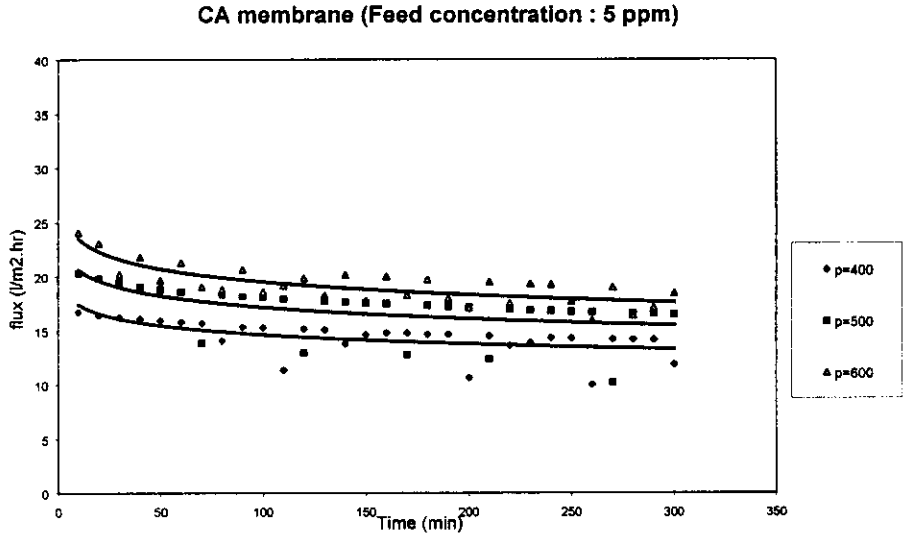
บทที่ 3

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

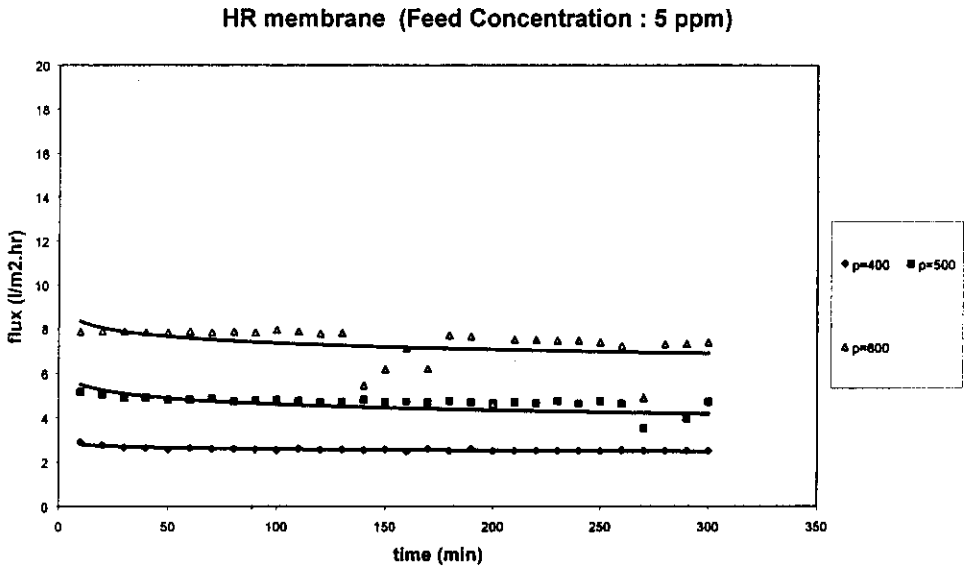
ในการเสนอผลการวิจัย ผู้วิจัยจะจัดเรียงตามลำดับการทดลองย่อย ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 พร้อมภาพประกอบ ดังต่อไปนี้

<u>การทดลองที่ 1</u> ศึกษาความสัมพันธ์ ของความดัน ฟลักซ์ และประสิทธิภาพของเมมเบรน แบบแผ่น 3 ชนิด คือ Cellulose Acetate on Polyester (CA990PE) Thin Film Composite on Polypropylene (HR98PP) และ Thin Film Composite on Polyester (NF45PE) จากบริษัท DSS ประเทศเดนมาร์ก สารหนูมีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 5 ppm และ 1.6 ppm ดำเนินการป้อนสารหนูเข้าสู่กระบวนการเมมเบรน (membrane test cell) แล้วบันทึกข้อมูล ค่าฟลักซ์และเวลาซึ่งสารละลาย Permeateผ่านเมมเบรนออกมา จากนั้นนำสารที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารหนู นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การกักกัน (Rejection)

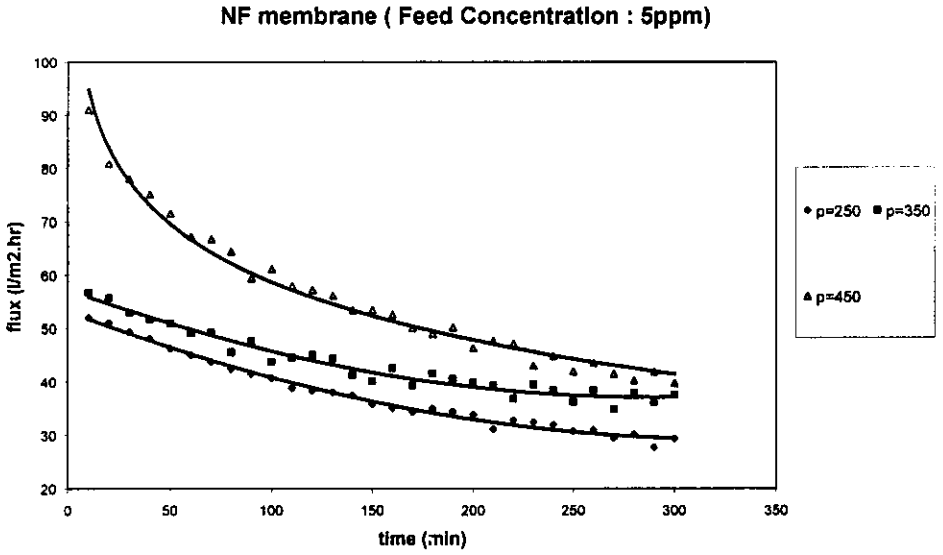
ตอนที่1 ความเข้มข้นของสารหนู หรือสารป้อนเข้า (Feed) 5 ppm



ภาพประกอบ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ กับเวลา ของเมมเบรน CA990PE(CA)



ภาพประกอบ19 ความสัมพันธ์ระหว่าง ฟลักซ์กับเวลา ของเมมเบรน HR98PP(HR)



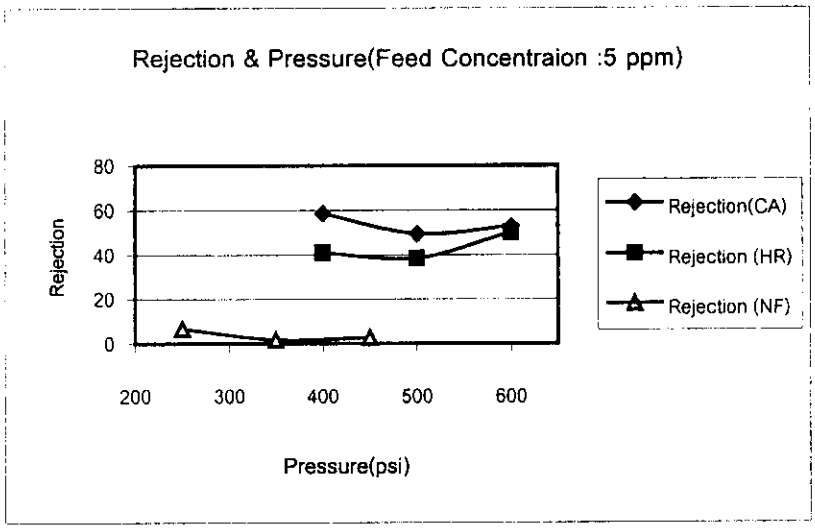
ภาพประกอบ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ กับเวลา ของเมมเบรน NF45PE(NF)

จากภาพประกอบ 18 , 19 และ 20 แสดงค่าฟลักซ์กับเวลาโดยในเมมเบรนแต่ละชนิด ทำการทดลอง 3ความดัน กราฟแต่ละเส้นแสดงผลของความดันนั้นๆ และจากข้อมูลที่บันทึกพบว่า เมื่อเพิ่มความดัน ค่าฟลักซ์จะเพิ่มขึ้น ซึ่งเมมเบรนทั้ง 3 ชนิดให้ผลการทดลองที่เหมือนกัน ในเมมเบรน NFให้ค่าฟลักซ์ของ Permeate มากที่สุด รองลงมา คือเมมเบรน CA เมมเบรนที่แทบจะไม่ให้น้ำผ่าน

เลยหรือให้ค่าฟลักซ์ต่ำที่สุดคือ เมมเบรน HR ค่าฟลักซ์จะลดลงเร็วในระยะเริ่มแรกและมีแนวโน้มที่จะคงที่ในช่วงระยะเวลาหลัง การดำเนินการใช้เวลาทั้งหมด 300 นาที แล้วจึงเก็บตัวอย่างนำไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของสารหนู จากนั้นนำข้อมูลมาเขียนกราฟระหว่างความดันกับค่าเปอร์เซ็นต์การกักกัน(Rejection) ได้ดังแสดงในภาพประกอบ 21

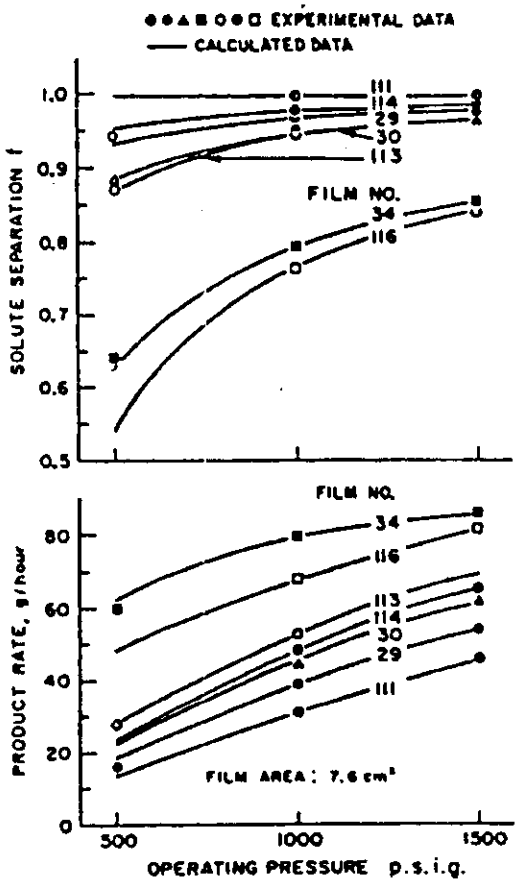
ตาราง 6 แสดงค่าความเข้มข้นของ Permeate (ppm) ซึ่งเก็บตัวอย่างเมื่อครบ 300นาที และ Rejection ของเมมเบรนแบบแผ่นทั้ง 3 ชนิด (ความเข้มข้นของ Feed = 5 ppm)

CA Membrane			HR Membrane			NF Membrane		
Pressure (Psi)	Permeate (ppm)	Rejection (%)	Pressure (Psi)	Permeate (ppm)	Rejection (%)	Pressure (Psi)	Permeate (ppm)	Rejection (%)
400	2.07	58.6	400	2.95	41	250	4.67	6.6
500	2.53	49.4	500	3.07	38.6	350	4.92	1.6
600	2.36	52.8	600	2.49	50.2	450	4.87	2.6



ภาพประกอบ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและ Rejection ของเมมเบรน CA ,HRและ NF

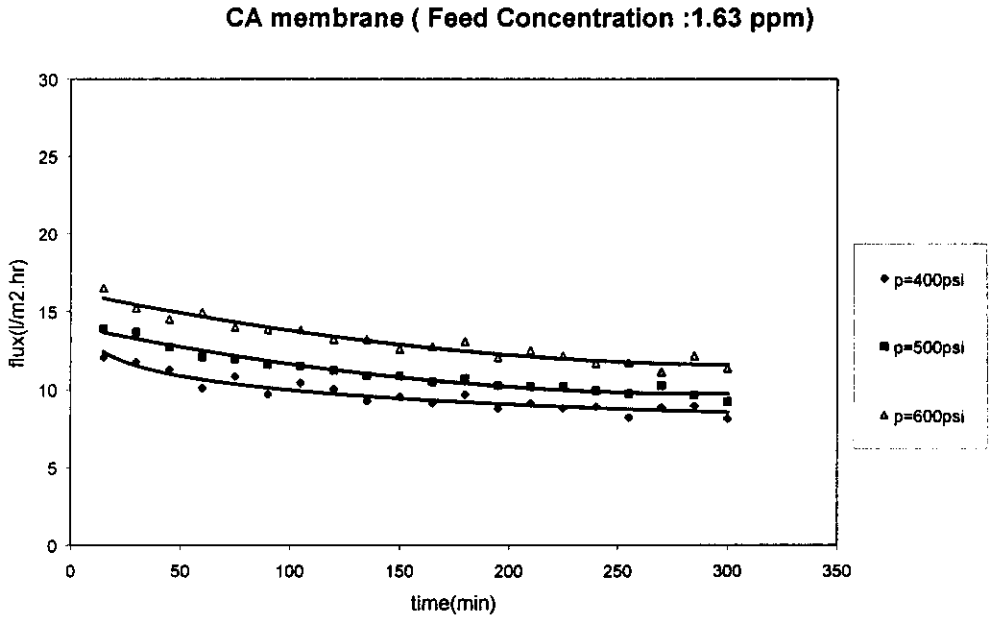
จากตารางที่ 6 ซึ่งแสดงค่า เปอร์เซ็นต์การกักกันของเมมเบรนชนิดแผ่น 3 ชนิดที่ความดันต่างๆกัน เมมเบรน CA และเมมเบรน HR จำเป็นต้องดำเนินการที่ความดันค่อนข้างสูง คือ 400 –600 psi เนื่องจากถ้าดำเนินการที่ความดันต่ำกว่านี้ ผลผลิตที่ออกมาหรือ Permeate จะได้ในปริมาณที่น้อยมาก ส่วนเมมเบรน NF สามารถดำเนินการที่ความดัน 250 –450 psi จากผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของ Permeate พบว่า เมมเบรน CA ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การกักกันมากที่สุด (50-59 %) รองลงมาคือ เมมเบรน HR (40-50 %) ส่วนเมมเบรน NF นั้นแทบจะไม่สามารถแยกสารหนูออกจากสารตั้งต้นได้เลยเพราะเปอร์เซ็นต์การกักกันต่ำมาก (2 –7 %) สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับเปอร์เซ็นต์การกักกันซึ่งแสดงในภาพประกอบ 21 นั้น จากผลการทดลองของ Kimura-Sourirajan (James M. Dickson, 1990) ผลของความดันที่มีต่อประสิทธิภาพการแยก หรือเปอร์เซ็นต์การกักกันเป็นดังนี้



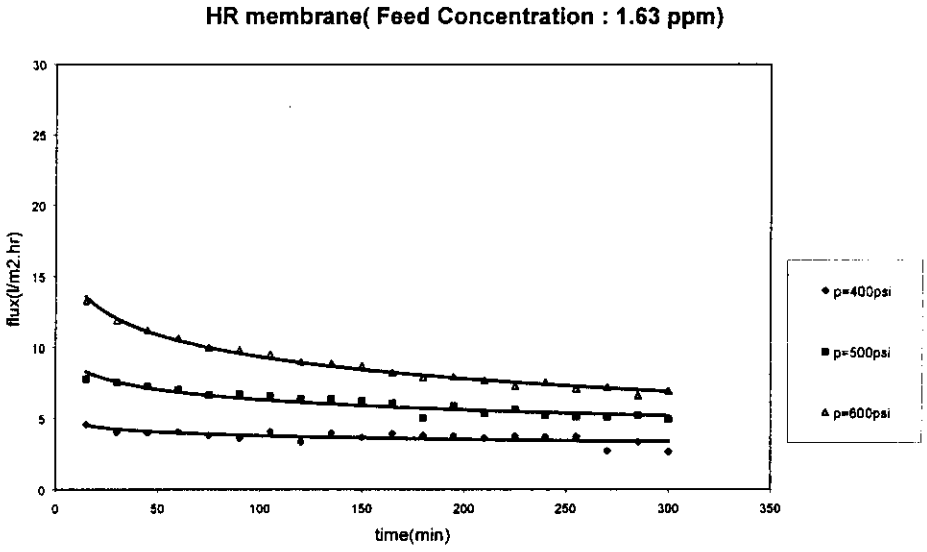
ภาพประกอบ22 ผลของความดันต่อประสิทธิภาพการแยกสำหรับ Cellulose Acetate Membraneชนิดต่างๆ เส้นกราฟได้จากการคำนวณด้วย Kimura – Sourirajan Analysis (James M. Dickson, 1990)

จากภาพข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้น เปอร์เซ็นต์การกักกันเพิ่มขึ้นด้วย และจะค่อยๆคงที่ในตอนท้าย อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้เป็นการ Flow แบบ Dead- End การที่มีความดันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ฟลักซ์ของ Permeateเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะมีการผ่านของ Solute ในเมมเบรนมากขึ้นด้วย Solute ที่ไม่ผ่านเมมเบรนจะติดอยู่ที่ผิวหน้า และรูพรุนของเมมเบรนมากขึ้นด้วย เป็นผลให้เกิดปรากฏการณ์ Concentration Polarization ได้ นอกจากนั้นการที่ความดันสูงมากอาจทำให้ความต้านทานของเมมเบรนต่ำลงได้ การป้องกันการเกิด Concentration Polarization และ Fouling อาจทำได้โดยการทำ Pretreatment ก่อนเข้า RO เมมเบรน และอาจกำหนดให้ ค่าฟลักซ์ต่ำลง หรือถ้าหากภายในระบบมีการป้อนสารเข้าเมมเบรนเป็นแบบ Cross - Flow การเพิ่มความเร็วของ Feed จะช่วยได้ เพราะ Foulant จะถูกชะล้างออกไป (John J. Waypa, Menachem Elimelech , and Janet G. Hering , 1997) ในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยทำการเก็บตัวอย่างหลังจากที่ดำเนินการ ไปแล้วเป็นเวลา 300นาที หรือ 5 ชั่วโมงในแต่ละความดัน ดังนั้นที่ความดันสูงๆ ก็อาจมีปัญหาในเรื่องของการเกิด Concentration Polarization ได้เช่นกัน ดังนั้นในการทดลองเมื่อเพิ่มความดัน เปอร์เซ็นต์การกักกัน อาจมีค่าน้อยกว่า ระบบที่ความดันต่ำกว่า

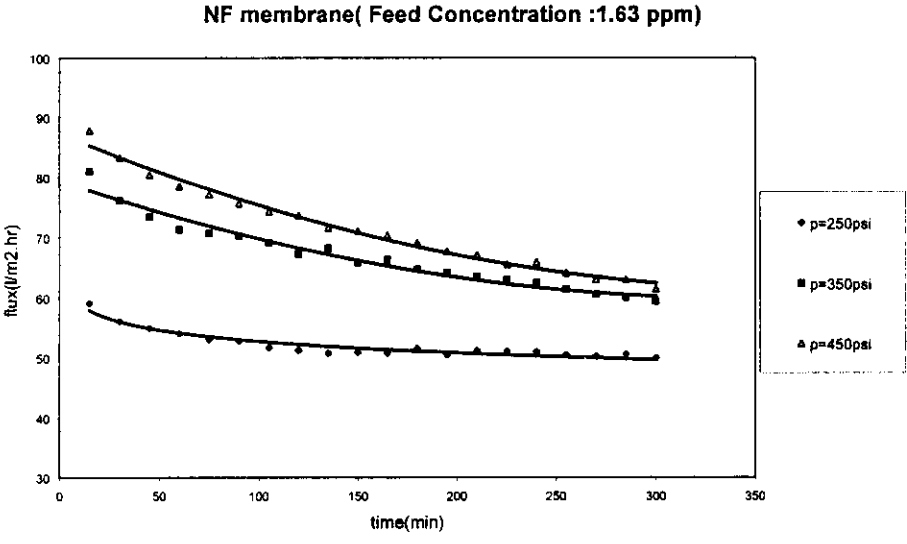
ตอนที่2 ความเข้มข้นของสารหนู หรือสารป้อนเข้า (Feed) 1.63 ppm



ภาพประกอบ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับเวลาของเมมเบรน CA



ภาพประกอบ 24 ความสัมพันธ์ระหว่าง ฟลักซ์กับเวลา ของเมมเบรน HR

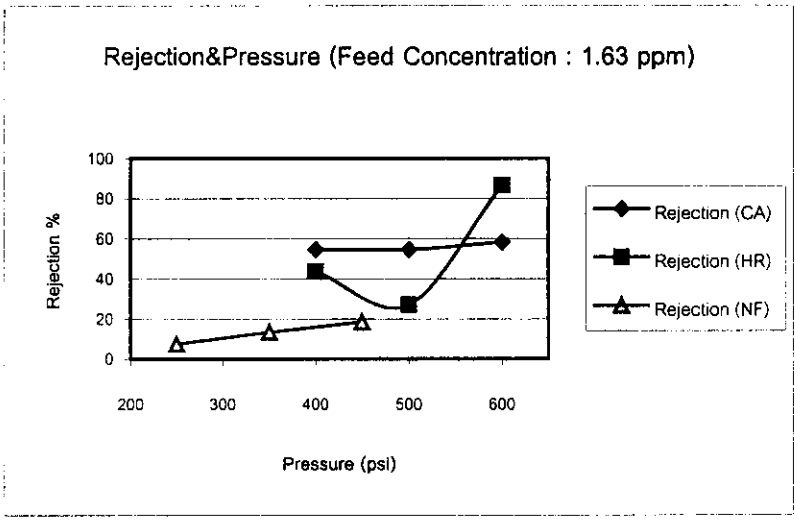


ภาพประกอบ 25 ความสัมพันธ์ระหว่าง ฟลักซ์กับเวลา ของเมมเบรน NF

จากภาพประกอบ 23 , 24, และ 25 ความสัมพันธ์ของฟลักซ์กับเวลาเหมือนกับการทดลองในตอนที่ 1 คือ ฟลักซ์จะลดลงค่อนข้างเร็วในช่วงแรก และจะค่อนข้างคงที่ในช่วงเวลาหลัง เมื่อเพิ่มความดัน ค่าฟลักซ์จะเพิ่มขึ้น ในเมมเบรนทั้ง 3 ชนิด สำหรับค่าความเข้มข้นของ Permeate และเปอร์เซ็นต์การกักกันแสดงในตารางที่ 7

ตาราง 7 แสดงค่าความเข้มข้นของ Permeate และ Rejection ของการกรองผ่านเมมเบรนแบบแผ่นทั้ง 3 ชนิด (ความเข้มข้นของ Feed = 1.63 ppm)

CA Membrane			HR Membrane			NF Membrane		
Pressure (Psi)	Permeate (ppm)	Rejection (%)	Pressure (Psi)	Permeate (ppm)	Rejection (%)	Pressure (Psi)	Permeate (ppm)	Rejection (%)
400	0.74	54.60	400	0.92	43.56	250	1.51	7.36
500	0.74	54.60	500	1.19	26.99	350	1.41	13.50
600	0.68	58.28	600	0.22	86.50	450	1.33	18.40

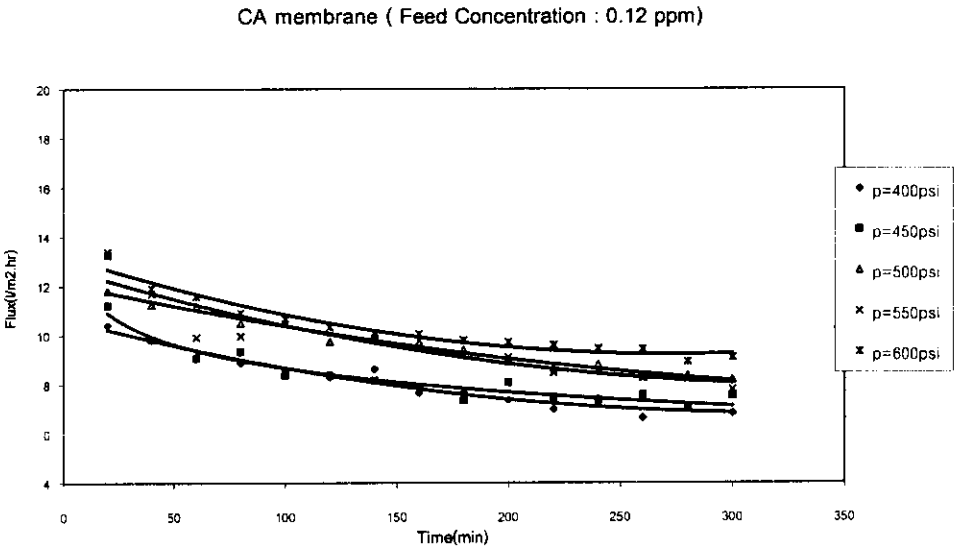


ภาพประกอบ26 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและ Rejection ของเมมเบรน CA ,HR และ NF

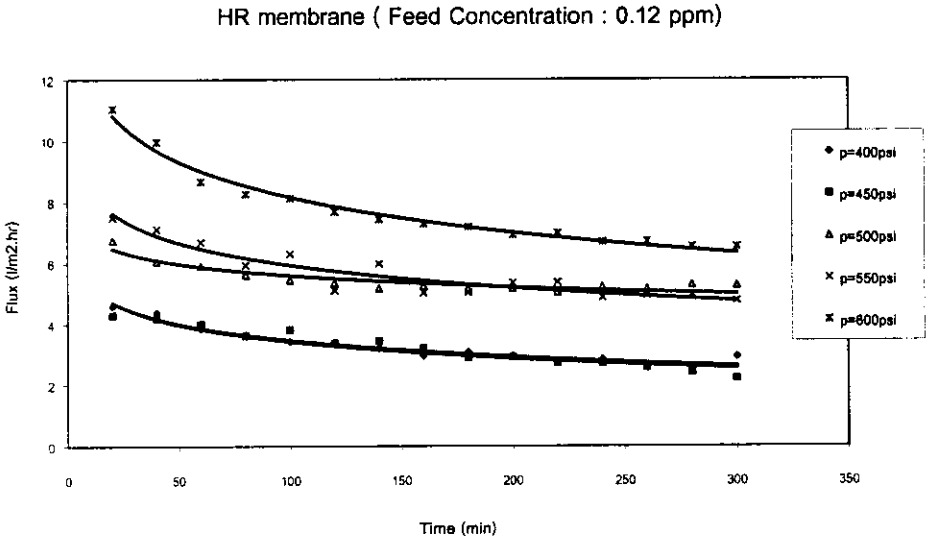
จากผลการหาความเข้มข้นในตารางที่ 7 และภาพประกอบ 26 โดยภาพรวมเมมเบรน CA ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูดีที่สุด (55-60 %) สำหรับเมมเบรน HR ในการทดลองนี้ค่าเปอร์เซ็นต์การกักกันค่อนข้างเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ (27-87 %) ส่วนเมมเบรน NFประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูต่ำที่สุด (7-18 %) อย่างไรก็ตามเมมเบรนทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มที่ให้เปอร์เซ็นต์การกักกันดีขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองของนักวิจัยท่านอื่น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับเปอร์เซ็นต์การกักกันนั้นไม่อาจอธิบายได้ในทางทฤษฎี เพราะในทางปฏิบัติจริงๆ มีปัจจัยหลายตัวแปรเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ชนิดของเมมเบรน ช่วงความดันที่ใช้ และการเกิดปรากฏการณ์ Concentration Polarization และมีผลที่ซับซ้อนต่อเปอร์เซ็นต์การกักกัน (John J. waypa , Menachem Elimelech ,and Janet G. Hering ,1997)

<u>การทดลองที่ 2</u> เป็นการศึกษาใน Membrane Test Cell เช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 แต่เนื่องจากในการทดลองที่ 1 เป็นวิธีการเมมเบรนเพียงกระบวนการเดียวและ ความเข้มข้นของสารหนูใน Permeate ไม่ต่ำพอถึงเกณฑ์มาตรฐาน ในการทดลองนี้จึงเพิ่มกระบวนการตกตะกอน หรือ การทำโคแอกกูเลชันโดยเฟอริกคลอไรด์เข้ามาในการทดลองด้วยซึ่ง จากการศึกษาของ นิภา มหารัชพงศ์ (2540) พบว่าวิธีการนี้สามารถลดความเข้มข้นของสารหนูได้ดีกว่า Coagulant ชนิดอื่นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ง่ายและราคาค่อนข้างถูก ขั้นตอนในการทดลองแสดงในรูปที่ 15 จากนั้นจึงทำการศึกษา ความสัมพันธ์ของฟลักซ์กับเวลา และผลของ ความดัน ความเข้มข้นเริ่มต้น และชนิดของเมมเบรน ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนู การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ตอนดังนี้

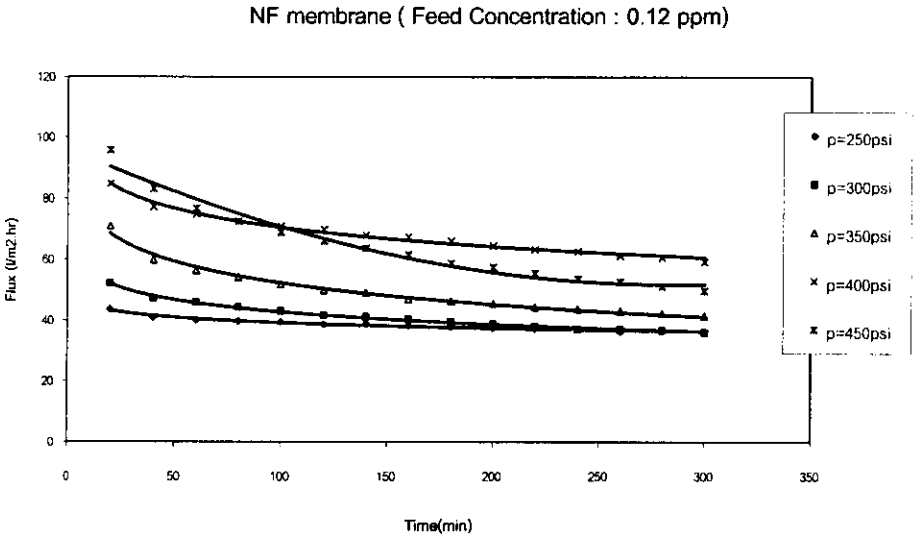
ตอนที่1 สารหนูหรือสารตั้งต้น(Feed)ที่ผ่านการตกตะกอนแล้วมีค่าความเข้มข้น 0.12 ppm การทดลองในส่วนนี้ทำการทดลอง โดยเปลี่ยนค่าความดัน 5 ค่าในเมมเบรนแต่ละชนิด ผลการทดลองเป็นดังนี้



ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ กับเวลา ของเมมเบรน CA



ภาพประกอบ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ กับเวลา ของเมมเบรน HR



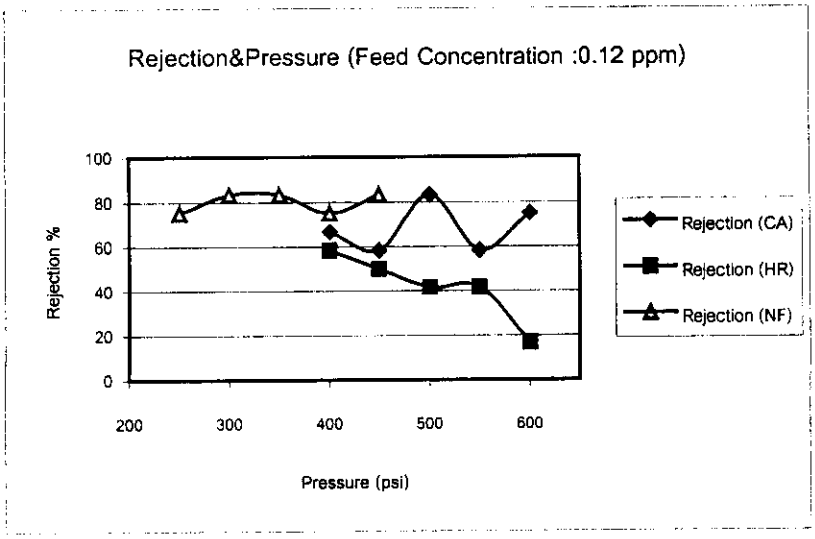
ภาพประกอบ 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับเวลาของเมมเบรน NF

จากภาพประกอบ 27 , 28 และ 29 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ฟลักซ์ กับเวลา โดยในแต่ละเมมเบรน ทำการทดลองถึง 5 ความดัน แต่ค่าของความดันยังคงใช้ช่วงเดิม คือ 400-600 psi ในเมมเบรน CA และ HR 250-450 Psi สำหรับเมมเบรน NF ผลการทดลองพบว่า ค่าฟลักซ์ลดลงค่อนข้างเร็วในช่วงเวลา เริ่มต้น แต่จะค่อนข้างคงที่ในช่วงเวลาหลัง และเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ฟลักซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในช่วงระยะเวลาท้าย (นาทีที่ 200 –300) ค่าฟลักซ์ที่ความดันสูงกว่าอาจมีค่าน้อยกว่า ค่าฟลักซ์ที่ความดันต่ำกว่า เนื่องจากการอุดตันที่ผิวหน้าเมมเบรนของอนุภาคต่างๆ ในสารละลายเกิดขึ้นได้ง่ายที่ความดันสูง ดังนั้นอาจทำให้ฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อดำเนินการเป็นระยะเวลานาน ประกอบกับช่วงความดันที่เปลี่ยนแต่ละค่า (400กับ 450 psi) ค่อนข้างที่จะแคบ เส้นกราฟหรือค่าฟลักซ์จึงมีค่าใกล้เคียงกัน ไม่แยกกันอย่างชัดเจนเหมือนในการทดลองที่ 1 เมมเบรนที่ให้ค่าฟลักซ์มากที่สุด คือ เมมเบรน NF รองลงมาเป็นเมมเบรน CA และสุดท้ายเมมเบรน HR สำหรับเปอร์เซ็นต์การกักกันแสดงในตารางที่ 8

ตาราง 8 ค่าความเข้มข้นของ Permeate (ppm) และ Rejection ของเมมเบรนทั้ง 3 ชนิด (ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารหนูก่อนเข้าเมมเบรน Feed = 0.12ppm)

CA Membrane			HR Membrane			NF Membrane		
Pressure (Psi)	Permeate (ppm)	Rejection (%)	Pressure (Psi)	Permeate (ppm)	Rejection (%)	Pressure (Psi)	Permeate (ppm)	Rejection (%)
400	0.04	66.67	400	0.05	58.33	250	0.03	75
450	0.05	58.33	450	0.06	50.00	300	0.02	83.33
500	0.02	83.33	500	0.07	41.67	350	0.02	83.33
550	0.05	58.33	550	0.07	41.67	400	0.03	75
600	0.03	75.00	600	0.10	16.67	450	0.02	83.33

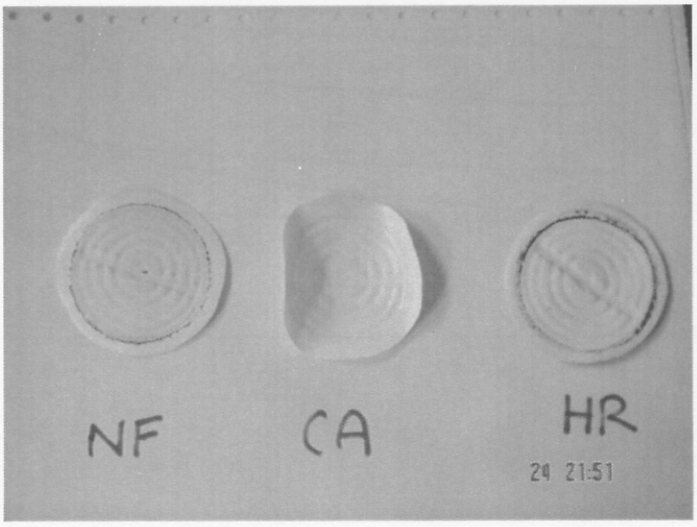
ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับเปอร์เซ็นต์การกักกันแสดงในภาพประกอบ 30



ภาพประกอบ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและ Rejection ของเมมเบรน CA ,HR และNF

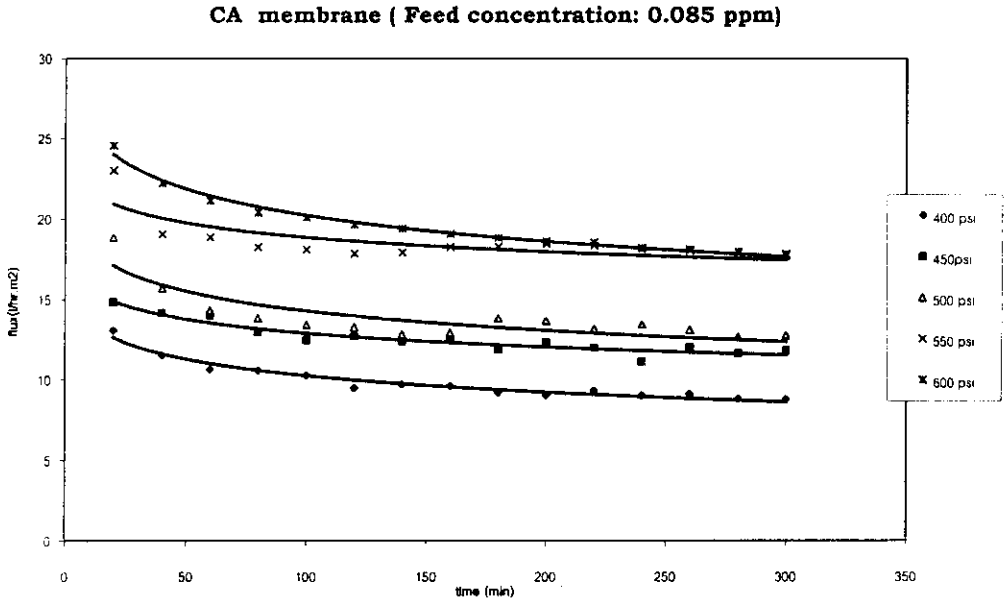
จากตารางที่ 8 และภาพประกอบ 30 ผลการทดลองในส่วนนี้แตกต่างไปจาก การทดลองที่ 1 ซึ่งสารตั้งต้นไม่ได้ผ่านการตกตะกอน (Feed Concentration :5 และ 1.63 ppm) คือ เมมเบรน NF มีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของสารหนูดีที่สุด สามารถลดความเข้มข้นของสารหนูจากความเข้มข้นเริ่มต้นคือ 0.12 ppm ให้เหลือความเข้มข้น 0.02 ppm (75-83 %)รองลงมาคือเมมเบรน CA (60-83 %)และเมมเบรน HR (17-58 %)ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงในครั้งนี้ เกิดขึ้นเนื่องจากการมี ไอออนหรือสารประกอบชนิดอื่นร่วมอยู่ด้วยในสารละลายซึ่งก็คือ สารประกอบของเหล็ก ที่ยังหลงเหลือหลังจากการกรองเอาตะกอนออกแล้ว

อย่างไรก็ตามเมมเบรน CA ยังสามารถใช้งานได้ดีโดยไม่มีผลกระทบมากนัก ในส่วนของเมมเบรน HR ซึ่งมีรูพรุนที่เล็กที่สุด (ค่าฟลักซ์ต่ำที่สุด) อาจเกิดการอุดตันได้ง่าย เพราะมี ตัวถูกละลายถึง 3 ชนิด คือ สารหนู สารประกอบของเหล็ก และเกลือโซเดียมคลอไรด์ โดยเฉพาะสารประกอบของเหล็ก ดังนั้น เมื่อความดันสูงขึ้น เปอร์เซ็นต์การกักกันในเมมเบรนชนิดนี้จึงค่อนข้างต่ำลง สำหรับเมมเบรน NF ซึ่งเป็นเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ที่สุด การมีไอออนของเหล็กปะปนอยู่ในสารละลายกลับช่วยให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูดียิ่งขึ้น ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากการที่สารประกอบของเหล็กเข้าไปยึดติดกับโครงสร้างหรือรูพรุนของเมมเบรน แต่เมมเบรน NF มีรูพรุนที่ค่อนข้างใหญ่จึงไม่ได้ทำให้ เมมเบรนอุดตัน และสารหนูจะยึดติดกับสารประกอบของเหล็กได้ดี ดังนั้นจึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูในเมมเบรนชนิดนี้ดีมาก ในภาพประกอบ 31 แสดงภาพของเมมเบรนหลังจากใช้งานแล้วทั้ง 3 ชนิด พบว่าที่ผิวหน้าของเมมเบรน NF จะมีสีเหลืองซึ่งเป็นสารประกอบของเหล็ก

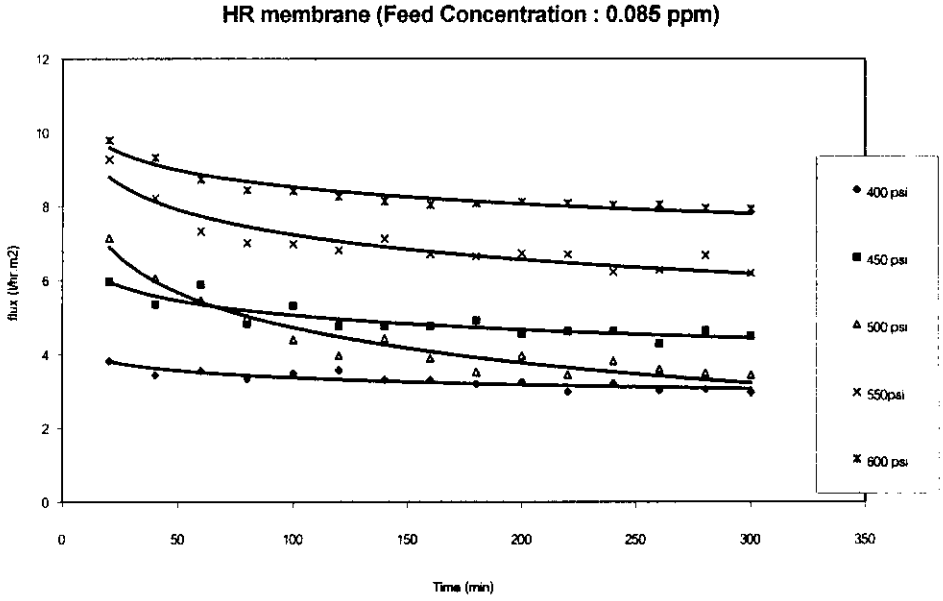


ภาพประกอบ 31 ภาพผิวหน้าของเมมเบรนทั้ง 3 ชนิดหลังใช้งานแล้ว

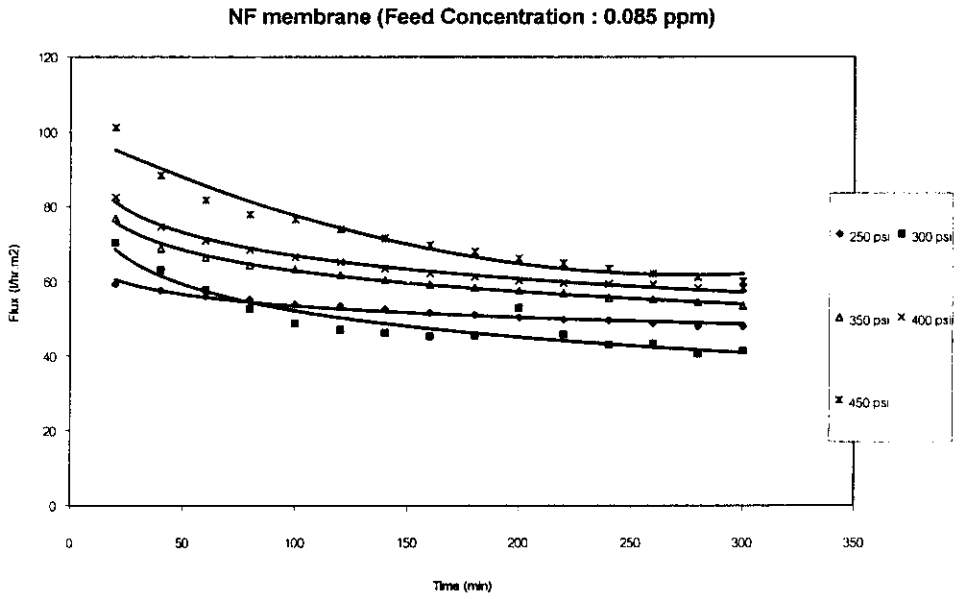
ตอนที่ 2 สารหนูหรือสารตั้งต้นที่ผ่านการตกตะกอนแล้วมีค่าความเข้มข้น 0.085 ppm



ภาพประกอบ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ กับเวลา ของเมมเบรน CA



ภาพประกอบ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ กับเวลา ของเมมเบรน HR

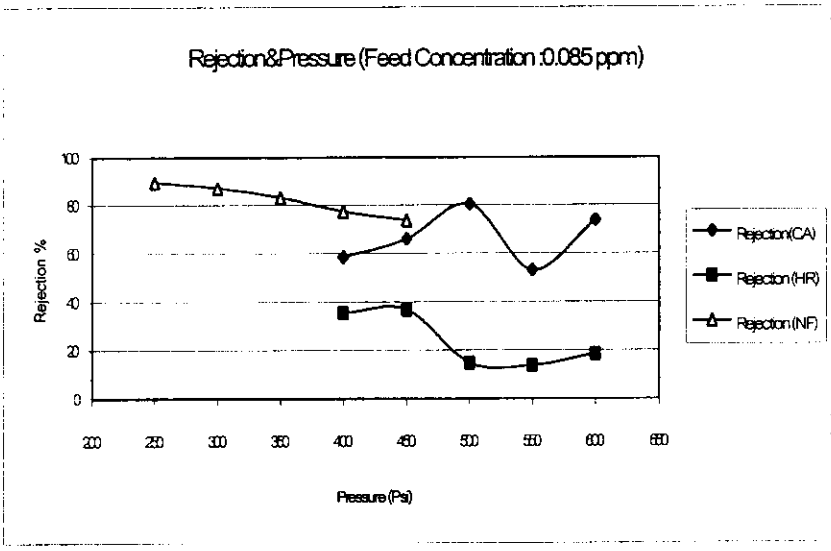


ภาพประกอบ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ กับเวลา ของเมมเบรน NF

ผลการทดลองในเรื่องของฟลักซ์กับเวลาเหมือนกับการทดลองในตอนที่ 1 ดังภาพประกอบ 32 ,33 และ 34 ค่าความเข้มข้นของ Permeate และเปอร์เซ็นต์การกักกันแสดงในตารางที่ 9 ดังนี้

ตาราง 9 ค่าความเข้มข้นของ Permeat และ Rejection ของเมมเบรนทั้ง 3 ชนิด ที่ความดันต่างๆ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารหนูก่อนเข้าเมมเบรน Feed = 0.085ppm)

CA Membrane			HR Membrane			NF Membrane		
Pressure (Psi)	Permeate (ppm)	Rejection (%)	Pressure (Psi)	Permeate (ppm)	Rejection (%)	Pressure (Psi)	Permeate (ppm)	Rejection (%)
400	0.035	58.37	400	0.055	35.38	250	0.009	89.50
450	0.029	65.92	450	0.054	36.79	300	0.011	87.15
500	0.017	80.31	500	0.072	14.74	350	0.014	83.25
550	0.04	52.95	550	0.073	13.56	400	0.019	77.36
600	0.02	73.82	600	0.069	18.40	450	0.022	73.82



ภาพประกอบ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและ Rejection ของเมมเบรน CA , HRและNF

ผลการทดลองในส่วนนี้เมมเบรน NF ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด โดยสามารถลดความเข้มข้นของสารหนูจนเหลือ ค่า0.009 ppm ซึ่งสอดคล้องกับหลักการที่กล่าวว่าเมื่อสารตั้งต้นมีความเข้มข้นน้อยลง เปอร์เซ็นต์การกักกันจะเพิ่มขึ้น เมมเบรนที่มีประสิทธิภาพดีรองลงมาคือ เมมเบรน CA และเมมเบรน HR ตามลำดับ ในเมมเบรน CA และเมมเบรน HR เปอร์เซ็นต์การกักกันที่ค่าความดันบางค่าน้อยกว่า เปอร์เซ็นต์การกักกันในการทดลองตอนที่1 เพราะในการทดลองตอนนี้มีการเติมเฟอริกคลอไรด์ลงไปมากกว่าการทดลองในตอนที่ 1 ดังนั้นสารประกอบของเหล็ก(ที่เหลือจากการกรองตะกอน) อาจละลายในสารละลายมากกว่าเดิม เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นสารหนูของเมมเบรน CA และ HRไม่ดีขึ้นเพราะถึงแม้สารหนูจะมีความเข้มข้นน้อยลง แต่เมมเบรนต้องรับภาระในการกำจัดสารประกอบของเหล็กด้วย ดังนั้นการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ควรเติมลงไปในปริมาณที่เหมาะสมไม่มากเกินไปหรือน้อยเกินไป

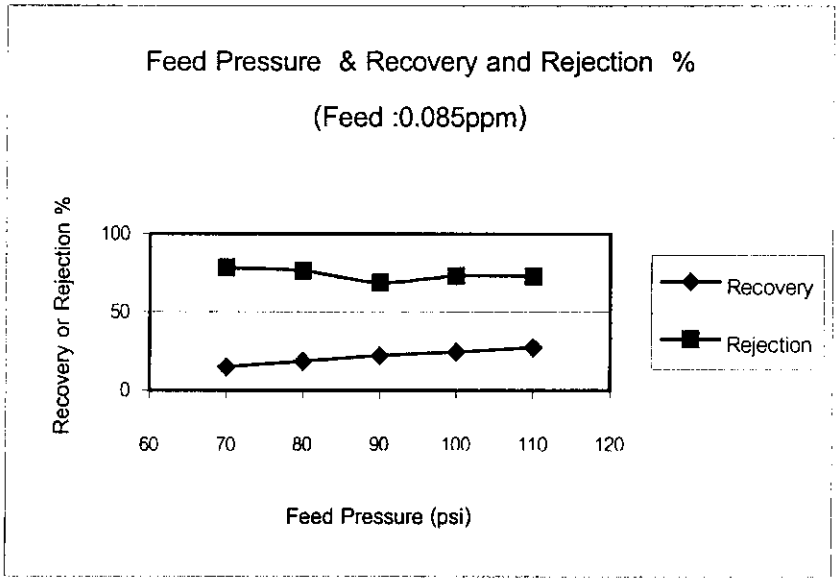
การทดลองที่ 3 การทดลองในเมมเบรนโมดูล ซึ่งการทดลองในตอนนี้สารตั้งต้นต้องผ่านกระบวนการกรองเช่นเดียวกับการทดลองในตอนที่ 2 โดยทำการทดลอง กับโมดูล แบบม้วนของบริษัท 2 แห่งคือ จากบริษัท Filmtec และ Osmonics ทำการศึกษาในเรื่องของประสิทธิภาพและเปอร์เซ็นต์ Recovery กับความดันที่ใช้ในการทดลองผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ตอนดังนี้

ตอนที่ 1 เมมเบรนโมดูลแบบม้วน TW30-1812-50 (Filmtec)

ความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้นหลังจากการกรองแล้ว (Feed) :0.085 ppm

ตาราง10 ค่าอัตราการไหลในระบบ (Feed Rate ,Concentrate Rate and Permeate Rate) เปอร์เซ็นต์ Recovery ความเข้มข้นของ Permeate และเปอร์เซ็นต์การกักกัน ที่ความดันต่างๆ Pump pressure : 15 kg/cm^2 (213.35 psi)

Feed Pressure (Psi)	Feed Rate (R1) (L/min)	Concentrate Rate (L/min)	Permeate Rate (R2) (L/min)	Recovery (%) (R2/R1)	Permeate (ppm)	Rejection %
70	1.34	1.14	0.2	14.93	0.0185	78.18
80	1.34	1.09	0.25	18.66	0.0203	76.06
90	1.34	1.042	0.298	22.24	0.0265	68.75
100	1.34	1.01	0.33	24.63	0.0229	73
110	1.34	0.97	0.37	27.61	0.0231	72.76



ภาพประกอบ36 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับ Recovery และ Rejection (Filmtec Membrane Module)

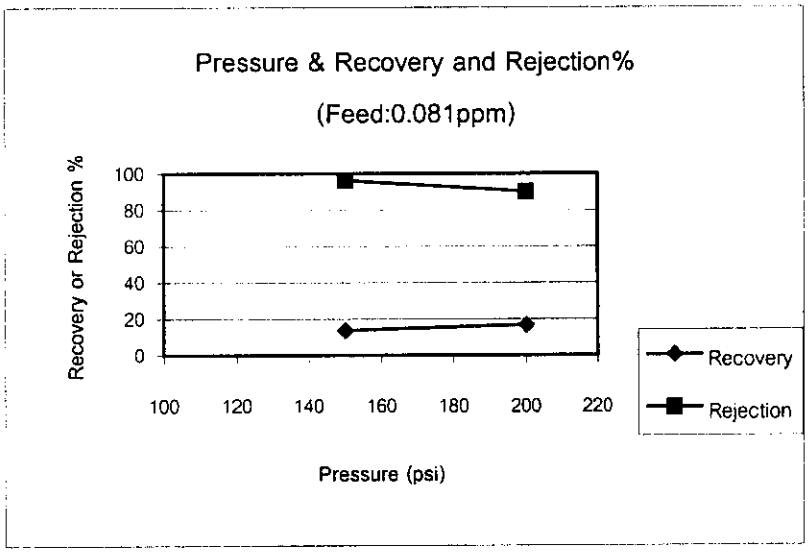
จากตารางที่ 10และภาพประกอบ 36 แสดงผลของความดันที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ Recovery พบว่าถ้าความดันเพิ่มขึ้นค่าของเปอร์เซ็นต์ Recovery จะเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับเมมเบรนโมดูลชนิดนี้ มีค่าเปอร์เซ็นต์ Recovery 14.93 – 28 %

การทดลองกับเมมเบรนโมดูลในส่วนนี้ แต่ละความดันใช้เวลา 5 นาที แล้วจึงเก็บตัวอย่าง โดยเริ่มที่ความดันต่ำที่สุดก่อน ผลการทดลองจากตารางที่ 10 และภาพประกอบ 36 ค่าเปอร์เซ็นต์การกักกันไม่แตกต่างมากนัก แต่มีแนวโน้มถ้าความดันเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การกักกันต่ำลง ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจาก มีการอุดตันที่ผิวหน้าของเมมเบรน เพราะในการทดลอง กำหนดให้อัตราเร็วของ Feed คงที่ แล้วจึงค่อยๆเพิ่มความดันจากค่าน้อยไป ค่ามาก จากที่กล่าวไว้ข้างต้น ถ้าความดันสูงแต่อัตราเร็วของ Feed คงที่ Solute จะติดที่ผิวหน้าของเมมเบรนมากขึ้น ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การกักกันในช่วงความดันสูงจึงมีค่าต่ำลง

ตอนที่ 2 เมมเบรนโมดูลแบบม้วน Osmonics :Membrane Element , DESAL AG 2521TF
ความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้นหลังจากการกรองแล้ว (Feed) :0.081 ppm

ตาราง 11 ค่าอัตราการไหลในระบบ (Feed Rate ,Concentrate Rate and Permeate Rate) เปอร์เซ็นต์ Recovery ความเข้มข้นของ Permeate และเปอร์เซ็นต์การกักกัน ที่ความดันต่างๆ (Osmonics Membrane Module)

Operateing Pressure (Psi)	Feed Rate (R1) (L/min)	Concentrate Rate (L/min)	Permeate Rate (R2) (L/min)	Recovery (%) (R2/R1)	Permeate (ppm)	Rejection %
150	6.8	5.88	0.92	13.57	0.003	96.30
200	6.8	1.67	1.13	16.62	0.008	90.12



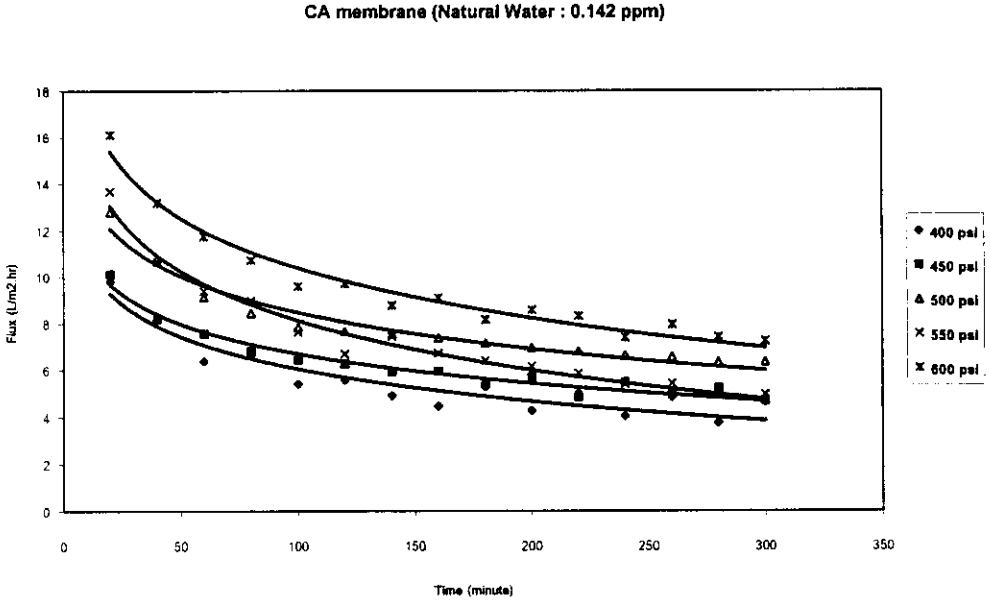
ภาพประกอบ37 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับ Recovery และ Rejection (Osmonics Membrane Module)

จากตารางที่11 และภาพประกอบ 37 ผลการทดลองมีแนวโน้มเหมือนการทดลองในตอนที่ 1 สำหรับ Filmtec Membrane module คือ เมื่อเพิ่มความดัน ค่าฟลักซ์ของ Permeate สูงขึ้นและค่าเปอร์เซ็นต์ Recovery สูงขึ้นเช่นกัน

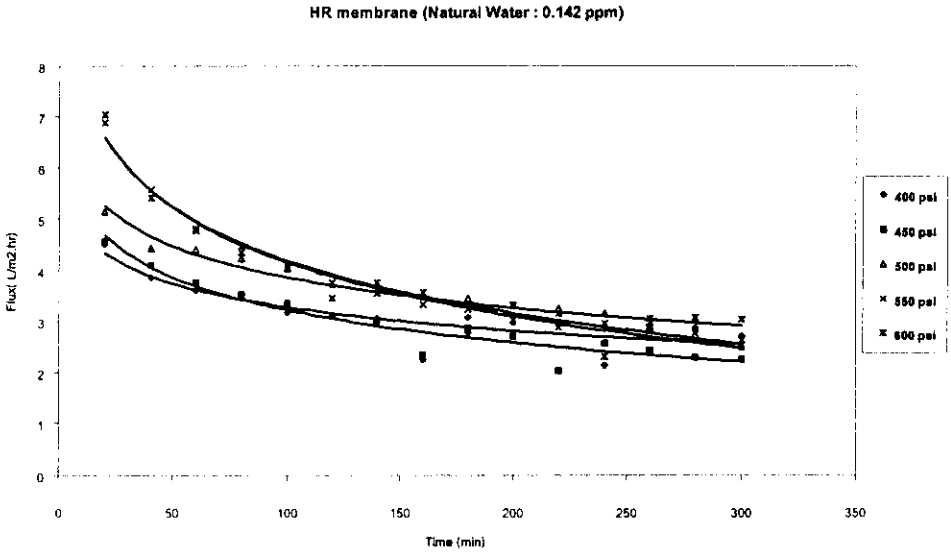
สำหรับเปอร์เซ็นต์การกักกันก็เช่นกันมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของสารหนูดีมาก สามารถทำให้ความเข้มข้นของสารหนูเหลือเพียง 0.003 ppm ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น้อยมาก และผ่านมาตรฐานของ WHO

การทดลองที่ 4 เป็นการนำน้ำตัวอย่างจากอำเภอร่อนพิบูลย์ บริเวณหน้าวัดจีบประดิษฐ์มาทดลองกับเมมเบรนทั้งใน Membrane Test Cell และ เมมเบรนโมดูล บริเวณนี้เป็นจุดที่น่าสนใจเพราะน้ำในบ่อบาดาล มีชาวบ้านใช้บริโภค 2- 3 หลังคาเรือน และจากการสำรวจของ ทรัพยากรธรณี เขต 1 จังหวัดสงขลา พบว่าความเข้มข้นของสารหนูในน้ำบริเวณนี้มีความเข้มข้นมากที่สุด และจากการเก็บตัวอย่างนำไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของสารหนูน้ำ มีค่า 0.156 ppm แต่หลังจากผ่านการกรองโดยไส้กรองแล้ว มีค่า 0.142 ppm ค่า pHของน้ำมีค่า 6.4 ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ตอนดังต่อไปนี้

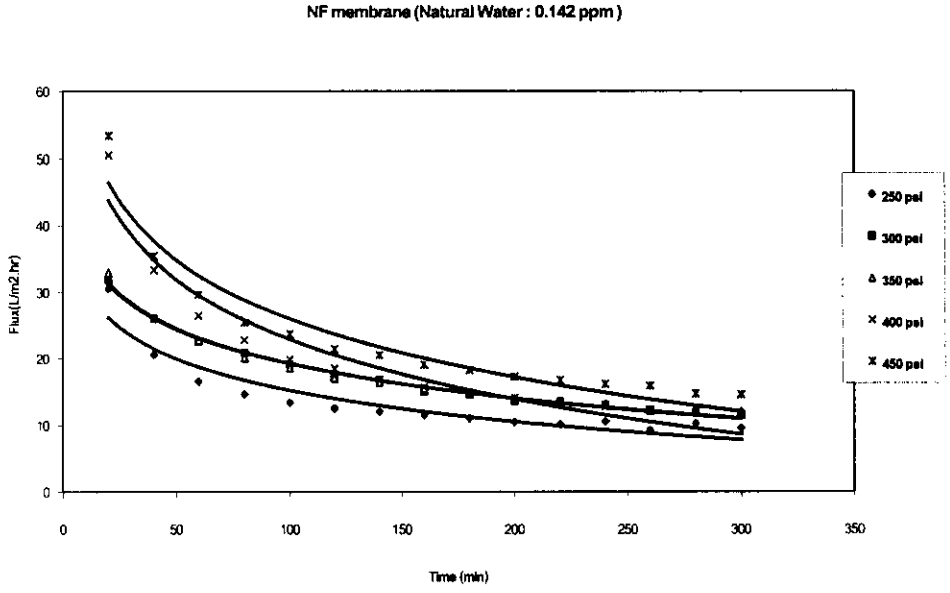
ตอนที่ 1 การทดลองใน Membrane Test Cell ใช้เมมเบรนแบบแผ่น 3 ชนิด คือ เมมเบรน CA , HR และ NF ศึกษาประสิทธิภาพ ค่าฟลักซ์ เปรียบเทียบกับการทดลองในน้ำสังเคราะห์ว่าเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร



ภาพประกอบ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ กับเวลา ของเมมเบรน CA



ภาพประกอบ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ กับเวลา ของเมมเบรน HR

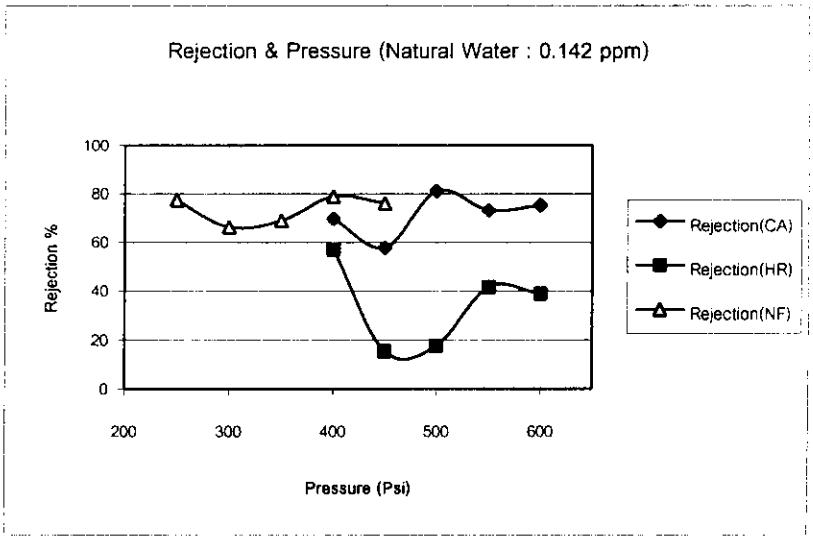


ภาพประกอบ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ กับเวลา ของเมมเบรน NF

น้ำตัวอย่างที่นำมาใช้ก่อนจะนำไปผ่านกระบวนการเมมเบรน มีลักษณะเป็นสีเขียวเหลือง มีตะกอนพวกตะใคร่น้ำ ทราย ปะปนอยู่บ้าง ต้องนำไปกรองโดยผ่านไส้กรองขนาด 10 ไมครอน และ 5 ไมครอน ตามลำดับ หลังจากนั้นเก็บข้อมูลในการทดลองกับเมมเบรนทั้ง 3 ชนิด ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับความดัน เหมือนกับการทดลองที่ผ่านมา เมมเบรน NF ให้ค่ามากที่สุด รองลงมาคือ CA และ HR ฟลักซ์มีค่ามากที่ความดันสูงแต่ค่าฟลักซ์ที่ได้ ค่อนข้างน้อยกว่าค่าฟลักซ์ที่ทดลองในน้ำสังเคราะห์ และทำให้เมมเบรนอุดตันเร็ว สังเกตจากฟลักซ์ที่ความดันสูงในช่วงท้ายการทดลอง จะลงต่ำมากบางครั้งต่ำกว่าการทดลองที่ความดันต่ำกว่า ตะกอนที่ละลายน้ำจะมากกว่าในน้ำสังเคราะห์ หลังจากเก็บข้อมูลในเรื่องของฟลักซ์แล้วนำสารตัวอย่างที่ผ่านเมมเบรนแล้ว Permeate ไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของสารหนู และเปอร์เซ็นต์การกักกันของเมมเบรนแต่ละชนิด ผลออกมาดังตารางที่ 12 และภาพประกอบ 41

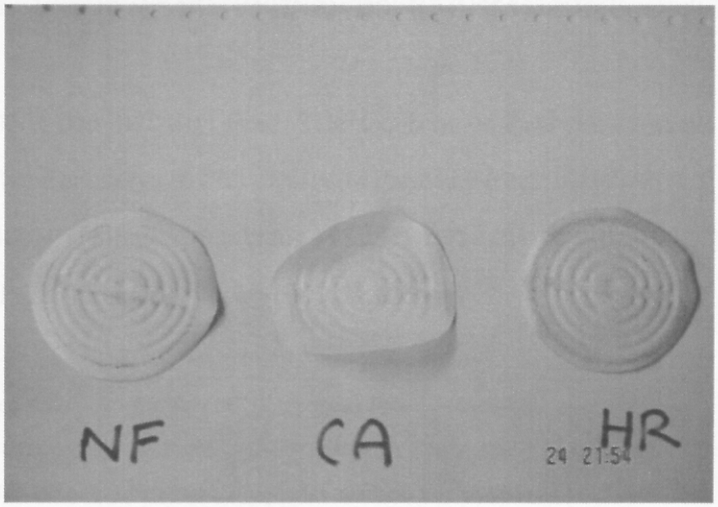
ตาราง 12 ค่าความเข้มข้นของ Permeat(ppm) และ Rejection ของเมมเบรนทั้ง 3 ชนิด
(ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารหนูในน้ำ Feed = 0.142ppm)

CA Membrane			HR Membrane			NF Membrane		
Pressure (psi)	Permeate (ppm)	Rejection (%)	Pressure (Psi)	Permeate (ppm)	Rejection (%)	Pressure (Psi)	Permeate (ppm)	Rejection (%)
400	0.043	69.72	400	0.061	57.04	250	0.032	77.46
450	0.060	57.75	450	0.12	15.49	300	0.048	66.20
500	0.027	80.99	500	0.117	17.61	350	0.044	69.01
550	0.03	73.24	550	0.083	41.55	400	0.030	78.87
600	0.034	75.35	600	0.087	38.73	450	0.034	76.06



ภาพประกอบ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและ Rejection ของเมมเบรน CA , HR และNF (สารละลายจากแหล่งน้ำธรรมชาติ)

จากผลการทดลองข้างต้น เมมเบรน NF เปอร์เซ็นต์การกักกันดีที่สุดเฉลี่ยในทุกๆความดัน (66-79 %) สามารถลดความเข้มข้นของสารหนูจนเหลือ 0.03 ppm รองลงมาคือ เมมเบรน CA (58-81 %) การเปลี่ยนแปลงมีค่อนข้างมาก สุดท้ายคือ เมมเบรน HR (16-57 %) ซึ่งบางการทดลองแทบจะไม่สามารถลดความเข้มข้นของสารหนูลงได้เลย ผลการทดลองมีแนวโน้มเหมือนกับการทดลองในตอนที่ 2 ซึ่งมีกระบวนการตกตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์ก่อนที่จะเข้ากระบวนการเมมเบรน ดังนั้นเราจึงสันนิษฐานว่าในน้ำที่เก็บตัวอย่างมามีสารประกอบของเหล็กละลายอยู่พอสมควร สังเกตจากสีของน้ำ และคราบที่ติดอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรนดังภาพประกอบ 42 ซึ่งเป็นสีเหลือง อย่างไรก็ตามนอกจากสารประกอบของเหล็กแล้ว อาจมีสารตัวอื่นอยู่หลายชนิดปะปนในน้ำ



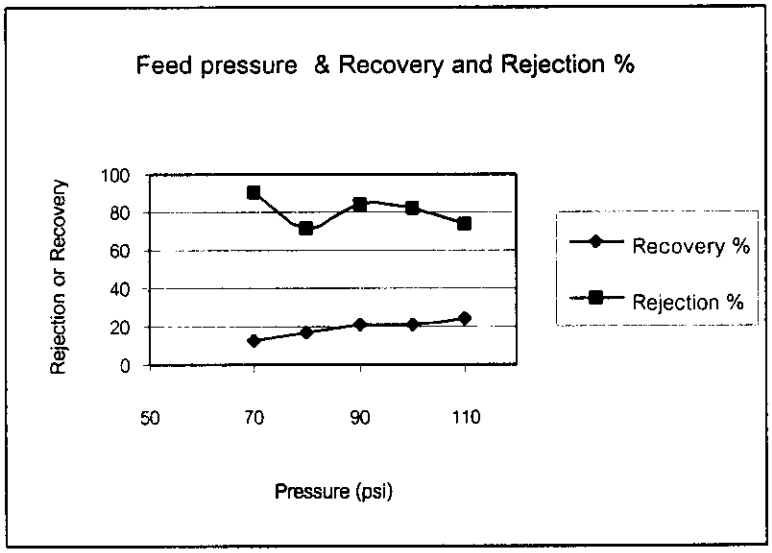
ภาพประกอบ 42 ภาพผิวหน้าของเมมเบรนทั้ง 3 ชนิดหลังใช้งานแล้ว (สารตั้งต้นจากแหล่งน้ำจริง)

ตอนที่ 2 การทดลองใน Filmtec Membrane Module

ความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้นจากแหล่งน้ำธรรมชาติ(Feed) :0.142 ppm

ตาราง 13 ค่าอัตราการไหลในระบบ (Feed Rate ,Concentrate Rate and Permeate Rate) เปอร์เซ็นต์ Recovery ความเข้มข้นของ Permeate และเปอร์เซ็นต์การกักกัน ความดันต่างๆ (Filmtec Membrane Module) สารตั้งต้นจากแหล่งน้ำธรรมชาติ : 0.142 ppm , Pump pressure : 15 kg/cm^2 (213.35 psi)

Feed Pressure (Psi)	Feed Rate (R1) (L/min)	Concentrate Rate (L/min)	Permeate Rate (R2) (L/min)	Recovery (%) (R2/R1)	Permeate (ppm)	Rejection %
70	1.34	1.17	0.17	12.69	0.014	90.14
80	1.34	1.12	0.22	16.42	0.041	71.13
90	1.34	1.064	0.276	20.60	0.023	83.80
100	1.34	1.054	0.286	21.34	0.026	81.69
110	1.34	1.02	0.32	23.88	0.038	73.24



ภาพประกอบ43 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับRecovery และ Rejection (Filmtec Membrane Module) สารตั้งต้นจากแหล่งน้ำธรรมชาติ :0.142 ppm

เช่นเดียวกับการทดลองใน Membrane Test Cell น้ำจากแหล่งน้ำจะให้ค่า Recovery ประมาณ12.70- 24 % ต่ำกว่าการทดลองในน้ำสังเคราะห์ (14.93-28 %) เพราะจากตารางที่ 13 อัตราการไหลของ Permeate ที่ผ่านเมมเบรนออกมามีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้ในน้ำสังเคราะห์ เป็นผลให้ Recovery ต่ำลง แนวโน้มของ Recovery กับความดันดูได้จากภาพประกอบ 43 เมื่อความดันเพิ่ม อัตราการไหลของ Permeate เพิ่มขึ้น Recovery จึงเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับเปอร์เซ็นต์การกักกันแสดงผลในตารางที่ 13 และภาพประกอบ 43

สำหรับการทดลองนำน้ำธรรมชาติมาผ่านเมมเบรนโมดูลของบริษัทนี้ ค่าที่ได้ค่อนข้างน่าพอใจเพราะสามารถลดความเข้มข้นของสารหนู จนเหลือประมาณ 14 ppb ซึ่งทำได้ดีกว่าการทดลองกับน้ำสังเคราะห์ในการทดลองที่ 2 และในแต่ละความดันเปอร์เซ็นต์การกักกัน ผลออกมาค่อนข้างใกล้เคียงกัน ไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะฉะนั้นเมมเบรนโมดูลชนิดนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำธรรมชาติได้ แต่ต้องตรวจคุณภาพของน้ำก่อนว่าเป็นอย่างไร เพื่อพิจารณาว่าจำเป็นที่จะต้องมีการทำ Pretreatment ก่อนเข้ากระบวนการเมมเบรนหรือไม่

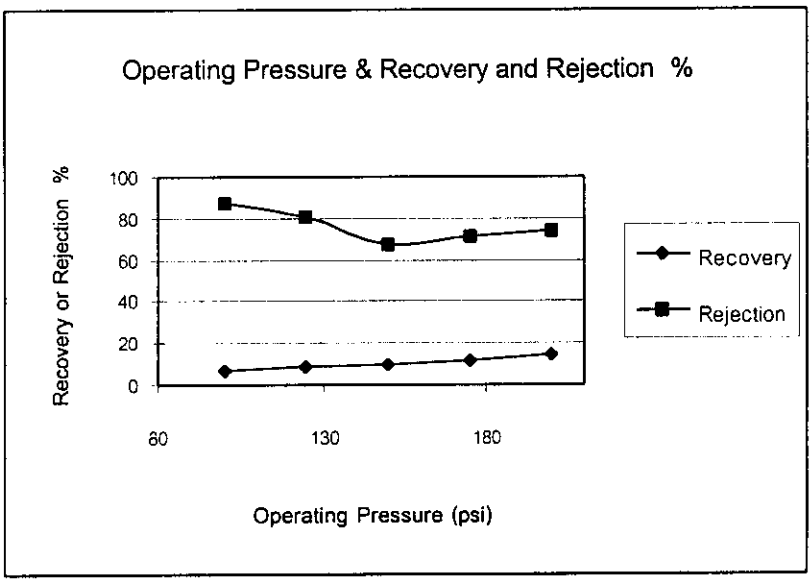
ตอนที่ 3 เมมเบรนโมดูลแบบม้วน (Osmonics Membrane Module)
ความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้นจากแหล่งน้ำธรรมชาติ : 0.142 ppm

ตาราง 14 ค่าอัตราการไหลในระบบ (Feed Rate ,Concentrate Rate and Permeate Rate) เปอร์เซ็นต์ Recovery ความเข้มข้นของ Permeate และเปอร์เซ็นต์การกักกัน ที่ความดันต่างๆ สารตั้งต้นจากแหล่งน้ำธรรมชาติ :0.142 ppm (Osmonics Membrane Module)

Operateing Pressure (Psi)	Feed Rate (R1) (L/min)	Concentrate Rate (L/min)	Permeate Rate (R2) (L/min)	Recovery (%) (R2/R1)	Permeate (ppm)	Rejection %
100	7.0	6.51	0.49	7.00	0.018	87.32
125	7.0	6.423	0.577	8.24	0.027	80.99
150	7.0	6.348	0.652	9.31	0.047	66.90
175	7.0	6.194	0.806	11.51	0.041	71.13
200	7.0	6.021	0.976	13.99	0.037	73.95

จากตารางข้างต้น ค่าเปอร์เซ็นต์ Recovery ที่ได้ต่ำกว่าค่าที่ทดลองในการทดลองกับน้ำสังเคราะห์โดยเมมเบรน โมดูลตัวเดียวกัน แนวโน้มหรือความสัมพันธ์ของความดันกับเปอร์เซ็นต์ Recovery แสดงในภาพประกอบ 44 คือ ความดันสูงขึ้น เปอร์เซ็นต์ Recovery สูงขึ้นด้วย

จากตารางที่ 14 และ ภาพประกอบ 44 บอกค่าเปอร์เซ็นต์การกักกันในเมมเบรนโมดูลชนิดนี้พบว่า สามารถลดความเข้มข้นของสารหนู จนกระทั่งเหลือปริมาณเพียง 0.018 ppm จากความเข้มข้นเริ่มต้น 0.142 ซึ่งใกล้เคียงกับ Filmtec Membrane Module แนวโน้มค่าเปอร์เซ็นต์การกักกันของเมมเบรนชุดนี้ พบว่ามีแนวโน้มที่จะลดลงความดันสูงขึ้น ดังนั้นในการนำไปใช้กับน้ำจริง ไม่จำเป็นที่เราจะต้องดำเนินการที่ความดันสูง เพราะนอกจากการสิ้นเปลืองในเรื่องของพลังงานแล้ว ประสิทธิภาพที่ได้อาจไม่ดีพอ



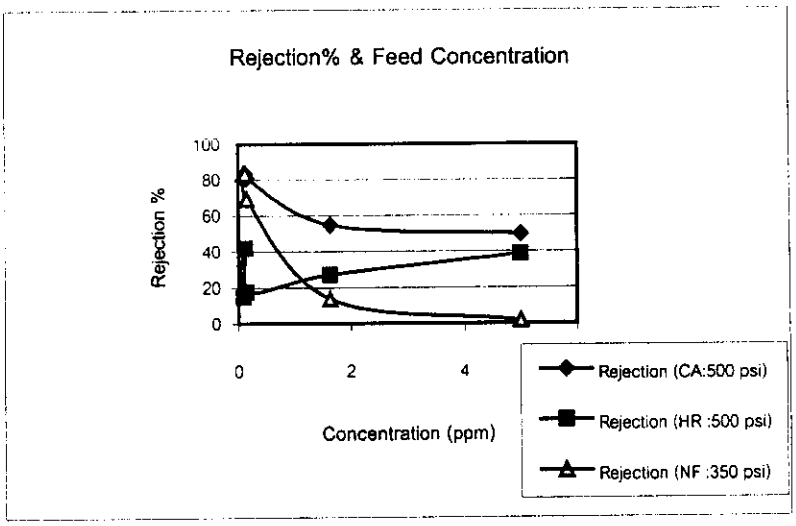
ภาพประกอบ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับ Recovery และ Rejection (Osmonic Membrane Module) สารตั้งต้นจากแหล่งน้ำธรรมชาติ :0.142 ppm

ผลของความเข้มข้นของสารหนูในสารตั้งต้น

ส่วนผลของความเข้มข้นเริ่มต้นในสารละลาย โดยทั่วไปแล้วถ้าสารละลายตั้งต้นมีความเข้มข้นน้อยลง เปอร์เซ็นต์การกักกันในเมมเบรนจะดีขึ้น ในงานวิจัยชิ้นนี้มีการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นเริ่มต้นในการทดลองกับ Membrane Test Cell ตัวอย่าง Permeate ที่เก็บไปวิเคราะห์เก็บเมื่อเวลา 300 นาทีซึ่งแสดงในตาราง 15 และตาราง 16

ตาราง 15 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูใน เมมเบรนชนิดแผ่น 3 ชนิด (ที่ความดันเดียวกัน P =500 psi)

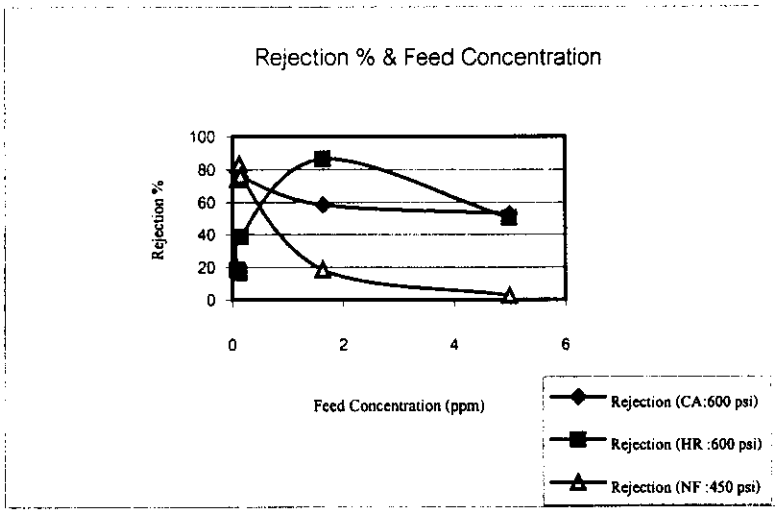
CA Membrane (500 psi)			HR Membrane (500 psi)			NF Membrane (350 psi)		
Feed Concentration (ppm)	Permeate Concentration (ppm)	Rejection %	Feed Concentration (ppm)	Permeate Concentration (ppm)	Rejection %	Feed Concentration (ppm)	Permeate Concentration (ppm)	Rejection %
5	2.53	49.4	5	3.07	38.6	5	4.92	1.6
1.63	0.74	54.60	1.63	1.19	26.99	1.63	1.41	13.5
0.12	0.02	83.33	0.12	0.07	41.67	0.12	0.02	83.33
0.085	0.017	83.31	0.085	0.0723	14.74	0.085	0.014	83.25
0.142 (Natural Water)	0.027	80.99	0.142 (Natural Water)	0.117	17.61	0.142 (Natural Water)	0.044	69.01



ภาพประกอบ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นและเปอร์เซ็นต์การกักกันใน เมมเบรนชนิดแผ่น

ตาราง 16 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูในเมมเบรนชนิดแผ่น 3 ชนิด (ที่ความดันเดียวกัน P=600 psi)

CA Membrane (600 psi)			HR Membrane (600 psi)			NF Membrane (450 psi)		
Feed Concentration (ppm)	Permeate Concentration (ppm)	Rejection %	Feed Concentration (ppm)	Permeate Concentration (ppm)	Rejection %	Feed Concentration (ppm)	Permeate Concentration (ppm)	Rejection %
5	2.36	52.8	5	2.49	50.2	5	4.87	2.6
1.63	0.68	58.28	1.63	0.22	86.5	1.63	1.33	18.40
0.12	0.03	75.00	0.12	0.1	16.67	0.12	0.02	83.33
0.085	0.022	78.82	0.085	0.069	18.40	0.085	0.022	73.82
0.142 (Natural Water)	0.035	75.35	0.142 (Natural Water)	0.087	38.73	0.142 (Natural Water)	0.034	76.06



ภาพประกอบ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นและเปอร์เซ็นต์การกักกันในเมมเบรนชนิดแผ่น

จากข้อมูลในตารางและภาพประกอบ 45 และ 46 เมื่อความเข้มข้นของสารหนูน้อยลง เปอร์เซ็นต์การกักกันของเมมเบรนจะดีขึ้น แต่สำหรับการทดลองที่มีการตกตะกอนด้วย เฟอร์ริกคลอไรด์อาจมีการเปลี่ยนแปลงบ้างเนื่องจาก มีสารประกอบหรือไอออนตัวอื่นรวมอยู่ในสารละลายด้วย ในเมมเบรน NF เมื่อความเข้มข้นของสารหนูน้อยลง หรือมีการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ลงไปมากขึ้น เปอร์เซ็นต์การกักกันมีแนวโน้มดีขึ้น เมมเบรน CA เฟอร์ริกคลอไรด์ไม่มีผลมากนักและยังคงมีเปอร์เซ็นต์การกักกันดีขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารหนูน้อยลง ส่วนในเมมเบรน HR เส้นกราฟไม่คงที่เพราะในช่วงที่สารตั้งต้นมีความเข้มข้นต่ำ เปอร์เซ็นต์การกักกันต่ำเนื่องจากมีการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ลงไปดังอธิบายไว้ในการทดลองข้างต้น

ในส่วนของการทดลองในน้ำธรรมชาติ เมมเบรน CA และเมมเบรน NF มีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของสารหนูได้ดี ผลของไอออนหรืออนุภาคต่างๆซึ่งละลายในน้ำไม่ขัดขวางการทำงานของเมมเบรน สำหรับเมมเบรน HR ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูลดต่ำลงมากทั้งในน้ำธรรมชาติและน้ำสังเคราะห์ที่มีการตกตะกอนด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์

สำหรับผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่อค่าฟลักซ์ ให้ผลไม่เด่นชัดในน้ำสังเคราะห์ จะให้ค่าใกล้เคียงกัน แต่ในน้ำธรรมชาติจะให้ค่าฟลักซ์ต่ำกว่าเนื่องจาก ตะกอนหรืออนุภาคที่ละลายในน้ำมีมากกว่าในน้ำสังเคราะห์ เป็นผลให้เมมเบรนอุดตันเร็วขึ้น