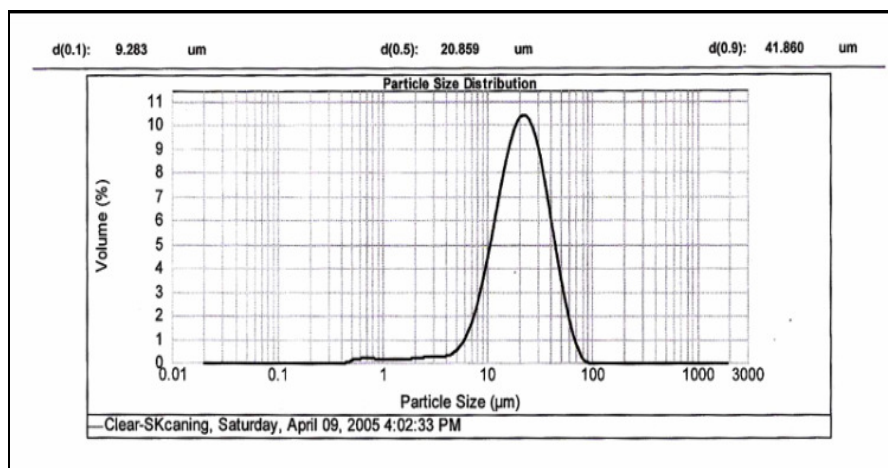
ผลการทดลอง และบทวิจารณ์

ในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยใช้การกรองไมโครฟิลเตรชันแบบการไหลขวาง แทนถึงตกตะกอนของระบบบำบัดแบบตะกอนเร่งสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอาหารทะเลแช่แข็ง เนื่องจากระบบตะกอนเร่งจะมีความยุ่งยากในการดำเนินการ โดยเฉพาะความยุ่งยากในการเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ และปัญหาที่พบบ่อยซึ่งทำให้น้ำสุดท้ายไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน คือ ปัญหาตะกอนลอยตัวซึ่งอาจเกิดจากฟล็อกเข็มหมุดหรือบัลกิง โดยวิธีการแก้ทำได้ยากมาก โดยเฉพาะบัลกิงแบบเส้นใยอาจต้องทำการทดสอบ เพื่อหาสาเหตุโดยมีความยุ่งยากและใช้เวลามาก ซึ่งปัญหาตะกอนลอยตัวเป็นปัญหาใหญ่ในระบบ เนื่องจากระบบตะกอนเร่งมีความต้องการตะกอนจุลินทรีย์ เพื่อใช้ในการเวียนกลับเข้าสู่ระบบเพื่อรักษาปริมาณของจุลินทรีย์ต่อสารอาหารให้มีความสมดุล ดังนั้นการใช้เทคโนโลยีเมมเบรนในการแยกตะกอนจุลินทรีย์เป็นวิธีหนึ่งซึ่งช่วยให้สามารถควบคุมความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในระบบได้ง่ายขึ้น แต่จะต้องมีการศึกษาถึงปัจจัยทางไฮโดรไดนามิกเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพและปริมาณเพอมีเอทฟลักซ์ที่สูง ขั้นตอนในการทดลองแสดงโดยไดอะแกรมดังนี้



1. ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย โดยอันดับแรกได้ทำการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของน้ำเสียด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) เพื่อนำไปหาขนาดรูพรุนของเมมเบรนที่ใช้ในการทดลองโดยขนาดอนุภาคของน้ำเสียแสดงดังภาพประกอบ 22



ภาพประกอบ 22 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคจุลินทรีย์ในตัวอย่างน้ำเสีย

จากการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคจุลินทรีย์ในน้ำเสีย พบว่าอนุภาคจุลินทรีย์จะเกิดการกระจายตัวอยู่ในช่วง 9.28 - 41.86 micron ดังนั้นจึงนำผลของการกระจายตัวของอนุภาคไปทำการเลือกขนาดรูพรุนของเมมเบรน โดยทฤษฎีการเลือกขนาดรูพรุนต่อขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยจะเลือกในอัตราส่วน 1:10 (Cheryan (1998))

ดังนั้นจากทฤษฎีการเลือกขนาดรูพรุนของเมมเบรน จึงเลือกใช้เมมเบรนที่มีขนาด 0.1-5 micron หลังจากนั้นได้นำน้ำเสียมาวิเคราะห์ค่าความเป็น กรด-ด่าง (pH) ค่าสารแขวนลอย (Suspended Solid) และค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) ซึ่งผลของการวิเคราะห์จะแสดงดังตาราง 11

ตาราง 11 ผลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากบ่อเติมอากาศของระบบบำบัดแบบตะกอนเร่งจากโรงงานอาหารทะเลแช่แข็ง

ตัวอย่างน้ำ	ค่าความเป็นกรด-ด่าง	ค่าสารแขวนลอย (mg/l)	ค่า COD (mg/l)
น้ำเสีย	6.9 - 7.4	1500-3500	105-152

(ผลของค่าซีโอดีเป็นผลจาก น้ำเสียตัวอย่างที่ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที และนำส่วนที่ใสมาวิเคราะห์)

2. ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อเพอมีเอทฟลักซ์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณเพอมีเอทฟลักซ์ ได้แก่ ความดัน อัตราการไหล ความเข้มข้นของสารปนื้อ และขนาดรูพรุนของเมมเบรน ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อกระบวนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันแบบการไหลขวาง โดยทำการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรต่างๆ ในรูปของสมการความสัมพันธ์ด้วยโปรแกรม Response Surface Method เพื่อจะทำให้ได้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ของการกรองน้ำเสียสูงสุด และคุณภาพของน้ำหลังจากผ่านการกรองต้องผ่านเกณฑ์มาตรฐานของน้ำเสีย

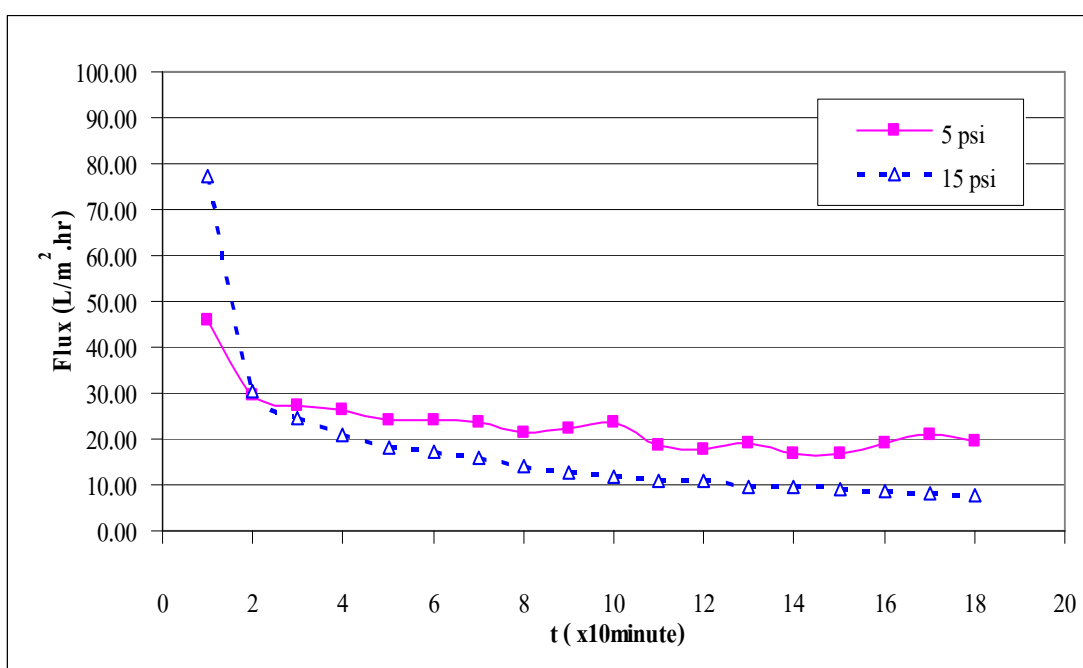
2.1 ผลของความดันต่อเพอมีเอทฟลักซ์และลักษณะการแพร่ของอนุภาค

การศึกษาผลของความดันต่อเพอมีเอทฟลักซ์โดยให้ อัตราการไหล ความเข้มข้นของสารปนื้อ และขนาดของรูพรุน มีค่าคงที่คือ 1.75 Lpm 1500 mg/l 0.1 micron ตามลำดับ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าของความดันที่ 5 และ 15 psi และทำการบันทึกน้ำหนักของน้ำเสียที่ผ่านการกรองทุกๆ 10 นาที จะเห็นได้ว่าค่าเพอมีเอทฟลักซ์ของการดำเนินการที่ความดัน 15 psi จะมีค่าเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้นสูงกว่าการดำเนินการที่ความดัน 5 psi ในช่วงแรกของการดำเนินการ การกรองที่ความดันสูงจะให้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์สูงในช่วง 10-20 นาทีแรกของการกรองเนื่องจากยังไม่เกิดการฟาวลิงบนผิวหน้าของเมมเบรน ซึ่งหลังจากนั้นค่าเพอมีเอทฟลักซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากผลของการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันและฟาวลิง

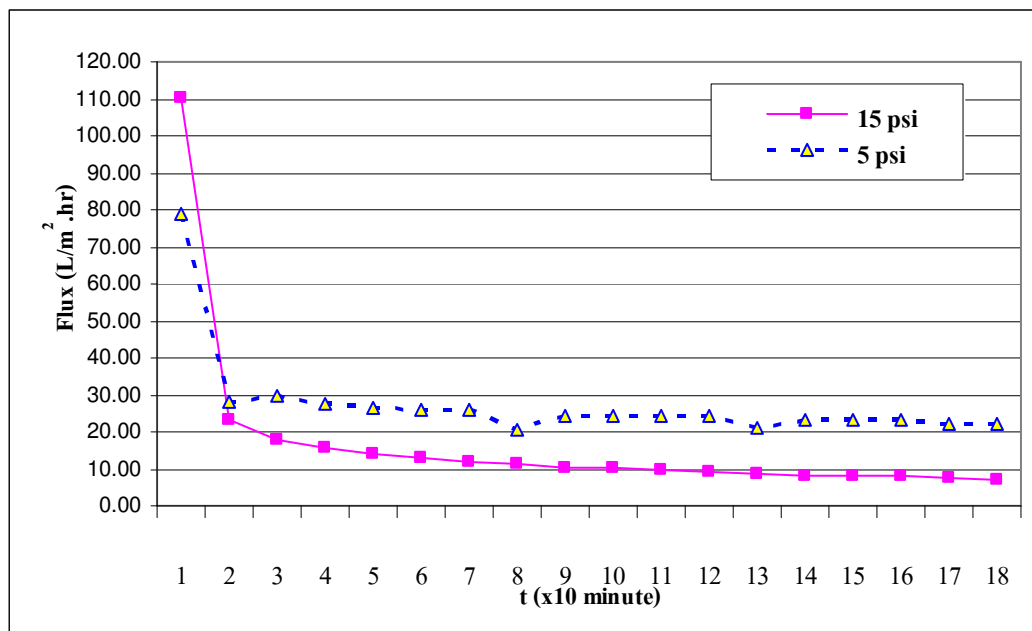
เพอมีเอทฟลักซ์เริ่มเข้าสู่สถานะคงตัว แสดงว่าความต้านทานการไหลเริ่มคงที่โดยค่าเพอมีเอทฟลักซ์สำหรับการดำเนินการที่ความดัน 15 psi จะมีค่าเท่ากับ 14.63 L/m².hr ซึ่งต่ำกว่าการดำเนินการที่ความดันต่ำคือ 5 psi ที่ได้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์สูงกว่าโดยมีค่าเท่ากับ 23.16 L/m².hr ดังภาพประกอบ 23

จากภาพประกอบ 24 แสดงผลของความดันต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์โดยให้ อัตราการไหล ความเข้มข้นของสารปนื้อ และขนาดของรูพรุน มีค่าคงที่คือ 1.75 Lpm 1500 mg/l 5 micron ตามลำดับ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าของความดันที่ 5 และ 15 psi โดยค่าเพอมีเอทฟลักซ์สำหรับการดำเนินการที่ความดัน 15 psi จะมีค่าเท่ากับ 16.89 L/m².hr ซึ่งต่ำกว่าการดำเนินการที่ความดันต่ำคือ 5 psi ที่ได้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์สูงกว่าโดยมีค่าเท่ากับ 27.58 L/m².hr เช่นเดียวกับภาพประกอบ 25 แสดงผลของความดันต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์โดยให้ อัตราการไหล ความเข้มข้นของสารปนื้อ และขนาดของรูพรุน มีค่าคงที่คือ 1.75 Lpm 3500 mg/l 5 micron ตามลำดับ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าของความดันที่ 5 และ 15 psi โดยค่าเพอมีเอทฟลักซ์สำหรับการดำเนินการที่ความดัน 15 psi จะมีค่าเท่ากับ 15.52 L/m².hr ซึ่งต่ำกว่าการดำเนินการที่ความดันต่ำคือ 5 psi ที่ได้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์สูงกว่าโดยมีค่าเท่ากับ 23.47 L/m².hr

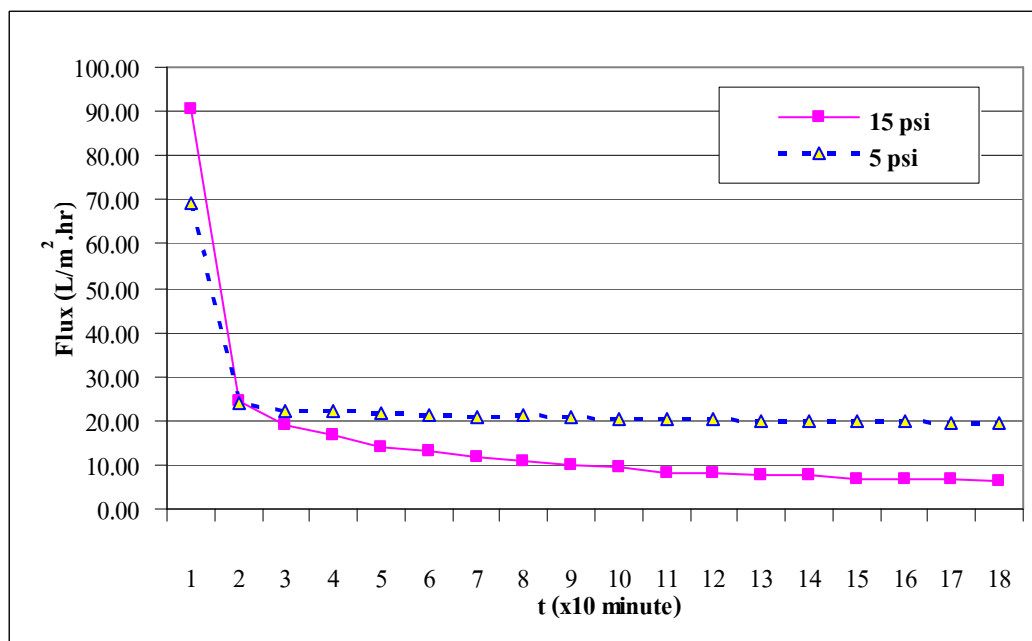
เนื่องจากการดำเนินการโดยการเพิ่มความดันจะทำให้ อนุภาคของจุลินทรีย์ถูก แรงดันที่สูงกว่าอัดตัวกันบนผิวของเมมเบรนเกิดการอุดตันบนผิวของเมมเบรนมากขึ้น ชั้นเจลจาก ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน/เค้ก ถูกอัดแน่นมากขึ้น ทำให้สามารถกักกันตัวถูก ละลายได้มาก ดังนั้นอัตราการไหลผ่านเมมเบรนของสารละลายจึงลดลง การเกิดเจลสามารถเกิดขึ้น ในระยะเวลาที่รวดเร็วมาก การดำเนินการที่ความดันสูงจะทำให้อนุภาคจุลินทรีย์ของน้ำเสียถูกอัด แน่นเพิ่มมากขึ้นทำให้การไหลผ่านของเพอมีเอทฟลักซ์ลดน้อยลง แสดงลักษณะการแพร่ของ อนุภาคจุลินทรีย์สำหรับการกรองที่ความดันต่างกัน ดังภาพประกอบ 26



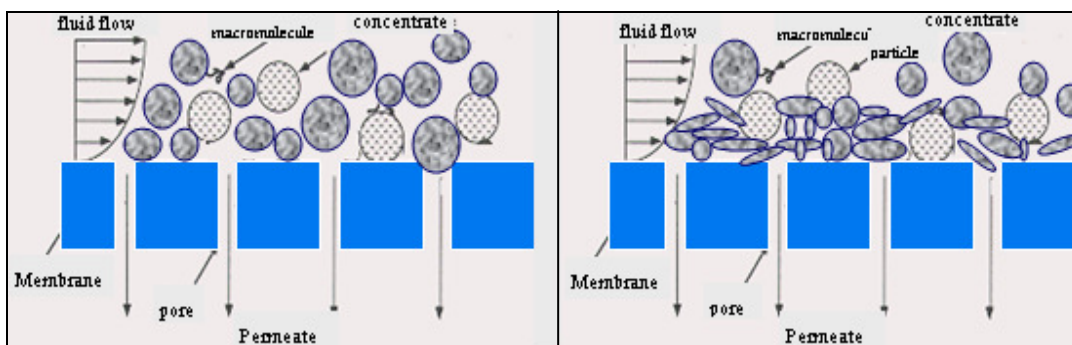
ภาพประกอบ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์กับเวลา สำหรับการกรองน้ำเสีย ความเข้มข้น SS ของสารป้อน 1500 mg/l ผ่านเซลล์ูโลสในเตรทเมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอนด้วยความดันต่างกันว่า 5 และ 15 psi ที่อัตราการไหลคงที่ 1.75 Lpm



ภาพประกอบ 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเทฟลักซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำเสีย ความเข้มข้น SS ของสารป้อน 1500 mg/l ผ่านเซลล์ูโลสไนเตรทเมมเบรนขนาด 5 micron ด้วยความดันต่างกันที่ 5 และ 15 psi ที่อัตราการไหลคงที่ 1.75 Lpm



ภาพประกอบ 25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเทฟลักซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำเสีย ความเข้มข้น SS ของสารป้อน 3500 mg/l ผ่านเซลล์ูโลสไนเตรทเมมเบรนขนาด 5 micron ด้วยความดันต่างกันที่ 5 และ 15 psi ที่อัตราการไหลคงที่ 1.75Lpm



ความดันต่ำ

ความดันสูง

ภาพประกอบ 26 แสดงการแพร่ของอนุภาคจุลินทรีย์ระหว่างการดำเนินการที่ความดันต่ำ
เปรียบเทียบกับที่ความดันสูง

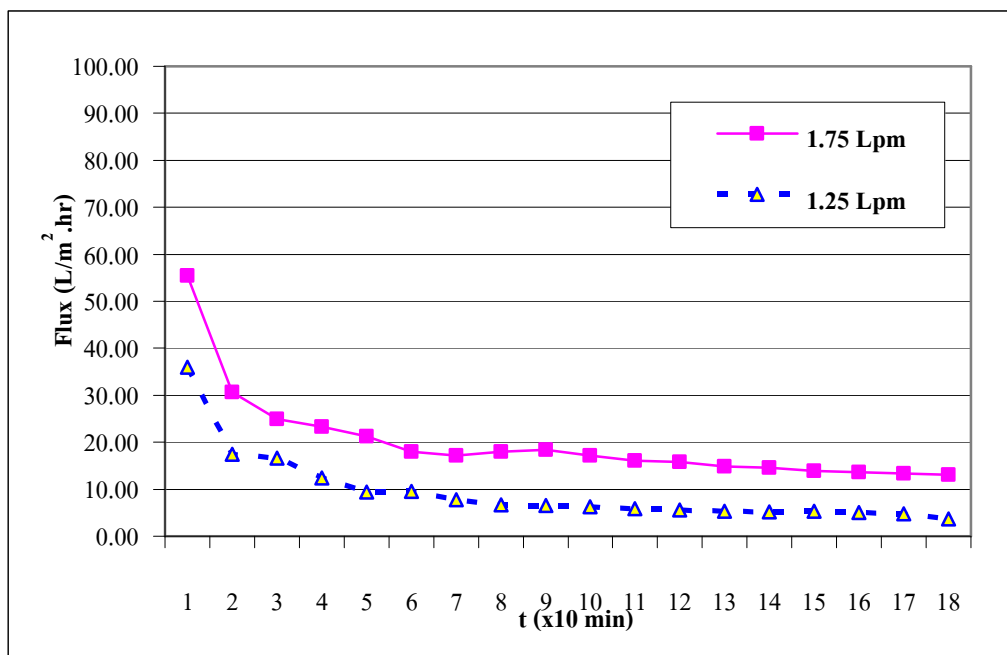
ที่มา: รัตนา จิระรัตนานนท์, 2541

2.2 ผลของอัตราการไหลต่อเพอเมอเทฟลักซ์และลักษณะการแพร่ของอนุภาค

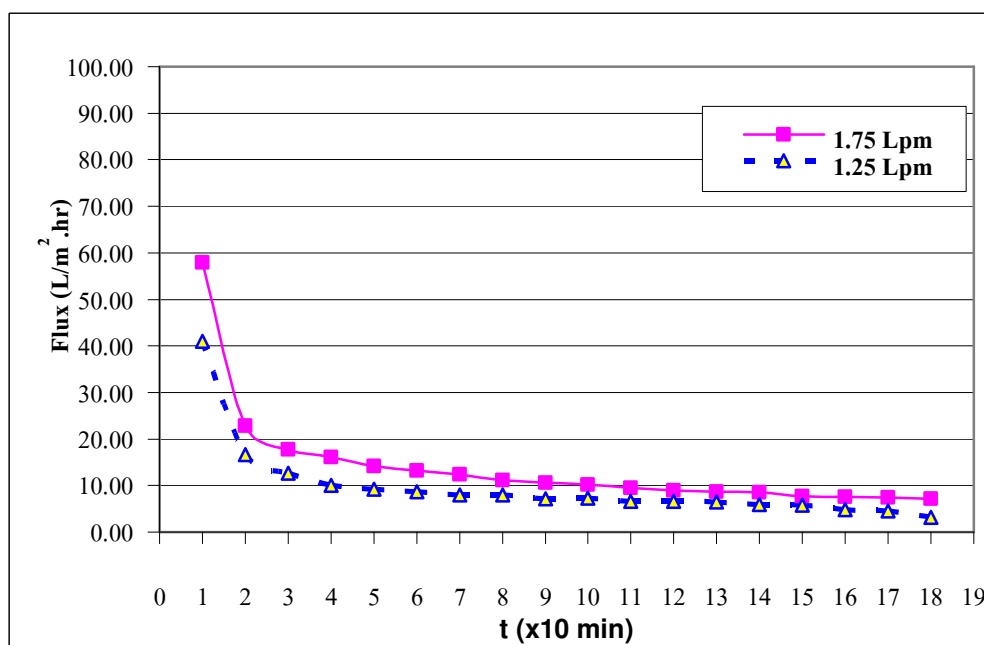
การศึกษาผลของอัตราการไหลต่อเพอเมอเทฟลักซ์โดยให้ ความดัน ความเข้มข้นของสารป้อน ขนาดของรูพรุน มีค่าคงที่คือ 5 psi 3500 mg/l และ 0.1 micron ตามลำดับโดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลที่ 1.25 และ 1.75 Lpm และทำการบันทึกน้ำหนักของน้ำเสียที่ผ่านการกรองทุกๆ 10 นาที พบว่าที่อัตราการไหลที่สูงกว่าคือที่ 1.75 Lpm จะได้ค่าเพอเมอเทฟลักซ์เท่ากับ 19.98 L/m².hr ซึ่งค่าเพอเมอเทฟลักซ์จะสูงกว่าการดำเนินการที่อัตราการไหลที่ต่ำคือ 1.25 Lpm ซึ่งเพอเมอเทฟลักซ์จะได้เท่ากับ 9.4 L/m².hr ดังภาพประกอบ 27

จากผลการทดลอง การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลพบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นค่าเพอเมอเทฟลักซ์ที่ได้มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลเป็นการเพิ่มแรงเฉือนบนผิวหน้าเมมเบรนทำให้อนุภาคของจุลินทรีย์ไม่สามารถเกาะติดที่ผิวหน้าเมมเบรนได้ เป็นผลต่อการแพร่กลับของอนุภาคจากผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้น ลดการยึดเกาะระหว่างเมมเบรนและอนุภาคของจุลินทรีย์ และอนุภาคกับอนุภาคด้วยกันเอง ดังนั้นจึงลดความต้านทานเชิงกลของชั้นฟาวลิง ฟาวลิงที่เกิดลดน้อยลงทำให้เพอเมอเทฟลักซ์เพิ่มขึ้นและความต้านทานลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังภาพประกอบ 30

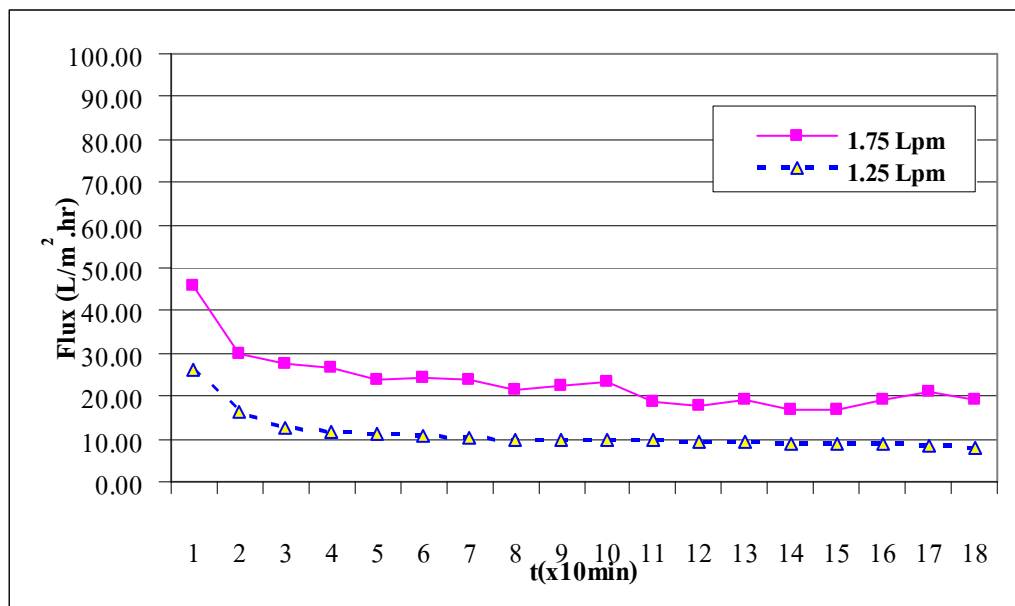
จากภาพประกอบ 28 และ 29 ซึ่งทำการทดลองที่ความดันและความเข้มข้นคงที่ที่ 15 psi 5 psi และ 3500 mg/l 1500 mg/l ได้ผลในทำนองเดียวกับกรณีภาพประกอบ 27 คือ เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ที่ความเข้มข้นของสารป้อน ความดันและขนาดของเมมเบรนคงที่ จะได้ค่าเพอเมอเทฟลักซ์มากขึ้น



ภาพประกอบ 27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเทฟลักซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำเสีย ความเข้มข้น SS ของสารป้อน 3,500 mg/l ผ่านเซลล์ูโลสไนเตรทเมมเบรนขนาด 0.1 micron ด้วยอัตราการไหลต่างกันว่า 1.25 และ 1.75 Lpm ที่ความดันคงที่ 5 psi

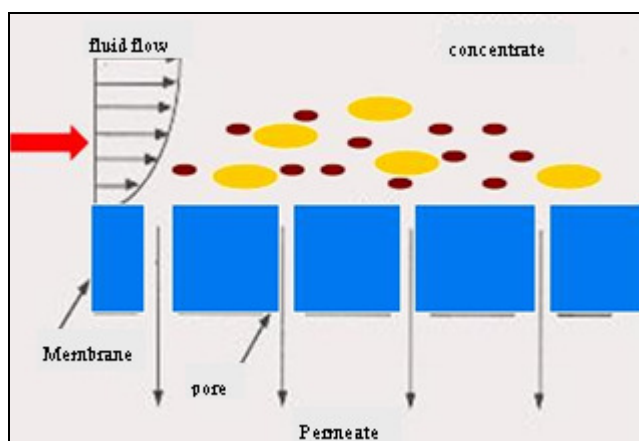


ภาพประกอบ 28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเทฟลักซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำเสีย ความเข้มข้น SS ของสารป้อน 3,500 mg/l ผ่านเซลล์ูโลสไนเตรทเมมเบรนขนาด 0.1 micron ด้วยอัตราการไหลต่างกันว่า 1.25 และ 1.75 Lpm ที่ความดันคงที่ 15 psi



ภาพประกอบ 29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเทฟลักซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำเสีย ความเข้มข้น SS ของสารป้อน 1,500 mg/l ผ่านเซลลูโลสไนเตรทเมมเบรนขนาด 0.1 micron ด้วยอัตราการไหลต่างกันที่ 1.25 และ 1.75 Lpm ที่ความดันคงที่ 5 psi

ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองของ สุวิจักขณ์ ห่านศรีวิจิตร, 2546 ซึ่งได้ทำการทดลองการกรองน้ำรั้งโดยไม่โครฟิลเตรชันแบบการไหลขวางที่อัตราการไหลที่แตกต่างกัน พบว่าที่อัตราการไหลเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการกักกันของของแข็งลดน้อยลง เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลเป็นการเพิ่มแรงเฉือนทำให้เพิ่มค่าเพอมีเทฟลักซ์และลดค่าความต้านทานในการกรอง



ภาพประกอบ 30 แสดงถึงอนุภาคจุลินทรีย์ของน้ำเสียที่ลอยตัวเมื่อมีการเพิ่มแรงเฉือนบนผิวหน้าเมมเบรน

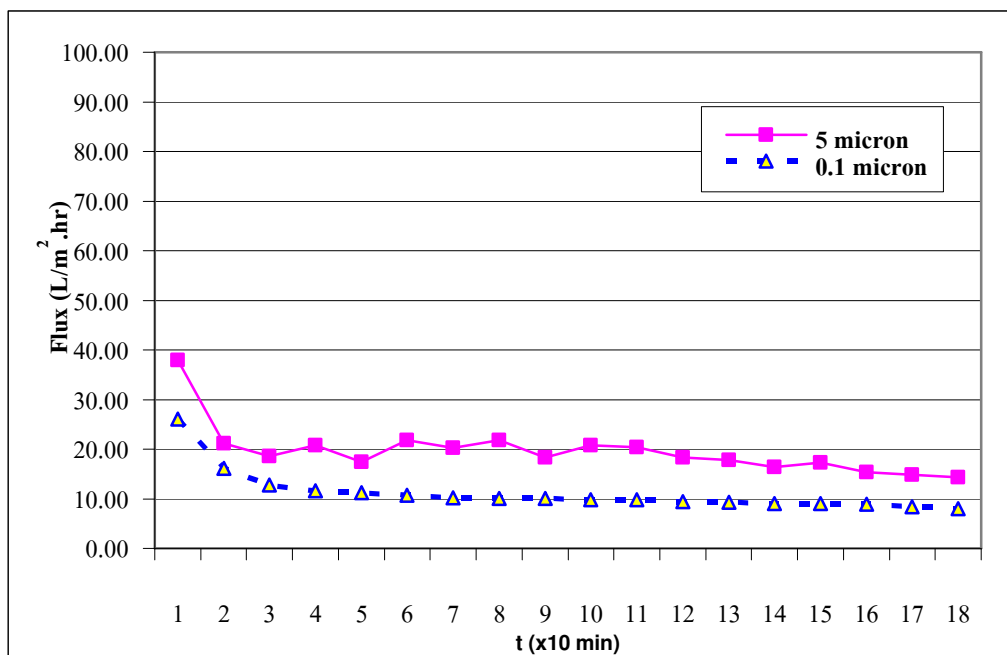
ที่มา: รัตนา จิระรัตนานนท์, 2541

2.3 ผลของขนาดรูพรุนของเมมเบรนต่อเพอมีเอทฟลักซ์และลักษณะการแพร่ของอนุภาค

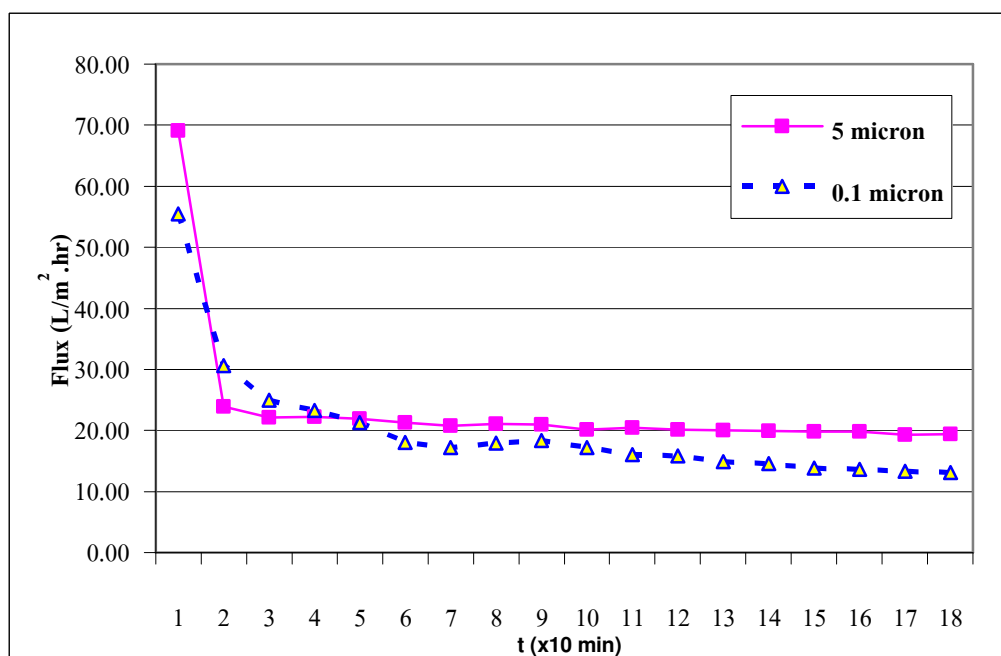
การศึกษาผลของขนาดรูพรุนต่อเพอมีเอทฟลักซ์โดยให้ อัตราการไหล ความเข้มข้นของสารป้อน ความดันมีค่าคงที่ คือ 1.25 Lpm 1500 mg/l และ 5 psi ตามลำดับโดยทำการเปลี่ยนแปลงขนาดรูพรุนที่ 0.1 และ 5 micron และทำการบันทึกน้ำหนักของน้ำเสียที่ผ่านการกรองทุกๆ 10 นาที

จากผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงขนาดรูพรุนของเมมเบรน พบว่าเพอมีเอทฟลักซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 10-20 นาทีแรกของการดำเนินการและจะเข้าสู่สภาวะคงตัวทั้งนี้เนื่องจากการเกิดการสะสมของอนุภาคจุลินทรีย์เป็นชั้นเคลือบที่ผิวหน้าเมมเบรน โดยเมมเบรนที่มีขนาดใหญ่ (5 micron) จะได้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่ 19.63 L/m².hr สูงกว่าเมมเบรนที่มีขนาดเล็ก (0.1 micron) ซึ่งเพอมีเอทฟลักซ์มีค่าเพียง 11.13 L/m².hr ดังภาพประกอบ 31 สำหรับการศึกษผลของขนาดรูพรุนต่อเพอมีเอทฟลักซ์โดยให้ อัตราการไหล ความเข้มข้นของสารป้อน ความดันมีค่าคงที่ คือ 1.75 Lpm 3500 mg/l และ 5 psi ตามลำดับโดยทำการเปลี่ยนแปลงขนาดรูพรุนที่ 0.1 และ 5 micron โดยเมมเบรนที่มีขนาดใหญ่ (5 micron) จะได้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่ 23.47 L/m².hr สูงกว่าเมมเบรนที่มีขนาดเล็ก (0.1 micron) ซึ่งเพอมีเอทฟลักซ์มีค่าเพียง 19.98 L/m².hr ดังภาพประกอบ 32 ซึ่งได้ผลในทำนองเดียวกับกรณีภาพประกอบ 31 คือ การทดลองที่ความดันต่ำ 5 psi ทำให้เกิดการอุดตันเป็นแบบเค้ก (cake) เพราะฉะนั้นเพอมีเอทฟลักซ์ของระบบที่ใช้เมมเบรนขนาด 0.1 micron จึงต่ำกว่าเมมเบรนที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากน้ำเสียสามารถผ่านเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ได้มากกว่าเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็ก เพราะอนุภาคที่ถูกดักไว้บนผิวหน้าของเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กจะมีความหนาแน่นของจุลินทรีย์ของน้ำเสียมาก ทำให้ความต้านทานจากการเกิดฟาวลิงสูงกว่าเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ การดำเนินการที่ความดันต่ำทำให้อนุภาคของจุลินทรีย์ไม่ถูกอัดแน่นบนผิวหน้าของเมมเบรน และน้ำเสียมียังขนาดอนุภาคใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรนมาก แสดงลักษณะการแพร่ของอนุภาคจุลินทรีย์ของน้ำเสียสำหรับการดำเนินการที่ความดันต่ำ ดังภาพประกอบ 33

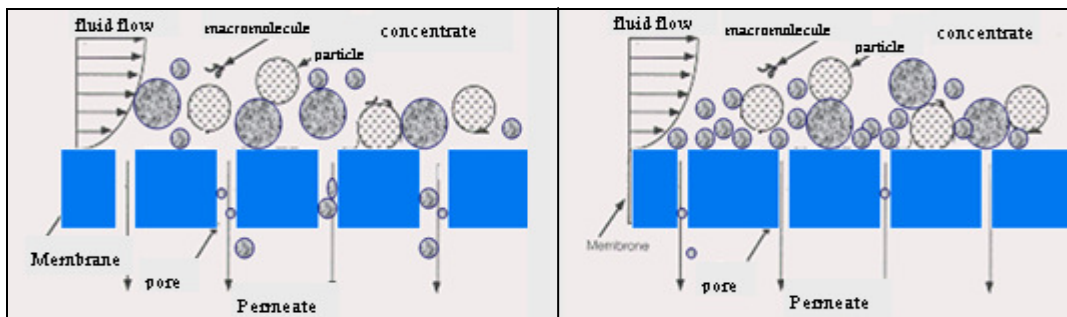
ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองของ Jiffin (1993) ซึ่งศึกษาการเปลี่ยนแปลงเพอมีเอทฟลักซ์ของไวน์ เมื่อกรองผ่านเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนต่างๆ คือ 0.1 0.2 0.4 0.8 1.5 และ 3 micron พบว่าเพอมีเอทฟลักซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรกของการกรอง ซึ่งเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่จะมีค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่สูงกว่า เนื่องจากสารป้อนสามารถผ่านเมมเบรนได้ดีกว่า แต่ฟาวลิงที่เกิดเป็นฟาวลิงที่เกิดภายในรูพรุนและผิวหน้าเมมเบรนจึงส่งผลให้เพอมีเอทฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว



ภาพประกอบ 31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีอเทฟลักซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำเสีย ความเข้มข้น SS ของสารป้อน 1,500 mg/l ผ่านเซลลูโลสไนเตรทเมมเบรนขนาด ต่างกันที่ 0.1 และ 5 micron ที่ความดัน 5 psi และอัตราการไหล 1.25 Lpm



ภาพประกอบ 32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีอเทฟลักซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำเสีย ความเข้มข้น SS ของสารป้อน 3,500 mg/l ผ่านเซลลูโลสไนเตรทเมมเบรนขนาด ต่างกันที่ 0.1 และ 5 micron ที่ความดัน 5 psi และอัตราการไหล 1.75 Lpm



เมมเบรน 5 ไมครอน

เมมเบรน 0.1 ไมครอน

ภาพประกอบ 33 แสดงลักษณะการอุดตันของอนุภาคของสารละลายสำหรับเมมเบรนขนาด 5 และ 0.1 micron ที่การดำเนินการกรองที่ความดันต่ำ (5psi)

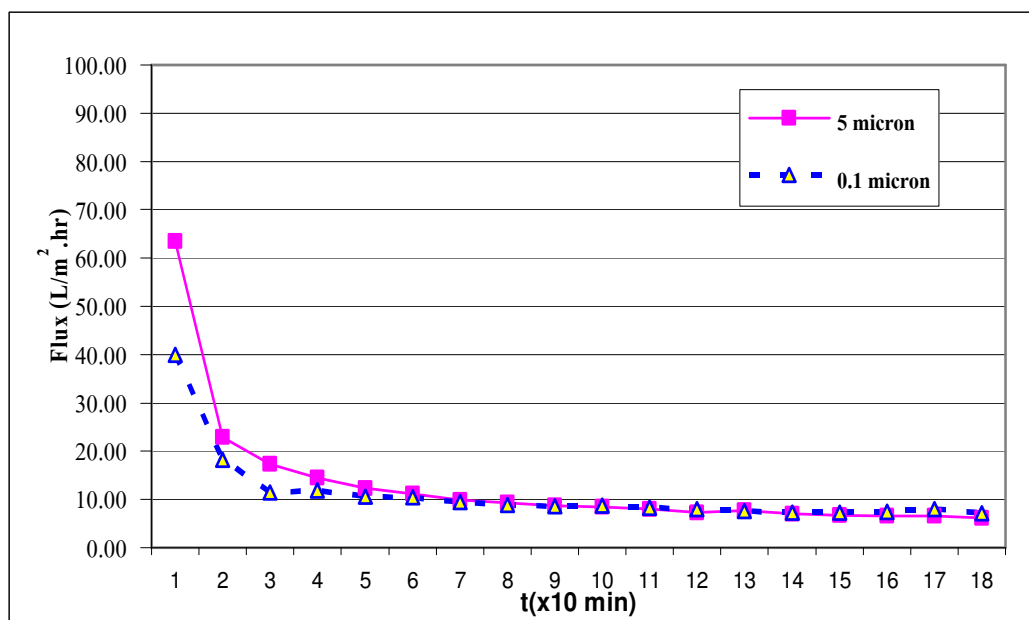
ที่มา: รัตนา จิระรัตนานนท์, 2541

จากผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงขนาดรูพรุนของเมมเบรน โดยให้อัตราการไหล ความเข้มข้นของสารป้อน ความดันมีค่าคงที่ คือ 1.25 Lpm 1500 mg/l และ 15 psi ตามลำดับโดยทำการเปลี่ยนแปลงขนาดรูพรุนที่ 0.1 และ 5 micron และทำการบันทึกน้ำหนักของน้ำเสียที่ผ่านการกรองทุกๆ 10 นาที พบว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่ (5 micron) จะให้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์สูงกว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็ก (0.1 micron) ที่ความดันสูงคือ 15 psi ในช่วงแรกของการกรองแต่เมื่อเวลาผ่านไปเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กกว่าจะให้ปริมาณเพอมีเอทฟลักซ์ใกล้เคียงกัน ดังภาพประกอบ 34 ถึงอย่างไรก็ตามเพอมีเอทฟลักซ์ในการกรองที่มีขนาดเมมเบรนใหญ่กว่า (5 micron) จะให้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่ $13.01 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ สูงกว่าขนาดเมมเบรนที่เล็กกว่า (0.1 micron) โดยเพอมีเอทฟลักซ์มีค่าเพียง $11.08 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ เช่นเดียวกับการทดลองที่ อัตราการไหล ความเข้มข้นของสารป้อน ความดันมีค่าคงที่ คือ 1.25 Lpm 3500 mg/l และ 15 psi ตามลำดับโดยทำการเปลี่ยนแปลงขนาดรูพรุนที่ 0.1 และ 5 micron พบว่าเพอมีเอทฟลักซ์ในการกรองที่มีขนาดเมมเบรนใหญ่กว่า (5 micron) จะให้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่ $11.16 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ สูงกว่าขนาดเมมเบรนที่เล็กกว่า (0.1 micron) โดยเพอมีเอทฟลักซ์มีค่าเพียง $9.57 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ ดังภาพประกอบ 35

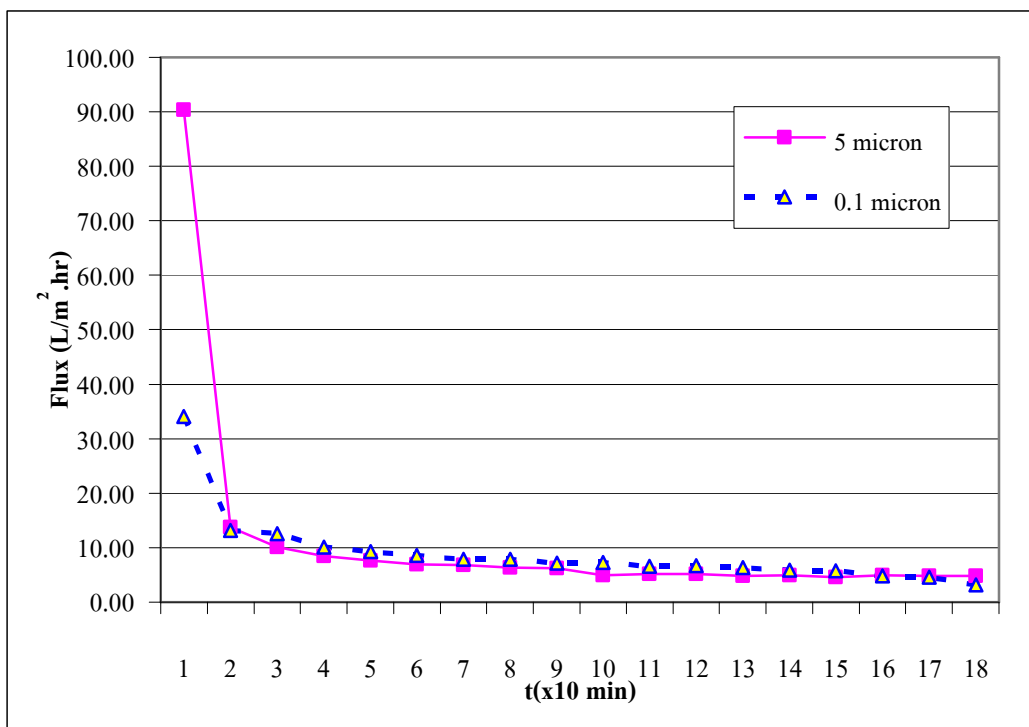
จากภาพประกอบ 31 และ 34 ที่การทดลองที่ ความเข้มข้น อัตราการไหล เดียวกัน คือ 1500 mg/l 1.25Lpm พบว่าการกรองที่ความดันสูง (15 psi) จะให้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ต่ำกว่าการกรองที่ความดันต่ำ (5 psi) ทุกขนาดของเมมเบรนที่ทดลองคือ 0.1 และ 5 ไมครอนเนื่องจาก การกรองที่ความดันสูงจะทำให้อนุภาคจุลินทรีย์ในน้ำเสียถูกอัดแน่น ทั้งภายในรูพรุนและบนผิวหน้าของเมมเบรนมากกว่าการดำเนินการที่ความดันต่ำ ทำให้ค่าความต้านทานจากการอุดตันสูงขึ้น เพอมีเอทฟลักซ์ลดลง และสำหรับการกรองที่เมมเบรนขนาดใหญ่ (5 ไมครอน) ที่ความดันสูง พบว่าเพอมีเอทฟลักซ์ลดลงอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับดำเนินการที่ความดันต่ำ ซึ่งแตกต่าง

กับการกรองที่เมมเบรนขนาดเล็ก (0.1 ไมครอน) พบว่าเพอมีอเทฟลักซ์จะไม่แตกต่างกันมาก ระหว่างการดำเนินการกรองที่ความดันสูงหรือความดันต่ำ เนื่องจากอนุภาคของจุลินทรีย์มีขนาดเล็กกว่าขนาดของรูพรุนขนาดใหญ่ (5 ไมครอน) มากทำให้อนุภาคจุลินทรีย์เกิดการอุดตันภายในรูพรุนและเกิดการอุดตันบนผิวหน้าของเมมเบรนมากกว่าการกรองด้วยเมมเบรนขนาดรูพรุนที่เล็กกว่า (0.1 micron)

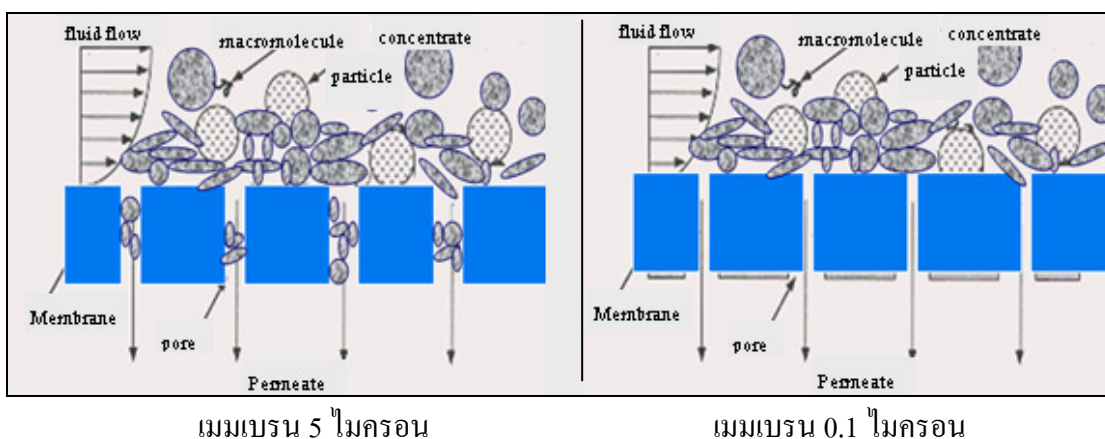
ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิด เนื่องจากเมมเบรนมีรูพรุนขนาดใหญ่ แต่อนุภาคจุลินทรีย์ของน้ำเสียที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรนเกิดการเกาะติดภายในรูพรุน ดังนั้นปริมาณเพอมีอเทฟลักซ์จึงลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 10-20 นาทีแรกของการดำเนินการ นอกจากนี้การดำเนินการกรองภายใต้ความดันสูง จะทำให้การอัดแน่นของอนุภาคจุลินทรีย์ในน้ำเสียถูกอัดกลายเป็นเค้กเพิ่มมากขึ้นกว่าการดำเนินการที่ความดันต่ำ ส่งผลให้การทำความสะอาดยากขึ้นด้วย ในทางกลับกันถ้าขนาดรูพรุนของเมมเบรนเล็กกว่าอนุภาคจุลินทรีย์ของน้ำเสีย อนุภาคจะไม่เข้าไปเกาะติดภายในรูพรุนแต่จะเกาะติดบนผิวหน้าเมมเบรนทำให้อนุภาคถูกกดอัดได้ เกิดการอุดตันและอัดแน่นของเค้กมากขึ้น แสดงลักษณะการแพร่ของอนุภาคจุลินทรีย์ของน้ำเสียสำหรับการดำเนินการที่ความดันสูง (15 psi) ดังภาพประกอบ 36



ภาพประกอบ 34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีอเทฟลักซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำเสีย ความเข้มข้น SS ของสารป้อน 1,500 mg/l ผ่านเซลล์ูโลสไนเตรทเมมเบรนขนาดต่างกันที่ 0.1 และ 5 micron ที่ความดัน 15 psi และอัตราการไหล 1.25 Lpm



ภาพประกอบ 35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอเมียบลั๊กซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำเสีย ความเข้มข้น SS ของสารป้อน 3,500 mg/l ผ่านเซลล์ูโลสไนเตรทเมมเบรนขนาดต่างกันที่ 0.1 และ 5 micron ที่ความดัน 15 psi และอัตราการไหล 1.25 Lpm



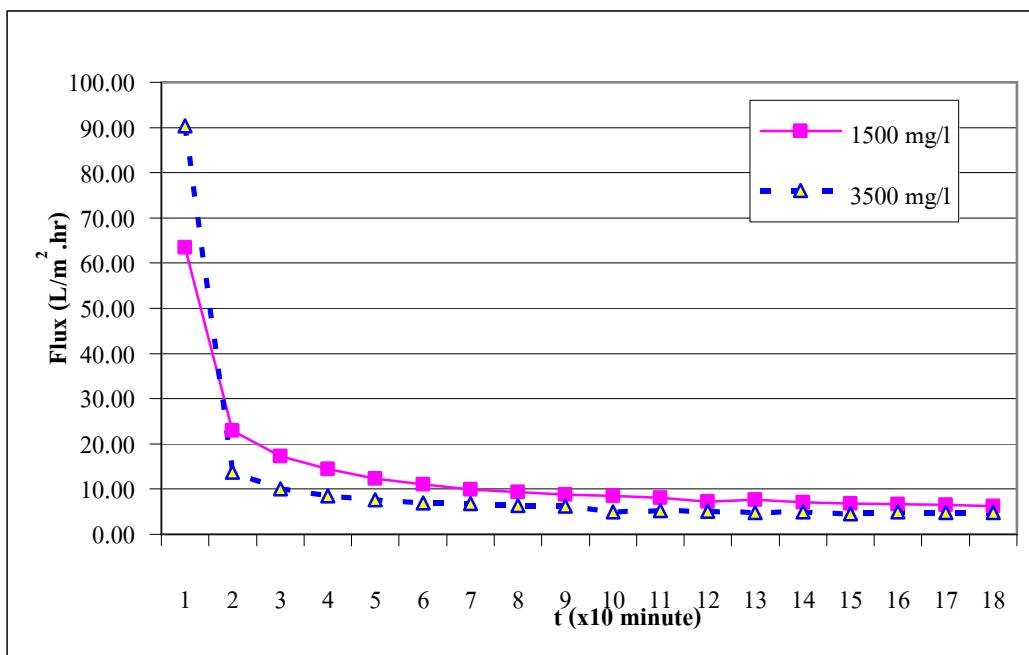
ภาพประกอบ 36 แสดงลักษณะการอุดตันของอนุภาคของสารละลายสำหรับเมมเบรนขนาด 5 และ 0.1 micron ที่การดำเนินการกรองที่ความดันสูง (15psi)

ที่มา: รัตนา จิระรัตนานนท์, 2541

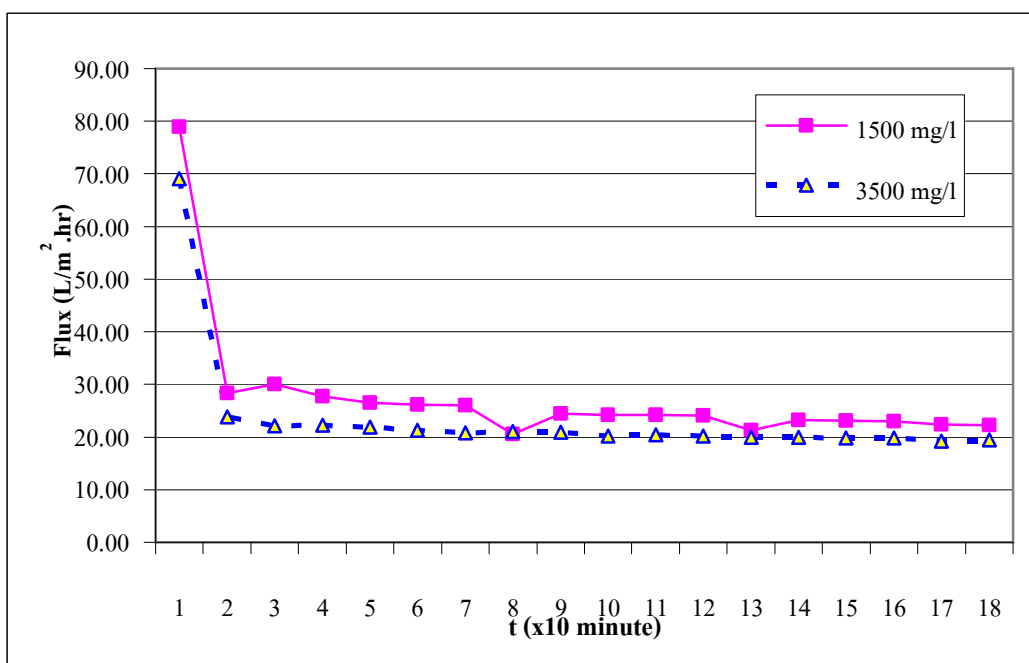
2.4 ผลของความเข้มข้นของสารป้อนต่อเพอเมอเทฟลักซ์และลักษณะการแพร่ของอนุภาค

การศึกษาผลของความเข้มข้นต่อเพอเมอเทฟลักซ์โดยให้ อัตราการไหล ความดัน ขนาดของรูพรุน มีค่าคงที่คือ 1.25 Lpm 15 psi และ 5 micron ตามลำดับโดยทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารป้อนที่ 1500 และ 3500 mg/l และทำการบันทึกน้ำหนักของน้ำเสียที่ผ่านการกรองทุกๆ 10 นาทีพบว่าความเข้มข้นของสารป้อนสูง (3500 mg/l) จะให้ค่าเพอเมอเทฟลักซ์เท่ากับ 11.16 L/m².hr โดยมีค่าต่ำกว่าสารป้อนที่มีความเข้มข้นต่ำ (1500 mg/l) ค่าเพอเมอเทฟลักซ์เท่ากับ 13.01 L/m².hr ดังภาพประกอบ 37

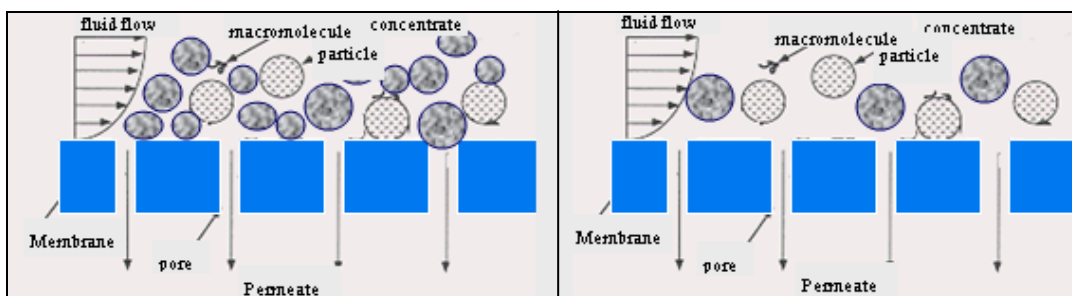
ความเข้มข้นของสารป้อนที่สูงจะมีปริมาณของอนุภาคจุลินทรีย์สูง เมื่อทำการกรองจะทำให้ปริมาณจุลินทรีย์ถูกกักกันไว้มากบนผิวของเมมเบรน ทำให้ความต้านทานการกรองสูง อัตราการไหลผ่านจะต่ำกว่าเมื่อเทียบกับสารป้อนที่มีความเข้มข้นต่ำ จากภาพประกอบ 37 และ 38 พบว่าสารป้อนที่มีความเข้มข้นสูง (วัดในรูปของสารแขวนลอย) จะให้ค่าเพอเมอเทฟลักซ์ที่ต่ำกว่าความเข้มข้นของสารป้อนต่ำเนื่องจากความเข้มข้นสูงจะมีอนุภาคจุลินทรีย์ของน้ำเสียมาก ทำให้การอุดตันและความหนาแน่นของเค้กมากขึ้นทำให้เกิดการอุดตันมากขึ้น แสดงการแพร่ของอนุภาค ดังภาพประกอบ 39 ความต้านทานของการกรองสูง สารละลายจึงไหลผ่านเมมเบรนได้ต่ำกว่าเพอเมอเทฟลักซ์จึงลดลง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Katayon (2000) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของ MLSS ต่อประสิทธิภาพของ Membrane bioreactor สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร โดยมีการทำการทดลองที่ความเข้มข้นของ MLSS ต่ำและสูง ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของ MLSS ต่ำให้ค่าการกำจัด Suspended Solid และค่าความขุ่นได้มาก โดยสามารถกำจัดสารแขวนลอย (Suspended Solid) ได้ถึง 99.2% และกำจัดความขุ่นออกไปได้ถึง 99.73% และค่าของเพอเมอเทฟลักซ์ในกระบวนการที่ความเข้มข้น MLSS ต่ำมีค่าเท่ากับ 5.03 L/m².hr ซึ่งมีค่าสูงกว่าการทดลองที่ความเข้มข้นของ MLSS สูงซึ่งที่ความเข้มข้นสูงได้ เพอเมอเทฟลักซ์ที่ 2.27 L/m².hr และได้ศึกษาเพิ่มเติม พบว่าการใช้ Horizontal Membrane Module สามารถกำจัด ความขุ่น (Turbidity) และสารแขวนลอย (Suspended Solid) และให้ค่าเพอเมอเทฟลักซ์สูงกว่า เมื่อเทียบกับแบบ Vertically Membrane Module



ภาพประกอบ 37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำเสีย ความเข้มข้น SS ของสารป้อนต่างกันที่ 1,500 และ 3,500 mg/l ผ่านเซลล์ูโลส ไนเตรทเมมเบรนขนาด 5 micron ที่ความดัน 15 psi และอัตราการไหล 1.25 Lpm



ภาพประกอบ 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์กับเวลาสำหรับการกรองน้ำเสีย ความเข้มข้น SS ของสารป้อนต่างกันที่ 1,500 และ 3,500 mg/l ผ่านเซลล์ูโลส ไนเตรทเมมเบรนขนาด 5 micron ที่ความดัน 5 psi และอัตราการไหล 1.75 Lpm



ความเข้มข้นสูง (3500 mg/l)

ความเข้มข้นต่ำ (1500 mg/l)

ภาพประกอบ 39 แสดงลักษณะการอุดตันและการแพร่ของอนุภาคจุลินทรีย์ของน้ำเสียสำหรับ

ความเข้มข้นของสารป้อนที่ 3, 500 mg/l และ 1,500 mg/l

ที่มา: รัตนา จิระรัตนานนท์, 2541

2.5 ประสิทธิภาพของการกรอง

จากผลการทดลองการกรองจุลินทรีย์ในน้ำเสีย โดยไมโครฟิลเตรชันแบบการไหลขวาง ประสิทธิภาพของการกรองจะเปรียบเทียบจากค่าของสารแขวนลอยก่อนและหลังการกรองของน้ำเสียโดยพบว่าประสิทธิภาพของการกรองสูงมาก ซึ่งสามารถกรองสารแขวนลอยได้ถึง 99.73% และผลพลอยได้จากการกรองสารแขวนลอย ทำให้ค่าซีโอดีที่อยู่ในรูปของสารแขวนลอยลดลง ซึ่งค่าซีโอดีจากการทดลองสามารถลดลงได้ถึง 58.10% ดังแสดงในภาพประกอบ 40 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียก่อนการกรองและหลังผ่านการกรองด้วยระบบไมโครฟิลเตรชัน แสดงในตาราง 12 และ 13 ตามลำดับ ส่วนลักษณะของน้ำเสียก่อนการกรองและหลังการกรองแสดงในภาพประกอบ 41 และ 42 ตามลำดับ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Yamamoto (1989) ที่ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.1 micron ซึ่งพบว่าสามารถลดค่าซีโอดีได้สูงถึง 95%

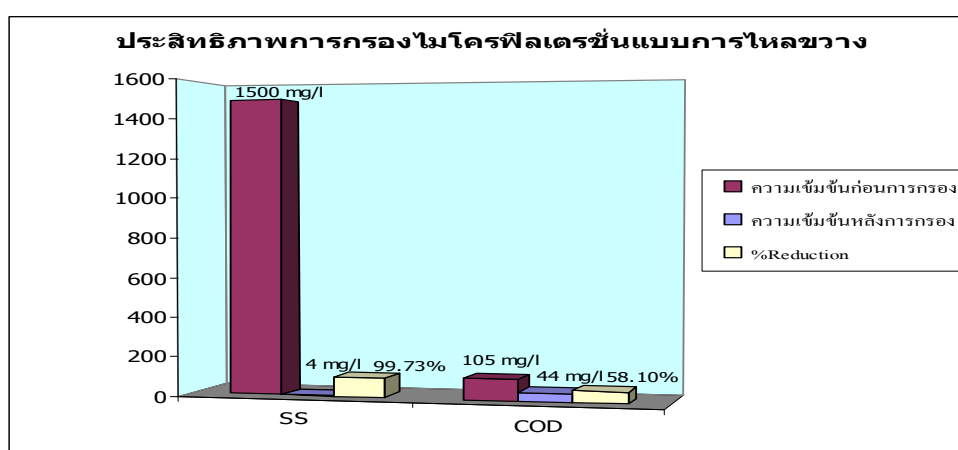
ตาราง 12 ความเข้มข้น SS ของสารป้อนและคุณสมบัติของน้ำก่อนการกรอง

ความเข้มข้นของสารป้อน (mg/l)	COD (mg/l)
3,500	152
2,500	138
1,500	105

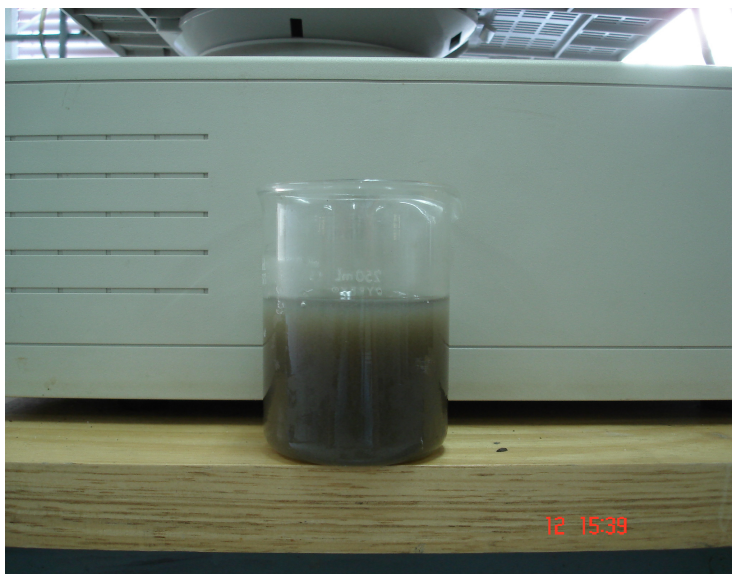
(ผลของค่าซีโอดีเป็นผลเฉลี่ย 3 ครั้งจากการวัด น้ำเสียตัวอย่างที่ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที และนำส่วนที่ใสมาวิเคราะห์)

ตาราง 13 ผลซีไอดี สารแขวนลอยและเพอมีอเทฟลักซ์ของน้ำเสียหลังจากผ่านการกรองด้วยไมโครฟิลเตรชันแบบการไหลขวาง

การทดลองที่	ความเข้มข้น SS ของสารป้อน (mg/l)	ขนาดรูพรุนของเมมเบรน (micron)	ความดัน (psi)	อัตราการไหล (Lpm)	ซีไอดี (mg/l)	ความเข้มข้น SS ของเพอมีอเทฟลักซ์ (mg/l)	เพอมีอเทฟลักซ์ (L/m ² .hr)
1	1500	0.1	5	1.25	25	3.2	11.13
2		0.1	5	1.75	20	3.4	23.16
3		0.1	15	1.25	20	3.5	11.08
4		0.1	15	1.75	22	3.7	14.63
5		5	5	1.25	36	4.76	19.63
6		5	5	1.75	44	4	27.58
7		5	15	1.25	44	7.5	13.01
8		5	15	1.75	20	3.39	16.89
9	2500	1.2	10	1.5	30	4	9.38
10	3500	0.1	5	1.25	35	4.3	9.4
11		0.1	5	1.75	40	6.2	19.98
12		0.1	15	1.25	38	4.8	9.57
13		0.1	15	1.75	38	5	13.98
14		5	5	1.25	40	6.3	14.06
15		5	5	1.75	46	6.5	23.47
16		5	15	1.25	42	6.5	11.16
17		5	15	1.75	28	5.88	15.52



ภาพประกอบ 40 แสดงประสิทธิภาพของการกรองน้ำเสียความเข้มข้น SS ของสารป้อน 1500 mg/l โดยระบบไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวาง ผ่านเซลล์โลสไนเตรทเมมเบรนขนาด 5 micron ที่ ความดัน 5 psi อัตราการไหลของสารป้อนที่ 1.75 Lpm และค่าซีไอดี 105 mg/l



ภาพประกอบ 41 แสดงภาพน้ำเสียตัวอย่างจากบ่อเติมอากาศของระบบบำบัดแบบตะกอนเร่งจากโรงงานอาหารทะเลแช่แข็งที่ความเข้มข้น 1,500 mg/l



ภาพประกอบ 42 แสดงภาพน้ำเสียตัวอย่างหลังจากกรองด้วยไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวางผ่านเซลลูโลสไนเตรทเมมเบรนขนาด 5 micron สำหรับการกรองน้ำเสียที่ความเข้มข้น 1500 mg/l ความดัน 5 psi และอัตราการไหล 1.75 Lpm

2.6 สมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์

การหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อ ค่าเพอมีเอทฟลักซ์สามารถสรุปได้จากผลการทดลองของชุดการทดลองที่ออกแบบโดยโปรแกรม Response Surface Method ดังแสดงในตาราง 13 ค่าของเพอมีเอทฟลักซ์โดยการหาความสัมพันธ์จากโปรแกรม Response Surface Method (RSM) ซึ่งความสัมพันธ์ในรูปของสมการแสดงดังสมการ (11)

$$\text{Flux (L/m}^2\text{.hr)} = 5.608 + 9.074Q^2 - 1.315QP + 0.082P^2 - 0.001C \quad (11)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลของสารป้อน (ในช่วง 1.25-1.75Lpm)

P = ความดันในการดำเนินการ (ในช่วง 5-15psi)

C = ความเข้มข้นของสารป้อน (ในช่วง 1500-3500mg/l)

ซึ่งความแม่นยำของสมการสามารถดูได้จากค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอย (Linear Regression Coefficient) โดยค่า R^2 ใกล้เคียง 1 หมายถึงสมการจะมีความแม่นยำสูง และค่า R^2 ที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.967

จากการวิเคราะห์ผลของสมการจะเห็นได้ว่าตัวแปร ที่มีความสำคัญต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์สูงที่สุดนั่นคือ อัตราการไหลของสารป้อน หมายถึง การเกิดแรงเหวี่ยงบนผิวหน้าเมมเบรนจะทำให้อนุภาคของจุลินทรีย์ไม่สามารถเกาะติดผิวหน้าเมมเบรนได้ ดังนั้นจึงลดความต้านทานเชิงกลของชั้นฟาวลิ่ง แต่ปรากฏการณ์ดังกล่าวข้างต้นจะไม่เกิดขึ้นถ้าดำเนินการ โดยใช้ความดันสูงร่วมกับอัตราการไหลสูง ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับการกรองทางนมด้วยเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (Cheryan (1998)) แสดงดังภาพประกอบ 17

3. รูปแบบของการอุดตันในการกรอง

ได้ทำการศึกษารูปแบบของการอุดตัน ในกระบวนการกรองแยกตะกอนจุลินทรีย์ เนื่องจากการดำเนินการกรองด้วยเมมเบรนเมื่อดำเนินการไประยะหนึ่ง เมมเบรนจะเกิดการอุดตันทำให้สารละลายที่ผ่านการกรองลดน้อยลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาลักษณะการอุดตันของเมมเบรนเพื่อกำหนดวิธีการล้างทำความสะอาดเมมเบรนด้วยวิธีที่เหมาะสม เพื่อให้เมมเบรนมีสภาพใกล้เคียงเมมเบรนใหม่มากที่สุดและยืดอายุการใช้งานของเมมเบรน โดยการประยุกต์ใช้สมการของ Hermia (1992) เพื่อที่จะศึกษาลักษณะการอุดตันว่าเป็นการอุดตันแบบ Complete

blocking model Intermediate model Standard blocking model หรือ Cake filtration model โดยหาความสัมพันธ์ของสมการดังตาราง 14

ตาราง 14 สมการแสดงความสัมพันธ์สำหรับโมเดลของการอุดตันของ Hermia (1992)

โมเดล	สมการ	ความสัมพันธ์ของกราฟเส้นตรง	สมการที่
Complete blocking	$J = J_0 - K_b V$	พล็อตกราฟระหว่าง J กับ V	(12)
Intermediate blocking	$\frac{1}{J} = \frac{1}{J_0} + K_i t$	พล็อตกราฟระหว่าง $\frac{1}{J}$ กับ t	(13)
Standard blocking	$\sqrt{\frac{J}{J_0}} = 1 - \frac{K_s V}{2}$	พล็อตกราฟระหว่าง $\sqrt{\frac{J}{J_0}}$ กับ V	(14)
Cake filtration	$\frac{1}{J} = \frac{1}{J_0} + K_c V$	พล็อตกราฟระหว่าง $\frac{1}{J}$ กับ V	(15)

เมื่อ K_b = constant value for complete blocking model ($1/m^2 \cdot hr$)

K_i = constant value for intermediate blocking model (m^2/L)

K_s = constant value for standard blocking model ($1/L$)

K_c = constant value for cake filtration model ($m^2 \cdot hr / L^2$)

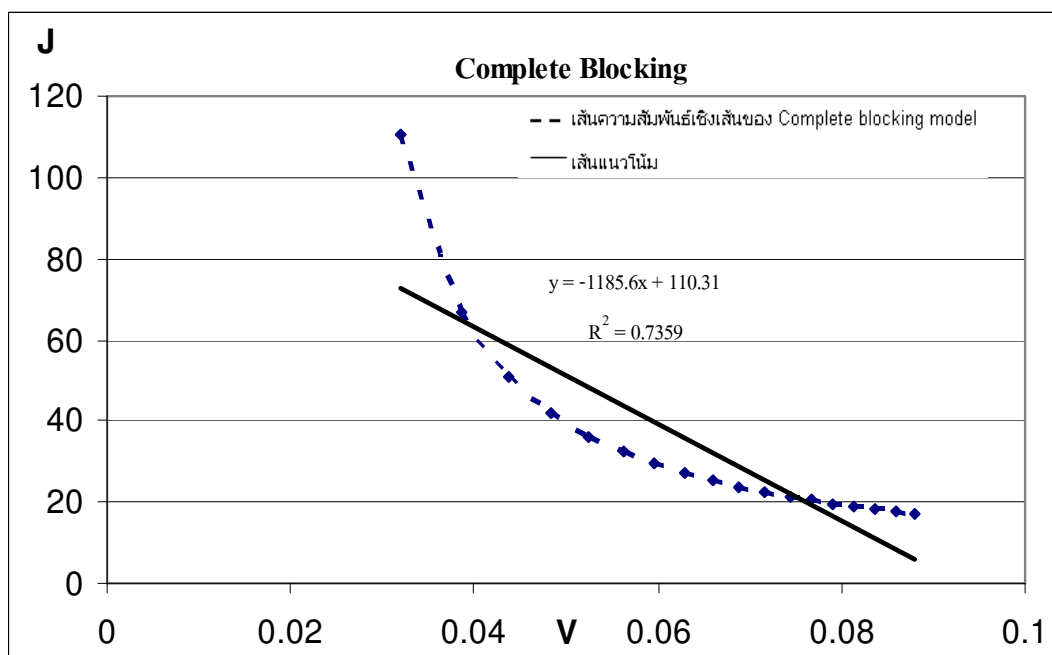
J = permeate flux ($L/m^2 \cdot hr$)

V = volume (L)

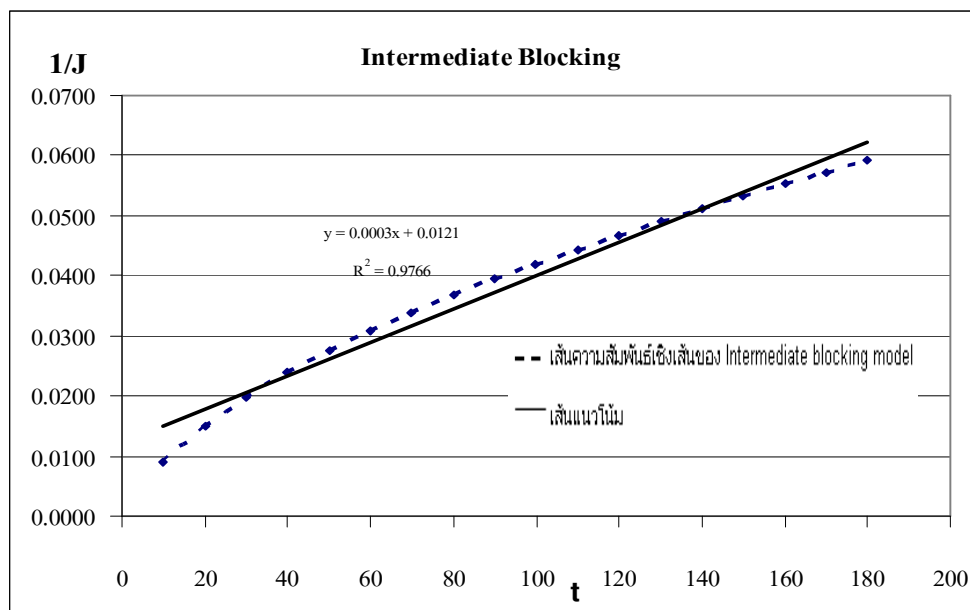
t = time (hr)

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการ plot graph เพื่อหาความสัมพันธ์ในแต่ละสมการโดยสมการสำหรับโมเดลของ Hermia (1992) เป็นสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นหากโดยตัดสินจากค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอย (Linear Regression Coefficient) ให้ค่า R^2 ใกล้เคียง 1 นั่นคือกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง หมายถึงการอุดตันสำหรับการกรองจุลินทรีย์ของน้ำเสียนั้นเป็นไปตามโมเดลดังกล่าว

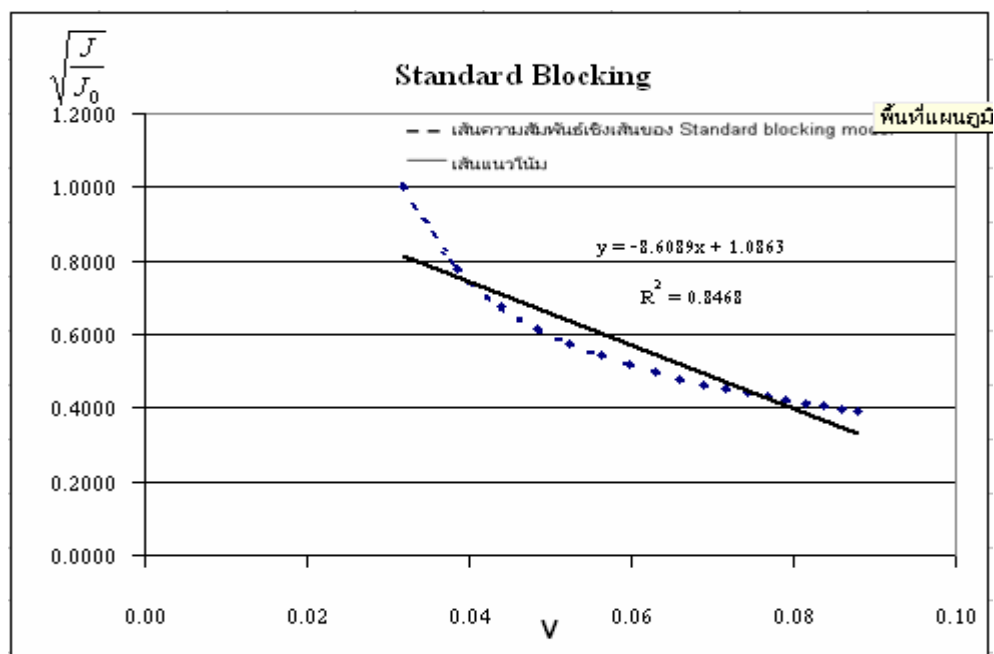
3.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอยในแต่ละโมเดลของการอุดตันสำหรับการทดลองการกรองน้ำเสียที่ความเข้มข้น 1,500 mg/l ที่ความดัน 15 psi อัตราการไหลของสารป้อน 1.75 Lpm และที่เมมเบรนขนาด 5 micron



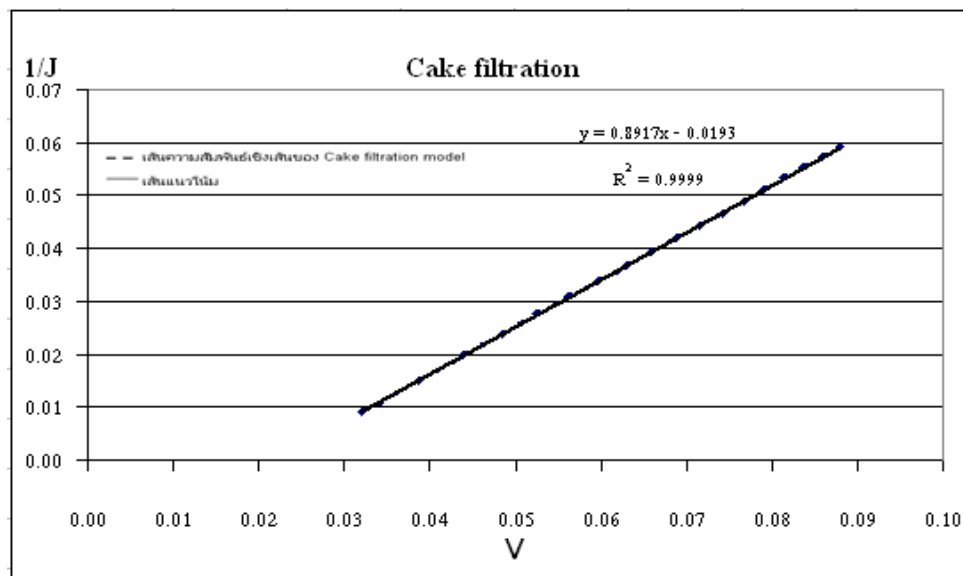
ภาพประกอบ 43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเทฟลักซ์(J) กับปริมาตร (V) สำหรับการกรองน้ำเสียความเข้มข้น SS ของสารป้อน 1,500 mg/l ผ่านเซลล์ูโลสไนเตรทเมมเบรนขนาด 5 micron ที่ความดัน 15 psi และอัตราการไหล 1.75 Lpm



ภาพประกอบ 44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของเพอมีเอทพลักซ์ ($1/J$) กับเวลา (t) สำหรับการกรองน้ำเสียความเข้มข้น SS ของสารป้อน 1,500 mg/l ผ่านเซลล์ูโลสไนเตรทเมมเบรนขนาด 5 micron ที่ความดัน 15 psi และอัตราการไหล 1.75 Lpm

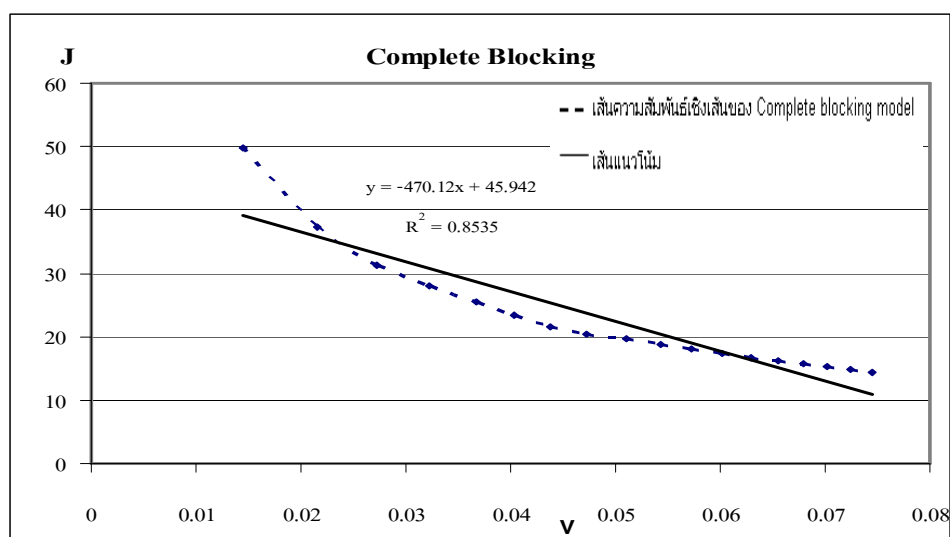


ภาพประกอบ 45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{\frac{J}{J_0}}$ กับปริมาตร (v) สำหรับการกรองน้ำเสียความเข้มข้น SS ของสารป้อน 1,500 mg/l ผ่านเซลล์ูโลสไนเตรทเมมเบรนขนาด 5 micron ที่ความดัน 15 psi และอัตราการไหล 1.75 Lpm

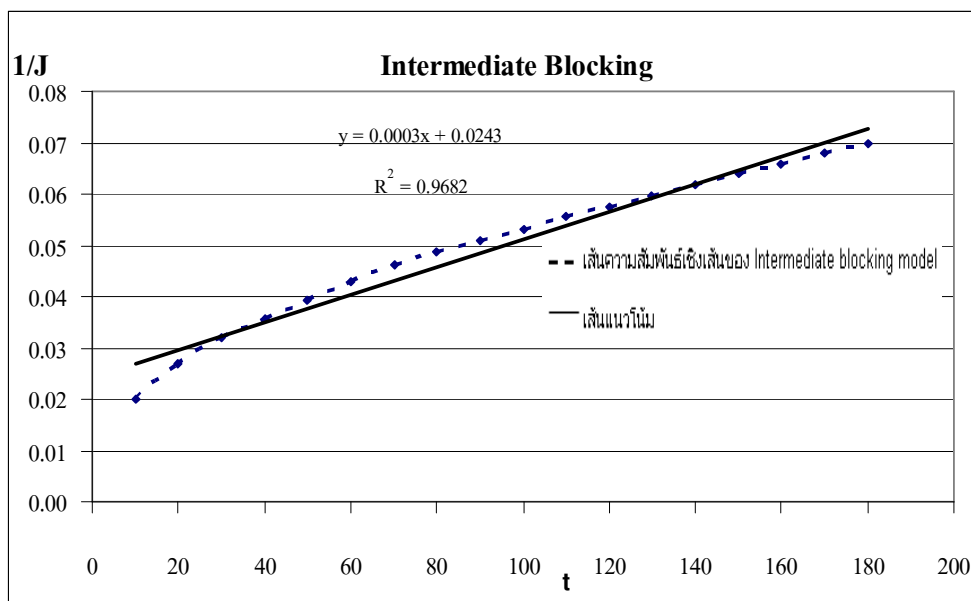


ภาพประกอบ 46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ส่วนกลับของเพอมีเอทพลักซ์(1/J) กับปริมาตร (V) สำหรับการกรองน้ำเสียความเข้มข้น SS ของสารป้อน 1,500 mg/l ผ่านเซลล์ูโลสไนเตรทเมมเบรนขนาด 5 micron ที่ความดัน 15 psi และอัตราการไหล 1.75Lpm

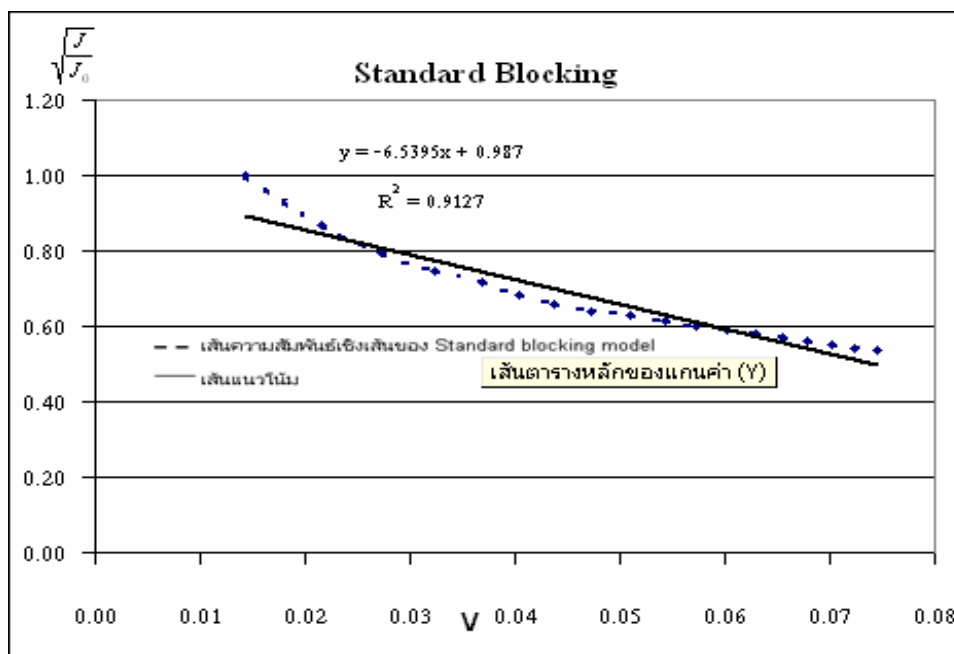
3.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอยในแต่ละ โมเดลของการอุดตันสำหรับการทดลองการกรองน้ำเสียที่ความเข้มข้น 3,500 mg/l ที่ความดัน 5 psi อัตราการไหลของสารป้อน 1.75 Lpm และที่เมมเบรนขนาด 0.1 micron



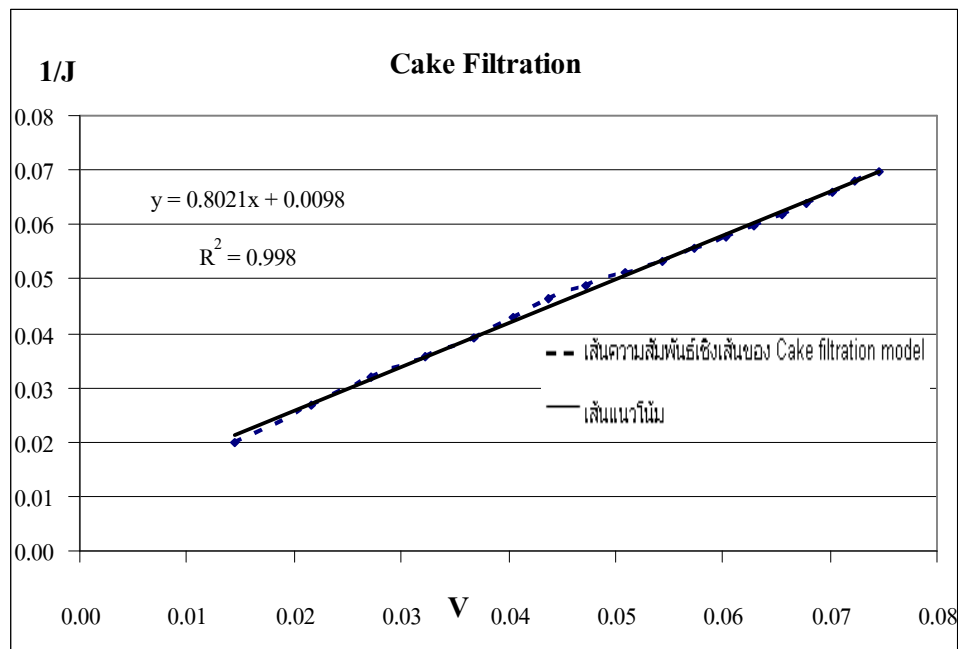
ภาพประกอบ 47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทพลักซ์(J) กับปริมาตร (V) สำหรับการกรองน้ำเสียความเข้มข้น SS ของสารป้อน 3,500 mg/l ผ่านเซลล์ูโลสไนเตรทเมมเบรนขนาด 0.1 micron ที่ความดัน 5 psi และอัตราการไหล 1.75 Lpm



ภาพประกอบ 48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของเพอมีเอทฟลักซ์ ($1/J$) กับเวลา (t) สำหรับการกรองน้ำเสียความเข้มข้น SS ของสารป้อน 3,500 mg/l ผ่านเซลลูโลสไนเตรทเมมเบรนขนาด 0.1 micron ที่ความดัน 5 psi และอัตราการไหล 1.75 Lpm

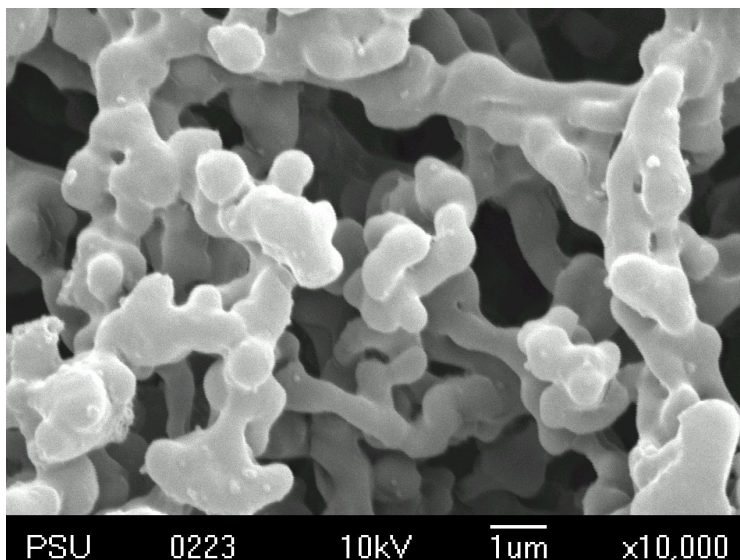


ภาพประกอบ 49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{\frac{J}{J_0}}$ กับปริมาตร (V) สำหรับการกรองน้ำเสียความเข้มข้น SS ของสารป้อน 3,500 mg/l ผ่านเซลลูโลสไนเตรทเมมเบรนขนาด 0.1 micron ที่ความดัน 5 psi และอัตราการไหล 1.75 Lpm

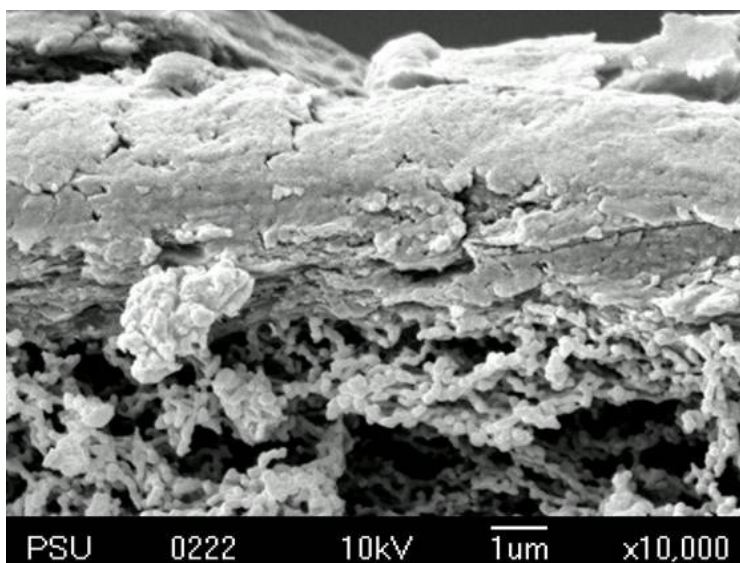


ภาพประกอบ 50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ส่วนกลับของเพอิมิเอทฟลักซ์(1/J) กับปริมาตร (V) สำหรับการกรองน้ำเสียความเข้มข้น SS ของสารป้อน 3,500 mg/l ผ่านเซลล์ูโลส ไนเตรทเมมเบรนขนาด 0.1 micron ที่ความดัน 5 psi และอัตราการไหล 1.75Lpm

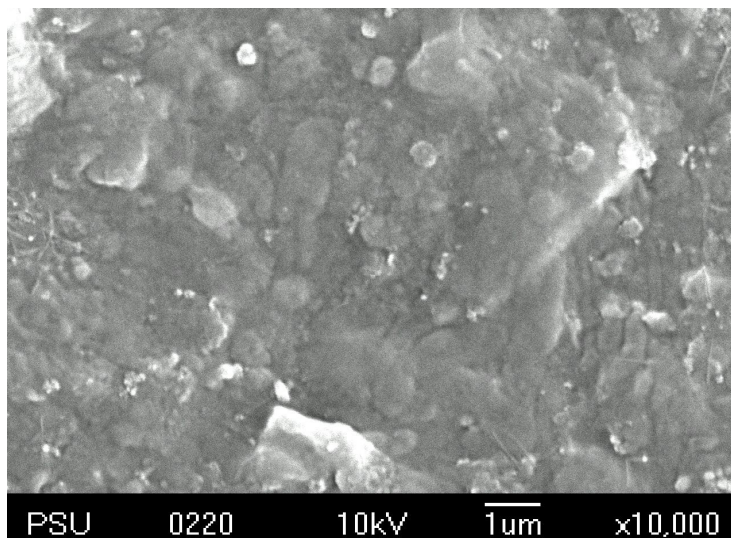
จากผลการทดลองและการหาความสัมพันธ์ของการอุดตันพบว่า ทุกการทดลองจะเกิดการอุดตันเป็นแบบ Cake Filtration Model โดยสามารถอธิบายการกรองอนุภาคสำหรับการอุดตันแบบ Cake Filtration Model ที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ กันคือ อนุภาคที่ใหญ่กว่ารูพรุนจะถูกสะสมและเกิดเป็นเค้กที่ผิวหน้าเมมเบรน ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กและใหญ่ผสมกัน อนุภาคขนาดเล็กจะถูกสะสมอยู่ภายในรูพรุนและต่อมาจะเกิดการสะสมของอนุภาคขนาดใหญ่ เกิดเป็นเค้กที่ผิวหน้าเมมเบรน จนในที่สุดเมมเบรนสามารถกักโมเลกุล หรืออนุภาคขนาดเล็กไว้เกิดเป็นชั้นบางบนเมมเบรน (กรณีถ้าเป็นโมเลกุลเรียก เจล และถ้าเป็นอนุภาคเรียก เค้ก) ซึ่งสามารถทำการยืนยันผลการทดลองได้โดยการใช้อุปกรณ์จุลทรรศน์แบบส่องกราด หรือ scanning electron microscopy (SEM) เป็นไปได้ที่จะเห็นชั้นของการเกิดฟาวลิง (fouling layer) ดังภาพประกอบ 51 52 53 54 55 และ 56



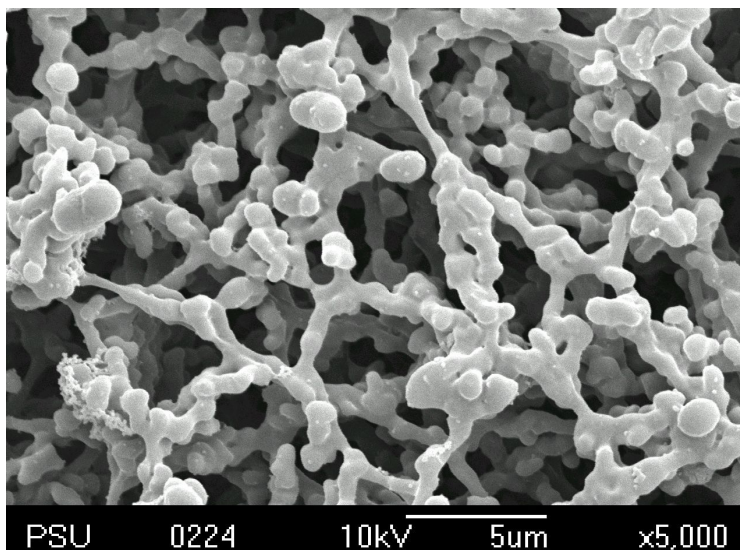
ภาพประกอบ 51 แสดงภาพขยายของเซลล์โลสไนเตรทเมมเบรนขนาด 1.2 micron ที่ยังไม่ผ่านการกรองโดยใช้กำลังขยาย 10,000 เท่าด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด



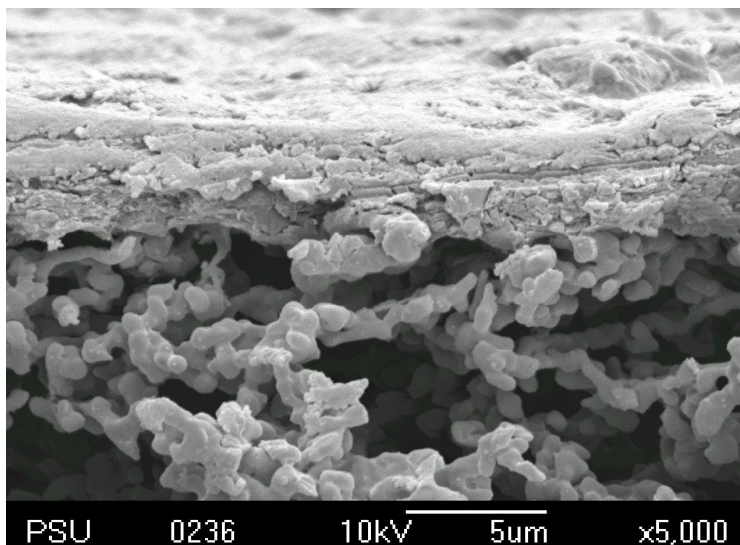
ภาพประกอบ 52 แสดงภาพขยายจากการตัดขวางโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของเมมเบรนที่ผ่านการกรองจุลินทรีย์ของน้ำเสียโดยแสดงการเกิดการอุดตันบนผิวหน้าของเซลล์โลสไนเตรทเมมเบรนขนาด 1.2 micron หลังการกรองน้ำเสียความเข้มข้น SS ของสารป้อน 1500 mg/l ที่อัตราการไหล 1.5 Lpm ความดัน 10 psi โดยใช้กำลังขยาย 10,000 เท่า



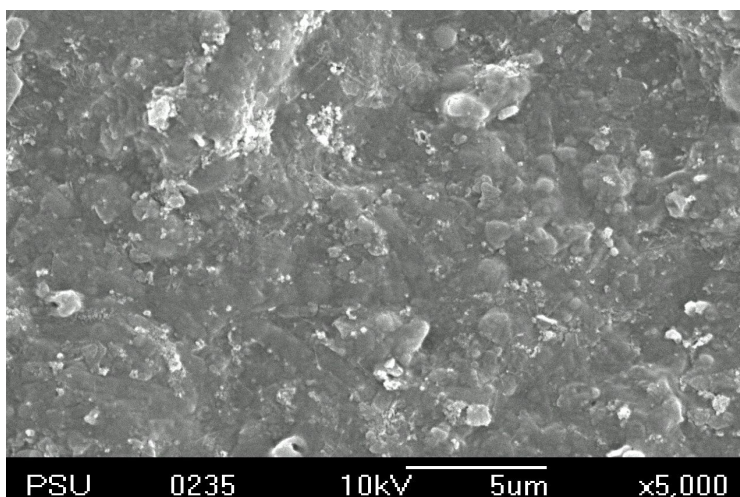
ภาพประกอบ 53 แสดงภาพขยายของเค็กบนผิวหน้าของเมมเบรนหลังจากการกรองจุลินทรีย์ของน้ำเสียความเข้มข้น SS ของสารป้อน 1500 mg/l ผ่านเซลลูโลสไนเตรทเมมเบรนขนาด 1.2 micron ที่อัตราการไหล 1.5 Lpm และความดัน 10 psi โดยใช้กำลังขยาย 10,000 เท่าด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด



ภาพประกอบ 54 แสดงภาพขยายของเซลลูโลสไนเตรทเมมเบรนขนาด 5 micron ที่ยังไม่ผ่านการกรองน้ำเสีย โดยใช้กำลังขยาย 5,000 เท่าด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด



ภาพประกอบ 55 แสดงภาพขยายจากการตัดขวางโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของเมมเบรนที่ผ่านการกรองจุลินทรีย์ของน้ำเสียโดยแสดงการเกิดการอุดตันบนผิวหน้าของเซลลูโลสไนเตรทเมมเบรนขนาด 5 micron หลังการกรองน้ำเสียความเข้มข้น SS ของสารป้อน 1500 mg/l อัตราการไหล 1.75 Lpm ความดัน 5 psi โดยใช้กำลังขยาย 5,000 เท่า



ภาพประกอบ 56 แสดงภาพขยายของเค็บบนผิวหน้าของเมมเบรนหลังจากการกรองจุลินทรีย์ของน้ำเสียความเข้มข้น SS ของสารป้อน 1500 mg/l ผ่านเซลลูโลสไนเตรทเมมเบรนขนาด 5 micron ที่อัตราการไหล 1.75 Lpm และความดัน 5 psi และ โดยใช้กำลังขยาย 5,000 เท่าด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

จากการยืนยันผลโดย SEM ก็สามารระบุได้ว่าการกรองแยกตะกอนจุลินทรีย์ใน กระบวนการไมโครฟิลเตรชันแบบการไหลขวางทำให้เกิดการอุดตันของเมมเบรนแบบ Cake Filtration Model ซึ่งทำให้สามารถกำหนดวิธีการล้างของเมมเบรนได้โดยง่าย โดยส่วนใหญ่การอุดตัน ที่มีการสะสมที่ผิวหน้าเมมเบรนมากกว่าการอุดตันในรูพรุน จะนิยมใช้การทำความสะอาดเมมเบรนแบบ ทางกายภาพนั่นคือ การทำการล้างกลับทาง (Back washing) ซึ่งทำได้โดยการป้อนสารละลายภายใต้ ความดันเข้าทางด้านเพอมีเอท ซึ่งจะช่วยให้สารละลายคั้นสารอุดตันหลุดออกจากเมมเบรน การล้าง กลับทางอาจทำระหว่างการกรอง เช่น กรอง 30 นาทีแล้วป้อนสารละลายกลับทาง 2-3 นาทีเป็นต้น หรืออาจทำเมื่อเสร็จสิ้นการกรองคือล้างกลับทางด้วยน้ำหรือสารทำความสะอาด ตัวอย่างเช่น ใน การทำงานปกติใช้แผ่นเมมเบรนกลวงเป็นการป้อนสารละลายด้านในเส้นใย แต่ในการล้างกลับทาง เป็นการป้อนสารด้านนอกเส้นใย ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ อุปกรณ์จะต้องมีการออกแบบเฉพาะให้มีการ ล้างกลับทางได้

จากโมเดลของการอุดตันของ Hermia (1992) และการยืนยันผลด้วย SEM พบว่า การกรองจุลินทรีย์ของน้ำเสียด้วยไมโครฟิลเตรชันแบบการไหลขวาง เกิดการอุดตันแบบ Cake filtration model บนผิวหน้าของเมมเบรนโดยเมื่อทำการทดลองโดยการล้างผิวหน้าเมมเบรน แล้ว นำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง โดยได้ทำการทดลองที่ความดัน 5 psi อัตราการไหลของสารป้อนที่ 1.75 Lpm ขนาดเมมเบรนที่ 5 micron และความเข้มข้นของสารป้อนที่ 1,500 mg/l พบว่า ค่าฟลักซ์มีค่า ลดลง 38% โดยค่าฟลักซ์จะลดลงจาก 27.58 L/m².hr เหลือเพียง 17 L/m².hr และค่า COD มีค่า เท่ากับ 45 mg/l และค่าสารแขวนลอย มีค่าเท่ากับ 7.3 mg/l

4. การศึกษาค่าความต้านทานเมมเบรน(Membrane Resistance) และความต้านทานจากการอุดตัน (Fouling Resistance)

4.1 การศึกษาค่าความต้านทานเมมเบรน (Membrane Resistance, R_m)

จากการศึกษาสมการของ Darcy's Law ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์เพื่อใช้ในการ ทำนายค่าเพอมีเอทฟลักซ์สำหรับ transmembrane pressure ต่างๆ ได้ดังนี้

$$J(t) = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu(R_t)} = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_f)} \quad (16)$$

J = Permeate flux (m³/(m²h))

V = total volume of permeate (m³)

A = membrane area (m^2)

ΔP = TMP (Pa)

μ = Permeate viscosity (Pa.s)

R_t = total resistance (m^{-1})

R_m = intrinsic membrane resistance (m^{-1})

R_f = fouling resistance (m^{-1})

สำหรับการหาค่า Membrane Resistance ทำได้โดยการหาค่าจากฟลักซ์ของน้ำกลั่นดังสมการ (17) คือ

$$J_w = \frac{P_T}{R_m} \quad (17)$$

4.1.1 ทำการทดลองเพื่อหาค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่น ที่ความดันต่างๆสำหรับ
เมมเบรนขนาด 5 micron ได้ผลดังตาราง 15

ตาราง 15 แสดงผลของความต้านทานเมมเบรนสำหรับเมมเบรน 5 micron

ขนาดเมมเบรน (Membrane size, micron)	ความดัน (Pressure, psi)	อัตราการไหล (Feed rate, Lpm)	เวลาในการกรอง (time, min)	น้ำหนักที่กรองได้ (g)	ความต้านทานเมมเบรน (Membrane resistance, m^{-1})
5	5	1.5	5	702.07	
			10	862.69	6.48×10^8
			15	963.48	
	10	1.5	5	1695.11	
			10	1770.05	6.86×10^8
			15	1820.02	
	15	1.5	5	2314.12	
			10	2486.61	7.23×10^8
			15	2587.35	

ค่า Membrane Resistance มีค่าใกล้เคียงกันจึงนำมาหาค่าเฉลี่ยสำหรับค่า Membrane Resistance สำหรับเมมเบรน 5 micron คือมีค่าเท่ากับ $6.86 \times 10^8 m^{-1}$

4.1.2 ทำการทดลองเพื่อหาค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่น ที่ความดันต่างๆสำหรับ
เมมเบรนขนาด 0.1 micron ได้ผลดังตาราง 16

ตาราง 16 แสดงผลของความต้านทานเมมเบรนสำหรับเมมเบรน 0.1 micron

ขนาดเมมเบรน (Membrane size, micron)	ความดัน (Pressure,psi)	อัตราการไหล (Feed rate, Lpm)	เวลาในการกรอง (time,min)	น้ำหนักที่กรองได้ (g)	ความต้านทานเมมเบรน (Membrane resistance,m ⁻¹)
0.1	5	1.5	5	49.74	
			10	107.33	3.90x10 ⁹
			15	156.48	
	10	1.5	5	90.16	
			10	240.12	4.06x10 ⁹
			15	307.11	
	15	1.5	5	180.12	
			10	320.16	4.03x10 ⁹
			15	465.64	

ค่า Membrane Resistance มีค่าใกล้เคียงกันจึงนำมาหาค่าเฉลี่ยสำหรับค่า Membrane Resistance สำหรับเมมเบรน 0.1 micron คือมีค่าเท่ากับ 4.0x10⁹ m⁻¹

4.1.3 ทำการทดลองเพื่อหาค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่น ที่ความดันต่างๆสำหรับเมมเบรนขนาด 1.2 micron ได้ผลดังตาราง 17

ตาราง 17 แสดงผลของความต้านทานเมมเบรนสำหรับเมมเบรน 1.2 micron

ขนาดเมมเบรน (Membrane size, micron)	ความดัน (Pressure,psi)	อัตราการไหล (Feed rate, Lpm)	เวลาในการกรอง (time,min)	น้ำหนักที่กรองได้ (g)	ความต้านทานเมมเบรน (Membrane resistance,m ⁻¹)
1.2	5	1.5	5	506	
			10	596	9.10x10 ⁸
			15	686	
	10	1.5	5	1090	
			10	1230	9.53x10 ⁸
			15	1310	
	15	1.5	5	1330	
			10	1580	10.76x10 ⁸
			15	1740	

ค่า Membrane Resistance มีค่าใกล้เคียงกันจึงนำมาหาค่าเฉลี่ยสำหรับค่า Membrane Resistance สำหรับเมมเบรน 1.2 micron คือมีค่าเท่ากับ 9.80x10⁸ m⁻¹

ค่าความต้านทานของเมมเบรนสำหรับขนาดรูพรุนต่างๆที่หาได้จากการกรองน้ำกลั่น แสดงดังตาราง 18

ตาราง 18 แสดงผลของความต้านทานเมมเบรนสำหรับเมมเบรนขนาดรูพรุนต่างๆ

ขนาดเมมเบรน (Membrane size, micron)	ความต้านทานเมมเบรน (Membrane resistance, m^{-1})
0.1	4.0×10^9
1.2	9.80×10^8
5	6.86×10^8

4.2 ศึกษาค่าความต้านทานจากการอุดตัน (Fouling Resistance, R_f)

จากสมการของ Darcy's Law โดยนำค่า Membrane Resistance จาก 4.1 และสมการที่ (15) มาประยุกต์ใช้กับค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่ได้ทำการทดลองไว้ก่อนหน้านี้ โดยค่า R_f ที่ได้แสดงดังตาราง 19

ตาราง 19 แสดงผลของ Fouling Resistance สำหรับการทดลองการกรองไมโครฟิลเตรชันแบบการไหลขวาง

การทดลองที่	ความเข้มข้น SS ของสารป้อน (mg/l)	ขนาดเมมเบรน (micron)	ความดัน (psi)	อัตราการไหลของสารป้อน (Lpm)	เพอมีเอทฟลักซ์ ($L/m^2 \cdot hr$)	ความต้านทานการอุดตัน, $R_f (x 10^{10} m^{-1})$
1	1500	0.1	5	1.25	11.13	12.54
2		0.1	5	1.75	23.16	5.82
3		0.1	15	1.25	11.08	38.99
4		0.1	15	1.75	14.63	29.13
5		5	5	1.25	19.63	7.27
6		5	5	1.75	27.58	5.15
7		5	15	1.25	13.01	33.14
8		5	15	1.75	16.89	25.51
9	2500	1.2	10	1.5	9.38	30.61
10	3500	0.1	5	1.25	9.4	14.92
11		0.1	5	1.75	19.98	6.81
12		0.1	15	1.25	9.57	44.74
13		0.1	15	1.75	13.98	30.5
14		5	5	1.25	14.06	10.17
15		5	5	1.75	23.47	6.07
16		5	15	1.25	11.16	38.64
17		5	15	1.75	15.52	27.77

ตาราง 20 แสดงค่า Fouling Resistance ที่ความดันและอัตราการไหลในการดำเนินการต่างๆ

ความดัน (Pressure,psi)	อัตราการไหล (Feed rate, Lpm)	ความต้านทานการอุดตัน (Fouling Resistance , m ⁻¹)
5	1.25	11.22 x10 ¹⁰
5	1.75	5.96x10 ¹⁰
10	1.50	30.61 x10 ¹⁰
15	1.25	31.9x10 ¹⁰
15	1.75	28.23x10 ¹⁰

จากค่า Fouling Resistance พบว่าการเกิดการอุดตันสำหรับเมมเบรนในแต่ละขนาด การอุดตัน จะเกิดมากสำหรับการดำเนินการที่ความดันสูงเนื่องจากการดำเนินการโดยการเพิ่มความดันจะทำให้อนุภาคของจุลินทรีย์ถูกแรงดันที่สูงกว่าอัดตัวกันบนผิวของเมมเบรน เกิดการอุดตันบนผิวของเมมเบรนมากขึ้น ชั้นเจลจากปรากฏการณ์คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน/เค้ก ถูกอัดแน่นมากขึ้น ทำให้สามารถกักกันตัวถูกละลายได้มากและการเพิ่มอัตราการไหลของสารป้อนจะทำให้เกิดแรงเฉือนขึ้นบนผิวหน้าของเมมเบรน ทำให้สารละลายไม่สามารถเกาะติดผิวหน้าของเมมเบรนได้ ทำให้ความต้านทานการอุดตันลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่า Membrane Resistance และค่า Fouling Resistance มีค่าแตกต่างกันมาก ซึ่งการคำนวณหาค่าเพอมีเอทฟลักซ์สามารถทำการตัดเทอมของ Membrane Resistance ได้โดยค่าเพอมีเอทฟลักซ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และทำการยืนยันผลจากการคำนวณดังต่อไปนี้

การหาค่าเพอมีเอทฟลักซ์สำหรับการดำเนินการกรองน้ำเสียที่ความเข้มข้น 2500 mg/l ที่ ความดัน 10 psi อัตราการไหลที่ 1.5 Lpm ด้วยเมมเบรนขนาด 1.2 micron จากสมการของ Darcy's Law

$$J(t) = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu(R_t)} = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_f)}$$

$$P = 10 \text{ psi} = 0.68 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$R_m \text{ สำหรับเมมเบรนขนาด } 1.2 \text{ micron} = 9.8 \times 10^8 \text{ m}^{-1}$$

R_f สำหรับสภาวะการดำเนินการกรองดังกล่าว = $30.61 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$

$\mu = 0.085 \text{ Pa.s}$

$$J = (0.68 \times 10^5) \times 1000 \times 3600 / (0.085 \times (9.8 \times 10^8 + 30.61 \times 10^{10}))$$

$$J = 9.38 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$$

เพื่อทำการยืนยันผลว่าค่า Membrane Resistance มีค่าน้อยกว่าค่า Fouling Resistance มากเมื่อตัดเทอมของ Membrane Resistance ในการคำนวณจะไม่ส่งผลต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์ดังต่อไปนี้

$$J = (0.68 \times 10^5) \times 1000 \times 3600 / (0.085 \times (30.61 \times 10^{10}))$$

$$J = 9.40 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$$

ซึ่งเปรียบเทียบกับผลเพอมีเอทฟลักซ์จากการคำนวณด้วยสมการของ Darcy's Law ซึ่งได้ค่าเท่ากับ $9.38 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ พบว่าการตัดเทอมของ Membrane Resistance จะให้ผลที่แตกต่างกันเพียง 0.2%

Membrane Resistance มีผลต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์น้อยมาก ซึ่ง Membrane Resistance จะมีความสัมพันธ์กับขนาดของเมมเบรน ดังนั้นขนาดของเมมเบรนจึงไม่มีผลต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์สำหรับการทดลองนี้ โดยสัมพันธ์กับสมการ (10) ที่ได้จากการนำผลการทดลองไปหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพอมีเอทฟลักซ์กับตัวแปรต่างๆ โดยสมการดังกล่าวขนาดของเมมเบรนจะไม่ส่งผลต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์ และได้แสดงผลของเพอมีเอทฟลักซ์ที่ได้การทดลองเปรียบเทียบกับเพอมีเอทฟลักซ์ที่ได้จากสมการ (10) และสมการของ Darcy's Law โดยตัดเทอมของ Membrane Resistance ดังตาราง 21 และ ภาพประกอบ 58

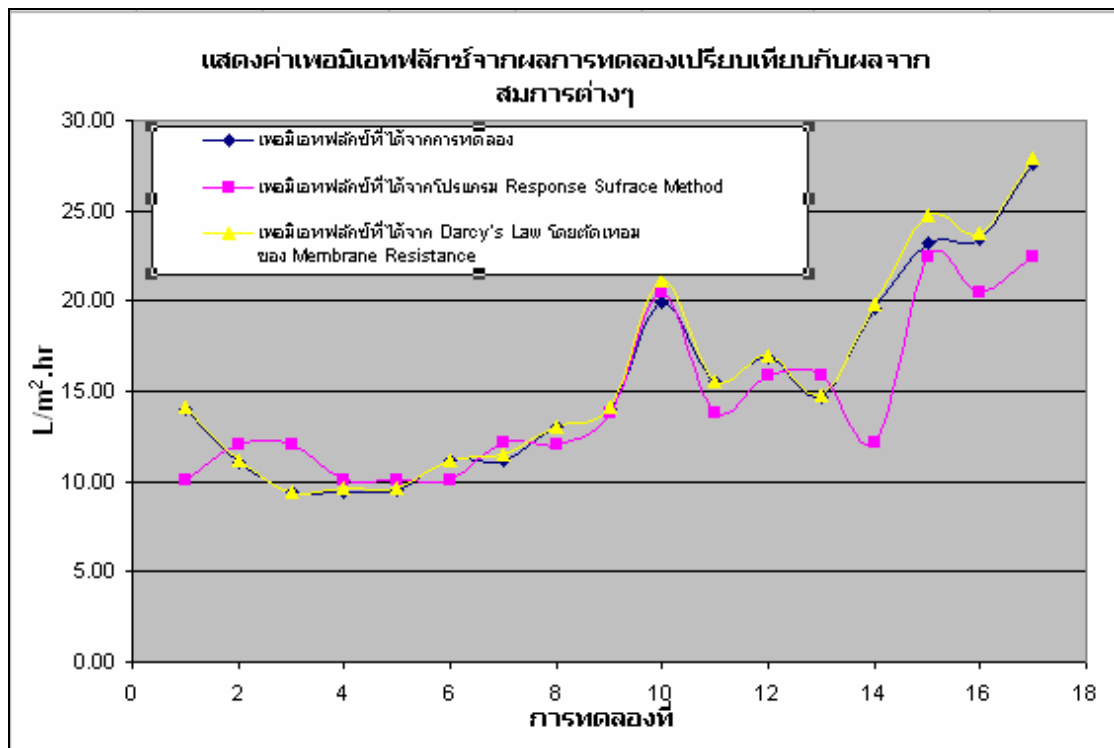
ตาราง 21 แสดงผลของค่าพอมิเอทฟลักซ์จากการทดลองและสมการต่างๆ

การทดลองที่	ความเข้มข้น SS ของสารป้อน (mg/l)	ขนาดเมมเบรน (micron)	ความดัน (psi)	อัตราการไหลของสารป้อน (Lpm)	J_1 (L/m ² .hr)	J_2 (L/m ² .hr)	J_3 (L/m ² .hr)
1	1500	0.1	5	1.25	11.13	12.12	11.48
2		0.1	5	1.75	23.16	23.94	24.74
3		0.1	15	1.25	11.08	13.58	11.20
4		0.1	15	1.75	14.63	17.33	14.83
5		5	5	1.25	19.63	13.62	19.81
6		5	5	1.75	27.58	23.94	27.96
7		5	15	1.25	13.01	13.58	13.04
8		5	15	1.75	16.89	17.33	16.93
9	2500	1.2	10	1.5	9.38	12.00	9.41
10	3500	0.1	5	1.25	9.4	10.12	9.65
11		0.1	5	1.75	19.98	23.94	21.15
12		0.1	15	1.25	9.57	13.58	9.66
13		0.1	15	1.75	13.98	17.33	14.16
14		5	5	1.25	14.06	13.62	14.16
15		5	5	1.75	23.47	23.94	23.72
16		5	15	1.25	11.16	13.58	11.18
17		5	15	1.75	15.52	17.33	15.56

J_1 = ค่าพอมิเอทฟลักซ์ที่ได้จากการทดลอง

J_2 = ค่าพอมิเอทฟลักซ์ที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ด้วยโปรแกรม Response Surface Method

J_3 = ค่าพอมิเอทฟลักซ์ที่ได้จากสมการของ Darcy's Law โดยตัดเทอมของ Membrane Resistance.



ภาพประกอบ 57 แสดงค่าเพอมีเอทฟลักซ์จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลจากสมการต่างๆ