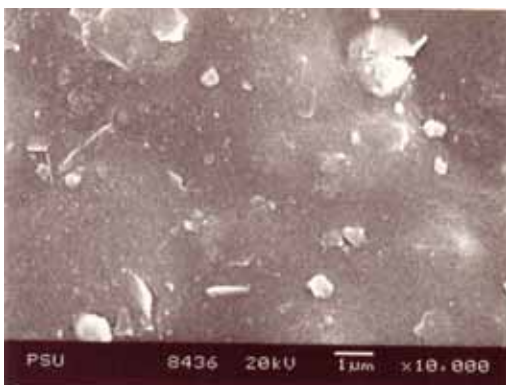


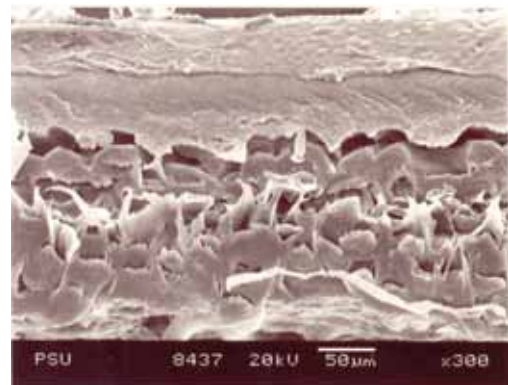
### บทที่ 3

#### ผลการทดลองและบทวิจารณ์

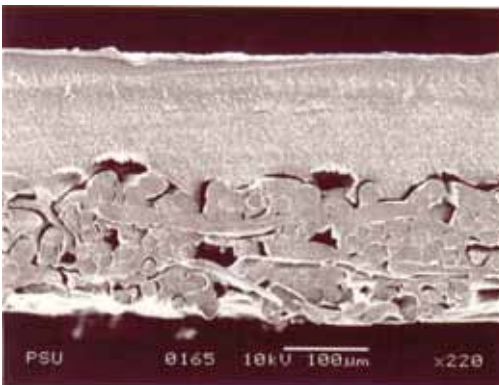
#### 3.1 อิเล็กตรอนไมโครกราฟของเมมเบรนเชิงประกอบชนิด silicone/polysulfone



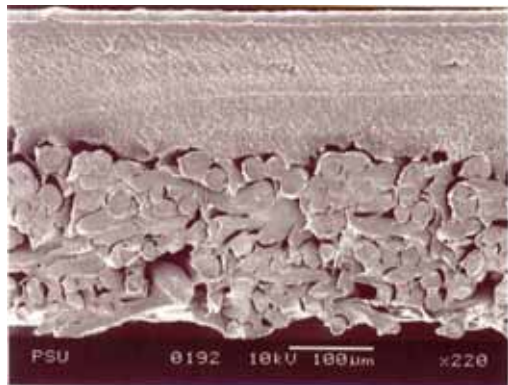
(a)



(b)



(c)



(d)

ภาพประกอบ 3.1 อิเล็กตรอนไมโครกราฟของเมมเบรนเชิงประกอบชนิด silicone/polysulfone

- (a) พื้นผิวด้านบน (top surface), ซิลิโคนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก
- (b) ภาคตัดขวาง (cross-section), ซิลิโคนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก
- (c) ภาคตัดขวาง, ซิลิโคนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
- (d) ภาคตัดขวาง, ซิลิโคนร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก

สัณฐานวิทยา (morphology) ของเมมเบรนสังเคราะห์เชิงประกอบชนิด silicone/polysulfone ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังภาพประกอบ 3.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าผิวชั้นบนเป็นเมมเบรนซิลิโคนชนิดทึบ และมีพอลิซัลโฟนเป็นเมมเบรนชั้นรองรับชนิดพรุน และจากรูป (b)-(d) พบว่าเมมเบรนเชิงประกอบที่เคลือบด้วยซิลิโคนจะมีความหนาของชั้นผิวหน้าซึ่งทึบหนามากขึ้นเมื่อใช้ปริมาณร้อยละของซิลิโคนในสารเคลือบสูงขึ้นดังแสดงในตาราง 3.1

ตาราง 3.1 ความหนาของชั้นซิลิโคนสำหรับเมมเบรนเชิงประกอบ silicone/polysulfone ที่เคลือบด้วยปริมาณซิลิโคนร้อยละ 3 5 และ 7 โดยน้ำหนัก

Thickness of polysulfone support ( $\mu\text{m}$ )	Silicone content (wt %)	Thickness by SEM ( $\mu\text{m}$ )
170	3	$85 \pm 4$
170	5	$133 \pm 2$
173	7	$156 \pm 5$

### 3.2 กระบวนการเพอแวกพอเรชันของสารละลายเอทานอล-น้ำ ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด silicone/polysulfone

#### 3.2.1 ผลของปริมาณซิลิโคนที่เคลือบบนพอลิซัลโฟน

ผลของปริมาณซิลิโคนที่เคลือบบนพอลิซัลโฟนต่อเพอมีเอทฟลักซ์รวมและการแยกของเอทานอลเทียบกับน้ำ แสดงดังภาพประกอบ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$  ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 10 20 30 และ 55 % โดยน้ำหนัก พบว่าพอลิซัลโฟนที่เคลือบด้วยซิลิโคนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ให้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์สูงสุด รองลงมาคือ เมมเบรนที่เคลือบด้วยซิลิโคนร้อยละ 5 และ 7 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากความหนาของเมมเบรนสังเคราะห์ขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลิโคนที่ใช้เคลือบดังแสดงในตาราง 3.1 กล่าวคือเมมเบรนที่เคลือบด้วยปริมาณซิลิโคนสูงขึ้นไปจะมีความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งเพอมีเอทฟลักซ์จะแปรผกผันกับความหนาของเมมเบรนตามสมการ (3.1)

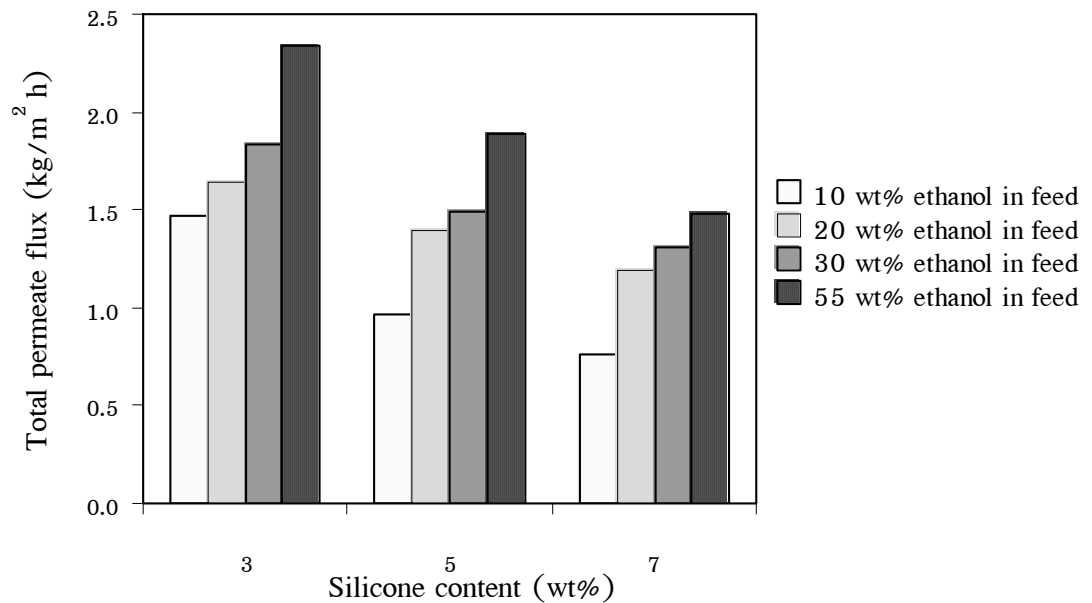
$$J_i = \frac{\bar{P}_i \Delta P}{l} \quad (3.1)$$

โดยที่  $J_i$  คือ เพอมีเอทฟลักซ์ของสาร  $i$ ,  $\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$

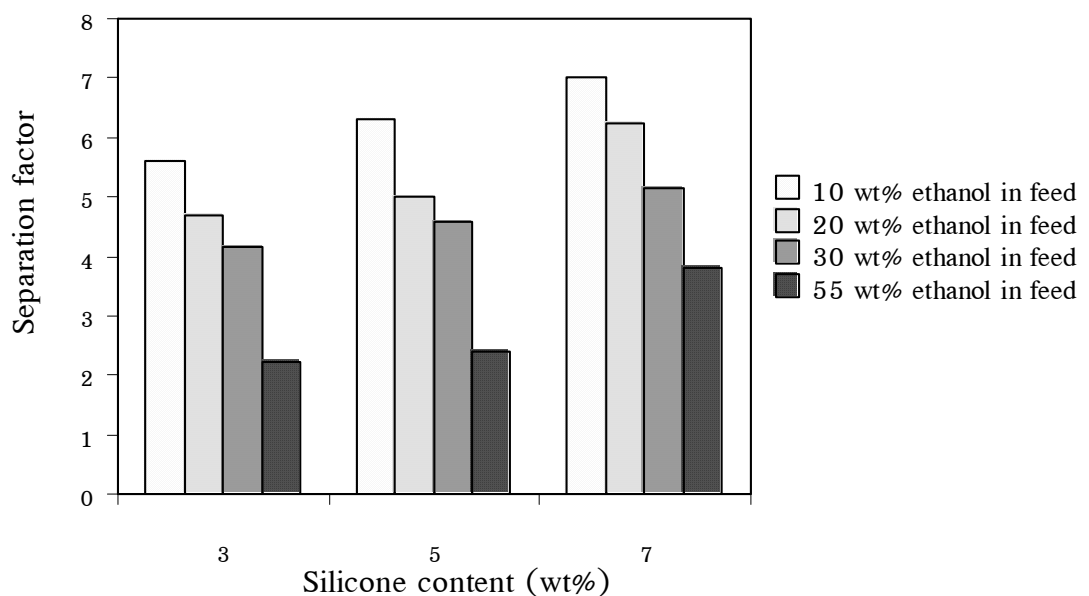
$l$  คือ ความหนาของเมมเบรน,  $\text{m}$

$\bar{P}_i$  คือ สภาพการซึมผ่านสารของเมมเบรน (permeability),  $\text{kg. m.m}^{-2} \text{Pa}^{-1}.\text{h}^{-1}$

$\Delta P$  คือ ผลต่างระหว่างความดันย่อยของสาร  $i$  ทางด้านป้อนและเพอมีเอท,  $\text{Pa}$



ภาพประกอบ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์ร่วมกับปริมาณซิลิโคน ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 10 20 30 และ 55 % โดยน้ำหนัก และที่อุณหภูมิ 70 °C

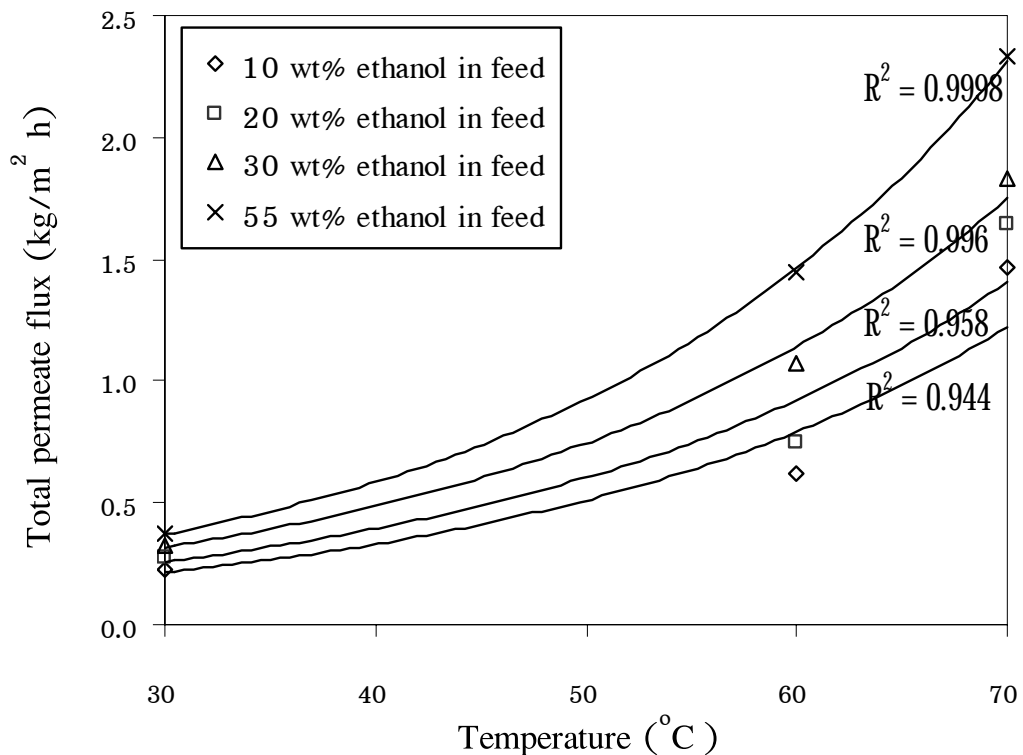


ภาพประกอบ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแยกของเอทานอลเทียบกับน้ำกับปริมาณซิลิโคน ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 10 20 30 และ 55 % โดยน้ำหนัก และที่อุณหภูมิ 70 °C

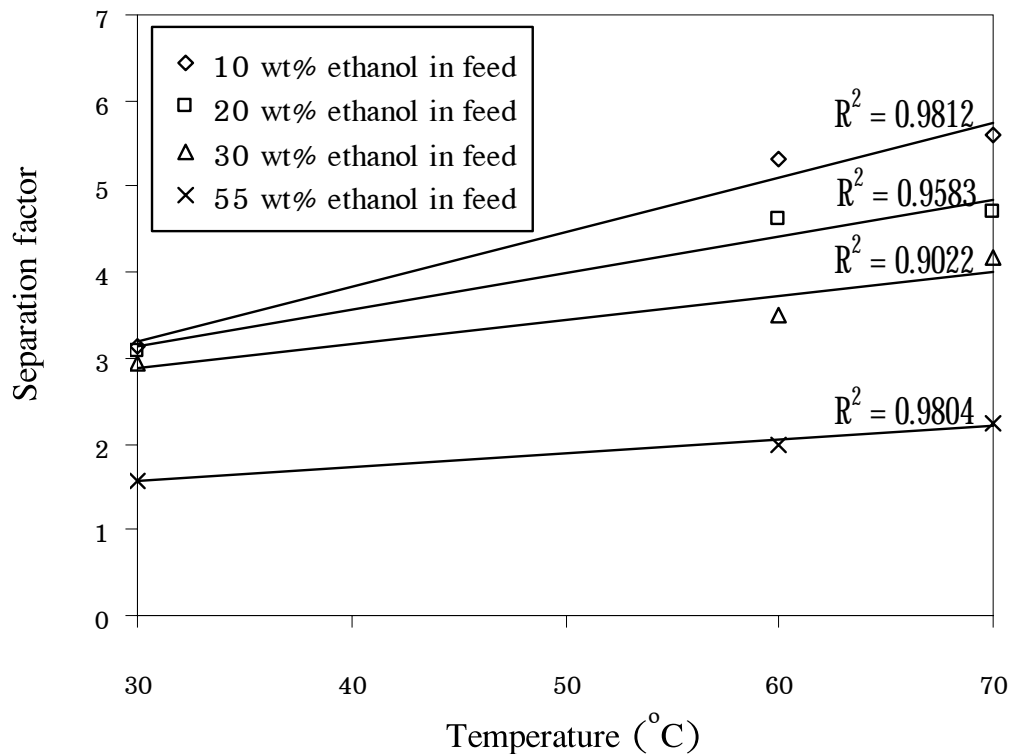
จะสามารถอธิบายได้ว่า เมมเบรนเชิงประกอบที่เคลือบด้วยปริมาณซิลิโคนน้อยกว่า (บางกว่า) มีความต้านทานของเมมเบรนน้อยกว่า จึงส่งผลทำให้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์สูงกว่าเมมเบรนที่เคลือบด้วยปริมาณซิลิโคนมากกว่า (หนากว่า) แต่ค่าการแยกของเมมเบรนลดลงเล็กน้อย ซึ่งสามารถอธิบายด้วยกลไกการละลายและการแพร่ กล่าวคือเมมเบรนชนิดนี้มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ซึ่งจะเลือกให้เอทานอลผ่านมากกว่าน้ำ เมื่อความหนาของชั้นซิลิโคนสูงขึ้นทำให้เส้นทางการแพร่ของสารที่สามารถผ่านเมมเบรนได้ยาวนานกว่า ส่งผลทำให้เมมเบรนมีความสามารถในการเลือกเอทานอลออกจากน้ำได้ดีกว่าเมมเบรนที่เคลือบด้วยปริมาณของซิลิโคนน้อยกว่า

### 3.2.2 ผลของอุณหภูมิของสารละลายป้อน

ผลของอุณหภูมิของสารละลายป้อนต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์รวมและความสามารถในการเลือกผ่านของเอทานอลเทียบกับน้ำ ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด 3 % โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone แสดงดังภาพประกอบ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 10 20 30 และ 55 % โดยน้ำหนัก



ภาพประกอบ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์รวมกับอุณหภูมิ ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 10 20 30 และ 55 % โดยน้ำหนัก ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด 3 % โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone



ภาพประกอบ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแยกของเอทานอลเทียบกับน้ำกับอุณหภูมิ ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 10 20 30 และ 55 % โดยน้ำหนัก ผ่านเมมเบรนชนิด 3 % โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone

พบว่าค่าเพอมีเอทพลั๊กซ์รวมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของสารละลายป้อนเพิ่มขึ้นในทุกความเข้มข้นของสารละลายป้อนที่ทำการศึกษา เนื่องจาก silicone เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous) และโครงสร้างนี้สามารถเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสายโซ่โมเลกุลของ silicone มีความสามารถเคลื่อนไหวได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดช่องว่าง (free volume) ภายในโมเลกุลมากขึ้น ทำให้ทั้งโมเลกุลของน้ำและเอทานอลสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้เร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองสำหรับการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำด้วยเมมเบรนชนิด 1060 Sulzer (Molina et al., 2002) และ PDMS (Li et al., 2004) สำหรับค่าการแยกของเอทานอลเทียบกับน้ำจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กัอุณหภูมิ กล่าวคือค่าการแยกของเอทานอลผ่านเมมเบรนชนิด 3 % โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จากปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าการแพร่และความสามารถขององค์ประกอบที่สามารถผ่านเมมเบรนขึ้นอยู่กัอุณหภูมิ และพฤติกรรมการแยกของเมมเบรนจะเปลี่ยนแปลงกัอุณหภูมิ

เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาพลอตกราฟตามสมการของอาเรเนียสซึ่งแสดงในสมการ (3.2)

$$J_i = J_0 \exp\left(\frac{-E_{J,i}}{RT}\right) \quad (3.2)$$

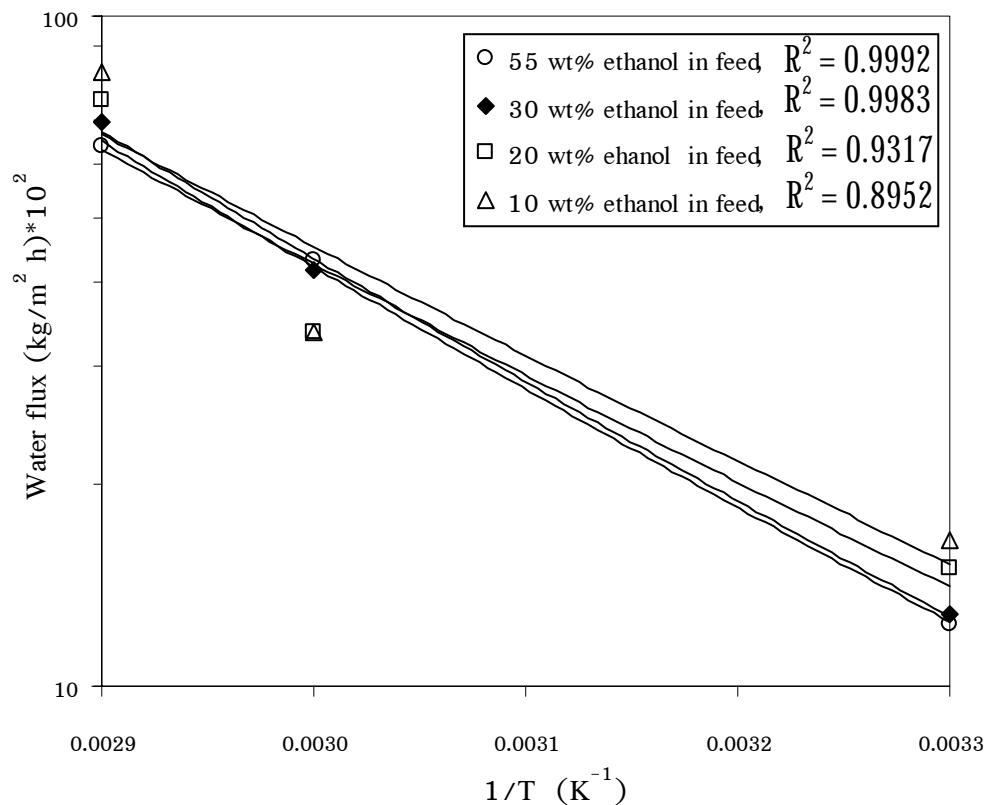
โดยที่  $E_{J,i}$  คือ พลังงานกระตุ้นของฟลักซ์ของสารชนิด  $i$ ,  $\text{kJ mol}^{-1}$

$J_0$  คือ ฟลักซ์แฟคเตอร์เบื้องต้น (pre-exponential factor),  $\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$

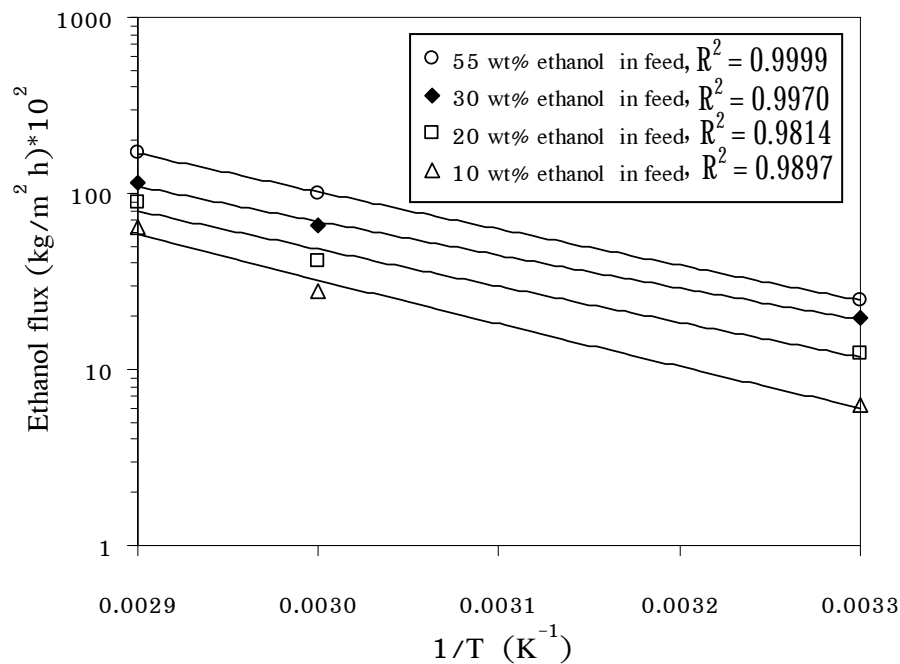
$R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส,  $8.314 \times 10^{-3} \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

$T$  คือ อุณหภูมิ,  $\text{K}$

จะได้กราฟเชิงเส้นซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของน้ำและฟลักซ์ของเอทานอลกับส่วนกลับของอุณหภูมิตามภาพประกอบ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ และสามารถคำนวณหาพลังงานกระตุ้นของเพอมีเอทซึ่งได้แก่ น้ำและเอทานอล จากความชันของกราฟที่พลอตตามสมการของอาเรเนียสได้ และผลจากการคำนวณแสดงในตาราง 3.2



ภาพประกอบ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์น้ำกับส่วนกลับของอุณหภูมิ ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 10 20 30 และ 55 %โดยน้ำหนัก ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด 3 %โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone



ภาพประกอบ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์เอทานอลกับส่วนกลับของอุณหภูมิ ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 10 20 30 และ 55 % โดยน้ำหนัก ผ่านเมมเบรนชนิด 3 % โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone

ตาราง 3.2 พลังงานกระตุ้น (activation energy) ของเพอมีเอทฟลักซ์ ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด 3 % โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone

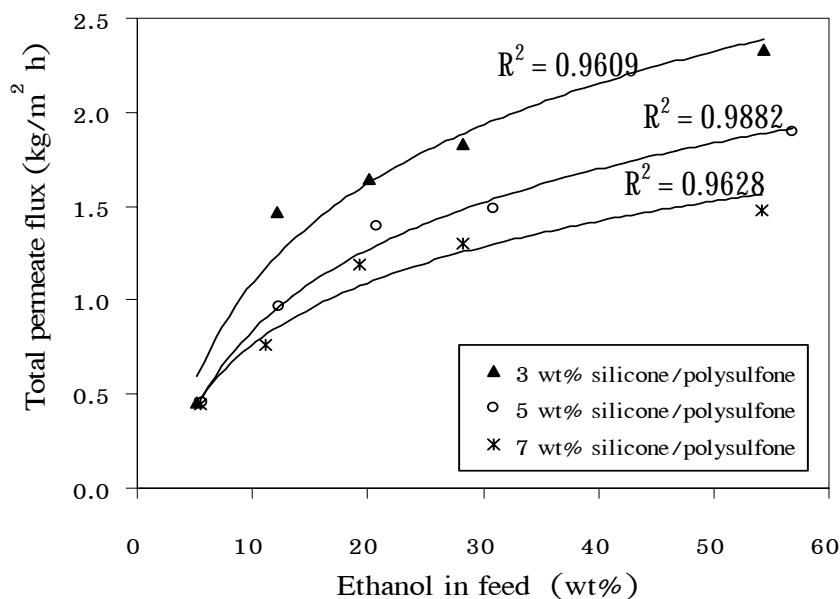
Ethanol in feed (wt%)	$E_{J,ethanol}$ (kJ mol <sup>-1</sup> )	$E_{J,water}$ (kJ mol <sup>-1</sup> )
10	46.60	32.40
20	39.43	32.97
30	35.92	36.64
55	39.53	36.33

ซึ่งพลังงานกระตุ้นของเอทานอลที่คำนวณได้จากการทดลองนี้มีค่าใกล้เคียงกับในรายงานการวิจัยฉบับอื่นๆ (Molina et al., 2002 และ Li et al., 2005) และจากตาราง 3.2 จะพบว่า  $E_{J,ethanol}$  จะลดลงตามความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าเอทานอลสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อพิจารณาความสามารถในการละลายดังแสดงในตาราง 3.3 จะพบว่าผลต่างของความสามารถในการละลายระหว่างเอทานอลกับเมมเบรนจะเท่ากับ 9.2 (MPa)<sup>1/2</sup> ซึ่งน้อยกว่าผลต่างของความสามารถในการละลายระหว่างน้ำกับเมมเบรนซึ่งเท่ากับ 31 (MPa)<sup>1/2</sup> ดังนั้น

โมเลกุลของเอทานอลจะสามารถละลายและถูกดูดซับบนผิวของเมมเบรนได้มากกว่าน้ำ และ Mohammadi et al. (2005) ได้ทำการศึกษาการบวมตัวของเมมเบรนชนิด silicone (PDMS) พบว่าเมมเบรนจะบวมตัวมากขึ้นเมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นของเอทานอลสูง ส่งผลทำให้ทั้งโมเลกุลของเอทานอลและน้ำสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้ง่ายขึ้น จึงเป็นเหตุผลทำให้  $E_{J,ethanol}$  ลดลงแต่เมื่อพิจารณาค่า  $E_{J,water}$  พบว่าจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงความเข้มข้นของเอทานอล 10-30 % โดยน้ำหนัก หลังจากนั้น  $E_{J,water}$  ลดลงเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนสูงมากกว่า 30 % อาจเป็นผลเนื่องมาจากการที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนสูงขึ้น เอทานอลสามารถทำให้สายโซ่โมเลกุลของ silicone เกิดการเคลื่อนไหวมากขึ้น ส่งผลทำให้น้ำแพร่ผ่านเมมเบรนได้ง่ายขึ้น จึงทำให้  $E_{J,water}$  ลดลงเล็กน้อย แต่เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลต่ำกว่า 30% การเกิดการเคลื่อนไหวของสายโซ่ silicone โดยเอทานอลมีเพียงเล็กน้อย ดังนั้นการแพร่ของน้ำในเมมเบรนมีผลมาจากการเพิ่มอุณหภูมิ กล่าวคือการเพิ่มอุณหภูมิจะมีผลทำให้โครงสร้างสัณฐานของ silicone เกิดช่องว่างมากขึ้น เป็นผลทำให้น้ำสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้ง่ายมากขึ้นจึงทำให้  $E_{J,water}$  เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนต่ำกว่า 30 %

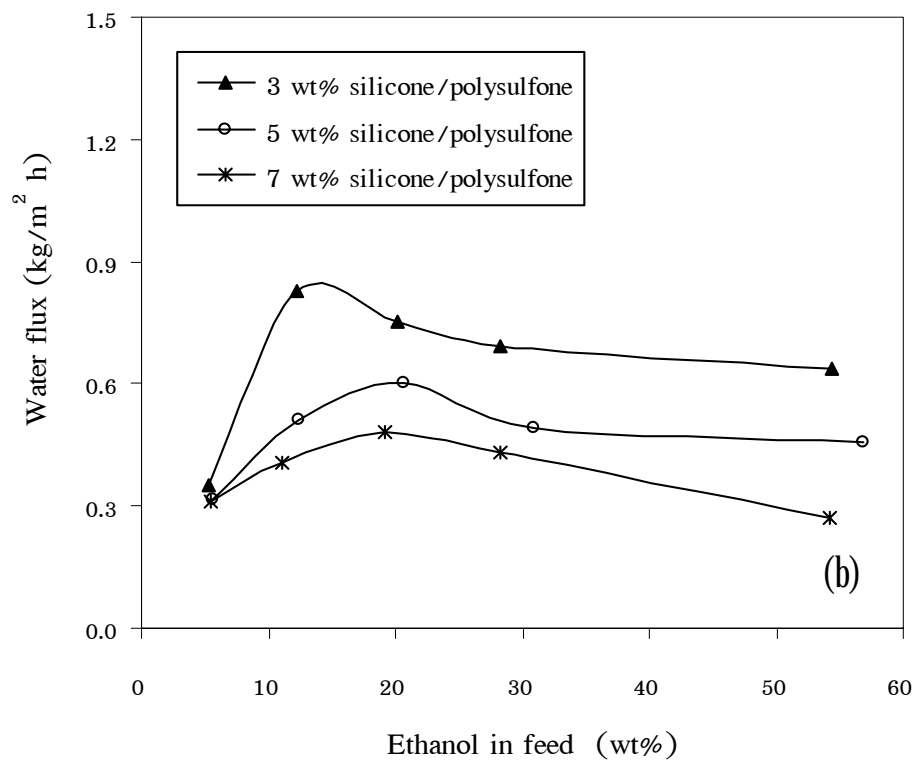
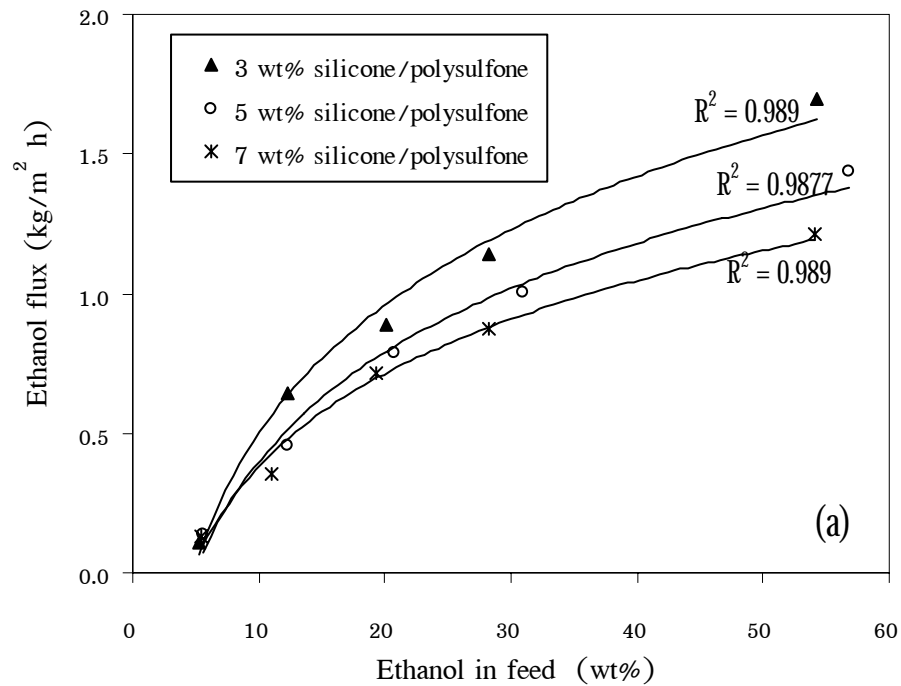
### 3.2.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายป้อน

ผลของความเข้มข้นของสารละลายป้อนต่อเพอมีเอทฟลักซ์รวม ฟลักซ์เอทานอล ฟลักซ์น้ำ และค่าการแยกของเอทานอลเทียบกับน้ำ แสดงดังภาพประกอบ 3.8 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 70 °C ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด 3 5 และ 7 % โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone



ภาพประกอบ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์รวมกับความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 70 °C ผ่านเมมเบรนชนิด 3 5 และ 7 % โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone





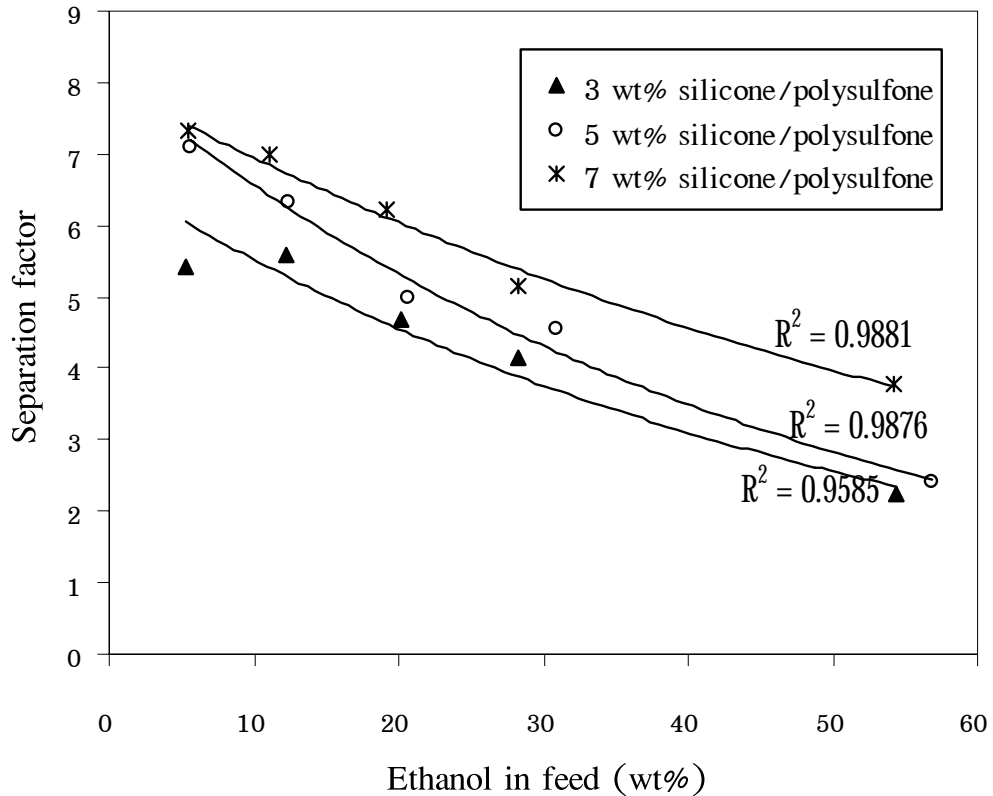
ภาพประกอบ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ฟลักซ์เอทานอลและ (b) ฟลักซ์น้ำกับความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 70 °C ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด 3 5 และ 7 %โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone

พบว่าค่าพหุคูณเอกพจน์สูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนเพิ่มขึ้น แต่ค่าการแยกมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองสำหรับการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำด้วยเมมเบรนเชิงประกอบชนิด PDMS (Chang et al., 2004) เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนสูง ทำให้แอกติวิตีของเอทานอลก็เพิ่มขึ้นด้วย ทำให้เกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างโมเลกุลของเอทานอลกับเมมเบรน ส่งผลทำให้เมมเบรนดูดซับโมเลกุลของเอทานอลได้มาก จึงเกิดการบวมตัวของเมมเบรนขึ้น และเนื่องจากความเข้มข้นของเอทานอลในเมมเบรนเพิ่มขึ้น จึงทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของเอทานอลในเมมเบรนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่งผลทำให้ฟลักซ์เอทานอลสูงขึ้นดังแสดงในภาพประกอบ 3.9 (a) และเมื่อพิจารณาฟลักซ์น้ำดังแสดงในภาพประกอบ 3.9 (b) จะพบว่าฟลักซ์ของน้ำจะค่อย ๆ สูงขึ้นในช่วงความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 5-20 %โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นฟลักซ์ของน้ำมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนสูงขึ้น เนื่องจากการที่เมมเบรนเกิดการบวมตัวเมื่อปริมาณเอทานอลในสารละลายป้อนสูง และ Shah et al. (2000) ได้ทำการศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโมเลกุลของเอทานอล ซึ่งพบว่าเอทานอลมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าโมเลกุลของน้ำดังแสดงในตาราง 3.3 จึงส่งผลทำให้น้ำซึ่งมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้ง่ายขึ้นด้วยเมื่อเมมเบรนเกิดการบวมตัว จึงส่งผลทำให้ฟลักซ์ของน้ำเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของเอทานอลในช่วง 5-20 %โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นช่วงความเข้มข้นที่มีปริมาณในสารละลายป้อนสูง แต่เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนสูงขึ้นไป (สูงกว่า 20 %โดยน้ำหนัก) นั่นคือปริมาณน้ำในสารละลายป้อนมีค่าลดลง เอทานอลสามารถละลายและถูกเมมเบรนดูดซับได้มาก ส่งผลทำให้เอทานอลสามารถแพร่ผ่านในเมมเบรนได้ดีกว่าการแพร่ผ่านของน้ำ จึงส่งผลทำให้ฟลักซ์ของน้ำลดลง ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนมากกว่า 20 %โดยน้ำหนัก และเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนสูง เอทานอลสามารถทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ในเมมเบรนเกิดการเคลื่อนไหวมากขึ้น ทำให้เกิดช่องว่างในเมมเบรนขึ้น (plasticizing effect) ทำให้น้ำสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้ง่ายขึ้นด้วย จึงเป็นเหตุผลค่าการแยกของเอทานอลลดลงดังแสดงในภาพประกอบ 3.10

ตาราง 3.3 คุณสมบัติของตัวทำละลาย (solvent properties)

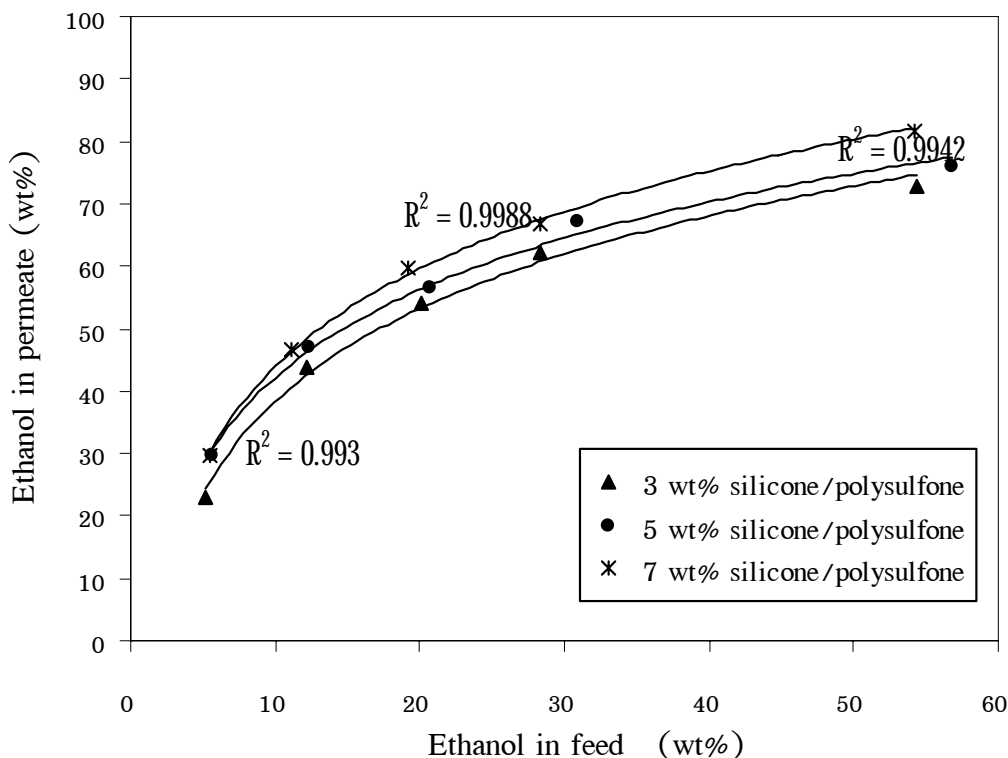
Solvent	Molecular diameter (nm)	Solubility parameter <sup>b</sup> (MPa) <sup>1/2</sup>
ethanol	0.52 <sup>a</sup>	26.2
water	0.26	48
silicone	-	17

ที่มา: <sup>a</sup>Shah et al., 2000, <sup>b</sup>Burke, 1984



ภาพประกอบ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแยกของเอทานอลเทียบกับน้ำกับความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 70 °C ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด 3 5 และ 7 %โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone

ความเข้มข้นของเอทานอลในเฟอมีเอทจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนดังแสดงในภาพประกอบ 3.11 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนสูงขึ้น ความเข้มข้นของเอทานอลในเฟอมีเอทจะสูงขึ้นด้วย (บริสุทธิ์มากขึ้น) ในทุกความเข้มข้นที่ทำการทดลอง และเมื่อพิจารณาความชันจากภาพประกอบ 3.11 จะพบว่าความชันของกราฟจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนต่ำๆ (สารละลายเอทานอลเจือจาง) และความชันของกราฟจะค่อยๆ ลดลงเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดนี้เหมาะสำหรับการแยกเอทานอลออกจากสารละลายเอทานอลเจือจาง (Seok et al., 1987)

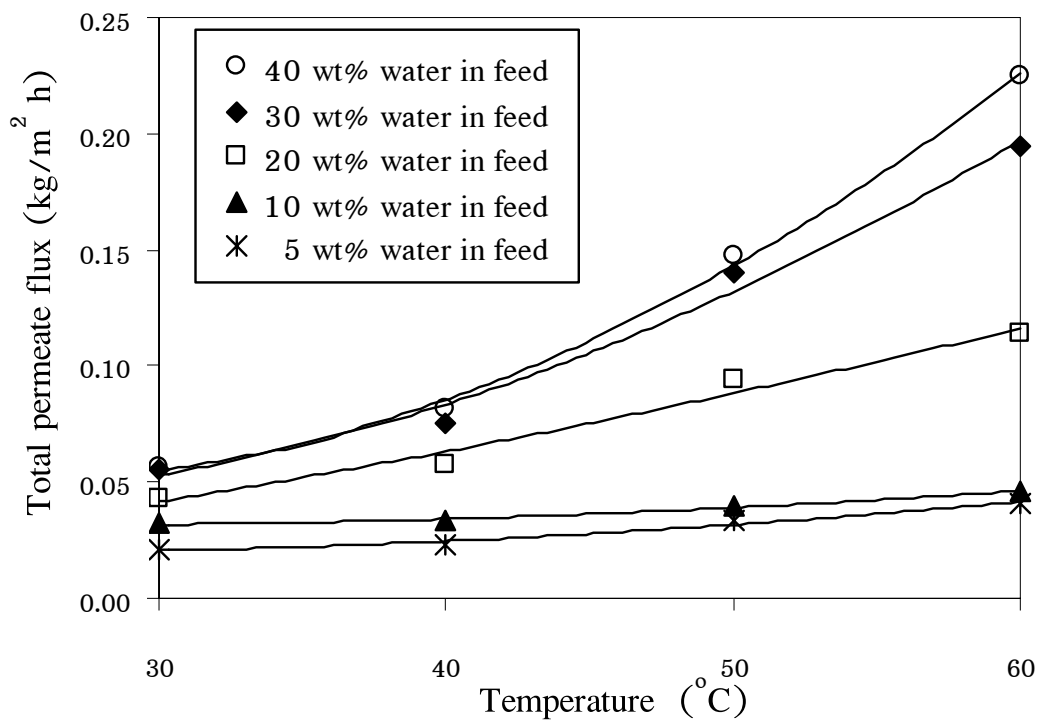


ภาพประกอบ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเอทานอลในเพอมีเอทกับความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 70 °C ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด silicone/polysulfone

### 3.3 กระบวนการเพอเวปพอเรชั่นของสารละลายเอทานอล-น้ำ ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol

#### 3.3.1 ผลของอุณหภูมิของสารละลายป้อน

ผลของอุณหภูมิของสารละลายป้อนต่อเพอมีเอทฟลักซ์รวม ฟลักซ์น้ำ ฟลักซ์เอทานอลและความสามารถในการเลือกผ่านของน้ำ ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol แสดงดังภาพประกอบ 3.12 3.13 และ 3.14 ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5 10 20 30 และ 40 % โดยน้ำหนัก พบว่าเพอมีเอทฟลักซ์รวม ฟลักซ์น้ำและฟลักซ์เอทานอลจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิของสารละลายป้อนเพิ่มขึ้นในทุกความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน แต่ค่าการแยกลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองสำหรับการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำด้วยเมมเบรนชนิด CS/HEC (Jiratananon et al., 2002) และ PVA-PAA (Vauclair et al., 1997)



ภาพประกอบ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์รวมกับอุณหภูมิที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5 10 20 30 และ 40 % โดยน้ำหนัก ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol

การเพิ่มขึ้นของเพอมีเอทฟลักซ์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สามารถอธิบายได้ตามนิยามของอาเรเนียส ซึ่งแสดงดังสมการ (3.2) (Feng และ Huang, 1996) และเนื่องจากค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทผ่านเมมเบรนสามารถพิจารณาได้โดยทั้งความสามารถในการละลาย (solubility) และการแพร่ (diffusivity) ของเพอมีเอท ดังนั้นค่าเพอมีเอทฟลักซ์จึงขึ้นอยู่กับทั้งพลังงานกระตุ้นของการแพร่ผ่านเมมเบรนในขั้นตอนการแพร่และความร้อนของการดูดซับ (sorption) ซึ่งแสดงตามสมการ (3.3) และ (3.4)

$$E_{P,i} = E_{J,i} - \Delta H_{v,i} \quad (3.3)$$

$$E_{P,i} = E_{D,i} + \Delta H_{S,i} \quad (3.4)$$

โดยที่  $E_{P,i}$  คือ พลังงานกระตุ้นของการซึมผ่านของสาร  $i$  ผ่านเมมเบรน,  $\text{kJ mol}^{-1}$

$E_{J,i}$  คือ พลังงานกระตุ้นของฟลักซ์ของสาร  $i$  ผ่านเมมเบรน,  $\text{kJ mol}^{-1}$

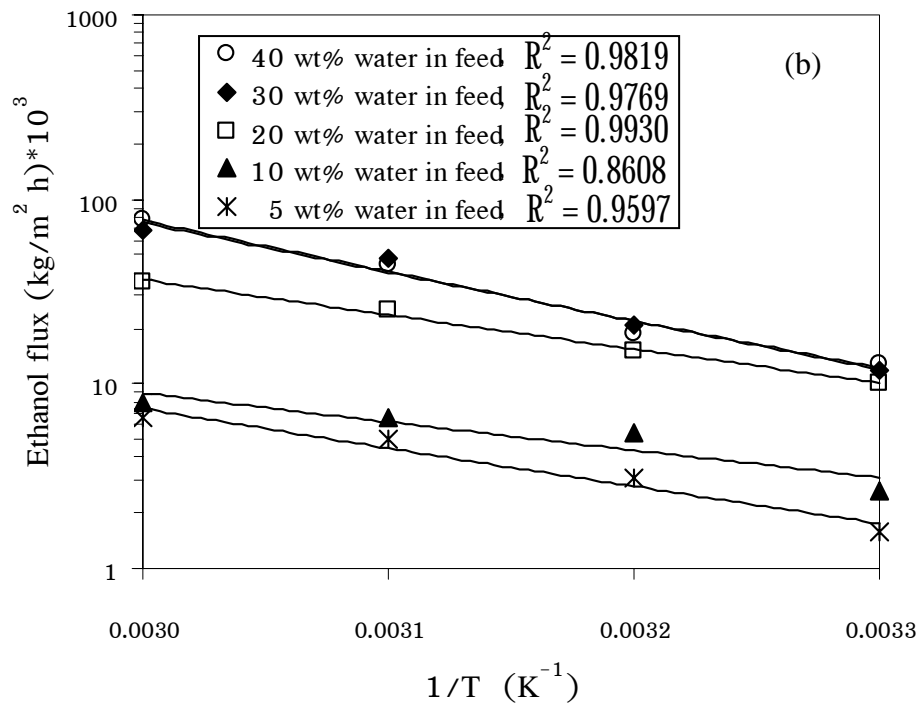
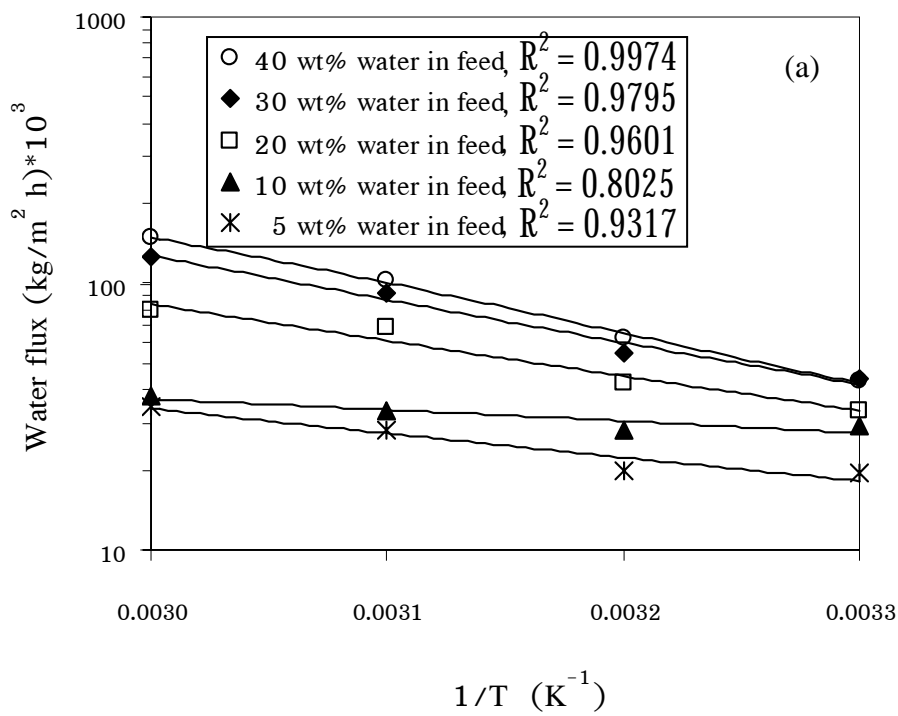
$E_{D,i}$  คือ พลังงานกระตุ้นของการแพร่ของสาร  $i$  ในเมมเบรน,  $\text{kJ mol}^{-1}$

$\Delta H_{v,i}$  คือ ความร้อนของการระเหยกลายเป็นไอของสาร  $i$  ในเมมเบรน,  $\text{kJ mol}^{-1}$   
 $\Delta H_{S,i}$  คือ เอนโทรปีของการดูดซับของสาร  $i$  ในเมมเบรน,  $\text{kJ mol}^{-1}$

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาพลอตกราฟตามสมการของอาเรเนียส จะได้กราฟเชิงเส้น แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของน้ำและฟลักซ์ของเอทานอลกับส่วนกลับของอุณหภูมิ ซึ่งแสดงในภาพประกอบ 3.13 (a) และ (b) ตามลำดับ และสามารถคำนวณหาพลังงานกระตุ้นของเพอมีเอท ซึ่งได้แก่ น้ำและเอทานอล จากความชันของกราฟที่พลอตตามสมการของอาเรเนียสได้ และผลจากการคำนวณแสดงในตาราง 3.4 ซึ่งจากตารางพบว่า  $E_{J,ethanol}$  สูงกว่า  $E_{J,water}$  ในทุกความเข้มข้นที่ทำการศึกษา แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดนี้เลือกให้น้ำผ่านมากกว่าเอทานอล เนื่องจากอะฟินิตี (affinity) ระหว่างน้ำกับเมมเบรนมีมากกว่าระหว่างเอทานอลกับเมมเบรน สำหรับการเพิ่มขึ้นของ  $E_{J,water}$  ตามปริมาณน้ำในสารละลายป้อน เนื่องจากที่ปริมาณน้ำในสารละลายป้อนสูงจะมีการรวมกลุ่มระหว่างน้ำ-น้ำสูง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะสามารถทำให้ปริมาณการรวมกลุ่มของน้ำลดลงและเป็นผลให้น้ำสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้สูงขึ้น ดังนั้นที่ปริมาณน้ำในสารละลายป้อนสูง เพอมีเอทฟลักซ์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นอย่างมาก จึงเป็นเหตุผลทำให้  $E_{J,water}$  สูงขึ้นตามปริมาณน้ำในสารละลายป้อน ซึ่งผลจากการคำนวณสอดคล้องกับรายงานวิจัยสำหรับการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำด้วยเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol (Huang et al., 1990) และ CS/HEC (Jiratananon et al., 2002)

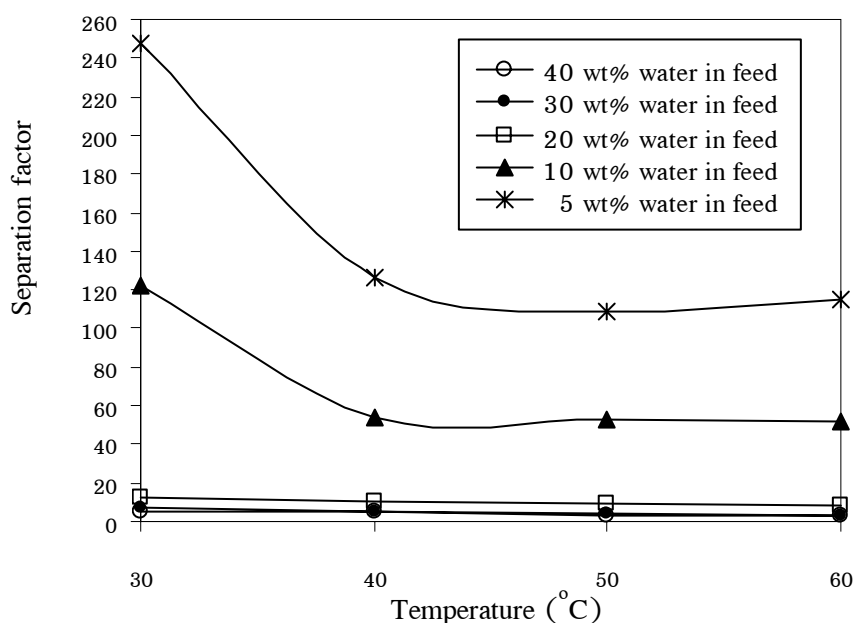
ตาราง 3.4 พลังงานกระตุ้น (activation energy) ของเพอมีเอทฟลักซ์ ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol

Water in feed (wt%)	$E_{J,water}$ ( $\text{kJ mol}^{-1}$ )	$E_{J,ethanol}$ ( $\text{kJ mol}^{-1}$ )
5	15.85	32.20
10	8.17	29.19
20	26.43	35.54
30	32.09	50.19
40	36.19	49.54



ภาพประกอบ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ฟลักซ์น้ำ (b) ฟลักซ์เอทานอลกับส่วนกลับของอุณหภูมิ ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5 10 20 30 และ 40 % โดยน้ำหนัก ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol

เนื่องจากเอทานอลสามารถเคลื่อนที่ผ่านส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และส่วนที่เป็นโครงสร้างออสัณฐานของเมมเบรน ซึ่งฟลักซ์ของเอทานอลจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ในเมมเบรนเป็นอย่างมาก ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิสามารถเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนไหวของพอลิเมอร์ในเมมเบรน ส่งผลทำให้ค่าฟลักซ์ของเอทานอลเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของสารละลายป้อนที่สูงขึ้น และยังพบว่าฟลักซ์ของเอทานอลจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิมากกว่าฟลักซ์ของน้ำ

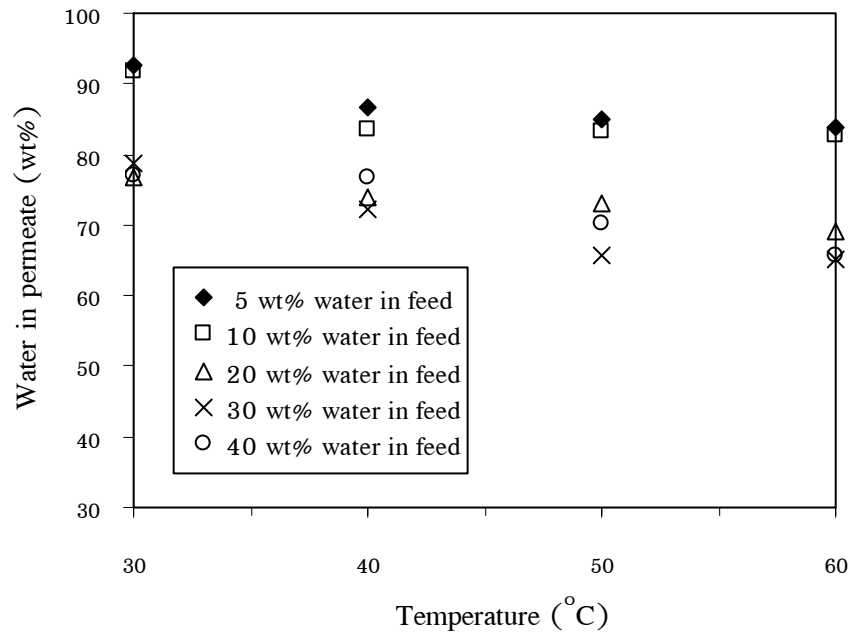


ภาพประกอบ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแยกของน้ำเทียบกับเอทานอลกับอุณหภูมิ ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5 10 20 30 และ 40 %โดยน้ำหนัก ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol

สำหรับที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนต่ำๆ น้ำมีผลทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ในเมมเบรนเคลื่อนไหวได้น้อยมาก ดังนั้นการเพิ่มของอุณหภูมิสามารถทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ในเมมเบรนเคลื่อนไหวได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลทำให้เอทานอลผ่านเมมเบรนเพิ่มมากขึ้น และการที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนสูงๆ น้ำสามารถเกิด plasticizing effect กับเมมเบรน ส่งผลทำให้เอทานอลในสารละลายสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้ง่ายขึ้นด้วย แต่ในช่วงความเข้มข้นที่ศึกษา คือมีปริมาณน้ำ 5-40 %โดยน้ำหนัก ผลของการเกิด plasticizing effect โดยน้ำอาจมีเพียงเล็กน้อย ดังนั้นฟลักซ์ของเอทานอลจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิมากกว่า และเมื่อปริมาณน้ำในสารละลายป้อนสูง (ปริมาณเอทานอลในสารละลายป้อนลดลง) ดังนั้นการที่เอทานอลจะสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้นั้นจำเป็นจะต้องใช้พลังงานสูงขึ้น ( $E_{J,ethanol}$  สูงขึ้น) ตามปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น และเนื่องจากเอทานอลสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้



สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จึงเป็นผลทำให้ให้ค่าการแยกต่อน้ำของเมมเบรนลดลงดังแสดงในภาพประกอบ 3.14



ภาพประกอบ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำในเฟอมีเอทกับอุณหภูมิ ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5 10 20 30 50 %โดยน้ำหนัก ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol

สำหรับผลของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นของน้ำในเฟอมีเอท ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5 10 20 30 และ 40 %โดยน้ำหนัก แสดงในภาพประกอบ 3.15 จะพบว่าความเข้มข้นของน้ำในเฟอมีเอทจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (3.5) (Vauclair et al., 1997)

$$y_{water} = \frac{J_{O,water}}{J_{O,water} + J_{O,ethanol} \exp\left(E_{J,water} - E_{J,ethanol} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o}\right)\right)} \quad (3.5)$$

โดยที่  $y_{water}$  คือ เศษส่วนเชิงมวลของน้ำในเฟอมีเอท

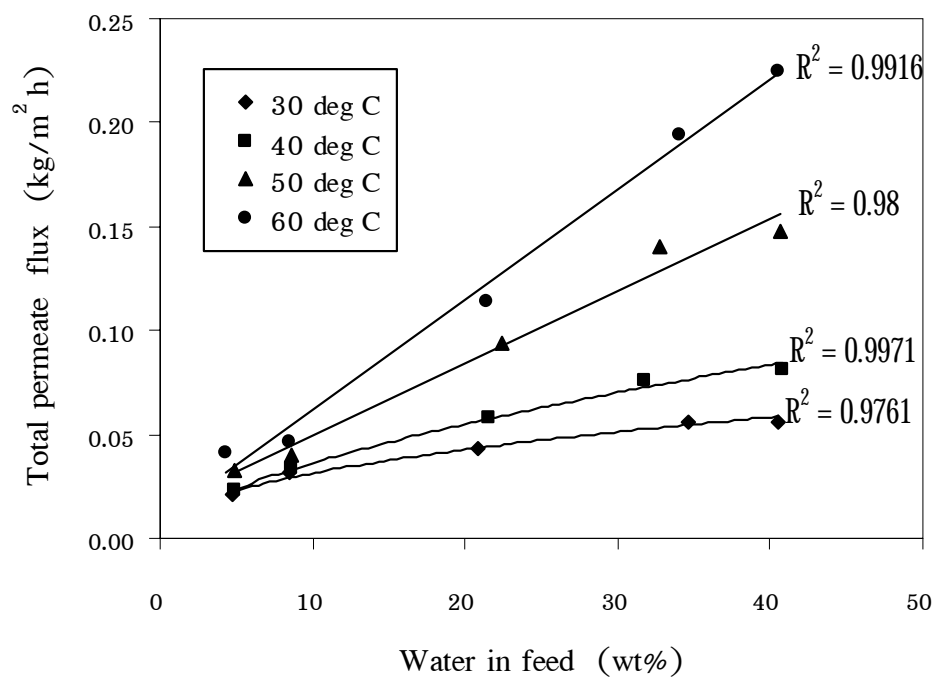
$J_{O,water}$  คือ ฟลักซ์ของน้ำที่อุณหภูมิ  $T_o$ ,  $\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$

$J_{O,ethanol}$  คือ ฟลักซ์ของเอทานอลที่อุณหภูมิ  $T_o$ ,  $\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$

เนื่องจาก  $E_{J,water}$  น้อยกว่า  $E_{J,ethanol}$  ซึ่งเหตุผลได้มีการอธิบายมาก่อนหน้านี้แล้ว การเพิ่มอุณหภูมิจะมีผลทำให้ความเข้มข้นของน้ำในเฟอมีเอทลดลงอย่างมีนัยสำคัญและมีผลเป็นอย่างมากเนื่องจากมีความแตกต่างของ  $E_{J,water} - E_{J,ethanol}$  มากกว่า

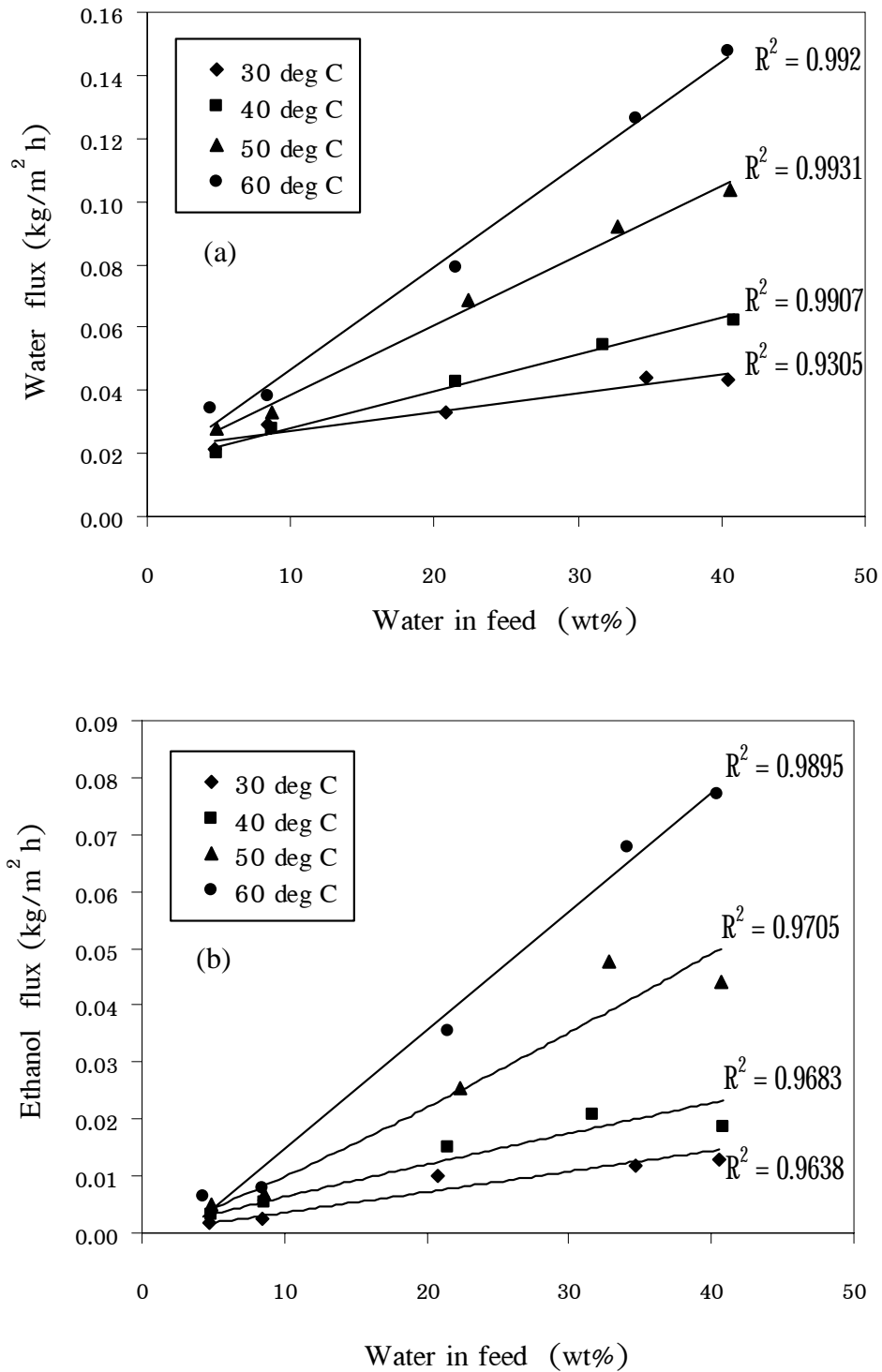
### 3.3.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายป้อน

ผลของความเข้มข้นของสารละลายป้อนต่อเพอมีเอทฟลักซ์รวม ฟลักซ์น้ำ ฟลักซ์เอทานอล และค่าการแยกของน้ำเทียบกับเอทานอล แสดงดังภาพประกอบ 3.16 3.17 และ 3.18 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 30 40 50 และ 60 °C ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol พบว่าเมื่อความเข้มข้นน้ำในสารละลายป้อนสูงขึ้น ค่าเพอมีเอทฟลักซ์จะสูงขึ้นแต่ค่าการแยกลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองสำหรับการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำด้วยเมมเบรนชนิด PVA/PAN (Baelen et al., 2005)

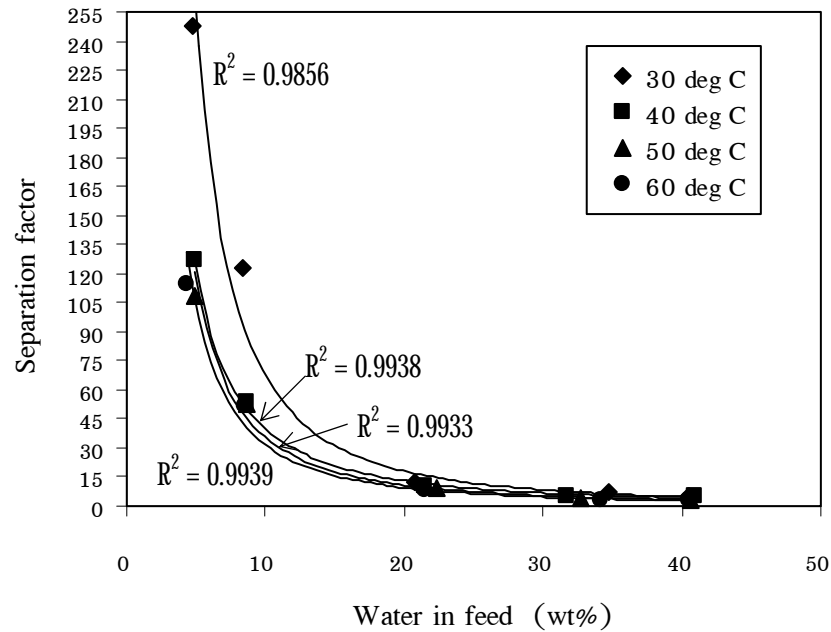


ภาพประกอบ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์รวมกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 30 40 50 และ 60 °C ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol

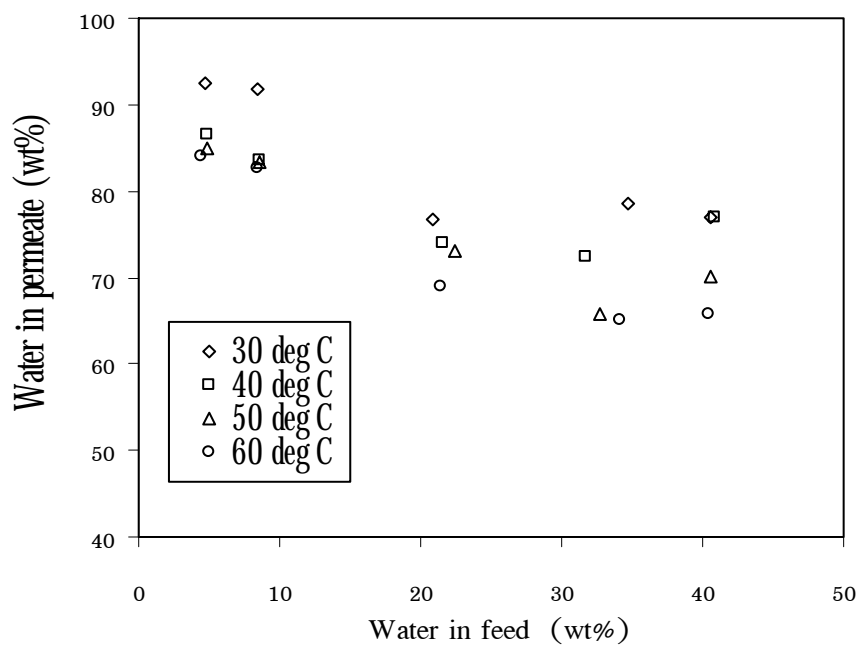
เนื่องจากเมมเบรนชนิดนี้มีคุณสมบัติความชอบน้ำ (hydrophilic) เมมเบรนจะเลือกให้น้ำผ่านมากกว่าเอทานอล เมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนสูงค่าแอกติวิตีของน้ำก็เพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลทำให้เมมเบรนดูดซับโมเลกุลของน้ำได้มาก จึงทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเมมเบรนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทำให้ค่าฟลักซ์ของน้ำสูงขึ้น และเมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารละลายเพิ่มขึ้นจะทำให้เมมเบรนเกิดการบวมตัวขึ้นและน้ำสามารถเกิดการคู่ควบ (coupling effect) กับเอทานอลด้วยพันธะไฮโดรเจนก็จะพาโมเลกุลของเอทานอลให้ผ่านเมมเบรนได้เพิ่มขึ้นด้วย จึงส่งผลทำให้ค่าการแยกมีค่าลดลง



ภาพประกอบ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ฟลักซ์น้ำและ (b) ฟลักซ์เอทานอลกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 30 40 50 และ 60 °C ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol



ภาพประกอบ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแยกของน้ำเทียบกับเอทานอลกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 30 40 50 และ 60 °C ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol



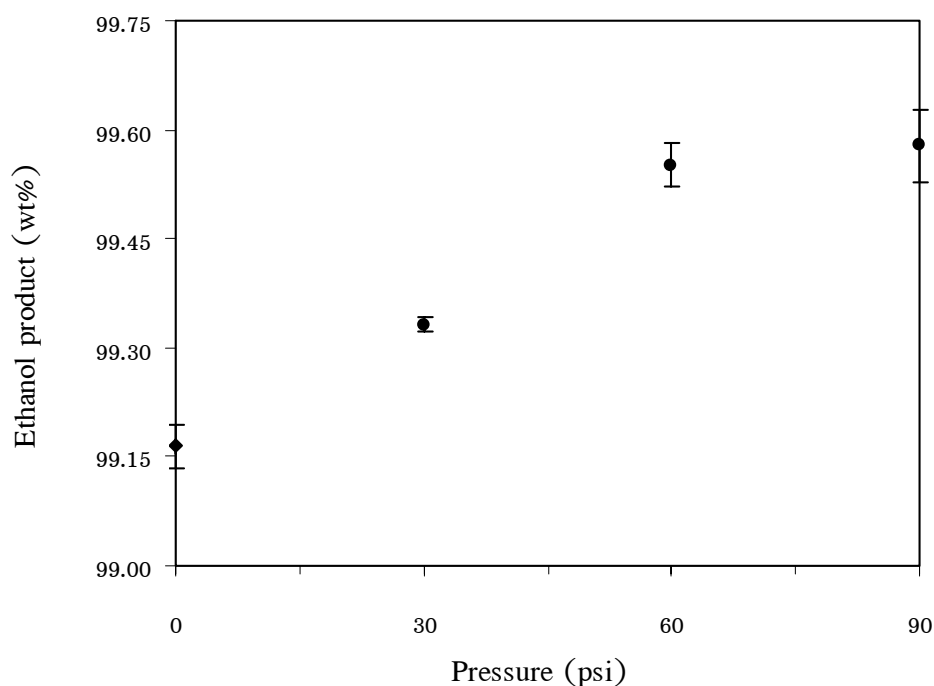
ภาพประกอบ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำในเพอเมตกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 30 40 50 และ 60 °C ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol

ความเข้มข้นของน้ำในเพอมีเอทจะแปรผกผันกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนดังแสดงในภาพประกอบ 3.19 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนสูงขึ้น ความเข้มข้นของน้ำในเพอมีเอทจะมีค่าลดลงในทุกความเข้มข้นและอุณหภูมิที่ทำการศึกษา อาจเป็นผลเนื่องมาจากค่าการแยกมีค่าลดลงตามความเข้มข้นของน้ำในสารป้อนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 3.18 แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดนี้เหมาะสำหรับการแยกน้ำออกจากการละลายเอทานอลเข้มข้น

### 3.4 กระบวนการดูดซับของสารละลายเอทานอล-น้ำด้วย **molecular sieve** ชนิด 3<sup>o</sup>A zeolite

#### 3.4.1 ผลของความดัน

ผลของความดันต่อความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลหลังจากผ่านการดูดซับในวัฏภาคของเหลวแสดงดังภาพประกอบ 3.20 ที่อุณหภูมิ  $27.8 \pm 1.7$  °C เวลาในการดูดซับ 45 นาที และความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน  $91.61 \pm 0.17$  %โดยน้ำหนัก

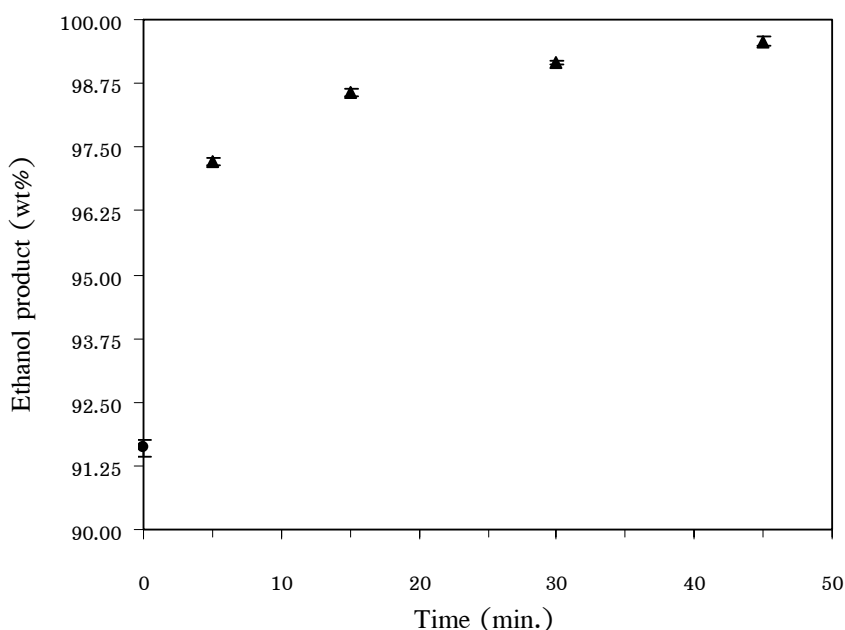


ภาพประกอบ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเอทานอลหลังจากผ่านการดูดซับกับความดันที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน  $91.61 \pm 0.17$  %โดยน้ำหนัก เวลาในการดูดซับ 45 นาที

พบว่าเมื่อความดันสูงขึ้น 90 psi จะส่งผลทำให้ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลสูงขึ้นเล็กน้อยคือ สูงขึ้นประมาณ 0.41 %โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าในกระบวนการดูดซับสำหรับสารละลายเอทานอลในวัฏภาคของเหลว ความดันจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับเพียงเล็กน้อย และจากผลการทดลองพบว่าที่ความดัน 90 psi จะให้ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลหลังจากผ่านการดูดซับสูงสุดที่สุด คือ 99.58 %โดยน้ำหนัก

### 3.4.2 ผลของเวลาของการดูดซับ

ผลของเวลาของการดูดซับต่อความเข้มข้นของเอทานอลหลังจากผ่านการดูดซับที่อุณหภูมิ  $27.8 \pm 1.7$  °C ความดัน 90 psi และความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน  $91.61 \pm 0.17$  %โดยน้ำหนัก แสดงดังภาพประกอบ 3.21 พบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการดูดซับนานขึ้น ความเข้มข้นของเอทานอลหลังจากผ่านการดูดซับจะสูงขึ้น และแนวโน้มของความเข้มข้นค่อยๆ สูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5 นาทีแรกของการดูดซับ และหลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างคงที่ อาจเนื่องมาจากในช่วง 5 นาทีแรกของการดูดซับ ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของน้ำในสารละลายเอทานอลได้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นปริมาณน้ำค่อยๆ ลดลง กล่าวคือเอทานอลมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น ทำให้โมเลกุลของน้ำแพร่ผ่านเข้าไปยังช่องว่างรูพรุนของ molecular sieve ชนิด 3<sup>o</sup>A zeolite ได้ค่อนข้างยากขึ้นเมื่อเทียบกับในช่วง 5 นาทีแรกของการทดลอง นั่นคือโมเลกุลของน้ำจะถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับค่อนข้างคงที่เมื่อเทียบกับเวลา



ภาพประกอบ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเอทานอลหลังจากผ่านกระบวนการดูดซับกับเวลาของการดูดซับ ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน  $91.61 \pm 0.17$  %โดยน้ำหนัก ความดัน 90 psi