สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(11)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 การตรวจเอกสาร	4
1.2.1 เอทานอล (ethanol) หรือเอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol)	4
1.2.2 กระบวนการเมมเบรนแบบเพอแวปพอเรชัน	7
1.2.3 ข้อดีของกระบวนการเมมเบรนแบบเพอแวปพอเรชัน	11
1.2.4 ข้อจำกัดของกระบวนการเมมเบรนแบบเพอแวปพอเรชัน	12
1.2.5 วัสดุสำหรับผลิตเมมเบรน	13
1.2.6 เมมเบรนสังเคราะห์ที่ใช้สำหรับกระบวนการเพอแวปพอเรชัน	15
1.2.7 วิธีการผลิตเมมเบรนสังเคราะห์แบบเนื้อแน่น	19
1.2.8 อุปกรณ์เมมเบรน (membrane module)	19
1.2.9 การนำระบบเพอแวปพอเรชันไปประยุกต์ใช้งาน	24
1.2.10 กระบวนการดูดซับ (adsorption)	33
1.3 วัตถุประสงค์	35
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	35
2 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ	36
2.1 วัสดุ	36
2.2 อุปกรณ์	36
2.3 วิธีการวิจัย	39
3 ผลการทดลองและบทวิจารณ์	44
3.1 อิเล็กตรอนไมโครกราฟของเมมเบรนเชิงประกอบชนิด silicone/polysulfone	44
3.2 กระบวนการเพอแวปพอเรชันของสารละลายเอทานอล-น้ำ ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด silicone/polysulfone	45
3.3 กระบวนการเพอแวปพอเรชันของสารละลายเอทานอล-น้ำ ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 กระบวนการดูดซับของสารละลายเอทานอล-น้ำด้วย molecular sieve ชนิด 3 ^{0}A zeolite	63
4 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	66
4.1 บทสรุป	66
4.2 ข้อเสนอแนะ	67
บรรณานุกรม	68
ภาคผนวก	73
ก วิธีการวิเคราะห์	74
ข กราฟมาตรฐานสำหรับสารละลายเอทานอล-น้ำ	79
ค ข้อมูลการทดลอง	80
ตัวอย่างการคำนวณ	91
ประวัติผู้เขียน	95

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	พอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในการผลิตเมมเบรนสำหรับกระบวนการเพอแวปพอเรชัน	14
1.2	ประสิทธิภาพของเมมเบรนแบบชอบน้ำ (hydrophilic) ที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล–น้ำโดยกระบวนการเพอแวปพอเรชัน	17
1.3	ประสิทธิภาพของเมมเบรนแบบไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ที่ใช้ในการแยกสารละลายอินทรีย์–น้ำโดยกระบวนการเพอแวปพอเรชัน	18
1.4	บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์เมมเบรนแบบต่าง ๆ เพื่อใช้งานสำหรับเพอแวปพอเรชัน	21
1.5	การเปรียบเทียบคุณลักษณะของอุปกรณ์เมมเบรนทั้ง 4 แบบ	23
1.6	การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเอทานอลสำหรับโรงงานการผลิตเอทานอลเข้มข้น 99.5 %โดยน้ำหนัก ซึ่งมีกำลังการผลิต 1 m^3/day	27
1.7	การแยกน้ำออกจากตัวทำละลายต่าง ๆ ด้วยกระบวนการเพอแวปพอเรชัน	28
1.8	ตัวอย่างการใช้งานเพอแวปพอเรชันสำหรับแยกของผสมอินทรีย์	30
1.9	สารเคมีที่ได้จากการแยกหรือสามารถทำให้บริสุทธิ์โดยวิธีเพอแวปพอเรชัน	30
2.1	คุณสมบัติทางกายภาพของ molecular sieve ชนิด 3 °A zeolite	39
2.2	ปริมาตรของเอทานอลและน้ำสำหรับเตรียมสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ สำหรับทดลองเพอแวปพอเรชัน	40
3.1	ความหนาของชั้นซิลิโคนสำหรับเมมเบรนเชิงประกอบ silicone/polysulfone ที่เคลือบด้วยปริมาณซิลิโคนร้อยละ 3 5 และ 7 โดยน้ำหนัก	45
3.2	พลังงานกระตุ้น (activation energy) ของเพอมิเอทฟลักซ์ ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบ 3 %โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone	50
3.3	คุณสมบัติของตัวทำละลาย (solvent properties)	53
3.4	พลังงานกระตุ้น (activation energy) ของเพอมิเอทฟลักซ์ ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol	57
ก.1	น้ำหนักของเอทานอลและน้ำที่ความเข้มข้นต่าง ๆ สำหรับเตรียมสารละลายมาตรฐาน	74
ก.2	สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟฟี	75
ก.3	ปริมาณสารตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Karl Fisher Coulometer	78
ค.1	เพอมิเอทฟลักซ์รวม ฟลักซ์เอทานอล ฟลักซ์น้ำ และค่าการแยกของเอทานอลเทียบกับน้ำกับความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 30 60 และ 70 °C ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด 3 %โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone	80

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ค.2 เพอมิเอทฟลักซ์รวม ฟลักซ์เอทานอล ฟลักซ์น้ำ และค่าการแยกของเอทานอลเทียบกับน้ำกับความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 70 °C ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด 5 %โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone	81
ค.3 เพอมิเอทฟลักซ์รวม ฟลักซ์เอทานอล ฟลักซ์น้ำ และค่าการแยกของเอทานอลเทียบกับน้ำกับความเข้มข้นของเอทานอลสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 70 °C ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด 7 %โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone	81
ค.4 ความเข้มข้นของเอทานอลในเพอมิเอทและรีเทนเททกับความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด 3 %โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone	82
ค.5 ความเข้มข้นของเอทานอลในเพอมิเอทและรีเทนเททกับความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 70 °C ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด 5 %โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone	83
ค.6 ความเข้มข้นของเอทานอลในเพอมิเอทและรีเทนเททกับความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 70 °C ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด 7 %โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone	83
ค.7 เพอมิเอทฟลักซ์รวม ฟลักซ์เอทานอล ฟลักซ์น้ำ และค่าการแยกของน้ำเทียบกับเอทานอลกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol (ผลการทดลองครั้งที่ 1)	84
ค.8 เพอมิเอทฟลักซ์รวม ฟลักซ์เอทานอล ฟลักซ์น้ำ และค่าการแยกของน้ำเทียบกับเอทานอลกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol (ผลการทดลองครั้งที่ 2)	86
ค.9 ความเข้มข้นของน้ำในเพอมิเอทและรีเทนเททกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol (ผลการทดลองครั้งที่ 1)	88
ค.10 ความเข้มข้นของน้ำในเพอมิเอทและรีเทนเททกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol (ผลการทดลองครั้งที่ 2)	89
ค.11 ความเข้มข้นของเอทานอลหลังจากผ่านกระบวนการดูดซับกับความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 91.61 ±0.17 %โดยน้ำหนัก ใช้เวลาในการดูดซับ 45 นาที และอุณหภูมิ 27.8±1.7 °C ที่ความดันต่าง ๆ	90

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง **หน้า**

ค.12 ความเข้มข้นของเอทานอลหลังจากผ่านกระบวนการดูดซับกับความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 91.61 ±0.17 %โดยน้ำหนัก ความดัน 90 psi และอุณหภูมิ 27.8±1.7 °C ที่เวลาของการดูดซับต่าง ๆ 90

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ		หน้า
1.1	โครงสร้างทางเคมีของเอทานอล	4
1.2	การผลิตเอทานอลโดยกระบวนการหมักจากวัตถุดิบทางการเกษตร	6
1.3	หลักการของกระบวนการเมมเบรนแบบเพอแวปพอเรชัน	8
1.4	วิธีการลดความดันด้านเพอมิเอทสำหรับเพอแวปพอเรชัน	9
1.5	การเกิด Concentration polarization (CP)	13
1.6	เมมเบรนแบบสมมาตร	16
1.7	เมมเบรนแบบไม่สมมาตร	16
1.8	เมมเบรนเชิงประกอบ	16
1.9	รูปร่างของเมมเบรน (a) เมมเบรนแบบแผ่นเรียบ (b) เมมเบรนแบบท่อ (c) เมมเบรนแบบเส้นใยกลวง	20
1.10	อุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบ	22
1.11	อุปกรณ์แบบท่อ	22
1.12	อุปกรณ์แบบท่อม้วน	22
1.13	อุปกรณ์แบบเส้นใยกลวง	23
1.14	Liquid-vapor equilibrium สำหรับสารละลายเอทานอล – น้ำ	25
1.15	กระบวนการผสม (hybrid process) ระหว่างการกลั่นกับเพอแวปพอเรชันเพื่อผลิตเอทานอลเข้มข้น 99.5 %โดยน้ำหนัก	25
1.16	เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเอทานอลกับอัตราการผลิต (m^3/day) สำหรับกระบวนการเพอแวปพอเรชัน กระบวนการดูดซับและกระบวนการกลั่น	26
1.17	โรงงานต้นแบบ (pilot plant) ที่มีกำลังการผลิตเอทานอล 1,000 ตัน/ปี ของบริษัท Sulzer Chemtech	27
1.18	การแยกเอทานอลออกจากเบียร์เพื่อผลิตเบียร์ที่มีแอลกอฮอล์ต่ำเป็นของบริษัท GFT ด้วยกระบวนการเพอแวปพอเรชัน	28
1.19	ความสามารถในการแพร่ของสารอินทรีย์ผ่านเมมเบรนชนิด silicone rubber ซึ่งเป็นเมมเบรนแบบท่อม้วน	29
2.1	แสดงผังเพอแวปพอเรชัน	37
2.2	แสดงหน่วยดูดซับสำหรับใช้ในการทดลอง	38
2.3	molecular sieve ชนิด 3 ^{0}A zeolite	38
2.4	การเตรียมสารละลายซิลิโคนในเฮกเซน	39

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ **หน้า**

3.1 อิเล็กตรอนไมโครกราฟของเมมเบรนเชิงประกอบชนิด 3 %โดยน้ำหนักของ 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 44

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอทฟลักซ์รวมกับปริมาณซิลิโคน ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 10 20 30 และ 55 %โดยน้ำหนัก และที่อุณหภูมิ 70 °C 46

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแยกของเอทานอลเทียบกับน้ำกับปริมาณซิลิโคน ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 10 20 30 และ 55 %โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 70 °C 46

3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอทฟลักซ์รวมกับอุณหภูมิ ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 10 20 30 และ 55 %โดยน้ำหนัก ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด 3 %โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone 47

3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแยกของเอทานอลเทียบกับน้ำกับอุณหภูมิ ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 10 20 30 และ 55 %โดยน้ำหนัก ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด 3 %โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone 48

3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์น้ำกับส่วนกลับของอุณหภูมิ ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 10 20 30 และ 55 %โดยน้ำหนัก ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด 3 %โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone 49

3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์เอทานอลกับส่วนกลับของอุณหภูมิ ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 10 20 30 และ 55 %โดยน้ำหนัก ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด 3 %โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone 50

3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอทฟลักซ์รวมกับความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 70 °C ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด 3 5 และ 7 %โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone 51

3.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ฟลักซ์เอทานอลและ (b) ฟลักซ์น้ำ กับความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 70 °C ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด 3 5 และ 7 %โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone 52

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ **หน้า**

3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแยกของเอทานอลเทียบกับน้ำกับความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 70 °C ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด 3 5 และ 7 %โดยน้ำหนักของ silicone/polysulfone 54

3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเอทานอลในเพอมิเอทกับความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 70 °C ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด silicone/polysulfone 55

3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอทฟลักซ์รวมกับอุณหภูมิ ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5 10 20 30 และ 40 %โดยน้ำหนัก ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol 56

3.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ฟลักซ์น้ำ (b) ฟลักซ์เอทานอลกับส่วนกลับของอุณหภูมิ ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5 10 20 30 และ 40 %โดยน้ำหนัก ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol 58

3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแยกของน้ำเทียบกับเอทานอลกับอุณหภูมิที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5 10 20 30 และ 40 %โดยน้ำหนัก ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol 59

3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำในเพอมิเอทกับอุณหภูมิ ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5 10 20 30 50 %โดยน้ำหนัก ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol 60

3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอทฟลักซ์รวมกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 30 40 50 และ 60 °C ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol 61

3.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ฟลักซ์น้ำและ (b) ฟลักซ์เอทานอลกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 30 40 50 และ 60 °C ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol 62

3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแยกของน้ำเทียบกับเอทานอลกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 30 40 50 และ 60 °C ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol 63

3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำในเพอมิเอทกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 30 40 50 และ 60 °C ผ่านเมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol 63

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
3.20	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเอทานอลหลังจากผ่านกระบวนการดูดซับกับความดัน ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 91.61±0.17 %โดยน้ำหนัก เวลาของการดูดซับ 45 นาที	64
3.21	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเอทานอลหลังจากผ่านกระบวนการดูดซับกับเวลาของการดูดซับ ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 91.61±0.17 %โดยน้ำหนัก ความดัน 90 psi	65
ก.1	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟฟี (GC/FID) ของบริษัท Hewlett Packard รุ่น 5790A	76
ก.2	เครื่อง Karl Fisher Coulometer ของบริษัท Mettler รุ่น DL39	76
ก.3	ส่วนประกอบของเครื่อง Karl Fisher Coulometer	77
ข.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ใต้พีกของเอทานอลต่อพื้นที่ใต้พีกของโพรพานอลกับความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล	79