

สมดุลการดูดซับน้ำในเอทานอลด้วยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด 4A

นางสาวพลอยพรรณ จริงจิตต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

ADSORPTION EQUILIBRIUM OF WATER IN ETHANOL WITH ZEOLITE 4A

Miss Ploypan Jingjit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมดุลการดูดซับน้ำในเอทานอลด้วยตัวดูดซับซีโอไลต์ ชนิด 4A
โดย	นางสาวพลอยพรรณ จริงจิตต์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บรรเจิด จงสมจิตร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภางค์ จุฬาลักษณ์านุกูล)

พลอยพรรณ จริงจิตต์ : สมดุลการดูดซับน้ำในเอทานอลด้วยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด 4A
(ADSORPTION EQUILIBRIUM OF WATER IN ETHANOL WITH ZEOLITE 4A)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช, 120 หน้า.

น้ำและเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำถูกดูดซับบนตัวดูดซับซีโอไลต์ 4A ในสถานะของเหลว ที่อุณหภูมิห้อง ตัวดูดซับที่ผ่านการดูดซับมาแล้วจะถูกนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น เพื่อประเมินปริมาณเอทานอลที่สามารถดึงกลับออกมาได้ อีกทั้งยังศึกษาการดูดซับน้ำจากของผสมเอทานอลปนน้ำในหอดูดซับจำลอง

ตัวดูดซับซีโอไลต์ 4A สามารถดูดซับได้ทั้งน้ำและเอทานอล โดยน้ำและเอทานอลเข้าสู่สมดุลดูดซับภายในเวลา 120 และ 30 นาที ตามลำดับ แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับใช้อธิบายสมดุลดูดซับน้ำ และเอทานอล คือ แบบจำลองสมดุลดูดซับของฟรุนดลิช ซึ่งมีค่าคงที่ของแบบจำลองเท่ากับ 577.81 และ 423.59 มิลลิกรัมของผสมเอทานอลต่อกรัมซีโอไลต์ 4A ตามลำดับ ซีโอไลต์ 4A ที่ผ่านการดูดซับมาแล้ว สามารถดึงเอทานอลบางส่วนภายในตัวดูดซับออกด้วยน้ำกลั่น เอทานอลที่ล้างออกมาได้มีปริมาณอย่างน้อย 70 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับไว้ หลังจากนั้นจะนำซีโอไลต์ 4A ไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อระเหยเอทานอลและน้ำที่ติดอยู่ภายในตัวดูดซับออกไป การทดสอบการดูดซับน้ำในหอดูดซับจำลองสามารถผลิตเอทานอลเข้มข้นได้ประมาณร้อยละ 99 โดยมวล จากของผสมเอทานอลปนน้ำเริ่มต้นประมาณร้อยละ 92 โดยมวล

ภาควิชา...วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา...วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.2554.....

5270511421 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : ADSORPTION / ZEOLITE 4A

PLOYPAN JINGJIT : ADSORPTION EQUILIBRIUM OF WATER IN ETHANOL WITH ZEOLITE 4A. ADVISOR : ASSOC.PROF. DEACHA CHATSIRIWECH, Ph.D., 120 pp.

Equilibrium adsorption of water in ethanol with commercial zeolite 4A was investigated at ambient temperature. The adsorption performance of the regenerated adsorbents was also investigated. In addition, the simulated packed bed was introduced for evaluating separation performance.

Both water and ethanol were adsorbed simultaneously on zeolite 4A. Equilibrium adsorptions of water and ethanol could be achieved within 120 and 30 min, respectively. The adsorption isotherms obeyed Freundlich's model quite well, with model constants of 577.81 and 423.59 mg/g, respectively. For regeneration, the specific amount of ethanol adsorbed on the adsorbent could be recovered at least 70% by washing with water followed by drying at 200 °C for 1 hours. The 99 % ethanol could be produced from 92% ethanol by simulated packed bed with the adsorbent to feed ratio of zeolite 4A.

Department : Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study : Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2011

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช ที่กรุณาให้ความเอาใจใส่ ให้คำปรึกษา และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ที่ดีต่อ งานวิจัยเสมอมา รวมทั้งกรุณาตรวจสอบเนื้อหาวิทยานิพนธ์ รวมทั้งกรุณาตรวจเล่มวิทยานิพนธ์ เพื่อให้ได้เนื้อหาที่มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณประธานสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เหมือนเดือน พิศาพงษ์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. บรรเจิด จงสมจิตร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุภางค์ จุฬาลักษณ์านุกูล สำหรับข้อแนะนำ ข้อคิดเห็น และตรวจสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ และเนื้อหาวิทยานิพนธ์ ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาเคมี สาขา วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ช่วยให้คำแนะนำ และอำนวยความสะดวก ด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดามารดา ญาติพี่น้อง และเพื่อน ๆ ซึ่งคอยเป็นให้ คำปรึกษา เป็นกำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ของผสมเอทานอลปนน้ำ.....	4
2.1.1 ลักษณะทั่วไปของของผสมเอทานอลปนน้ำ.....	4
2.1.2 กระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำ.....	5
2.2 การดูดซับ.....	6
2.2.1 ประเภทของการดูดซับ.....	7
2.2.1.1 การดูดซับแบบกายภาพ (physisorption).....	7
2.2.1.2 การดูดซับแบบเคมี (chemisorptions).....	7
2.2.2 ตัวดูดซับ.....	8
2.3.3 กลไกของการดูดซับ.....	10
2.2.4 แบบจำลองสมดุลการดูดซับ.....	10
2.2.4.1 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของเฮนรี่.....	11
2.2.4.2 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์.....	11

บทที่	หน้า
2.2.4.3 แบบจำลองการสมดุลคูดซึบของฟรุณดิช.....	12
2.2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการคูดซึบ.....	12
2.2.6 ระบบการคูดซึบ.....	13
2.2.7 การเสื่อมสภาพของตัวคูดซึบ.....	14
2.2.8 การคายกลับ หรือ การฟื้นฟูสภาพ.....	14
2.2.9 การคูดซึบของเหลวด้วยแรงกะปิลลารี.....	17
2.3 ซีโอดี.....	18
2.3.1 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของซีโอดี.....	18
2.3.2 ชนิดของซีโอดี.....	19
2.3.3 คุณสมบัติที่สำคัญของซีโอดี.....	21
2.3.4 การประยุกต์ใช้ซีโอดี.....	22
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
3 วิธีการดำเนินงาน.....	28
3.1 สารเคมีและเครื่องมือวิเคราะห์.....	28
3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติและคุณลักษณะของซีโอดี 4A.....	28
3.3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับสัดส่วนเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ.....	28
3.4 การทดลองคูดซึบน้ำและเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยซีโอดี 4A.....	29
3.4.1 ศึกษาสมดุลคูดซึบน้ำและเอทานอลบริสุทธิ์.....	29
3.4.2 แบบจำลองสมดุลคูดซึบน้ำและเอทานอลช่วงสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำมากกว่า 0.9222.....	29
3.4.3 แบบจำลองสมดุลคูดซึบน้ำและเอทานอลช่วงสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำเป็น 0-0.995.....	30
3.5 การทดลองแยกเอทานอลที่ถูกคูดซึบไว้กลับคืนมาโดยใช้น้ำ.....	30
3.6 ทดสอบการคูดซึบน้ำจากของผสมเอทานอลปนน้ำในหอคูดซึบจำลอง.....	31
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	32
4.1 การหาสัดส่วนมวลของเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ.....	32
4.1.1 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำ.....	32

บทที่	หน้า
4.1.2 ผลของการตรวจวัดความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำด้วย Gas Chromatography และวิธีวัดความหนาแน่น.....	40
4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเบื้องต้นของตัวดูดซับซีโอไลต์ 4A.....	42
4.3 การศึกษาปริมาณดูดซับน้ำและเอทานอลด้วยซีโอไลต์ 4A.....	44
4.3.1 ศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลดูดซับ.....	45
4.3.2 คุณสมบัติสารในการทดลองสมดุลการดูดซับ.....	54
4.3.3 แบบจำลองสมดุลการดูดซับ.....	57
4.4 การทดสอบระบบการดูดซับน้ำในหลอดดูดซับจำลอง.....	65
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	69
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	69
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	70
รายการอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก.....	76
ภาคผนวก ก.....	77
ภาคผนวก ข.....	79
ภาคผนวก ค.....	88
ภาคผนวก ง.....	89
ภาคผนวก จ.....	98
ภาคผนวก ฉ.....	103
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	104

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการผลิตเอทานอลร้อยละ 99 ขึ้นไปด้วยกระบวนการแยกประเภทต่าง ๆ.....	2
2.1 ลักษณะสำคัญของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี.....	8
2.2 ข้อดีและข้อเสียสำหรับการคายกลับด้วยวิธีต่าง ๆ.....	16
2.3 คุณสมบัติของซีโอไลต์ A.....	21
2.4 ขนาดโพรงของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ.....	21
4.1 ค่าคงที่ของแบบจำลองตามความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงกับสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลผสมน้ำ.....	34
4.2 ค่าคงที่ของแบบจำลองตามความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงกับสัดส่วนโมลเอทานอลในเอทานอลผสมน้ำ.....	36
4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายปริมาตรทางความร้อนของของผสมเอทานอลปนน้ำที่สัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำต่าง ๆ.....	38
4.4 ค่าคงที่ของสมการค่าคงที่ที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนมวลเอทานอลกับความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำ กับ อุณหภูมิในช่วงระหว่าง 27-35 องศาเซลเซียส.....	39
4.5 คุณสมบัติเบื้องต้นของตัวดูดซับซีโอไลต์ 4A.....	42
4.6 ปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะ ค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ และปริมาตรรูพรุน ของการดูดซับน้ำและเอทานอลด้วยซีโอไลต์ 4A ตามลำดับ.....	43
4.7 ค่าความหนืด แรงตึงผิวของน้ำและเอทานอล.....	45
4.8 เปรียบเทียบปริมาณดูดซับของผสมเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 30 ถึง 180 นาที และ 60 ถึง 180 นาที.....	48
4.9 เปรียบเทียบปริมาณดูดซับน้ำเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 30 ถึง 180, 60 ถึง 180, 90 ถึง 180 และ 120 ถึง 180 นาที.....	50
4.10 เปรียบเทียบปริมาณดูดซับเอทานอลเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 30 ถึง 180 นาที และ 60 ถึง 180 นาที.....	53
4.11 ค่าคงที่ของแบบจำลองสมดุลดูดซับน้ำตามแบบจำลองของเฮนรี่, แลงเมียร์ และ ฟรุนดิช กรณีที่สัดส่วนเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำสูงกว่า 0.9222.....	58

ตารางที่	หน้า
4.12 ค่าคงที่ของแบบจำลองสมดุลดูดซับน้ำตามแบบจำลองของเฮนรี, แลงเมียร์ และ ฟรุนดิช ในช่วงสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ 0-0.99.....	60
4.13 ค่าคงที่ของแบบจำลองสมดุลดูดซับเอทานอลตามแบบจำลองของเฮนรี, แลงเมียร์ และฟรุนดิช ในช่วงสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ 0-0.99.....	62
4.14 ผลการทดลองการดูดซับน้ำในของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ.....	64
4.15 เปรียบเทียบความเข้มข้นหลังการดูดซับที่ได้จากการทดสอบในหลอดดูดซับจำลอง กับ จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลที 4.4.1 ที่ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 30, 60 และ 90 ของ ปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ.....	68
ก.1 ผลการทดลองแสดงความหนาแน่นและสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ.....	77
ก.2 ค่า Specific molar Volume (V) ที่ได้จากการทดลอง และค่าความคลาดเคลื่อนของ Excess molar Volume (ΔV) ระหว่างค่าจากการทดลองและค่าที่ได้จากการอ้างอิง	78
ข.1 แสดงสถานะที่ใช้ในการตรวจวัดความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำด้วย Gas Chromatography.....	79
ง.1 ผลการทดลองวัดความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ และ ปริมาณดูดซับจำเพาะของน้ำ, เอทานอล และของผสมเอทานอลปนน้ำ กรณีที่ใช้ ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ.....	89
ง.2 ผลการทดลองวัดความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ และ ปริมาณดูดซับจำเพาะของน้ำ, เอทานอล และของผสมเอทานอลปนน้ำ กรณีที่ใช้ ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 20 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ.....	90
ง.3 ผลการทดลองวัดความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ และ ปริมาณดูดซับจำเพาะของน้ำ, เอทานอล และของผสมเอทานอลปนน้ำ กรณีที่ใช้ ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 30 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ.....	91
ง.4 ผลการทดลองวัดความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ และ ปริมาณดูดซับจำเพาะของน้ำ, เอทานอล และของผสมเอทานอลปนน้ำ กรณีที่ใช้ ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 40 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ.....	92
ง.5 ผลการทดลองวัดความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ และ ปริมาณดูดซับจำเพาะของน้ำ, เอทานอล และของผสมเอทานอลปนน้ำ กรณีที่ใช้ ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 50 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ.....	93

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	การดูดซับของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ.....	6
2.2	กลไกการดูดซับ.....	10
2.3	การลดลงของความสามารถของสารดูดซับและกระบวนการฟื้นฟูสภาพ.....	15
2.4	วิธีวัดความตึงผิวโดยใช้หลอดคาปิลลารี (a) ปฏิกิริยาการหนีตัวของเหลวในหลอดคาปิลลารี (b) เมื่อแรงดึงดูดของโมเลกุลที่เหมือนกัน (Cohesion) มากกว่าแรงดึงดูดของโมเลกุลที่ต่างกัน (Adhesion).....	17
2.5	โครงสร้าง 2 มิติ ของออลูมิโนซิลิเกต.....	18
2.6	รูปทรงสี่หน้าของออกซิเจน โคออร์ดิเนตกับซิลิกอนหรือออลูมิเนียมในหน่วยย่อยของซีโอไลต์ (หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ.....	18
2.7	แสดงซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด A.....	20
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น กับความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำ ระหว่างอุณหภูมิ 27-35 องศาเซลเซียส.....	33
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่เปลี่ยนแปลง กับสัดส่วนโดยมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ.....	34
4.3	เปรียบเทียบผลการวัดปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงของเอทานอลผสมน้ำ ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กับผลการทดลองของ Benson และ Kiyohara.....	35
4.4	เปรียบเทียบผลการวัดปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงของเอทานอลผสมน้ำ ณ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส กับผลการทดลองของ Benson และ Kiyohara.....	35
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนมวลเอทานอลของในผสมเอทานอลปนน้ำกับค่าความหนาแน่น.....	40
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนมวลเอทานอลในผสมเอทานอลปนน้ำกับค่าพื้นที่ได้กราฟที่ได้จาก GC.....	41
4.7	ปริมาณดูดซับน้ำและเอทานอลจำเพาะของตัวดูดซับซีโอไลต์ 4A ในช่วงเวลา 180 นาที.....	43
4.8	สัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ ในเวลา 30-180 นาที เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับอยู่ในช่วงร้อยละ 10-90 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ.....	46

ภาพที่	หน้า	
4.9	ปริมาณดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำจำเพาะของซีโอไลต์ 4A ในช่วงเวลา 30-180 นาที เมื่อปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10-90 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ.....	47
4.10	ปริมาณดูดซับน้ำจำเพาะของซีโอไลต์ 4A ในช่วงเวลา 30-180 นาที เมื่อปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10-90 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ.....	49
4.11	ปริมาณดูดซับเอทานอลจำเพาะของซีโอไลต์ 4A ในช่วงเวลา 30-180 นาที เมื่อปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10-90 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ.....	52
4.12	ร้อยละสัดส่วนการดูดซับของเอทานอลและน้ำกับเปอร์เซ็นต์ของปริมาณเอทานอลที่ใช้ในการดูดซับ ที่เวลาการดูดซับ 120 นาที.....	54
4.13	มวลของผสมหลังการดูดซับที่ได้จากการวัดจริงกับการคำนวณมวลสารที่เวลา 120 นาที.....	55
4.14	สัดส่วนของปริมาณเอทานอลที่ล้างออกมาได้ต่อปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับไว้ก่อนล้าง.....	56
4.15	ปริมาณสมมูลดูดซับของผสมเอทานอล น้ำ และเอทานอล ที่สัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนสูงกว่า 0.9222.....	57
4.16	ปริมาณสมมูลดูดซับน้ำที่สัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำสูงกว่า 0.922.....	58
4.17	ปริมาณสมมูลดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำ, เอทานอล และน้ำ ในช่วงสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ 0-0.99.....	59
4.18	ปริมาณสมมูลดูดซับน้ำ ในช่วงสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ 0-0.99.....	60
4.19	ปริมาณสมมูลดูดซับเอทานอล ในช่วงสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ 0-0.99.....	61
4.20	ปริมาณสมมูลดูดซับของผสมที่ได้จากการวัดของผสมที่หายไป และมวลของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้น.....	63
4.21	การเปรียบเทียบปริมาณสมมูลดูดซับด้วยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ.....	65
4.22	ความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมที่สมมูล ด้วยการทดสอบระบบการดูดซับน้ำในหลอดดูดซับจำลอง.....	66

ภาพที่		หน้า
ข.1	การตรวจวัดความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีสัดส่วนมวลเอทานอล 0.1673.....	80
ข.2	การตรวจวัดความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีสัดส่วนมวลเอทานอล 0.3367.....	81
ข.3	การตรวจวัดความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีสัดส่วนมวลเอทานอล 0.5352.....	82
ข.4	การตรวจวัดความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีสัดส่วนมวลเอทานอล 0.7437.....	83
ข.5	การตรวจวัดความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีสัดส่วนมวลเอทานอล 0.8119.....	84
ข.6	การตรวจวัดความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีสัดส่วนมวลเอทานอล 0.8688.....	85
ข.7	การตรวจวัดความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีสัดส่วนมวลเอทานอล 0.9132.....	86
ข.8	การตรวจวัดความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีสัดส่วนมวลเอทานอล 0.9950.....	87

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

m_{ad}	=	มวลตัวดูดซับ
m_{sol}	=	มวลของผสมเอทานอลปนน้ำ
q	=	ปริมาณดูดซับของผสมจำเพาะ
q_w	=	ปริมาณดูดซับน้ำจำเพาะ
q_{Et}	=	ปริมาณดูดซับเอทานอลจำเพาะ
t	=	เวลา
T	=	อุณหภูมิ
$\hat{V}_{mixture}$	=	ปริมาตรจำเพาะของผสมเอทานอลปนน้ำ
\hat{V}_{H_2O}	=	ปริมาตรจำเพาะน้ำ
\hat{V}_{EtOH}	=	ปริมาตรจำเพาะเอทานอล
$\Delta \hat{V}$	=	ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงของของผสมเอทานอลปนน้ำ
x_{Et}	=	สัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ
x_w	=	สัดส่วนมวลน้ำในของผสมเอทานอลปนน้ำ
x_{Et}	=	สัดส่วนโมลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ
อักษรกรีก		
γ	=	แรงตึงผิว
ρ	=	ความหนาแน่นของของเหลว
η	=	สัดส่วนการดูดซับคำนวณจากปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารเริ่มต้นก่อนการดูดซับ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เอทานอลถูกนำมาใช้งานในหลาย ๆ อุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการผลิตยาและเครื่องสำอางค์ อุตสาหกรรมอาหาร เช่น การผลิตเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ได้มีการนำเอทานอลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนเพิ่มมากขึ้น โดยนำเอทานอลผสมกับน้ำมันเบนซินเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ และ เพิ่มค่าออกเทน (octane) ของน้ำมันเบนซิน ทำให้สามารถลดการนำเข้าของ MTBE

เอทานอลสามารถผลิตได้จาก 2 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี และ กระบวนการหมักวัตถุดิบทางการเกษตร [1] เช่น อ้อย แป้ง มันสำปะหลัง กากน้ำตาล ด้วยยีสต์หรือแบคทีเรีย ซึ่งทุกกระบวนการผลิตจะได้เอทานอลที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งไม่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง เอทานอลที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจะต้องมีความบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่า 0.995 ของสัดส่วนมวลของเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ [2]

กระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำ ในปัจจุบันคือการกลั่น ณ ความดันบรรยากาศ ซึ่งสามารถเพิ่มความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำได้สูงสุดประมาณ 0.955 ของสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ หลังจากนั้นจะไม่สามารถเพิ่มความเข้มข้น โดยการกลั่นลำดับส่วนได้อีก เนื่องจากของผสมเกิดจุดเดือดคงที่ (azeotrope) ระหว่างเอทานอลกับน้ำ [3] กระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของของผสมเอทานอลกับน้ำมีหลายกระบวนการแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการผลิตเอทานอลที่มีสัดส่วนมวลของเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ 0.99 ขึ้นไปด้วยกระบวนการแยกประเภทต่าง ๆ [4]

สัดส่วนมวลเอทานอล ในของผสมเอทานอลปนน้ำ		ค่าพลังงาน (KJ/Kg-EtOH)	กระบวนการ
เริ่มต้น	สุดท้าย		
0.08	0.995	10,383	การกลั่นที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ
0.10	0.995	9,671	การกลั่นเพิ่มสัดส่วนมวลเอทานอล 0.955 แล้วเติมสารช่วยกลั่นเพื่อให้ได้สัดส่วนมวลเอทานอล 0.995
0.64	0.995	7,324	การกลั่นเพิ่มสัดส่วนมวลเอทานอล 0.900 แล้วนำมาระเหยผ่านเยื่อแผ่นให้ได้สัดส่วนมวลเอทานอล 0.995
0.08	0.99	5,032	การดูดซับ

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของของผสมเอทานอลปนน้ำได้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 99 โดยมวล โดยใช้พลังงานต่ำ ทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ ดังนั้นกระบวนการดูดซับจึงเป็นกระบวนการที่น่าสนใจในการเพิ่มความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำ ส่วนตัวดูดซับเมื่ออิ่มตัวด้วยของผสมจะนำไปทำการรีเจเนอเรทเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาสมมูลการดูดซับของของผสมเอทานอลปนน้ำ โดยใช้ของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีมวลเอทานอลในขอบเขต 0.9222 ในสภาวะของเหลว ที่ความดันบรรยากาศ โดยสารดูดซับที่จะพิจารณาต้องเป็นสารที่ดูดน้ำได้ดี และมีราคาไม่แพง คือ ซีโอไลต์ชนิด 4A ซึ่งซีโอไลต์ 4A มีความมีขั้วที่พื้นผิวที่สูง ทำให้พื้นผิวของซีโอไลต์ 4A ดูดซับน้ำได้ดีกว่าเอทานอล นอกจากนี้ในงานวิจัยยังทำการแยกเอทานอลที่ถูกดูดซับไว้ในซีโอไลต์ 4A ที่ผ่านการดูดซับแล้วกลับคืนมาโดยใช้น้ำกลั่น เพื่อหาความเข้มข้นและปริมาณของเอทานอลที่ถูกดูดซับไว้ และยังทำการทดสอบระบบการดูดซับน้ำในหอดูดซับจำลอง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อหาสมมูลดูดซับน้ำจากของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยซีโอไลต์ชนิด 4A

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 หาเวลาสมมูลดูดซับน้ำและเอทานอล และแบบจำลองสมมูลดูดซับน้ำและเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ โดยใช้ซีโอไลต์ชนิด 4A ในสถานะของเหลว ด้วยสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำเริ่มต้นเป็น 0.9222 แล้วทำการปรับเปลี่ยนปริมาณตัวดูดซับในช่วงร้อยละ 10-90 ของของผสมเอทานอลปนน้ำ ทำการดูดซับเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างทุก ๆ 30 นาที

1.3.2 หาแบบจำลองสมมูลการดูดซับน้ำและเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ โดยการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของของผสมเอทานอลปนน้ำ ที่ปริมาณซีโอไลต์ 4A ร้อยละ 30 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ

1.3.3 แยกเอทานอลที่ถูกดูดซับไว้ในซีโอไลต์ 4A ที่ผ่านการดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำที่สมมูลดูดซับ กลับคืนมาโดยใช้น้ำกลั่น

1.3.4 ทดสอบระบบการดูดซับน้ำในหอดูดซับจำลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

1.4.1 ทราบสมมูลดูดซับของเอทานอลและน้ำด้วยซีโอไลต์ชนิด 4A

1.4.2 ทราบว่ากระบวนการดูดซับในสถานะของเหลวสามารถทำให้ของผสมเอทานอลปนน้ำบริสุทธิ์ ได้มากหรือน้อยเพียงใด

1.4.3 ได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น โดยกระบวนการที่ใช้พลังงานต่ำ

1.4.4 ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอล

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ของผสมเอทานอลปนน้ำ

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของของผสมเอทานอลปนน้ำ

ของผสมเอทานอลปนน้ำ หรือ เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) คือ สารประกอบอินทรีย์จำพวกแอลกอฮอล์ ที่มีสูตร โครงสร้างเป็น C_2H_5OH สามารถผลิตได้จาก 2 กระบวนการใหญ่ ๆ คือ กระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical synthesis) เป็นการผลิตของผสมเอทานอลปนน้ำที่ได้จากอนุพันธ์ของสารปิโตรเลียม และกระบวนการหมัก (Fermentation) ซึ่งกระบวนการผลิตของผสมเอทานอลปนน้ำจากการหมักผลิตทางการเกษตร เช่น อ้อย กากน้ำตาล และมันสำปะหลัง ด้วยเชื้อจุลินทรีย์ ของผสมเอทานอลปนน้ำที่ผลิตได้จะมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 8-12 โดยปริมาตร[1] จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำ ของผสมเอทานอลปนน้ำที่ได้จากการผลิตสามารถแยกได้เป็น 3 ชนิดคือ [2]

1. ของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยปริมาตร (Potable Alcohol) ใช้รับประทาน และใช้ในการแพทย์
2. ของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยปริมาตร (Industrial) ใช้ในอุตสาหกรรม
3. ของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95-99.5 โดยปริมาตร (Denatured Alcohol) หรือที่เรียกกันว่าเอทานอล สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ 3 รูปแบบ [3] คือ

แบบที่หนึ่ง เอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยปริมาตร ผสมในน้ำมันดีเซล เรียกว่า ดีโซฮอล (Diesohol) ในอัตราส่วนร้อยละ 15 และเพิ่มสารปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างในปริมาณร้อยละ 1-2

แบบที่สอง เอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 โดยปริมาตร ผสมในน้ำมันเบนซิน เรียกว่า แก๊สโซฮอล์ (Gasohol) ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ในลักษณะของสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงค่าออกเทนของน้ำมันเบนซิน

แบบที่สาม ใช้เป็นสารเคมีเพิ่มออกเทน (octane) แก่เครื่องยนต์ โดยการเปลี่ยนรูปเอทานอลมาเป็นสาร ETBE (Ethyl Tertiary Butyl Ether) ใช้ทดแทนสาร MTBE (Methyl Tertiary Butyl Ether)

2.1.2 กระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำ

ของผสมเอทานอลปนน้ำที่ได้จากกระบวนการหมัก จะถูกนำมากลั่นลำดับส่วน ซึ่งสามารถแยกเอทานอลให้ได้ความบริสุทธิ์ได้สูงสุดประมาณร้อยละ 95.5 โดยปริมาตร เนื่องจากของผสมเกิดจุดเดือดคงที่ (azeotrope) ระหว่างเอทานอลกับน้ำ จึงต้องเพิ่มความเข้มข้นให้กับของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยวิธีอื่น [4,5] ซึ่งวิธีที่นิยมในการเพิ่มความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำมากกว่าร้อยละ 95.5 โดยปริมาตร มี 3 วิธีได้แก่ [6]

1) กระบวนการดูดซับด้วยโมเลกุลาร์ซีฟ

โมเลกุลาร์ซีฟเป็นสารประเภทซีโอไลต์สังเคราะห์ ขนาดรูพรุนของโมเลกุลาร์ซีฟสามารถให้โมเลกุลของน้ำซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขนาดรูพรุนผ่านเข้าไปข้างในโพรงของโมเลกุลาร์ซีฟได้ ส่วนโมเลกุลของเอทานอลที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของโมเลกุลาร์ซีฟไม่สามารถผ่านไปได้ ทำให้โมเลกุลาร์ซีฟสามารถกำจัดน้ำออกจากของผสมเอทานอลปนน้ำได้ ข้อดีของเทคโนโลยีนี้คือ เป็นเทคโนโลยีที่ง่าย ใช้ไอน้ำและพลังงานที่ต่ำเมื่อเทียบกับวิธีการกลั่น นอกจากนี้ยังไม่ต้องใช้สารเคมีอื่นๆ มาช่วยในการแยกน้ำ การกำจัดของเสียจึงไม่จำเป็นต้องคำนึงถึง

2) กระบวนการกลั่นอะซีโอโทรป

กระบวนการนี้ต้องมีการเติมสารประกอบที่เรียกว่า entrainer ลงไป เพื่อทำให้น้ำแยกออกจากเอทานอลได้ดียิ่งขึ้น สารประกอบ entrainer ได้แก่ ไซโคลเฮกเซน (cyclohexane), เบนซีน (benzene), โทลูอิน (toluene), อีเทอร์ (ether) หรือคีโตน (ketone) วิธีนี้นิยมใช้กันมานาน ซึ่งมี

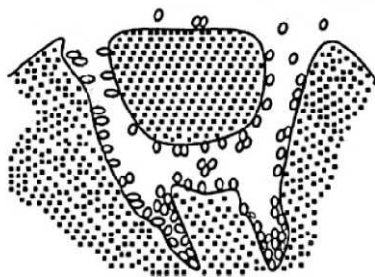
ข้อเสียอยู่มาก ได้แก่ การใช้พลังงานที่มากในการกลั่นเพื่อให้ได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูง และสารที่ใช้เป็น entrainer เป็นสารมีพิษ บางชนิดเป็นสารก่อโรคมะเร็ง

3) กระบวนการแผ่นเยื่อบาง

กระบวนการแผ่นเยื่อบางใช้เทคนิคการซึมผ่าน (permeation) ของน้ำผ่านแผ่นเยื่อบางในรูปของไอน้ำ ด้วยแรงดึงดูดจากภายนอกที่มีความดันต่ำกว่า (evaporation) สารที่ผ่านเยื่อแผ่น เรียกว่าเพอมีเอท (permeate) การแยกเกิดขึ้นได้เนื่องจากองค์ประกอบของสารในสารผสมมีความเป็นขั้ว (hydrophilicity) ต่างกัน เช่นในกรณีของ น้ำในของผสมเอทานอลปนน้ำ น้ำมีความเป็นขั้วที่สูงกว่าเอทานอล ความสามารถในการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นของน้ำจึงมีค่าสูงกว่า ขณะที่มีการซึมผ่านของน้ำ ความดันต่ำจากภายนอกจะช่วยดึงน้ำออกมาในรูปของไอน้ำ เมื่อลดอุณหภูมิเพื่อให้ไอน้ำกลั่นตัวเป็นของเหลว

2.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

กระบวนการดูดซับ เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกสาร โดยสารที่ต้องการแยกเป็นได้ทั้งก๊าซและของเหลว สารเหล่านี้จะถูกถ่ายโอนมวลไปยังอีกสารหนึ่งที่เป็นของแข็งและไม่ละลายในก๊าซและของเหลวนั้น และเกิดการเกาะติดบนพื้นผิวของของแข็งขึ้น โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีพื้นผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) การดูดซับเกิดขึ้นที่พื้นผิวระหว่างสารถูกดูดซับกับตัวดูดซับ [7] การเกาะติดบนพื้นผิวขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับ สามารถจำแนกออกมาเป็นการเกาะติดด้วยแรงทางฟิสิกส์ หรือพันธะทางเคมี



ภาพที่ 2.1 การดูดซับของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ [8]

2.2.1 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ตามแรงกระทำกันระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับ กับผิวของตัวดูดซับ ได้แก่ การดูดซับแบบกายภาพ และการดูดซับแบบเคมี [9]

2.2.1.1 การดูดซับแบบกายภาพ (physisorption)

การดูดซับแบบกายภาพเป็นการดูดซับระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับ กับพื้นผิวของตัวดูดซับ ที่ยึดกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) โดยไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้าง เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้ง่าย และในการดูดซับลักษณะนี้ โมเลกุลของสารถูกดูดซับสามารถยึดเกาะพื้นผิวบริเวณใดก็ได้ภายในรูพรุนของตัวดูดซับ ไม่ว่าจะพื้นผิวหน้าโดยตรงของตัวดูดซับ หรือ ระหว่างพื้นผิวหน้าของสารถูกดูดซับกับสารถูกดูดซับ การดูดซับประเภทนี้เป็นการดูดซับที่สามารถเกิดขึ้นได้หลายชั้น (multilayer adsorption) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่กับชั้นโมเลกุลก่อนหน้า ซึ่งจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับ หรือจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ลักษณะสำคัญของการดูดซับทางกายภาพสรุปไว้ในตารางที่ 2.1

2.2.1.2 การดูดซับแบบเคมี (chemisorptions)

การดูดซับแบบเคมีเกิดขึ้นเมื่อสารถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่สูง ได้แก่ พันธะไอออนิก (ionic bond) หรือ พันธะโควาเลนต์ (covalent bond) ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นในการดูดซับแบบเคมีมีค่าสูง และมักมีค่าสูงกว่าความร้อนแฝงของการควบแน่นไอของสารถูกดูดซับประมาณ 3 เท่า การดูดซับประเภทนี้มักต้องการพลังงานกระตุ้น ดังนั้นจึงเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง ๆ และเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณพื้นผิวหน้าของตัวดูดซับเท่านั้น และเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) การดูดซับประเภทนี้จะไม่เกิดบนชั้นโมเลกุลของสารถูกดูดซับ ที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับ เช่นเดียวกับการดูดซับแบบกายภาพ ลักษณะสำคัญของการดูดซับทางเคมีสรุปไว้ในตารางที่ 2.1

การดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน นั่นคือการเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนทัลปีของระบบหลังการดูดซับมีค่าลดลง ตามสมการ $\Delta H_{ads} = \Delta G_{ads} + T\Delta S_{ads}$

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการผันกลับได้ โดยเมื่อระบบเข้าสู่สมดุลแล้ว อัตราการเคลื่อนที่ไปเกาะติดผิวตัวดูดซับเท่ากับอัตราการเคลื่อนที่ออกจากผิวตัวดูดซับ พลังงานกิบส์ของระบบที่เกิดการดูดซับแล้ว จะน้อยกว่า พลังงานกิบส์ของระบบสารถูกดูดซับรวมกับพลังงานกิบส์ของระบบตัวดูดซับ การเปลี่ยนแปลงพลังงานกิบส์สุทธิของระบบจึงลดลง ($\Delta G_{ads} < 0$) เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนโทรปีสุทธิของระบบ พบว่า โมเลกุลสารถูกดูดซับก่อนการดูดซับสามารถเคลื่อนที่ และหมุน ได้อย่างอิสระ ทำให้เกิดการชนกันมาก พลังงานเอนโทรปี (entropy) ณ อุณหภูมินั้น ๆ มีค่าสูง เมื่อเกิดการดูดซับ โมเลกุลบางส่วนยึดเกาะที่ผิวตัวดูดซับ ทำให้โมเลกุลชนกันได้น้อยลง พลังงานเอนโทรปี ณ อุณหภูมินั้นจึงมีค่าน้อยลง การเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนโทรปีสุทธิของระบบจึงลดลง ($T\Delta S_{ads} < 0$) ทำให้การเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนทัลปีของระบบหลังการดูดซับมีค่าลดลง การดูดซับจึงเป็นกระบวนการคายความร้อน [10]

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสำคัญของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี [11]

ลักษณะ	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. แรงที่กระทำ	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี เรียกว่า แรงกระตุ้นในการดูดซับ (Activated adsorption)
2. จำนวนชั้นการดูดซับ	แบบหลายชั้น	แบบชั้นเดียว
3. พลังงานกระตุ้น	ไม่มีพลังงานกระตุ้น	ใช้พลังงานกระตุ้นเล็กน้อย
4. ช่วงของอุณหภูมิ	ขึ้นอยู่กับจุดเดือดของตัวถูกดูดซับ	ขึ้นอยู่กับพลังงานกระตุ้น
5. ความร้อนในการดูดซับ	8-20 KJ/mol	40-800 KJ/mol

2.2.2 ตัวดูดซับ

ตัวดูดซับที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ซิลิกาเจล ซีโอไลต์ และพอลิเมอร์สังเคราะห์

1) ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) คือตัวดูดซับที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก อาจมีธาตุอื่นปนอยู่เล็กน้อยได้แก่ ธาตุไฮโดรเจน ธาตุไนโตรเจน ธาตุออกซิเจน และธาตุกำมะถัน เกิดจากวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบผ่านกระบวนการผลิต 2 ขั้นตอน ได้แก่

ขั้นตอนการผลิตถ่าน และขั้นตอนการสร้างโพรง ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง และมีรูพรุนมาก นอกจากนี้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มีอิเล็กตรอนอิสระ สามารถแลกเปลี่ยนประจุ ทำให้เกิดการยึดเกาะของสารต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี ถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้มักมีพื้นที่ผิวมากกว่า 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนตั้งแต่ต่ำกว่า 2 จนถึงมากกว่า 50 นาโนเมตร อุตสาหกรรมที่นิยมใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ เช่น การแยกก๊าซไนโตรเจนจากอากาศ กระบวนการเพิ่มความบริสุทธิ์ของฮีเลียม เป็นต้น [12-13]

2) ซิลิกาเจล (Silica gel) เป็นตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นจากเกลือซิลิเกต แล้วเกิดการรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นสารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกไซด์ขึ้น ตัวดูดซับซิลิกาเจลมีลักษณะโดยทั่วไปเป็นทรงกลมที่มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 6-25 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 100-850 ตารางเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวส่วนใหญ่ประกอบด้วยหมู่ SiOH และ SiOSi ทำให้พื้นผิวมีความเป็นขี้ ซึ่งสามารถดูดซับสารประกอบที่มีขี้ได้ เช่น น้ำ, เอทานอล, ฟีนอล และเอมีน เป็นต้น อุตสาหกรรมที่นิยมใช้ซิลิกาเจลเป็นตัวดูดซับ สำหรับแยกตัวประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกไซด์ (-OH) เช่น น้ำ อัลกอฮอล์ (ROH) และกรดคาร์บอกซิลิก (RCOOH) เป็นต้น [12]

3) แอกติเวเตด อะลูมินา (Activated alumina) เป็นสารประกอบอลูมิเนียมออกไซด์ (aluminium oxide) ที่เตรียมจากแร่ที่สารประกอบอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ได้รับการกระตุ้นในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย ทำให้เกิดอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีรูพรุนสูง พื้นผิวมีความเป็นขี้มากกว่าซิลิกาเจล โดยพื้นที่ผิวของอลูมิเนียมออกไซด์อยู่ในช่วง 250-350 ตารางเมตรต่อกรัม อุตสาหกรรมที่นิยมใช้อลูมินาออกไซด์เป็นตัวดูดซับ เช่น การกำจัดกรดไฮโดรคลอริกจากไฮโดรเจน เป็นต้น [8,12]

4) ตัวดูดซับพอลิเมอร์ (Polymeric Adsorbents) การเตรียมและการใช้ตัวดูดซับพอลิเมอร์ในอุตสาหกรรมโดยมากใช้โคพอลิเมอร์ของสไตรีนกับไดไวนิลเบนซีน ส่วนใหญ่ใช้ดูดซับสารอินทรีย์ที่ไม่มีขี้ออกจากสารละลาย และโคพอลิเมอร์ของอะคลิลิก แอซิด เอสเตอร์กับไดไวนิลเบนซีน ตัวดูดซับพอลิเมอร์มีพื้นที่ผิวมากกว่า 750 ตารางเมตรต่อกรัม [12]

5) ซีโอไลต์ (zeolite) เป็นผลึกที่มีรูพรุนของสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) ที่ประกอบด้วย SiO_4 และ AlO_4 ที่มีการใช้ออกซิเจนร่วมกัน ซีโอไลต์มีมากกว่า 150 ชนิด แต่ชนิดที่

ใช้ในอุตสาหกรรม คือ ซีโอดีชนิด A และ X ซีโอดีที่สังเคราะห์ได้มักมีโครงสร้างและลักษณะที่แน่นอน โดยความเป็นขั้วของพื้นผิวจะขึ้นอยู่กับชนิดของซีโอดี อุตสาหกรรมที่นิยมใช้ ซีโอดีเป็นตัวดูดซับ เช่น การกำจัดไอน้ำ หรือความชื้นออกจากก๊าซ การแยกแอมโมเนีย และ ไฮโดรเจน เป็นต้น [12]

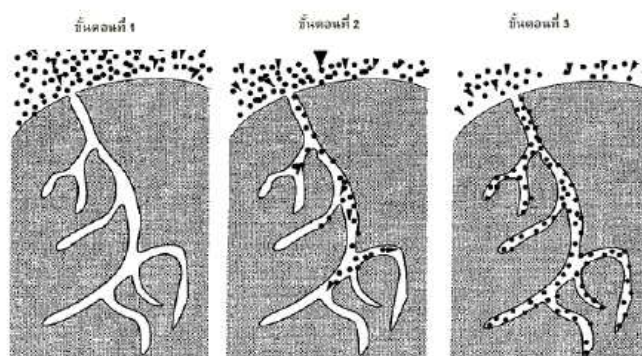
2.2.3 กลไกของการดูดซับ

การดูดซับโมเลกุลจากสารละลายโดยตัวดูดซับที่มีรูพรุน สามารถอธิบายได้ดังนี้ [14]

ขั้นตอนที่หนึ่ง การแพร่ภายนอก (external or film diffusion) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะแพร่ผ่านของเหลวบาง ๆ ที่หุ้มผิวของสารถูกดูดซับไปยังผิวของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่สอง การแพร่ภายใน (internal diffusion) โมเลกุลของสารถูกดูดซับแพร่เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ และเคลื่อนที่ไปตลอดพื้นผิวของรูพรุน

ขั้นตอนที่สาม สารถูกดูดซับเกิดการเกาะติดกับพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยแรงกายภาพหรือแรงเคมี



ภาพที่ 2.2 กลไกการดูดซับ

2.2.4 แบบจำลองสมดุลดูดซับ (Equilibrium Adsorption Model)

แบบจำลองสมดุลดูดซับ หรือไอโซเทอมการดูดซับ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสมดุลดูดซับ กับความดันของก๊าซของสารถูกดูดซับ หรือความเข้มข้นของสารถูกดูดซับใน

ของเหลวผสมที่สมดุล ณ อุณหภูมิการดูดซับคงที่ แบบจำลองสมดุลดูดซับที่นิยมใช้อธิบายผลการทดลอง ได้แสดงดังรายละเอียดต่อไปนี้ [15]

2.2.4.1 แบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี

แบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี มีความเหมาะสมสำหรับระบบดูดซับที่มีความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเจือจาง ปริมาณดูดซับจำเพาะที่สมดุลแปรตามความเข้มข้นสมดุลในของผสมแบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี แสดงดังสมการที่ 2.1

$$q = K_H C \quad \dots 2.1$$

โดยที่ K_H คือ ค่าคงที่สมดุลดูดซับของเฮนรี

2.2.4.2 แบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงเมียร์

แบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงเมียร์ มีสมมติฐาน คือ การดูดซับเกิดเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลที่ไม่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระตลอดพื้นผิวของตัวดูดซับ และพลังงานในการดูดซับจะมีค่าเท่ากันทุกบริเวณของการดูดซับ แบบจำลองการดูดซับมีลักษณะโค้งคว่ำ และเข้าสู่ค่าจำกัด ซึ่งมักกำหนดเป็นปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะสูงสุดตามสมมติฐาน แสดงดังสมการที่ 2.2

$$q = \frac{q_{\max} K_L C}{1 + K_L C} \quad \dots 2.2$$

แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นได้ดังสมการระหว่าง $1/q$ และ $1/C$ ดังสมการที่ 2.3

$$\frac{1}{q} = \left(\frac{1}{q_{\max} K_L} \right) \frac{1}{C} + \frac{1}{q_{\max}} \quad \dots 2.3$$

โดยที่ q_{\max} คือ ปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะสูงสุดของสารที่ถูกดูดซับ ต่อ น้ำหนักของสารดูดซับ
 K_L คือ ค่าคงที่สมดุลดูดซับของแลงเมียร์

2.2.4.3 แบบจำลองสมมูลคูดุคซึบของฟรุณดิช

แบบจำลองการสมมูลคูดุคซึบของฟรุณดิช เป็นแบบจำลองสมมูลคูดุคซึบที่มีลักษณะโค้งคว่ำหรือโค้งหงาย โดยที่ปริมาณสมมูลคูดุคซึบจำเพาะจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารถูกคูดุคซึบ แต่จะไม่ลู่เข้าสู่ค่าจำกัด ใช้ได้ทั้งกับการคูดุคซึบทางเคมี และการคูดุคซึบทางกายภาพ โดยมักมีความถูกต้องสูงกับระบบการคูดุคซึบสารละลายที่ค่อนข้างเจือจาง แบบจำลองการคูดุคซึบแบบฟรุณดิชแสดงดังสมการที่ 2.4

$$q = K_F C^n \quad \dots 2.4$$

แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นได้ดังสมการระหว่าง $\ln q$ กับ $\ln C$ ดังสมการที่ 2.5

$$\ln q = \ln K_F + n \ln C \quad \dots 2.5$$

โดยที่ K_F และ n คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองสมมูลคูดุคซึบของฟรุณดิช

2.2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการคูดุคซึบ ได้แก่ [16]

1) ลักษณะของตัวคูดุคซึบ

ลักษณะของตัวคูดุคซึบที่สำคัญ ได้แก่ (1) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน โดยการคูดุคซึบของสารละลายจะเพิ่มขึ้น เมื่อพื้นที่ผิวในการคูดุคซึบของตัวคูดุคซึบเพิ่มขึ้น (2) ขนาดของอนุภาค กล่าวคือ ตัวคูดุคซึบที่ไม่มีรูพรุนความสามารถในการคูดุคซึบเพิ่มขึ้น เมื่อตัวคูดุคซึบมีขนาดเล็กลง ส่วนตัวคูดุคซึบที่มีรูพรุน ความสามารถในการคูดุคซึบไม่ขึ้นกับขนาดของตัวคูดุคซึบ เพราะ การคูดุคซึบส่วนใหญ่เกิดที่พื้นที่ผิวของโครงสร้างที่เป็นรูพรุน (3) สภาพทางเคมีของพื้นผิว ได้แก่ ความเป็นขั้วบนผิวหน้าตัวคูดุคซึบจะส่งผลต่อสารถูกคูดุคซึบ

2) ธรรมชาติของสารถูกคูดุคซึบ

คุณสมบัติของสารถูกคูดุคซึบที่มีอิทธิพลต่อการคูดุคซึบ ได้แก่ ความยาวของสายโซ่ และมวลโมเลกุลของสารถูกคูดุคซึบ

3) ความปั่นป่วน

ความปั่นป่วนของระบบ จะทำให้อัตราเร็วของตัวถูกดูดซับในการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม หรือ การแพร่ในรูพรุนเปลี่ยนแปลงไป ถ้าระบบมีความปั่นป่วนที่ต่ำจะทำให้เกิดสารสะสมของสารเป็น ฟิล์มหนาอยู่บนผิวหน้าของตัวดูดซับ สารถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ไปยังพื้นผิวของตัวดูดซับได้ยาก ใน กรณีนี้อัตราการดูดซับจะถูกกำหนดโดยการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม แต่ถ้าระบบมีความปั่นป่วนสูง สารจะเคลื่อนที่อยู่บริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับเป็นฟิล์มบาง ทำให้สารถูกดูดซับเคลื่อนที่ไปยังผิวของ ตัวดูดซับได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนเข้าไปในโพรงของตัวดูดซับ ในกรณีนี้อัตราการดูดซับจะถูก กำหนดโดยการแพร่ในรูพรุน

4) อุณหภูมิ

เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน การดูดซับจะเกิดได้ดีที่ อุณหภูมิต่ำ แต่ก็มีการดูดซับบางชนิดเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง ส่วนใหญ่เป็นการดูดซับสารจำพวก โโลหะ เป็นต้น

2.2.6 ระบบการดูดซับ

ระบบการดูดซับ โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ระบบการดูดซับแบบกะ และ ระบบการดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง [17-18]

1) ระบบการดูดซับแบบกะเป็นระบบการดูดซับที่ให้ตัวดูดซับ และสารถูกดูดซับสัมผัสกัน ในระยะเวลาหนึ่ง ในระบบนี้การดูดซับจะเข้าสู่สมดุลดูดซับเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ สารถูกดูดซับในสารละลาย ขนาดของตัวดูดซับ และระยะเวลาสัมผัสกันของสารถูกดูดซับกับตัวดูด ซับ

2) ระบบการดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง แบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ แบบชั้นตรึง (fixed bed) แบบชั้นเคลื่อนที่ (moving bed) และแบบฟลูอิดไคซ์ (fluidized bed)

(1) ระบบการดูดซับแบบไหลต่อเนื่องแบบชั้นตรึง ตัวดูดซับจะบรรจุอยู่ในคอลัมน์ และอยู่ในลักษณะนิ่ง ๆ ของไหลหรือไอระเหยของสารถูกดูดซับไหลผ่านคอลัมน์ตลอดคอลัมน์ที่ บรรจุด้วยสารดูดซับในลักษณะไหลขึ้น หรือ ไหลลง

(2) ระบบการดูดซับแบบไหลต่อเนื่องแบบชั้นเคลื่อนที่ ระบบการดูดซับแบบนี้จะให้ตัวดูดซับที่มีการเสื่อมสภาพไหลออกไปพร้อม ๆ กับของไหล

(3) ระบบการดูดซับแบบไหลต่อเนื่องแบบฟลูอิดไรซ์ ระบบนี้จะให้ของไหลไหลขึ้นด้านบนด้วยความเร็วสูงมากพอให้ตัวดูดซับเกิดลอยได้ แต่ต้องไม่ให้ตัวดูดซับลอยขึ้นมากจนหลุดออกจากชั้นดูดซับ ในการควบคุมระบบให้ได้ผลอย่างสม่ำเสมอควรมีการเติมตัวดูดซับใหม่และปล่อยตัวดูดซับเก่าออก

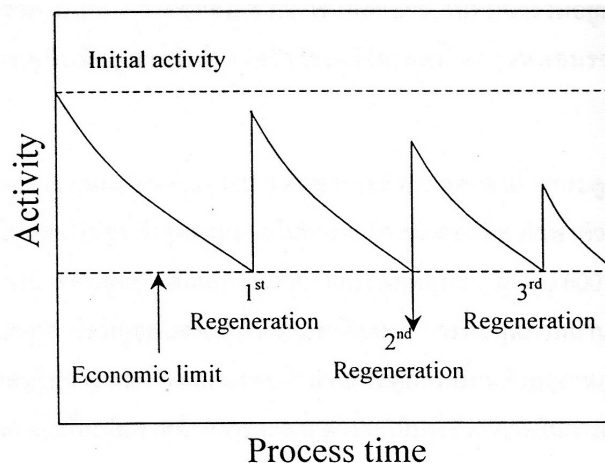
2.2.7 การเสื่อมสภาพของตัวดูดซับ

การเสื่อมสภาพของตัวดูดซับที่เกิดจากตัวดูดซับได้ดูดซับสารถูกดูดซับไว้จนเกิดการอิ่มตัว แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพเนื่องจากการแตกหรือหลุดของพื้นผิวตัวดูดซับ การเสื่อมสภาพลักษณะนี้ จะสามารถนำตัวดูดซับผ่านกระบวนการคืนสภาพ (regeneration process) ทำให้ตัวดูดซับกลับมาอยู่ในสภาพใช้งานได้อีกครั้ง

ในบางกรณีการเสื่อมสภาพของตัวดูดซับ เกิดในลักษณะ การหลุดหรือแตกออกของพื้นผิว บางส่วนของตัวดูดซับ เมื่อได้รับแรงกระแทกหรือแรงขัดสีในเครื่องปฏิกรณ์ระหว่างการดูดซับ ทำให้เกิดการสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลของเม็ดอนุภาคนั้น ๆ การเสื่อมสภาพในลักษณะนี้จะไม่นิยมนำตัวดูดซับกลับมาใช้งานใหม่ [10]

2.2.8 การคายกลับ หรือ การฟื้นฟูสภาพ (Desorption or Regeneration)

การคายกลับ หรือการฟื้นฟูสภาพ คือ กระบวนการนำสารถูกดูดซับออกจากพื้นผิวของตัวดูดซับ เพื่อรักษาสมรรถภาพการดูดซับของตัวดูดซับที่เสื่อมสภาพ ทำให้สามารถนำตัวดูดซับกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง เนื่องจากตัวดูดซับบางชนิดมีราคาแพงและใช้งานในปริมาณมาก หรือ เพื่อนำสารถูกดูดซับในตัวดูดซับกลับคืนมา ก่อนจะนำตัวดูดซับมาผ่านการฟื้นฟูสภาพต้องพิจารณาด้วยว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางกายภาพ หรือทางเคมี เพราะการดูดซับทางกายภาพสามารถย้อนกลับได้ ส่วนทางเคมีจะต้องใช้กระบวนการต่าง ๆ ที่ยุ่งยากกว่า การคายกลับทำได้ไม่สมบูรณ์นัก การนำตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่จะต้องพิจารณาถึงความสามารถในการดูดซับว่าเท่ากับการดูดซับของตัวดูดซับใหม่หรือไม่ด้วย



ภาพที่ 2.3 การลดลงของความสามารถของตัวดูดซับและกระบวนการฟื้นฟูสภาพ [19]

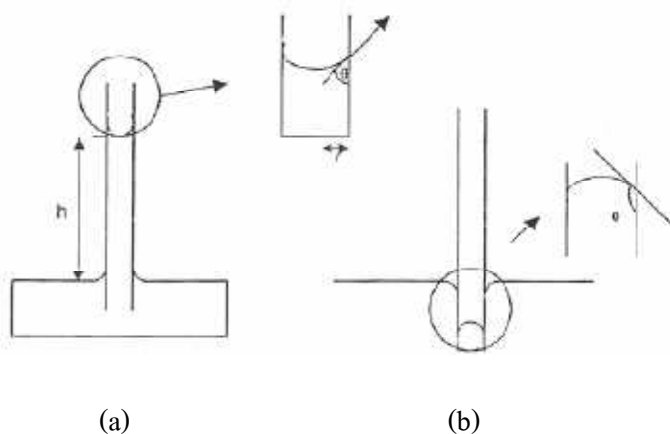
วิธีการปฏิบัติสำหรับการคายกลับ หรือการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับที่ใช้แล้วมีดังนี้ การเพิ่มอุณหภูมิ, การลดความดันย่อย, การลดความเข้มข้น, การไล่ด้วยของไหลเฉื่อย, การแทนที่ด้วยสารที่ดูดซับในตัวดูดซับนั้นได้ดีกว่า, การเปลี่ยนเงื่อนไขทางเคมี เช่น ความเป็นกรด-ด่าง ข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อเสียสำหรับการคายกลับด้วยวิธีต่าง ๆ [19]

วิธีการ	ข้อดี	ข้อเสีย
อุณหภูมิสลับ (Thermal swing)	<ul style="list-style-type: none"> - ดีสำหรับสารถูกดูดซับ ดูดซับได้ดีในตัวดูดซับ - ได้สารคายกลับ (Desorbate) ที่มีความเข้มข้นสูง - ใช้สำหรับก๊าซและของเหลว 	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิมีผลกระทบต่อสารถูกดูดซับ - อาจเกิดการสูญเสียความร้อน (Heat loss) - ใช้เวลาต่อหนึ่งรอบการดูดซับและการคายกลับนาน
ความดันสลับ (Pressure swing)	<ul style="list-style-type: none"> - ดีสำหรับสารถูกดูดซับ ดูดซับได้ไม่ดีในตัวดูดซับที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง 	<ul style="list-style-type: none"> - อาจต้องใช้ความดันต่ำมาก - พลังงานเชิงกลแพงกว่าพลังงานความร้อน
การแทนที่ (Displacement)	<ul style="list-style-type: none"> - ดีกรณีมีสารถูกดูดซับชนิดอื่นดูดซับบนตัวดูดซับได้ดีกว่าสารถูกดูดซับหลัก - ไม่เกิดปฏิกิริยาการแตก (cracking reaction) เนื่องจากการคายกลับ - ไม่เกิดผลกระทบจากอุณหภูมิกับสารถูกดูดซับ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องแยกและการนำผลิตภัณฑ์กลับ - หาสารที่ใช้แทนที่สารถูกดูดซับยาก
การไล่ด้วยก๊าซ (Purge gas stripping)	<ul style="list-style-type: none"> - จำเป็นที่อุณหภูมิและความดันคงที่ 	<ul style="list-style-type: none"> - เฉพาะสำหรับสารถูกดูดซับดูดซับในตัวดูดซับได้ด้วยแรงกระทำระหว่างกันอ่อน - โดยปกติจะไม่ใช้เมื่อจำเป็นต้องนำสารคายกลับกลับมา
การไล่ด้วยไอน้ำ	<ul style="list-style-type: none"> - ข้อดีเช่นเดียวกับอุณหภูมิสลับและการแทนที่ 	

2.2.9 การดูดซับของเหลวด้วยแรงคะปิลารี [19]

การดูดซับด้วยแรงคะปิลารีนั้นขึ้นกับแรงตึงผิวของสาร แรงตึงผิวของสารเกิดจากโมเลกุลของของเหลวเคลื่อนที่ตลอดเวลา ภายใต้อิทธิพลของโมเลกุลรอบด้านเกือบเท่ากันทุกทิศทุกทาง ส่วนโมเลกุลที่ผิวถูกดึงดูดด้วยโมเลกุลที่อยู่ด้านข้างและด้านล่าง ทำให้ดูเหมือนว่าโมเลกุลนั้นถูกแรงดึงเข้ามาภายในของเหลวมากกว่า แรงนี้จะพยายามลดพื้นที่ผิวของของเหลวให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้ เพื่อลดจำนวนโมเลกุลที่ผิวหน้าของของเหลวให้น้อยลง จึงเกิดความตึงผิวขึ้น การวัดความตึงผิวของของเหลววิธีหนึ่งคือ การจุ่มหลอดคะปิลารีรัศมี r ลงในของเหลวที่ต้องการวัดความตึงผิว แสดงดังรูปที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 วิธีวัดความตึงผิวโดยใช้หลอดคะปิลารี (a) ปรากฏการณ์ทั่วไปของของเหลวในหลอดคะปิลารี (b) เมื่อแรงดึงดูดของโมเลกุลที่เหมือนกัน (Cohesion) มากกว่าแรงดึงดูดของโมเลกุลที่ต่างกัน (Adhesion)

ค่าแรงตึงผิวสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.6

$$\gamma = \frac{h\rho gr}{2\cos\theta} \quad \dots(2.6)$$

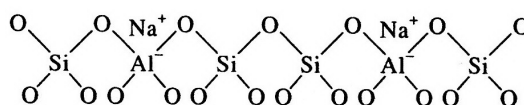
แรงดึงดูดโมเลกุลที่ต่างกัน เรียกว่า แรงยึดติด (Adhesion force) ส่วนแรงดึงดูดโมเลกุลที่เหมือนกัน เรียกว่า แรงเชื่อมแน่น (Cohesion force) ถ้าแรงยึดติดมากกว่าแรงควบแน่น ของเหลวจะถูกดึงขึ้นไปตามผนัง ซึ่งของเหลวส่วนใหญ่มีลักษณะเช่นนี้ แต่ถ้าแรงเชื่อมแน่นแข็งแรงกว่าแรง

ยึดติด ของเหลวในหลอดอะปิลลารีจะต่ำลง เช่น การไหลของปรอทในหลอดอะปิลลารี หรือน้ำหยดบนพื้นที่สะอาด ปรากฏการณ์การไหลของของเหลวขึ้นสู่หลอดอะปิลลารีด้วยความตึงผิวสามารถนำมาอธิบายปรากฏการณ์การไหลของของเหลวขึ้นสู่วัตถุที่มีรูพรุนขนาดเล็กได้เช่นกัน

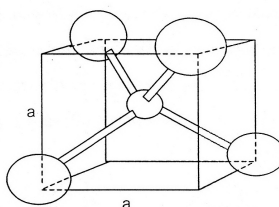
2.3 ซีโอไลต์ (Zeolite)

2.3.1 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์

ซีโอไลต์มีความเป็นผลึกที่สูง เป็นสารประกอบจำพวกอลูมิโนซิลิเกต (crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของ ซีโอไลต์เป็นสารประกอบออกไซด์ร่วมระหว่างธาตุซิลิกอนกับอลูมิเนียม โดยอะตอมของซิลิกอน (หรืออลูมิเนียม) แต่ละอะตอมมีพันธะเคมีกับอะตอมของออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) ดังแสดงในภาพที่ 2.5 เกิดเป็นผลึกรูปทรงสี่หน้า (tetrahedron) มีอะตอมของซิลิกอน หรืออลูมิเนียม อยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ดังแสดงในภาพที่ 2.6 โดยอะตอมของออกซิเจนแต่ละอะตอมมีพันธะกับอะตอมของซิลิกอน 2 อะตอม หรืออะตอมของซิลิกอนและอลูมิเนียมอย่างละ 1 อะตอม จึงเกิดเป็น โครงผลึกต่อเนื่องอย่างสม่ำเสมอ เป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น และเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็งมีรูพรุนหรือโพรงที่ต่อกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ซึ่งโพรงหรือรูพรุนขนาดตั้งแต่ 0.3 ถึง 1.0 นาโนเมตร [20]

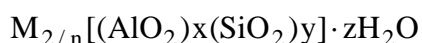


ภาพที่ 2.5 โครงสร้าง 2 มิติ ของอลูมิโนซิลิเกต [21]



ภาพที่ 2.6 รูปทรงสี่หน้าของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิกอนหรืออลูมิเนียมในหน่วยย่อยของซีโอไลต์ (หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ) [22]

ซีโอไลต์เป็นผลึกทรงสี่หน้าที่มีอะตอมของธาตุอลูมิเนียมเป็นจุดศูนย์กลางเป็นประจุลบ จึงต้องดุลประจุลบดังกล่าวด้วยไอออนของธาตุโลหะหมู่หนึ่ง (ดูภาพที่ 2.5) และหมู่สอง เช่น ธาตุโซเดียม ธาตุโพแทสเซียม ธาตุแคลเซียม เป็นต้น หรือไอออนของธาตุโลหะหมู่อื่น ๆ เช่น ไอออนธาตุไฮโดรเจน ไอออนสารประกอบแอมโมเนีย (NH_4^+) และอนุพันธ์ของแอมโมเนีย (เช่น $\text{N}(\text{CH}_3)_4^+$) โครงสร้างที่เป็นไอออนิกทำให้ซีโอไลต์มีคุณสมบัติความเป็นขั้วแตกต่างกันได้ นอกจากนี้ยังมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก สามารถระเหยออกไปโดยให้ความร้อน ซีโอไลต์มีสูตรโมเลกุล ดังนี้



โดยที่ M แทนไอออนดุลประจุ

n แทนจำนวนประจุของไอออน M

x, y เป็นเลขจำนวนเต็ม ค่า y/x มากกว่าหรือเท่ากับ 1 ซึ่งมักใช้เป็นตัวชี้ตัวหนึ่งสำหรับแบ่งชนิดของซีโอไลต์

z เป็นจำนวน โมลของน้ำที่อยู่ในผลึกซีโอไลต์

ซีโอไลต์เมื่อได้รับความร้อนแล้วโมเลกุลของน้ำในช่องว่างจะระเหยออกมาอย่างต่อเนื่อง โดยโครงสร้างโมเลกุลจะไม่มีเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ช่องว่างภายในโครงสร้างสามารถถูกเติมด้วยน้ำได้เช่นกัน มีลักษณะเป็น reversible dehydration อัตราส่วนของธาตุซิลิกอนต่อธาตุอลูมิเนียม และขนาดโพรงเฉลี่ยของซีโอไลต์ เป็นปัจจัยสำคัญต่อการจำแนกชนิดของซีโอไลต์ ซีโอไลต์บางชนิดอาจมีโพรงขนาดเดียว บางชนิดอาจมีโพรง 2-3 ขนาด ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงอะตอมของธาตุออกซิเจนในบริเวณใกล้เคียงกันเป็น [23-24]

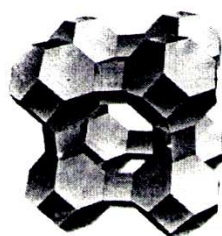
2.3.2 ชนิดของซีโอไลต์

ซีโอไลต์สามารถแบ่งได้ 2 ชนิด ตามลักษณะของการเกิด คือ ซีโอไลต์ธรรมชาติ (natural or mineral zeolites) และซีโอไลต์สังเคราะห์ (synthesis zeolites)

1) ซีโอไลต์ธรรมชาติ (Mineral zeolites or Naturally occurring zeolites) ส่วนใหญ่ค้นพบจากการทำเหมืองแร่ เป็นกลุ่มของผลึกอลูมิโนซิลิเกตของโมโนหรือไดวาเลนที่ต่าง ตัวอย่างเช่น clinoptilolite ซีโอไลต์ธรรมชาตินำมาใช้ประโยชน์ในการก่อสร้าง ใช้เป็นสารเติมเต็มในอุตสาหกรรมกระดาษ นอกจากนี้ ซีโอไลต์ธรรมชาติยังมีคุณสมบัติเป็นโมเลกุลาร์ซีฟ (molecular sieves) และตัวแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) จึงนำมาใช้เป็นสารดูดซับในอุตสาหกรรมแยกก๊าซธรรมชาติและแยกแอมโมเนียในขบวนการกำจัดน้ำทิ้ง [25]

2) ซีโอไลต์สังเคราะห์ (synthesis zeolite) การสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยทั่วไปใช้วิธีไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal process) ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาของแหล่งอลูมินา (เช่น sodium aluminates หรือ aluminum sulfate) ซิลิกา (เช่น sodium water glass, silica gel) กับด่าง (เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์) เกิดเป็นเจลที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน และก่อตัวเป็นผลึกอย่างช้า ๆ ภายในช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิการเกิดผลึกอยู่ในช่วงประมาณ 150 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่านั้นเท่ากับความดันของไอน้ำอิ่มตัวในขณะนั้น บางครั้งอาจเกิดผลึกซีโอไลต์มากกว่าหนึ่งชนิด ตัวอย่างของซีโอไลต์สังเคราะห์ เช่น ซีโอไลต์ A, ซีโอไลต์ Y, ซีโอไลต์ F, ซีโอไลต์ M เป็นต้น ซีโอไลต์สังเคราะห์มักจะมีโครงสร้างและคุณสมบัติที่แน่นอน [26]

ซีโอไลต์ A ประกอบด้วย 24 รูปของทรงสี่หน้าเป็น 12 รูปของ SiO_4 และ 12 รูปของ AlO_4 ดังแสดงในภาพที่ 2.7 และมีน้ำบรรจุอยู่ 27 โมเลกุล โดยมีการสลับกันของ SiO_4 และ AlO_4 ภายในโมเลกุล ทั้งนี้ เพราะอัตราส่วนของ Si:Al เป็น 1:1 ส่วนขนาดโพรงของซีโอไลต์ A ขึ้นอยู่กับไอออนที่ดูลประจุ ดังตารางที่ 2.3 ส่วนขนาดของโพรงซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ สรุปไว้ในตารางที่ 2.4



ภาพที่ 2.7 แสดงซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด A [16]

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของซีโอไลต์ A [12]

ชนิด	ไอออนโลหะ	สูตรโครงสร้าง	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโพรง (°A)
3A	K ⁺	K ₁₂ [(AlO ₂) ₁₂ (SiO ₂) ₁₂]	2.9
4A	Na ⁺	Na ₁₂ [(AlO ₂) ₁₂ (SiO ₂) ₁₂]	3.8
5A	Ca ²⁺	Ca ₅ Na ₂ [(AlO ₂) ₁₂ (SiO ₂) ₁₂]	4.4

ตารางที่ 2.4 ขนาดโพรงของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ [27]

ชนิด	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโพรง (°A)	โมเลกุลขนาดใหญ่ที่สุดที่ถูกดูดซับ
Small Pore		
3A	3.0	H ₂ O, NH ₃
4A	3.8	N ₂ , C ₂ H ₆
5A	4.3	n-alkanes, alkanes
Erionite	3.6 x 5.2	
Titanium-silicalite	3.7 – 4.0	
Medium Pore		
Pentasil	5.1 x 5.6	CCl ₄ , m-xylene
Mordenite	2.9 x 5.7	
Large Pore		
Faujasite	7.4	(C ₄ H ₉) ₃ N, naphthalenes
ALPO	3 – 10	

2.3.3 คุณสมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์ [21]

- 1) การแลกเปลี่ยนไอออน โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลต์เป็นกระบวนการผันกลับได้
- 2) สมบัติความเป็นรูพรุนและโครงสร้างที่เป็นผลึก โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุนทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามาก

3) สมบัติในการเลือกสรร คัดขนาดและรูปร่างของโมเลกุลที่จะผ่านเข้าออกจากโพรง หรือ รูพรุน โดยโครงสร้างของซีโอไลต์จะมีโพรงขนาดต่าง ๆ กัน ที่ตำแหน่งทางเข้าของโพรง จะเรียกว่า ปากโพรง (aperture) โมเลกุลที่มีรูปร่างและขนาดพอเหมาะเท่านั้นที่จะสามารถผ่านเข้าออก จากปากโพรงของซีโอไลต์ได้ ทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติในการกรองแยกโมเลกุลได้ (molecular sieves)

4) สมบัติการดูดซับ เนื่องจากรูพรุนของซีโอไลต์มีลักษณะเป็นโพรงที่มักจะมีโมเลกุลของ น้ำอยู่ภายใน เมื่อไอน้ำทำให้เกิดช่องว่างภายในจำนวนมาก เนื่องจากรูพรุนมีสภาพั้วปรับเปลี่ยน ได้ตามอัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่ออลูมินา ทำให้ซีโอไลต์สามารถดูดซับสารอื่นเข้าสู่รูพรุนได้ตาม สภาพั้ว นอกจากนี้สามารถกำจัดสารอื่น ๆ ที่ถูกดูดซับไว้ในรูพรุนของซีโอไลต์ได้โดย กระบวนการต่าง ๆ เช่น การให้ความร้อน การแทนที่ เป็นต้น

2.3.4 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์

1) ตัวแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange)

ประจุบวกที่เกาะอยู่กับซีโอไลต์จะเกาะอยู่กับหลวม ๆ เมื่ออยู่ในสารละลายจะเกิดการแตก ตัวออก และแลกเปลี่ยนประจุกับ โลหะอื่นที่อยู่ในสารละลาย จึงมีการนำซีโอไลต์มาใช้ลดความกระด้าง ของน้ำแทนฟอสเฟตในผงซักฟอก โดยโลหะอัลคาไลน์ เช่น โซเดียม หรือ โพแทสเซียม ที่เกาะกับ ซีโอไลต์จะแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียม และแมกนีเซียม ที่อยู่ภายในน้ำกระด้าง หรือใช้ซีโอไลต์ กำจัดแอมโมเนียจากน้ำเสีย โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกของแอมโมเนียกับโลหะ โซเดียมในโพรง ของซีโอไลต์ [26]

2) ตัวดูดซับ (adsorption)

เนื่องจากซีโอไลต์มีสมบัติในการเลือกสรร และการดูดซับ จึงสามารถประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ เป็นตัวดูดซับได้ เช่น การดูดซับความชื้นเพื่อผลิตอากาศแห้ง, การดูดซับสารมีกลิ่นและสารมีสีใน สารละลายน้ำตาล หรือน้ำมันพืชและไขมันสัตว์, การดูดซับไอระเหยของสารตัวทำละลายอินทรีย์ ที่ใช้เคลือบผิววัสดุต่าง ๆ เช่น เครื่องเรือน ตัวถังรถยนต์ ในก๊าซที่ปล่อยสู่อากาศ เป็นต้น [24]

3) ประโยชน์อื่น ๆ

การใช้งานซีโอไลต์ในด้านอื่น ๆ เช่น ใช้ในการเกษตร และการก่อสร้างในเชิงการเกษตร นั้น จะนำซีโอไลต์ธรรมชาติปรับเปลี่ยนองค์ประกอบบริเวณที่มีการแลกเปลี่ยนประจุ โดยการสารถอาหารของพืชลงไปแทน สารถอาหารนั้นจะค่อย ๆ ปลดปล่อยออกมา ทำให้สารถอาหารไม่ถูกชะล้างไปโดยง่าย [26]

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถของตัวดูดซับชนิดที่ต่างกััน รวมถึงปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อการดูดซับของสารผสมระหว่างน้ำและเอทานอล อาทิเช่น รูปร่างของโมเลกุลาร์ซีฟ, ขนาดของโมเลกุลาร์ซีฟ, อุณหภูมิที่ทดลอง และความเข้มข้นของเอทานอล เพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจในงานวิจัยมากยิ่งขึ้นจึงขอกกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพอสังเขปดังนี้

Sowerby, S. และ Crittenden, B.D. [28] เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับน้ำออกจากของผสมเอทานอลปนน้ำ ในสภาวะก๊าซ โดยใช้ตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟที่แตกต่างกันสี่ชนิด ได้แก่ 3A, 4A, 5A และ 10A พบว่า ที่โมเลกุลาร์ซีฟ 4A สามารถแยกน้ำออกจากของผสมได้ดีที่สุด และใช้พลังงานในการดำเนินการต่ำสุด ทั้งนี้เนื่องจากตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ 4A มีขนาดของรูพรุนที่ใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ 3A ทำให้น้ำถูกดูดซับได้ง่ายกว่า ส่วนตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ 5A และ 10A ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการแยกน้ำออกจากของผสมเอทานอลปนน้ำ เพราะตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟทั้งสองชนิดมีรูพรุนขนาดใหญ่ ทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลเอทานอลเข้าไปได้ด้วยเช่นกัน

Carmo, M.J. และ Gubulin, J.C. [29] ศึกษาผลทางเทอร์โมไดนามิกส์และไคลน์เนติกส์ของการดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยซีโอไลต์ 3A ที่มีรูปร่างแตกต่างกัน 2 แบบ คือ แบบที่หนึ่งซีโอไลต์ 3A ที่มีลักษณะทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.38 ถึง 4.76 มิลลิเมตร และแบบที่สองซีโอไลต์ 3A มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.65 และมีความยาว 4.00 มิลลิเมตร ทดลองในสถานะของเหลวที่อุณหภูมิ 25, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส

เพื่อศึกษาผลทางเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่า ซีโอไลต์ทั้งสองแบบมีปริมาณการดูดซับใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิเดียวกัน และปริมาณการดูดซับมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ส่วนผลทางไคลเนติกส์ พบว่า ซีโอไลต์ทั้งสองแบบมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusivity) สูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาตัวดูดซับรูปทรงกระบอกที่อุณหภูมิคงที่ อัตราการดูดซับมีค่าลดลง เมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้น ขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าคงที่ แสดงว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เปลี่ยนแปลงไป

Carmo, M.J., Adeodato, M.G., Moreira, A.M., Parente, E.J.S. และ Vieira, R.S. [30] ศึกษาไคลเนติกส์การดูดซับและเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำ ในสถานะของเหลวโดยใช้แป้งเป็นตัวดูดซับ การศึกษาผลของเทอร์โมไดนามิกส์ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของผสมเอทานอลปนน้ำในช่วงร้อยละ 0 ถึง 50 โดยมวล และการศึกษาผลของไคลเนติกส์การดูดซับใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของผสมเอทานอลปนน้ำประมาณร้อยละ 90 โดยมวล มีการตั้งสมมติฐานในการศึกษาว่าแอลกอฮอล์ไม่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ จากการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความเข้มข้นของน้ำในของแข็งมีค่าลดลง และเมื่อความเข้มข้นน้ำในของเหลวมีค่ามากขึ้น จะทำให้ความเข้มข้นน้ำในของแข็งมีค่ามากขึ้นด้วย ซึ่งแบบจำลองสมดุลการดูดซับที่มีความเหมาะสมคือแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ และจากการศึกษาผลของไคลเนติกส์การดูดซับพบว่า อัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยในระบบการดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำ พบว่า ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาการดูดซับ 30 นาที ปริมาณการดูดซับเข้าใกล้ 100 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณที่สมดุล และที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาการดูดซับ 30 นาที ปริมาณการดูดซับเป็นประมาณร้อยละ 80 ของปริมาณที่สมดุล นั่นคือเมื่ออุณหภูมิในการดูดซับลดลง ระบบการดูดซับใช้เวลาเข้าสู่สมดุลนานขึ้น

จิระเดช ฮายุกต์ และ วิทยา เทพไพฑูรย์ [31] ศึกษาการดูดซับไอน้ำออกจากของผสมเอทานอลปนน้ำ ในสถานะก๊าซด้วยโมเลกุลาร์ซีฟ 4A บรรจุในแพคคอตัมน์ ที่อุณหภูมิ 85 °C ความดันบรรยากาศ พบว่า ความเร็วการไหลของไอผสมผ่านคอตัมน์ดูดซับส่งผลต่อค่า Breakthrough Time (t_b), ค่า Length of Unused Bed (LUB) และ ค่า Length of Mass Transfer Zone (L_{MTZ}) เมื่อ

ปรับค่าทั้งสามให้มีความเหมาะสมจะสามารถเพิ่มความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำได้จากความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 95.5 โดยมวล ให้สูงขึ้นเป็นความเข้มข้นร้อยละ 99.5 โดยมวลได้

ฐิติ เลิศวรศิริกุล [32] ศึกษาการดูดซับน้ำในของผสมเอทานอลปนน้ำโดยใช้โมเลกุลาร์ซีฟ 3A และ 4A บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง อุณหภูมิเบดเริ่มต้นระหว่าง 80 ถึง 110 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นเริ่มต้นของของผสมเอทานอลปนน้ำร้อยละ 85 ถึง 95 โดยมวล พบว่า โมเลกุลาร์ซีฟ 3A มีความเหมาะสมในการแยกน้ำออกจากของผสมเอทานอลปนน้ำมากกว่าโมเลกุลาร์ซีฟ 4A และจากการทดลองพบว่าโมเลกุลาร์ซีฟ 4A มีการดูดเอทานอลเข้าไปบางส่วนเนื่องจากการคายความร้อนอย่างมากในขณะที่มีการดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำ การผสมตัวดูดซับของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A และ 4A ไม่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำ และแบบจำลองสมดุลดูดซับแบบแลงเมียร์ มีความเหมาะสมสำหรับใช้อธิบายการดูดซับน้ำจากของผสมเอทานอลปนน้ำ ด้วยตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ 3A แสดงว่าการดูดซับน้ำด้วยโมเลกุลาร์ซีฟเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว

Al-asheh, S., Banat, F. และ Al-lagtah, N. [33] ศึกษาความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟที่แตกต่างกันสามชนิด คือ 3A , 4A และ 5A ซึ่งทำการทดลองในสภาวะแก๊สพิจารณาความสามารถของการดูดซับจากค่า Breakthrough Time และความเข้มข้นของน้ำที่ทางออกของคอลัมน์ เมื่อเปรียบเทียบตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟทั้งสามชนิด โมเลกุลาร์ซีฟ 3A มีความเหมาะสมในการแยกของผสมเอทานอลปนน้ำได้มากที่สุด รองลงมาคือ โมเลกุลาร์ซีฟ 4A และโมเลกุลาร์ซีฟ 5A ไม่มีความเหมาะสมในการแยกของผสมเอทานอลปนน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลาร์ซีฟ 5A มีขนาดของรูพรุนที่ใหญ่กว่ารูพรุนของโมเลกุลเอทานอลทำให้โมเลกุลเอทานอลเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนของตัวดูดซับ และถูกดูดซับไว้ ส่วนโมเลกุลน้ำมีขนาดเล็กกว่าขนาดรูพรุนของโมเลกุลาร์ซีฟทั้งสามชนิด ทำให้โมเลกุลน้ำถูกดูดซับได้ง่าย

Beery, K.E. และ Ladisch, M.R. [34] ศึกษาปัจจัยเบื้องต้นที่ส่งผลกระทบต่อการใช้ตัวดูดซับน้ำจากของผสมของผสมเอทานอล ในสถานะของเหลว โดยทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในช่วงร้อยละ 1 ถึง 20 โดยมวลน้ำ ซึ่งใช้ตัวดูดซับจากแป้งชนิดต่าง ๆ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับตัวดูดซับอนินทรีย์ ได้แก่ ซิลิกาเจล และโมเลกุลาร์ซีฟ พบว่า ที่ความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำเริ่มต้นต่ำกว่าร้อยละ 10 โดยมวลน้ำ ตัวดูดซับอนินทรีย์ให้ปริมาณการดูด

ซับต่อกรัมตัวดูดซับที่สูงกว่าตัวดูดซับที่ได้จากแป้ง และที่ความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 10 โดยมวลน้ำ การใช้ตัวดูดซับที่ได้จากแป้งถูกจำกัด เนื่องจากตัวดูดซับเริ่มไม่รวมตัวกัน เมื่อเวลาที่ใช้ในการดูดซับนานเกินไป

Crawshaw, J.P. และ Hills, J.H. [35] ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของไอผสมเอทานอลปนน้ำ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ ใช้ตัวดูดซับเป็นแป้งข้าวโพด และศึกษาการคายกลับของสารในตัวดูดซับโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ผ่านไปยังเม็ดตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้ว จากการศึกษาพบว่า เมื่อเวลาผ่านไป รูปแบบของการดูดซับเอทานอลมีรูปร่างผิดปกติ กล่าวคือ ในช่วง 100 นาทีแรกปริมาณการดูดซับมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและลดลงไม่แน่นอน แต่หลังจาก 100 นาทีผ่านไป ปริมาณการดูดซับเอทานอลมีค่าเพิ่มขึ้นเสมือนเมื่อมีการดูดซับแล้วเกิดการคายกลับชั่วคราว และต่อมาเกิดการดูดซับอีกครั้ง ส่วนการคายกลับของเอทานอลในตัวดูดซับ พบว่า ในช่วงเริ่มต้นการคายกลับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และค่อย ๆ ลดลง เมื่อเวลาผ่านไป

Ivanova, E., Damgaliev, D. และ Kostova, M. [25] ศึกษากระบวนการดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยตัวดูดซับ clinoptilolite ซึ่งเป็นซีโอไลต์ธรรมชาติประเภทหนึ่ง ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเป็น 9.73 ในการทดลองได้ดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำในสถานะของเหลว และในการหาปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับต่อกรัมตัวดูดซับ หาได้โดยสมดุลมวลสารในระบบ โดยมีสมมุติฐานว่ามวลของเอทานอลในสถานะของเหลวไม่มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างที่ทดลอง จากการทดลองพบว่า แบบจำลองสมดุลการดูดซับที่เหมาะสมคือแบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงเมียร์ และระบบเข้าสู่สมดุลการดูดซับภายในเวลา 24 ชั่วโมง

Banat, F.A., Abu Al-rub, F.A. และ Simadl, J. [4] ศึกษาผลของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A และ 4A บนสมดุลไอ-ของเหลว ของของผสมเอทานอลปนน้ำ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า การดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยโมเลกุลาร์ซีฟส่งผลต่อสมดุลไอ-ของเหลว เนื่องจากผลของแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของโมเลกุลาร์ซีฟกับองค์ประกอบในของผสม กล่าวคือ แรงกระทำระหว่างโมเลกุลของโมเลกุลาร์ซีฟกับสารมีขั้ว มีค่ามากกว่าแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของโมเลกุลาร์ซีฟกับสารไม่มีขั้ว ดังนั้น น้ำซึ่งเป็นสารที่มีความเป็นขั้วมากกว่าเอทานอลจะมีความ

เข้มข้นที่ปรากฏในเฟสไอน้อยกว่าในโมเลกุลาร์ซีฟ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาถึงผลของน้ำหนักของโมเลกุลาร์ซีฟ โดยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณโมเลกุลาร์ซีฟมากกว่าค่าที่เหมาะสม จะไม่ทำให้ประสิทธิภาพของการแยกเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงผลของรูพรุนของโมเลกุลาร์ซีฟพบว่า แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A กับของผสมเอทานอลปนน้ำ มีค่าสูงกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของโมเลกุลาร์ซีฟ 4A กับของผสมเอทานอล-น้ำ แต่ทั้งนี้ผู้วิจัยไม่ได้ศึกษาถึงการคายกลับของสารในโมเลกุลาร์ซีฟทั้งสองชนิด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 สารเคมีและเครื่องมือวิเคราะห์

3.1.1 ของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำเป็น 0.9222 และ 0.995

3.1.2 ซีโอไลต์ชนิด 4A พาณิชย

3.1.3 น้ำกลั่น

3.1.4 เครื่องมือวิเคราะห์พื้นผิว (Bruneur-Emmet-Teller)

3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติและคุณลักษณะของซีโอไลต์ 4A

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ, ปริมาตรรูพรุนจำเพาะ และขนาดรูพรุนเฉลี่ยด้วยเครื่องมือวิเคราะห์พื้นผิว (Bruneur-Emmet-Teller)

3.3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับสัดส่วนเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ

3.3.1 เตรียมของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีสัดส่วนเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ เป็น 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 และ 0.9

3.3.2 วัดค่าความหนาแน่นของแต่ละความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำ ด้วยขวดวัดความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 27,30 และ 35 องศาเซลเซียส ทำซ้ำอุณหภูมิละ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นที่วัดได้

3.3.3 ศึกษาค่าปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไป กับสัดส่วนเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ ค่าการขยายตัวทางความร้อนของของผสมเอทานอลปนน้ำ และความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ

3.4 การทดลองดูดซับน้ำและเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยซีโอไลต์ 4A

3.4.1 ศึกษาสมมูลดูดซับน้ำและเอทานอลบริสุทธิ์

3.4.1.1 นำน้ำมา 20 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วนำไปชั่ง จากนั้นเติมซีโอไลต์ 4A ปริมาตรร้อยละ 10 ของมวลน้ำก่อนดูดซับ แล้วนำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 70 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบตามเวลาแยกซีโอไลต์ 4A ออกจากน้ำ แล้วชั่งน้ำหนักของน้ำที่แยกออกมา และซีโอไลต์ 4A หลังการดูดซับ

3.4.1.2 ทดลองซ้ำ 3.4.1.1 โดยเปลี่ยนเวลาการดูดซับเป็น 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที

3.4.1.3 ทดลองซ้ำ 3.4.1.1 – 3.4.1.2 โดยเปลี่ยนจากน้ำเป็นของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีสัดส่วนมวลเอทานอลเป็น 0.995

3.4.2 แบบจำลองสมมูลดูดซับน้ำและเอทานอลช่วงสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำมากกว่า 0.9222

3.4.2.1 วัดความหนาแน่นและอุณหภูมิของของผสมเอทานอลปนน้ำ เพื่อหาความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำ ก่อนการดูดซับ

3.4.2.2 นำของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีสัดส่วนมวลเอทานอลเป็น 0.9222 มา 20 กรัม (ประมาณ 25 มิลลิลิตร) ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วนำไปชั่ง จากนั้นเติมซีโอไลต์ 4A ปริมาตรร้อยละ 10 ของน้ำหนักของของผสมเอทานอลปนน้ำ แล้วนำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 70 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบตามเวลาแยกซีโอไลต์ 4A ออกจากของผสมเอทานอลปนน้ำ แล้วชั่งน้ำหนักของของผสมเอทานอลปนน้ำที่แยกออกมา และซีโอไลต์ 4A หลังการดูดซับ และวัดความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ เพื่อหาความเข้มข้นหลังการดูดซับของของผสมเอทานอลปนน้ำ

3.4.2.3 ทดลองซ้ำ 3.4.2.1 – 3.4.2.2 โดยเปลี่ยนเวลาการดูดซับเป็น 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที

3.4.2.4 ทดลองซ้ำ 3.4.2.1 – 3.4.2.3 โดยเปลี่ยนปริมาณซีโอไลต์เป็นร้อยละ 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 ของน้ำหนักของผสมเอทานอลปนน้ำเริ่มต้นก่อนดูดซับ

3.4.2.5 วิเคราะห์หาเวลาสมดุลการดูดซับ และสร้างแบบจำลองสมดุลดูดซับน้ำและเอทานอลสำหรับช่วงสัดส่วนเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำสูงกว่า 0.9222

3.4.3 แบบจำลองสมดุลดูดซับน้ำและเอทานอลช่วงสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำเป็น 0-0.995

3.4.3.1 เตรียมของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีสัดส่วนเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำเป็น 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7

3.4.3.2 น้ำของผสมเอทานอลปนน้ำตามความเข้มข้นที่ได้เตรียมไว้มา 20 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วนำไปชั่ง เติมใช้ปริมาณซีโอไลต์ 4A ร้อยละ 30 ของน้ำหนักของผสมเอทานอลปนน้ำก่อนดูดซับ ใช้เวลาการดูดซับเท่ากับเวลาสมดุลดูดซับที่ได้จากการทดลอง 3.4.2 เมื่อครบตามกำหนดแยกซีโอไลต์ 4A ออกจากของผสมเอทานอลปนน้ำ ชั่งน้ำหนักของผสมเอทานอลปนน้ำที่แยกออกมา และซีโอไลต์ 4A หลังการดูดซับ แล้ววัดความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ เพื่อหาความเข้มข้นหลังการดูดซับของของผสมเอทานอลปนน้ำ

3.4.3.3 แบบจำลองสมดุลดูดซับน้ำและเอทานอลช่วงสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำเป็น 0-0.995

3.5 การทดลองแยกเอทานอลที่ถูกดูดซับไว้กลับคืนมาโดยใช้น้ำ

3.5.1 นำตัวดูดซับเปียกที่ผ่านการใช้งานในการทดลองที่ 3.4.2 ที่เวลาสมดุลดูดซับ มาเติมน้ำกลั่น 15 กรัม (ปริมาณน้ำกลั่น 15 กรัม ได้จากการทดสอบเบื้องต้นแล้วว่าเป็นปริมาณน้ำที่น้อยที่สุด ที่ใช้ในการล้างตัวดูดซับเปียกที่มีปริมาณมากที่สุด แล้วทำให้มีปริมาณสารหลังล้างเพียงพอสำหรับการตรวจวัด ดังนั้นจึงใช้ปริมาณน้ำกลั่น 15 กรัม สำหรับล้างตัวดูดซับเปียกปริมาณอื่น ๆ

ด้วย) แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 70 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาเท่ากับเวลาสมดุลดูดซับจากการทดลองที่ 3.4.2

3.5.2 เมื่อถึงเวลาที่กำหนด แยกตัวดูดซับออกจากของผสมเอทานอลปนน้ำ ชั่งน้ำหนักของของผสมเอทานอลปนน้ำ และตัวดูดซับ หลังการล้าง และวัดความหนาแน่นของน้ำล้าง เพื่อหาความเข้มข้นหลังการดูดซับ แล้วทำการล้างเม็ดตัวดูดซับซ้ำ จนกระทั่งความเข้มข้นของน้ำล้างมีค่าเป็นศูนย์

3.5.3 ประเมินปริมาณเอทานอลที่ได้กลับคืนมา และปริมาณเอทานอลที่เหลืออยู่ภายในตัวดูดซับ

3.5.4 นำซีโอไลต์ 4A หลังการล้างไปทำการอบด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส [34] เพื่อหาเวลาในการระเหยเอทานอลและน้ำที่อยู่ภายในตัวดูดซับหลังการล้าง

3.6 ทดสอบการดูดซับน้ำจากของผสมเอทานอลปนน้ำในหลอดดูดซับจำลอง

3.6.1 จำลองการทดสอบการดูดซับน้ำจำนวน 3 ครั้ง แล้วประเมินหาน้ำหนักของผสมเอทานอลปนน้ำที่ใช้ในการดูดซับให้เพียงพอกับจำนวนครั้งที่ทำการดูดซับ โดยใช้สมมุติฐานว่าน้ำหนักของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับต่อน้ำหนักของผสมเอทานอลปนน้ำก่อนการดูดซับมีค่าเท่ากันเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับต่อปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำเดียวกัน

3.6.2 เติมซีโอไลต์ 4A ปริมาณร้อยละ 30 ของน้ำหนักของผสมเอทานอลปนน้ำ ลงในของผสมเอทานอลปนน้ำ แล้วนำไปเขย่า ใช้เวลาเขย่าเท่ากับเวลาสมดุลดูดซับที่คำนวณได้จาก 3.4.2

3.6.3 แยกของของผสมเอทานอลปนน้ำออกจากซีโอไลต์ 4A วัดความหนาแน่น และน้ำหนักของผสมเอทานอลปนน้ำที่แยกออกมาได้

3.6.4 ทดลองซ้ำ 3.6.1 – 3.6.3 จนกว่าจะครบตามจำนวนครั้งของการทดสอบ แล้วเปลี่ยนจำนวนครั้งของการทดสอบเป็น 5 และ 7 ครั้ง

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

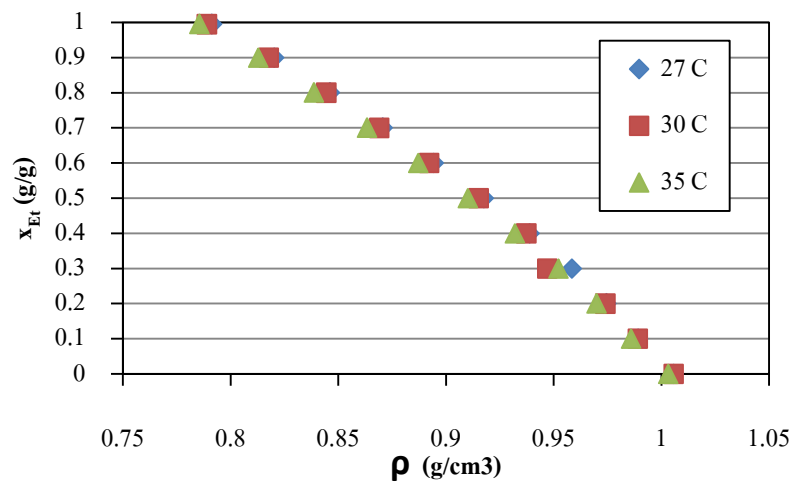
ในงานวิจัยได้ศึกษาสมดุลการดูดซับของน้ำและเอทานอล ด้วยการดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำ โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ 4A

4.1 การหาสัดส่วนมวลของเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ

4.1.1 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำ

น้ำมีความหนาแน่นมากกว่าเอทานอลบริสุทธิ์ และของผสมเอทานอลปนน้ำมีความหนาแน่นลดลง เมื่อสัดส่วนของเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำมีค่ามากขึ้น การดูดซับในงานวิจัยนี้จะศึกษา ณ อุณหภูมิบรรยากาศปกติ ดังนั้น อุณหภูมิของการดูดซับจะเปลี่ยนแปลงตามสภาพอากาศ และอุณหภูมิจะส่งผลต่อความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำโดยตรง และจะมีผลต่อความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำที่คำนวณจากความหนาแน่น เมื่อพิจารณาข้อมูลสภาพอากาศหรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสภาพอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยา พบว่า ตลอดทั้งปีประเทศไทยมีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิประมาณ 27 องศาเซลเซียส จึงกำหนดอุณหภูมิของการสร้างสมการความสัมพันธ์ของความเข้มข้นกับความหนาแน่นในช่วงอุณหภูมิ 27-35 องศาเซลเซียส ดังภาพที่

4.1



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น กับความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำ
ระหว่างอุณหภูมิ 27-35 องศาเซลเซียส

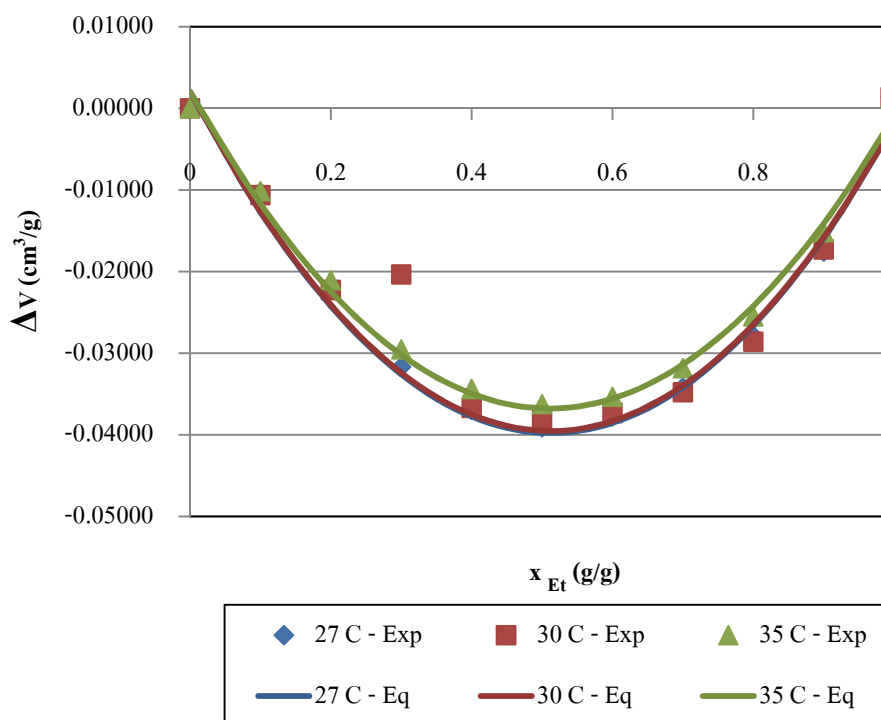
เนื่องจากปริมาตรจำเพาะ (ปริมาตรต่อหน่วยมวล) ของของผสมเอทานอลปนน้ำ เป็นดังนี้

$$\hat{V}_{\text{mixture}} < (1-x)\hat{V}_{\text{H}_2\text{O}} + x\hat{V}_{\text{EtOH}}$$

ดังนั้นสามารถคำนวณหาปริมาตรที่เปลี่ยนแปลง ($\Delta \hat{V}$) ได้จาก

$$\Delta \hat{V} = \hat{V}_{\text{mixture}} - \left((1-x)\hat{V}_{\text{H}_2\text{O}} + x\hat{V}_{\text{EtOH}} \right)$$

ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.2



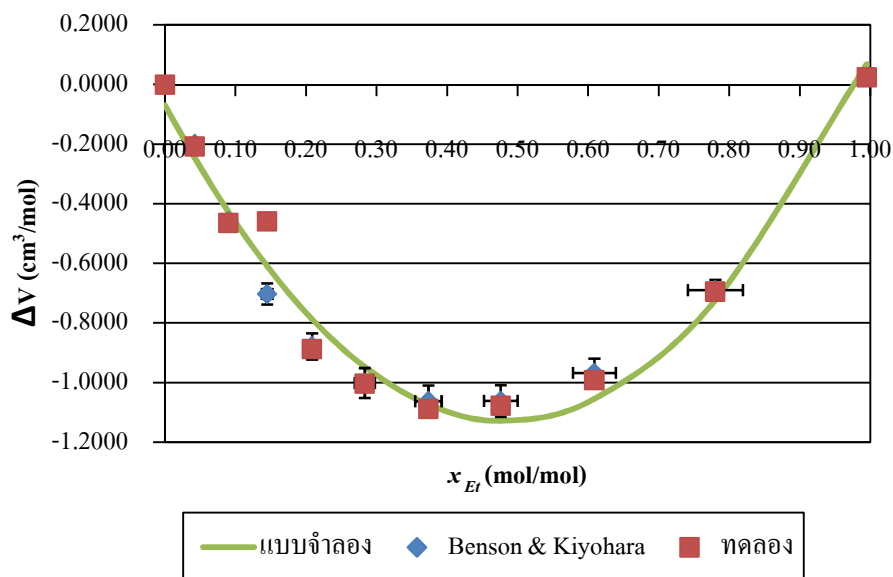
ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่เปลี่ยนแปลง กับสัดส่วนโดยมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงกับสัดส่วนมวลของเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ มีลักษณะสมมาตร ค่าคงที่ของสมการแบบจำลองความสัมพันธ์ และผลรวมของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง สรุปไว้ในตารางที่ 4.1

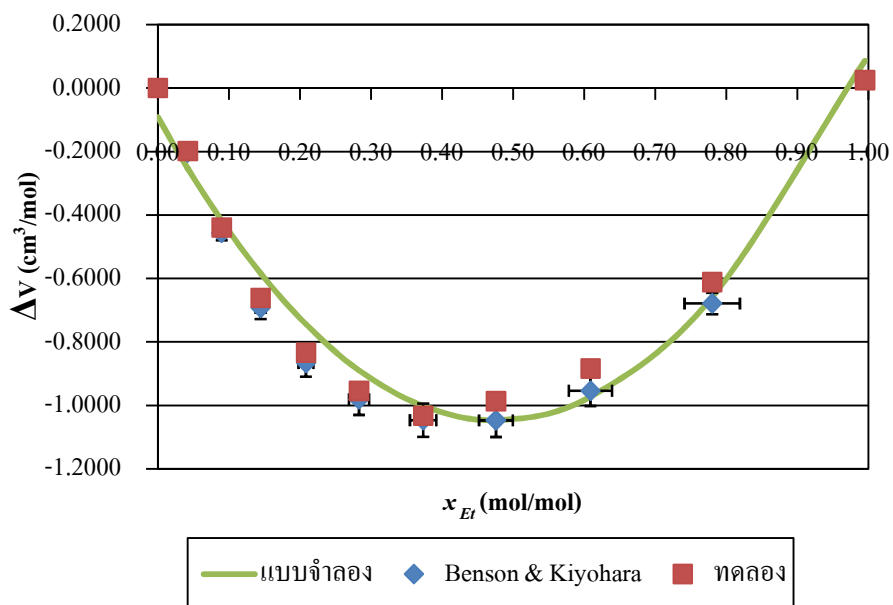
ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ของแบบจำลองตามความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงกับสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลผสมน้ำ

อุณหภูมิ	a_1	a_2	a_3	R^2	$\sum ((\hat{\Delta V}_{eq} - \hat{\Delta V}_{exp})^2)$
27	0.156	-0.161	0.002	0.989	0.000025
30	0.155	-0.159	0.002	0.988	0.000155
35	0.146	-0.149	0.001	0.993	0.000017

ผลการทดลองหาปริมาตรที่เปลี่ยนแปลง มีความสอดคล้องกับผลที่ Benson และ Kiyohara [39] ได้รายงานไว้ก่อนแล้ว ดังภาพที่ 4.3 และ 4.4



ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบผลการวัดปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงของเอทานอลผสมน้ำ ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กับผลการทดลองของ Benson และ Kiyohara



ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการวัดปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงของเอทานอลผสมน้ำ ณ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส กับผลการทดลองของ Benson และ Kiyohara

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงกับสัดส่วนโมลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำเดียวกัน มีลักษณะเบี่ยงจากแกนสมมาตรของสมการแบบจำลองพาราโบลา ค่าคงที่ของสมการแบบจำลองตามความสัมพันธ์ และผลรวมของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง สรุปไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ของแบบจำลองตามความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงกับสัดส่วนโมลเอทานอลในเอทานอลผสมน้ำ

อุณหภูมิ	b_1	b_2	b_3	R^2	$\sum ((\Delta \hat{V}_{eq} - \Delta \hat{V}_{exp})^2)$
27	4.553	-4.37	-0.086	0.972	0.049215
30	4.554	-4.393	-0.069	0.982	0.053192
35	4.209	-4.009	-0.092	0.968	0.048467

ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างผลของ Benson และ Kiyohara กับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีค่าโดยเฉลี่ย 3.19 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 12.41 ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างผลของ Benson และ Kiyohara กับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส มีค่าโดยเฉลี่ย 5.51 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 2.34 ซึ่งพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำ นั่นคือข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จาก Benson และ Kiyohara

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไป กับสัดส่วนของสารในระบบมีลักษณะเป็นกราฟพาราโบลาหงาย จึงสามารถอธิบายด้วยสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง แต่ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไป กับสัดส่วนของสารในระบบที่ได้เสนอข้างต้นประกอบด้วย 2 ระบบ ได้แก่ ความสัมพันธ์โดยมวลดังภาพที่ 4.2 และความสัมพันธ์โดยโมลดังภาพที่ 4.3 และ 4.4 ถึงแม้ว่าค่า R^2 ของแบบจำลองทั้งสองลักษณะกับผลการทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ผลรวมของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองของแบบจำลองด้วยสัดส่วนโมลสูงกว่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองของแบบจำลองด้วยสัดส่วนมวลอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสมการ

แบบจำลองพาราโบลาของปริมาตรของผสมเอทานอลปนน้ำที่เปลี่ยนแปลงกับสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำเหมาะสมต่อการนำไปใช้วัดความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำได้ดีกว่า

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การขยายปริมาตรทางความร้อน (Volumetric Expansion Coefficient) ของของผสมเอทานอลปนน้ำในช่วงสัดส่วนมวลเอทานอลตั้งแต่ 0 ถึง 1 ระหว่างช่วงอุณหภูมิ 27-35 องศาเซลเซียส โดยใช้อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิอ้างอิง เนื่องจากเป็นอุณหภูมิโดยเฉลี่ยตลอดปีของประเทศไทย สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1

$$\Gamma = \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad \dots (4.1)$$

เมื่อ Γ คือ สัมประสิทธิ์การขยายปริมาตรทางความร้อน

V_0 คือ ปริมาตรที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส

ΔV คือ ผลต่างของปริมาตรที่อุณหภูมิใด ๆ กับปริมาตรที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิใด ๆ กับอุณหภูมิที่ 27 องศาเซลเซียส

เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า ΔT กับ ΔV จะได้ความชันของสมการเส้นตรงเป็นค่า γV_0 ค่า V_0 เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง ทำให้สามารถคำนวณค่า Γ ได้แสดงผลการทดลองแสดงดังตารางที่

4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายปริมาตรทางความร้อนของของผสมเอทานอลปนน้ำที่สัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำต่าง ๆ

สัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ (กรัม/กรัม)	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (1/°C)
0	0.000372
10	0.000485
20	0.000662
40	0.000975
50	0.001034
60	0.001044
70	0.001138
80	0.001174
90	0.001153
99.5	0.000915

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของอุณหภูมิอ้างอิงที่ 27 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำเพิ่มขึ้น และผลของอุณหภูมิจะส่งผลต่อการขยายตัวของปริมาตรของของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยเช่นกัน

การคำนวณหาสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ โดยนำความหนาแน่นที่วัดได้ คำนวณหาปริมาตรที่เปลี่ยนแปลง แล้วนำปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงมาแทนลงในสมการแบบจำลองพาราโบลา และแก้สมการกำลังสอง เพื่อคำนวณหาสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำ เป็นวิธีการที่ไม่สะดวกต่อการนำไปใช้งาน ดังนั้นจึงเสนอวิธีคำนวณหาสัดส่วนมวลเอทานอลอีกวิธี คือ หาได้จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนมวลเอทานอล ความหนาแน่น และอุณหภูมิ จากภาพที่ 4.1 สามารถแสดงความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างค่าสัดส่วนมวลของเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ กับค่าความหนาแน่น ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 27 ถึง 35 องศาเซลเซียสได้ดังสมการที่ 4.2

$$x_{Et} = d_1 \rho^2 + d_2 \rho + d_3 \quad \dots(4.2)$$

สมการที่ 4.2 เป็นสมการความสัมพันธ์ของสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำกับความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำ ณ อุณหภูมิที่กำหนด เมื่อสัมประสิทธิ์ d_1 , d_2 , และ d_3 เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ และค่าคงที่ d_1 , d_2 , และ d_3 มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอุณหภูมิ ดังสมการที่ 4.3

$$d_i = m_i T + c_i \quad \dots(4.3)$$

ค่าคงที่ของสมการที่ 4.3 และค่า R^2 แสดงได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ของสมการค่าคงที่ที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนมวลเอทานอลกับความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำ กับ อุณหภูมิในช่วงระหว่าง 27-35 องศาเซลเซียส

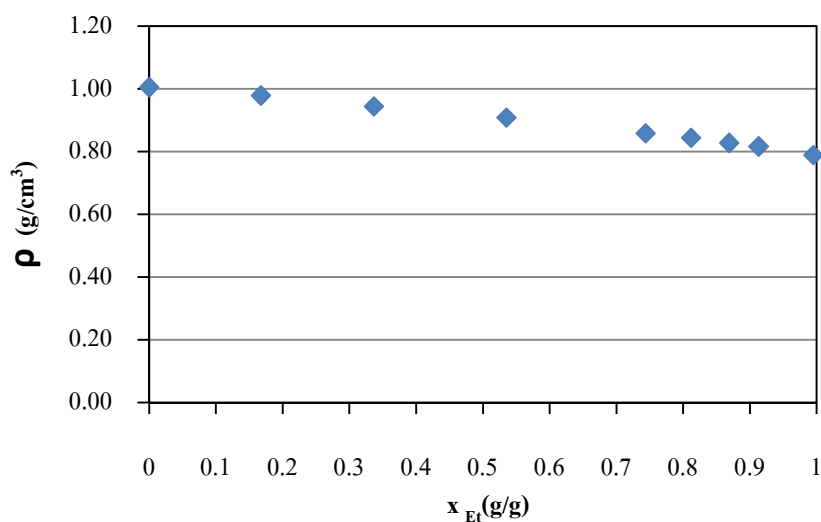
d_i	m_i	c_i	R^2
d_1	0.1880	-12.9077	1.000
d_2	-0.3378	18.6295	1.000
d_3	0.1474	-5.6112	0.999

เมื่อทราบอุณหภูมิของของผสมที่วัดความหนาแน่น สามารถนำมาหา d_1 , d_2 , และ d_3 ตามสมการที่ 4.3 โดยใช้ค่าคงที่ของสมการตามตารางที่ 4.4 จากนั้นนำค่าความหนาแน่นและค่าคงที่ d_1 , d_2 , และ d_3 ที่ได้มาหาค่าสัดส่วนมวลเอทานอลในของของผสมเอทานอลได้ดังสมการที่ 4.2 หรือสามารถหาค่าสัดส่วนมวลเอทานอลได้ดังสมการที่ 4.4 ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ, ความหนาแน่น และอุณหภูมิในช่วงระหว่าง 27-35 องศาเซลเซียส

$$x_{Et} = [(0.1880T - 12.9077)\rho^2] - [(0.3378T - 18.6295)\rho] + [0.1474T - 5.6112] \quad \dots(4.4)$$

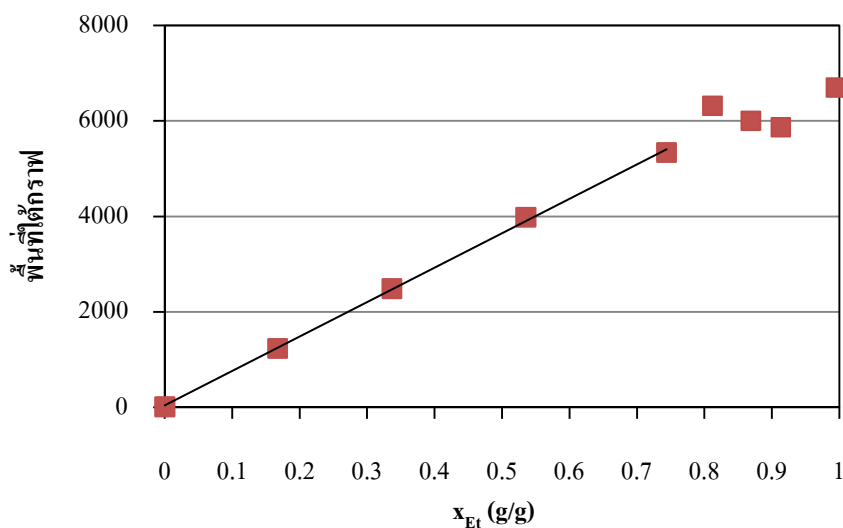
4.1.2 ผลของการตรวจวัดความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำด้วย Gas Chromatography และวิธีวัดความหนาแน่น

นำเอทานอลที่มีสัดส่วนมวลเอทานอล 0.995 มาเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ของผสมที่ได้มีสัดส่วนมวลเอทานอลตั้งแต่ 0.1-0.9 นำของผสมที่เตรียมได้มาวัดความหนาแน่น และทดสอบความเข้มข้นวิธี Gas Chromatography เพื่อสร้างความสัมพันธ์และเปรียบเทียบการตรวจวัดสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยวิธีวัดความหนาแน่น และวิธี Gas chromatography ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำกับค่าความหนาแน่น

ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ กับความหนาแน่นมีแนวโน้มเดียวกันตลอดช่วงความเข้มข้น กล่าวคือ เมื่อสัดส่วนมวลเอทานอลมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นจะมีค่าลดลง



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนมวลเอทานอลในผสมเอทานอลปนน้ำกับ ค่าพื้นที่ใต้กราฟ
ที่ได้จาก GC

ในขณะที่ค่าสัดส่วนมวลเอทานอลโดยการใช้ GC สามารถพิจารณาได้เป็น 2 ส่วน คือ ช่วงของสัดส่วนมวลเอทานอลต่ำกว่า 0.8 ในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ใต้กราฟ กับสัดส่วนมวลเอทานอลมีความสัมพันธ์ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน สามารถอธิบายด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ดังสมการที่ 4.5

$$x = 7216A + 34.36 \quad \dots(4.5)$$

เมื่อ A คือพื้นที่ใต้กราฟที่ตรวจวัดจากวิธี Gas Chromatography ซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.999 ดังแสดงในภาพที่ 4.6 ในขณะที่ค่าสัดส่วนมวลเอทานอลที่สูงกว่า 0.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ใต้กราฟ กับสัดส่วนมวลเอทานอลมีการแกว่งและมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอน อาจเนื่องมาจากข้อจำกัดของการใช้ FID Detector ดังนั้นการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลด้วยวิธีที่มีความเข้มข้นมากกว่า 0.8 จึงต้องลดความเข้มข้นลงครั้งหนึ่งเป็นอย่างน้อย ในงานวิจัยนี้จุดจับของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีความเข้มข้นสูง ดังนั้น การวัดความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยวิธีวัดความหนาแน่น จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้

4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเบื้องต้นของตัวดูดซับซีโอไลต์ 4A

พื้นที่ผิวจำเพาะ, ปริมาตรรูพรุนจำเพาะ และขนาดรูพรุนเฉลี่ย ที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วย BET แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติเบื้องต้นของตัวดูดซับซีโอไลต์ 4A

ขนาดเม็ด	1.5 มิลลิเมตร
พื้นที่ผิวจำเพาะ	22.385 ตารางเมตรต่อกรัม
ปริมาตรรูพรุนจำเพาะ	0.0604 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย	10.276 นาโนเมตร

ขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่วัดได้จาก BET มีค่า 10.276 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ 4A ที่คำนวณจากทฤษฎีที่มีขนาด 0.38 นาโนเมตร เพราะซีโอไลต์ที่ใช้มีลักษณะเป็นแท่ง ซึ่งจะต้องขึ้นรูปมาจากซีโอไลต์ผง จึงจำเป็นต้องใช้ตัวประสาน เช่น aluminum hydroxide, silicic acid salts, siliceous earth เป็นต้น ในการรวมซีโอไลต์ผงเข้าด้วยกัน [36-37] ทำให้รูพรุนเฉลี่ยที่ได้จาก BET อาจเป็นขนาดรูพรุนระหว่างผลึกซีโอไลต์และตัวประสานที่ทำให้ซีโอไลต์ 4A เกาะรวมตัวกัน

ส่วนปริมาตรรูพรุนของการดูดซับของเหลว สามารถหาได้จากการนำเอทานอลและน้ำบริสุทธิ์มาดูดซับ ซึ่งปริมาณดูดซับเอทานอลและน้ำจำเพาะที่สมดุล มีลักษณะเป็นโค้งคว่ำ และถ้าเข้าสู่ค่าจำกัดค่าหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.7 สามารถสร้างสมการแบบจำลองอัตราการดูดซับ ได้ดังสมการที่ (4.6) และปริมาตรรูพรุนหาได้จากสมการที่ (4.7)

$$\frac{q}{q_e} = \frac{kt}{1+kt} \quad \dots(4.6)$$

$$V_p = \frac{q_e}{\rho} \quad \dots(4.7)$$

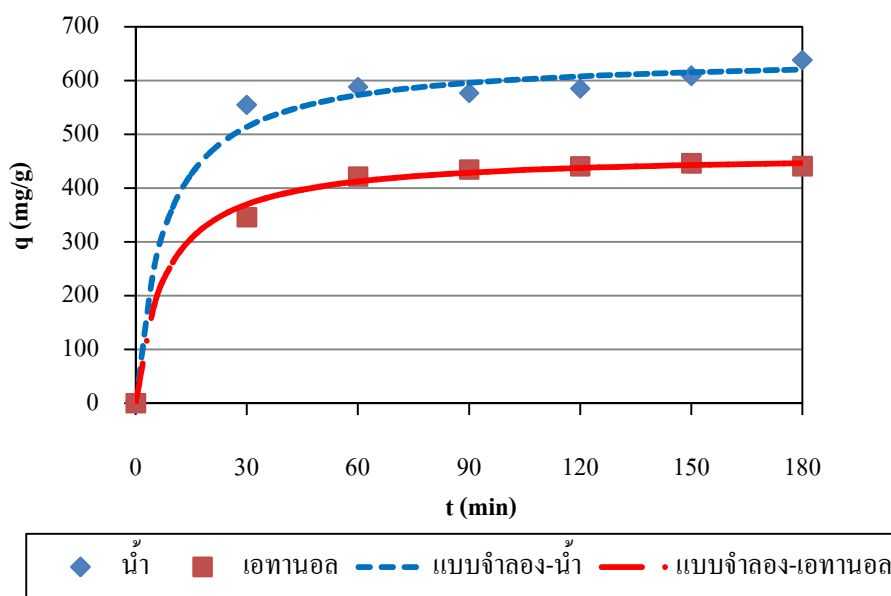
เมื่อ	q	แทน ปริมาณดูดซับจำเพาะ ณ เวลาใด ๆ
	q _e	แทน ปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะ
	k	แทน ค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ
	t	แทน เวลา

v_p แทน ปริมาตรรูพรุนของการดูดซับของเหลว

ดังนั้น q_e และ k สามารถคำนวณจากสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง $\frac{t}{q}$ กับ t ดัง

สมการ 4.8 และปริมาตรรูพรุนของการดูดซับน้ำและเอทานอลแสดงดังตารางที่ 4.6

$$\frac{t}{q} = \frac{t}{q_e} + \frac{1}{kq_e} \quad \dots(4.8)$$



ภาพที่ 4.7 ปริมาณดูดซับน้ำและเอทานอลจำเพาะของตัวดูดซับซีโอไลต์ 4A ในช่วงเวลา 180 นาที

ตารางที่ 4.6 ปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะ ค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ และปริมาตรรูพรุน ของการดูดซับน้ำและเอทานอลด้วยซีโอไลต์ 4A ตามลำดับ

สาร	q_e (mg/g)	k	R^2	V_p (cm ³ /g)	$\sum((q_{eq} - q_{exp})^2)$
น้ำ	647.15	0.1286	0.995	0.6436	3128
เอทานอล	465.73	0.1286	0.999	0.5902	741

หมายเหตุ ค่าความหนาแน่นของน้ำและเอทานอลที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสมีค่า 1.00547 และ 0.78904 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ

ปริมาณรูพรุนที่ได้จากการดูดซับน้ำและเอทานอลแตกต่างจากปริมาณรูพรุนที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์พื้นผิวด้วย BET (จากตารางที่ 4.5) ปริมาณรูพรุนที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์พื้นผิวด้วย BET มีค่าประมาณ 0.06 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ในขณะที่ปริมาณรูพรุนที่ได้จากการดูดซับน้ำและเอทานอลมีค่าประมาณ 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เนื่องจาก สภาวะของสารที่ใช้ในการดูดซับแตกต่างกัน การหาปริมาณรูพรุนจากการตรวจวิเคราะห์พื้นผิวด้วย BET เป็นการดูดซับสารในสถานะก๊าซ โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนในการดูดซับ ส่วนปริมาณรูพรุนที่ได้จากการดูดซับน้ำและเอทานอล เป็นการดูดซับสารในสถานะของเหลว นั่นคือ ปริมาณรูพรุนที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์พื้นผิวด้วย BET ไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการดูดซับของเหลว

ปริมาณดูดซับน้ำจำเพาะมีค่ามากกว่าปริมาณดูดซับเอทานอลจำเพาะ เนื่องจากว่า ผลของการดูดซับบนพื้นผิว และผลของการเติมเต็มภายในรูพรุนตัวดูดซับ กล่าวคือ การดูดซับบนซีโอไลต์ 4A เกิดจากปัจจัยที่สำคัญคือ ความมีขั้วบนพื้นผิว [24] น้ำซึ่งมีความมีขั้วที่สูงกว่าเอทานอล จะเกิดการดูดซับบนพื้นผิวซีโอไลต์ได้ดีกว่าเอทานอล (ค่าไดโพลโมเมนต์ของน้ำเท่ากับ 1.87 เดอร์บาย , ค่าไดโพลโมเมนต์ของเอทานอลเท่ากับ 1.69 เดอร์บาย) นอกจากนี้ ของผสมเอทานอลปนน้ำยังสามารถเข้าไปยังรูพรุนของซีโอไลต์ 4A ได้ เนื่องจากผลของแรงดึงผิว กล่าวคือ เมื่อพิจารณารูพรุนของตัวดูดซับเสมือนเป็นหลอดคะปิลลารี ของเหลวสามารถถูกดูดเข้าไปในหลอดคะปิลลารีได้ เนื่องจากแรงดึงผิว จากสมการที่ 2.6 พบว่าความสูงของของเหลวที่ถูกดูดเข้าไปในหลอดคะปิลลารีแปรผันโดยตรงกับแรงดึงผิวของของเหลว คือเมื่อแรงดึงผิวมากขึ้น ความสูงของของเหลวที่ถูกดูดเข้าไปในหลอดคะปิลลารีก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย น้ำซึ่งมีแรงดึงผิวมากกว่าเอทานอลย่อมถูกดูดเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับด้วยผลของแรงดึงผิวได้มากกว่าเอทานอล นอกจากนี้ความหนืดของน้ำมีค่าน้อยกว่าความหนืดของเอทานอล ทำให้ค่าความเสียดทานระหว่างของไหลด้วยกันเองระหว่างไหล หรือระหว่างของไหลกับพื้นผิวซีโอไลต์ กรณีของน้ำน้อยกว่าเอทานอล จากผลของการดูดซับบนพื้นผิว แรงดึงผิว และความหนืด ทำให้ปริมาณดูดซับน้ำจำเพาะมีค่ามากกว่าปริมาณดูดซับเอทานอลจำเพาะ ซึ่งค่าแรงดึงผิวและความหนืดของน้ำและเอทานอลแสดงในตารางที่ 4.7

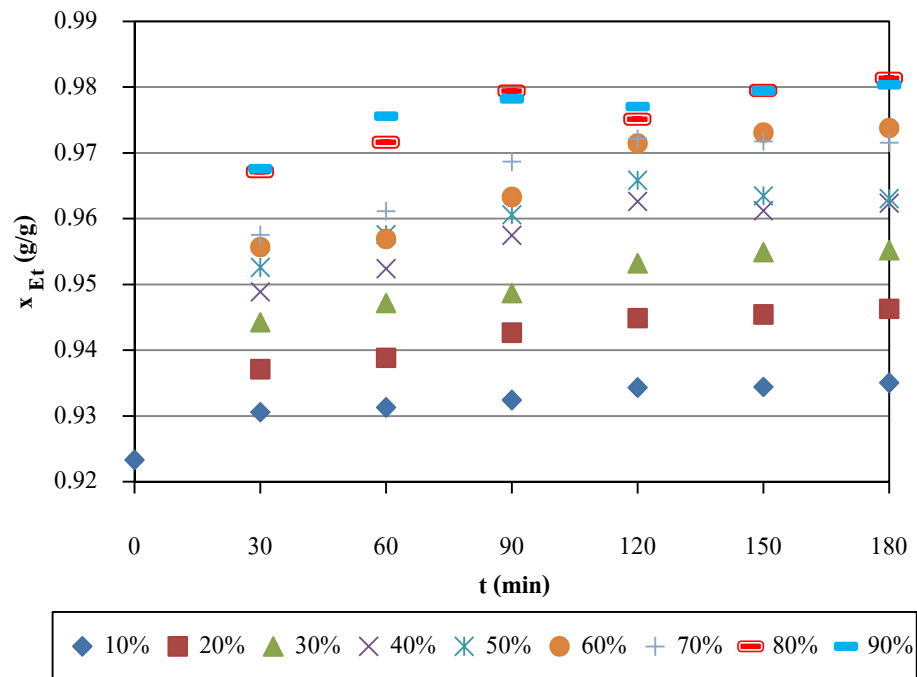
ตารางที่ 4.7 ค่าความหนืด และแรงตึงผิวของน้ำและเอทานอล

แรง	น้ำ	เอทานอล
ความหนืด (mPa) ที่ 20 องศาเซลเซียส	1.00	1.2
แรงตึงผิว (dynes/cm) ที่ 20 องศาเซลเซียส	72.8	22.3

4.3 การศึกษาปริมาณดูดซับน้ำและเอทานอลด้วยซีโอไลต์ 4A

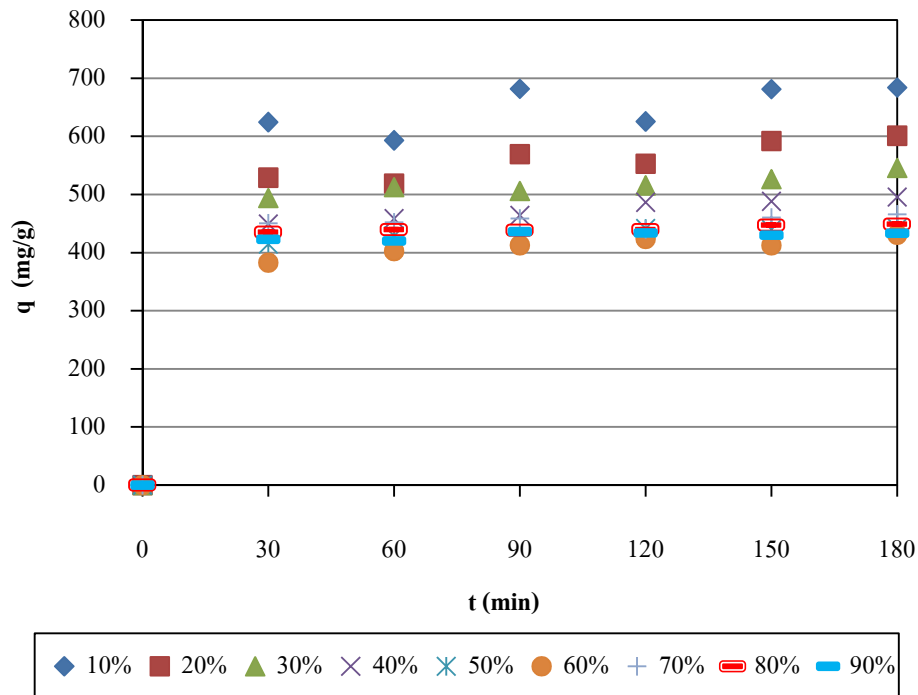
4.3.1 ศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลดูดซับ

การทดสอบการดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยตัวดูดซับซีโอไลต์ 4A ด้วยปริมาณของตัวดูดซับร้อยละ 10 ถึง 90 ของน้ำหนักของผสมเอทานอลปนน้ำ และดูดซับในช่วงเวลา 0-180 นาที โดยเข้าด้วยความเร็วรอบ 70 รอบต่อนาที เพื่อให้ของผสมเอทานอลปนน้ำเคลื่อนที่ไปรอบตัวดูดซับ ของผสมเอทานอลที่ใช้มีสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำเริ่มต้น 0.9222 เป็นความเข้มข้นที่ได้จากการกลั่นแยกน้ำออกจากของผสมเอทานอลปนน้ำที่สังเคราะห์ได้จากการหมัก และมีความเข้มข้นใกล้เคียงความเข้มข้นของของผสมจุดเดือดคงที่ (Azeotrope mixture) และได้มาจากกระบวนการกลั่นที่ความดันบรรยากาศจริงในโรงงานอุตสาหกรรม สัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นตามสัดส่วนตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับซีโอไลต์ 4A จึงน่าจะดูดซับน้ำได้ดีกว่าดูดซับเอทานอล ดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 สัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ ในเวลา 30-180 นาที เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับอยู่ในช่วงร้อยละ 10-90 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ

ตัวดูดซับซีโอไลต์ 4A สามารถเพิ่มความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำได้ กล่าวคือ ที่ปริมาณตัวดูดซับเท่ากัน เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นหลังการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณการดูดซับน้ำและเอทานอลจำเพาะของซีโอไลต์ 4A ลดน้อยลง เมื่อเพิ่มสัดส่วนตัวดูดซับต่อของผสมเอทานอลปนน้ำให้มากขึ้น แสดงดังภาพที่ 4.9-4.11



ภาพที่ 4.9 ปริมาณดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำจำเพาะของซีโอไลต์ 4A ในช่วงเวลา 30-180 นาที เมื่อปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10-90 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ

การหาเวลาสมดุลดูดซับจะคำนวณจากค่าเฉลี่ยของปริมาณดูดซับจำเพาะตั้งแต่เวลาที่ระบบเริ่มเข้าสู่สมดุลดูดซับจนถึงเวลา 180 นาที แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาติดกันจนถึงเวลา 180 นาที ถ้าค่าทั้งสองใกล้เคียงกัน จะถือว่าเวลาที่มีค่าน้อยกว่าเป็นเวลาสมดุลดูดซับของระบบ

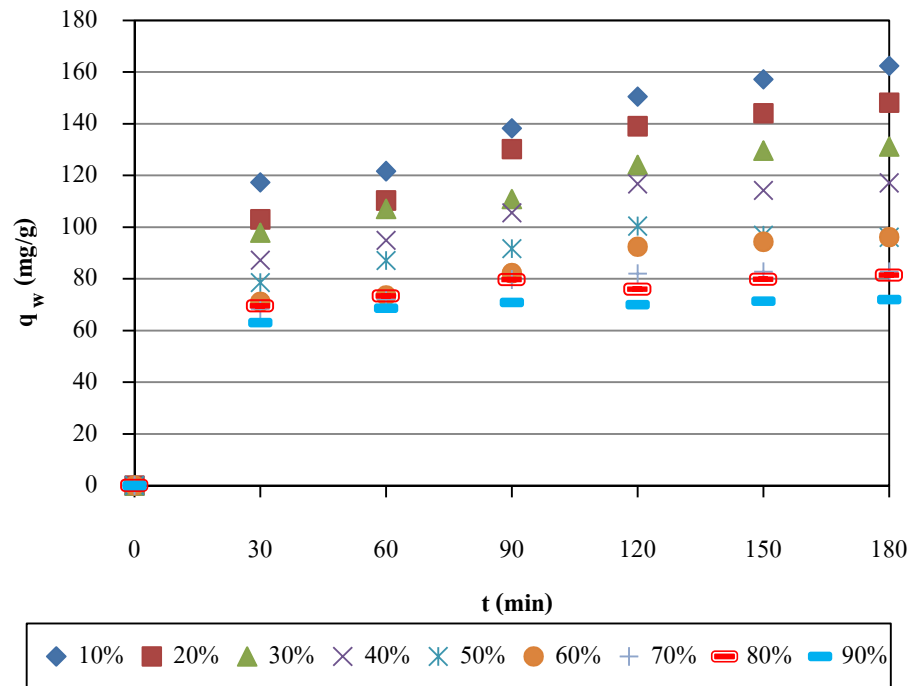
ปริมาณดูดซับของผสมจำเพาะเริ่มมีค่าคงที่ตั้งแต่เวลา 30 นาที ดังนั้น จะพิจารณาปริมาณดูดซับเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 30 ถึง 180 นาที เพื่อเปรียบเทียบกับปริมาณดูดซับเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 60 ถึง 180 นาที ถ้าปริมาณดูดซับเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 30 ถึง 180 นาที มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณดูดซับเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 60 ถึง 180 นาที ระบบการดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยซีโอไลต์ 4A เข้าสู่สมดุลในเวลา 30 นาที ปริมาณดูดซับของผสมเฉลี่ยแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบปริมาณดูดซับของผสมเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 30 ถึง 180 นาที และ 60 ถึง 180 นาที

ร้อยละของปริมาณซีโอไลต์ 4A ต่อปริมาณของผสมเอทานอล	ปริมาณดูดซับของผสมเฉลี่ยตั้งแต่เวลา		$\left \frac{\bar{q}_{60} - \bar{q}_{30}}{\bar{q}_{30}} \right \times 100$
	30 ถึง 180 นาที	60 ถึง 180 นาที	
10	648.38	653.18	0.74
20	556.44	561.93	0.99
30	516.80	521.34	0.88
40	473.72	478.62	1.03
50	432.36	435.85	0.81
60	410.95	416.61	1.38
70	454.61	455.46	0.19
80	441.62	442.93	0.30
90	429.40	430.66	0.29

ปริมาณดูดซับเฉลี่ยของผสมเอทานอลตั้งแต่เวลา 30 ถึง 180 นาที มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณดูดซับเฉลี่ยของผสมเอทานอลตั้งแต่เวลา 60 ถึง 180 นาที ซึ่งปริมาณดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 30 ถึง 180 นาที มีค่าความแตกต่างประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 60 ถึง 180 นาที แสดงว่า ระบบการดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยซีโอไลต์ 4A เข้าสู่สมดุลในเวลา 30 นาที

สำหรับอัตราการดูดซับน้ำ พบว่า เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับแตกต่างกัน เวลาเข้าสู่สมดุลดูดซับจะแตกต่างกัน เนื่องจากน้ำมีปริมาณน้อยในระบบการดูดซับ กล่าวคือ เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับน้อยพื้นที่ในการดูดซับมีน้อยกว่าการใช้ตัวดูดซับในปริมาณมาก ในขณะที่ปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำมีปริมาณเท่ากัน นั่นคือน้ำในระบบการดูดซับมีปริมาณเท่ากัน โอกาสที่น้ำเคลื่อนที่แล้วเกิดการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับกรณีที่ใช้ตัวดูดซับน้อย จึงใช้เวลานานกว่ากรณีใช้ตัวดูดซับมาก ดังแสดงในภาพ 4.10



ภาพที่ 4.10 ปริมาณดูดซับน้ำจำเพาะของซีโอไลต์ 4A ในช่วงเวลา 30-180 นาที เมื่อปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10-90 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ

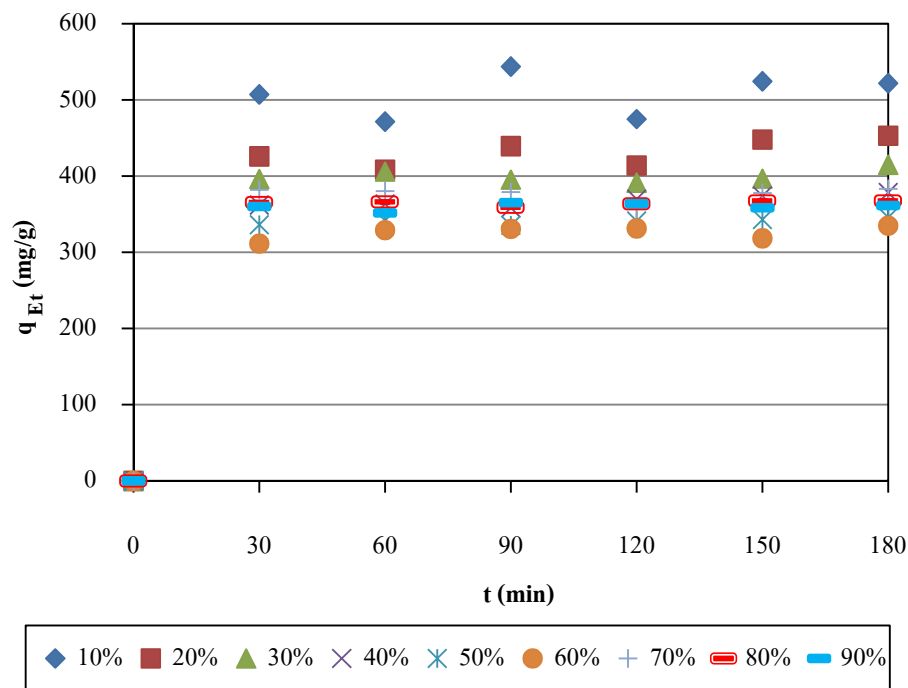
เนื่องจากเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับแตกต่างกัน เวลาเข้าสู่สมดุลดูดซับน้ำจำเพาะจะมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นการหาเวลาเข้าสู่สมดุลดูดซับน้ำ จึงจำเป็นต้องหาค่าเฉลี่ยของปริมาณดูดซับน้ำที่เวลาใด ๆ จนถึงเวลา 180 นาที แล้วเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของปริมาณดูดซับน้ำที่เวลาที่อยู่ติดกันเป็นคู่ ๆ ถ้าค่าทั้งสองใกล้เคียงกัน จะถือว่าเวลาที่มีค่าน้อยกว่าเป็นเวลาสมดุลดูดซับของระบบ ผลการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบปริมาณดูดซับน้ำเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 30 ถึง 180, 60 ถึง 180, 90 ถึง 180 และ 120 ถึง 180 นาที

$\left(\frac{m_{ad}}{m_{sol}}\right) \times 100$	ปริมาณสมมูลดูดซับน้ำเฉลี่ย					$\left \frac{\bar{q}_{60} - \bar{q}_{30}}{\bar{q}_{30}}\right \times 100$	$\left \frac{\bar{q}_{90} - \bar{q}_{60}}{\bar{q}_{60}}\right \times 100$	$\left \frac{\bar{q}_{90} - \bar{q}_{120}}{\bar{q}_{90}}\right \times 100$	$\left \frac{\bar{q}_{120} - \bar{q}_{150}}{\bar{q}_{120}}\right \times 100$
	$\bar{q}_{30 \rightarrow 180}$	$\bar{q}_{60 \rightarrow 180}$	$\bar{q}_{90 \rightarrow 180}$	$\bar{q}_{120 \rightarrow 180}$	$\bar{q}_{150 \rightarrow 180}$				
10	141.23	146.01	152.11	156.72	159.81	3.39	4.18	3.03	1.97
20	128.92	134.10	140.05	143.33	145.47	4.02	4.43	2.34	1.49
30	116.76	120.55	123.93	128.29	130.36	3.24	2.81	3.51	1.62
40	105.97	109.72	113.42	116.04	115.68	3.54	3.37	2.31	0.32
50	91.76	94.40	96.23	97.76	96.44	2.88	1.94	1.59	1.35
60	84.96	87.74	91.29	94.33	95.26	3.26	4.05	3.32	0.99
70	77.96	79.87	81.81	82.51	82.74	2.45	2.43	0.85	0.29
80	76.66	78.08	79.25	79.09	80.66	1.86	1.50	-0.21	1.99
90	69.32	70.57	71.05	71.11	71.69	1.81	0.68	0.08	0.82

ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10-60 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ ปริมาณดูดซับน้ำเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 120 ถึง 180 นาที มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณดูดซับน้ำเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 150 ถึง 180 นาที มีความแตกต่างกันประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 70 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ ปริมาณดูดซับน้ำเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 90 ถึง 180 นาที มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณดูดซับน้ำเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 120 ถึง 180 นาที และมีความแตกต่างกันประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ส่วนปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 80 ถึง 90 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ ปริมาณดูดซับน้ำเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 30 ถึง 180 นาที มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณดูดซับน้ำเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 60 ถึง 180 นาที มีความแตกต่างกันไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น เวลาสมดุลดูดซับน้ำจากของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยซีโอไลต์ 4A สำหรับปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10-60 , 70 และ 80-90 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ คือเวลา 120, 90 และ 30 นาทีตามลำดับ

ปริมาณดูดซับเอทานอลจำเพาะสามารถคำนวณได้จากการคูณมวลสาร เช่นเดียวกับปริมาณดูดซับน้ำจำเพาะ โดยปริมาณดูดซับเอทานอลจำเพาะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.11 แต่เอทานอลเป็นสารระเหยง่าย ดังนั้นจึงทำการคำนวณหาปริมาณเอทานอลที่หายไประหว่างการดูดซับ ปริมาณเอทานอลที่สูญหายโดยการทดลอง ทดสอบ ณ สภาพที่เหมือนกับทดลองการดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยตัวดูดซับทุกอย่าง เพียงแต่ไม่มีการเติมตัวดูดซับในระหว่างการทดลอง แล้วเขย่า ผลปรากฏว่า น้ำหนักของเอทานอลหายไปคิดเป็น 0.15 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำเริ่มต้น หรือถ้าใช้ของผสมเอทานอลปนน้ำเริ่มต้นประมาณ 20 กรัม หลังการทดลองปริมาณเอทานอลจะหายไปประมาณ 0.0303 กรัม ซึ่งปริมาณเอทานอลที่ระเหยไปจะถูกนำไปหักออกจากปริมาณเอทานอลเริ่มต้น เพื่อคำนวณหาปริมาณเอทานอลที่แท้จริงในระบบการดูดซับ



ภาพที่ 4.11 ปริมาณดูดซับเอทานอลจำเพาะของซีโอไลต์ 4A ในช่วงเวลา 30-180 นาที เมื่อปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10-90 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ

ปริมาณดูดซับเอทานอลจำเพาะเริ่มมีแนวโน้มคงที่ตั้งแต่เวลา 30 นาที ดังนั้น จะพิจารณาปริมาณดูดซับเอทานอลเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 30 ถึง 180 นาที แล้วเปรียบเทียบกับปริมาณเอทานอลเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 60 ถึง 180 นาที ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบปริมาณดูดซับเอทานอลเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 30 ถึง 180 นาที และ 60 ถึง 180 นาที

ร้อยละของปริมาณซีโอไลต์ 4A ต่อปริมาณของผสมเอทานอล	ปริมาณดูดซับเอทานอลเฉลี่ยตั้งแต่เวลา		$\left \frac{\bar{q}_{60} - \bar{q}_{30}}{\bar{q}_{30}} \right \times 100$
	30 ถึง 180 นาที	60 ถึง 180 นาที	
10	507.16	507.18	0.00
20	427.52	427.84	0.07
30	400.04	400.79	0.19
40	367.76	368.90	0.31
50	340.60	341.45	0.25
60	325.99	328.88	0.89
70	376.65	375.59	0.28
80	364.96	364.85	0.03
90	360.08	360.09	0.00

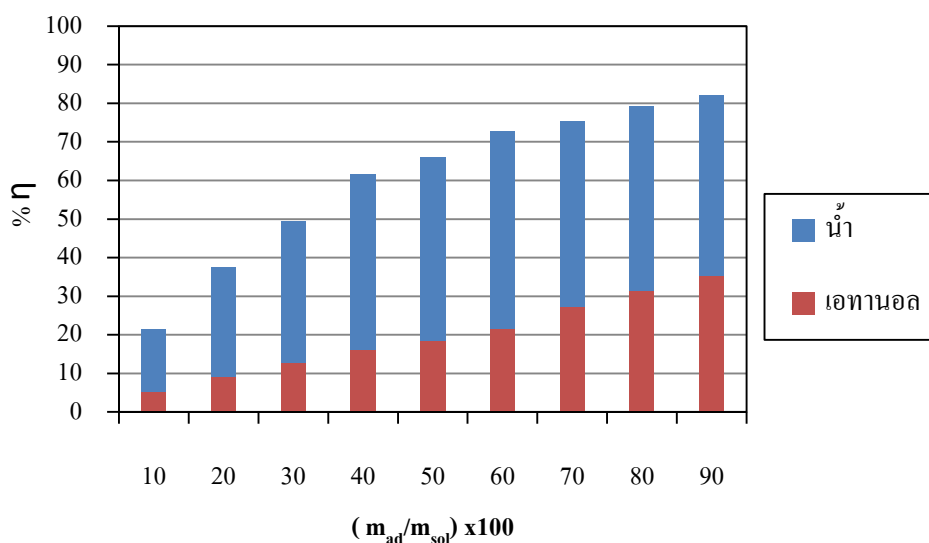
ปริมาณดูดซับเอทานอลเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 30 ถึง 180 นาที มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณดูดซับเอทานอลเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 60 ถึง 180 นาที โดยพิจารณาจากค่าความแตกต่างระหว่างปริมาณดูดซับเอทานอลเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 60 ถึง 180 นาที กับปริมาณเอทานอลเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 30 ถึง 180 นาที มีค่าไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่า การดูดซับเอทานอลจากของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยซีโอไลต์ 4A ระบบเข้าสู่สมดุลดูดซับในเวลา 30 นาที

เมื่อได้เวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุลดูดซับแล้ว จะนำปริมาณดูดซับที่สมดุลไปสร้างแบบจำลองสมดุลดูดซับ โดยจะใช้ปริมาณสมดุลดูดซับที่เวลา 120 นาที เนื่องจากการดูดซับน้ำโดยใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10-60 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ ระบบเข้าสู่สมดุลในเวลา 120 นาที แต่ที่เวลานี้ การดูดซับน้ำด้วยปริมาณตัวดูดซับอื่น หรือการดูดซับเอทานอล ระบบจะเข้าสู่สมดุลเรียบร้อยแล้ว

เมื่อพิจารณาปริมาณตัวดูดซับค่าเดียวกัน พบว่า ปริมาณการดูดซับเอทานอลจำเพาะมีค่ามากกว่าปริมาณการดูดซับน้ำจำเพาะ (แสดงในภาพที่ 4.10 และ 4.11) แต่เมื่อพิจารณาทั้งระบบการ

ดูดซับ พบว่า ปริมาณเอทานอลก่อนการดูดซับมีค่ามากกว่าปริมาณน้ำก่อนการดูดซับ แสดงเป็น สัดส่วนการดูดซับได้ดังภาพที่ 4.12 ค่าสัดส่วนการดูดซับคำนวณจากปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อ ปริมาณสารเริ่มต้นก่อนการดูดซับ ดังนิยามในสมการที่ 4.9

$$\eta = \frac{\text{ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ}}{\text{ปริมาณสารเริ่มต้นก่อนการดูดซับ}} \quad \dots(4.9)$$



ภาพที่ 4.12 ร้อยละสัดส่วนการดูดซับของเอทานอลและน้ำกับเปอร์เซ็นต์ของปริมาณเอทานอลที่ใช้ ในการดูดซับ ที่เวลาการดูดซับ 120 นาที

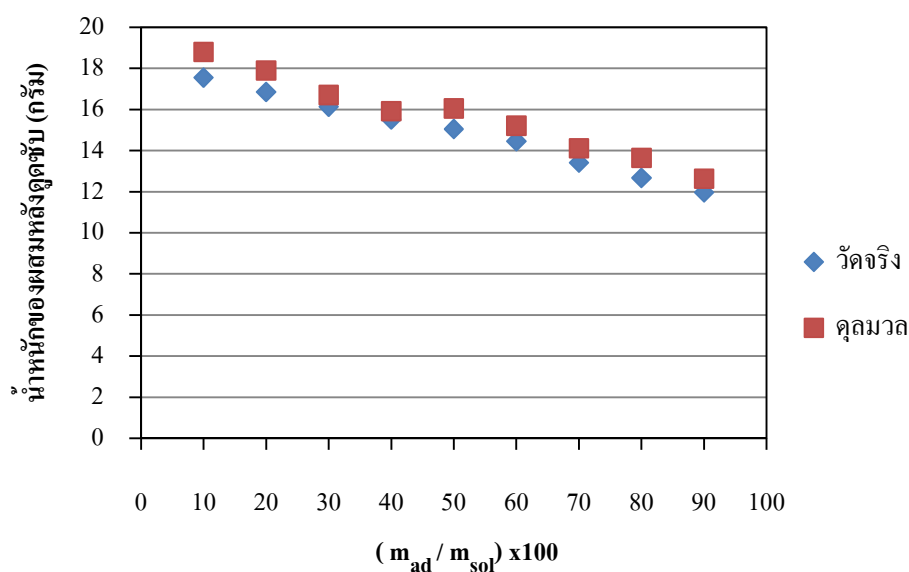
สัดส่วนการดูดซับน้ำมีค่ามากกว่าสัดส่วนการดูดซับเอทานอล ทำให้ระบบการดูดซับของ ผสมเอทานอลปนน้ำด้วยซีโอไลต์ 4A สามารถเพิ่มความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำได้ ซึ่ง การดูดซับของน้ำและเอทานอลบนพื้นผิวซีโอไลต์จะเกิดจากปัจจัยที่สำคัญ คือ ความมีขั้วบนพื้นผิว กับสารที่มาดูดซับ ตามที่ได้กล่าวแล้วในผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ 4.3 คือ น้ำเป็นสารที่มีขั้วสูงกว่า เอทานอลจึงทำให้สัดส่วนการดูดซับน้ำมีค่ามากกว่าสัดส่วนการดูดซับเอทานอล

4.3.2 คุณสมบัติสารในการทดลองสมดุลการดูดซับ

คำนวณคุณสมบัติสารที่เวลาสมดุลดูดซับ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการตรวจสอบ น้ำหนักของของผสมเอทานอลปนน้ำ โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูด

ซั้บที่ไ้จากการวัดจริง กับน้ำหนักของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซั้บที่ไ้จากการคำนวณคุณมวลสาร ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.13

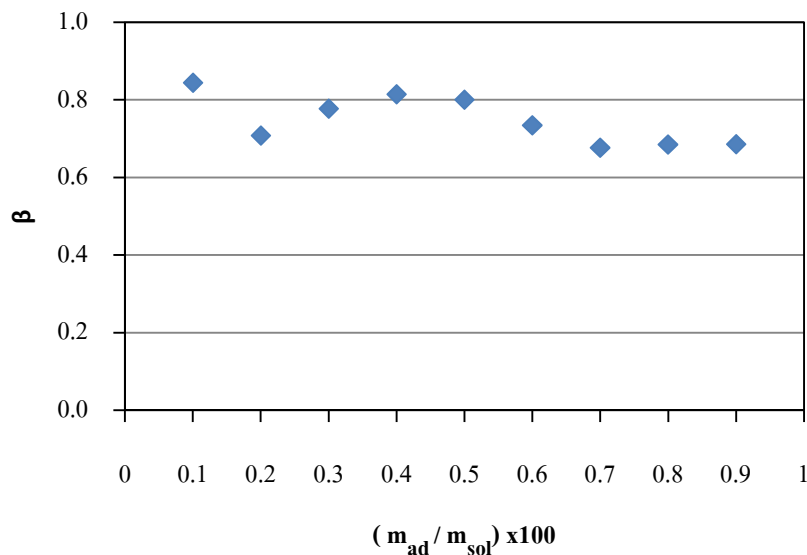
มวลของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซั้บที่ไ้จากการคำนวณคุณมวลสาร คำนวณจากผลต่างของมวลของของผสมเอทานอลปนน้ำก่อนการดูดซั้บกับมวลของตัวดูดซั้บซีโไลต์ 4A ที่เพิ่มขึ้นหลังการดูดซั้บ



ภาพที่ 4.13 มวลของผสมหลังการดูดซั้บที่ไ้จากการวัดจริงกับการคำนวณคุณมวลสาร
ที่เวลา 120 นาที

กรณีที่ไม่มีการสูญเสียมวลในระบบ มวลของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซั้บที่ไ้จากการวัดจริง กับที่ไ้จากการคำนวณคุณมวลสารควรมีค่าเท่ากัน แต่จากการทดลองค่าทั้งสองไ้ไม่เท่ากันเนื่องจากการระเหยของสารจากระบวนการทดลองและจากการวัดน้ำหนักจากเครื่องมือวัด

ซีโไลต์ 4A ที่ผ่านการดูดซั้บแล้วจะถูกนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นตามวิธีที่กำหนดไว้ โดยใช้เวลาในการล้าง 120 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่ระบบการดูดซั้บน้ำเข้าสู่สมดุล หลังจากการล้างจะนำตัวซีโไลต์ 4A มาปรับสภาพเพื่อนำกลับไปใช้งานซ้ำอีก สัดส่วนปริมาณเอทานอลที่ล้างออกมาได้ต่อปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซั้บไว้ก่อนล้าง แสดงดังภาพ 4.14

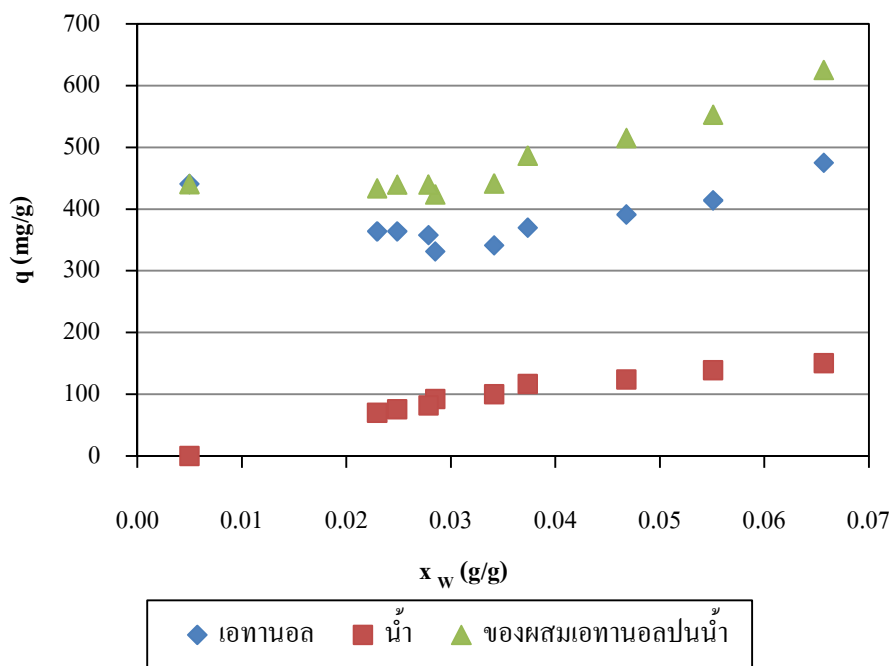


ภาพที่ 4.14 สัดส่วนของปริมาณเอทานอลที่ล้างออกมาได้ต่อปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับไว้ก่อนล้าง

การนำเอทานอลที่ผ่านการดูดซับแล้วมาล้างด้วยน้ำกลั่น สามารถนำเอทานอลบางส่วนกลับออกมาจากซีโอไลต์ 4A โดยจะได้ปริมาณเอทานอลอย่างน้อยร้อยละ 70 ของปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับไว้ เอทานอลส่วนที่ดึงกลับมาได้สามารถนำกลับเข้าสู่กระบวนการเพื่อเพิ่มความเข้มข้นต่อไป ในกรณีที่สามารถล้างเอทานอลที่ติดอยู่ภายในตัวดูดซับได้หมด สัดส่วนของปริมาณเอทานอลที่ล้างออกมาได้ต่อปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับไว้ จะต้องมีค่าเท่ากับหนึ่ง แต่ผลจากการทดลองพบว่าค่าสัดส่วนของเอทานอลที่ล้างออกมาได้ไม่เป็นเช่นนั้น แสดงให้เห็นว่ายังคงมีเอทานอลบางส่วนที่ติดอยู่ภายในซีโอไลต์ 4A จึงต้องนำซีโอไลต์ 4A หลังการล้าง ไปปรับสภาพด้วยวิธีอื่น เพื่อนำตัวดูดซับกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง ซึ่งในงานวิจัยจะทำการปรับสภาพซีโอไลต์ 4A หลังจากล้างด้วยน้ำกลั่นด้วยความร้อน จากการอบตัวดูดซับที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส พบว่าน้ำหนักซีโอไลต์ 4A หลังอบในเวลา 60 นาที มีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักซีโอไลต์ 4A หลังอบในเวลา 80 นาที กล่าวคือ น้ำหนักซีโอไลต์ 4A หลังอบในเวลา 60 นาที แตกต่างจากน้ำหนักซีโอไลต์ 4A หลังอบในเวลา 80 นาที เพียงร้อยละ 0.3

4.3.3 แบบจำลองสมดุลการดูดซับ

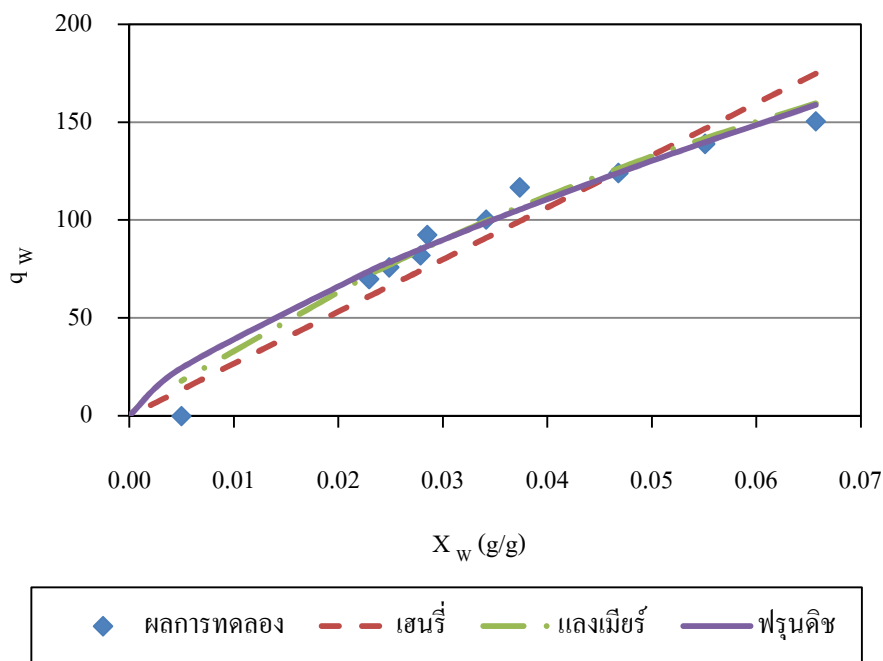
การดูดซับน้ำออกจากของผสมเอทานอลปนน้ำที่สัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำสูงกว่า 0.9222 ด้วยตัวดูดซับซีโอไลต์ 4A ระบบจะเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 120 นาที จึงนำปริมาณสมดุลดูดซับที่เวลา 120 นาที มาสร้างแบบจำลองสมดุลดูดซับที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้ในการทำนายปริมาณดูดซับเอทานอลและน้ำแทนผลการทดลอง ปริมาณสมดุลดูดซับที่เวลา 120 นาที แสดงดังภาพที่ 4.15 แบบจำลองสมดุลดูดซับที่จะใช้อธิบายแทนผลการทดลองในงานวิจัยได้แก่ แบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี, แลงเมียร์ และฟรุนดลิช เนื่องจาก เป็นแบบจำลองที่ใช้สำหรับอธิบายผลการดูดซับของของเหลว



ภาพที่ 4.15 ปริมาณสมดุลดูดซับของผสมเอทานอล น้ำ และเอทานอล ที่สัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำสูงกว่า 0.9222

สำหรับปริมาณสมดุลดูดซับเอทานอลที่สัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำสูงกว่า 0.9222 ไม่สามารถบอกได้ว่าตรงกับแบบจำลองสมดุลการดูดซับของเฮนรี, แลงเมียร์ หรือ ฟรุนดลิช เนื่องจากข้อมูลการทดลองมีการกระจายมาก ทำให้ไม่สามารถหาแบบจำลองที่เหมาะสมได้ ส่วนปริมาณสมดุลดูดซับน้ำด้วยซีโอไลต์ 4A ที่สัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ

สูงกว่า 0.9222 สามารถอธิบายด้วยแบบจำลองสมมูลดูดซับของเฮนรี่, แลงเมียร์ และฟรุนดิช ดังภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.16 ปริมาณสมมูลดูดซับน้ำที่สัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำสูงกว่า 0.9222

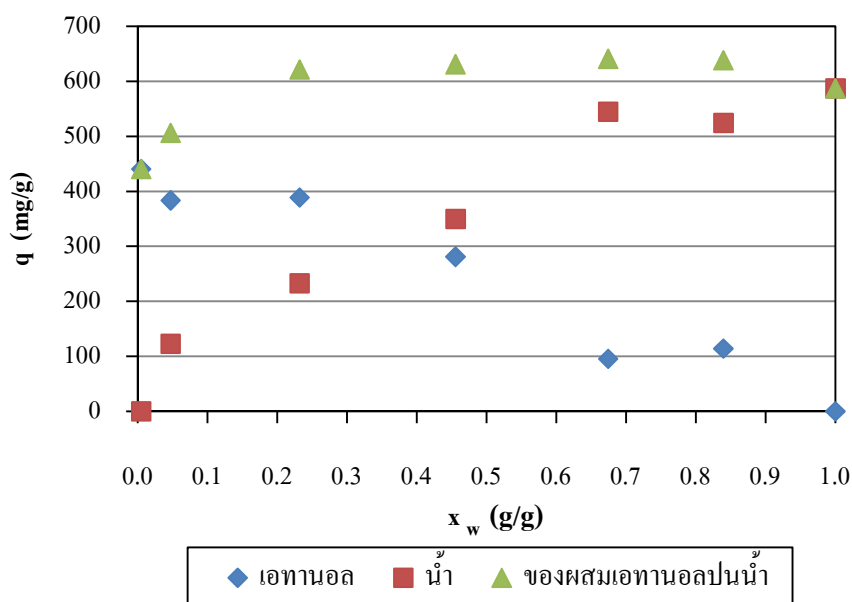
สำหรับค่าคงที่ของแบบจำลอง และผลรวมของผลต่างระหว่างค่าปริมาณสมมูลดูดซับที่ได้จากแบบจำลอง กับที่ได้จากการทดลอง ยกกำลังสอง ($\Sigma(\Delta q)^2$) แสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าคงที่ของแบบจำลองสมมูลดูดซับน้ำตามแบบจำลองของเฮนรี่, แลงเมียร์ และฟรุนดิช กรณีที่สัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำสูงกว่า 0.9222

แบบจำลองสมมูลดูดซับของเฮนรี่		แบบจำลองสมมูลดูดซับของแลงเมียร์		แบบจำลองสมมูลดูดซับของฟรุนดิช	
K_H	2661.00	K_L	8.07	K_F	1148.70
		q_m	460.84	n	0.73
R^2	0.895	R^2	0.970	R^2	0.960
$(\Sigma(\Delta q)^2)$	1725	$(\Sigma(\Delta q)^2)$	568	$(\Sigma(\Delta q)^2)$	865

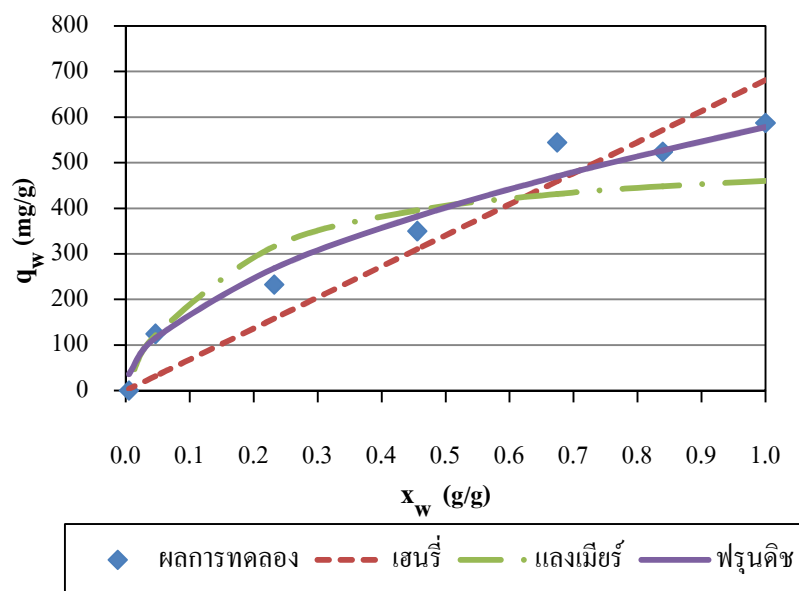
ผลรวมของผลต่างระหว่างปริมาณสมดุลดูดซับน้ำที่ได้จากแบบจำลองสมดุลดูดซับกับค่าปริมาณสมดุลดูดซับน้ำที่ได้จากการทดลองยกกำลังสองของแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์และแบบจำลองสมดุลดูดซับของฟรุนดลิชมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าน้อยกว่าผลรวมของผลต่างระหว่างปริมาณสมดุลดูดซับน้ำที่ได้จากแบบจำลองสมดุลดูดซับกับค่าปริมาณสมดุลดูดซับน้ำที่ได้จากการทดลองยกกำลังสองที่ได้จากแบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี แบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช จึงเหมาะสมที่ใช้ในการอธิบายสมดุลดูดซับน้ำออกจากของผสมเอทานอลปนน้ำที่สัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำสูงกว่า 0.9222

นอกจากนี้ในงานวิจัยยังศึกษาการดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยซีโอไลต์ 4A ในช่วงสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำตั้งแต่ 0-0.99 เพื่อต้องการสร้างแบบจำลองสมดุลดูดซับที่สามารถใช้ได้กับช่วงของความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำทั้งระบบ โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 30 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ และใช้เวลาการดูดซับ 120 นาที ปริมาณสมดุลดูดซับแสดงดังภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.17 ปริมาณสมดุลดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำ, เอทานอล และน้ำ ในช่วงสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ 0-0.99

แบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี แลงเมียร์ และฟรุนดิช สำหรับปริมาณสมดุลดูดซับน้ำ
แสดงดังภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.18 ปริมาณสมดุลดูดซับน้ำ ในช่วงสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ
0-0.99

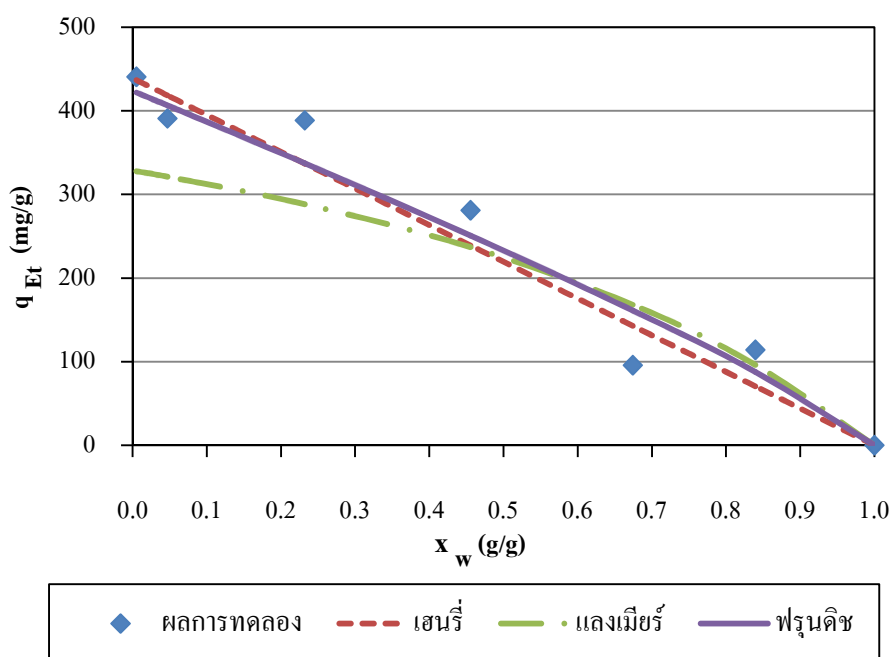
สำหรับค่าคงที่ของแบบจำลอง และผลรวมของผลต่างระหว่างค่าปริมาณสมดุลดูดซับน้ำที่
ได้จากแบบจำลอง กับที่ได้จากการทดลอง ยกกำลังสอง ($\Sigma(\Delta q)^2$) แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าคงที่ของแบบจำลองสมดุลดูดซับน้ำตามแบบจำลองของเฮนรี, แลงเมียร์ และ
ฟรุนดิช ในช่วงสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ 0-0.99

แบบจำลองสมดุลดูด ซับของเฮนรี	แบบจำลองสมดุลดูดซับ ของแลงเมียร์	แบบจำลองสมดุลดูดซับ ของฟรุนดิช
K_H 681.10	K_L 6.29	K_F 577.81
	q_m 533.16	n 0.53
R^2 0.894	R^2 0.934	R^2 0.970
$(\Sigma(\Delta q)^2)$ 34014	$(\Sigma(\Delta q)^2)$ 44100	$(\Sigma(\Delta q)^2)$ 9363

แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรูนดิช มีค่า $(\Sigma(\Delta q)^2)$ น้อยกว่าแบบจำลองสมดุลการดูดซับของเฮนรี และแลงเมียร์ ดังนั้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรูนดิช มีความเหมาะสมเพื่อใช้ในการอธิบายการดูดซับน้ำออกจากของผสมเอทานอลปนน้ำ ด้วยซีโอไลต์ 4A ในช่วงสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ 0-0.99

แบบจำลองสมดุลการดูดซับของเฮนรี แลงเมียร์ และฟรูนดิช สำหรับปริมาณสมดุลการดูดซับเอทานอล แสดงดังภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 ปริมาณสมดุลการดูดซับเอทานอล ในช่วงสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ 0-0.99

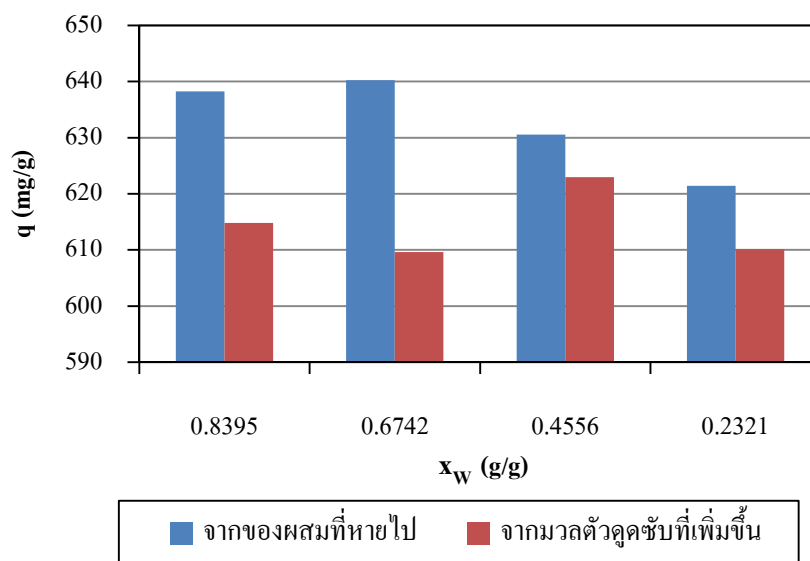
ค่าคงที่ของแบบจำลอง และผลรวมของผลต่างระหว่างค่าปริมาณสมดุลการดูดซับที่ได้จากแบบจำลองกับที่ได้จากการทดลองยกกำลังสอง $(\Sigma(\Delta q)^2)$ แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ค่าคงที่ของแบบจำลองสมมูลดูดซับเอทานอลตามแบบจำลองของเฮนรี, แลงเมียร์ และฟรุนดิช ในช่วงสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ 0-0.99

แบบจำลองสมมูลดูดซับของเฮนรี		แบบจำลองสมมูลดูดซับของแลงเมียร์		แบบจำลองสมมูลดูดซับของฟรุนดิช	
K_H	439.00	q_m	610.12	K_F	423.59
		K_L	1.1678	n	0.86
R^2	0.981	R^2	0.616	R^2	0.833
$(\Sigma(\Delta q)^2)$	9300	$(\Sigma(\Delta q)^2)$	35076	$(\Sigma(\Delta q)^2)$	8753

แบบจำลองสมมูลการดูดซับของเฮนรี และฟรุนดิช มีค่า $(\Sigma(\Delta q)^2)$ ใกล้เคียงกัน และมีค่าน้อยกว่า $(\Sigma(\Delta q)^2)$ ที่ได้จากแบบจำลองสมมูลการดูดซับของแลงเมียร์ ดังนั้นแบบจำลองสมมูลการดูดซับของเฮนรี และฟรุนดิช มีความเหมาะสมเพื่อใช้ในการอธิบายการดูดซับเอทานอลออกจากของผสม เอทานอลปนน้ำด้วยซีโอไลต์ 4A ในช่วงสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ 0-0.99

เมื่อวัดปริมาณสมมูลดูดซับของผสม ที่ได้จากการวัดของผสมเอทานอลที่ลดลงหลังการดูดซับ กับที่ได้จากการวัดน้ำหนักของซีโอไลต์ 4A ที่เพิ่มขึ้นหลังการดูดซับ พบว่า ค่าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีความแตกต่างกันไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.20 ปริมาณสมมูลดูดซับของผสมที่ได้จากการวัดของผสมที่หายไป และมวลของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้น

เนื่องจาก การวัดปริมาณดูดซับของผสมจากการวัดของผสมที่ลดลงหลังการดูดซับ และจากการวัดมวลตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้นหลังการดูดซับมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นการยืนยันว่าปริมาณดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำที่วัดได้จากการวัดของผสมที่ลดลงหลังการดูดซับมีความน่าเชื่อถือ จึงสามารถคำนวณ ปริมาณสมมูลดูดซับของผสม จากการนำปริมาณสมมูลดูดซับน้ำรวมกับปริมาณสมมูลดูดซับเอทานอล ดังสมการที่ 4.10

$$q_T = q_w + q_{Et} \quad \dots(4.10)$$

ปริมาณสมมูลดูดซับน้ำอธิบายได้ด้วยแบบจำลองสมมูลดูดซับของฟรุนดิช ส่วนปริมาณสมมูลดูดซับเอทานอลอธิบายได้ด้วยแบบจำลองสมมูลดูดซับของฟรุนดิช และเฮนรี เมื่อนำค่าคงที่จากแบบจำลองสมมูลดูดซับน้ำและเอทานอลมาแทนลงในสมการที่ 4.10 สามารถหาสมการปริมาณสมมูลดูดซับของผสมได้ดังสมการที่ 4.11 และ 4.12 ซึ่งแทนปริมาณสมมูลดูดซับเอทานอลด้วยแบบจำลองสมมูลดูดซับของฟรุนดิช และเฮนรี ตามลำดับ

$$q_T = 577.81 X_w^{0.53} + 423.59 X_w^{0.86} \quad \dots(4.11)$$

$$q_T = 577.81 X_w^{0.53} + 439 X_w \quad \dots(4.12)$$

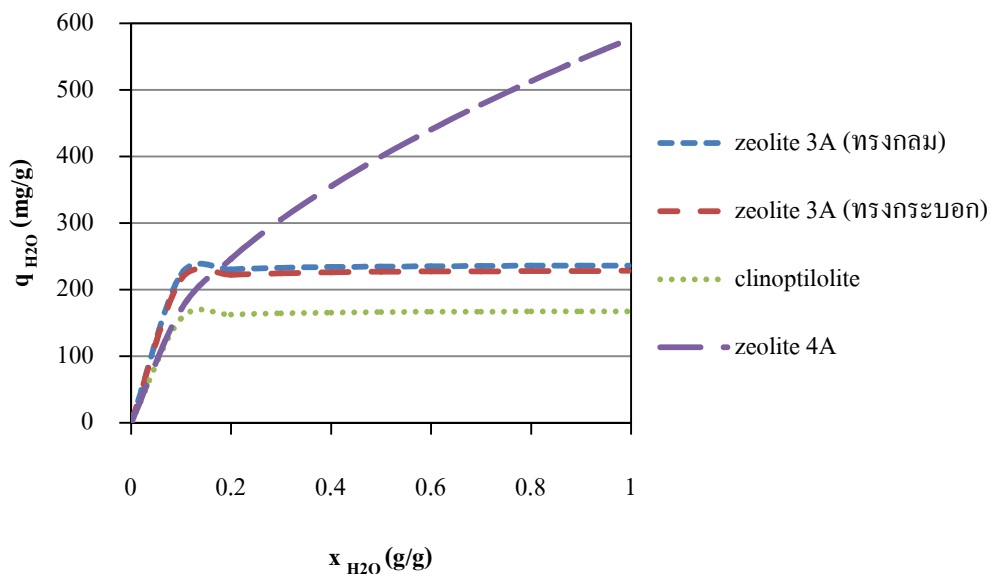
เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะที่ได้จากการทดลองการดูดซับน้ำในของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ เช่น ซีโอไลต์ 3A [29], clinoptilolite [25] สภาวะการดูดซับ และแบบจำลองสมมูลดูดซับ สรุปไว้ในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ผลการทดลองการดูดซับน้ำในของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ

ชนิดตัวดูดซับ		อุณหภูมิ (°C)	x_{H_2O} (กรัม/กรัม)	เวลาดูดซับ (นาที)	สมการสมมูลดูดซับ
ซีโอไลต์ 3A [29]	ทรงกลม	40	0-1	7 วัน	$q = \frac{(238)(153)x}{1+153x}$
	ทรงกระบอก				$q = \frac{(230)(148)x}{1+148x}$
Clinoptilolite [25]		20	0.053-0.623	1 วัน	$q = \frac{(169)(127.39)x}{1+127.39x}$
ซีโอไลต์ 4A		30	0-0.995	120 นาที	$q = 577.81x^{0.53}$

โดยที่ q มีหน่วยเป็น mg/g และ x มีหน่วยเป็น กรัมต่อกรัมของผสมเอทานอลปนน้ำ

เมื่อตัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำต่ำกว่า 0.2 ปริมาณสมมูลดูดซับน้ำด้วยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อตัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำมีค่าสูงกว่า 0.2 พบว่า ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด 4A มีค่าปริมาณสมมูลดูดซับน้ำมีค่ามากกว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด 3A และ clinoptilolite ดังแสดงในรูปที่ 4.21

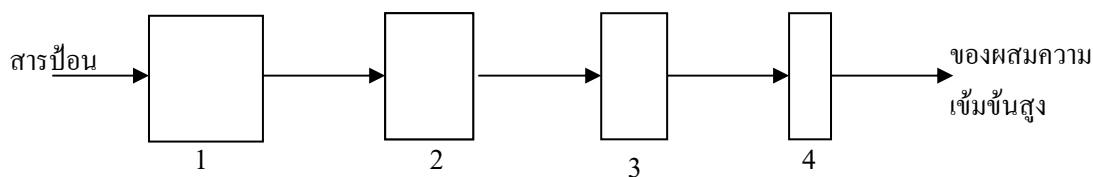


ภาพที่ 4.21 การเปรียบเทียบปริมาณสมดุลดูดซับด้วยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ

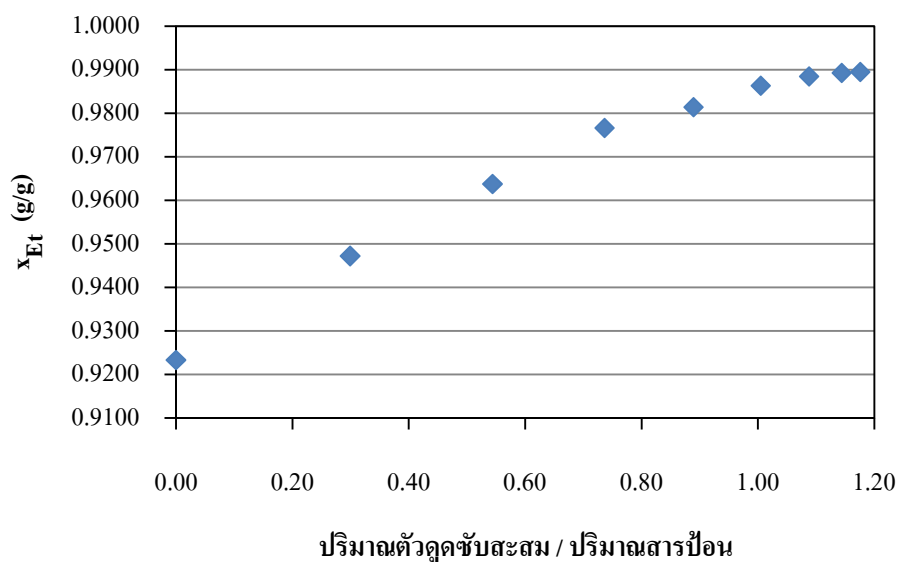
4.4 การทดสอบระบบการดูดซับน้ำในหอดูดซับจำลอง

การทดสอบระบบการดูดซับในหอดูดซับจำลอง เป็นการเพิ่มสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำ โดยจะทำการดูดซับในระบบกะ ของผสมเอทานอลปนน้ำที่เหลือจากการดูดซับครั้งแรกจะถูกนำมาใช้ในครั้งต่อไป ดังนั้นระบบการดูดซับในลำดับต่อไปจะมีขนาดเล็กลง ดังแสดงในภาพที่ 4.22 ซึ่งในงานวิจัยจะกำหนดการใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่าเดิม คือ ร้อยละ 30 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำที่ทางเข้าของแต่ละระบบการดูดซับ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่

4.23



ภาพที่ 4.22 แสดงระบบการดูดซับน้ำในหอดูดซับจำลอง



ภาพที่ 4.23 ความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมที่สมดุล ด้วยการทดสอบระบบการดูดซับน้ำในหอดูดซับจำลอง

เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับสะสม 1.09 เท่าของปริมาณสารป้อน ทำให้สัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำเริ่มต้นจาก 0.92 เพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 0.99 และทำให้ของผสมเอทานอลปนน้ำที่เหลือหลังการดูดซับจะมีปริมาณร้อยละ 24 ของปริมาณสารป้อน ถ้าใช้ปริมาณตัวดูดซับสะสมมากกว่า 1.09 เท่าของปริมาณสารป้อน ทำให้ความสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำเพิ่มขึ้นน้อยมาก เนื่องจาก ในแต่ละครั้งของการดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำบรรจุในภาชนะที่มีขนาดเดียวกัน เมื่อจำนวนครั้งการดูดซับมากขึ้น ทำให้ระดับความสูงของของผสมเอทานอลปนน้ำมีค่าน้อยลง ส่งผลให้ความดันที่ผิวของตัวดูดซับมีค่าน้อยลง การดูดซับน้ำจาก

ของผสมเอทานอลปนน้ำจึงทำได้ยากขึ้น ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการทดสอบระบบการดูดซับน้ำจากของผสมเอทานอลปนน้ำในหอดูดซับจำลองในงานวิจัยนี้

ในการทดลองในหอดูดซับจำลองแต่ละครั้งจะใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 30 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ ดังนั้น ในการดูดซับครั้งแรกจะใช้ปริมาณตัวดูดซับสะสมร้อยละ 30 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ การทดลองครั้งที่สองจะนำของผสมเอทานอลปนน้ำที่เหลือหลังการดูดซับครั้งแรกมาใช้ต่อ โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 30 ของปริมาณของผสมที่ได้ ดังนั้น ปริมาณตัวดูดซับทั้งหมดจากครั้งแรกพร้อมกับครั้งที่สองมีปริมาณสะสมร้อยละ 60 ของปริมาณสารป้อน และการทดลองครั้งที่สามจะนำของผสมเอทานอลปนน้ำที่เหลือหลังการดูดซับครั้งที่สองมาใช้ต่อ โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 30 ของปริมาณของผสมที่เหลือจากการดูดซับครั้งที่สอง ดังนั้น ปริมาณตัวดูดซับทั้งหมดจากครั้งแรกถึงครั้งที่สามมีปริมาณสะสมร้อยละ 90 ของสารป้อน การทดลองในสามครั้งแรกในหอดูดซับเสมือนกับการทดลองการดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำโดยใช้ตัวดูดซับร้อยละ 30, 60 และ 90 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ 4.4.1 ผลการเปรียบเทียบความเข้มข้นหลังการดูดซับที่ได้จากการทดสอบการดูดซับในหอดูดซับ กับผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ 4.4.1 แสดงดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบความเข้มข้นหลังการดูดซับที่ได้จากการทดสอบในหอดูดซับจำลอง กับ จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ 4.4.1 ที่ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 30, 60 และ 90 ของปริมาณของผสม เอทานอลปนน้ำ (สำหรับในหอดูดซับจำลอง จะเปลี่ยนจากปริมาณตัวดูดซับ เป็นปริมาณตัวดูดซับ สะสม)

ร้อยละปริมาณตัวดูดซับ (หรือปริมาณตัวดูดซับ สะสม) ต่อปริมาณของ ผสมเอทานอลปนน้ำ	สัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ		
	จากการทดสอบในหอดูดซับ จำลอง (ผลการวิเคราะห์ ข้อมูลที่ 4.5)	จากผลการ วิเคราะห์ข้อมูลที่ 4.4.1	$\frac{\bar{q}_{4.5} - \bar{q}_{4.4.1}}{\bar{q}_{4.5}} \times 100$
30	0.94717	0.95319	0.64
60	0.96372	0.97148	0.81
90	0.97663	0.97704	0.04

จากการทดลองพบว่า ค่าความเข้มข้นหลังการดูดซับที่ได้จากการทดสอบในหอดูดซับจำลอง กับจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ 4.4.1 มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนแตกต่างกันไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือ การใช้ระบบการดูดซับที่ต่างกัน ความเข้มข้นหลังการดูดซับมีค่าใกล้เคียงกัน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. การดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำ ระบบเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่เวลา 30 นาที ส่วนการดูดซับเอทานอลจากของผสมเอทานอลปนน้ำระบบเข้าสู่สมดุลที่เวลา 30 นาที และการดูดซับน้ำจากของผสมเอทานอลปนน้ำระบบจะเข้าสู่สมดุลโดยใช้เวลา 120 นาที
2. ตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานมาแล้วสามารถล้างเอทานอลบางส่วนออกด้วยน้ำกลั่น โดยจะได้ปริมาณเอทานอลอย่างน้อย 70 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับไว้
3. สัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำมากกว่า 0.9222 ปริมาณสมดุลดูดซับน้ำสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองสมดุลดูดซับของฟรุนดิชและแลงเมียร์ได้ดีกว่าแบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี ส่วนสมดุลดูดซับของเอทานอลไม่สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี แลงเมียร์ และฟรุนดิช
4. ตลอดช่วงสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำตั้งแต่ 0-0.995 ปริมาณสมดุลดูดซับน้ำและเอทานอลสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองสมดุลดูดซับของฟรุนดิช และเฮนรีได้ดีกว่าแบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงเมียร์
5. เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับสะสม 1.09 เท่าของปริมาณสารป้อน ทำให้สัดส่วนความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำมีค่าประมาณ 0.99 และของผสมที่เหลือหลังการดูดซับจะมีปริมาณร้อยละ 24 ของปริมาณสารป้อน เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับสะสมมากกว่า 1.09 เท่าของปริมาณสารป้อน ทำให้ความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำเพิ่มขึ้นน้อยมาก ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการทดสอบระบบการดูดซับน้ำจากของผสมเอทานอลปนน้ำในหอดูดซับจำลองในงานวิจัยนี้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาการนำตัวดูดซับซีโอไลต์กลับมาใช้งานใหม่ ดังนั้นควรมีการศึกษาการนำตัวดูดซับกลับมาใช้งานใหม่อีกครั้ง
2. งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยซีโอไลต์ 4A ในระบบกะ ซึ่งยังไม่มีความเหมาะสมในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงควรมีการพัฒนาการดูดซับเป็นระบบต่อเนื่อง
3. ในการทดสอบระบบการดูดซับน้ำจากของผสมเอทานอลปนน้ำในหอดูดซับจำลอง ควรมีการศึกษาออกแบบการทดลองโดยให้ปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำเท่ากันในแต่ละครั้งของการทดสอบ

รายการอ้างอิง

- [1] ภาวดี. ผลิตเอทานอลเพื่อก๊าซโซฮอลล์ (gasohol). [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา : <http://www.vcharkarn.com/varticle/38199> [24 มกราคม 2554].
- [2] สุจิตรา วงศ์เกษมจิตต์ และ เดโซ ชุนนกร. เอทานอล : พลังงานทดแทนในวิธีพอเพียง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.cca.chula.ac.th/lecture_series/images/stories/pdf/sufficiency01.pdf [24 มกราคม 2554].
- [3] Robertson, G.H. and Paulath, A.E. Simultaneous water adsorption from ethyl alcohol and oil extraction from corn. Energy in Agriculture 5 (December 1986) : 295-308.
- [4] Banat, F.A., Al-rub, F.A.A. และ Simadl, J. Analysis of vapor-liquid equilibrium of ethanol-water system via headspace gas chromatography : effect of molecular sieves. Separation and Purification Technology 18 (March 2000) : 111-118.
- [5] ประสาน รัตนสาลี. การผลิตเอทานอล (Ethanol) ใช้แทนน้ำมันได้พิภพ. [ออนไลน์]. 2549. แหล่งที่มา : <http://psmc 2006.com>. [12 ตุลาคม 2554].
- [6] นิรนุช ควรเชิดชู และ สุจิตรา วงศ์เกษมจิตต์. แก๊สโซฮอลล์ : เทคโนโลยีสะอาด ช่วยเศรษฐกิจประเทศไทย. [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา : <http://www.vcharkarn.com/varticle/16376> [12 ตุลาคม 2554].
- [7] Mantell, C.L. Adsorption. second edition. New York and London : McGraw-Hill, 1951.
- [8] Geankoplis, C.J. Transport process and separation process principle. fourth edition. Upper Saddle River, N. J. : Pearson/Prentice Hall, 2003.
- [9] จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. การเร่งปฏิกิริยาพื้นฐาน และการประยุกต์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2547.

- [10] Rodrigues, A.E., Levan, M.D. and Tondeur, D. Adsorption : science and technology. Dordrecht : Kluwer Academic, 1989.
- [11] Ruthven, D.M. Principles of Adsorption and Adsorption Processes. New York : John Wiley, 1984.
- [12] Thomas, W.J. and Crittenden, B. Adsorption Technology and Design. Boston : Butterworth-Heinemann, 1998.
- [13] ศักดิ์จิตรา ต้นสมบูรณ์, ถัดดา ยาวีรชน์ และ ชลรา ไกรวัฒนุสรณ์. การผลิตคาร์บอนกัมมันต์จากชานอ้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2538
- [14] จีรณา วงศ์สิหรา และ ภัทรารักษ์ หลักทอง. การศึกษาการดูดซับสิ่งเจือปนในน้ำมันไบโอดีเซล. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2538
- [15] Kulprathipanja, S. Zeolite in industrial separation and catalyst. Weinheim : Wiley-VCH, 2010.
- [16] Werber, WJ. Application of adsorption to wastewater treatment. Industrial water Engineer 18 (1981) : 19-25.
- [17] เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. การบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. นนทบุรี : มิตรนราการพิมพ์, 2539.
- [18] Treybal, R.E. Mass-transfer operations. Second edition. New York : McGraw-Hill, 1968.
- [19] ชวริน โภชมรัตน์. การแยกเอทานอลออกจากสารผสมเอทานอล-น้ำ โดยใช้ตัวดูดซับเชิงพาณิชย์จากกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิศวกรรมศาสตร์ สถาบันจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

- [20] Venuto, P.B. and Habib, E.T. Fluid Catalytic Cracking with zeolite catalysts. New York : Marcel Dekker, 1979.
- [21] Gates, B.C. Catalytic chemistry. New York : John Wiley, 1992.
- [22] เลิศ รักสินดิชาติ. การฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ชนิดเอกซ์ที่ใช้แล้วสำหรับดูดซับเอทิลีนไกลคอล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [23] Breck, D.W. Zeolite molecular sieves : structure, chemistry, and use. Malaban, Flo. : Robert E. Krieger, 1984.
- [24] เดชา ฉัตรศิริเวช. กระบวนการดูดซับ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [25] Ivanova, E., Damgaliev, D. and Kostova, M. Adsorption separation of ethanol-water liquid mixtures by natural clinoptilolite. Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy 44 (July 2009) : 267-274.
- [26] สุภาภรณ์ คางคำ. การพัฒนากระบวนการสำหรับฟื้นฟูสภาพโมเลกุลาร์ซีฟใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [27] Bartholomew, C.H. and Farrauto, R.J. Fundamentals of industrial catalytic processes. Second edition. Hoboken, N.J. : Wiley, 2006.
- [28] Sowerby, S. and Crittenden, B.D. An experimental comparison of type A molecular sieves for drying the ethanol-water azeotrope. Gas Separation and Purification 2 (June 1988) : 77-83.

- [29] Carmo, M.J. and Gubulin, J.C. Ethanol-water adsorption on commercial 3A zeolites kinetic and thermodynamic data. Brazilian Journal of Chemical Engineering [Online]. 1997. Available : http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-66321997000300004&script=sci_arttext [2009, January 22]
- [30] Carmo, M.J., Adeodato, M.G., Moreira, A.M., Parente, E.J.S. and Vieira, R.S. Kinetic and thermodynamic study on the liquid Phase adsorption by starchy material in the alcohol-water system. Adsorption 10 (November 2004) : 211-218.
- [31] จิระเดช ฮายุกต์ และวิทยา เทพไพฑูรย์. การแยกของผสมเอทานอล-น้ำ โดยกระบวนการดูดซับ. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 42. หน้า 351-358. 22 สิงหาคม 2554 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกรุงเทพฯ, 2554 หน้าวิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546.
- [32] จูติ เลิศวรกุล. การแยกแบบดูดซับของของผสมเอทานอล-น้ำ โดยโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3A และ 4A. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [33] Al-asheh, S., Banat, F. and Al-lagtah, N. Separation of ethanol-water mixtures using molecular sieves and biobased adsorbents. Chemical Engineering Research and Design 82 (July 2004) : 855-864.
- [34] Beery, K.E. และ Ladisch, M.R. Adsorption of water from liquid-phase ethanol-water mixtures at room temperature using starch-based adsorbents. Industrial & Engineering Chemistry Research 40 (May 2001) : 2112-2115.
- [35] Crawshaw, J.P. และ Hills, J.H. Experimental determination of binary sorption and desorption kinetics for the system ethanol, water and maize at 90 °C. Industrial & Engineering Chemistry Research 31 (March 1992) : 887-892

- [36] Tannous , M.K., Sherman , J.D. and Cohen, A. P. Silicate treatment of molecular sieve agglomerates. United States Patent (June 1991) : Patent number 5026531
- [37] Plee, D. Zeolite granules with zeolite binder. United States Patent (July 1992) : Patent number 5132260
- [38] Benson, G.C. and Kiyohara, O. Thermodynamics of aqueous mixtures of nonelectrolytes. I. Excess volume of water-n-alcohol mixtures at several temperatures. Journal of Solution Chemistry 9 (1980) : 791-804.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก : ผลการทดลองหาความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำ

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองแสดงความหนาแน่นและความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำ

เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำ		ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส (g/cm ³)				ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (g/cm ³)				ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (g/cm ³)			
โดยมวล	โดยโมล	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	1.00601	1.00579	1.00565	1.00582	1.00556	1.00586	1.00581	1.00574	1.00314	1.00346	1.00315	1.00325
0.1	0.042	0.98919	0.98920	0.98931	0.98923	0.98901	0.98929	0.98917	0.98915	0.98489	0.98677	0.98623	0.98596
0.2	0.089	0.97429	0.97486	0.97447	0.97454	0.97406	0.97406	0.97401	0.97404	0.96968	0.96983	0.97040	0.96997
0.3	0.144	0.95814	0.95840	0.95885	0.95847	0.95739	0.95696	0.95688	0.95708	0.95243	0.95199	0.95247	0.95230
0.4	0.207	0.93878	0.93892	0.93912	0.93894	0.93774	0.93715	0.93716	0.93735	0.93218	0.93208	0.93205	0.93211
0.5	0.281	0.91803	0.91707	0.91769	0.91760	0.91534	0.91494	0.91524	0.91517	0.91033	0.91032	0.91002	0.91022
0.6	0.370	0.89470	0.89437	0.89406	0.89438	0.89199	0.89216	0.89243	0.89220	0.88719	0.88712	0.88725	0.88719
0.7	0.477	0.87038	0.87093	0.87081	0.87071	0.86891	0.86914	0.86912	0.86906	0.86331	0.86348	0.86333	0.86337
0.8	0.610	0.84620	0.84631	0.84598	0.84616	0.84479	0.84424	0.84441	0.84448	0.83882	0.83920	0.83827	0.83876
0.9	0.779	0.81943	0.82049	0.82054	0.82016	0.81775	0.81725	0.81759	0.81753	0.81272	0.81280	0.81296	0.81283
0.995	0.987	0.79123	0.79184	0.79118	0.79142	0.78881	0.78917	0.78915	0.78904	0.78587	0.78522	0.7856	0.78556

ตารางที่ ก.2 ค่า Specific molar Volume (V) ที่ได้จากการทดลอง และค่าความคลาดเคลื่อนของ Excess molar Volume (ΔV) ระหว่างค่าจากการทดลอง และค่าที่ได้จากการอ้างอิง

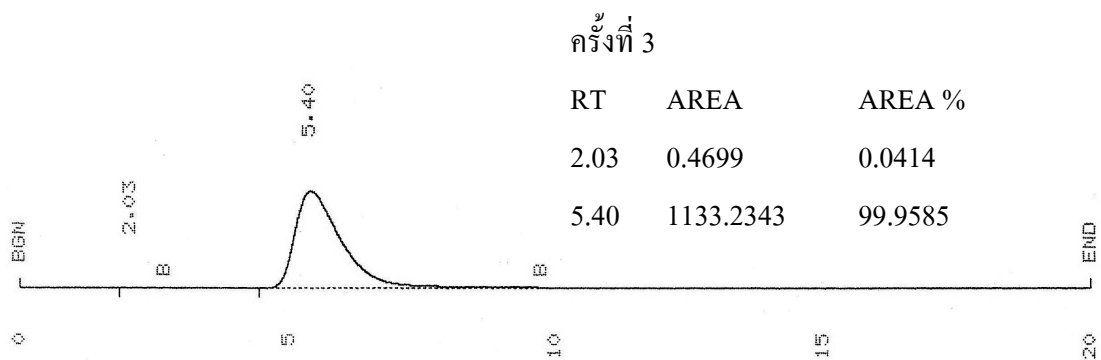
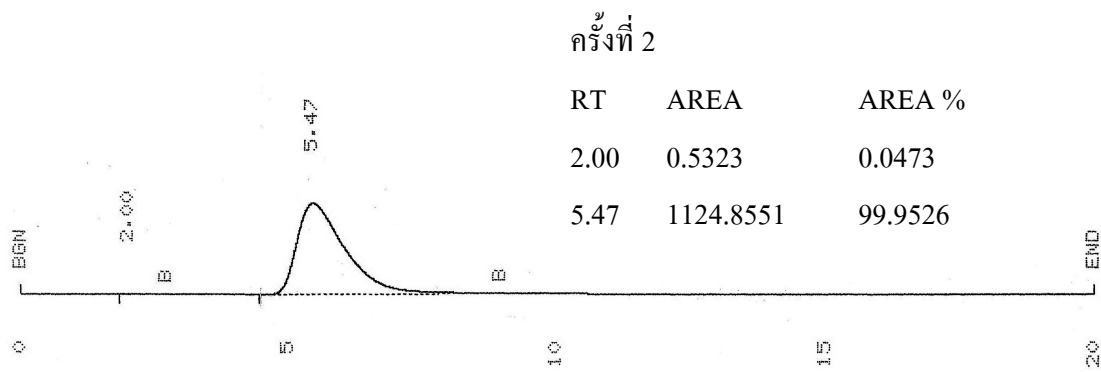
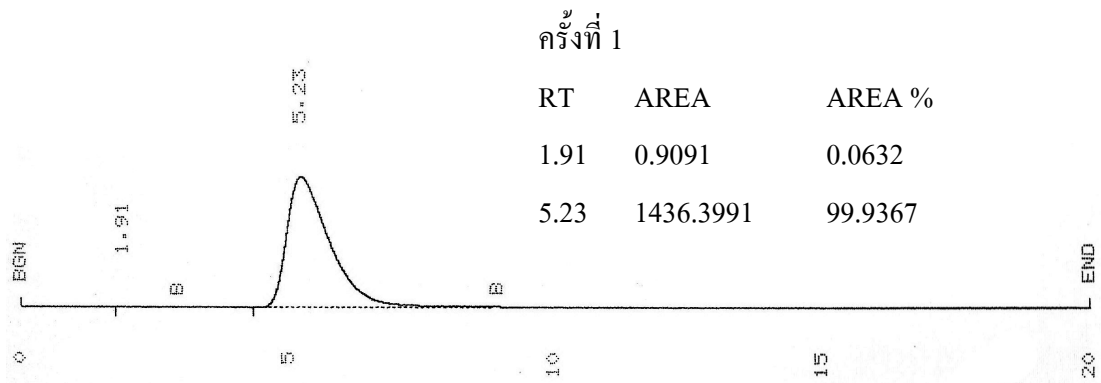
สัดส่วน โดยโมล	ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส					ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส				
	V (cm ³ /mol)		ΔV (cm ³ /mol)		เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน	V (cm ³ /mol)		ΔV (cm ³ /g)		เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อน
	ทดลอง	คำนวณ	จากการ ทดลอง	จากการ อ้างอิง		ทดลอง	คำนวณ	จากการ ทดลอง	จากการ อ้างอิง	
0.042	17.89727	17.89727	-0.2038	-0.1974	-3.2819	17.94169	17.94169	-0.1945	-0.2013	3.4156
0.089	19.37682	19.58066	-0.4562	-0.4551	-0.2305	19.43952	19.63399	-0.4314	-0.4534	4.8689
0.144	21.04120	21.49740	-0.4481	-0.6989	35.8897	21.12950	21.56087	-0.6504	-0.6894	5.6607
0.207	23.25154	23.69960	-0.8728	-0.8768	0.4533	23.12435	23.77473	-0.8186	-0.8636	5.2057
0.281	25.38340	26.25618	-0.9869	-0.9997	1.2833	25.52620	26.34485	-0.9377	-0.9795	4.2660
0.370	28.27332	29.26017	-1.0578	-1.0622	0.4125	28.42705	29.36473	-1.0020	-1.0458	4.1915
0.477	31.78242	32.84026	-1.0905	-1.0616	-2.7271	31.96181	32.96377	-0.9993	-1.0473	4.5769
0.610	36.08925	37.17977	-1.0031	-0.9663	-3.8033	36.32692	37.32625	-0.8948	-0.9527	6.0775
0.779	41.54593	42.54899	-0.6878	-0.6925	0.6887	41.82907	42.72388	-0.6045	-0.6819	11.3637
	\bar{X}				3.19	\bar{X}				5.51
	S.D.				12.41	S.D.				2.34

ภาคผนวก ข : ผลการทดลองตรวจความเข้มข้นของน้ำด้วย Gas Chromatography

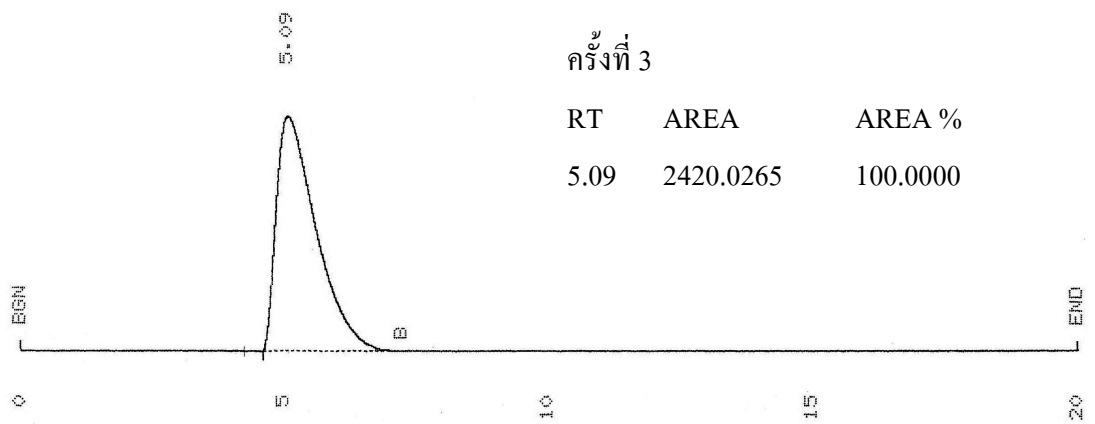
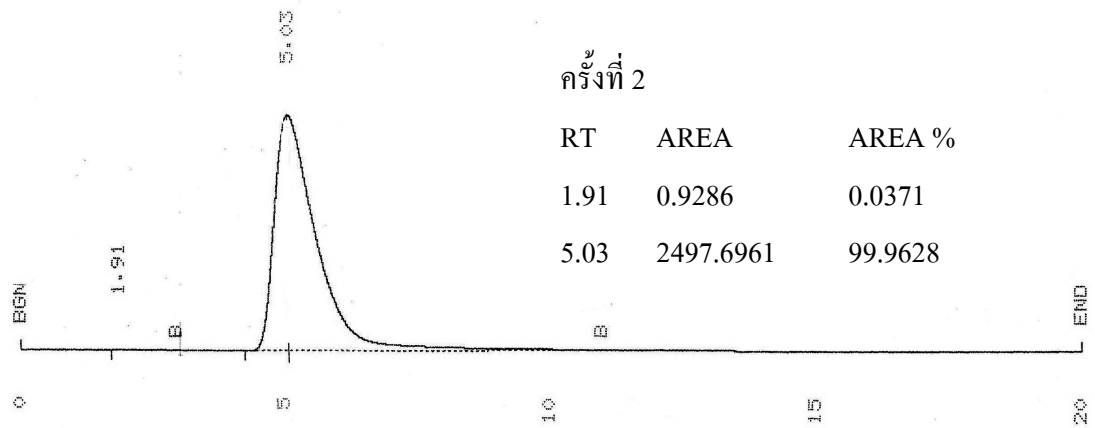
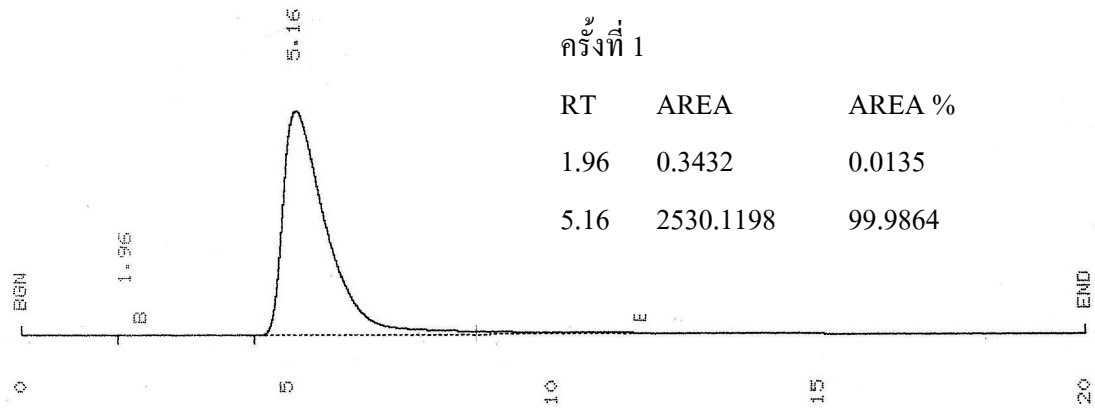
ตารางที่ ข.1 แสดงสภาวะที่ใช้ในการตรวจวัดความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำด้วย Gas Chromatography

Column	Porapak Q
Detector	Flame ionization detector (FID)
Carrier Gas	He 14 psig
Iso time	20 min
Oven temperature	150 °C
Injection temperature	150 °C
Detector temperature	200 °C

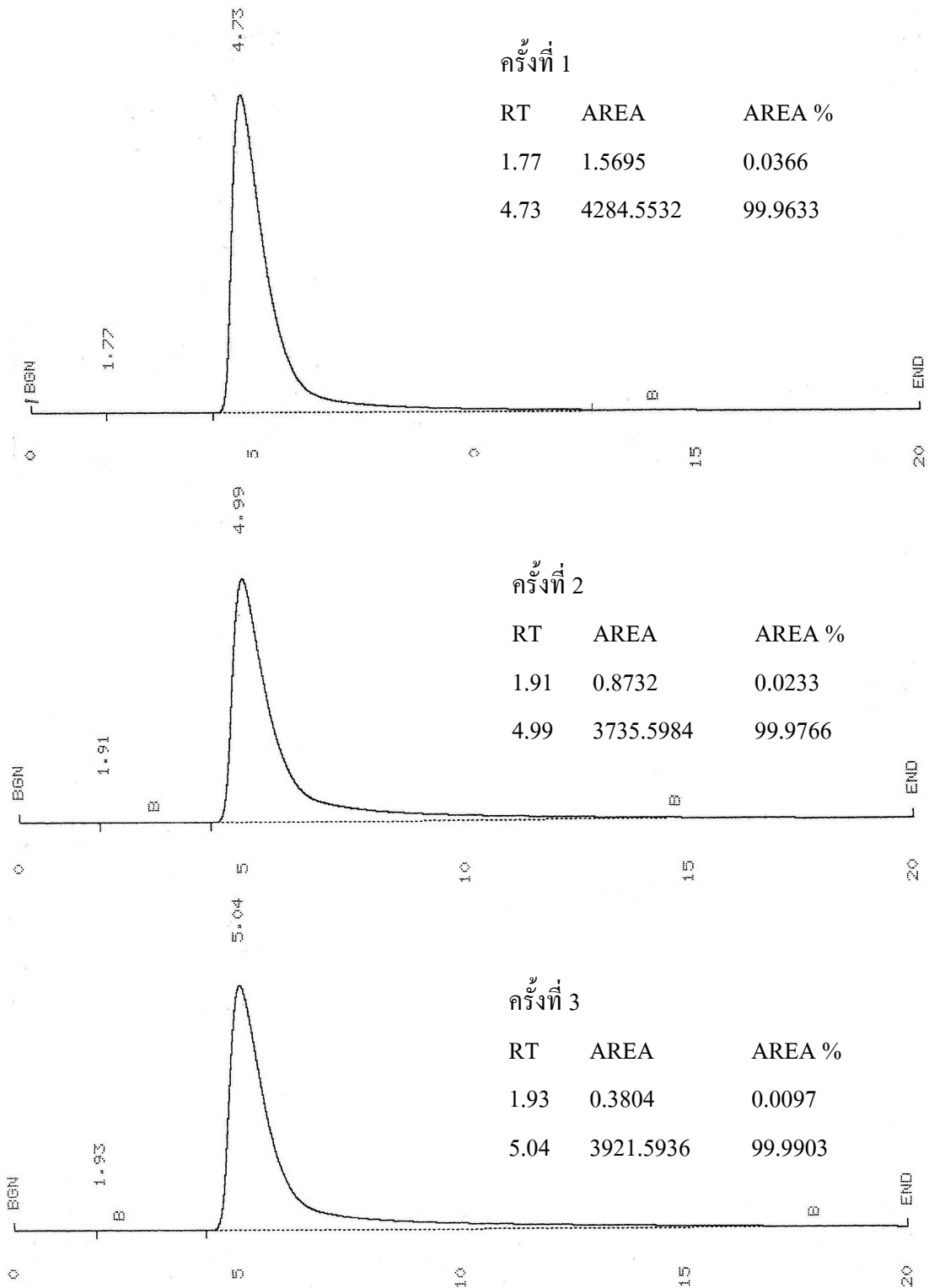
ผลการตรวจวัดสัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำด้วย Gas Chromatography



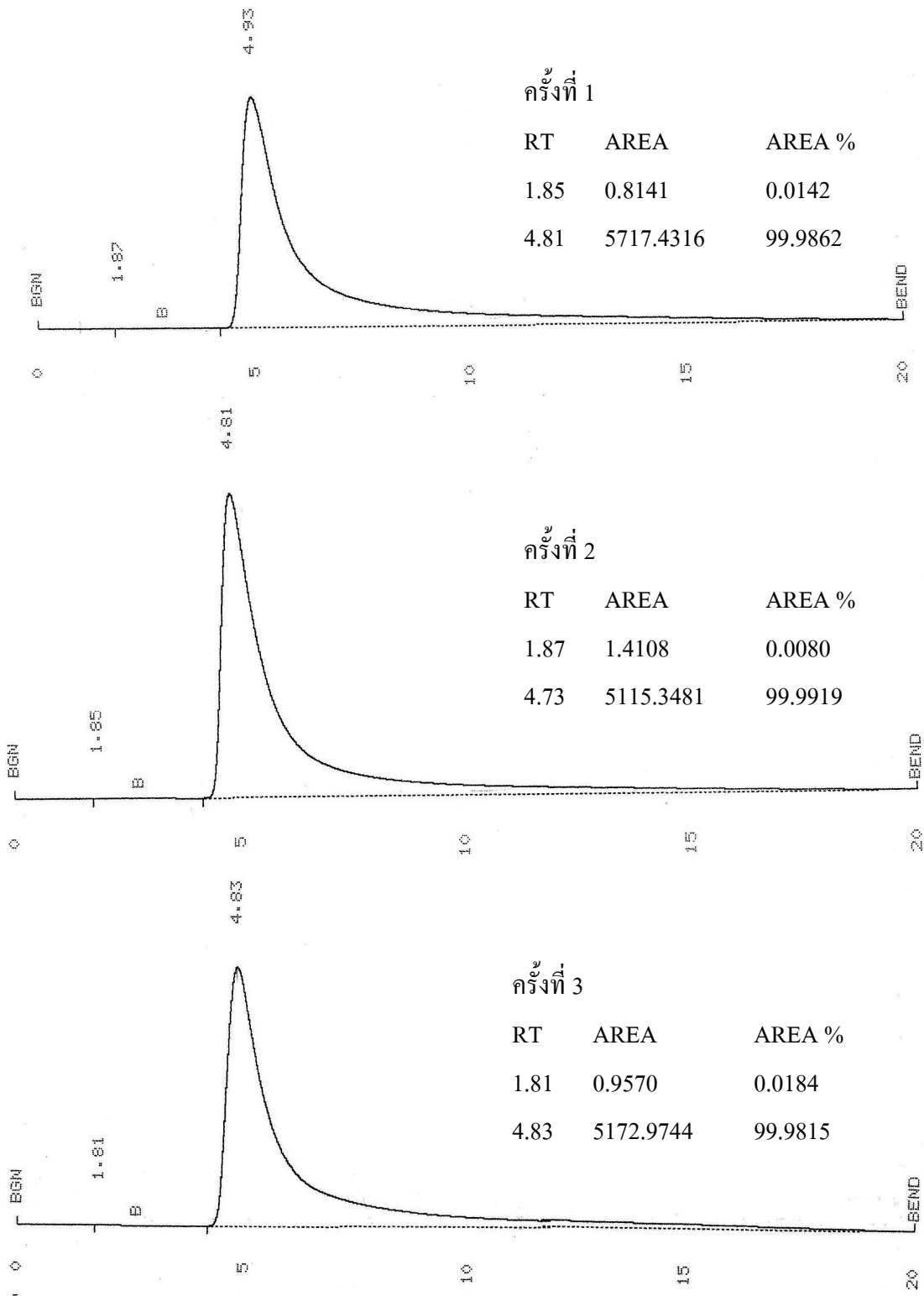
ภาพที่ ข.1 การตรวจความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีสัดส่วนมวลเอทานอล 0.1673



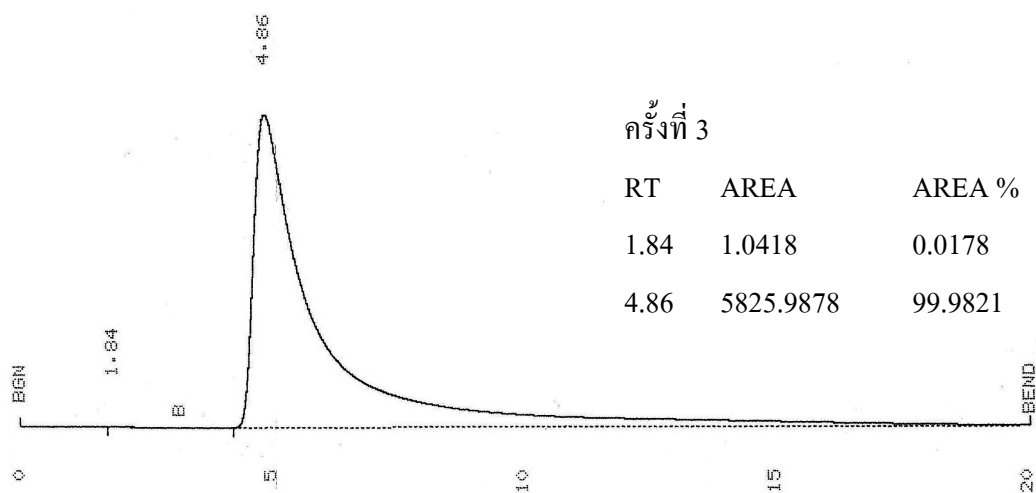
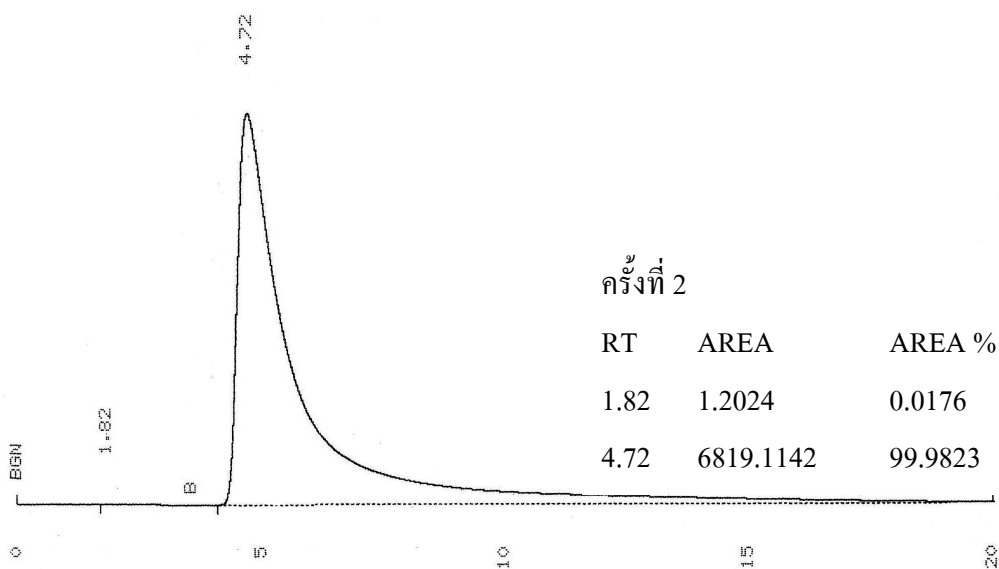
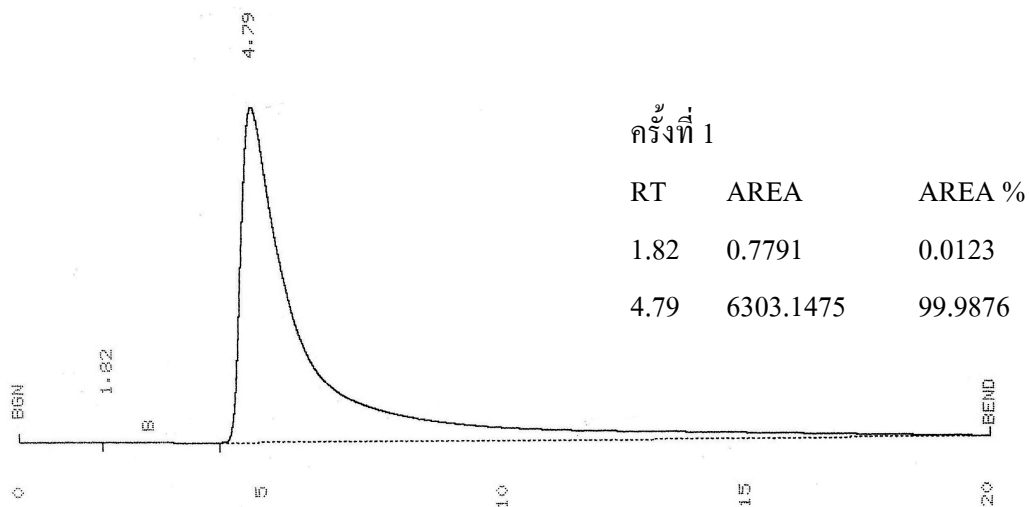
ภาพที่ ข.2 การตรวจความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีสัดส่วนมวลเอทานอล 0.3367



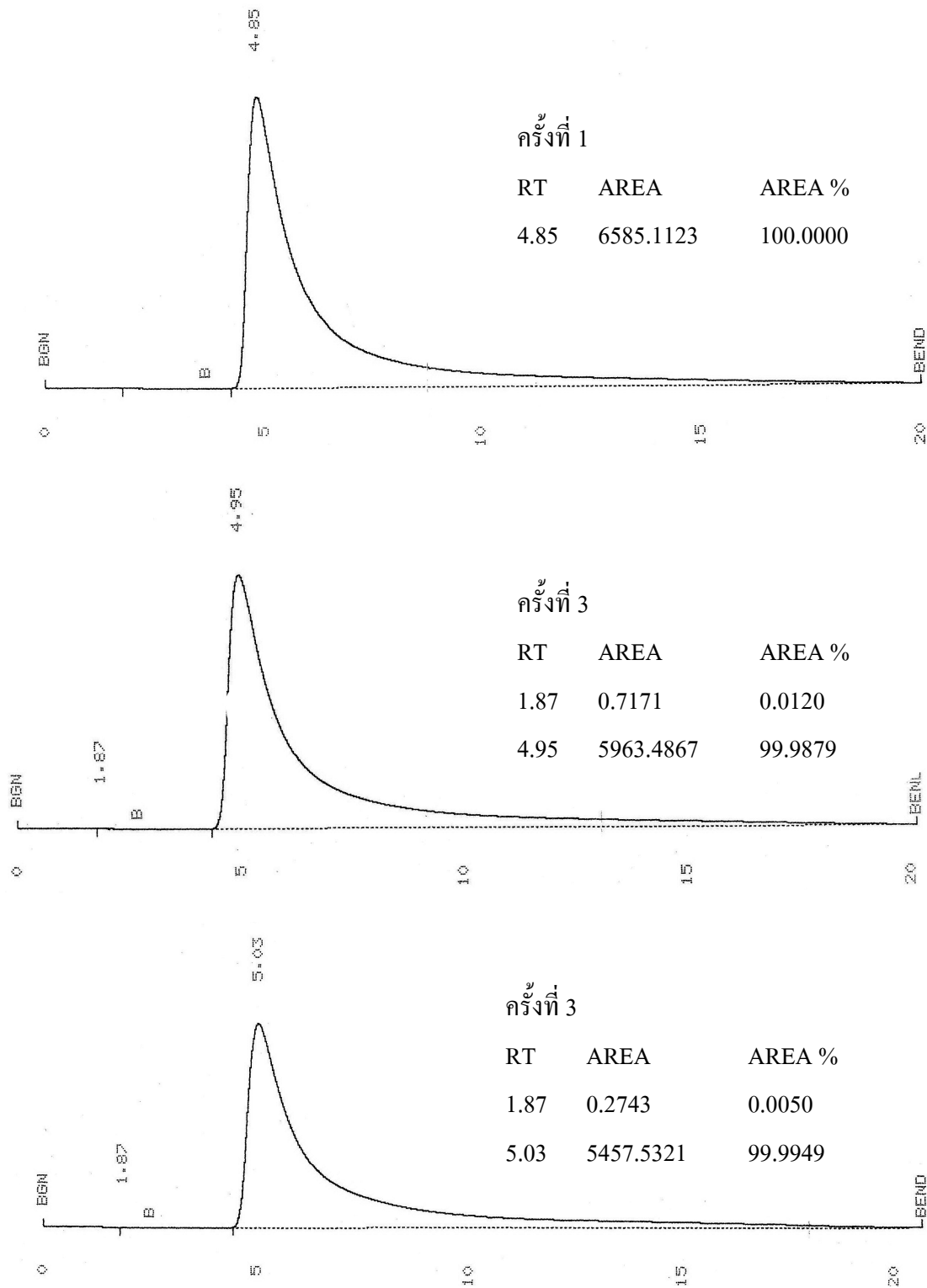
ภาพที่ ข.3 การตรวจความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีสัดส่วนมวลเอทานอล 0.5352



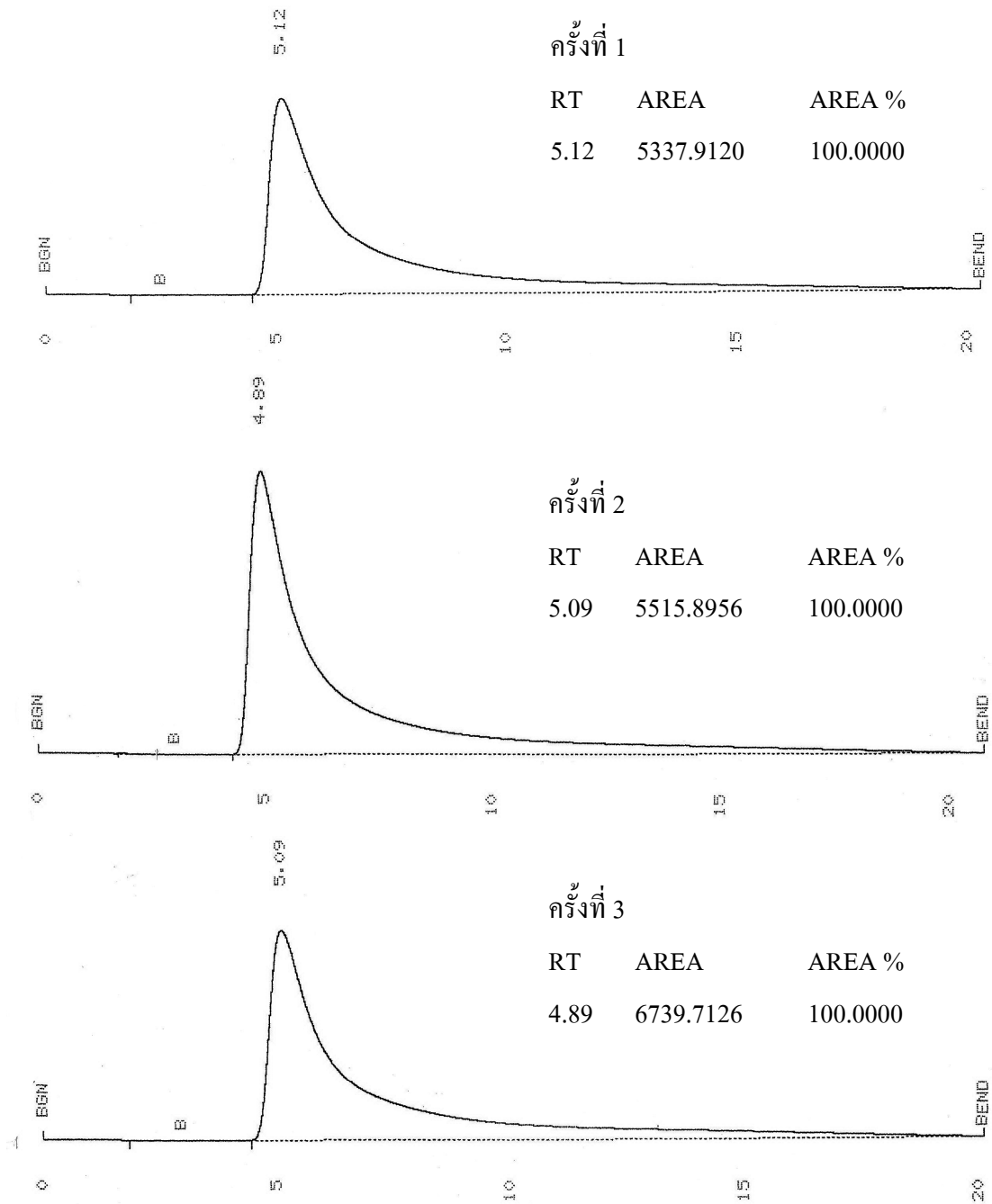
ภาพที่ ข.4 การตรวจความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีสัดส่วนมวลเอทานอล 0.7437



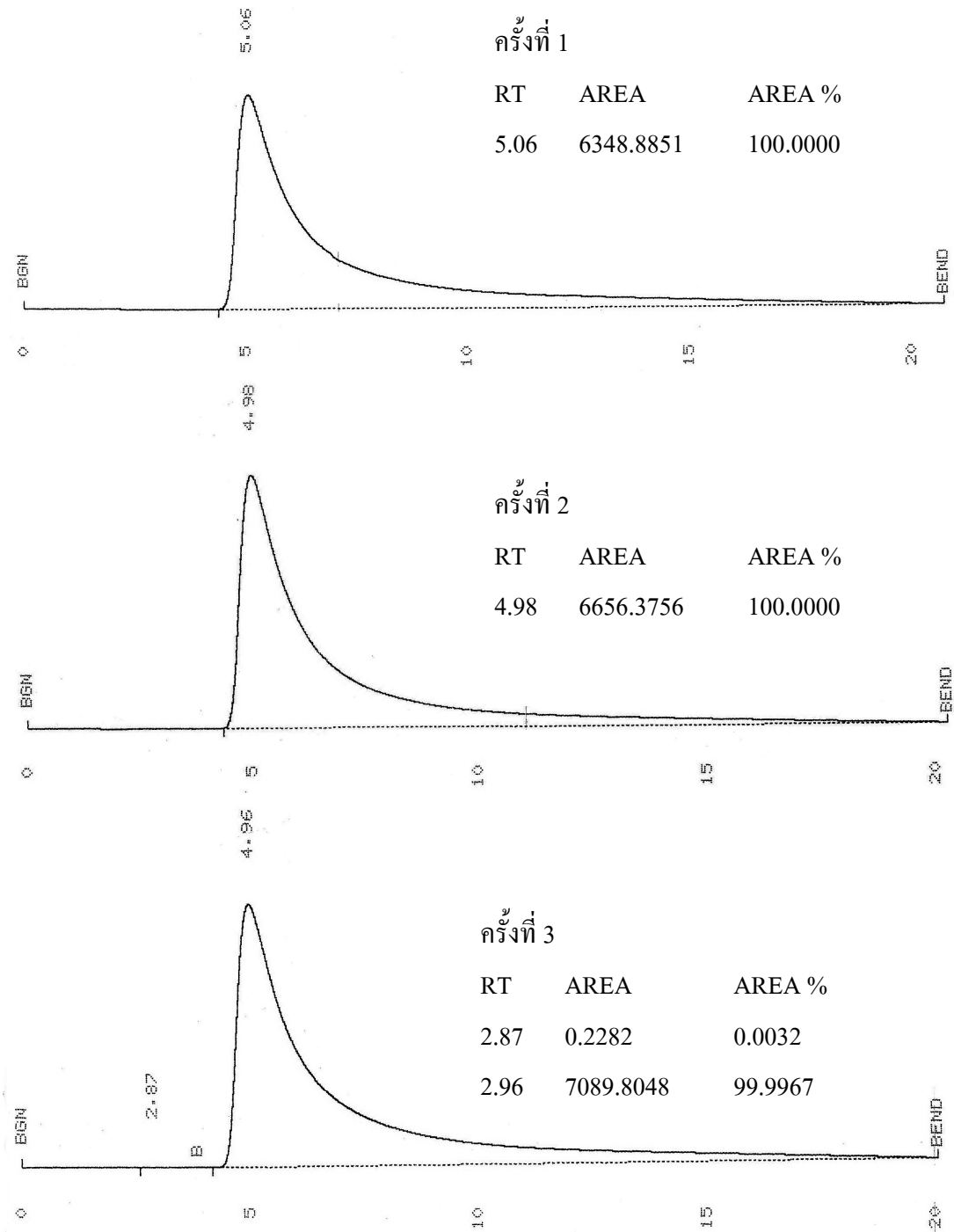
ภาพที่ ข.5 การตรวจความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีสัดส่วนมวลเอทานอล 0.8119



ภาพที่ ข.6 การตรวจความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีสัดส่วนมวลเอทานอล 0.8688



ภาพที่ ข.7 การตรวจความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีสัดส่วนมวลเอทานอล 0.9132



ภาพที่ ข.8 การตรวจความเข้มข้นของผสมเอทานอลปนน้ำที่มีสัดส่วนมวลเอทานอล 0.9950

ภาคผนวก ค : วิธีการคำนวณปริมาณดูดซับจำเพาะ

คำนวณปริมาณดูดซับของน้ำจำเพาะในของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยซีโอไลต์ 4A ได้ดังนี้

$$q_{H_2O} = \frac{M_1(1-x_1) - M_2(1-x_2)}{M} \cdot 1000 \quad (\text{ข.1})$$

คำนวณปริมาณดูดซับเอทานอลจำเพาะในของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยซีโอไลต์ 4A ได้ดังนี้

$$q_{EtOH} = \frac{M_1x_1 - M_2x_2}{M} \cdot 1000 \quad (\text{ข.2})$$

คำนวณปริมาณดูดซับของผสมจำเพาะด้วยซีโอไลต์ 4A ได้ดังนี้

$$q_{total} = q_{H_2O} + q_{EtOH} \quad (\text{ข.3})$$

โดย q_{EtOH} คือ มวลเอทานอลที่ถูกดูดซับต่อมวลซีโอไลต์ 4A (มิลลิกรัมเอทานอลต่อกรัมซีโอไลต์ 4A)

q_{H_2O} คือ มวลน้ำที่ถูกดูดซับต่อมวลซีโอไลต์ 4A (มิลลิกรัมน้ำต่อกรัมซีโอไลต์ 4A)

M_1 คือ มวลของผสมเอทานอลปนน้ำก่อนการดูดซับ (กรัม)

M_2 คือ มวลของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ (กรัม)

x_1 คือ สัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำก่อนการดูดซับ

x_2 คือ สัดส่วนมวลเอทานอลในของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ

M คือ มวลซีโอไลต์ 4A ก่อนการดูดซับ (กรัม)

ภาคผนวก ง : ผลการทดลองวัดความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ และปริมาณดูดซับจำเพาะของน้ำ ,เอทานอล และของผสมเอทานอลปนน้ำ

ตารางที่ ง.1 ผลการทดลองวัดความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ และปริมาณดูดซับจำเพาะของน้ำ ,เอทานอล และของผสมเอทานอลปนน้ำ กรณีที่ใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ

เวลา	ปริมาณสารก่อนการดูดซับ (กรัม)		ปริมาณสารก่อนการดูดซับ (กรัม)		ความหนาแน่น (g/cm ³)	อุณหภูมิ (°C)	สัดส่วนมวลเอทานอล (กรัม/กรัม)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/กรัม)		
	ของผสมเอทานอลปนน้ำ	ซีโอไลต์ 4A	ของผสมเอทานอลปนน้ำ	ซีโอไลต์ 4A				เอทานอล	น้ำ	ของผสม
0							0.9222	0	0	0
30	20.0968	2.0082	18.8126	3.2645	0.80711	31	0.9306	507.0675	117.3226	624.3900
60	20.0862	2.0082	18.8652	3.1963	0.80775	30	0.9313	471.3265	121.5925	592.9190
90	20.1616	2.0149	18.7573	3.3666	0.80740	30	0.9324	543.6340	138.2857	681.9197
120	20.0914	2.0391	18.7858	3.3647	0.80514	32	0.9343	474.8864	150.5366	625.4230
150	20.0638	2.0036	18.6680	3.2716	0.80593	31	0.9344	524.3102	157.2130	681.5233
180	20.0599	2.0122	18.6530	3.3290	0.80659	30	0.9350	521.7197	162.4071	684.1268

ตารางที่ ง.2 ผลการทดลองวัดความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ และปริมาณดูดซับจำเพาะของน้ำ,เอทานอล และของผสมเอทานอลปนน้ำ กรณีที่ใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 20 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ

เวลา	ปริมาณสารก่อนการดูดซับ (กรัม)		ปริมาณสารก่อนการดูดซับ (กรัม)		ความหนาแน่น (g/cm ³)	อุณหภูมิ (°C)	สัดส่วนมวลเอทานอล (กรัม/กรัม)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/กรัม)		
	ของผสมเอทานอลปนน้ำ	ซีโอไลต์ 4A	ของผสมเอทานอลปนน้ำ	ซีโอไลต์ 4A				เอทานอล	น้ำ	ของผสม
0							0.9233	0	0	0
30	20.0665	4.0066	17.9168	6.1373	0.80510	31	0.9371	425.9568	103.0204	528.9772
60	20.0939	4.0032	17.9871	6.0301	0.80540	30	0.9389	408.4003	110.3097	518.7100
90	20.0749	4.0060	17.7626	6.1717	0.80421	30	0.9427	439.4508	130.1948	569.6455
120	20.0824	4.0093	17.8348	6.2226	0.80189	32	0.9449	413.9847	139.0545	553.0392
150	20.1358	4.0042	17.7346	6.2024	0.80252	31	0.9455	447.9862	144.1170	592.1033
180	20.0724	4.0002	17.7373	6.2406	0.80307	30	0.9463	429.3544	146.8167	576.1712

ตารางที่ 3.3 ผลการทดลองวัดความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ และปริมาณดูดซับจำเพาะของน้ำ,เอทานอล และของผสมเอทานอลปนน้ำ กรณีที่ใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 30 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ

เวลา	ปริมาณสารก่อนการดูดซับ (กรัม)		ปริมาณสารก่อนการดูดซับ (กรัม)		ความหนาแน่น (g/cm ³)	อุณหภูมิ (°C)	สัดส่วนมวลเอทานอล (กรัม/กรัม)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/กรัม)		
	ของผสมเอทานอลปนน้ำ	ซีโอไลต์ 4A	ของผสมเอทานอลปนน้ำ	ซีโอไลต์ 4A				เอทานอล	น้ำ	ของผสม
0							0.9222	0	0	0
30	20.0545	6.0053	17.0567	8.9639	0.80289	31	0.9443	396.3062	97.8407	494.1468
60	20.0355	6.0056	16.9246	9.1235	0.80280	30	0.9472	405.9619	106.9927	512.9546
90	20.0365	6.0104	16.9633	9.329	0.80232	30	0.9487	395.3979	110.8745	506.2725
120	20.0529	6.0076	16.9271	9.0627	0.79931	32	0.9532	391.1313	124.1327	515.2640
150	20.0724	6.0109	16.8779	8.8405	0.79955	31	0.9549	396.8777	129.5327	526.4104
180	20.0723	6.0083	16.7628	8.9064	0.80026	30	0.9552	414.5821	131.1963	545.7783

ตารางที่ ง.4 ผลการทดลองวัดความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ และปริมาณดูดซับจำเพาะของน้ำ,เอทานอล และของผสมเอทานอลปนน้ำ กรณีที่ใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 40 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ

เวลา	ปริมาณสารก่อนการดูดซับ (กรัม)		ปริมาณสารก่อนการดูดซับ (กรัม)		ความหนาแน่น (g/cm ³)	อุณหภูมิ (°C)	สัดส่วนมวลเอทานอล (กรัม/กรัม)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/กรัม)		
	ของผสมเอทานอลปนน้ำ	ซีโอไลต์ 4A	ของผสมเอทานอลปนน้ำ	ซีโอไลต์ 4A				เอทานอล	น้ำ	ของผสม
0							0.9222	0	0	0
30	20.0445	8.0068	16.4171	11.5316	0.80145	31	0.9489	362.0642	87.1914	449.2556
60	20.0569	8.0084	16.3549	12.0484	0.80114	30	0.9524	363.5645	94.9166	458.4811
90	20.0806	8.0098	16.3321	12.1655	0.79953	30	0.9575	358.6432	105.5632	464.2063
120	20.0475	8.0088	16.1198	11.7872	0.79634	32	0.9626	369.8590	116.7807	486.6397
150	20.1004	8.0112	16.159	11.493	0.79755	31	0.9612	373.9927	114.2113	488.2040
180	20.0243	7.9528	16.0529	11.5333	0.79796	30	0.9624	378.4208	117.1405	495.5613

ตารางที่ 5.5 ผลการทดลองวัดความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ และปริมาณดูดซับจำเพาะของน้ำ,เอทานอล และของผสมเอทานอลปนน้ำ กรณีที่ใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 50 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ

เวลา	ปริมาณสารก่อนการดูดซับ (กรัม)		ปริมาณสารก่อนการดูดซับ (กรัม)		ความหนาแน่น (g/cm ³)	อุณหภูมิ (°C)	สัดส่วนมวลเอทานอล (กรัม/กรัม)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/กรัม)		
	ของผสมเอทานอลปนน้ำ	ซีโอไลต์ 4A	ของผสมเอทานอลปนน้ำ	ซีโอไลต์ 4A				เอทานอล	น้ำ	ของผสม
0							0.9222	0	0	0
30	20.0589	10.0053	15.8776	13.9397	0.80028	31	0.9526	336.3281	78.5520	414.8801
60	20.0565	10.0042	15.7361	13.9778	0.79949	30	0.9576	341.7656	87.0643	428.8299
90	20.0302	10.0049	15.7276	13.9732	0.79852	30	0.9606	335.3731	91.6476	427.0208
120	20.0308	10.001	15.5848	14.4541	0.79532	32	0.9658	341.1153	100.3929	441.5082
150	20.0787	10.0024	15.6491	14.0662	0.79683	31	0.9635	343.0120	96.8124	439.8244
180	20.0299	10.0046	15.5769	13.9975	0.79773	30	0.9631	346.0054	96.0612	442.0666

ตารางที่ ง.6 ผลการทดลองวัดความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ และปริมาณดูดซับจำเพาะของน้ำ,เอทานอล และของผสมเอทานอลปนน้ำ กรณีที่ใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 60 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ

เวลา	ปริมาณสารก่อนการดูดซับ (กรัม)		ปริมาณสารก่อนการดูดซับ (กรัม)		ความหนาแน่น (g/cm ³)	อุณหภูมิ (°C)	สัดส่วนมวลเอทานอล (กรัม/กรัม)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/กรัม)		
	ของผสมเอทานอลปนน้ำ	ซีโอไลต์ 4A	ของผสมเอทานอลปนน้ำ	ซีโอไลต์ 4A				เอทานอล	น้ำ	ของผสม
0							0.9222	0	0	0
30	20.0097	12.0003	15.3876	16.7202	0.79930	31	0.9557	311.5460	71.0945	382.6404
60	20.0181	12.007	15.1546	16.7058	0.79970	30	0.9569	329.0105	73.5214	402.5319
90	20.0912	12.0096	15.1022	16.8811	0.79765	30	0.9633	330.7079	82.1868	412.8947
120	20.0032	12.0027	14.8852	16.8958	0.79352	32	0.9715	331.4218	92.4578	423.8796
150	20.0567	12.0063	15.0715	16.7389	0.79373	31	0.9731	318.3432	94.3485	412.6917
180	20.1534	12.0003	14.9501	16.5878	0.79424	30	0.9738	334.9013	96.1713	431.0726

ตารางที่ ง.7 ผลการทดลองวัดความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ และปริมาณดูดซับจำเพาะของน้ำ,เอทานอล และของผสมเอทานอลปนน้ำ กรณีที่ใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 70 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ

เวลา	ปริมาณสารก่อนการดูดซับ (กรัม)		ปริมาณสารก่อนการดูดซับ (กรัม)		ความหนาแน่น (g/cm ³)	อุณหภูมิ (°C)	สัดส่วนมวลเอทานอล (กรัม/กรัม)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/กรัม)		
	ของผสมเอทานอลปนน้ำ	ซีโอไลต์ 4A	ของผสมเอทานอลปนน้ำ	ซีโอไลต์ 4A				เอทานอล	น้ำ	ของผสม
0							0.9222	0	0	0
30	20.1374	14.0137	13.7961	19.9619	0.79795	32	0.9575	381.9394	68.4056	450.3450
60	20.1445	14.0039	13.7802	20.1230	0.79681	32	0.9611	380.2036	72.0990	452.3026
90	20.1479	14.0001	13.6949	20.0304	0.79442	32	0.9687	379.0280	79.7330	458.7610
120	19.9890	14.0030	13.7988	19.9920	0.79331	32	0.9721	357.8683	82.0303	439.8986
150	20.1370	14.0099	13.6553	20.3031	0.79343	32	0.9718	377.7677	82.7210	460.4887
180	20.1527	14.0059	13.5975	20.0973	0.79349	32	0.9716	383.1025	82.7655	465.8680

ตารางที่ 8.8 ผลการทดลองวัดความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ และปริมาณดูดซับจำเพาะของน้ำ,เอทานอล และของผสมเอทานอลปนน้ำ กรณีที่ใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 80 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ

เวลา	ปริมาณสารก่อนการดูดซับ (กรัม)		ปริมาณสารก่อนการดูดซับ (กรัม)		ความหนาแน่น (g/cm ³)	อุณหภูมิ (°C)	สัดส่วนมวลเอทานอล (กรัม/กรัม)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/กรัม)		
	ของผสมเอทานอลปนน้ำ	ซีโอไลต์ 4A	ของผสมเอทานอลปนน้ำ	ซีโอไลต์ 4A				เอทานอล	น้ำ	ของผสม
0							0.9222	0	0	0
30	20.1434	16.0035	13.1509	22.5581	0.79491	32	0.9671	365.5094	69.5329	435.0423
60	20.1538	16.0044	13.0859	22.7318	0.79347	32	0.9716	366.3338	73.3953	439.7291
90	20.1610	16.0060	13.1070	22.5110	0.79096	32	0.9794	359.0582	79.7585	438.8167
120	20.0707	16.0124	12.9981	22.7257	0.79235	32	0.9751	363.8589	75.9440	439.8029
150	20.1257	16.0207	12.9302	22.6836	0.79093	32	0.9795	367.4283	79.8181	447.2464
180	20.1478	16.0043	12.9306	22.7199	0.79033	32	0.9814	367.5628	81.4978	449.0606

ตารางที่ ง.9 ผลการทดลองวัดความหนาแน่นของของผสมเอทานอลปนน้ำหลังการดูดซับ และปริมาณดูดซับจำเพาะของน้ำ,เอทานอล และของผสมเอทานอลปนน้ำ กรณีที่ใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 90 ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำ

เวลา	ปริมาณสารก่อนการดูดซับ (กรัม)		ปริมาณสารก่อนการดูดซับ (กรัม)		ความหนาแน่น (g/cm ³)	อุณหภูมิ (°C)	สัดส่วนมวลเอทานอล (กรัม/กรัม)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/กรัม)		
	ของผสมเอทานอลปนน้ำ	ซีโอไลต์ 4A	ของผสมเอทานอลปนน้ำ	ซีโอไลต์ 4A				เอทานอล	น้ำ	ของผสม
0							0.9222	0	0	0
30	20.0351	18.0063	12.3865	24.9669	0.79476	32	0.9676	360.0343	63.0565	423.0908
60	20.0922	18.0034	12.4955	24.9069	0.79220	32	0.9756	351.6218	68.6544	420.2762
90	20.1018	18.0038	12.2217	25.4614	0.79134	32	0.9782	365.1363	70.8717	436.0080
120	20.0966	18.0180	12.2498	25.4748	0.79173	32	0.9770	363.8761	69.9401	433.8162
150	20.0642	18.0152	12.2895	25.1974	0.79097	32	0.9794	358.5176	71.3639	429.8814
180	20.0291	18.0015	12.1985	25.3676	0.79066	32	0.9803	361.2938	72.0201	433.3139

ภาคผนวก จ : ผลการทดลองล้างตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว (ที่สมมูลดูดซับ 120 นาที) ด้วยน้ำกลั่น

ตารางที่ จ.1 ผลการทดลองล้างซีโอไลต์ 4A ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว (ที่สมมูลดูดซับ 120 นาที) ด้วยน้ำกลั่น และผลการคำนวณปริมาณเอทานอลที่ได้จากการล้าง และปริมาณเอทานอลที่ยังคงติดอยู่ภายในตัวดูดซับ ของการล้างครั้งที่ 1

ร้อยละตัวดูดซับต่อ ปริมาณของผสมเอ ทานอลปนน้ำ	ปริมาณสารก่อน ล้าง (กรัม)		ปริมาณสารหลังล้าง (กรัม)		อุณหภูมิ (°C)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	สัดส่วนมวล เอทานอล (กรัม/กรัม)	ปริมาณเอทานอล (กรัม)	
	น้ำ	ซีโอไลต์ 4A	น้ำ	ซีโอไลต์ 4A				ที่ล้างออกมา ได้	ที่ยังคงติดอยู่ ในตัวดูดซับ
10	15.1459	3.3647	14.8604	3.5400	32	0.99786	0.04611	0.6852	0.2831
20	15.0565	6.2226	14.0505	6.8695	32	0.99333	0.07287	1.0238	0.6360
30	15.0617	9.0627	13.7976	9.0979	32	0.98507	0.12093	1.6686	0.6812
40	15.1510	11.7872	13.5935	12.9704	32	0.98101	0.14421	1.9603	1.0018
50	15.1026	14.4541	13.4501	15.6702	32	0.97726	0.16551	2.2261	1.1855
60	15.1596	16.8958	13.4422	18.0299	32	0.97486	0.17904	2.4067	1.5712
70	15.0455	19.992	12.8862	21.7338	32	0.96775	0.21866	2.8177	2.1936
80	15.1135	22.7257	12.7486	24.3388	32	0.96345	0.24228	3.0887	2.7375
90	15.0285	25.4748	12.5979	27.4117	32	0.95812	0.27120	3.4166	3.1397

ตารางที่ จ.2 ผลการทดลองล้างซีโพลต์ 4A ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว (ที่สมดุลดูดซับ 120 นาที) ด้วยน้ำกลั่น และผลการคำนวณปริมาณเอทานอลที่ได้จากการล้าง และปริมาณเอทานอลที่ยังคงติดอยู่ภายในตัวดูดซับ ของการล้างครั้งที่ 2

ร้อยละตัวดูดซับต่อ ปริมาณของผสมเอ ทานอลปนน้ำ	ปริมาณสารก่อน ล้าง (กรัม)		ปริมาณสารหลังล้าง (กรัม)		อุณหภูมิ (°C)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	สัดส่วนมวล เอทานอล (กรัม/กรัม)	ปริมาณเอทานอล (กรัม)	
	น้ำ	ซีโพลต์ 4A	น้ำ	ซีโพลต์ 4A				ที่ล้างออกมา ได้	ที่ยังคงติดอยู่ ในตัวดูดซับ
10	15.0423	3.5400	14.8587	3.5853	30	1.00457	0.0103	0.1532	0.1300
20	15.0274	6.8695	14.8455	6.8882	30	1.00267	0.0219	0.3250	0.3109
30	15.0016	9.0979	14.6323	10.1040	30	1.00149	0.0291	0.4253	0.2559
40	15.0251	12.9704	14.3976	13.3661	30	0.99994	0.0385	0.5536	0.4482
50	15.1285	15.6702	14.0373	16.3405	30	0.99822	0.0488	0.6854	0.5001
60	15.1207	18.0299	13.9112	19.1139	30	0.99777	0.0515	0.7169	0.8543
70	15.1063	21.7338	14.4093	22.3107	30	0.99425	0.0726	1.0463	1.1472
80	15.0253	24.3388	13.6330	25.4935	30	0.99301	0.0800	1.0906	1.6469
90	15.0671	27.4117	14.0194	28.2349	30	0.99033	0.0959	1.3441	1.7956

ตารางที่ จ.3 ผลการทดลองล้างซีโพลต์ 4A ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว (ที่สมดุลดูดซับ 120 นาที) ด้วยน้ำกลั่น และผลการคำนวณปริมาณเอทานอลที่ได้จากการล้าง และปริมาณเอทานอลที่ยังคงติดอยู่ภายในตัวดูดซับ ของการล้างครั้งที่ 3

ร้อยละตัวดูดซับต่อ ปริมาณของผสมเอ ทานอลปนน้ำ	ปริมาณสารก่อน ล้าง (กรัม)		ปริมาณสารหลังล้าง (กรัม)		อุณหภูมิ (°C)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	สัดส่วนมวล เอทานอล (กรัม/กรัม)	ปริมาณเอทานอล (กรัม)	
	น้ำ	ซีโพลต์ 4A	น้ำ	ซีโพลต์ 4A				ที่ล้างออกมา ได้	ที่ยังคงติดอยู่ ในตัวดูดซับ
10	15.1445	3.5853	14.9775	3.5170	32	1.00471	0.0044	0.0662	0.0638
20	15.0262	6.8882	14.6101	7.1124	32	1.00470	0.0052	0.0755	0.2354
30	15.0379	10.1040	14.5256	10.3997	32	1.00466	0.0054	0.0786	0.1773
40	15.0371	13.3661	14.7926	13.4255	32	1.00339	0.0131	0.1932	0.2550
50	15.0567	16.3405	14.7447	16.5060	32	1.00325	0.0139	0.2050	0.2951
60	15.0246	19.1139	14.2309	19.6860	32	1.00355	0.0121	0.1721	0.6822
70	15.0782	22.3107	14.1095	22.9172	32	1.00302	0.0153	0.2156	0.9316
80	15.1423	25.4935	14.3951	26.0317	32	1.00158	0.0239	0.3444	1.3026
90	15.0090	28.2349	13.3714	29.7059	32	1.00069	0.0292	0.3911	1.4045

ตารางที่ จ.4 ผลการทดลองล้างซีโอไลต์ 4A ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว (ที่สมมูลดูดซับ 120 นาที) ด้วยน้ำกลั่น และผลการคำนวณปริมาณเอทานอลที่ได้จากการล้าง และปริมาณเอทานอลที่ยังคงติดอยู่ภายในตัวดูดซับ ของการล้างครั้งที่ 4

ร้อยละตัวดูดซับต่อ ปริมาณของผสมเอ ทานอลปนน้ำ	ปริมาณสารก่อน ล้าง (กรัม)		ปริมาณสารหลังล้าง (กรัม)		อุณหภูมิ (°C)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	สัดส่วนมวล เอทานอล (กรัม/กรัม)	ปริมาณเอทานอล (กรัม)	
	น้ำ	ซีโอไลต์ 4A	น้ำ	ซีโอไลต์ 4A				ที่ล้างออกมา ได้	ที่ยังคงติดอยู่ ในตัวดูดซับ
10	-	-	-	-	-	-	-	0.0662	0.0638
20	-	-	-	-	-	-	-	0.0755	0.2354
30	-	-	-	-	-	-	-	0.0786	0.1773
40	15.1013	13.4255	14.7946	13.186	31	1.00517	0.0045	0.0663	0.1886
50	15.0129	16.5060	14.7315	16.3168	31	1.00486	0.0064	0.0938	0.2013
60	15.0198	19.6860	14.5678	19.8174	31	1.00482	0.0066	0.0963	0.5858
70	14.9995	22.9172	14.6876	22.9172	31	1.00503	0.0053	0.0784	0.8532
80	15.0159	26.0317	14.7710	26.0317	31	1.00430	0.0098	0.1443	1.1583
90	15.0177	29.7059	14.8087	29.7059	31	1.00338	0.0153	0.2272	1.1773

ตารางที่ จ.5 ผลการทดลองล้างซีโพลไต์ 4A ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว (ที่สมดุลดูดซับ 120 นาที) ด้วยน้ำกลั่น และผลการคำนวณปริมาณเอทานอลที่ได้จากการล้าง และปริมาณเอทานอลที่ยังคงติดอยู่ภายในตัวดูดซับ ของการล้างครั้งที่ 5

ร้อยละตัวดูดซับต่อ ปริมาณของผสมเอ ทานอลปนน้ำ	ปริมาณสารก่อน ล้าง (กรัม)		ปริมาณสารหลังล้าง (กรัม)		อุณหภูมิ (°C)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	สัดส่วนมวล เอทานอล (กรัม/กรัม)	ปริมาณเอทานอล (กรัม)	
	น้ำ	ซีโพลไต์ 4A	น้ำ	ซีโพลไต์ 4A				ที่ล้างออกมา ได้	ที่ยังคงติดอยู่ ในตัวดูดซับ
10	-	-	-	-	-	-	-	0.0662	0.0638
20	-	-	-	-	-	-	-	0.0755	0.2354
30	-	-	-	-	-	-	-	0.0786	0.1773
40	-	-	-	-	-	-	-	0.0663	0.1886
50	-	-	-	-	-	-	-	0.0938	0.2013
60	15.0902	19.8174	15.0653	19.8174	31	1.00511	0.0048	0.0730	0.5128
70	15.1477	22.9172	14.5304	23.1677	31	1.00518	0.0044	0.0643	0.7890
80	15.0588	26.0317	14.7262	25.8404	31	1.00515	0.0046	0.0678	1.0905
90	15.0586	29.7059	14.8039	29.6172	31	1.00514	0.0047	0.0691	1.1082

ภาคผนวก ฉ : ผลการทดลองการดูดซับน้ำในหอจำลองดูดซับ

ตารางที่ ฉ.1 ผลการทดลองการดูดซับน้ำในหอจำลองดูดซับ

ครั้งที่	ปริมาณสารก่อนการดูดซับ (กรัม)		ปริมาณสารก่อนการดูดซับ (กรัม)		ความ หนาแน่น (g/cm ³)	อุณหภูมิ (°C)	สัดส่วนมวล เอทานอล (กรัม/กรัม)	ปริมาณตัวดูด ซับสะสม (กรัม)	ปริมาณตัวดูด ซับ/ปริมาณสาร ป้อน
	ของผสมเอทานอลปนน้ำ	ซีโอดี 4A	ของผสมเอทานอลปนน้ำ	ซีโอดี 4A					
0	0	0	0	0	0	-	0.9222	0	0
1	200.5000	60.0059	175.5385	84.2427	0.80280	30	0.94717	60.0059	0.299
2	163.6500	49.0940	144.9363	67.5567	0.79752	30	0.96372	109.0999	0.544
3	128.4418	38.5304	113.6718	52.9430	0.79331	30	0.97663	147.6303	0.736
4	102.2541	30.6773	89.9219	41.8973	0.79174	30	0.98138	178.3076	0.889
5	77.1665	23.1562	67.4676	32.0074	0.79010	30	0.98630	201.4638	1.005
6	55.5016	16.6537	48.2201	23.1295	0.78937	30	0.98848	218.1175	1.088
7	37.3844	11.2211	32.6474	15.2475	0.78910	30	0.98928	229.3386	1.144
8	21.2728	6.3967	18.4328	9.2415	0.78904	30	0.98946	235.7353	1.176

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพลอยพรรณ จริงจิตต์ เกิดเมื่อวันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดตรัง สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและ วัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันมหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2550 และสำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554