3 ผลการทดลอง

3.1 กลไกการทำงาน

จาก Figure 2 จะเห็นว่า อนุภาคแขวนลอยในน้ำจากถังพักจะถูกกรองด้วยเยื่อกรองระดับ MF ที่ตำแหน่ง 3 แล้วถูกส่งต่อไปยังเยื่อกรองระดับ RO ที่ตำแหน่ง 4 โดยอาศัยปั๊มที่ตำแหน่ง 2 และ 1 ส่วนอนุภาคที่จะถูกกักกันบนเมมเบรน ขึ้นกับขนาด ดังอธิบายไว้ใน Figure 5 ในการนี้จะมีน้ำทิ้งปริมาณหนึ่ง ซึ่งจะ Recycle กลับมายังถังพักน้ำ

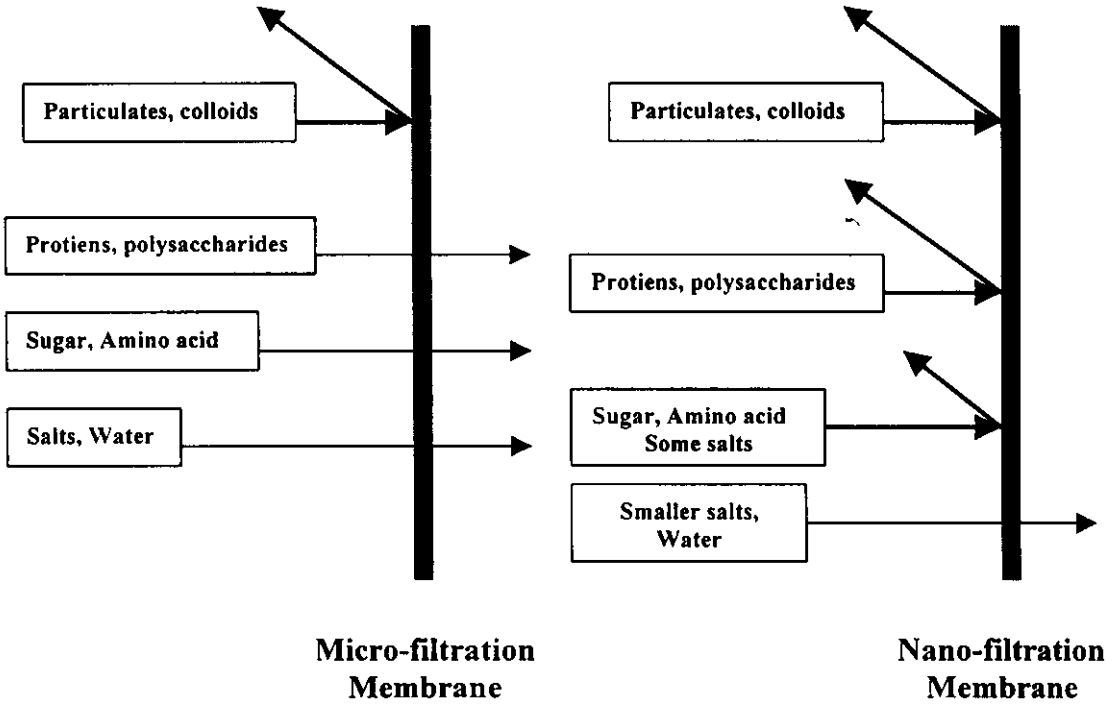

Figure 5 Diagram showing possibility of particles to be rejected by membranes. (a) micro filtration and (b) nano-filtration.

3.2 การทดสอบอุปกรณ์ครั้งที่ 1

3.2.1 ความดันของสารป้อน (Feed)

เมื่อเปิดให้เครื่องทำงาน โดยมีข้อพึงปฏิบัติตามรายละเอียดในตารางที่ 3 พบว่าความดันน้ำของปั๊ม (25 bar) ทำงานได้เพียง 50% คาดว่าเกิดจากความดันที่สูญเสียขณะที่น้ำผ่านเยื่อกรอง MF นอกจากนี้ความดันของน้ำก่อนเข้าเยื่อกรอง RO คือ 12.0 บาร์ และหลังจากน้ำผ่านเยื่อกรองแล้ว ความดันใน Retentate เหลือ 2.0 บาร์ แสดงว่าความดันในระหว่างการกรองลดลงถึง 10.5 bar จึงได้เพิ่มเติมอุปกรณ์ตาม Figure 2 ดังนี้

ก เพิ่มปั๊มขนาดไม่เกิน 3 bar ไว้ที่ตำแหน่ง 2 ก่อนน้ำผ่านเข้าเยื่อ MF

ข เพิ่ม Gauge Valve ตำแหน่ง 7 เพื่อตรวจความดันน้ำก่อนเข้าเยื่อกรอง

ค เพิ่มมิเตอร์แสดงปริมาตรการไหลของน้ำที่ออกจากถังพักน้ำ

ง การที่มี Pressure drop หลังน้ำผ่าน RO membrane สูง คาดว่าอาจเกิดจากท่อส่งน้ำเข้า RO membrane เล็กเกินไป (เส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว) จึงน่าจะลองเปลี่ยนขนาดท่อเดินน้ำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น **(ยังไม่ได้ทำในงานวิจัยนี้)**

จ ต่อท่อน้ำให้สูงจากขอบถังน้ำดีและน้ำก่อนกรอง เพื่อให้สามารถวัดอัตราการไหลของปริมาตรน้ำดีได้ง่ายขึ้น

ฉ เพิ่ม Valve ใต้ถังพักน้ำอีก 1 ตัวเพื่อ Bypass น้ำจากท่อประปา หรือถังพักน้ำของชุมชน เข้าเครื่องกรองได้โดยตรง

3.2.2 เพอมิเอท (Permeate) จากน้ำประปา มอ.

ทดลองกรองน้ำประปา มอ. (วัดในหน่วยสภาพนำไฟฟ้าของสารละลาย) คุณภาพน้ำวัดด้วยค่าสภาพนำไฟฟ้าที่ 17° C)

ก่อนผ่านเยื่อ RO	10.6 $mS.m^{-1}$
หลังผ่านเยื่อ RO	3.0 $mS.m^{-1}$

3.2.3 เพอมิเอทจากสารละลาย NaCl

คุณภาพน้ำวัดด้วยค่าสภาพนำไฟฟ้าที่ 17° C) และค่า TDS ในหน่วย ppm

ก่อนผ่านเยื่อ RO	705 $mS.m^{-1}$ (4,000 ppm)
หลังผ่านเยื่อ RO	36 $mS.m^{-1}$ (300 ppm)

International Standard = 250 ppm

มาตรฐานน้ำดื่มไทย 500 ppm

% rejection = [1-(36/705)]x10 = 94.8 คำนวณจากค่า TDS

หรือ = [1-(300/4000)] x100 = 92.5 คำนวณจากสภาพนำไฟฟ้า

3.2.4 การเปิด-ปิดเครื่องกรองและการบำรุงรักษา

ก่อนการใช้เครื่องกรองในซึ่งแสดงภาพใน Figure 4 จะต้องตรวจสอบตำแหน่งของวาล์วต่างๆให้อยู่ในตำแหน่งถูกต้อง ดังรายละเอียดในตารางที่ 2 (ดูไดอะแกรมเกี่ยวกับตำแหน่งวาล์วต่างๆใน Figure 3 ซึ่งตรงกับฉลากหมายเลขกำกับที่อุปกรณ์ไว้ที่ต้นแบบ) ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหากับปั๊มซึ่งทำงานด้วยระบบไฟฟ้า สำหรับการอุดตันของเยื่อกรอง

นอกจากจะเกิดจากอนุภาคเกลือที่ถูกกรองแล้ว อาจมีจุลินทรีย์ที่ปนมากับสารปูนที่สะสมอยู่บนเยื่อกรอง เมื่อเวลานานขึ้นจะมีโอกาสเจริญเติบโต ก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันตามมาด้วย เหล่านี้จะทำให้เยื่อกรองลดความสามารถในการกรองลง และหากปล่อยอุปกรณ์ทิ้งไว้โดยไม่ใช้งาน โดยไม่มีการดูแลรักษาให้เยื่อกรองชุ่มน้ำอยู่ตลอดเวลา ก็จะมีปัญหาด้านคุณภาพของเยื่อกรองด้วยเช่นกัน (ดูข้อมูลเกี่ยวกับเยื่อกรองเพิ่มเติมได้ ในภาคผนวก ง)

Table2 Brackish Water Filtration Unit: *Operation and Cares*

<table>
<tr><th>เตรียมระบบให้พร้อม</th><th>การเปิดเครื่อง</th></tr>
<tr><td>1 ตรวจสอบสวิทช์ปุ่มกดต่างๆอยู่ในตำแหน่งปิด โดยเฉพาะเมนสวิทช์(Main Braker)แล้วทำการต่อสายไฟเข้ากับแหล่งจ่ายชนิด 3 เฟส 380 โวลท์ พร้อมกับสายกราวด์ 1 เส้น
2 ตรวจสอบน้ำในถังน้ำวัตถุดิบ จะต้องอยู่ในระดับที่กำหนดไว้ ทุกครั้งก่อนการสตาร์ทเครื่อง
3 ตรวจสอบทิศทางการเปิดปิดของวาล์วใน Figure 3 ให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง ดังนี้
<table><tr><th>หมายเลขวาล์ว</th><th>ตำแหน่ง</th></tr><tr><td>1,3,4</td><td>เปิด</td></tr><tr><td>2 (มี 2 ตัว)</td><td>ปิด</td></tr><tr><td>5,6,7</td><td>เปิด</td></tr><tr><td>8</td><td>ปิด</td></tr><tr><td>9</td><td>เปิดสุด</td></tr></table><u>หมายเหตุ</u>
ก) วาล์วหมายเลข 8 นี้ เปิดทางให้น้ำไหลสู่ถังน้ำดิบ (Bypass) เมื่อไม่ต้องการให้น้ำไหลเข้าสู่เมมเบรน
ข) วาล์วหมายเลข 9 สามารถหรี่ลงได้เมื่อต้องการเพิ่มความดันน้ำ <u>แต่ห้ามปิด</u></td><td>1 ตรวจดูตำแหน่งสวิทช์ปุ่มกดจะต้องอยู่ในตำแหน่ง OFF จากนั้นเปิดฝาตู้ควบคุมไฟฟ้า เปิดเมนสวิทช์(Main Breaker)โดยการโยกสวิทช์ไปที่ตำแหน่ง ON
2 ตรวจดูสวิทช์ปุ่มกดฉุกเฉิน(Emergency Stop) จะต้องอยู่ในตำแหน่งปล่อย (หากสวิทช์ถูกกดอยู่ ให้บิดสวิทช์ปุ่มกดไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา แล้วปล่อยมือ สวิทช์จะถูกปลดออก)
3 กดปุ่มสตาร์ทปั๊มสีเขียว ปั๊มสูบน้ำหมายเลข 2 (ดู Figure 2) จะทำงาน และกดปุ่มสตาร์ทที่ตัวอินเวิร์ทเตอร์แล้วปรับรอบมอเตอร์ขึ้นไปจนถึงระดับที่ต้องการ ปั๊มหมายเลข 1 จะทำงาน
(หลังจากกดปุ่ม สตาร์ทปั๊มหมดแล้ว รอสักครู่น้ำที่ผ่านเมมเบรนจะไหลออกมา)</td></tr>
</table>

ขั้นตอนการหยุดเครื่อง	ข้อควรระวัง
1 ลดความเร็วรอบของมอเตอร์ปั๊มสูบน้ำหมายเลข 1 ลงจนหมดแล้วกดปุ่ม Stop ที่ตัวอินเวิร์ทเตอร์ 2 กดปุ่มสวิทช์หยุดฉุกเฉิน ปั๊มสูบน้ำหมายเลข 2 หยุดทำงาน 3 หากไม่ต้องการใช้งานอีกต่อไปให้ปิดเมนสวิทช์ลง (Main Breaker) และถ่ายน้ำในถังทั้ง 2 ถัง ออกให้หมด <u>การบำรุงรักษา</u> เยื่อกรองไม่ควรแห้ง ควรตรวจสอบให้มีน้ำหล่อเลี้ยงอยู่เสมอ ทุกๆ 2-3 วัน <u>การทำความสะอาด</u> **เพื่อลดโลหะที่อุดตัน (Acid cleaning)** ใช้ pH 2 หรือน้อยกว่า ด้วยกรด ฟอสฟอริก ไฮโดรคลอริก หรือไนตริก **เพื่อลดสารอินทรีย์ที่อุดตัน (Alkaline cleaning)** ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมลอรีลซัลเฟต (Sodium lauryl sulfate) หรืออาจใช้สารผสมระหว่าง NaEDTA, Sodium tripolyphosphate และ Trisodiumphosphate <u>**ข้อควรระวัง**</u> สำหรับ Alkaline cleaning <u>**ห้ามใช้สารที่มีประจุบวก**</u> เพราะจะทำให้ฟลักซ์ของเยื่อกรองลดลงอย่างถาวร	ก) ในการต่อสายไฟ 3 เฟสจะต้องดูทิศทางการหมุนของมอเตอร์ (มีลูกศรบอกทิศทางการหมุนของมอเตอร์อยู่ที่ตัวมอเตอร์) หากมอเตอร์หมุนในทิศทางที่ไม่ถูกต้อง ให้ทำการสลับสายเส้นใดเส้นหนึ่งแล้วสังเกตทิศทางการหมุนของมอเตอร์อีกครั้ง ข) การต่อสายกราวด์ให้ต่อจาก เทอร์มินอลในตู้ลงสู่กราวด์ (ground) ค) ทิศทางของวาล์วจะต้องอยู่ในตำแหน่งที่กำหนด หากวาล์วตัวใดตัวหนึ่งในระบบด้านที่มีความดันสูงปิดจะทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ในระบบได้ ง) การเปิดวาล์ว Bypass หมายเลข 8 จะต้องเปิดวาล์วหมายเลข 8 ก่อนแล้วจึงจะปิดวาล์วหมายเลข 7 หลังจาก Bypass แล้วเมื่อต้องการกลับเข้าสู่การกรองอีกครั้งจะต้องเปิดวาล์วหมายเลข 7 ก่อนแล้วจึงปิดวาล์วหมายเลข 8 จ) ในการกรองแต่ละครั้งจะต้องคอยระวังมิให้น้ำในถังน้ำวัตถุดิบแห้ง หรือลดลงในระดับต่ำกว่าที่กำหนด ซึ่งหากระดับน้ำต่ำกว่าระดับที่กำหนดจะทำให้ประสิทธิภาพในการกรองลดลงและอาจทำให้ปั๊มสูบน้ำเกิดอาการ Run dry ได้ซึ่งจะส่งผลให้ปั๊มสูบน้ำเสียหายได้

3.3 การทดสอบครั้งที่ 2

ภายหลังการแก้ไขดังข้อ 3.2 ได้ทำการทดสอบการกรองน้ำกร่อยอีกครั้ง ความดันของระบบสัมพันธ์กับความถี่ไฟฟ้าที่ให้กับตัวควบคุม (หมายเลข 9 ใน Figure 2) ดังนี้

3.3.1 ความดันน้ำที่สูญเสียในเยื่อกรอง

เมื่อให้ความดัน (ตำแหน่ง 7) ก่อนเข้าเยื่อกรอง คงที่ 2.2 MPa

พบว่าความดันที่แต่ละส่วนของระบบ มีดังนี้

Retentate pressure (ตำแหน่ง 12) 0.3 MPA

ดังนั้นความดันที่สูญเสียหลังน้ำผ่านเยื่อกรอง 1.9 MPa

ก **เปอร์เซนต์กักกันเกลือจากสารละลาย NaCl ที่ทำเอง (4,000 ppm)**

<u>วัดจากสภาพนำไฟฟ้าของน้ำ</u> (σ)

TDS ของสารป้อน = 694 $mS.m^{-1}$ TDS ของเพอมิเอท 147 $mS.m^{-1}$

% Rejection [1-(147/694)]x10 = **78.8**

ข เปอร์เซนต์กักกันเกลือจากน้ำบาดาลที่โรงพยาบาลสทิงพระ (3,300 ppm)

<u>วัดจากสภาพนำไฟฟ้าของน้ำ</u> (σ)

σ ของสารป้อน = 679 $mS.m^{-1}$ σ =ของเพอมิเอท = 0.71 $mS.m^{-1}$

% Rejection = [1-(0.71/679)]x100=**99.9**

3.3.2 ปริมาตรน้ำจากเพอมิเอทของระบบที่ความดันสารป้อน 2.2 MPa

ก ใช้สารป้อนคือน้ำกร่อยที่เตรียมจากห้องวิจัยซึ่งมีเฉพาะ NaCl วัดระดับพีเอชได้ 7.2 พบว่าได้เพอมิเอทในอัตรา 93 $L.h^{-1}$ หรือคิดต่อพื้นที่ของเยื่อกรอง (7.6 m^2) จะได้ฟลักซ์น้ำ 12.24 $L.h^{-1}.m^{-2}$

ข ใช้สารป้อนคือน้ำบาดาลซึ่งเก็บตัวอย่างจากโรงพยาบาลสทิงพระ มีระดับพีเอช 8.3 ได้เพอมิเอทในอัตรา 88 $L.h^{-1}$ หรือ ฟลักซ์น้ำ 11.58 $L.h^{-1}.m^{-2}$

3.4 การศึกษาผลของความดัน

3.4.1 ผลของความดันต่อการกักกันเกลือ

การทดลองขั้นตอนต่อไปนี้ได้เปรียบเทียบผลการกรองตัวอย่างน้ำที่เก็บจากโรงพยาบาลสทิงพระ และน้ำเกลือ NaCl ที่เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ค่าความดันเฉลี่ย ΔP จำนวน 3 ระดับ ซึ่งคำนวณจาก $\Delta P = (P_{feed} + P_{permeate})/2$ Figure 6 a และ b แสดงให้เห็นว่าเปอร์เซนต์การกักกันเกลือของเยื่อกรองขึ้นกับความดันที่ให้แก่ระบบ เมื่อเปรียบเทียบกับการกรองน้ำเกลือ NaCl ใน Figure 7 a, b จะเห็นว่าเปอร์เซนต์การกักกันเกลือของน้ำบาดาลมีค่า 88% สูงกว่าการกักกันเกลือ ในสารละลาย NaCl (80%)

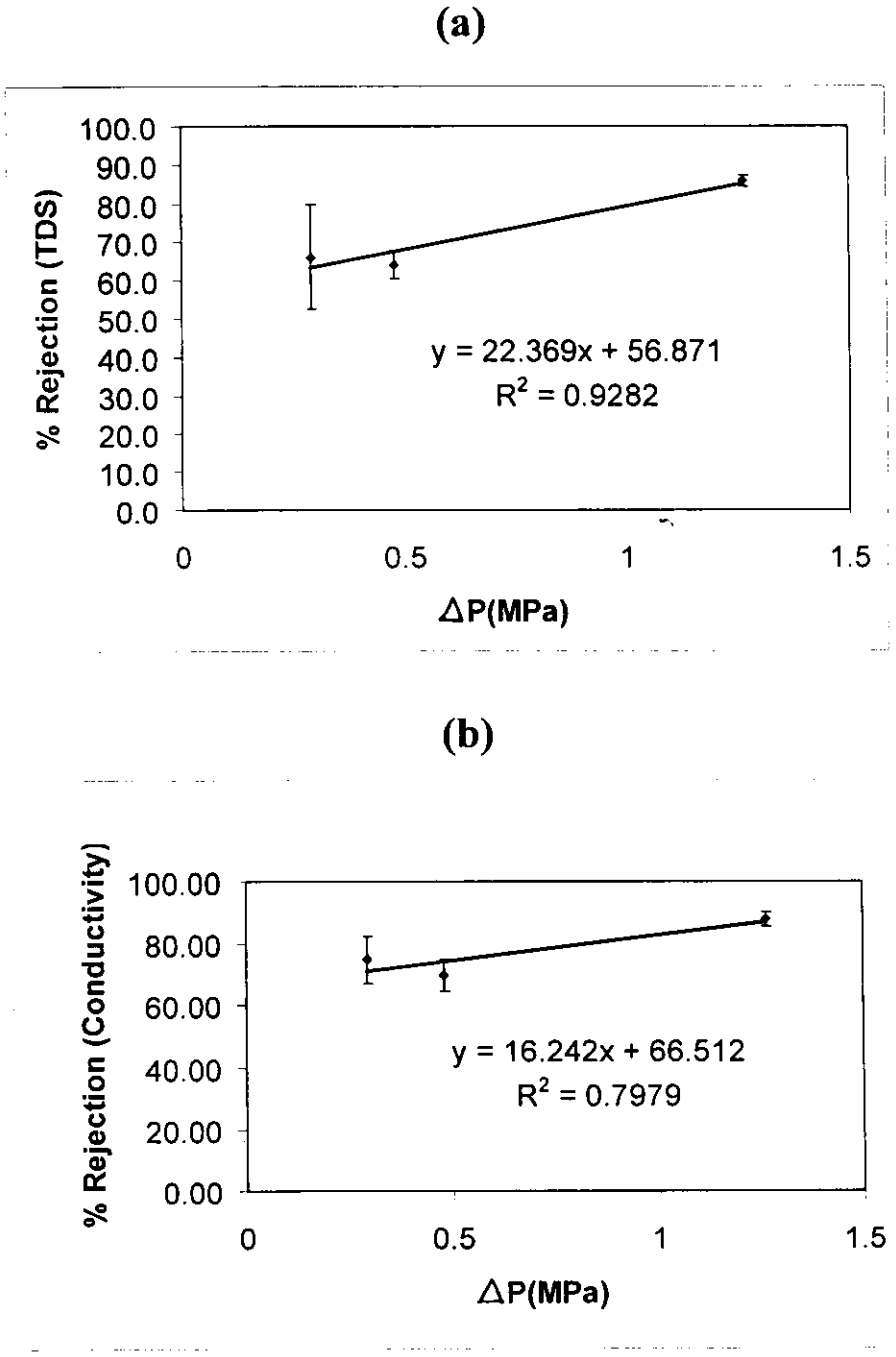

Figure 6 Salt rejection from 3,300 ppm underground water.
(a) calculated from TDS.
(b) calculated from solution conductivity.

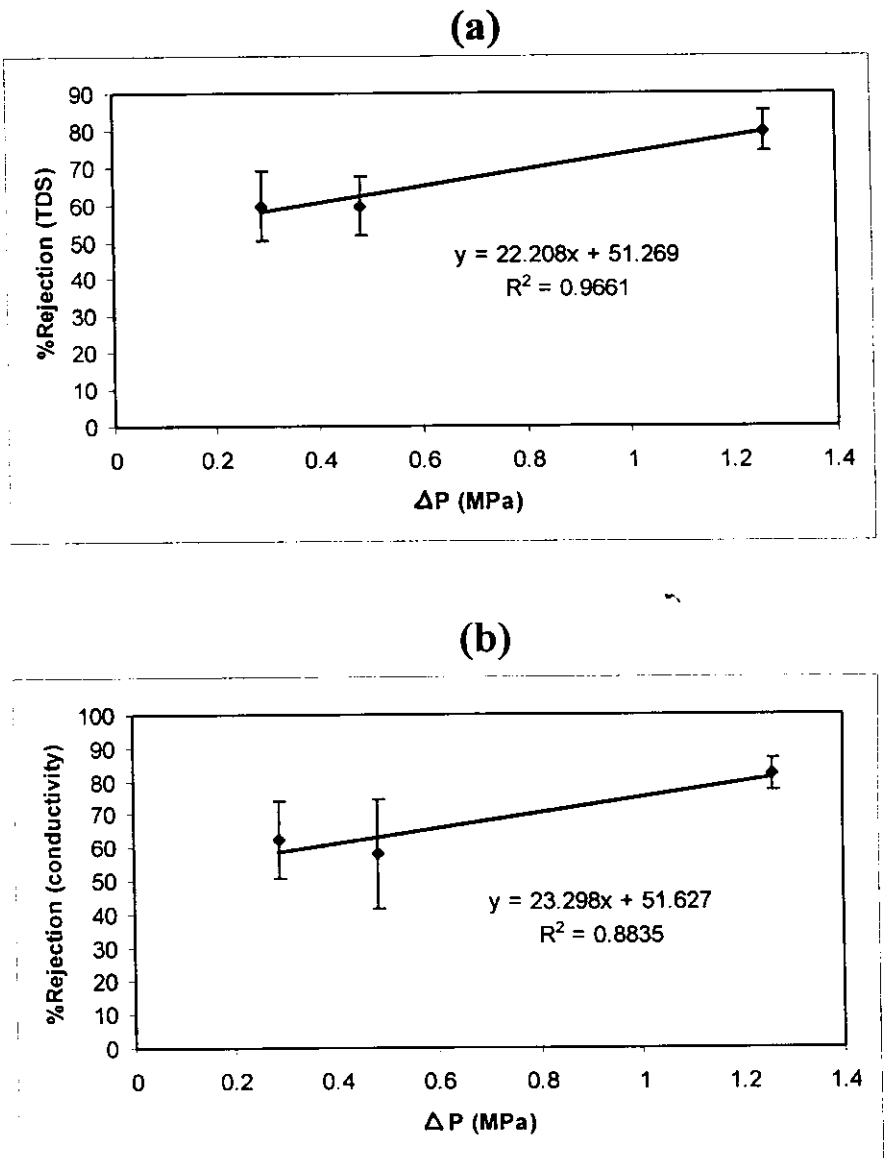

Figure 7 Salt rejection from 4,000 ppm NaCl solution.
(a) calculated from TDS
(b) calculated from solution conductivity.

3.4.2 ผลของความดันต่อฟลักซ์ของเพอมิเอท

Figure 8 ได้แสดงให้เห็นว่าหากเพิ่มความดันให้แก่ระบบกรอง จะได้ฟลักซ์น้ำสูงขึ้น ความดันสูงสุดที่ให้แก่ระบบได้คือ 2.2 MPa ดังนั้น หากปั๊มสามารถทำงานได้ 25 บาร์จริง (2.5 MPa) น่าจะให้ฟลักซ์น้ำได้สูงกว่านี้

3.5 ระยะเวลาการทำงานของระบบ และ % Recovery

เพื่อทดสอบการทำงานของระบบเป็นระยะเวลานานๆ จึงได้ทดลองเดินเครื่องติดต่อกันเป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้น้ำกรองซึ่งกำจัดสนิมเหล็กและความกระด้างแล้ว พบว่าอุปกรณ์ทำงานได้ตามปกติ ดังผลการทดลองใน Table 3 เมื่อเทียบสัดส่วน ($L.hr^{-1}$) ระหว่างน้ำในเพอมิเอทและในสารป้อนได้ค่า 5.4% ซึ่งต่ำมาก ขณะที่ได้น้ำกลับคืนมาก (รีเทนเททสูง) ดังนั้น % Recovery (คำนวณจาก Retentate/Feed) มีค่าสูงถึง 87.4% การที่รีเทนเททมีปริมาณมาก น่าจะเกิดจากอุปกรณ์ต้นแบบนี้ใช้เยื่อกรองเพียง 1 ชุด ปริมาตรน้ำดื่มที่ได้จึงต่ำ แต่ความดันสูญเสียในระบบมาก (ดูข้อ 3.3.1 หน้า ข-13) หากจะเพิ่มเยื่อกรองแบบอนุกรมกับระบบความดันอาจไม่เพียงพอ

Table 3 Showing a consistency of water production from the RO filtration unit, in terms of water fluxes in retentate, permeate and feed, using transmembrane pressure (ΔP) of 1.26 MPa.

	Retentate	Permeate		Feed
Hr.	**$L.hr^{-1}$**	**$L.hr^{-1}$**	**$L.hr^{-1}m^{-2}$**	**$L.hr^{-1}$**
1	2520	132	17	2670
2	2160	144	19	2650
3	2232	144	19	2570
4	2160	144	19	2680
5	2376	144	19	2620
6	2448	144	19	2720
7	2304	144	19	2540
8	2232	144	19	2630
Avg.	**2304**	**143**	**19**	**2635**
±SD	**±133**	**±4**	**±1**	**±59**

Noted that membrane area is 7.6 m^2 and feed was filtered water.

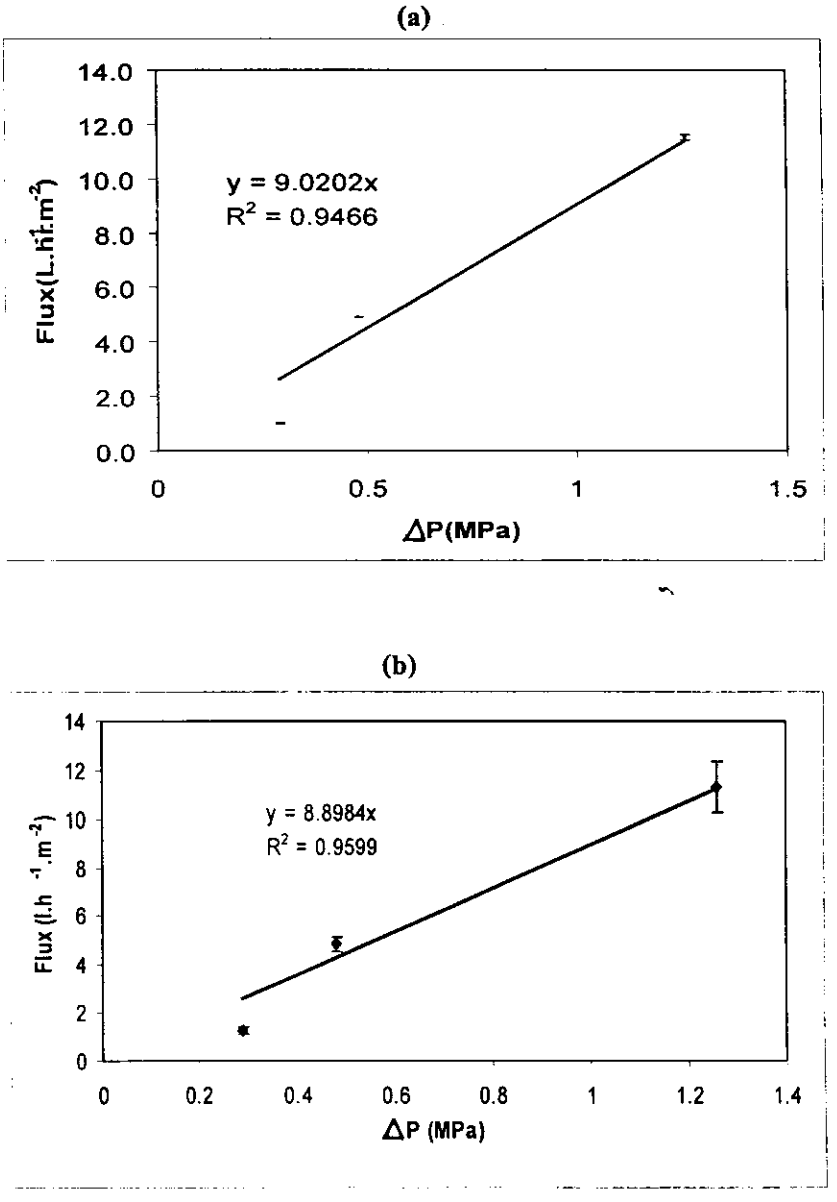

Figure 8
The effect of transmembrane pressure on permeate water flux. Feed solution was (a) underground water of 3,300 ppm collected from Satingpra Hospital, Songkhla province and (b) 4,000 ppm NaCl solution.

3.6 คุณภาพน้ำจากบ่อบาดาลและผลการกรอง

การศึกษาต่อไปนี้จะใช้ผลต่างความดัน (ΔP = Transmembrane pressure) ของน้ำก่อนและหลังผ่านเยื่อกรอง เป็นตัวแปรอิสระ 3 ระดับ คือที่ 0.29, 0.48, และ 1.26 MPa ซึ่งตรงกับความถี่ของสัญญาณควบคุมปั๊มที่ 25 35 และ 45 Hz ตามลำดับ โดยใช้น้ำที่เก็บจากบ่อบาดาล แล้วการทำซ้ำในข้อ 3.3.1-3.3.2 ผลใน Table 4 แสดงว่า คุณภาพน้ำที่เครื่องผลิตได้ดีขึ้นหากเพิ่มความดัน จากผลการวิเคราะห์สารที่ปนมากับน้ำบาดาล พบว่า เมมเบรนที่ใช้ สามารถกรองสารปนเปื้อนในน้ำได้ดีขึ้นเมื่อใช้ความถี่สูงขึ้น (ΔP สูงขึ้น) และที่ความดัน 1.26 MPa มีความสามารถในการกักกันสาร สูงที่สุด เมื่อเทียบกับผลที่ความดัน 0.29 MPa และ 0.48 MPa

Table 4 Showing water quality before and after filtering with the RO unit.

Elements	Feed	Permetate			
		0.29 MPa	0.48 MPa	1.26 MPa	Allowed*
Copper (ppm)	0.006	0.008	0.001	0.001	1.0
Manganese (ppm)	0.929	0.015	0.010	0.007	0.3
Chloride (ppm)	2,060	410	215	152	250
Sulfate (ppm)	870	26	26	17	250
TDS(ppm)	4,300	1400	1200	500	1,000
pH	8.31	7.01	7.23	6.93	6.5-8.5

(* ตามมาตรฐานของคุณภาพน้ำประปาเพื่อการบริโภค ของศูนย์อนามัยและสิ่งแวดล้อม)

นอกจากนี้ข้อมูลใน Table 4 ยังช่วยให้ทราบว่าความดันระดับ 0.2 MPa เพียงพอหากต้องการกรองโลหะธาตุชนิดทองแดง แมงกานีส และซัลเฟตที่ปนเปื้อนมากับน้ำดื่ม และต้องใช้ความดันน้อย 0.5 MPa เพื่อกรองคลอไรด์ซึ่งมีขนาดเล็กลงได้ ดังนั้นในอนาคตหากสามารถจัดเยื่อกรองที่มีรูพรุนต่างๆกัน 2-3 ระดับ ต่อกันแบบอนุกรมในระบบกรองต้นแบบนี้ น่าจะช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านการเดินเครื่อง และการอุดตันในกระบวนการทำน้ำดื่มได้

3.7 อายุการทำงานของระบบ

นอกจากคุณภาพของวัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างต้นแบบแล้ว อายุของระบบขึ้นกับชนิดและคุณภาพของเยื่อกรอง งานวิจัยนี้ ยังไม่สามารถบอกอายุของเยื่อกรองได้ แม้จะเลือกคุณภาพน้ำที่ป้อนก็ตาม เนื่องจากการใช้งานยังน้อย ควรนำอุปกรณ์ต้นแบบไปใช้งานจริง พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลอย่างสม่ำเสมอ จึงจะสามารถวิเคราะห์เกี่ยวกับการคุ้มทุนของระบบนี้ได้