

การแยกเอทานอลออกจากสารผสมเอทานอล-น้ำโดยใช้ตัวดูดซับเชิงพาณิชย์จากกะลามะพร้าว



นายชวริน โปยมรัตน์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

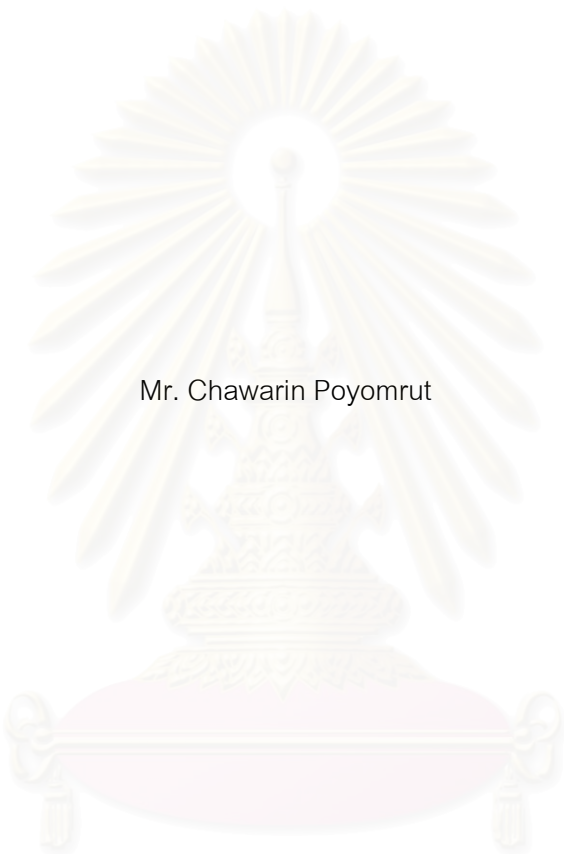
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ETHANOL SEPARATION FROM AQUEOUS MIXTURE WITH COMMERCIAL COCONUT SHELL
ADSORBENT



Mr. Chawarin Poyomrut

สภามหาวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2007
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การแยกเอทานอลออกจากสารผสมเอทานอล-น้ำโดยใช้ตัวดูดซับเชิงพาณิชย์จากกะลามะพร้าว

โดย

นาย ชวริน โขยมรัตน์

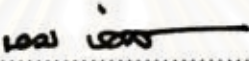
สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

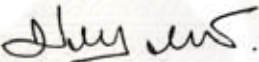
อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ กวสันต์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทพร ผลากรกุล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์วรรณ โชติพิฤกษ์)

นาย ชวริน โปชมรัตน์ : การแยกเอทานอลออกจากสารผสมเอทานอล-น้ำโดยใช้ตัวดูดซับเชิงพาณิชย์จากกะลามะพร้าว. (ETHANOL SEPARATION FROM AQUEOUS MIXTURE WITH COMMERCIAL COCONUT SHELL ADSORBENT)อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช, 113 หน้า.

เอทานอลในของผสมเอทานอล-น้ำถูกดูดซับบนถ่านดูดซับเชิงพาณิชย์ที่อุณหภูมิ 26-30 องศาเซลเซียส การดูดซับโดยถ่านก่อนดูดซับแห้งกับถ่านก่อนดูดซับชุ่มน้ำ ในขณะที่เอทานอลที่ถูกดูดซับบนถ่านถูกนำกลับโดยการให้ความร้อนโดยตรงที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ที่สภาวะนั้นประเมินพลังงานความร้อนที่ใช้ในการกลายเป็นไอต่ำสุด สมดุลการดูดซับของเอทานอลตรงกับแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงมัวร์ ในขณะที่สมดุลการดูดซับของน้ำตรงกับประเภทการดูดซับที่ 3 ของ BDDT ซึ่งตรงกับแบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดลิช ปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับสูงสุดบนถ่านแห้งและในถ่านชุ่มน้ำคือ 482.43 และ 603.31 มิลลิกรัม/กรัมถ่านดูดซับ ตามลำดับ ความเข้มข้นเอทานอลที่นำกลับจากการดูดซับบนถ่านดูดซับแห้งและชุ่มน้ำถูกทำให้เพิ่มขึ้นได้ 5 และ 6 เท่าตามลำดับ จากความเข้มข้นเริ่มต้นก่อนการดูดซับต่ำ พลังงานที่ใช้ 65 กิโลจูล/กรัมเอทานอลผลิตภัณฑ์

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ถายมือชื่อนิสิต..... *Eli P. P.*
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ถายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช*
ปีการศึกษา.....2550.....

4870263021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: ETHANOL / ADSORPTION / DESORPTION / ALCOHOL / COCONUT SHELL

Chawarin Poyomrut : ETHANOL SEPARATION FROM AQUEOUS MIXTURE WITH
COMMERCIAL COCONUT SHELL ADSORBENT. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
DEACHA CHATSIRIWECH , Ph.D., 113 pp.

Ethanol in aqueous mixture has been adsorbed on a commercial carbon adsorbent at 26-30 °C. The adsorption has been carried out with dried and water-soaked carbon adsorbents. While ethanol adsorbed on the carbon has been recovered by directly heating at 95 °C. In the circumstance, the minimum energy requirement has been estimated. The adsorption equilibrium of ethanol has agreed with Langmuir's model. While the adsorption equilibrium of water has been categorized as Type III of BDDT classification and has agreed with Freundlich's model. The maximum amount of ethanol adsorbed on dried and water-soaked adsorbents have been 482.43 and 603.31 mg/g, respectively. The concentrations of ethanol recovered from the adsorption on dried and water-soaked carbon adsorbents have be improved by about 5 and 6 times of the starting low concentration, respectively. The energy requirement has become 65 kJ per g ethanol produced.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Chemical Engineering..... Student's signature.....

Field of study.....Chemical Engineering..... Advisor's signature.....

Academic year.....2007.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำการวิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ รองศาสตราจารย์ ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับการให้คำแนะนำ และการดูแลเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา รวมทั้ง กรุณาตรวจสอบเนื้อหาวิทยานิพนธ์เพื่อให้ได้วิทยานิพนธ์ที่มีความสมบูรณ์ ตลอดจน รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาวนันต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. จันทพร ผลากรกุล และรองศาสตราจารย์ ดร. อาทิวรรณ โชติ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และตรวจสอบเนื้อหาวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดามารดา ญาติพี่น้องและเพื่อนๆ ซึ่งคอยเป็น กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญภาพ	ญ
สารบัญตาราง	ฎ
สัญลักษณ์และอักษรย่อ	ฅ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2. ทฤษฎี.....	5
2.1 การดูคั้ง.....	5
2.1.1 กลไกการดูคั้ง.....	6
2.1.2 การดูคั้งด้วยแรงแคบปีลารี.....	6
2.1.3 ประเภทของการดูคั้ง	8
2.1.3.1 การดูคั้งทางกายภาพ	8
2.1.3.2 การดูคั้งทางเคมี.....	8
2.2 ถ่านกัมมันต์.....	8
2.2.1 ชนิดของคุณสมบัติถ่านกัมมันต์.....	8
2.3 สมดุลการดูคั้ง.....	11
2.3.1 แบบจำลองสมดุลการดูคั้ง	8
2.3.1.1 สมดุลการดูคั้งเชิงเส้น	12
2.3.1.2 สมดุลการดูคั้งของแลงมัวร์	12
2.3.1.3 สมดุลการดูคั้งของฟรุนดลิช	13
2.3.2 การดูคั้งของเหลวสององค์ประกอบบนพื้นผิวของแข็ง.....	13
2.3.3 การวัดสมดุลการดูคั้งในของเหลวสององค์ประกอบ	16

บทที่	หน้า
2.4 การคายกลับ	17
2.4.1 การคืนสภาพตัวดูดซับที่ใช้แล้วด้วยความร้อน	20
3. การดำเนินงานวิจัย	21
3.1 การทดลองหาสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างดัชนีหักเหแสงกับความเข้มข้น ของผสมเอทานอล-น้ำ	21
3.2 การทดลองสมดุลการดูดซับ	22
3.2.1 การทดลองสมดุลการดูดซับของถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับแห้ง	22
3.2.2 ทดลองสมดุลการดูดซับของถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับเปียกน้ำ	22
3.2.3 การทดลองการคายกลับของเอทานอลและน้ำที่ถูกดูดซับในถ่านกัมมันต์	23
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	25
4.1 ผลการทดลองหาสมการแสดงความเข้มข้นของผสมเอทานอล-น้ำกับดัชนีหักเหแสง	25
4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นความหนาแน่นและดัชนีหักเหแสงของของผสม เอทานอล-น้ำเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป	28
4.2 การทดลองหาสมดุลการดูดซับ	31
4.2.1 สมดุลการดูดซับของถ่านก่อนการดูดซับถ่านแห้ง	31
4.2.2 สมดุลมวลสารในการทำสมดุลการดูดซับถ่านแห้ง	35
4.2.3 สมดุลการดูดซับของถ่านก่อนการดูดซับถ่านเปียกน้ำ	37
4.2.4 สมดุลมวลสารในการทำสมดุลการดูดซับถ่านเปียกน้ำ	38
4.2.5 เปรียบเทียบการดูดซับเอทานอลและน้ำที่ถูกดูดซับในถ่านแห้งกับถ่านเปียก	39
4.3 การทดลองหาสมดุลการคายกลับ	43
4.3.1 สมดุลการคายกลับของเอทานอลถ่านก่อนการดูดซับแห้ง	48
4.3.2 สมดุลการคายกลับของเอทานอลในถ่านก่อนการดูดซับเปียกน้ำ	50
4.4 ประเมินพลังงานที่ใช้ในการคายกลับเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์	56
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	58
5.1 สรุปผลการวิจัย	58
5.2 ข้อเสนอแนะ	59
รายการอ้างอิง	60
ภาคผนวก	62
ภาคผนวก ก การคำนวณ	63
ภาคผนวก ข แบบจำลองสมดุลการดูดซับ	67

บทที่	หน้า
ภาคผนวก ค ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของกราฟสอปเทียบความเข้มข้นกับ ดัชนีหักเหแสง	79
ภาคผนวก ง ผลการทดลองสมมูลการดูดซับที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียสและสมมูล การคายกลับที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสของผสมเอทานอล-น้ำในถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับ แห้ง	86
ภาคผนวก จ ผลการทดลองสมมูลการดูดซับที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียสและสมมูล การคายกลับที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสของผสมเอทานอล-น้ำในถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับ เปียกน้ำ	98
ภาคผนวก ฉ ผลการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการคายกลับเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์.....	111
ประวัติผู้เขียน	113

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่	หน้า
2.1 แสดงกระบวนการดูดซับและการคายกลับ	5
2.2 แสดงกลไกการดูดซับ	6
2.3 วิธีวัดความตึงผิวโดยใช้หลอดกะปิลลารี	7
2.4 แสดงรูปแบบไอโซเทอม	9
2.5 แสดงไอโซเทอมการดูดซับของของเหลวสององค์ประกอบ	10
2.6 ผลของการเพิ่มอุณหภูมิต่อสมดุลการดูดซับ จากรูป $T_2 > T_1$	15
2.7 ลักษณะของรูพรุนในถ่านกัมมันต์	16
4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับความหนาแน่นของของผสมเอทานอล-น้ำ	22
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ a กับอุณหภูมิ	23
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ b กับอุณหภูมิ	24
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ c กับอุณหภูมิ	24
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ d กับอุณหภูมิ	25
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหแสง ความหนาแน่น และความเข้มข้นของ ของผสมเอทานอล-น้ำ ที่อุณหภูมิ 26, 28, 30 องศาเซลเซียส	26
4.7 แสดงความสัมพันธ์และการกระจายตัวของข้อมูลที่ได้จากการทดลองระหว่าง ดัชนีหักเหแสงกับความเข้มข้นที่อุณหภูมิ 26, 28, 30 องศาเซลเซียส	27
4.8 แสดงการพหุคูณเส้นโค้งข้อมูลระหว่างดัชนีหักเหแสงกับความเข้มข้น	27
4.9 แสดงสมดุลการดูดซับของของผสมเอทานอล-น้ำใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ โดยวิธีการวัดปริมาณตัวถูกดูดซับโดยตรง	29
4.10 แสดงแสดงการพหุคูณเส้นโค้งข้อมูลสมดุลการดูดซับแบบแลงมัวร์	31
4.11 แสดงแสดงการพหุคูณเส้นโค้งข้อมูลสมดุลการดูดซับแบบฟรุนดลิช	31
4.12 แสดงสมดุลการดูดซับของของผสมเอทานอล-น้ำใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ โดยวิธีการ วัดปริมาณตัวถูกดูดซับของออสวอด	33
4.13 แสดงปริมาณเอทานอลและปริมาณน้ำที่คายกลับออกมาจากถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้น ของเอทานอลก่อนการดูดซับเปลี่ยนแปลงไป	35
4.14 แสดงปริมาณเอทานอลและปริมาณน้ำที่เหลือในถ่านกัมมันต์หลังการคายกลับที่ความ เข้มข้นของเอทานอลก่อนการดูดซับเปลี่ยนแปลงไป	36
4.15 แสดงแสดงการพหุคูณเส้นโค้งข้อมูลสมดุลการดูดซับแบบแลงมัวร์	37
4.16 แสดงแสดงการพหุคูณเส้นโค้งข้อมูลสมดุลการดูดซับแบบฟรุนดลิช	37

บทที่	หน้า
4.17 ผลจากการทดลองนำกลับเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์เปรียบกับสมดุลไอของเหลวที่ความดันบรรยากาศ.....	40
4.18 แสดงสัดส่วนเอทานอลในไอสมดุลกับสัดส่วนโดยมวลเอทานอลในของเหลวเปรียบเทียบกับระหว่างผลการทดลองกับสมดุลไอของเหลวที่ความดันบรรยากาศ	40
4.19 ผลจากการทดลองหาเปอร์เซ็นต์นำกลับเอทานอลและน้ำออกจากถ่านกัมมันต์	41
4.20 แสดงสมดุลการดูดซับของของผสมเอทานอล-น้ำใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับโดยวิธีการวัดปริมาณตัวถูกดูดซับโดยตรง.....	42
4.21 แสดงแสดงการพหุคูณเส้นโค้งข้อมูลสมดุลการดูดซับแบบแลงมัวร์	43
4.22 แสดงแสดงการพหุคูณเส้นโค้งข้อมูลสมดุลการดูดซับแบบฟรุนดลิช	44
4.23 แสดงปริมาณเอทานอลและปริมาณน้ำที่คายกลับออกมาจากถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นของเอทานอลก่อนการดูดซับเปลี่ยนแปลงไป	45
4.24 แสดงปริมาณเอทานอลและปริมาณน้ำที่เหลือในถ่านกัมมันต์หลังการคายกลับที่ความเข้มข้นของเอทานอลก่อนการดูดซับเปลี่ยนแปลงไป	46
4.25 แสดงแสดงการพหุคูณเส้นโค้งข้อมูลสมดุลการดูดซับแบบแลงมัวร์	47
4.26 แสดงแสดงการพหุคูณเส้นโค้งข้อมูลสมดุลการดูดซับแบบฟรุนดลิช	47
4.27 ผลจากการทดลองนำกลับเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์เป็ยกน้ำเปรียบกับสมดุลไอของเหลวที่ความดันบรรยากาศ.....	49
4.28 แสดงสัดส่วนเอทานอลในไอสมดุลกับสัดส่วนโดยมวลเอทานอลในของเหลวเปรียบเทียบกับระหว่างผลการทดลองกับสมดุลไอของเหลวที่ความดันบรรยากาศ	49
4.29 ผลจากการทดลองหาเปอร์เซ็นต์นำกลับเอทานอลและน้ำออกจากถ่านกัมมันต์เป็ยกน้ำ ..	50
4.30 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับของถ่านกัมมันต์แห้งกับถ่านกัมมันต์เป็ยกน้ำ.....	52
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงผิวกับความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไป.....	52
4.32 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับเอทานอลของถ่านกัมมันต์แห้งกับถ่านกัมมันต์เป็ยกน้ำ...53	53
4.33 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับน้ำของถ่านกัมมันต์แห้งกับถ่านกัมมันต์เป็ยกน้ำ	53
4.34 เปรียบเทียบปริมาตรการดูดซับน้ำของถ่านกัมมันต์แห้งกับถ่านกัมมันต์เป็ยกน้ำ	54

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้ในการผลิตเอทานอลร้อยละ 99 ขึ้นไปด้วยกระบวนการแยกประเภทต่าง ๆ.....	1
2.1 แสดงค่าการแพร่ของก๊าซ	11
2.2 แสดงค่าการแพร่ของของเหลวที่อุณหภูมิ 25 °c.....	12
2.3 ข้อดีข้อเสียสำหรับการคายกลับวิธีต่างๆ.....	13
2.4 ข้อดีข้อเสียสำหรับการคายกลับวิธีต่างๆ.....	13
3.1 แสดงสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลอง	19
4.1 แสดงค่าคงที่จากสมการที่ 1 เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป.....	23
4.2 ค่าคงที่ของสมการ Antoine	38
4.3 แสดงค่าคงที่ของสารบริสุทธิ์เอทานอลและน้ำที่อุณหภูมิ 28 °c.....	58
4.4 ค่าคงที่เพื่อใช้ในการคำนวณค่า $\frac{C_p}{R}$ ขึ้นอยู่กับชนิดสาร	58
ก.1 แสดงค่าคงที่ของสารบริสุทธิ์เอทานอลและน้ำที่อุณหภูมิ 28 °c.....	66
ค.1 ผลการทดลองแสดงความหนาแน่น ความเข้มข้นและดัชนีหักเหแสงของของผสมเอทานอล-น้ำ ที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส	79
ค.2 ผลการทดลองแสดงความหนาแน่น ความเข้มข้นและดัชนีหักเหแสงของของผสมเอทานอล-น้ำ ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส	80
ค.3 ผลการทดลองแสดงความหนาแน่น ความเข้มข้นและดัชนีหักเหแสงของของผสมเอทานอล-น้ำ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	81
ค.4 แสดงผลการประเมินทางสถิติของค่าดัชนีหักเหแสงที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ.....	82
ค.5 ผลการทดลองแสดงความหนาแน่น ความเข้มข้นและดัชนีหักเหแสงของของผสมเอทานอล-น้ำ ที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส	83
ค.6 แสดงผลการประเมิน P-Value ของกลุ่มประชากรค่าดัชนีหักเหแสงที่วัดได้แต่ละความเข้มข้นเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่ใกล้ชิดกัน	84
ค.7 แสดงผลความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำที่คำนวณได้จากวิธีเจือจางด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส.....	85
ค.8 แสดงผลความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำที่คำนวณได้จากวิธีเจือจางด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	86

ตาราง	หน้า
ง.1 แสดงผลความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำที่เปลี่ยนแปลงไปก่อนและหลังดูดซับ.....	87
ง.2 แสดงผลความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำในไอคาบกลับควบแน่น	88
ง.3 แสดงสมมูลมวลสารของเอทานอลในระบบ	89
ง.4 แสดงสมมูลมวลสารของน้ำในระบบ	90
ง.5 หาความชันของเส้น Tie-Line ของสมมูลไอของเหลวของการดูดซับและคายกลับของผสมเอทานอล-น้ำ.....	91
ง.6 ใช้หลักการวิเคราะห์เส้น Tie-Line เพื่อคำนวณปริมาณไอดีต่อปริมาณของเหลวเปรียบเทียบกับปริมาณไอดีต่อปริมาณของเหลวที่วัดจริงจากการทดลอง.....	92
ง.7 แสดงผลการวัดความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำก่อนการดูดซับ.....	93
ง.8 แสดงผลการวัดความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำหลังการดูดซับ	94
ง.9 แสดงผลการวัดความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำใน ไอควบแน่น	95
ง.10 แสดงความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักถ่านที่เพิ่มขึ้นหลังดูดซับกับปริมาณเอทานอลและน้ำที่ถูกดูดซับจากการคำนวณสมมูลมวลสาร	96
ง.11 แสดงความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักถ่านหลังการคายกลับที่เพิ่มขึ้นจากน้ำหนักถ่านก่อนการดูดซับกับน้ำหนักของเหลวควบแน่นในไอคาบกลับ	97
ง.12 แสดงความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักของผสมที่วัดจริงกับการคำนวณสมมูลมวลสาร	98
จ.1 แสดงผลความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำที่เปลี่ยนแปลงไปก่อนและหลังดูดซับกรณีถ่านก่อนดูดซับเปียก.....	99
จ.2 แสดงผลความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำใน ไอคาบกลับควบแน่นกรณีถ่านก่อนดูดซับเปียกน้ำ	100
จ.3 แสดงสมมูลมวลสารของเอทานอลในระบบกรณีถ่านก่อนดูดซับเปียกน้ำ	101
จ.4 แสดงสมมูลมวลสารของน้ำในระบบกรณีถ่านก่อนดูดซับเปียกน้ำ.....	102
จ.5 หาความชันของเส้น Tie-Line ของสมมูลไอของเหลวของการดูดซับและคายกลับของผสมเอทานอล-น้ำกรณีถ่านก่อนดูดซับเปียกน้ำ.....	103
จ.6 ใช้หลักการวิเคราะห์เส้น Tie-Line เพื่อคำนวณปริมาณไอดีต่อปริมาณของเหลวเปรียบเทียบกับปริมาณไอดีต่อปริมาณของเหลวที่วัดจริงจากการทดลองกรณีถ่านก่อนดูดซับเปียกน้ำ.....	104

ตาราง	หน้า
จ.7 แสดงผลการวัดความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำก่อนการดูดซับกรณีถ่านก่อนดูดซับเปียกน้ำ.....	105
จ.8 แสดงผลการวัดความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำในไอควบแน่นกรณีถ่านก่อนดูดซับเปียกน้ำ.....	106
จ.9 แสดงผลการวัดความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำหลังการดูดซับกรณีถ่านก่อนดูดซับเปียกน้ำ.....	107
จ.10 แสดงความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักถ่านที่เพิ่มขึ้นหลังดูดซับกับปริมาณเอทานอลและน้ำที่ถูกดูดซับจากการคำนวณสมดุลมวลสารกรณีถ่านก่อนดูดซับเปียกน้ำ.....	108
จ.11 แสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างการคำนวณสมดุลมวลสารเพื่อหาน้ำหนักของผสมหลังการดูดซับและจากการวัดจริง	109
จ.12 แสดงความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักถ่านที่เพิ่มขึ้นหลังดูดซับกับปริมาณเอทานอลและน้ำที่ถูกดูดซับจากการคำนวณสมดุลมวลสารกรณีถ่านก่อนดูดซับเปียกน้ำ.....	110
ฉ.1 ผลการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการคายกลับเอทานอลและน้ำออกจากถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับแห้งแสดง	111
ฉ.2 ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ.....	112

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

g	=	ค่าคงที่ความเร่งของความโน้มถ่วงของโลก
r	=	รัศมีของกะปิลลารี
h	=	ความสูงของของเหลวในหลอดกะปิลลารี
q	=	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ
q_m	=	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับสูงสุดต่อปริมาณตัวดูดซับ
C	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สมดุล
K_H	=	ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของเฮนรี
K_L	=	ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของแลงมัวร์
K_F	=	ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของฟรุนดลิช
T	=	อุณหภูมิ

อักษรกรีก

γ	=	แรงตึงผิวของของเหลว
ρ	=	ความหนาแน่นของของเหลว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ปัจจุบันได้มีการนำเอทานอลมาประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงเอทานอลกันอย่างแพร่หลายมากขึ้นเนื่องจากเอทานอลสามารถสังเคราะห์ได้จากการแปรรูปพืชจำพวกแป้งและน้ำตาลรวมทั้งเซลลูโลสโดยผ่านกระบวนการหมักจากวัตถุดิบทางการเกษตร เช่น อ้อย ข้าว ข้าวฟ่าง ข้าวโพด และมันสำปะหลัง เป็นต้น ซึ่งนอกจากจะช่วยลดการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงลงได้แล้วยังช่วยแก้ปัญหาผลผลิตทางการเกษตรล้นตลาดได้บางส่วน เอทานอลที่ได้จากกระบวนการหมักจะมีความเข้มข้นของเอทานอลประมาณร้อยละ 6-10 โดยน้ำหนัก จากนั้นต้องนำไปผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบน้ำมันเชื้อเพลิง [1]

ปัจจุบันกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลหลังผ่านกระบวนการหมักนั้นใช้การกลั่นซึ่งเป็นกระบวนการแยกที่ต้องใช้พลังงานสูงเป็นผลให้ต้นทุนในการผลิตเอทานอลสูงไปด้วย [2] การดูดซับเป็นวิธีการหนึ่งที่ถูกเลือกใช้ในการแยกเอทานอลออกจากน้ำเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลด้วยวิธีอื่นดัง แสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้ในการผลิตเอทานอลร้อยละ 99 ขึ้นไปด้วยกระบวนการแยกประเภทต่าง ๆ [3]

ความเข้มข้นของเอทานอล		ค่าพลังงาน (KJ/kg-EtOH)	กระบวนการ
เริ่มต้น (wt%)	สุดท้าย (wt%)		
8	99.5	10,383	การกลั่นที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ
10	99.5	9,671	การกลั่นเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลเป็น 95 wt% แล้วเติมสารช่วยกลั่นเพื่อให้ได้เอทานอล 99.5 wt %
6.4	99.5	7,324	การกลั่นเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลเป็น 90 wt% แล้วนำมาระเหยผ่านเยื่อแผ่นเพื่อให้ได้เอทานอล 99.5 wt%
8	99	5,032	การดูดซับ

จากตารางที่ 1.1 พบว่ากระบวนการทำเอทานอลให้บริสุทธิ์ทำได้หลายวิธีซึ่งวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจคือกระบวนการดูดซับเนื่องจากเป็นกระบวนการแยกซึ่งใช้พลังงานต่ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจกระบวนการดูดซับเพื่อทำเอทานอลบริสุทธิ์ จากนั้นพิจารณาตัวดูดซับที่เหมาะสมกับการแยกเอทานอลกับน้ำในสถานะของเหลวซึ่งได้มีผู้ทำการศึกษาไว้ดังนี้

R.K.Malik,P.Ghose and T.K. Ghose [4] เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับเอทานอลในสารผสม เอทานอล-น้ำ ในสถานะของเหลว ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ด้วยเรซินชนิด IRC-50(H) XAD-2 (macroporous) และถ่านกัมมันต์ พบว่าถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับเอทานอลออกจากน้ำได้ดีที่สุด การแยกโดยใช้ถ่านกัมมันต์จะดูดซับเอทานอลได้สูงกว่าน้ำเพราะถ่านกัมมันต์มีหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) และหมู่อัลดีไฮด์ (-COH)

Stephen Xenophon และ Raja [5] เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับเอทานอลในสารผสม เอทานอล-น้ำ ในสถานะของเหลว ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 50-90 °c ด้วย Silicalite Molecular Sieve, Zeolite ZMS-5 และถ่านกัมมันต์ พบว่า Silicalite Molecular Sieve มีความสามารถดูดซับเอทานอลได้ดีที่สุดทั้งยังคายกลับได้ที่อุณหภูมิต่ำ รองลงมาคือถ่านกัมมันต์ แม้ว่า จะดูดซับเอทานอลได้ดี และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการดูดซับจะลดลง

Hiromitu Naono และคณะ[6] ทำการศึกษากการแยกน้ำกับเอทานอลในสถานะก๊าซด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่าน้ำคายกลับออกจากถ่านกัมมันต์ได้ง่ายกว่าเอทานอลเนื่องจากน้ำมีแรงกระทำที่พื้นผิวถ่านกัมมันต์น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเอทานอล ค่าพลังงานดูดซับไอน้ำด้วยถ่านกัมมันต์มีค่า 17-32 kJ/mol ในขณะที่ค่าพลังงานดูดซับไอเอทานอลด้วยถ่านกัมมันต์มีค่า 43-52 kJ/mol พบว่าถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติดูดซับเอทานอลได้สูงกว่าน้ำ

คณิตา วัฒนะกิจ [1] ทำการศึกษากการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวสำหรับการดูดซับเอทานอลในน้ำ พบว่าสมมูลการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองสมมูลของแลงเมียร์และเฮนรี ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้สามารถดูดซับเอทานอลในน้ำเข้าไปในรูพรุนถ่านกัมมันต์ด้วยแรงดึงดูด

จากการศึกษากระบวนการผลิตเอทานอลพบว่าหลังจากผ่านเอทานอลหลังจากผ่านกระบวนการหมักจะได้เอทานอลประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงเลือกที่จะดูดซับเอทานอลไว้แทนที่จะดูดซับน้ำ และทำการคายกลับ เพื่อให้ได้เอทานอลบริสุทธิ์ขึ้น จากการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติในการดูดซับเอทานอลได้ดีทั้งยังสามารถผลิตได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ดังนั้นจึงเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ในงานวิจัยนี้ โดยงานวิจัยนี้ใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจาก

กะลามะพร้าวเนื่องจากกะลามะพร้าวมีคุณสมบัติที่ดีในการนำมาทำถ่านกัมมันต์ทั้งยังเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรสามารถผลิตได้ภายในประเทศ

การคายกลับหรือการรีเจนเนอเรชั่นนั้นมีหลายวิธีที่นิยมโดยงานวิจัยนี้สนใจการคายกลับด้วยความร้อน เนื่องจากมีผู้ศึกษาว่าถ่านกัมมันต์ดูดซับเอทานอลได้ดีกว่าน้ำดังนั้นจึงคาดว่าเอทานอลที่ถูกดูดซับไว้ที่ผิวหรือในรูพรุนของถ่านกัมมันต์เมื่อถูกให้ความร้อนและระยะเวลาในการคายกลับที่เหมาะสมจะคายกลับออกมาด้วยความเข้มข้นมากขึ้นกว่าสารละลายเอทานอลก่อนถูกดูดซับ และการคายกลับด้วยความร้อนมีข้อดีคือต้องการเอทานอลที่ถูกดูดซับที่ถ่านกัมมันต์คายกลับออกมาไม่มีสิ่งเจือปนอื่นที่ติดเพิ่มมาจากกระบวนการคายกลับเช่น น้ำ ทั้งยังเป็น การนำถ่านดูดซับที่ผ่านการดูดซับแล้วกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตซึ่งเป็นการประหยัด ยังมีผู้ศึกษาอีกว่าการรีเจนเนอเรตด้วยความร้อนที่สูงพอจะทำให้เกิดพื้นผิวถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นได้อีก ดังนั้นจึงเห็นว่าการทำรีเจนเนอเรตถ่านกัมมันต์ด้วยความร้อน น่าจะมีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ จึงทำการทดลองเพื่อศึกษาการดูดซับและการคายกลับที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งยังประเมินพลังงานที่ใช้ทั้งการดูดซับและการคายกลับ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบกระบวนการทำเอทานอลบริสุทธิ์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) สมดุลการดูดซับของของผสมเอทานอลน้ำด้วยถ่านกัมมันต์
- 2) ศึกษากระบวนการคายกลับของของผสมเอทานอลน้ำออกจากถ่านกัมมันต์โดยให้ความร้อน โดยตรง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) วัดสมดุลการดูดซับเอทานอลที่มีน้ำผสมด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ขนาด 4×8 เมช กรณีถ่านกัมมันต์แห้งและกรณีถ่านกัมมันต์เปียกน้ำก่อนการดูดซับ ที่ความเข้มข้นของเอทานอลต่าง ๆ พร้อมทั้งคำนวณหาค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับ
- 2) ทดลองหาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความเข้มข้นของสารที่กลั่นตัวหลังการคายกลับที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส
- 3) ประเมินพลังงานที่ถูกใช้ในการระเหยเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎี การดูดซับและการคายกลับของถ่านกัมมันต์
- 2) เตรียมการทดลอง และดำเนินการทดลอง ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก
 - 2.1 วัดสมมูลการดูดซับของการดูดซับเอทานอลด้วยถ่านกัมมันต์ ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และกำหนดปริมาณถ่านกัมมันต์ให้คงที่
 - 2.2 ทดลองคายกลับถ่านกัมมันต์ที่อิ่มตัวแล้วด้วยการเพิ่มอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส ด้วยอ่างน้ำร้อน แล้ววัดความเข้มข้นของเอทานอลในไอควบแน่น
- 3) รวบรวมข้อมูลการทดลอง และประเมินพลังงานที่ใช้ทั้งในกระบวนการคายกลับ
- 4) วิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง
- 5) สรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้

- 1) ทราบสมมูลการดูดซับของเอทานอลและน้ำในถ่านกัมมันต์
- 2) ทราบการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มีความสามารถที่จะทำให้เอทานอลบริสุทธิ์ได้มากขึ้นเพียงใด
- 3) ศึกษาหาแนวทางใหม่ในการแยกเอทานอลออกจากน้ำ

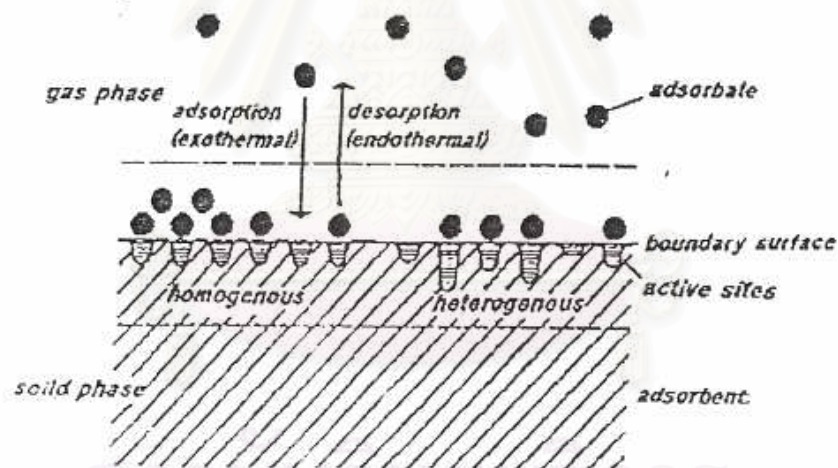
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 การดูดซับ

การดูดซับเป็นวิธีการอย่างหนึ่งที่ใช้แยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากก๊าซ เกิดจากสารสองชนิดมาสัมผัสกันทำให้โมเลกุลหรืออะตอมมีความเข้มข้นเฉพาะบริเวณระหว่างผิวสัมผัสเรียกว่าปรากฏการณ์การดูดซับ (Adsorption) เมื่อพิจารณาระบบดูดซับที่ประกอบด้วยก๊าซ และของแข็ง

- ของแข็งที่สามารถดูดซับ โมเลกุลของของเหลว หรือ โมเลกุลของก๊าซไว้ เรียกว่าเป็น สารดูดซับ (Adsorbent)
- ของเหลวหรือก๊าซ เรียกว่า เป็นสารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate)
- โมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับไว้ในผิวของแข็ง หลุดออกจากผิวของสารดูดซับกลับเข้าสู่วัฏภาคของก๊าซ เพื่อให้สามารถนำเอาสารดูดซับมาใช้ใหม่เรียกว่า การคายกลับ (Desorption) ซึ่งอาจทำได้โดยใช้ความร้อน หรือ การลดความดัน [7]



รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการดูดซับและการคายกลับ

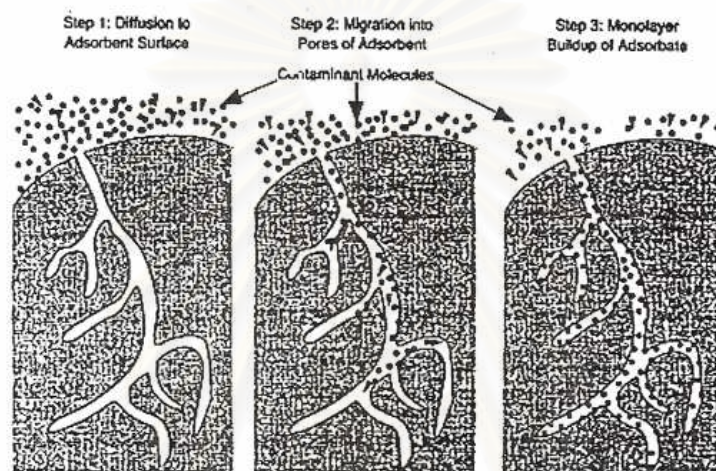
2.1.1 กลไกการดูดซับ [7]

การดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน สำหรับการดูดซับก๊าซ คือ

ขั้นแรก โมเลกุลของก๊าซแพร่ไปยังผิวภายนอกของสารดูดซับ

ขั้นที่สอง เคลื่อนที่เข้าไปยังผิวภายในรูพรุนซึ่งเป็นกระบวนการแพร่ อาจโดยวิธีแพร่เข้าทางรูพรุนหรือทางผิว (Surface migration) หรือ โดยแรงแคปิลลารี (Capillary force)

ขั้นที่สาม คือการเกาะติดกับพื้นผิวซึ่งขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่แท้จริงของการดูดซับ ขั้นตอนนี้เร็วมากเมื่อเทียบกับสองขั้นตอนนี้

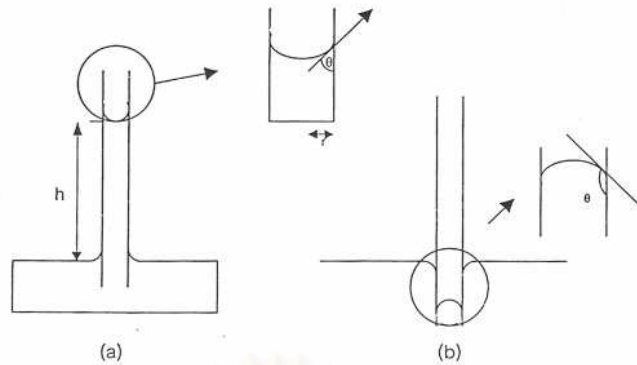


รูปที่ 2.2 แสดงกลไกการดูดซับ

สำหรับการดูดซับของเหลวนั้นมีเพียงขั้นตอนการแพร่ไปยังผิวภายนอกตัวดูดซับ และการเคลื่อนที่เข้ารูพรุนตัวดูดซับ โดยแรงแคปิลลารี (Capillary force) ไม่เกิดขั้นตอนการเกาะติดพื้นผิว

2.1.2 การดูดซับด้วยแรงแคปิลลารีในการดูดซับของเหลว

การดูดซับด้วยแรงแคปิลลารีนั้นขึ้นกับแรงตึงผิวของสาร แรงตึงผิวของสารเกิดจากโมเลกุลของของเหลวนั้นเคลื่อนที่ตลอดเวลา ภายใต้อิทธิพลของโมเลกุลรอบด้านเกือบเท่ากันทุกทิศทาง ส่วน โมเลกุลที่ผิวถูกดึงดูดด้วยโมเลกุลที่อยู่ด้านข้างและด้านล่าง ทำให้ดูเหมือนว่าโมเลกุลนั้นถูกแรงดึงเข้าภายในของเหลวมากกว่าแรงนี้จะพยายามลดพื้นที่ผิวของของเหลวให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้ เพื่อลดจำนวน โมเลกุลที่ผิวหน้าของของเหลวให้น้อยลง จึงเกิดความตึงผิวขึ้น การวัดความตึงผิวของของเหลววิธีหนึ่งที่ใช้คือ จุ่มหลอดกะปิลลารีรัศมี r ลงในของเหลวที่ต้องการวัดความตึงผิวแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วิธีวัดความตึงผิวโดยใช้หลอดกะปิลลารี

- (a) ปรากฏการณ์โดยทั่วไปของของเหลวในหลอดกะปิลลารี
 (b) เมื่อแรงดึงดูดของโมเลกุลที่เหมือนกันมากกว่าแรงดึงดูดของโมเลกุลที่ต่างกัน

ค่าแรงตึงผิวสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\gamma = \frac{h\rho gr}{2\cos\theta} \quad (2.1)$$

ของเหลวส่วนมากพบว่าสามารถไหลสูงขึ้นไปในหลอดกะปิลลารีได้ แต่มีของเหลวบางอย่างที่ไม่เกิดปรากฏการณ์แบบนี้เช่น ปรอท ที่เป็นเช่นนี้อธิบายได้จากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล แรงดึงดูดโมเลกุลสารที่เหมือนกันเรียกว่า แรงโคฮีชัน (Cohesion) แรงดึงดูดโมเลกุลสารที่ต่างกันเรียกว่า แรงแอกฮีชัน (Adhesion) ถ้าแรงแอกฮีชันแข็งแรงกว่าแรงโคฮีชันของเหลวจะถูกดึงขึ้นไปตามผนัง แต่ถ้าแรงโคฮีชันแข็งแรงกว่าแรงแอกฮีชันของเหลวในหลอดกะปิลลารีจะต่ำลง ความแตกต่างระหว่างแรงโคฮีชันและแอกฮีชันนี้เราจะเห็นได้เมื่อหยดน้ำเล็กๆลงบนพื้นที่สะอาดน้ำมีแนวโน้มแผ่กระจายออกทำมุม θ น้อยกว่า 90 องศา ส่วนการหยดปรอทลงบนพื้นผิว ลักษณะของมันจะคล้ายเป็นทรงกลมและทำมุมอยู่ระหว่าง 90-180 องศา ปรากฏการณ์การไหลของของเหลวขึ้นสู่หลอดกะปิลลารีด้วยความตึงผิวสามารถนำมาอธิบายปรากฏการณ์การไหลของของเหลวขึ้นสู่วัตถุที่มีรูพรุนขนาดเล็กได้เช่นกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.3 ประเภทของการดูดซับ [8]

2.1.3.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

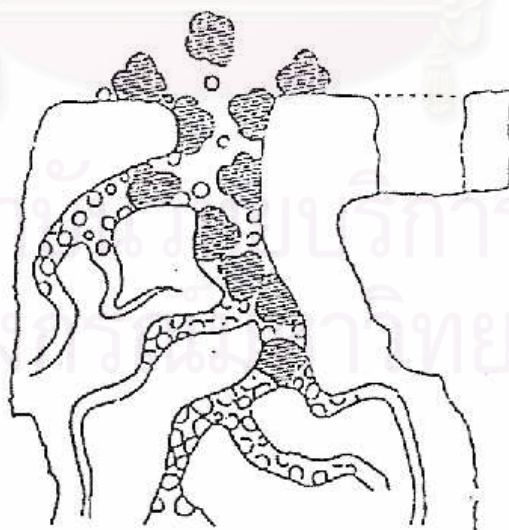
การดูดซับที่เกิดขึ้นด้วยแรงดึงดูดระหว่างมวล หรือระหว่างโมเลกุล หรือระหว่างประจุ การดูดซับชนิดนี้ไม่ต้องมีพลังงานกระตุ้นและปริมาณของการดูดซับชนิดนี้จะลดลงเมื่ออุณหภูมิของระบบสูงขึ้น

2.1.3.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption)

การดูดซับที่เกิดขึ้นด้วยพันธะเคมีระหว่าง โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ การดูดซับชนิดนี้จำเป็นต้องใช้พลังงานกระตุ้นเสมือนหนึ่งเกิดปฏิกิริยาเคมี และอาจดูดซับได้ดียิ่งขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

2.2 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับซึ่งสังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการพิเศษ เพื่อให้เกิดรูพรุนจำนวนมากและมีผิวสัมผัสสูง โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวสูง ประมาณ 600-2,000 ตารางเมตรต่อกรัม รูพรุน (Pores) ของถ่านกัมมันต์มีขนาดอยู่ระหว่าง 20-20,000 อังสตรอม วัสดุที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายชนิด ได้แก่ ไม้ กะลามะพร้าว ถ่านหิน ถ่านโค้ก กระจุก ขี้เลื่อย กากเมล็ดกาแฟ เปลือกของผลไม้บางชนิด เป็นต้น ถ่านกัมมันต์ซึ่งผลิตจากวัสดุที่ต่างกันจะมีคุณภาพแตกต่างกัน [8] ถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติดูดซับความชื้นได้ไม่ดี (hydrophobic) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่นๆ [9] เนื่องจากเป็นสารดูดซับชนิดไม่มีขั้ว



รูปที่ 2.7 ลักษณะของรูพรุนในถ่านกัมมันต์

2.2.1 ชนิดของคุณสมบัติถ่านกัมมันต์ [8]

2.2.1.1 แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น

- ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวคาร์บอน มักเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ตัวกระตุ้นที่ใช้ได้แก่ กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) และสังกะสีคลอไรด์ ($ZnCl_2$) เป็นต้น
- ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นทางกายภาพ (Physical Activation Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้ก๊าซออกซิไดซ์ เช่น ไออน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีรูพรุนขนาดเล็ก นิยมใช้ในการดูดซับก๊าซและไอระเหย

2.2.1.2 แบ่งตามขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์

- ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนเล็กกว่า 1.5 นาโนเมตร มักใช้ในการดูดซับก๊าซหรือไอระเหย
- ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 1.5 ถึง 100 นาโนเมตร มักนำไปใช้ประโยชน์ในปฏิกิริยา (Catalytic Reaction) ใช้ดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น การฟอกสี
- ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนมากกว่า 100 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ แต่เป็นตัวช่วยให้สารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนเล็กได้ง่ายขึ้น มักนำไปใช้ประโยชน์ในการฟอกสี และการผลิตยา

2.2.1.3 แบ่งตามลักษณะของรูปร่าง

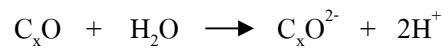
- ถ่านกัมมันต์แบบผง (Power Activated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผง ใช้สำหรับฟอกสีและดูดกลิ่นในของเหลว
- ถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด (Granular Activated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตรไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่ใช้งานมานานจนประสิทธิภาพลดลงแล้วสามารถนำไปทำการฟื้นฟูสภาพเพื่อทำให้มีอำนาจการดูดซับที่ผิวมากขึ้น และการนำกลับมาใช้งานใหม่ได้

2.2.1.4 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

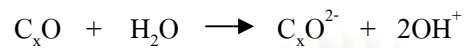
- ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักใช้ประโยชน์ในสถานะที่เป็นสารละลาย เช่น ใช้ในการฟอกสีน้ำตาลดิบ หรือการทำน้ำให้บริสุทธิ์
- ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นสูง มักใช้ในการดูดซับก๊าซหรือไอระเหย

2.2.1.5 แบ่งตามค่าความเป็นกรดต่างเมื่อละลายน้ำ

- ถ่านกัมมันต์ชนิดแอล (L-Type Activated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่อยู่ในสารละลายแล้วมีคุณสมบัติเป็นกรด เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาดังนี้



- ถ่านกัมมันต์ชนิดเอช (H-Type Activated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่อยู่ในสารละลายแล้วมีคุณสมบัติเป็นด่าง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาดังนี้



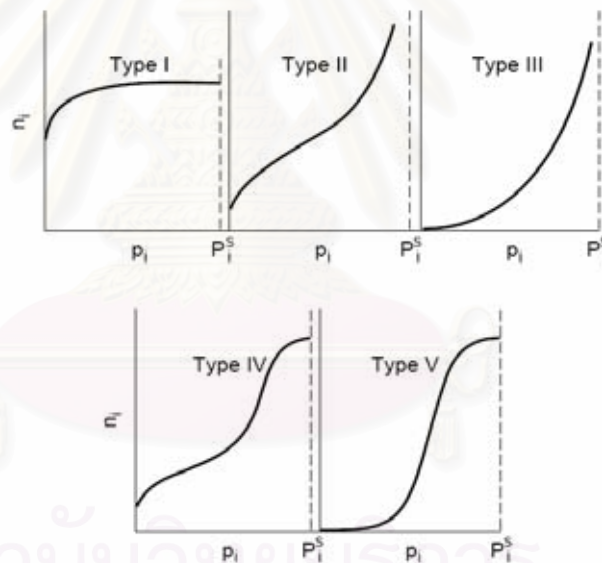
2.2.1.6 แบ่งตามหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์

- หมู่ฟังก์ชันออกไซด์ที่เป็นกรด ซึ่งแสดงคุณสมบัติเป็นกรดเมื่ออยู่ในสารละลาย คือ ส่วนใหญ่เป็นอนุพันธ์ของหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) หมู่ฟังก์ชันนี้พบในถ่านกัมมันต์ชนิดแอล เตรียมจากการเผาวัสดุที่อุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียสในอากาศ และเผากระตุ้นโดยใช้สารกระตุ้นที่อุณหภูมิไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักผลิตจากวัสดุที่จำพวกไม้ หรือวัสดุที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสูง ตัวอย่างของหมู่ฟังก์ชันกลุ่มนี้เช่น หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) หมู่ฟีนอลิกคาร์บอกซิล (Phenolic Carboxyl) หมู่ควิโนนอยด์ (Quinonoid) หมู่กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic Acid Group) หมู่แอนไฮไดรด์ (Anhydrides) หมู่แลคโตน (Lactone) และหมู่ไซคลิกเปอร์ออกไซด์ (Cyclic Peroxide) เป็นต้น
- หมู่ฟังก์ชันออกไซด์ที่เป็นด่าง ซึ่งแสดงคุณสมบัติเป็นด่างเมื่ออยู่ในสารละลาย มักพบในถ่านกัมมันต์ชนิดเอช ซึ่งเตรียมจากการกระตุ้นด้วยไอน้ำหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงมากประมาณ 1,000-1,200 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักผลิตจากวัสดุที่จำพวก กะลามะพร้าว ถ่านหิน หรือวัสดุชีวโมลที่มีองค์ประกอบธาตุคาร์บอนไม่สูงมากนัก ได้แก่ หมู่ควินิน (Quinines) หมู่ฟีนอล (Phenols) และหมู่คาร์บอกซิเลต (Carboxylates) เป็นต้น

2.3 สมดุลการดูดซับ (Equilibrium Adsorption) [8]

ในขณะที่เกิดการดูดซับ ตัวถูกละลายจะเคลื่อนที่ออกจากสารละลาย ทำให้ความเข้มข้นที่ผิวหน้าของของแข็งเพิ่มขึ้น เกิดสภาพสมดุลพลศาสตร์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของของแข็ง สมดุลของการดูดซับ (Equilibrium Adsorption) แสดงในรูปร้อยละ โดยน้ำหนักหรือโดยปริมาตรของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับไว้บนตัวดูดซับหนึ่งหน่วยน้ำหนัก อาจแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นหรือปริมาณหรือปริมาตรของตัวดูดซับที่ถูกดูดซับไว้เทียบกับความดันย่อยในกรณีดูดซับก๊าซ หรือความเข้มข้นของตัวถูกละลายในกรณีดูดซับของเหลว ที่อุณหภูมิคงที่ อธิบายถึงการกระจายตัวของตัวถูกละลายระหว่างวัฏภาคของเหลวและของแข็ง โดยอัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุล และจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวทำละลาย คุณสมบัติของตัวถูกละลาย หรือความเข้มข้นและคุณสมบัติของตัวถูกละลาย โดยทั่วไปเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้น

จากการศึกษาของ BDDT พบว่าเส้นสมดุลการดูดซับแบ่งออกเป็น 5 แบบ ตามรูปที่ 2.4 [9]



รูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบไอโซเทอม [8]

- สมดุลการดูดซับแบบที่ I มักพบในการดูดซับที่มีสารดูดซับมีรูพรุนขนาดเล็ก เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เช่น การดูดซับออกซิเจนบน carbon block ที่อุณหภูมิ -182°C
- สมดุลการดูดซับแบบที่ II พบได้ในการดูดซับของแข็งพวก nonporous จุดที่เกิดหักเหของเส้นไอโซเทอมมักเกิดใกล้กับบริเวณการดูดซับแบบชั้นเดียวสมบูรณ์ และเมื่อเพิ่มความดันจะเกิดการดูดซับหลายชั้น (multilayer) จนเข้าใกล้ค่าอนันต์

- สมดุลการดูดซับแบบ III จากกราฟเห็นได้ว่าปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นไม่จำกัด เช่น การดูดซับโบรมีนบนซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 20 °c
- สมดุลการดูดซับแบบ IV คล้ายกับแบบ II แต่มีการเกิดการดูดซับหลายชั้นอย่างจำกัด
- สมดุลการดูดซับแบบ V พบในการดูดซับไอน้ำด้วยถ่านกัมมันต์

ส่วนการดูดซับในของเหลวสององค์ประกอบนั้นส่วนใหญ่จะเกิดสมดุลการดูดซับแบบที่ I และ III ที่ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลายต่ำจะเกิด ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้น

2.3.1 แบบจำลองสมดุลการดูดซับ

มีหลายทฤษฎีและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการอธิบายถึงความแตกต่างของประเภทไอโซเทอมการดูดซับแต่ละแบบ และสามารถทำนายปริมาณการดูดซับสำหรับการดูดซับของของเหลวสององค์ประกอบที่ได้รับความนิยมดังนี้

2.3.1.1 ไอโซเทอมการดูดซับเชิงเส้น (Linear Adsorption Isotherm)

สมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้น คือ

- เหมาะกับปริมาณการดูดซับน้อย ๆ หรือความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเจือจาง ซึ่งมีผลให้แต่ละโมเลกุลถูกดูดซับจะไม่ส่งผลกระทบต่อโมเลกุลอื่นๆที่ถูกดูดซับไว้แล้ว
- ค่าคงที่สมดุลการดูดซับบางครั้งเรียกเป็น ค่าคงที่ของเฮนรี่ (Henny)
- กราฟไอโซเทอมมีลักษณะเป็นเส้นตรง

แสดงดังสมการ

$$q = K_H C \quad (2.2)$$

2.3.1.2 ไอโซเทอมการดูดซับของแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

สมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ คือ

- โมเลกุลถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดซับ
- มีโมเลกุลชั้นเดียวในบริเวณถูกดูดซับ
- พื้นที่ของบริเวณดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน กำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว
- พลังงานการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกทุกบริเวณ
- กราฟไอโซเทอมตรงกับไอโซเทอมแบบที่ I

แสดงดังสมการ

$$q = \frac{q_m K_L C}{1 + K_L C} \quad (2.3)$$

2.3.1.3 ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

- ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิชนิยมใช้มาก เนื่องจากมีความถูกต้องสูง โดยเฉพาะในกรณีดูดซับสารละลายที่ค่อนข้างเจือจาง
 - กราฟไอโซเทอมตรงกับไอโซเทอมแบบที่ I กรณีค่า n มากกว่า 1
 - กราฟไอโซเทอมตรงกับไอโซเทอมแบบที่ III กรณีค่า n น้อยกว่า 1
- แสดงดังสมการ

$$q = K_F C^{1/n} \quad (2.4)$$

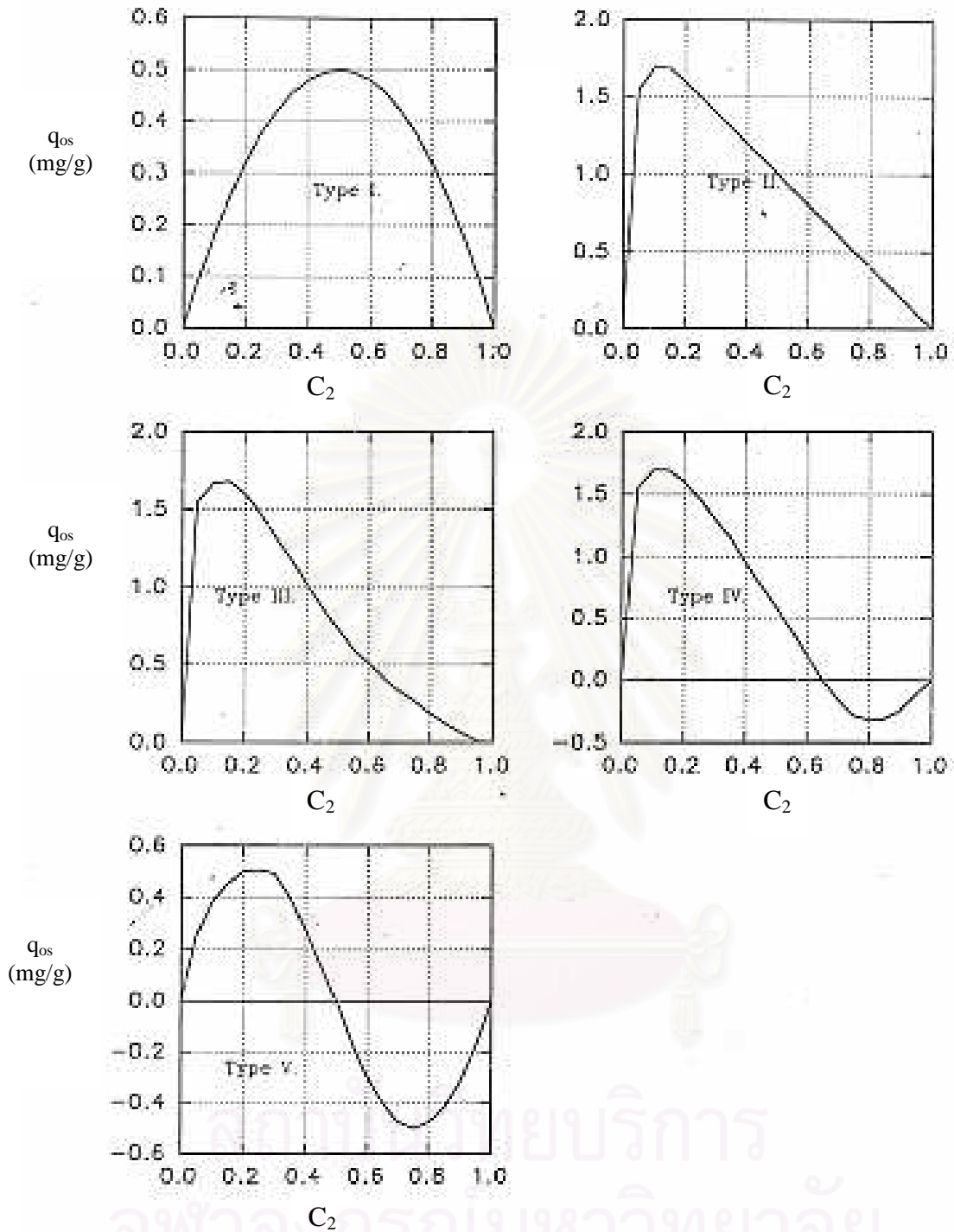
2.3.2 การดูดซับของเหลวผสมสององค์ประกอบบนพื้นผิวของแข็ง

เมื่อนุภาคของแข็งถูกแช่อยู่ในของเหลว จะเกิดแรงกระทำกันที่ผิวสัมผัสระหว่างของแข็งกับของเหลวเป็นสาเหตุให้เกิดเป็นชั้นดูดซับระหว่างวัฏภาคดูดซับ ปริมาณสารที่อยู่ในชั้นดูดซับคือ ความจุการดูดซับของตัวดูดซับของแข็ง ซึ่งสามารถหาได้จากสมการของออสวอด (Ostwald-de Izaguirre) ซึ่งได้มาจากสมการมวลสารของระบบดังนี้

$$q_{os} = N(C_1 - C_2) \quad (2.5)$$

- โดย q_{os} คือ มวลสารชนิดที่ 1 ที่ถูกดูดซับต่อมวลถ่านที่สมดุล โดยคำนวณจากสมการของ ออสวอด
- N คือ มวลของของผสมก่อนการดูดซับต่อมวลถ่าน
- C_1 คือ ความเข้มข้นของสารชนิดที่ 1 ในของผสมก่อนการดูดซับ
- C_2 คือ ความเข้มข้นของสารชนิดที่ 1 ในของผสมหลังดูดซับที่สมดุล

จากสมการที่ 2.5 สามารถเขียนกราฟไอโซเทอมการดูดซับระหว่าง เซย์ และ แนช (Schay and Nagy) ได้แบ่งประเภทสมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ของผสมในสถานะของเหลวออกเป็น 5 ลักษณะดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดง สมดุลการดูดซับ 5 ลักษณะของการแบ่งประเภทสมดุลการดูดซับของ เซย์ และ แนช

สำหรับสมดุลการดูดซับชนิดที่ 2, 3 และ 4 ของการแบ่งประเภทไอโซเทอมการดูดซับของ เซย์ และ แนช มีส่วนที่เป็นเชิงเส้นกว้างเมื่อเทียบกับส่วนโค้ง สำหรับส่วนที่เป็นเชิงเส้นสามารถเขียนได้ดังนี้

$$q_{os} = a - bC_2 \quad (2.6)$$

สำหรับสมการออสวอดสามารถเขียนใหม่ได้จากสมมูลมวลสารดังนี้

$$q_{os} = M_1(C_2 - C_1) = M_1^s - M^s C_2 = M^s (C_2^s - C_2) \quad (2.7)$$

โดย $C_1^s = \frac{M_1^s}{M^s}$ คือ ความเข้มข้นของสารชนิดที่ 1 ที่รัฐภาคผิวสัมผัส
 M_1^s คือ มวลของสารชนิดที่ 1 ที่ถูกดูดซับในถ่านกัมมันต์
 M^s คือ มวลของสารชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 ที่ถูกดูดซับ
 ในถ่านกัมมันต์

รวมสมการ (4.11) กับ (4.12) ได้ดังนี้

$$a - bC_2 = M_1^s - M^s C_2 = M_1^s - (M_1^s + M_2^s)C_2 \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.8 สามารถหาปริมาณสารชนิดที่ 1 ที่ถูกดูดซับ ได้จาก กรณี C_2
 เท่ากับศูนย์ $a = M_1^s$ และสามารถหาปริมาณสารชนิดที่ 2 ที่ถูกดูดซับได้จาก กรณี C_1 เท่ากับ
 หนึ่งร้อย $a - b = -M_2^s$

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.3 การวัดสมมูลการดูดซับในของเหลวสององค์ประกอบ [1]

การหาปริมาณการดูดซับที่สมดุลของของเหลวสององค์ประกอบในระบบปิดทำได้โดยการวัดความเข้มข้นของสารดูดซับเริ่มต้นของระบบและความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่เหลือหลังจากที่ระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจากข้อมูลทั้งสองส่วนสามารถคำนวณหาปริมาณที่ถูกดูดซับได้ พบว่ากรณีดูดซับของเหลวระบบจะเข้าสู่สมมูลการดูดซับได้ช้ากว่ากรณีดูดซับก๊าซ เนื่องจากในกรณีของการดูดซับสถานะของเหลวการแพร่ระหว่างอนุภาคมักจะเป็นตัวกำหนดการดูดซับ ของเหลวมีค่าการแพร่ต่ำเมื่อเทียบกับการแพร่ของก๊าซพบว่า การแพร่ของของเหลวมีค่าต่ำกว่าก๊าซมากกว่าพันเท่าทำให้ในการวัดสมมูลการดูดซับในของเหลวสององค์ประกอบในระบบปิดต้องใช้เวลานาน ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซและของเหลวแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าการแพร่ของก๊าซ

ก๊าซ	อุณหภูมิ (°C)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซ D_v (cm ² /s)			
		อากาศ	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน	คาร์บอนไดออกไซด์
เอทานอล	0		0.377		0.068
ไอโอดีน	0	0.07		0.07	
ปรอท	0	0.112	0.53		0.13
คาร์บอนไดออกไซด์	20			163	
ฮีเลียม	20			0.705	

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าการแพร่ของของเหลวที่อุณหภูมิ 25 °C

ตัวถูกละลาย	ตัวทำละลาย	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของของเหลว D_L (cm ² /s)
เอทานอล	น้ำ	1.28×10^{-5}
กลูโคส	น้ำ	0.68×10^{-5}
กรดอะซิติก	อะซิโตน	3.31×10^{-5}

2.4 การคายกลับ

การคายกลับ (Desorption) หรือการคืนสภาพของตัวดูดซับที่ใช้แล้ว (Regeneration) มีวัตถุประสงค์คือ

- เพื่อรักษาสมรรถภาพของการดูดซับของสารดูดซับที่เสื่อมไป
- เพื่อให้สารถูกดูดซับในสารดูดซับกลับคืนมา

การคายกลับนั้นต้องพิจารณาว่าเป็นการดูดซับแบบกายภาพ หรือทางเคมี เพราะ การดูดซับ การดูดซับทางกายภาพสามารถย้อนกลับได้ ส่วนทางเคมีจะต้องมีกระบวนการต่างๆ ที่ยุ่งยากกว่า การคายกลับทำได้ไม่สมบูรณ์นัก การนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้นั้นต้องพิจารณาถึงค่าการดูดซับที่ผิวตัวดูดซับเดิมที่นำมาดูดซับตัวถูกดูดซับใหม่ ตัวดูดซับที่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่จะมีความจุในการดูดซับเท่ากับที่ตอนเริ่มต้นหรือไม่ กรณีตัวถูกดูดซับเป็นสารที่ต้องการต้องพิจารณาถึงว่าจะนำตัวถูกดูดซับกลับออกมาจากตัวดูดซับได้มากน้อยเพียงใด กระบวนการคายกลับหรือการรีเจนเนอเรทมีตัวต้องพิจารณาคือระยะเวลาในการคายกลับจะต้องสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้ และถ้าจำเป็นต้องทำให้มีการดูดซับและนำสารดูดซับแยกกลับเพื่อเวียนใช้ใหม่อย่างต่อเนื่องแล้ว จะต้องติดตั้งระบบรีเจนเนอเรทหลายระบบ

วิธีการปฏิบัติสำหรับการคายกลับตัวดูดซับที่ใช้แล้วมีดังนี้

- (1) การเพิ่มอุณหภูมิ
- (2) การลดความดันย่อย
- (3) การลดความเข้มข้น
- (4) การไล่ด้วยของไหลเฉื่อย
- (5) การแทนที่ด้วยสารที่ดูดซับในตัวดูดซับนั้นได้ดีกว่า
- (6) การเปลี่ยนเงื่อนไขทางเคมีเช่นความเป็นกรดด่าง [10]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 ข้อดีข้อเสียสำหรับกระบวนการคายกลับวิธีต่างๆ [10]

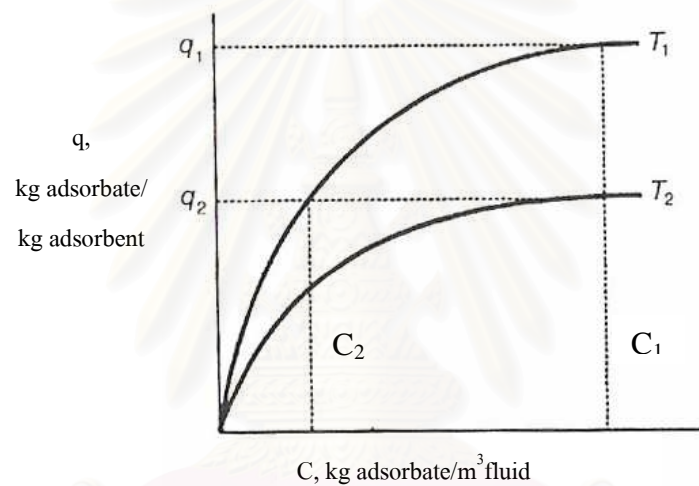
กระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
อุณหภูมิสลับ (Thermal swing)	<ul style="list-style-type: none"> - ดีสำหรับสารที่ถูกดูดซับได้ดีในตัวดูดซับ - ได้สารคายกลับ (Desorbate) ที่มีความเข้มข้นสูง - ใช้สำหรับก๊าซและของเหลว 	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิมีผลกระทบต่อสารที่ถูกดูดซับ - อาจเกิดการสูญเสียความร้อน (Heat loss) - ใช้เวลาต่อหนึ่งรอบการดูดซับและคายกลับนาน
ความดันสลับ (Pressure swing)	<ul style="list-style-type: none"> - ดีสำหรับสารที่ถูกดูดซับได้ไม่ดีในตัวดูดซับที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง 	<ul style="list-style-type: none"> - อาจต้องความดันใช้ความดันต่ำมาก - พลังงานเชิงกลแพงกว่าพลังงานความร้อน
สุญญากาศ (Vacuum) กรณีพิเศษใช้ความดันสลับ	<ul style="list-style-type: none"> - มีช่วงเวลาคายกลับรวดเร็ว 	<ul style="list-style-type: none"> - ได้สารคายกลับมีความบริสุทธิ์ต่ำ
การแทนที่ (Displacement)	<ul style="list-style-type: none"> - ดีกรณีมีสารที่ดูดซับตัวดูดซับได้ดีกว่าสารที่ถูกดูดซับ - ไม่เกิดปฏิกิริยาการแตก (cracking reaction) เนื่องจากการคายกลับ - ไม่เกิดผลกระทบจากอุณหภูมิกับตัวดูดซับ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องทำการแยกและการนำกลับของผลิตภัณฑ์ - หาสารที่ใช้แทนที่ตัวที่ถูกดูดซับยาก
การไล่ด้วยก๊าซ (Purge gas stripping)	<ul style="list-style-type: none"> - จำเป็นที่อุณหภูมิและความดันคงที่ 	<ul style="list-style-type: none"> - เฉพาะสำหรับตัวที่ถูกดูดซับดูดซับในตัวดูดซับได้ด้วยแรงกระทำระหว่างกันอ่อน - โดยปกติจะไม่ใช้เมื่อจำเป็นต้องนำสารคายกลับกลับมา
การไล่ด้วยไอน้ำ (เป็นส่วนประกอบในการบวนการอุณหภูมิสลับและการแทนที่)	<ul style="list-style-type: none"> - ข้อดีเช่นเดียวกับอุณหภูมิสลับและการแทนที่ 	

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างกระบวนการสำหรับการคายกลับวิธีต่างๆ [10]

วิธีการ	กระบวนการ	ตัวดูดซับ
อุณหภูมิสลับ (Thermal swing)	- การไล่ความชื้นก๊าซ - การไล่ความชื้นตัวทำละลาย	3A, 4A, 13X 4A
ความดันสลับ (Pressure swing)	- การไล่ความชื้นก๊าซ - การนำกลับก๊าซไฮโดรเจน - การแยกอากาศ	3A, 4A, 13X Mol sieve Carb mol sieve, Zeolite
สุญญากาศ (Vacuum) กรณีพิเศษใช้ความดันสลับ	- การแยกพาราฟินโซ่ตรง	5A mol sieve
การแทนที่ (Displacement)	- การแยกพาราฟินโซ่ตรงจาก โซ่กิ่งและโซ่ปิดพาราฟิน	5A mol sieve
การไล่ด้วยไอน้ำ (เป็นส่วนประกอบใน กระบวนการอุณหภูมิสลับและ กระบวนการแทนที่)	- ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำ เสีย - การนำตัวทำละลายกลับคืน	Activated Carbon

2.4.1 การคืนสภาพของตัวดูดซับที่ใช้แล้วด้วยความร้อน

กระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับจะใช้กระบวนการคายกลับสารถูกดูดซับที่ผิวหรือในรูพรุนตัวดูดซับออกมาโดยใช้ความร้อนเนื่องจากจากกราฟสมดุลที่ 2.4 พบว่ากรณีอุณหภูมิของระบบสูงขึ้นจะเกิดสมดุลใหม่ขึ้น กรณีที่ความเข้มข้นของระบบเท่ากันคือ C_1 แต่อุณหภูมิของระบบสูงขึ้นจาก T_1 ไปที่ T_2 พบว่าสมดุลจะเลื่อนลงไปที่สมดุลใหม่ที่อุณหภูมิสูงกว่าคือ T_2 และพบว่าที่จุดนั้นปริมาณการดูดซับลดลงจาก q_1 ไปที่ q_2 ดังรูปที่ 2.7 แสดงว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำลง กรณีคายกลับด้วยความร้อน ตัวถูกดูดซับจะระเหยสู่สถานะไอดังนั้นเส้นสมดุลที่อุณหภูมิ T_2 อาจหาไม่ได้โดยตรง สมดุลการคายกลับอาจหาจากความดันย่อยของสารที่ระเหยหลังจากได้รับความร้อนเทียบกับปริมาณการดูดซับ q



รูปที่ 2.7 ผลของการเพิ่มอุณหภูมิต่อสมดุลการดูดซับ จากรูป $T_2 > T_1$

การคืนสภาพของตัวดูดซับที่ใช้แล้วด้วยความร้อน ไม่สามารถทำได้ถ้าเป็นกรณีต่างๆดังนี้

1. เกิดเกลือบนผิวตัวดูดซับ ฉะนั้นขั้นตอนควรมีการล้างด้วยกรด เช่น กรดไฮโดรคลอริก
2. ตัวดูดซับบนผิวของถ่านกัมมันต์มีความเป็นพิษต่อชั้นบรรยากาศหลังการคายกลับเช่น ตัวถูกดูดซับเป็น Nitrogen oxide หรือสารกัมมันตภาพรังสี
3. ตัวถูกดูดซับมีฤทธิ์กัดกร่อนหลังการคายกลับ [7]

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ทำการทดลองคือถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด ขนาด 4×8 เมช ของบริษัท Carbo Karn Co.,Ltd ซึ่งผลิตจากกะลามะพร้าว ภายในประเทศ มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลอง

การกระจายตัวของขนาดเม็ดถ่าน : +4 (4.75 mm.) (ASTM Mesh/mm.) : 4 × 8 (4.75-2.36 mm.) : -8 (2.36 mm.)	MAX 5% MIN 90% MAX 5%
Iodine number (mg./g) (AWWA B 604)	MIN 1150
pH	9-11
พื้นที่ผิว (m ² /g)	MIN 1200
ความชื้น (% w/w)	MAX 3.5
ความหนาแน่น (g/cc.)	MIN 0.47

3.1 การทดลองหาสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างดัชนีหักเหแสงกับความเข้มข้นของผสมเอทานอล

ของผสมเอทานอลในน้ำที่เตรียมได้ด้วยสัดส่วน โดยปริมาตรและคิดเป็นค่าความเข้มข้นเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรได้นั้นเป็นความเข้มข้นที่ไม่ถูกต้องแม่นยำเนื่องจากมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลเอทานอลและน้ำทำให้การเตรียมสารละลายวิธีนี้ได้ความเข้มข้นหลังการผสมด้วยสัดส่วนโดยปริมาตรต่าง ๆ นั้นเปลี่ยนไป การวัดความเข้มข้นเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีความถูกต้องแม่นยำกว่า การวัดความเข้มข้นเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนั้นทำได้ยาก เนื่องจากไม่ทราบความเข้มข้นเริ่มต้นที่แน่นอนของเอทานอล ดังนั้นจึงวัดค่าอื่นที่มีข้อมูลเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นที่ผู้รายงานไว้ ได้มีผู้รายงานไว้ในหนังสือ Perry's chemical engineerings' Handbook ถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์โดยมวล กับ ความหนาแน่นหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรของสารละลายเอทานอลในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ จึงได้ออกแบบการทดลองดังนี้

1. ล้างถ่านกัมมันต์ให้เขม่าออกจากถ่านกัมมันต์ทั้งหมด จากนั้นนำถ่านซึ่งล้างแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสประมาณ 1 ชั่วโมง
2. เตรียมของผสมเอทานอล-น้ำที่โดยนำเอทานอลความเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักผสมกับน้ำกลั่นที่เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรเอทานอล 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 ตามลำดับ
3. วัดอุณหภูมิสารละลายที่เตรียมได้
4. นำสารละลายแต่ละความเข้มข้นนั้นไปหาค่าความหนาแน่นด้วยขวดวัดความหนาแน่น (Pycnometer) และวัดดัชนีหักเหแสงด้วยเครื่องวัดดัชนีหักเหแสงแบบพกพา (Hand Refractometer)
5. หาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กันระหว่างดัชนีหักเหแสงกับความเข้มข้น (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) จากที่มีข้อมูลความสัมพันธ์จากการทดลองระหว่างดัชนีหักเหแสงกับความหนาแน่น จากที่มีข้อมูลมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเข้มข้น

3.2 การทดลองหาสมมูลการดูดซับ

3.2.1 การทดลองสมมูลการดูดซับของถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับแห้ง

1. เตรียมของผสมเอทานอล-น้ำที่โดยนำเอทานอลความเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักผสมกับน้ำกลั่นที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร วัดดัชนีหักเหแสง และวัดอุณหภูมิ
2. นำของผสมเอทานอลในน้ำ 20 มิลลิลิตรและนำถ่านกัมมันต์ 3 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า เขย่าที่อุณหภูมิห้อง ให้เวลาในการเขย่า 2 ชั่วโมงซึ่งเป็นเวลาที่เกิดสมดุลกันระหว่างเอทานอลที่ถูกดูดซับในถ่านกัมมันต์กับเอทานอลในกับสารละลาย
3. กรองถ่านกัมมันต์ออกจากสารละลาย ซึ่งนำน้ำหนักถ่านกัมมันต์และน้ำหนักสารละลาย ที่เปลี่ยนไป และวัดดัชนีหักเหแสงของของผสมที่เหลือหลังดูดซับที่สมดุล
4. ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมก่อนดูดซับเป็น 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ
5. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปพล็อตกราฟไอโซเทอมการดูดซับว่าตรงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบใด

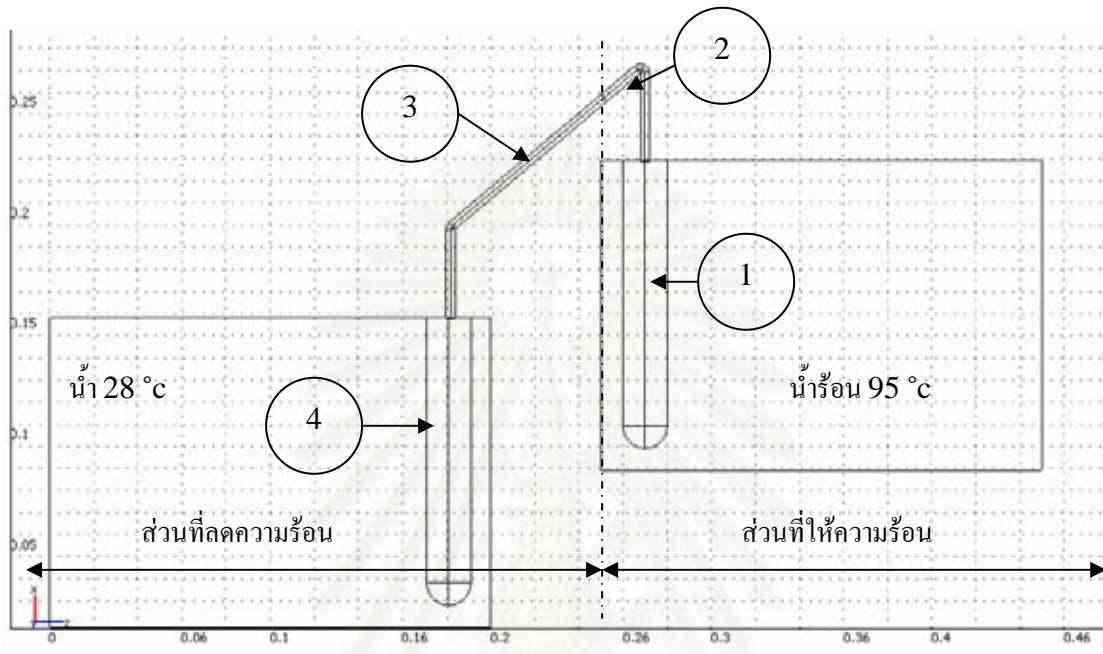
3.2.2 การทดลองสมมูลการดูดซับของถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับเปียกน้ำ

1. นำถ่านกัมมันต์ 3 กรัม และน้ำ 20 มิลลิลิตรใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ น้ำแพร่เข้าไปในรูพรุนถ่านกัมมันต์จนสมดุล

2. หลังจากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.2.1 แต่เปลี่ยนถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับของผสมเอทานอล-น้ำเป็นถ่านกัมมันต์เปียกน้ำ

3.3 การทดลองการคายกลับของเอทานอลและน้ำที่ถูกดูดซับในถ่านกัมมันต์

3.3.1 การทดลองการคายกลับเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์



รูปที่ 3.1 แสดงชุดทดลองการคายกลับเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์ด้วยความร้อน

จากรูปที่ 3.1 แสดงชุดทดลองการคายกลับเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์ด้วยความร้อนที่ 95 องศาเซลเซียส โดยแบ่งเป็นส่วนให้ความร้อนเพื่อให้เอทานอลคายกลับออกจากถ่านกัมมันต์และส่วนลดความร้อนเพื่อให้ไอเอทานอลที่คายกลับออกจากถ่านกัมมันต์ควบแน่นกลับไปเป็นของเหลวไอเอทานอลจะระเหยออกมาที่ส่วนให้ความร้อนแล้วควบแน่นเป็นของเหลวที่ส่วนลดความร้อน โดยให้เวลาในการคายกลับนานที่สุดจนไม่มีไอควบแน่นกลับออกมา

ส่วนที่ 1 คือ หลอดทดลองใส่ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับของผสมเอทานอล-น้ำที่สมดุลจากหัวข้อวิธีการทดลองที่ 3.2 เมื่อถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับของผสมเอทานอล-น้ำได้รับความร้อนจากอ่างน้ำร้อนอุณหภูมิคงที่ที่ 95 องศาเซลเซียส ไอของของผสมเอทานอล-น้ำจะระเหยออกมาที่หลอดนำก๊าซด้วยความแตกต่างของความหนาแน่นของไอและความแตกต่างของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป

ส่วนที่ 2 คือ ท่อนำก๊าซส่วนที่อุณหภูมิสูงที่ไอเอทานอลพบกับอากาศที่อุณหภูมิต่ำซึ่งอุณหภูมิต่ำกว่าไอเอทานอลซึ่งอยู่ในท่อนำก๊าซมีผลให้ความร้อนของไอเอทานอลถ่ายเทไปยังอากาศมีผลให้ไอเอทานอลมีอุณหภูมิลดลงและเกิดการควบแน่นเกิดสมดุลไอของเหลวมีผลให้เกิดจุดไออิมิตัว (Dew Point) และของเหลวอิมิตัว (Bubble Point) ในส่วนนี้ ซึ่งส่วนนี้จะนำไปพิจารณาความดันย่อยไอเอทานอลที่ผิวถ่านกัมมันต์โดยความดันย่อยที่สมดุลไอของเหลวส่วนนี้มีค่าเท่ากับ

ความดันย่อยในส่วนที่ 1 แต่เนื่องจากผลของอุณหภูมิต่ำที่ส่วนที่ 1 สูงกว่าจุดไออิ่มตัวมีผลให้ไอเอทานอลส่วนที่ 1 ไม่เกิดการควบแน่น

ส่วนที่ 3 คือส่วนที่ไอควบแน่นเป็นของเหลวเคลื่อนตัวด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกโดยอุณหภูมิลดลงเรื่อยๆ จนกลับมาที่อุณหภูมิห้องส่วนนี้มีปริมาณไอน้อยมากเนื่องจากไอเอทานอลเบากว่าของเหลวจะลอยขึ้นไปอยู่ในส่วนที่ 2 และไหลมายังส่วนที่ 4 คือหลอดเก็บของเหลวซึ่งแช่อยู่ในน้ำให้เวลาในการคายกลับนานที่สุดจนไม่มีไอควบแน่นกลับออกมาในส่วนที่ 4 จากนั้นวัดดัชนีหักเหแสงและน้ำหนักของไอควบแน่นและวัดน้ำหนักถ่วงหลังการคายกลับ



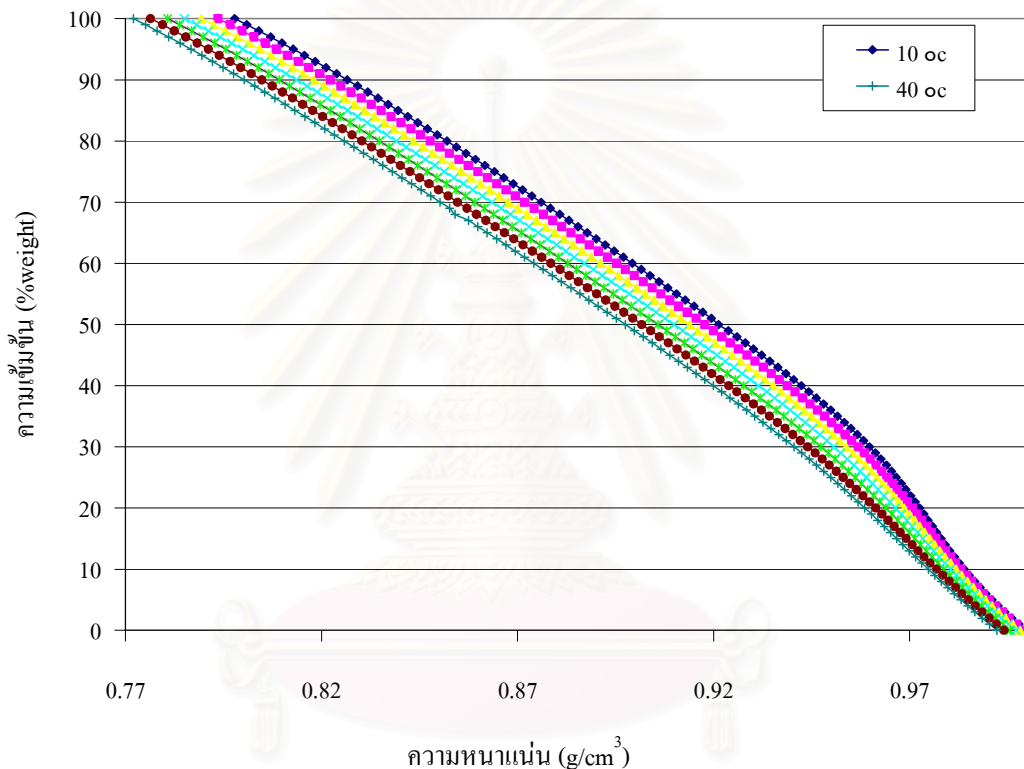
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหแสงกับความเข้มข้นของผสมเอทานอลน้ำ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับความหนาแน่นของของผสมเอทานอล-น้ำเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับความหนาแน่นของของผสมเอทานอล-น้ำ[]

จากกราฟรูปที่ 4.1 ระหว่างเส้นอุณหภูมิ 10 ถึง 40 องศาเซลเซียส คือเส้นที่อุณหภูมิ 15, 20, 25, 30, 35 ตามลำดับ สามารถแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างความหนาแน่นกับความเข้มข้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C = a + b(\log(\rho)) + c(\log(\rho))^2 + d(\log(\rho))^3 \quad (4.1)$$

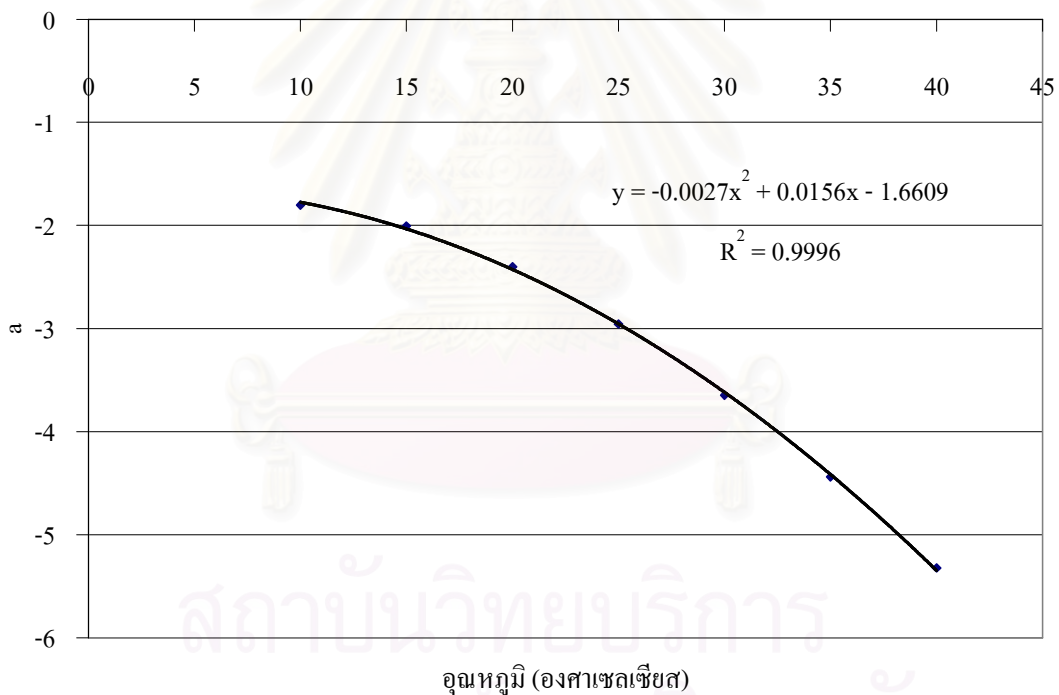
โดย C คือ ค่าความเข้มข้น (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

ρ คือ ค่าความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

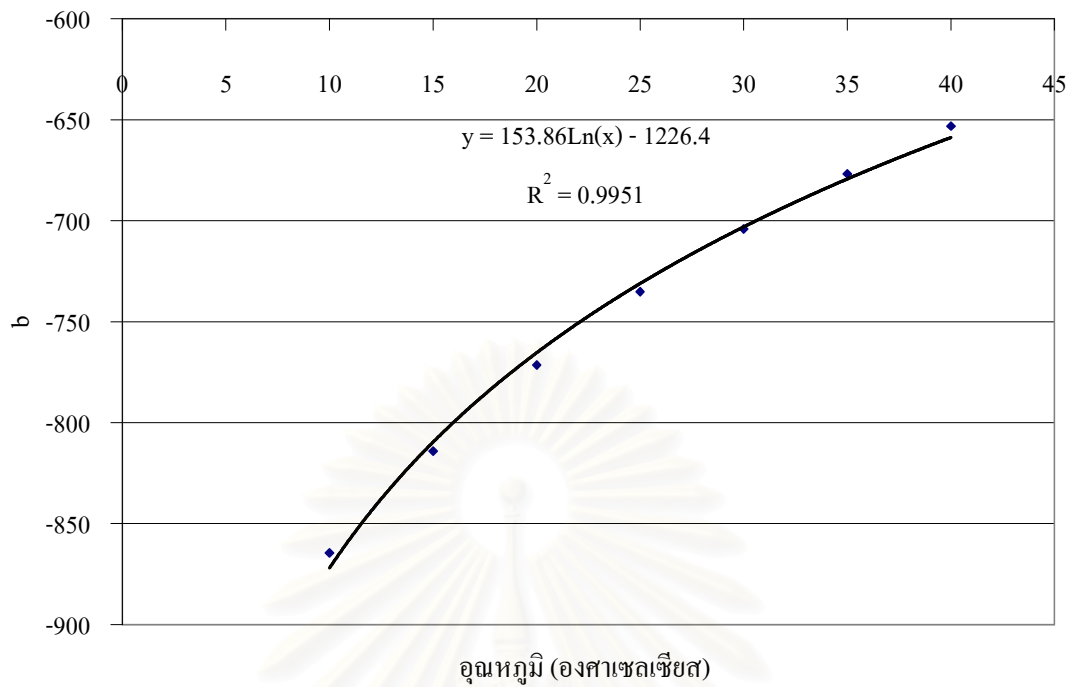
a, b, c, d คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นกับค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป แสดง

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่จากสมการที่ 1 เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป

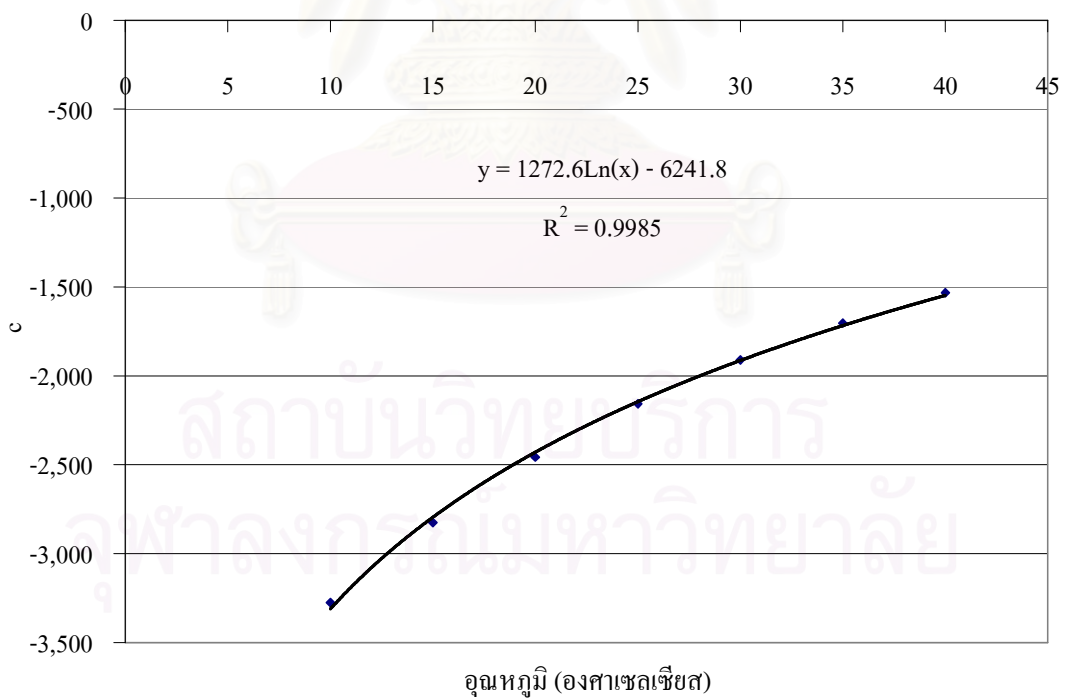
ค่าคงที่	อุณหภูมิ (°c)						
	10	15	20	25	30	35	40
a	-1.8020	-2.0056	-2.4000	-2.9557	-3.6469	-4.4389	-5.3217
b	-864.5387	-814.1781	-771.4508	-735.1342	-704.0604	-676.8478	-653.1946
c	-3274.842	-2825.163	-2457.4436	-2157.1958	-1910.1335	-1702.9378	-1532.8017
d	-6533.878	-5362.401	-4438.228	-3710.726	-3132.963	-2666.973	-2302.922
(R ²)	0.9992	0.9994	0.9996	0.9997	0.9998	0.9998	0.9999



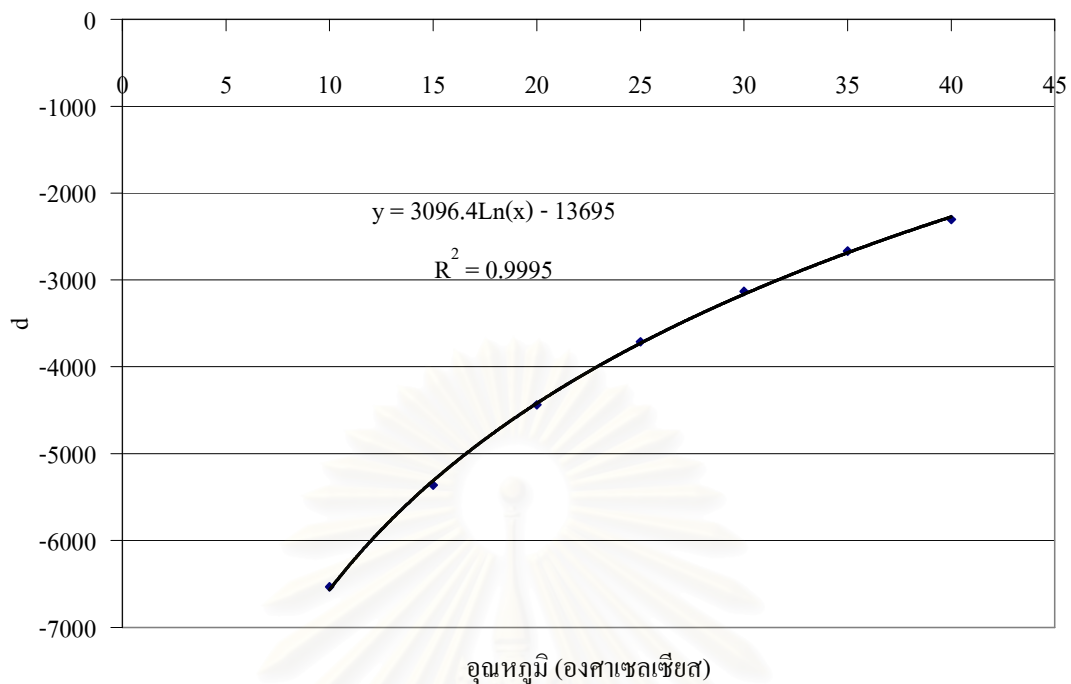
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ a กับอุณหภูมิ



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ b กับอุณหภูมิ



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ c กับอุณหภูมิ



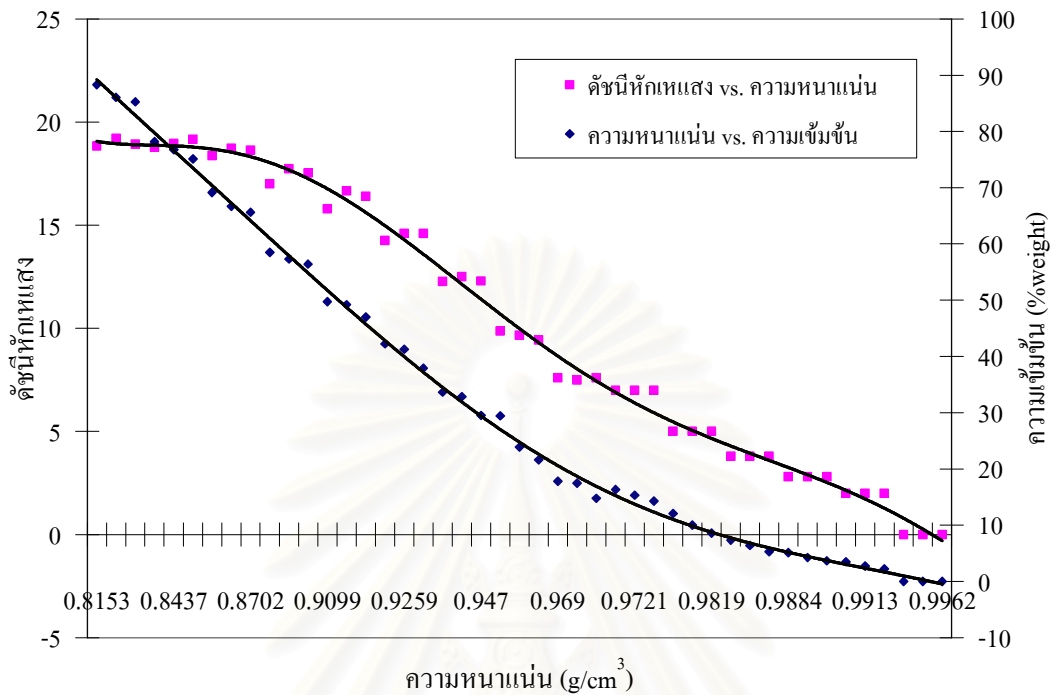
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ d กับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.2 ถึง 4.5 เมื่อทราบอุณหภูมิของสารละลายจากการวัดจากการทดลองสามารถนำค่ามาทำนายค่าคงที่ a, b, c, d ได้ และเมื่อทำการทดลองหาความหนาแน่นของของผสมจากการทดลอง สามารถนำค่าที่ได้มาเข้าสมการที่ 4.1 เพื่อทำนายความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักได้

4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับความหนาแน่นและดัชนีหักเหแสงของของผสมเอทานอล-น้ำเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป

เมื่อทำการทดลองวัด ความหนาแน่น และ ค่าดัชนีหักเหแสง ของของผสมเอทานอล-น้ำ ที่อุณหภูมิ 26, 28, 30 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ ก.1, ก.2, ก.3 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น ค่าดัชนีหักเหแสง และ ความเข้มข้น ดังรูปที่ 4.6 พบว่าความเมื่อดัชนีหักเหแสงลดความหนาแน่นของเอทานอลจะมีค่าเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของเอทานอลจะมีค่าลดลง สามารถทำนายความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมเอทานอล-น้ำได้จากดัชนีหักเหแสงดังนี้ เมื่อนำของผสมวัดค่าดัชนีหักเหแสงลากเส้นแนวระนาบมาสัมผัสเส้นความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหแสงกับความหนาแน่นจากจุดดังกล่าวจะสามารถทำนายความหนาแน่นของเอทานอลและน้ำได้จากนั้นลากไปยังแนวตั้งชนเส้นความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเข้มข้นลากเส้นแนวระดับไปทางด้านขวาของกราฟอ่านค่าได้ความเข้มข้น

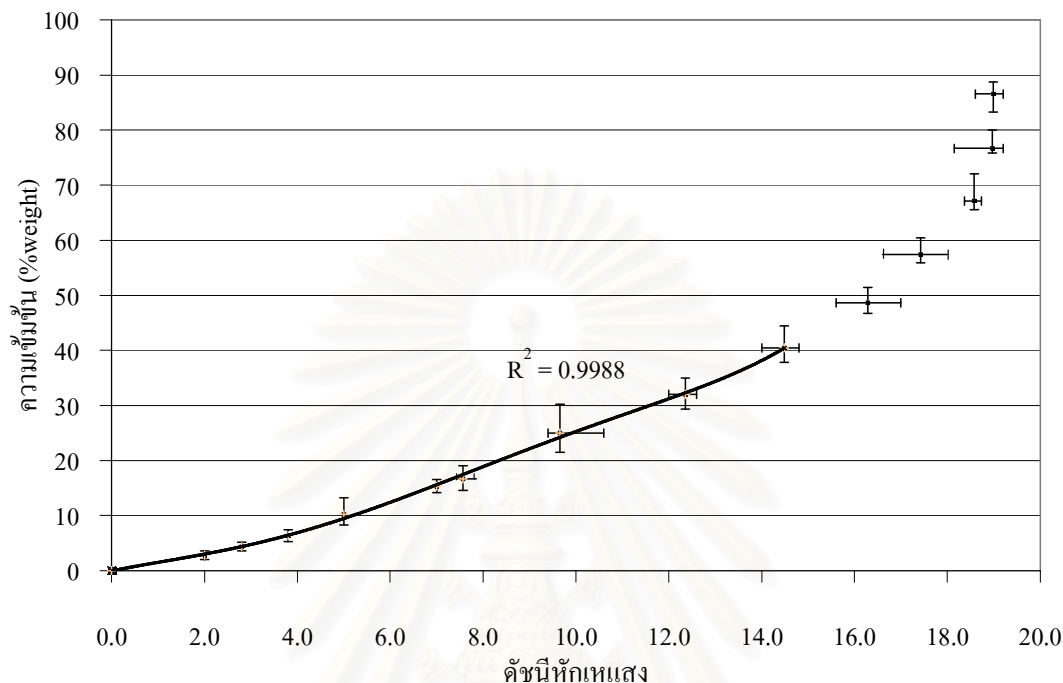
เอทานอล-น้ำที่ค่าดัชนีหักเหแสงนั้น ซึ่งรูปที่กราฟรูปที่ 4.6 ใช้ได้ที่อุณหภูมิ 26 ถึง 30 องศาเซลเซียส เท่านั้น



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหแสง ความหนาแน่น และความเข้มข้นของผสมเอทานอล-น้ำ ที่อุณหภูมิ 26, 28, 30 องศาเซลเซียส

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหแสงกับความเข้มข้นดังรูปที่ 4.7 โดยการเฉลี่ยค่าความเข้มข้นและค่าดัชนีหักเหแสงแต่ละอุณหภูมิที่สัดส่วน โดยปริมาตรระหว่างของผสมเอทานอล-น้ำเดียวกัน และประเมินข้อมูลเชิงสถิติดังตารางที่ ก. 4 และตารางที่ พบว่า ค่าความแปรปรวนของข้อมูล ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำเพิ่มขึ้น ค่าความแปรปรวน และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานคือค่าทางสถิติที่บ่งถึงความแม่นยำและความเที่ยงตรงของข้อมูลที่วัดได้แสดงว่าที่ความเข้มข้นเอทานอลมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปความแม่นยำและความเที่ยงตรงของข้อมูลที่วัดได้ต่ำลง การวิเคราะห์กลุ่มของข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่มีกลุ่มของประชากรใกล้เคียงกันเพื่อเปรียบเทียบว่ากลุ่มของข้อมูลนั้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่โดยการประเมิน P-Value โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Microsoft Excel) ประเมินผลทางสถิติ (T-test) ดังตารางที่ ก.5 พบว่า ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและค่าดัชนีหักเหแสงตั้งแต่ 14.6 ขึ้นไป P-Value มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่ากลุ่มของข้อมูลนั้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ความเข้มข้นและค่าดัชนีหักเหแสงต่ำกว่าค่าที่กล่าวไปข้างต้น P-Value มีค่าต่ำกว่า 0.05 แสดงว่ากลุ่มของข้อมูลที่มีประชากรสองกลุ่มที่ใกล้เคียงกันนั้น มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญนี้หมายความว่า

สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของสองกลุ่มข้อมูลนี้ได้ จึงสรุปได้ว่า สามารถทำการทดลองหา ค่าดัชนีหักเหแสงทำนายความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำดังรูปที่ 4.7 ได้แม่นยำ และเที่ยงตรง เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปอยู่ในช่วง 26 ถึง 30 องศาเซลเซียสและที่ดัชนีหักเหแสงต่ำกว่า 14.5



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์และการกระจายตัวของข้อมูลที่ได้จากการทดลองระหว่าง ดัชนีหักเหแสงกับความเข้มข้นที่อุณหภูมิ 26, 28, 30 องศาเซลเซียส

จากกราฟรูปที่ 4.7 สามารถแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างดัชนีหักเหแสงกับความเข้มข้นที่ดัชนีหักเหแสงต่ำกว่า 14.5 ได้ดังสมการต่อไปนี้ :

$$C = -0.024 + 1.093n^{1.5} - 0.0959n^2 \quad (4.2)$$

โดย C คือ ค่าความเข้มข้น (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
n คือ ค่าดัชนีหักเหแสง

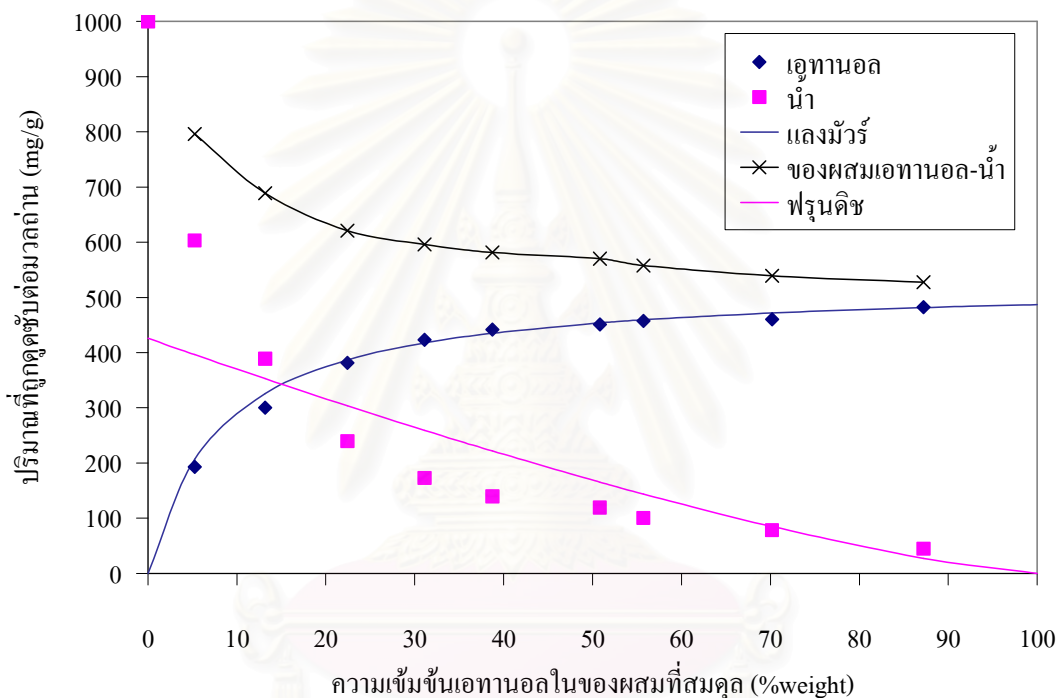
กรณีต้องการวัดปริมาณความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำสูงกว่า 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักใช้วิธีเจือจาง โดยนำกลั่นเพื่อให้ค่าดัชนีหักเหแสงต่ำกว่า 14 เพื่อใช้กราฟรูปที่ 4.7 ส่วนที่เป็นเส้นเต็ม ทำนายปริมาณความเข้มข้นหลังเจือจาง โดยการวัด น้ำหนักของผสมทั้งก่อนและหลังเจือจาง จากนั้นคำนวณย้อนกลับ ไปเป็นความเข้มข้นก่อนเจือจางดังตารางที่ 7 และ 8 พบว่า ค่าความเข้มข้นที่คำนวณได้จากวิธีเจือจางนี้มีค่าใกล้เคียง

กับวิธีวัดความหนาแน่น โดยวิธีใช้ขวดวัดความแน่นดังตารางที่ 2 กับตารางที่ 4 ที่อุณหภูมิเดียวกันตามลำดับ

4.2 การทดลองหาสมมูลการดูดซับ

4.2.1 สมมูลการดูดซับของถ่านก่อนการดูดซับแห้ง

4.2.1.1 คำนวณปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับโดยวิธีวัดน้ำหนักของของผสมทั้งก่อนและหลังสมดุลแล้วคำนวณปริมาณสารที่ถูกดูดซับจากสมมูลมวลสารของระบบที่อุณหภูมิ 28 °c



รูปที่ 4.8 แสดงสมมูลการดูดซับของของผสมเอทานอล-น้ำใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับโดยวิธีการวัดปริมาณตัวถูกดูดซับโดยตรง

จากรูปที่ 4.8 แสดงปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับและปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับพบว่าที่ความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมเพิ่มขึ้นเอทานอลที่ถูกดูดซับในถ่านกัมมันต์จะสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นก่อนดูดซับของของผสมเอทานอล-น้ำเพิ่มขึ้นไปอีกปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับในถ่านกัมมันต์จะเริ่มคงที่ เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมเพิ่มขึ้นปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับเข้าไปในถ่านจะลดลง

สมมูลการดูดซับเอทานอลด้วยถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส สมการที่ (ข.5) เปรียบเทียบตัวแปรกับสมการที่ (ข.2) ได้ค่าสมมูลการดูดซับของแลงมัวร์ (K_L) เท่ากับ 0.1234 และ ปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับสูงสุดต่อ

มวลถ่านกัมมันต์ (q_m) เท่ากับ 526.31 มิลลิกรัมเอทานอลต่อกรัมถ่านกัมมันต์ เขียนสมการแบบจำลองสมดุลการดูดซับแลงมัวร์ได้ดังสมการที่ 4.3

$$q = \frac{64.94C_2}{1 + 0.1234C_2} \quad (4.3)$$

สมดุลการดูดซับน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส สมการที่ (ข.6) เปรียบเทียบตัวแปรกับสมการที่ (ข.4) ได้ค่าสมดุลการดูดซับของฟรุนดิช (K_F) เท่ากับ 0.9147 และ ปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับสูงสุดต่อมวลถ่านกัมมันต์ (q_m) เท่ากับ 526.31 และค่า n เท่ากับ 0.7496 มิลลิกรัมเอทานอลต่อกรัมถ่านกัมมันต์ เขียนสมการแบบจำลองสมดุลการดูดซับฟรุนดิชได้ดังสมการที่ 4.3

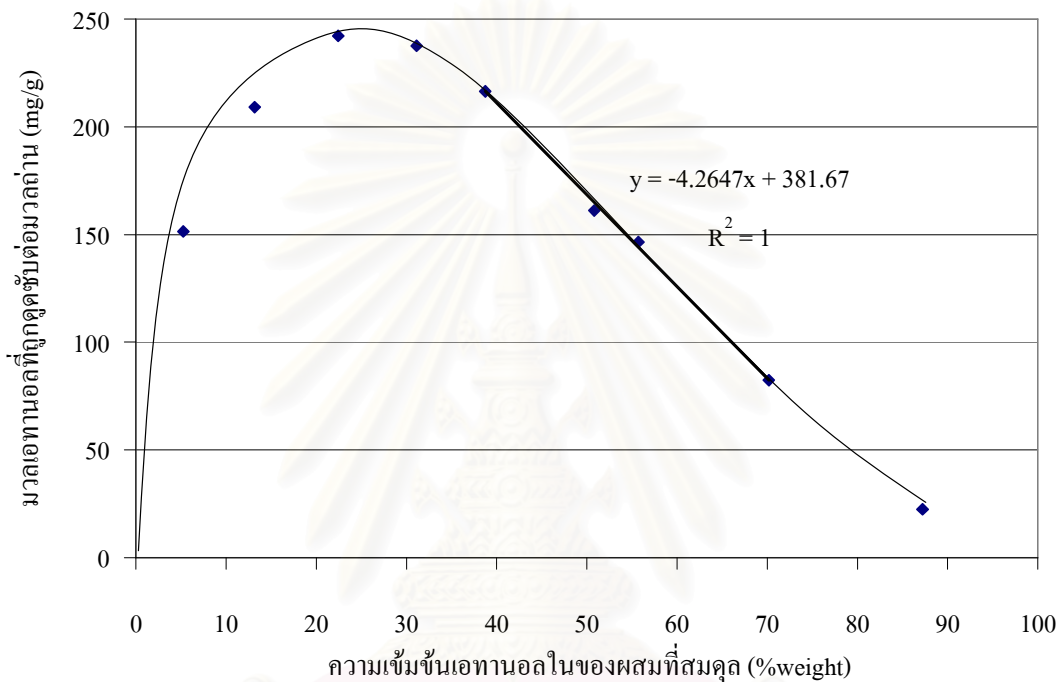
$$q = 0.9147C_2^{1/0.7496} \quad (4.4)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.1.2 จำนวนปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับโดยวิธีของออสวอด

สมการของออสวอด (Ostwald-de Izaguirre) ได้มาจากสมการมวลสารของระบบดังนี้

เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับต่อมวลถ่านที่สมดุล (q_{os}) กับ ความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมหลังดูดซับที่สมดุล (C_2) ได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.9 แสดงสมการการดูดซับของของผสมเอทานอล-น้ำใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับโดยวิธีการวัดปริมาณตัวถูกดูดซับของออสวอด

จากรูปที่ 4.9 ลักษณะกราฟสมดุลที่ได้เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมเอทานอล-น้ำก่อนการดูดซับเพิ่มขึ้น พบว่าความแตกต่างของความเข้มข้นของเอทานอลก่อนการดูดซับและเอทานอลหลังการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นช่วงแรกหลังจากนั้นมีค่าลดลง พบว่าตรงกับแบบจำลองของลักษณะสมดุลการดูดซับกับชนิดที่ 3 ของการแบ่งประเภทสมดุลการดูดซับของผสมในสถานะของเหลวของ เซย์ และ แนช มีส่วนที่เป็นเชิงเส้นกว้างเมื่อเทียบกับส่วนโค้ง สำหรับส่วนที่เป็นเชิงเส้นจากรูปที่ 4.12 เขียนได้ดังนี้

$$q_{os} = 381.67 - 4.2647C_2 \quad (4.4)$$

รวมสมการ (4.11) กับ (4.12) ได้ดังนี้

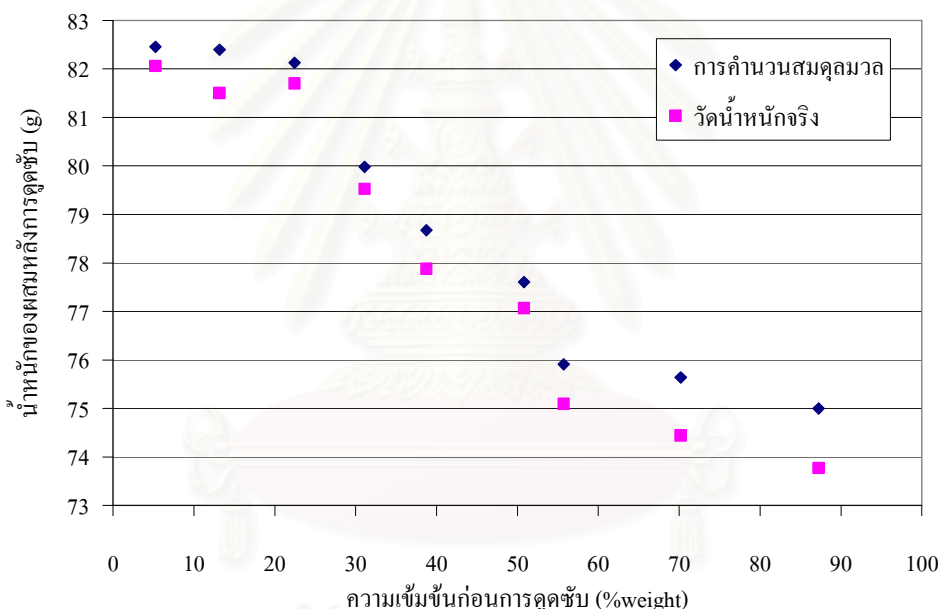
$$381.67 - 4.2647C_2 = M_1^s - M^s C_2 = M_1^s - (M_1^s + M_2^s)C_2 \quad (4.5)$$

จากสมการที่ 4.5 กรณี C_2 เท่ากับศูนย์ ปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับเฉลี่ยตลอดช่วงความเข้มข้นทั้งหมด M_1^s เท่ากับ 381.67 มิลลิกรัมเอทานอลที่ถูกดูดซับต่อกรัมถ่าน และสามารถหาปริมาณสารชนิดที่ 2 ที่ถูกดูดซับได้จาก กรณี C_2 เท่ากับหนึ่งร้อย ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับเฉลี่ยตลอดช่วงความเข้มข้นทั้งหมด M_2^s เท่ากับ 377.41 67 มิลลิกรัมเอทานอลที่ถูกดูดซับต่อกรัมถ่าน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลที่ถูกดูดซับซึ่งคำนวณได้จากผลการทดลองรูปที่ 4.9 ที่วัดได้จากการทดลองสมดุลมวลสารของเอทานอลทั้งก่อนและหลังดูดซับ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันสังเกตจากค่ามวลของเอทานอลและน้ำที่ถูกดูดซับเฉลี่ยตลอดทุกความเข้มข้นที่เปลี่ยนไป ดังนั้นลักษณะกราฟรูปที่ 4.9 ที่มีค่าเพิ่มขึ้นช่วงแรกหลังจากนั้นมีค่าลดลงนั้นไม่ได้หมายความว่าปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นสูงๆ แต่หมายความว่าความแตกต่างของความเข้มข้นก่อนและหลังดูดซับมีค่าใกล้เคียงกันเรื่อยๆ เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้นและ ลักษณะดังกล่าวอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงจากตัวถูกละลายเป็นตัวทำละลายในสารละลายเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้น

4.2.2 สมดุลมวลสารในการทำการทดลองสมดุลการดูดซับกรณีถ่านก่อนการดูดซับแห้ง
 จำนวนสมดุลมวลสารในการทำการทดลองสมดุลการดูดซับเพื่อตรวจสอบความ
 ถูกต้องของผลการทดลองตรวจสอบน้ำหนักของของผสมเอทานอล-น้ำที่เหลือในวัฐภาค
 ของเหลวหลังการดูดซับที่สมดุล จากการเปรียบเทียบผลจากการวัดน้ำหนักจริงและจากการ
 จำนวนสมดุลมวลสารซึ่งคำนวณ ได้ดังนี้

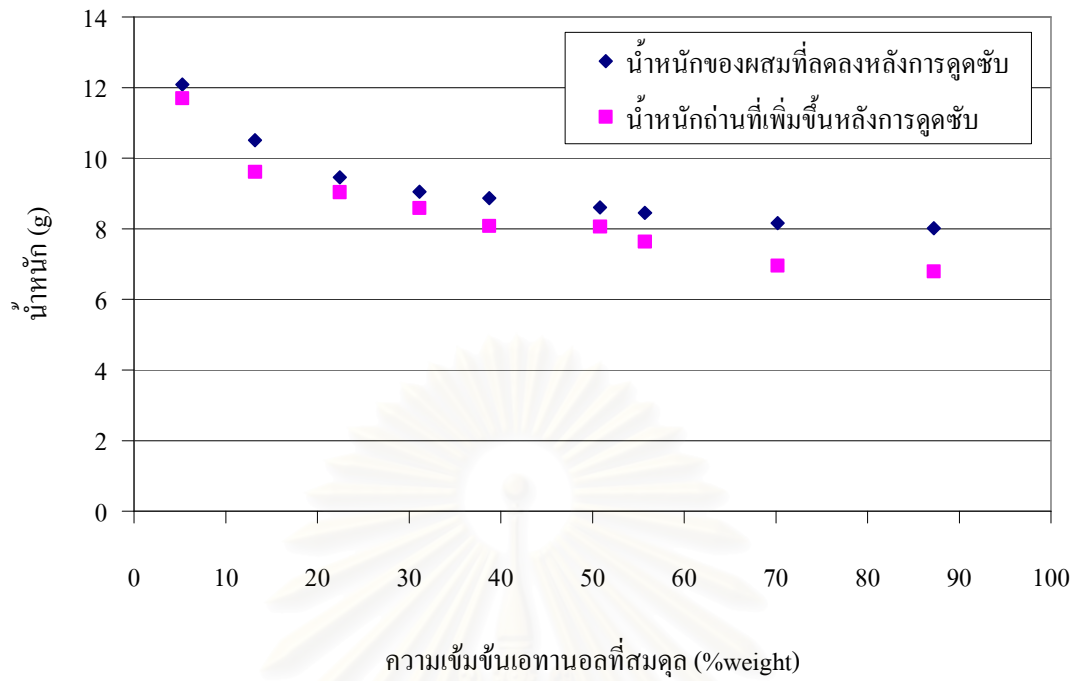
น้ำหนักของผสมก่อนการดูดซับลบน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้นหลังการดูดซับ
 เท่ากับน้ำหนักของผสมหลังการดูดซับ

จากการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนแสดงจากตารางที่ ค.12 ในภาคผนวก ค
 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างการวัดน้ำหนักจริงกับการคำนวณสมดุลมวลสาร
 แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่ามีความแตกต่างกันไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นผลการทดลองสมดุล
 การดูดซับจึงมีความน่าเชื่อถือ



รูปที่ 4.10 แสดงน้ำหนักของของผสมเอทานอล-น้ำหลังการดูดซับเปรียบเทียบระหว่างการวัด
 น้ำหนักจริงกับการคำนวณสมดุลมวล

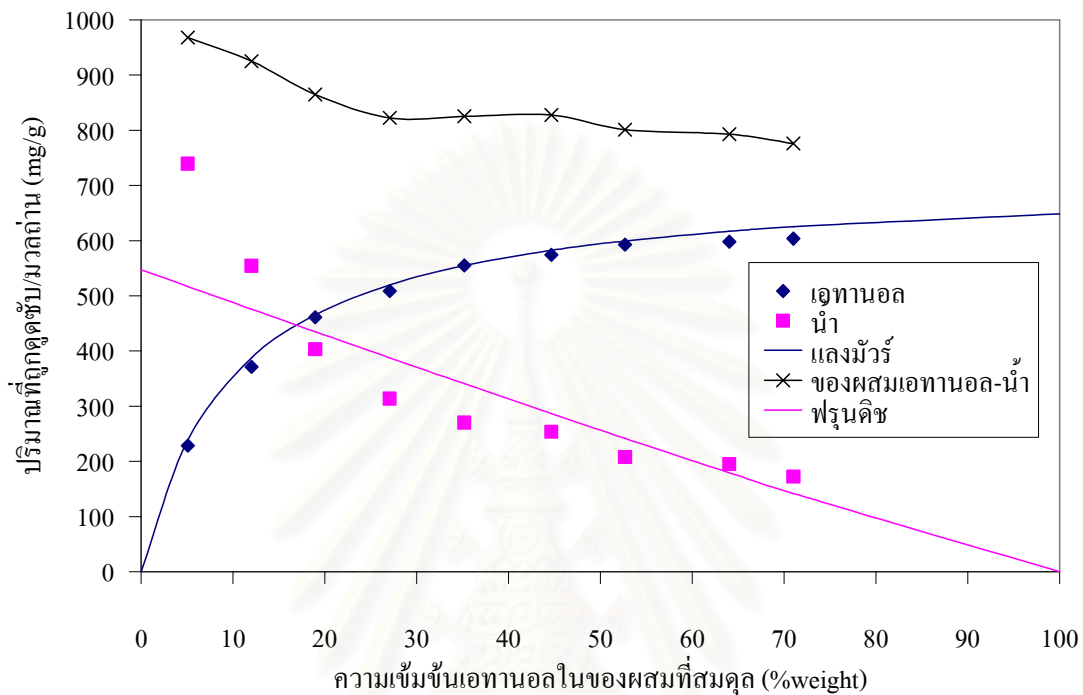
รูปที่ 4.11 แสดงความคลาดเคลื่อนจากการทดลองกรณีที่ไม่มีการสูญเสียน้ำหนัก
 ถ่านที่เพิ่มขึ้นกับน้ำหนักของผสมที่ลดลงหลังการดูดซับควรจะเท่ากัน แต่จากการทดลองจริง
 ได้ไม่เท่ากันเนื่องมาจากการสูญเสียเนื่องจากการระเหย จากกระบวนการทดลองและจากการ
 วัดน้ำหนักจากเครื่องมือวัดแต่ผลของความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5 % ดังนั้นจึงยอมรับผลการ
 ทดลองดังกล่าวได้



รูปที่ 4.11 แสดงน้ำหนักของของผสมเอทานอล-น้ำหลังการดูดซับเปรียบเทียบระหว่างการวัดน้ำหนักจริงกับการคำนวณสมมูลมวล

4.2.3 สมดุลการดูดซับของถ่านก่อนการดูดซับเป็ยกน้ำ

4.2.3.1 วัดปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับโดยวิธีวัดน้ำหนักของของผสมทั้งก่อนและหลังสมดุลแล้วคำนวณปริมาณสารที่ถูกดูดซับจากสมดุลมวลสารของระบบที่อุณหภูมิ 28 °c



รูปที่ 4.12 แสดงสมดุลการดูดซับของของผสมเอทานอล-น้ำใช้ถ่านกัมมันต์ก่อนดูดซับเป็ยกน้ำ

จากรูปที่ 4.12 แสดงปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับและปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับพบว่าที่ความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมเพิ่มขึ้นเอทานอลที่ถูกดูดซับในถ่านกัมมันต์จะสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นก่อนดูดซับของของผสมเอทานอล-น้ำเพิ่มขึ้นไปอีกปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับในถ่านกัมมันต์จะเริ่มคงที่ เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมเพิ่มขึ้นปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับเข้าไปในถ่านจะลดลง

สมการที่ ข.7 เปรียบเทียบตัวแปลกับสมการที่ ข.2 ได้ค่าสมดุลการดูดซับของแลงมัวร์ (K_L) เท่ากับ 0.0986 และ ปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับสูงสุดต่อมวลถ่านกัมมันต์ (q_m) เท่ากับ 714.28 มิลลิกรัมเอทานอลต่อกรัมถ่านกัมมันต์ เขียนสมการแบบจำลองสมดุลการดูดซับแลงมัวร์ได้ดังสมการที่ 4.6

$$q = \frac{70.43C_2}{1 + 0.0986C_2} \quad (4.6)$$

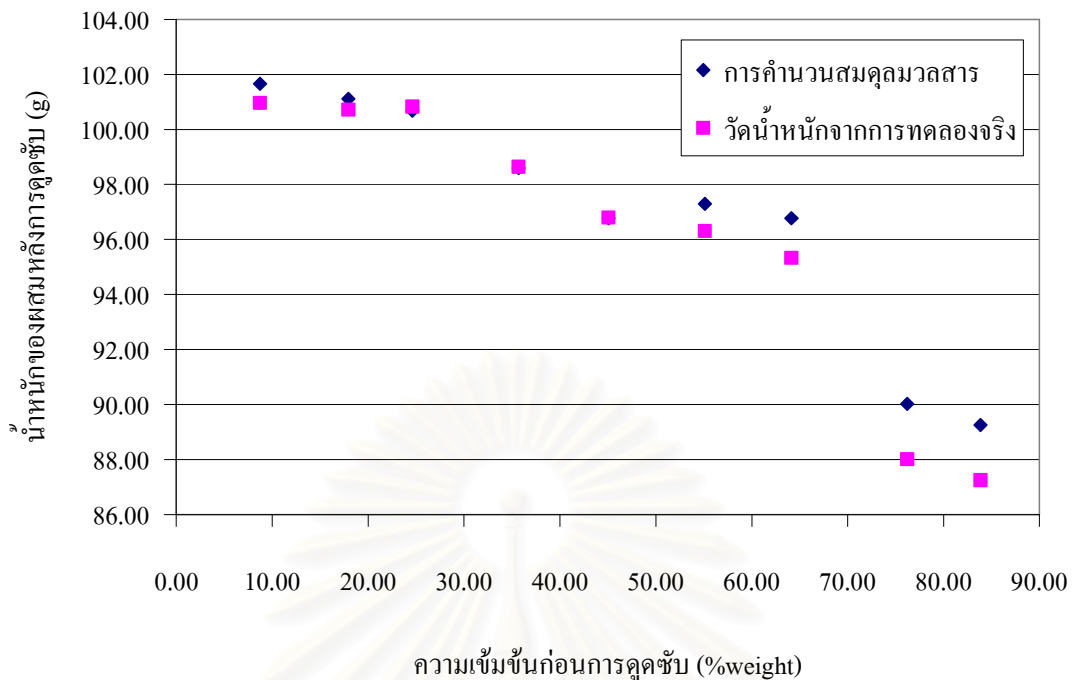
สมการการดูดซับน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส สมการที่ (ข.8) เปรียบเทียบตัวแปรกับสมการที่ (ข.4) ได้ค่าสมการการดูดซับของฟรูนดิช (K_F) เท่ากับ 3.5842 และ ค่า n เท่ากับ 0.2789 มีลิกกรัมเอทานอลต่อกรัมถ่านกัมมันต์ เขียนสมการแบบจำลองสมการการดูดซับฟรูนดิชได้ดังสมการที่ 4.3

$$q = 3.5842C_2^{1/0.2789} \quad (4.7)$$

4.2.4 สมดุลมวลสารในการทำการทดลองสมดุลการดูดซับกรณีถ่านก่อนการดูดซับเปียกน้ำ

สมดุลมวลสารของระบบเพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของผลการทดลองจากการทดลองดูดซับน้ำในถ่านจนสมดุลก่อนนำไปดูดซับของผสมเอทานอล-น้ำ โดยการสมดุลมวลน้ำซึ่งน้ำหนักน้ำที่หายไปจากการดูดซับน้ำด้วยถ่านกัมมันต์จะต้องเท่ากับน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้นหลังการดูดซับถ้าไม่มีความผิดพลาดจากการทดลองและจากเครื่องมือวัดเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดแสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าความผิดพลาดไม่เกิน 5 % แสดงว่าผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ โดยการทดลองครั้งที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 คือการทดลองที่ดูดซับของผสมเอทานอล-น้ำที่ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับจากการทดลองนำถ่านเปียกน้ำดูดซับของผสมเอทานอล-น้ำ จำนวนสมดุลมวลเอทานอลและน้ำที่เหลือในวัฏภาคของเหลวซึ่งคำนวณ ได้ดังนี้

น้ำหนักของผสมก่อนการดูดซับกับน้ำหนักน้ำในถ่านกัมมันต์เริ่มต้นลบน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้นหลังการดูดซับเท่ากับน้ำหนักของผสมหลังการดูดซับที่สมดุล เปรียบเทียบกับผลจากการวัดน้ำหนักจริงจากการทดลองถ้าไม่มีความผิดพลาดจากการทดลองและจากเครื่องมือวัด เปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดแสดงดังตารางที่ ในภาคผนวก พบว่าความผิดพลาดไม่เกิน 5 % แสดงว่าผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ



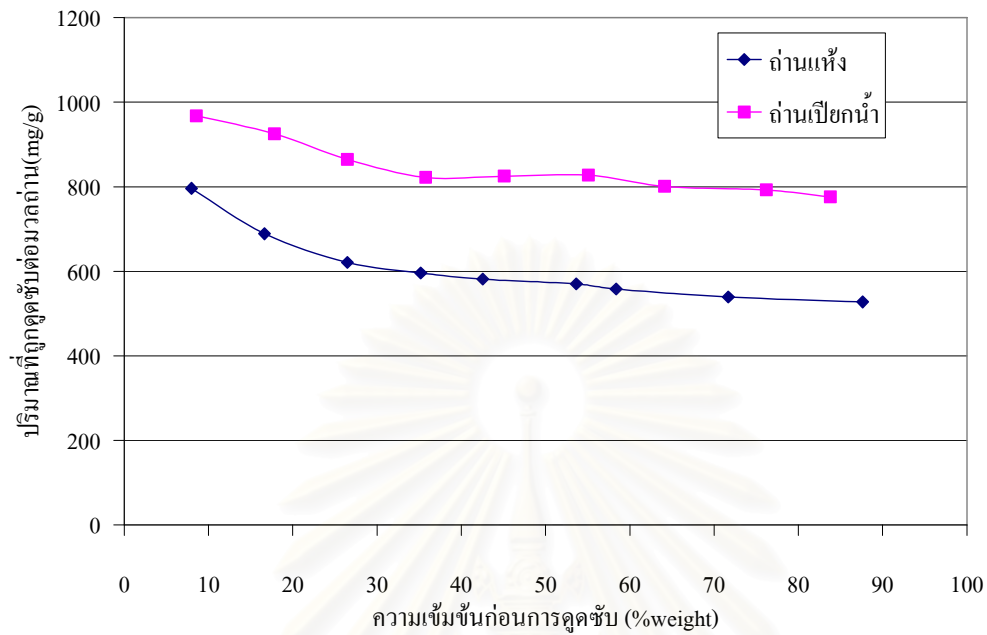
รูปที่ 4.13 แสดงน้ำหนักของของผสมเอทานอล-น้ำหลังการดูดซับเปรียบเทียบระหว่างการวัดน้ำหนักจริงกับการคำนวณสมมูลมวล

4.2.5 เปรียบเทียบการดูดซับเอทานอลและน้ำที่ถูกดูดซับในถ่านกัมมันต์แห้งกับถ่านกัมมันต์เปียก

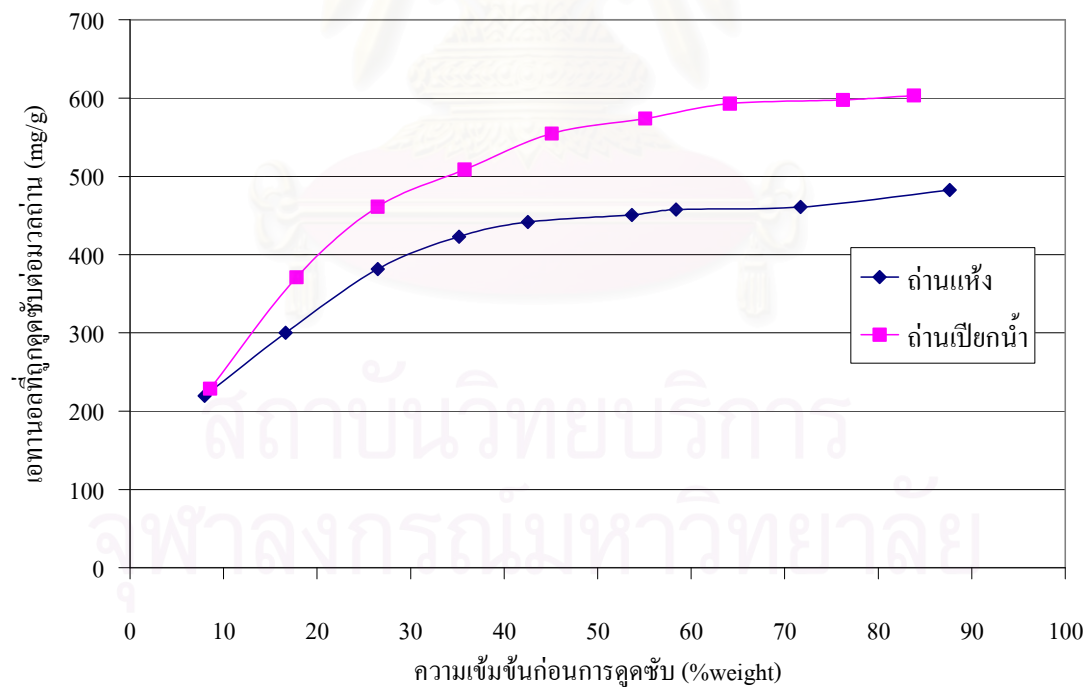
เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับของผสมเอทานอล-น้ำระหว่างถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับแห้งกับถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับเปียกน้ำ จากรูปที่ 4.14, 4.15, 4.16 พบว่า ถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับเปียกน้ำดูดซับเอทานอลและน้ำได้มากกว่าถ่านกัมมันต์แห้ง เหตุที่เป็นเช่นนี้แสดงให้เห็นได้จากสมการที่ 2.1 อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของของเหลวที่ถูกดูดเข้าหลอดกะปิลารีด้วยแรงตึงผิว พบว่าความสูงของของเหลวที่ถูกดูดเข้าหลอดกะปิลารีแปรผันโดยตรงกับแรงตึงผิวของของเหลว คือเมื่อแรงตึงผิวมากขึ้นความสูงของของเหลวที่ถูกดูดเข้าไปในหลอดกะปิลารีด้วยแรงตึงผิวของของเหลวนั้นเองจะมีค่ามากขึ้นด้วย จากการทดลองวัดค่าแรงตึงผิวที่ถูกดูดเข้าหลอดกะปิลารีและจาก

คำนวณแรงตึงผิวแต่ละความเข้มข้นพล็อตกราฟดังรูปที่ 4.17 เพื่อเปรียบเทียบค่าแรงตึงผิวของของผสมเอทานอลน้ำเมื่อความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงไปเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณและจากการทดลอง พบว่ามีแนวโน้มและค่าที่ได้ไปในทางเดียวกันคือน้ำมีแรงตึงผิวมากกว่าเอทานอลและเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมเพิ่มขึ้นมีผลทำให้แรงตึงผิวของของผสมนั้นมีค่าลดลง เป็นผลให้น้ำดูดเข้าไปในรูพรุนถ่านกัมมันต์มากกว่าของผสมเอทานอล-น้ำ น้ำซึ่งถูกดูดซับเข้าไปในถ่านก่อนนำถ่านนั้นไปดูดซับของผสมเอทานอล-น้ำ ทำ

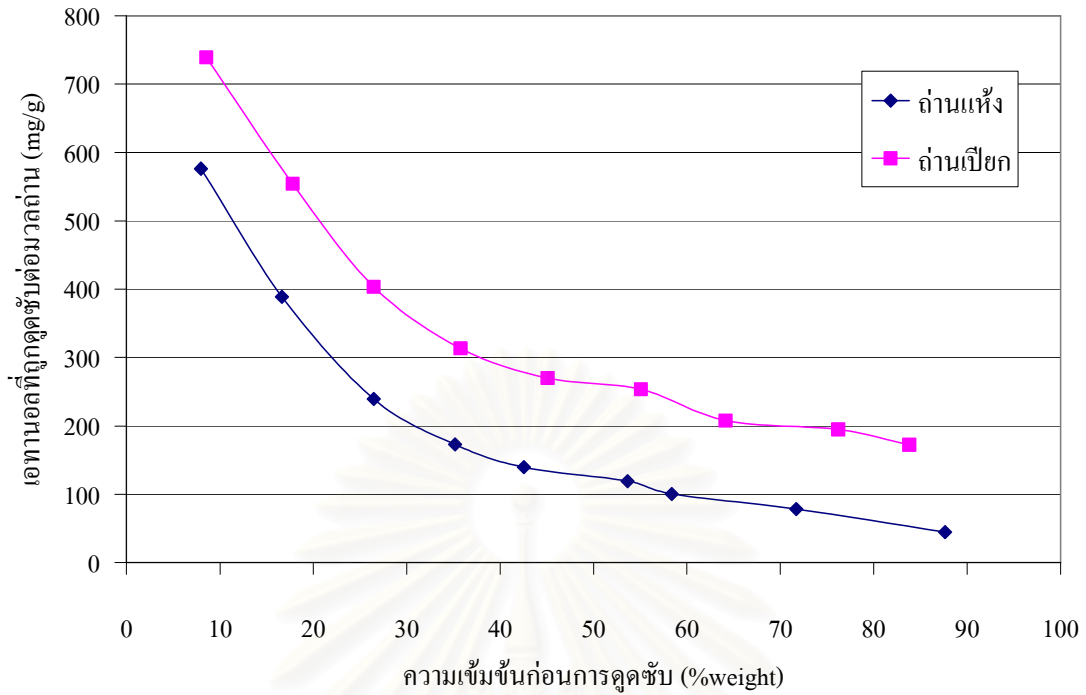
ให้เกิดเป็นพื้นที่ที่เอทานอลสามารถแพร่เข้าไปจนเกิดสมดุลได้มากกว่าถ่านกัมมันต์แห้ง
สังเกตจากรูปที่ 4.18



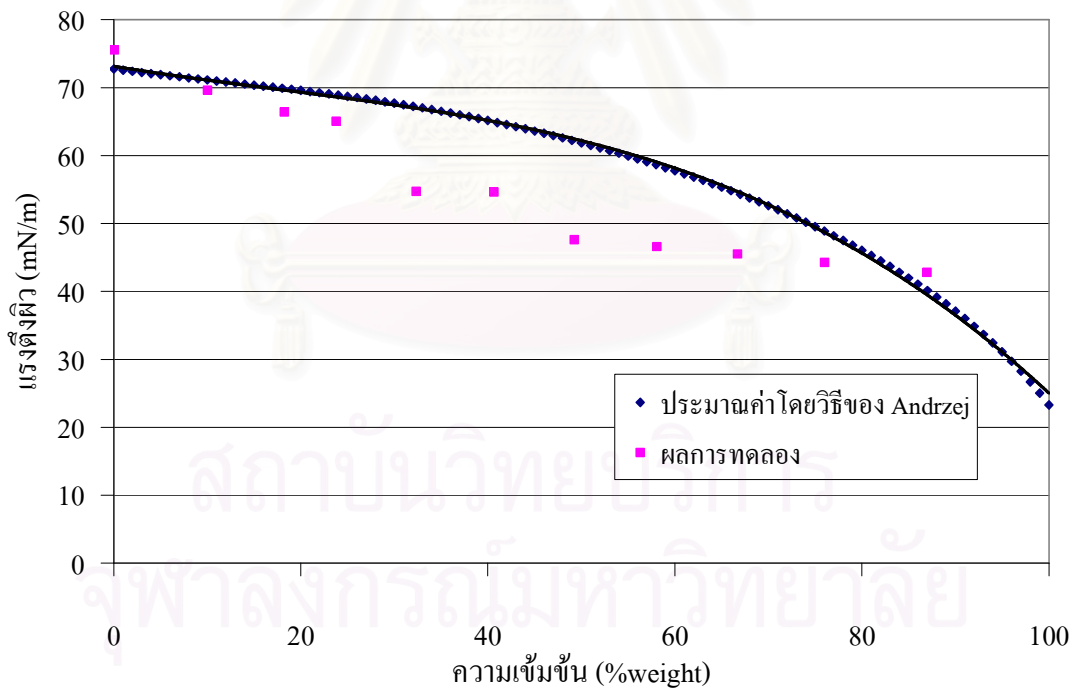
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับของถ่านกัมมันต์แห้งกับถ่านกัมมันต์เปียกน้ำ



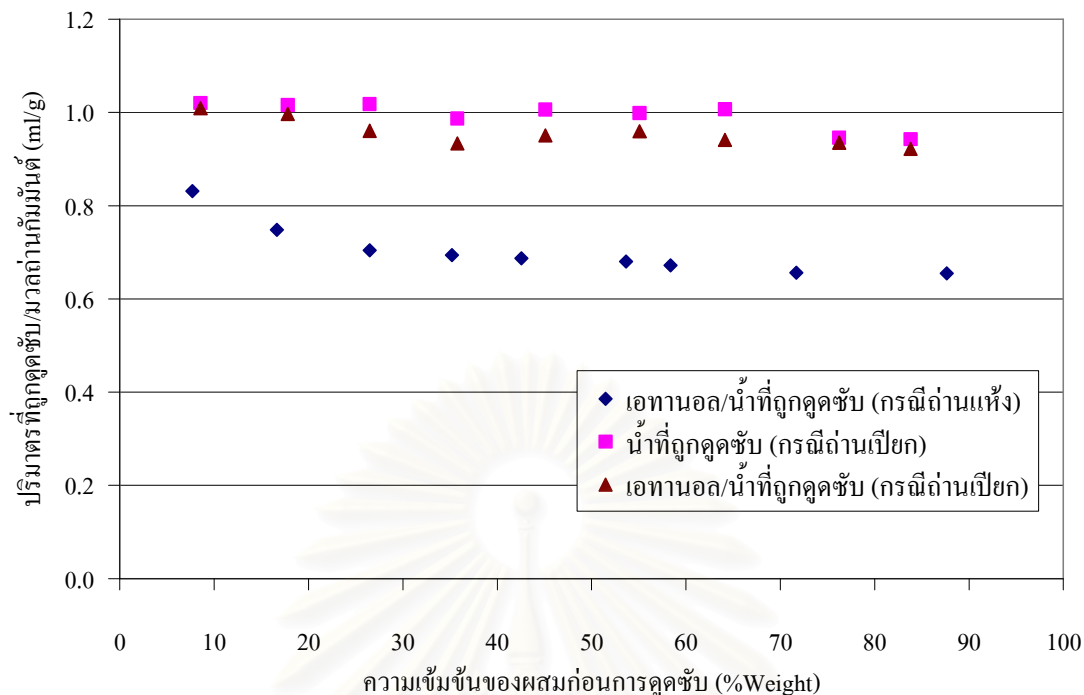
รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับเอทานอลของถ่านกัมมันต์แห้งกับถ่านกัมมันต์เปียกน้ำ



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับน้ำของถ่านกัมมันต์แห้งกับถ่านกัมมันต์เปียกน้ำ



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงผิวกับความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับน้ำของถ่านกัมมันต์แห้งกับถ่านกัมมันต์เปียกน้ำ

เปรียบเทียบค่าคงที่สมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 28 °c ระหว่างถ่านแห้งกับถ่านเปียก แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าประมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับสูงสุดต่อมวลถ่านกรณีถ่านก่อนดูดซับเปียกน้ำมีค่ามากกว่าถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับแห้ง แสดงว่าถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับเปียกน้ำดูดซับเอทานอลสูงกว่าถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับแห้ง และค่าคงที่สมดุลการดูดซับของแลงมัวร์กรณีถ่านก่อนการดูดซับเปียกน้ำมีค่าน้อยกว่าถ่านก่อนการดูดซับแห้ง

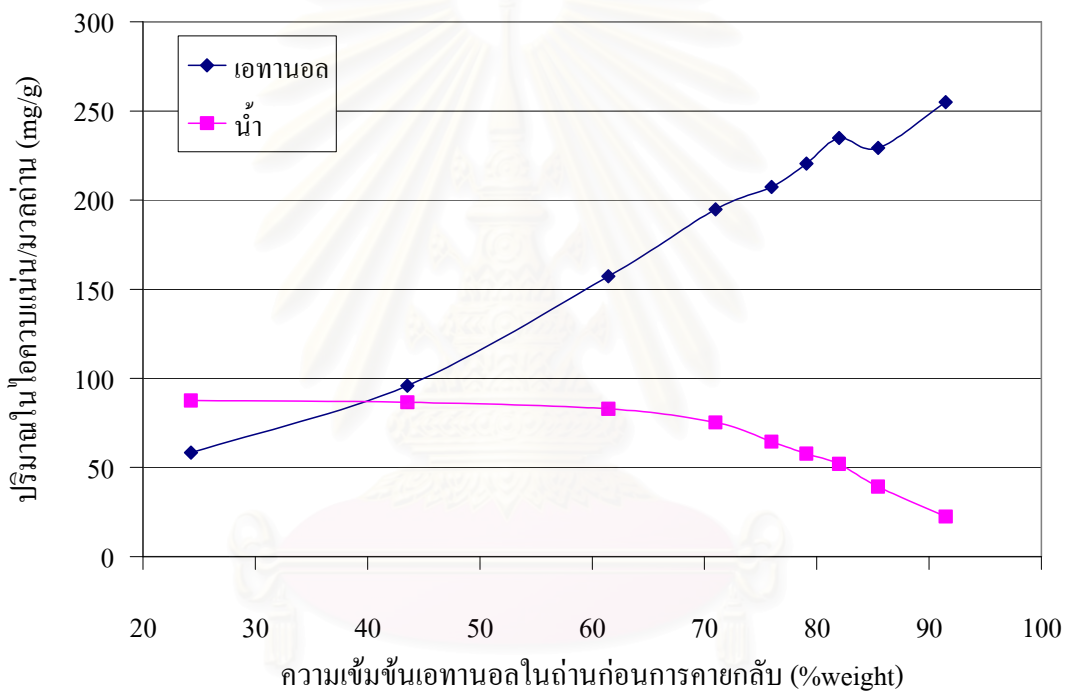
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าคงที่สมดุลการดูดซับแลงมัวร์ที่อุณหภูมิ 28 °c

	อุณหภูมิ 28 °c	
	K_L	q_m
ถ่านแห้ง	0.1234	526.31
ถ่านเปียก	0.0986	714.28

4.3 การทดสอบหาสมดุลการคายกลับ

4.3.1 สมดุลการคายกลับของถ่านก่อนการดูดซับแห้ง

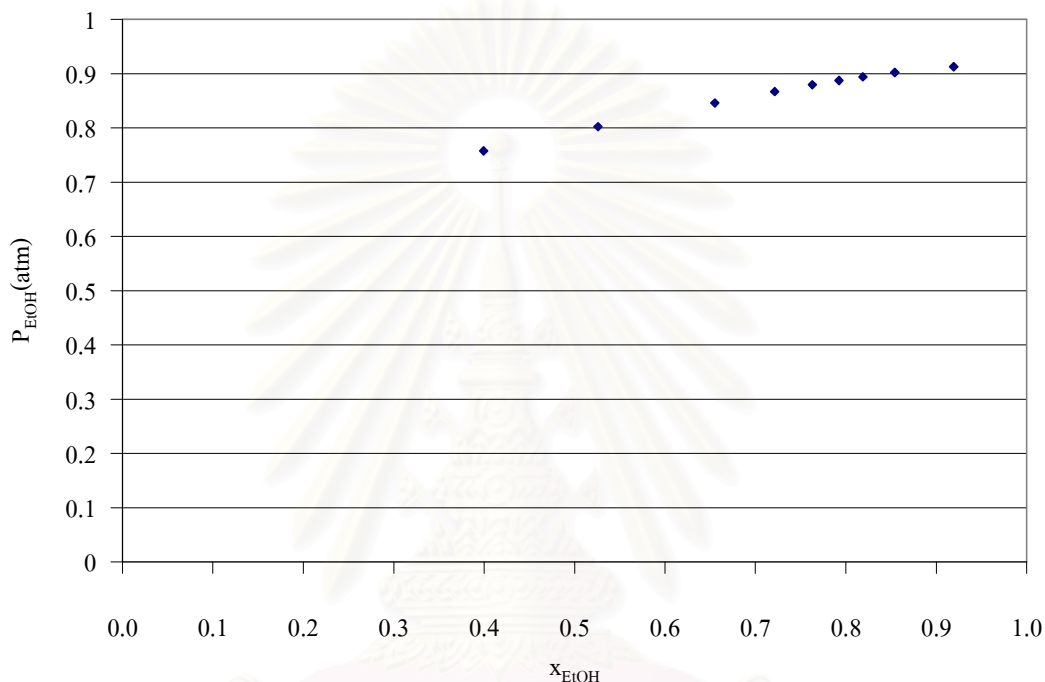
หลังจากนำถ่านกัมมันต์ดูดซับเอทานอลและน้ำที่สมดุลนำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95°C จนกลายเป็นไอ เมื่อไอนั้นเคลื่อนที่ผ่านท่อนำก๊าซที่อุณหภูมิห้องไอนั้นจะถูกลดความร้อนลงจนควบแน่นกลับเป็นของเหลว ให้ความเวลาในการคายกลับนานที่สุดจนไม่มีไอควบแน่น คายกลับออกมาจากท่อนำก๊าซแล้วจึงนับวัดความเข้มข้นของเอทานอลในไอควบแน่น สามารถคำนวณมวลเอทานอลและน้ำที่คายกลับมาจากถ่านกัมมันต์ได้ดังรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในถ่านกัมมันต์ก่อนการคายกลับมากขึ้นปริมาณการคายกลับของเอทานอลจะมากขึ้นแต่ปริมาณน้ำที่คายกลับลดลง



รูปที่ 4.19 แสดงปริมาณเอทานอลและปริมาณน้ำที่คายกลับออกจากถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นของเอทานอลก่อนการดูดซับเปลี่ยนแปลงไป

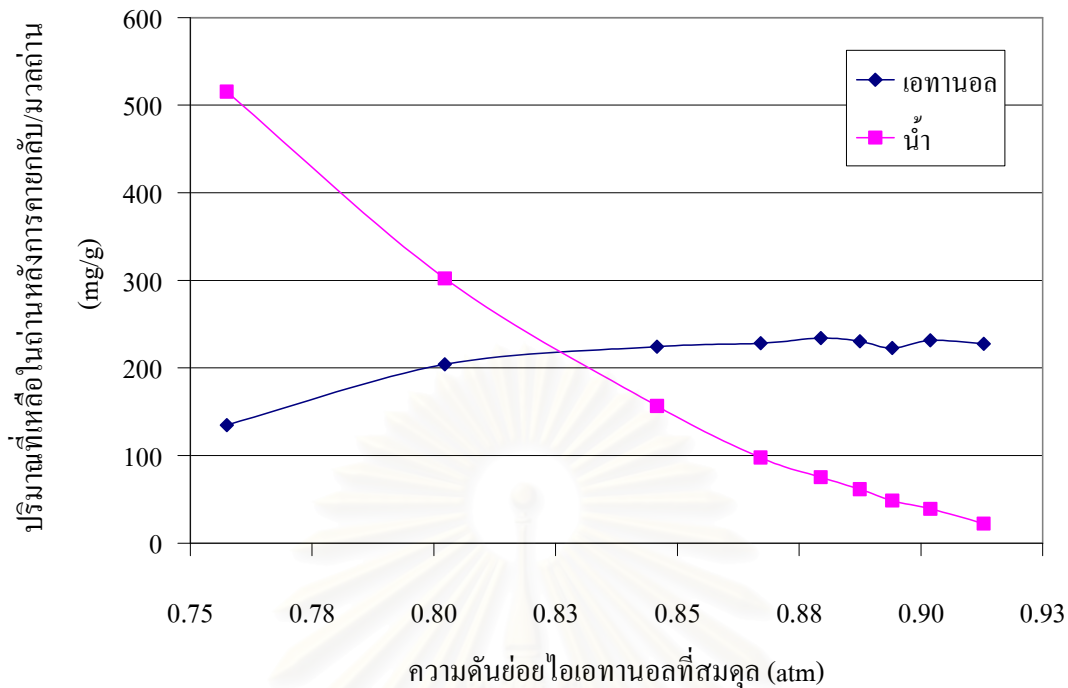
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อเอทานอลและน้ำที่ถูกดูดซับที่ถ่านกัมมันต์ถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95°C จะกลายเป็นไอซึ่งปริมาณเอทานอลและน้ำที่เหลืออยู่ในถ่านที่สมดุลกับไอที่อยู่เหนือผิวถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมินั้นจะคือสมดุลการดูดซับของเอทานอลในถ่านกัมมันต์ซึ่งคือสภาวะการดูดซับเอทานอลและน้ำในสภาวะก๊าซด้วยถ่านกัมมันต์ ความดันย่อยไอเอทานอลที่สมดุลที่ผิวถ่านกัมมันต์ได้แสดงดังรูปที่ 4.20 สมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิ 95°C แสดงดังรูปที่ 4.21 ซึ่งปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับคำนวณจากสมดุลมวลสารระบบ แสดงดังภาคผนวก



รูปที่ 4.20 สัดส่วนของเอทานอลในไอความดันเปลี่ยนไปมีผลให้ความดันย่อยของเอทานอลในระบบเปลี่ยนไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.21 แสดงปริมาณเอทานอลและปริมาณน้ำที่เหลือในถังกัมมันต์หลังการคายกลับ ที่ความดันย่อยไอเอทานอลเหนือถ่านเปลี่ยนไป

เมื่อพิจารณาจากภาคผนวกที่ ข.5 ไม่สามารถบอกได้ว่าตรงกับแบบจำลองสมดุลการดูดซับแบบแลงมัวร์และแบบฟรุนดลิช

จากการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณและจากการวัดน้ำหนักของไอเอทานอล-น้ำที่ควบแน่นกับน้ำหนักถ่านที่ลดลงหลังการคายกลับแสดงดังตารางที่ ค.11 ในภาคผนวก ค พบว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่า 5 % แสดงว่าผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือน้อย จึงไม่สามารถบอกถึงแบบจำลองสมดุลการดูดซับว่าตรงกับแบบใดได้ เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการสูญเสียมวล ไอเอทานอลและน้ำระหว่างการทำการทดลอง กรณีต้องการความแม่นยำผลการทดลองต้องออกแบบชุดทดลองการคายกลับให้เป็นระบบปิดมากขึ้น และออกแบบขั้นตอนการทดลองให้มีการสูญเสียเอทานอลและน้ำน้อยลงระหว่างขั้นตอนการคายกลับ

เมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับเอทานอลและน้ำแล้วมาเพิ่มอุณหภูมิที่ความดันบรรยากาศเพื่อให้ได้ไอของของผสมเอทานอล-น้ำแล้วควบแน่นเอทานอลกลับมาจากไอควบแน่นนั้นโดยให้เวลานานที่สุดเพื่อให้เกิดสมดุลกันระหว่างวัฏภาคไอที่คายกลับออกมาจากถ่านกัมมันต์กับวัฏภาคที่ถูกดูดซับ ทราบปริมาณเอทานอลและน้ำในถ่านกัมมันต์เริ่มต้นกับปริมาณเอทานอลและน้ำที่คายกลับออกมา วัดปริมาณเอทานอลและน้ำในวัฏภาคไอจากไอควบแน่นกลับออกมา คำนวณสมดุลมวลของระบบจะได้ปริมาณเอทานอลและน้ำที่

เหลืออยู่ในถ่านกัมมันต์ โดยปริมาณเอทานอลและน้ำที่เหลืออยู่ในถ่านกัมมันต์นี้กำหนดให้เป็นวิฤภาคของเหลว จากนั้นนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับสมมูลไอของเหลวที่ความดันบรรยากาศ ดังรูปที่ 4.22 พล็อตสัดส่วนมวลเอทานอลในวิฤภาคไอที่เกิดจากการคายกลับจากถ่านกัมมันต์ที่จุดไออิมิตัว (Dew Point) ในสมมูลไอของเหลว และพล็อตสัดส่วนมวลเอทานอลในวิฤภาคคูดซัที่จุดของเหลวอิมิตัว (Bubble Point) ในสมมูลไอของเหลว จากนั้นลากเส้น Tie Line เพื่อเชื่อมระหว่างจุดไอกับจุดของเหลว พล็อตสัดส่วนโดยมวลเอทานอลเริ่มต้นก่อนการคายกลับบนเส้น Tie Line นั้น เปรียบเทียบกับกรณีระเหยของผสมเอทานอลน้ำในสมมูลไอของเหลวโดยตั้งสมมติฐานเริ่มต้นที่ปริมาณของเหลวที่เหลือหลังการคายกลับที่จุดเดียวกับปริมาณของเหลวในสมมูลไอของเหลว ดังรูปที่ 4.22 เส้นแนวระดับคือเส้น Tie Line ของสมมูลไอของเหลว พบว่าสัดส่วนโดยมวลของเอทานอลในวิฤภาคไอที่ได้จากการคายกลับเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์มีค่าน้อยกว่าปริมาณสัดส่วนโดยมวลของเอทานอลในสมมูลไอของเหลว นั้นหมายความว่าถ่านกัมมันต์ทำให้สมมูลไอของเหลวเปลี่ยนไปเนื่องจากผลของถ่านกัมมันต์ และแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในถ่านกัมมันต์ก่อนการคายกลับเพิ่มขึ้นพบว่าเส้น Tie Line มีความชันมากขึ้นจนหาค่าไม่ได้ นั้นหมายความว่าที่ความเข้มข้นของเอทานอลมากขึ้น แยกเอทานอลให้ได้ความเข้มข้นมากขึ้นจากเริ่มต้นได้ยากผลของปรากฏการณ์คูดซัที่มีน้อยกว่าผลของแรงกระทำระหว่างโมเลกุลจึงไม่สามารถแยกเอทานอลออกจากน้ำให้มีสัดส่วนของเอทานอลในไอมากขึ้นได้

จากรูปที่ 4.23 แสดงสัดส่วนเอทานอลในไอสมมูลกับสัดส่วนโดยมวลเอทานอลในของเหลวเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับสมมูลไอของเหลว พบว่าที่ความเข้มข้นของเอทานอลก่อนการคายกลับเพิ่มขึ้นแนวโน้มของการระเหยเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์เข้าใกล้สมมูลไอของเหลวเพิ่มขึ้น นั้นหมายความว่าที่ความเข้มข้นสูงๆ ผลของการระเหยใกล้เคียงกับการระเหยไอจากของเหลวผสมเอทานอล-น้ำ และสัดส่วนของเอทานอลในสถานะไอจากการคายกลับออกจากถ่านน้อยกว่าสัดส่วนไอเอทานอลในสมมูลไอของเหลว เป็นผลจากการคูดซัไอโดยถ่านกัมมันต์

จากรูปที่ 4.24 แสดงเปอร์เซ็นต์น้ำกลับ (%Recovery) เอทานอลและน้ำออกจากถ่านกัมมันต์ พบว่าที่ความเข้มข้นต่ำเปอร์เซ็นต์การนำกลับเอทานอลมีค่ามากกว่าเปอร์เซ็นต์การนำกลับน้ำ ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในถ่านกัมมันต์ก่อนการคายกลับมากขึ้น เปอร์เซ็นต์น้ำกลับเอทานอลและน้ำออกจากถ่านกัมมันต์มีค่าใกล้เคียงกัน

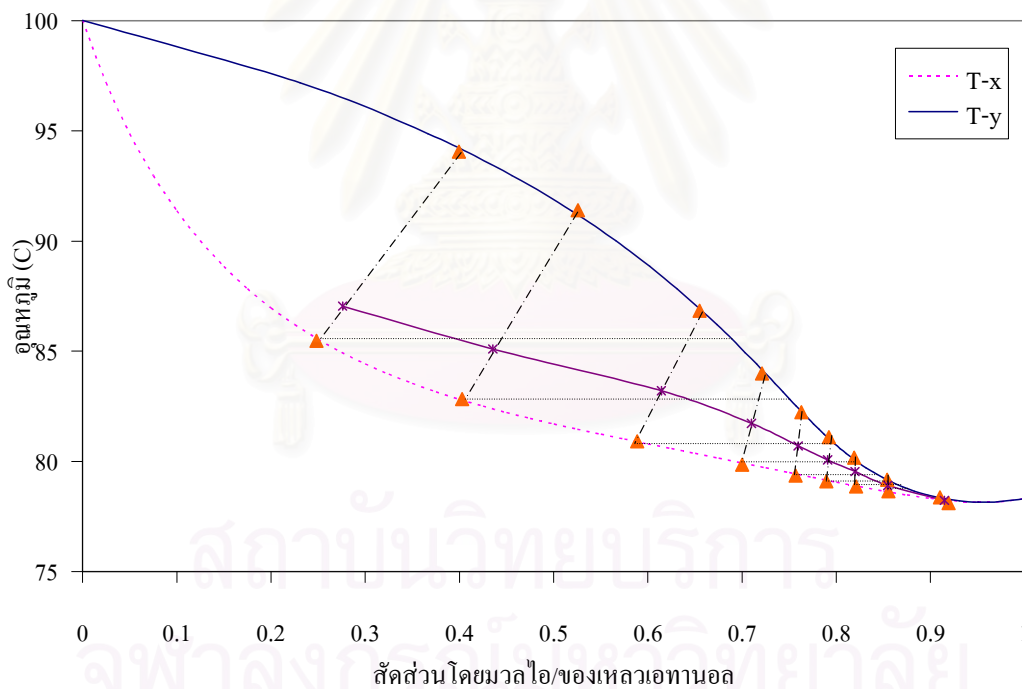
คำนวณเปอร์เซ็นต์น้ำกลับเอทานอลและน้ำดังนี้

$$\% \text{ Recovery}_{EtOH} = \left(\frac{M_3 C_3}{M_1 C_1 - M_2 C_2} \right) 100 \quad (4.8)$$

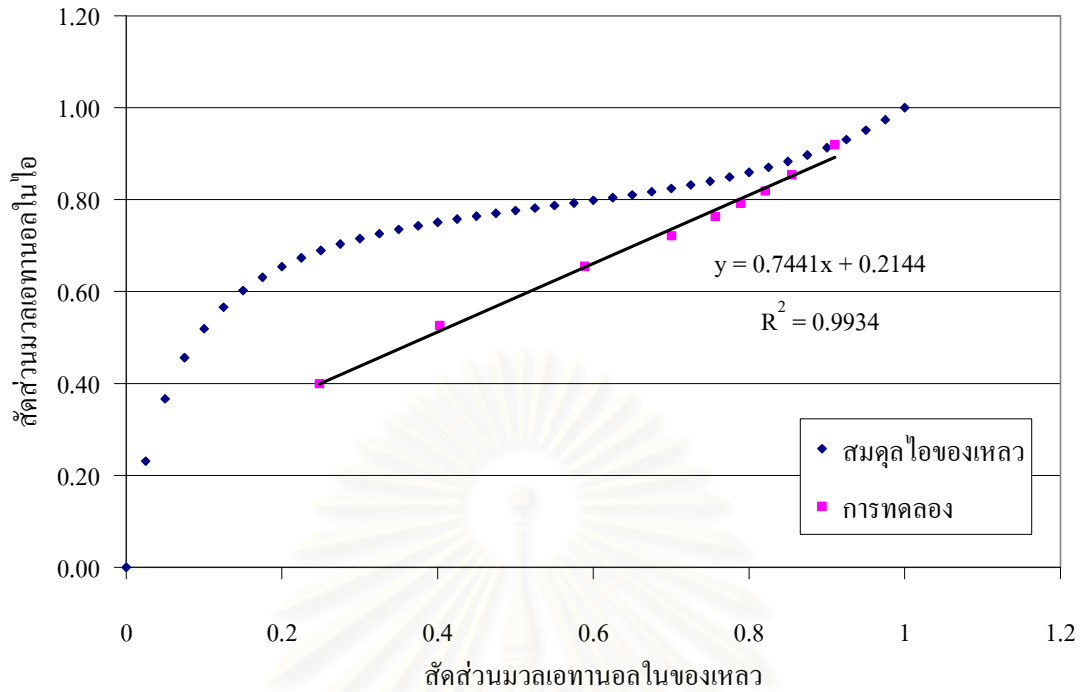
$$\% \text{ Recovery}_{H_2O} = \left[\frac{M_3(100 - C_3)}{M_1(100 - C_1) - M_2(100 - C_2)} \right] 100 \quad (4.9)$$

จากรูปที่ 4.25 แสดงกราฟระหว่างสัดส่วนโดยน้ำหนักเอทานอลก่อนการดูดซับ (x_{0EtOH}) กับสัดส่วนของความเข้มข้นเอทานอลในไอควบแน่นกลับต่อความเข้มข้นเอทานอลก่อนการดูดซับ (c/c_0) ที่อุณหภูมิ 95 °C ความดันบรรยากาศ พบว่าเมื่อความเข้มข้นเอทานอลก่อนการดูดซับเพิ่มขึ้นมีผลให้สัดส่วนของความเข้มข้นเอทานอลในไอควบแน่นกลับต่อความเข้มข้นเอทานอลก่อนการดูดซับลดลง และสามารถสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายความเข้มข้นเอทานอลที่ได้หลังการคายกลับที่อุณหภูมิ 95 °C ความดันบรรยากาศเมื่อทราบความเข้มข้นเอทานอลก่อนการดูดซับได้ดังนี้

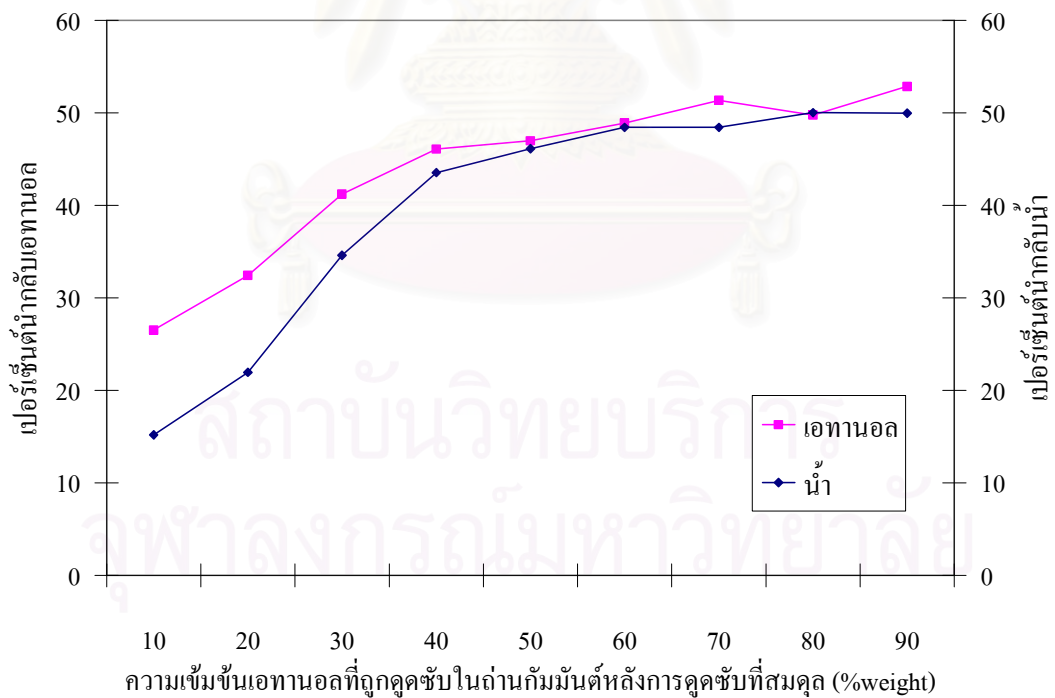
$$c/c_0 = 0.9886x_{0EtOH}^{-0.6585} \quad (4.10)$$



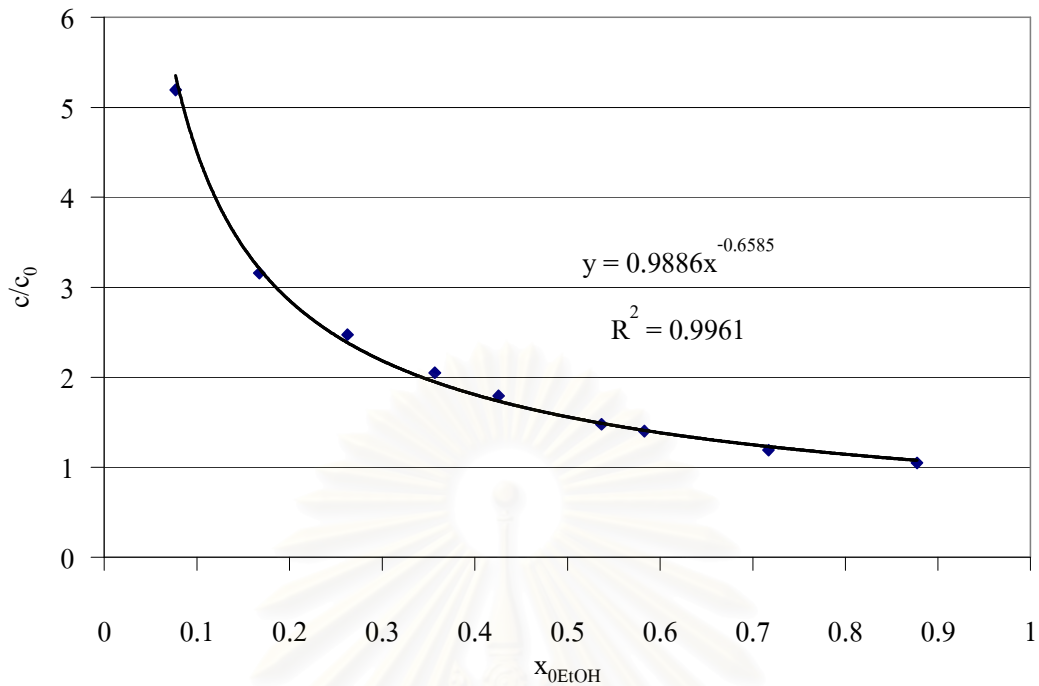
รูปที่ 4.22 ผลจากการทดลองนำกลับเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์เปรียบกับสมดุลไอของเหลวที่ความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.23 แสดงสัดส่วนเอทานอลในไอสมมูลกับสัดส่วนโดยมวลเอทานอลในของเหลว
 เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับสมมูลไอของเหลวที่ความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.24 ผลจากการทดลองหาเปอร์เซ็นต์น้ำกลับเอทานอลและน้ำออกจากถ่านกัมมันต์

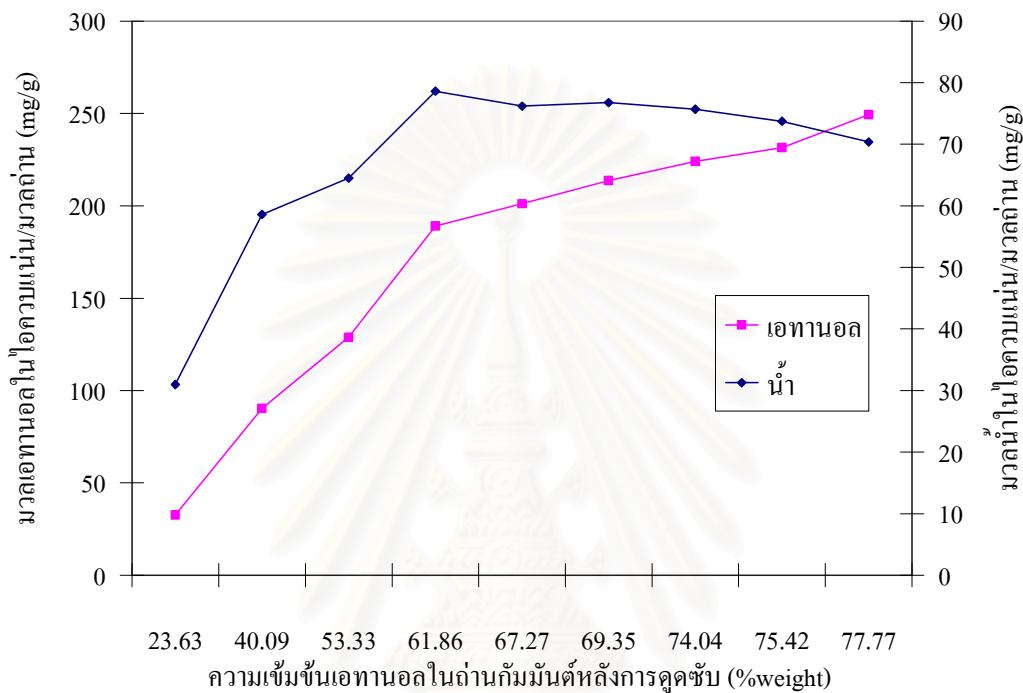


รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยน้ำหนักเอทานอลก่อนการดูดซับ กับ สัดส่วนของความเข้มข้นเอทานอลในไอควบแน่นกลับต่อความเข้มข้นเอทานอลก่อนการดูดซับ ที่อุณหภูมิ 95 °c ความดันบรรยากาศ

งานวิจัยของ Cuijuan Zhang และ Xiaoning Yang [12] ศึกษาโครงสร้างและการแพร่ของโมเลกุลเอทานอลและน้ำในของผสมเอทานอล-น้ำ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมเพิ่มขึ้นแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของเอทานอลและน้ำจะมีค่ามากขึ้นมีผลทำให้ที่ความเข้มข้นสูงแยกเอทานอลออกจากน้ำได้ยากขึ้น ส่วนที่ความเข้มข้นเอทานอลต่ำพบว่าเกิดการแตกพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของเอทานอล-เอทานอลที่กระทำกันเนื่องจากโมเลกุลของน้ำมีผลให้แยกเอทานอลออกจากน้ำได้ง่ายกว่า พบว่าจากบทสรุปนี้สอดคล้องกับผลงานวิจัยคือเมื่อความเข้มข้นเอทานอลมากขึ้นแยกเอทานอลกับน้ำให้มีความบริสุทธิ์ของเอทานอลมากขึ้นได้ยาก

4.3.2 ทดลองหาสมดุลการคายกลับของเอทานอลในถ่านกัมมันต์เปียกน้ำ

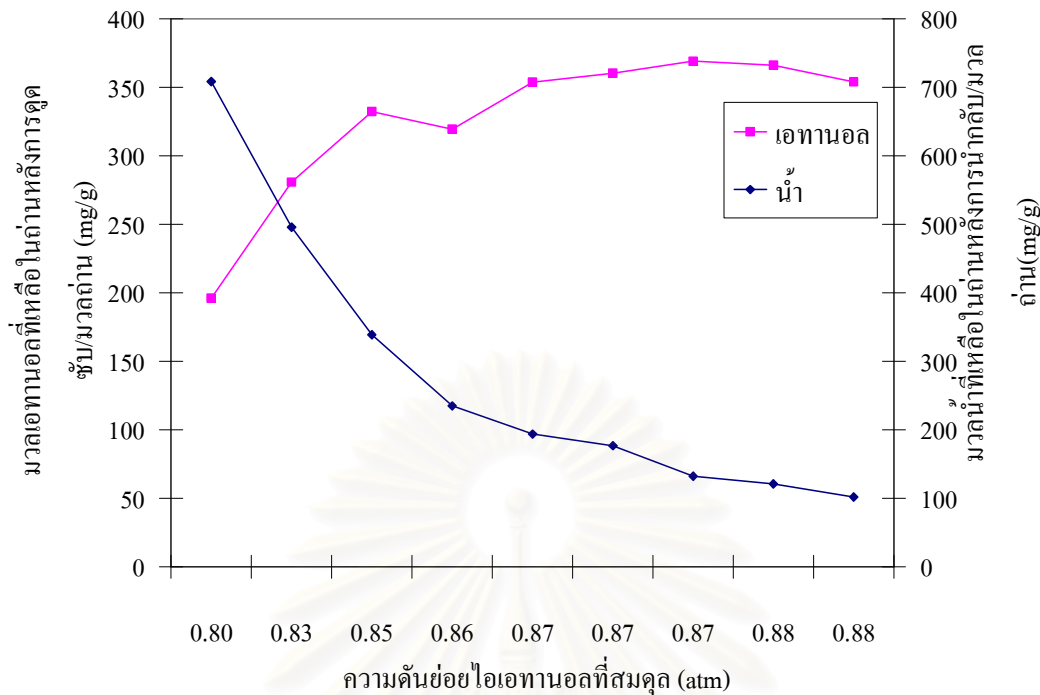
ทดลองการคายกลับของเอทานอลในถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิคงที่ 95 องศาเซลเซียส แล้วควบแน่นไอที่ระเหยออกมาจากถ่านกัมมันต์ให้ได้เป็นของเหลวโดยใช้เวลาในการคายกลับนานที่สุดจนไม่มีของเหลวควบแน่นกลับออกมาจากไอเพื่อให้เกิดสมดุลกัน ระหว่างวัฏภาคที่ถูกดูดซับกับวัฏภาคไอและวัฏภาคของเหลวที่เกิดจากไอควบแน่น



รูปที่ 4.26 แสดงปริมาณเอทานอลและปริมาณน้ำที่คายกลับออกมาจากถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นของเอทานอลก่อนการดูดซับเปลี่ยนแปลงไป

จากรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในถ่านกัมมันต์ก่อนการคายกลับมากขึ้นปริมาณการคายกลับของเอทานอลจะมากขึ้น ปริมาณน้ำที่คายกลับช่วงแรกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นช่วงหลังมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

การคำนวณปริมาณการคายกลับเอทานอลและน้ำต่อมวลถ่านคำนวณได้ดังสมการที่ (4.14), (4.15) และคำนวณความดันไอย่อยของเอทานอลที่สมดุลดังหัวข้อ 4.2.3.2



รูปที่ 4.27 แสดงปริมาณเอทานอลและปริมาณน้ำที่กลั่นในถ่านกัมมันต์หลังการคายกลับที่ความดันไอเอทานอลที่สมดุลเปลี่ยนไป

เมื่อพิจารณาจากภาคผนวกที่ ข.3 ไม่สามารถบอกได้ว่าตรงกับแบบจำลองสมดุลการดูดซับแบบแลงมัวร์และแบบฟรุนดลิช

จากการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณและจากการวัดน้ำหนักของไอเอทานอล-น้ำที่ควบแน่นกับน้ำหนักถ่านที่ลดลงหลังการคายกลับแสดงดังตาราง 4.13 ในภาคผนวก ข พบว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่า 5 % แสดงว่าผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือน้อย เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการสูญเสียมวลไอเอทานอลและน้ำระหว่างการทำการทดลอง จึงไม่สามารถบอกถึงแบบจำลองสมดุลการดูดซับว่าตรงกับแบบใดได้ กรณีต้องการความแม่นยำผลการทดลองต้องออกแบบชุดทดลองการคายกลับให้เป็นระบบปิดมากขึ้น และออกแบบขั้นตอนการทดลองให้มีการสูญเสียเอทานอลและน้ำน้อยลงระหว่างขั้นตอนการคายกลับ

พล็อตสัดส่วนมวลเอทานอลเริ่มต้น สัดส่วนมวลเอทานอลในวัฏภาคไอ และสัดส่วนมวลเอทานอลที่กลั่นในถ่านกัมมันต์ ในสมดุลไอของเหลวดังรูปที่ 4.32 มีลักษณะเดียวกับการคายกลับเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์แห่งดังรูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นของเอทานอลในถ่านกัมมันต์ก่อนการคายกลับเพิ่มขึ้นพบว่าเส้น Tie Line มีความชันมากขึ้นจนหาค่าไม่ได้ และจากรูปที่ 4.29 แสดงสัดส่วนเอทานอลในไอสมดุลกับสัดส่วนโดยมวลเอทานอลในของเหลวเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับสมดุลไอของเหลว พบว่า

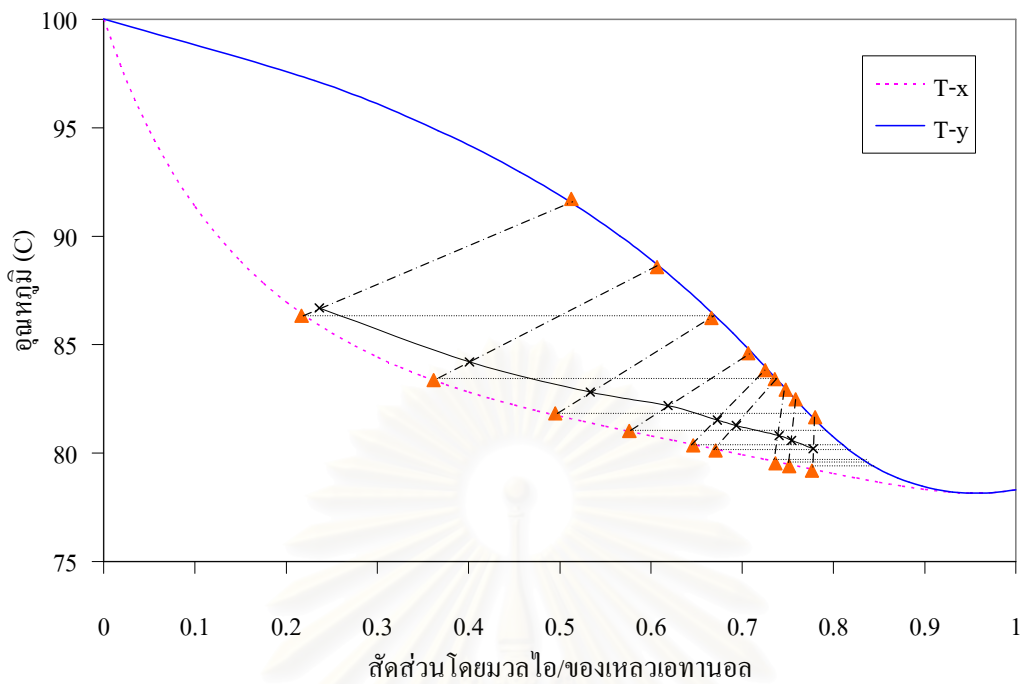
ที่ความเข้มข้นของเอทานอลก่อนการคายกลับเพิ่มขึ้นแนวโน้มของการระเหยเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์เข้าใกล้สมดุลไอของเหลวเพิ่มขึ้น นั้นหมายความว่าที่ความเข้มข้นสูงๆ ผลของการระเหยใกล้เคียงกับการระเหยไอจากของเหลวผสมเอทานอล-น้ำ ดังเช่นเดียวกับการคายกลับเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์แห้ง เริ่มต้นก่อนการดูดซับ นั้นหมายความว่าที่ความเข้มข้นของเอทานอลมากขึ้นแยกเอทานอลให้ได้ความสัดส่วนมวลเอทานอลให้ได้มากขึ้นจากเริ่มต้น ได้ยาก เกิดจากผลของปรากฏการณ์ดูดซับมีน้อยกว่าผลของแรงกระทำระหว่างโมเลกุลจึงไม่สามารถแยกเอทานอลออกจากน้ำให้มีสัดส่วนโดยมวลของเอทานอลเพิ่มขึ้นได้

จากรูปที่ 4.30 แสดงเปอร์เซ็นต์น้ำกลับ (%Recovery) เอทานอลและน้ำออกจากถ่านกัมมันต์ พบว่าที่ความเข้มข้นค่าเปอร์เซ็นต์การนำกลับเอทานอลมีค่ามากกว่าเปอร์เซ็นต์การนำกลับน้ำออกจากถ่านกัมมันต์ ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในถ่านกัมมันต์ก่อนการคายกลับมากขึ้นเปอร์เซ็นต์นำกลับเอทานอลและน้ำออกจากถ่านกัมมันต์มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น

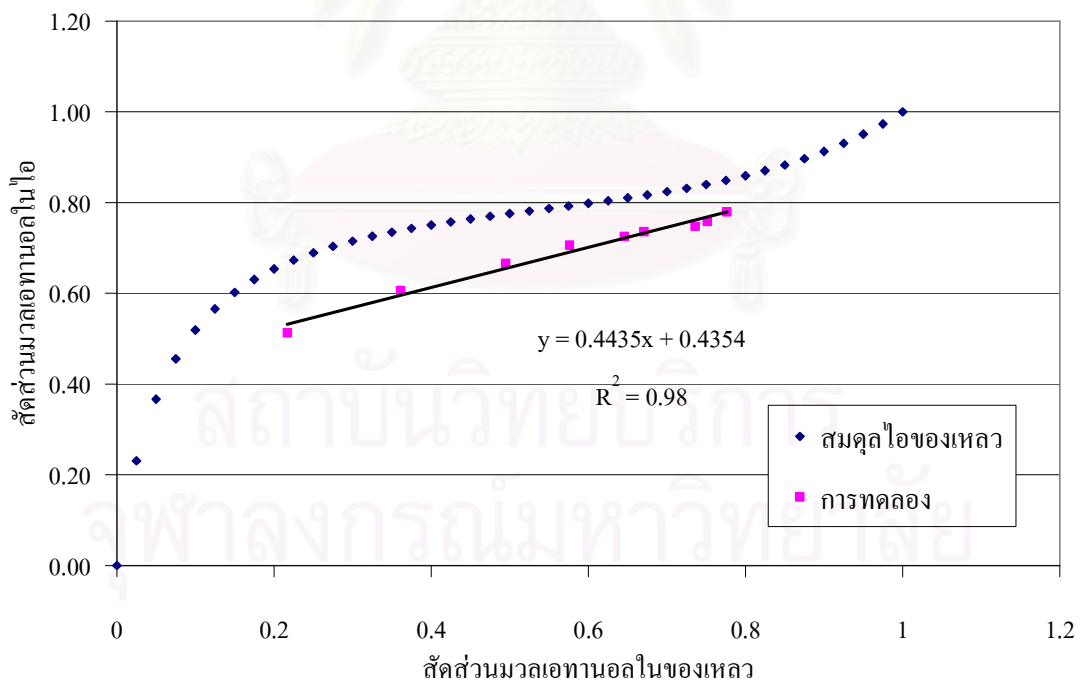
จากรูปที่ 4.31 แสดงกราฟระหว่างสัดส่วน โดยน้ำหนักเอทานอลก่อนการดูดซับ (x_{0EtOH}) กับสัดส่วนของความเข้มข้นเอทานอลในไอควบแน่นกลับต่อความเข้มข้นเอทานอลก่อนการดูดซับ (c/c_0) ที่อุณหภูมิ $95^{\circ}C$ ความดันบรรยากาศ พบว่าเป็นไปในแนวทางเดียวกับกรณีถ่านแห้ง สามารถสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายความเข้มข้นเอทานอลที่ได้หลังการคายกลับที่อุณหภูมิ $95^{\circ}C$ ความดันบรรยากาศเมื่อทราบความเข้มข้นเอทานอลก่อนการดูดซับได้ดังนี้

$$c/c_0 = 0.8193x_{0EtOH}^{-0.8237} \quad (4.20)$$

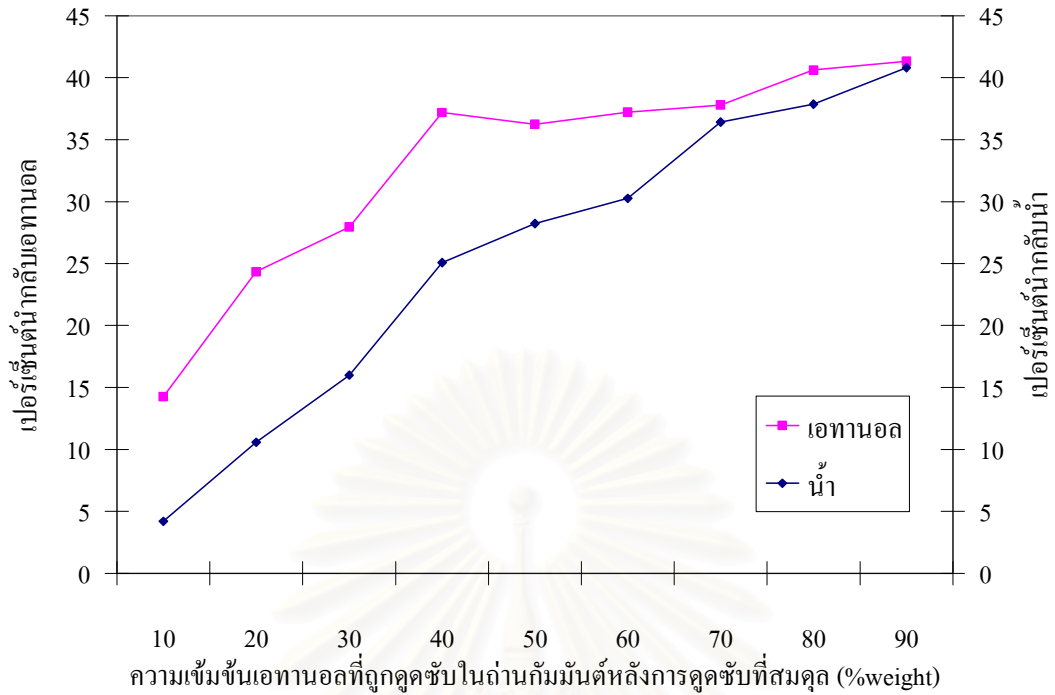
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



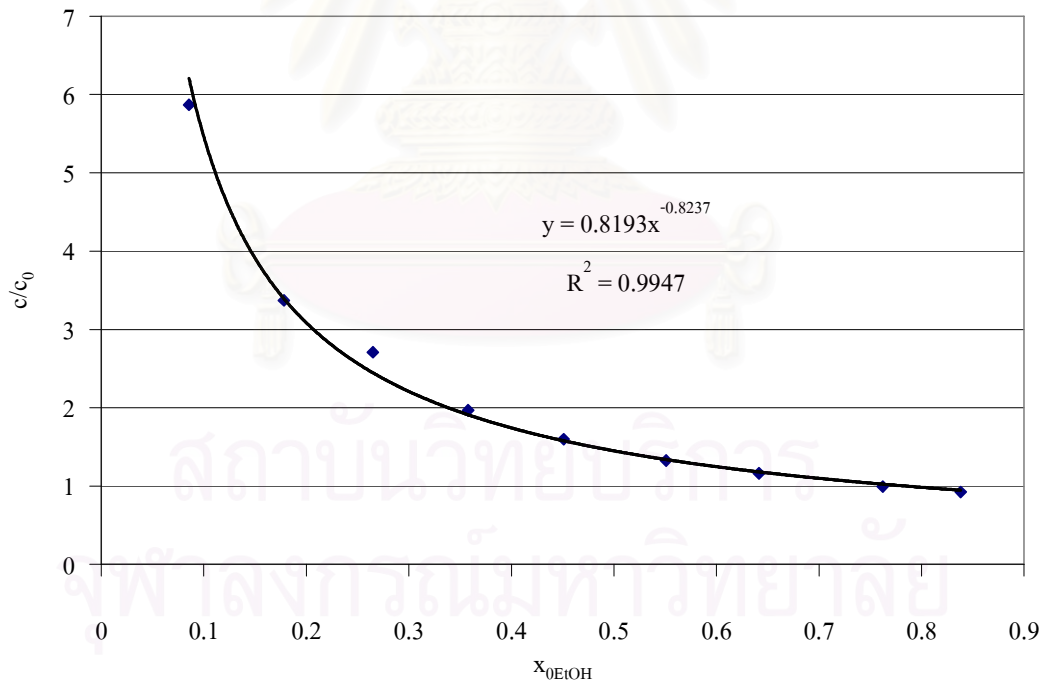
รูปที่ 4.28 ผลจากการทดลองนำกลีบเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์เปียกน้ำเปรียบกับสมดุลไอของเหลวที่ความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.29 แสดงสัดส่วนเอทานอลในไอสมดุลกับสัดส่วนโดยมวลเอทานอลในของเหลว เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับสมดุลไอของเหลวที่ความดันบรรยากาศ

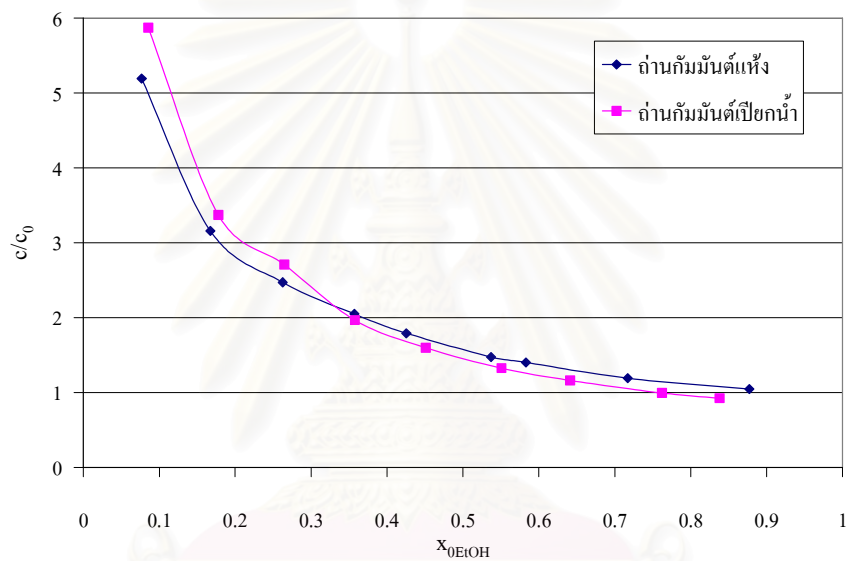


รูปที่ 4.30 ผลจากการทดลองหาเปอร์เซ็นต์น้ำกลับเอทานอลและน้ำออกจากถ่านกัมมันต์เปียกน้ำ



รูปที่ 4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยน้ำหนักเอทานอลก่อนการดูดซับ กับ สัดส่วนของความเข้มข้นเอทานอลในไอควบแน่นกลับต่อความเข้มข้นเอทานอลก่อนการดูดซับ ที่อุณหภูมิ 95 °c ความดันบรรยากาศ

เปรียบเทียบการแยกของผสมเอทานอลน้ำโดยใช้วิธีการดูดซับของเอทานอลไว้ใน ถ่านกัมมันต์ก่อนแล้วเพิ่มอุณหภูมิเพื่อให้เอทานอลซึ่งมีจุดเดือดต่ำกว่าน้ำระเหยออกแล้วทำ การลดอุณหภูมิไอเพื่อให้ไอควบแน่นเอทานอลเพื่อให้ได้เอทานอลที่มีความเข้มข้นขึ้นนั้น โดยเปรียบเทียบระหว่างถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับแห้งกับถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับเปียก น้ำ สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายปริมาณเอทานอลที่คายกลับออกมา จากถ่านด้วยการเพิ่มอุณหภูมิที่ 95°C ความดันบรรยากาศ ได้ดังรูปที่ 4.25 และ 4.31 นำมา เปรียบเทียบกันดังรูปที่ 4.32 พบว่าที่ความเข้มข้นเอทานอลก่อนการแยกของผสมเอทานอล- น้ำต่ำถ่านกัมมันต์เปียกน้ำแยกเอทานอลออกจากน้ำได้บริสุทธิ์กว่าถ่านแห้งที่ความเข้มข้นเอ ทานอลมากขึ้นการแยกเอทานอลออกจากของผสมเอทานอล-น้ำมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบการแยกของผสมเอทานอล-น้ำด้วยวิธีการดูดซับระหว่างถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับแห้งกับถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับเปียกน้ำแล้วคายกลับด้วยการเพิ่มอุณหภูมิ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

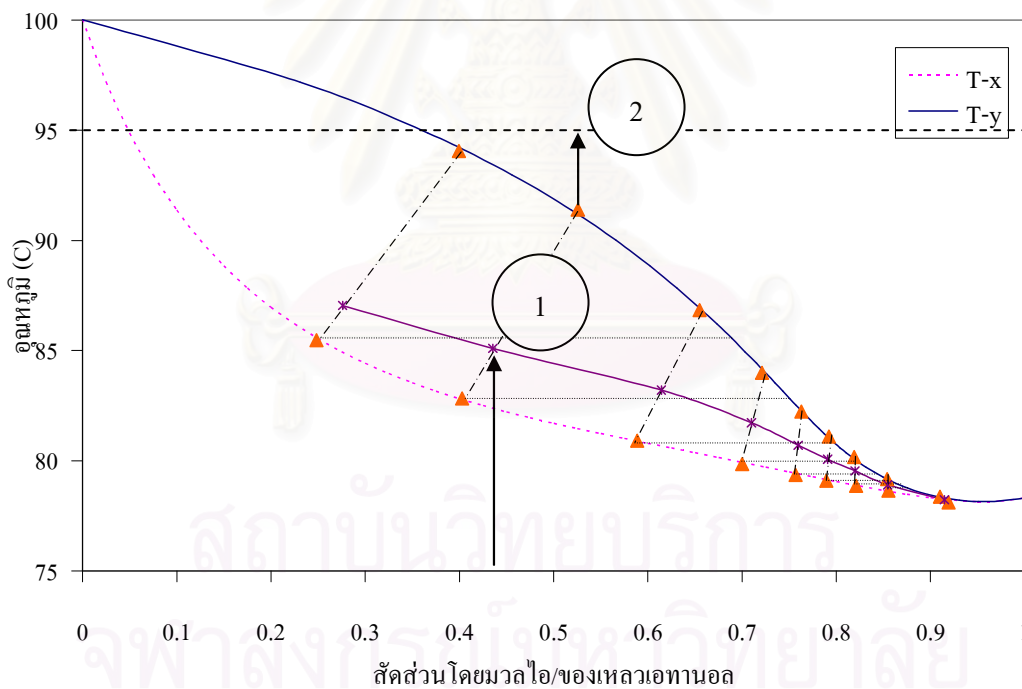
4.4 ประเมินพลังงานที่ใช้ในการคายกลับเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์

การคายกลับเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิถ่านกัมมันต์ที่จุดซัดของผสมเอทานอล-น้ำ จากอุณหภูมิห้องไปที่ 95°C ดังรูปที่ 4.33 แสดงแผนภาพการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการนำกลับเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์ โดยแบ่งการคำนวณออกเป็น 3 ช่วง

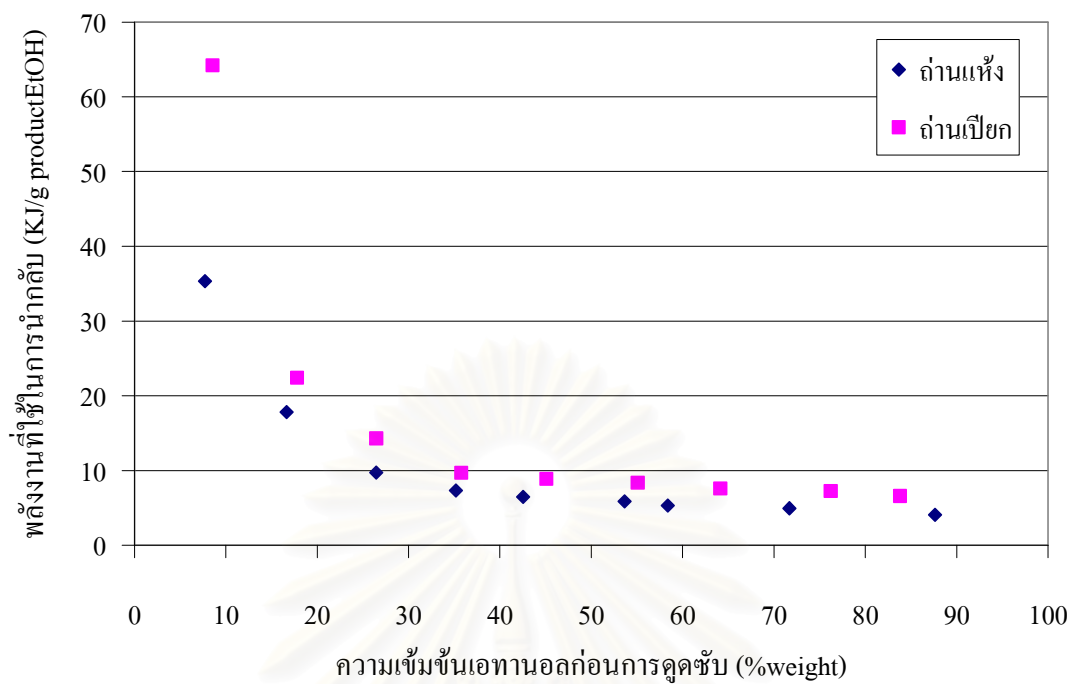
ช่วงแรกคือการเพิ่มอุณหภูมิถ่านกัมมันต์จากอุณหภูมิห้อง 30 องศาเซลเซียส มาที่อุณหภูมิจุดที่ 1 การคำนวณพลังงานจากโปรแกรมแบบจำลองสำเร็จรูปโดยใช้แบบจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่สัดส่วนโดยมวลเอทานอล-น้ำก่อนการคายกลับ เพิ่มอุณหภูมิจาก 30 องศาเซลเซียสไปที่อุณหภูมิที่จุดที่ 1 ดังรูป และที่ความดันบรรยากาศ

ช่วงที่สองคำนวณพลังงานจากความร้อนแฝงจากการเปลี่ยนสถานะจากจุดที่ 1 ไปที่จุดที่ 2 โดยคำนวณความร้อนแฝงแยกกันระหว่างเอทานอลและน้ำ

ช่วงที่สามคำนวณพลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิจากจุดที่ 2 ไปที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส คำนวณจาก โปรแกรมแบบจำลองสำเร็จรูปโดยใช้แบบจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่สัดส่วนโดยมวลเอทานอล-น้ำในไอควบแน่น ที่ความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.33 แผนภาพการคำนวณพลังงานการนำกลับเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์เปรียบกับสมดุลไอของเหลวที่ความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.34 พลังงานที่ใช้ในการนำกลั่นเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์

จากรูปที่ 4.34 ค่าพลังงานต่อปริมาณไอล้วนแน่นคายกลับ พบว่ากรณีคายกลับเอทานอลออกจากถ่านก่อนกลั่นแห้งมีค่าน้อยกว่าถ่านก่อนการกลั่นเปียกน้ำ โดยที่ช่วงความเข้มข้นก่อนการคายกลับต่ำมีค่าพลังงานในการคายกลับเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์มากที่สุด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. จากการทำการกราฟมาตรฐานสอบเทียบความเข้มข้นจากความหนาแน่นและวัดดัชนีหักเห แสงพบว่าเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของของผสมมีค่าลดลงและดัชนีหักเหแสงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยการวัดความเข้มข้นโดยวิธีวัดดัชนีหักเหแสงนั้นมีความแม่นยำที่ค่าดัชนีหักเหแสงต่ำกว่า 14.6 เท่านั้น กรณีวัดที่ความเข้มข้นเอทานอลมากขึ้น ต้องใช้วิธีการเจือจางให้ค่าดัชนีหักเหแสงต่ำกว่า 14.6 และน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปทั้งก่อนและหลังเจือจาง แล้วคำนวณความเข้มข้นก่อนเจือจาง
2. จากการวัดสมมูลการดูดซับของถ่านกัมมันต์แห้งก่อนการดูดซับจากวิธีวัดเอทานอล และน้ำที่ถูกดูดซับจากการสมดุลมวลสาร เปรียบเทียบกับการคำนวณปริมาณเอทานอลที่ถูกดูดซับโดยวิธีของออสวอด พบว่ามีความสัมพันธ์กันคือจากการพอดิกราฟส่วนที่เป็นเชิงเส้นของกราฟที่ได้จากการคำนวณ โดยวิธีออสวอด สามารถคำนวณปริมาณเอทานอลและน้ำที่ถูกดูดซับเฉลี่ยตลอดช่วงของความเข้มข้นเอทานอลก่อนการดูดซับที่เพิ่มขึ้นได้ใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยสมดุลมวลสาร
3. เปรียบเทียบปริมาณเอทานอลและน้ำที่ถูกดูดซับในถ่านกัมมันต์แห้งกับถ่านกัมมันต์เปียกพบว่าถ่านเปียกน้ำดูดซับเอทานอลมากกว่าเป็นผลจากแรงตึงผิว ดังนั้นแรงตึงผิวจึงมีผลต่อการดูดซับของเหลว
4. การแยกเอทานอลออกจากของผสมเอทานอล-น้ำวิธีการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์แล้วคายกลับเอทานอลออกมาด้วยการเพิ่มอุณหภูมินี้ได้ผลคือที่ความเข้มข้นเอทานอลก่อนดูดซับต่ำ เนื่องจากได้สัดส่วนของความเข้มข้นเอทานอลที่ได้จากไอคายกลับควบแน่นต่อความเข้มข้นเอทานอลก่อนการดูดซับมากที่สุด กรณีแยกเอทานอลออกจากของผสมเอทานอล-น้ำที่ความเข้มข้นเอทานอลสูงกระบวนการนี้ไม่สามารถแยกเอทานอลให้มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นได้

เนื่องจากผลของแรงกระทำระหว่างโมเลกุลเอทานอลมากขึ้น และกระบวนการนี้ไม่สามารถแยกเอทานอลออกจากน้ำที่จุดของผสมจุดเดือดคงที่ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรจะมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขอื่นที่มีผลต่อการดูดซับและการคายกลับของผสมเอทานอล-น้ำ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือขนาดของรูพรุนถ่านกัมมันต์ หรือใช้ตัวดูดซับชนิดอื่นเพิ่มขึ้นเพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเพื่อทำนายความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่แยกได้จากกระบวนการนี้ใช้งานได้หลายเงื่อนไขเพิ่มขึ้น
2. ศึกษาทางการดูดซับและคายกลับทางจุลศาสตร์เพื่อทำการออกแบบหอดูดซับขยายขนาดใช้กับหอดูดซับขนาดใหญ่ได้ต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] นางสาวคณิตา วัฒนะกิจ. การเตรียมถ่านดูดซับจากกะลามะพร้าวด้วยการต้มกับการละลาย
ซิงค์คลอไรด์สำหรับการดูดซับเอทานอลในน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชา
วิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [2] Santi Kulprathipanja. Use of activated carbon for separation of ethanol from water. United
States Patent, 1983.
- [3] Maeda, Y. and Kai, M. Recent Progress in Pervaporation Membrane for Water/Ethanol
Separation. Pervaporation Membrane Separation Process, 1991.
- [4] R.K.Malik,P.Ghose and T.K.Ghose. Ethanol Separation by Adsorption-Desorption.
Biotechnol.Bioeng 25 (April 1983): 277-282.
- [5] Bul, S., Verykios, X. and Mcetharasan. In Situ Removal of Ethanol from fermentation Broth.
I. Selective Adsorption Characteristics. Industrial Engineering Chemical Process
Design Development, 1985.
- [6] Hiromitu Naono and co-workers. Separation of Water and Ethanol by the Adsorption
Technique: Selective desorption of Water from Micropores of Active Carbon. Journal
of Colloid and Interface Science 182 (March 1996): 230-238.
- [7] สุภกร ศรสุพรรณ. การรีเจนเนอเรชันถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไฮดรอกซีสารอินทรีย์ด้วยไอน้ำ.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าธนบุรี, 2546.
- [8] นางสาวประพิณ ทักษากัญจนะ. การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกระตุ้นเปลือก
เมล็ดทานตะวันสำหรับการผลิตวัสดุดูดซับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชา
วิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2548.
- [9] Don W. Green. Perry's chemical engineering's Handbook seventh edition : Section 16
Adsorption and Ion Exchange. McGraw-Hill, 1999.
- [10] W. John Thomas and Barry Crittenden. Adsorption technology and design. Oxford ;
Boston : Butterworth-Heinemann, 1998.
- [11] Don W. Green. Perry's chemical engineering's Handbook seventh edition : Section 13
Adsorption and Ion Exchange. McGraw-Hill, 1999.
- [12] Cuijuan Zhang, Xiaoning Yang. Molecular dynamics simulation of ethanol/water mixtures
for structure and diffusion properties. Fluid Phase Equilibria., 2005.

- [13] Andrzej Ziabicki and Andrzej Wasiak. Surface Tension Corrections in Density Measurements Using Density Gradient Columns. **Kolloide.**, 1966.
- [14] J. M. Smith, H. C. Van Ness and M. M. Abbott. Chemical Engineering Thermodynamics.
Mc Graw Hill ; Sixth Edition, 2001.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การคำนวณ

ก.1 จำนวนปริมาณเอทานอลและน้ำที่ถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

ก.1.1 จำนวนปริมาณการดูดซับของเอทานอลและน้ำกรณีถ่านก่อนการดูดซับแห้ง

จำนวนปริมาณการดูดซับของเอทานอลในของผสมเอทานอล-น้ำในถ่านกัมมันต์ได้ดังนี้

$$q_{EtOH} = \frac{M_1 C_1 - M_2 C_2}{100M} \quad (ก.1)$$

จำนวนปริมาณการดูดซับของเอทานอลในของผสมเอทานอล-น้ำในถ่านกัมมันต์ได้ดังนี้

$$q_{H_2O} = \frac{M_1(100 - C_1) - M_2(100 - C_2)}{100M} \quad (ก.2)$$

โดย	q_{EtOH}	คือ มวลเอทานอลที่ถูกดูดซับต่อมวลถ่าน (มิลลิกรัม/กรัมถ่านกัมมันต์)
	q_{H_2O}	คือ มวลน้ำที่ถูกดูดซับต่อมวลถ่าน (มิลลิกรัม/กรัมถ่านกัมมันต์)
	M_1	คือ มวลของผสมเอทานอล-น้ำก่อนการดูดซับ (มิลลิกรัม)
	M_2	คือ มวลของของผสมเอทานอล-น้ำหลังการดูดซับ (มิลลิกรัม)
	C_1	คือ ความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำก่อนการดูดซับ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
	C_2	คือ ความเข้มข้นของผสมเอทานอล-น้ำหลังการดูดซับ (เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก)
	M	คือ มวลถ่านกัมมันต์ (กรัม)

- ก.1.2 จำนวนปริมาณการดูดซับของเอทานอลและน้ำกรณีถ่วงก่อนการดูดซับเปียกน้ำ
 จำนวนปริมาณการดูดซับของเอทานอลได้ตั้งสมการที่ (ก.1) และปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับได้ดังนี้

$$q_{H_2O} = \frac{M_1(100 - C_1) + M^0_{H_2O} - M_2(100 - C_2)}{100M} \quad (\text{ก.3})$$

โดย $M^0_{H_2O}$ คือ มวลของน้ำในถ่วงกัมมันต์เริ่มต้น (กรัม)

- ก.2 จำนวนปริมาณเอทานอลและน้ำที่คายกลับออกจากถ่วงกัมมันต์

- ก.2.1 การคำนวณปริมาณการคายกลับคำนวณได้จากสมดุลมวลสารของระบบดังนี้

$$q_{C_{EtOH}} = \frac{M_3 C_3}{100M} \quad (\text{ก.5})$$

$$q_{C_{H_2O}} = \frac{M_3(100 - C_3)}{100M} \quad (\text{ก.6})$$

$$C_4 = \frac{M_1 C_1 - M_2 C_2}{M_1 - M_2} \quad (\text{ก.7})$$

โดย $q_{C_{EtOH}}$ คือ ปริมาณเอทานอลในไอควบแน่นต่อปริมาณถ่วงกัมมันต์
 (มิลลิกรัมต่อกรัมถ่วง)

$q_{C_{H_2O}}$ คือ ปริมาณน้ำในไอควบแน่นต่อปริมาณถ่วงกัมมันต์
 (มิลลิกรัมต่อกรัมถ่วง)

M_3 คือ มวลไอควบแน่น (กรัม)

C_3 คือ ความเข้มข้นไอควบแน่น (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

C_4 คือ ความเข้มข้นเอทานอลในถ่วงกัมมันต์หลังการดูดซับ
 (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

ก.2.2 คำนวณปริมาณเอทานอลและปริมาณน้ำที่เหลือในถ่านกัมมันต์หลังการนำกลีบเอทานอลออก จากถ่านกัมมันต์ ดังนี้

$$q_{R_{EtOH}} = \frac{M_1 C_1 - M_2 C_2 - M_3 C_3}{100M} \quad (\text{ก.8})$$

$$q_{R_{H_2O}} = \frac{M_1(100 - C_1) - M_2(100 - C_2) - M_3(100 - C_3)}{100M} \quad (\text{ก.9})$$

ก.2.3 คำนวณปริมาณเอทานอลและปริมาณน้ำที่เหลือในถ่านกัมมันต์หลังการนำกลีบเอทานอลออก จากถ่านกัมมันต์ ดังสมการที่(ก.8) และสมการที่ (ก.10)

$$q_{R_{H_2O}} = \frac{M_1(100 - C_1) + M_{H_2O}^0 - M_2(100 - C_2) - M_3(100 - C_3)}{100M} \quad (\text{ก.10})$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.3 จำนวนแรงตึงผิวของของผสมเอทานอล-น้ำ

ก.3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายแรงตึงผิวของ Ziabicki [13] ได้ดังนี้

$$\gamma_\ell(\rho_\ell) = \frac{\gamma_1(\rho_\ell - \rho_2) - \xi\gamma_2(\rho_\ell - \rho_1)}{\rho_\ell - \rho_2 - \xi(\rho_\ell - \rho_1)} \quad (\text{ก.11})$$

โดย	γ_ℓ	คือ แรงตึงผิวของของผสม (mN/m)
	γ_1	คือ แรงตึงผิวของสารบริสุทธิ์ตัวที่ 1 (mN/m)
	γ_2	คือ แรงตึงผิวของสารบริสุทธิ์ตัวที่ 2 (mN/m)
	ρ_ℓ	คือ ความหนาแน่นของของผสม (kg/m^3)
	ρ_1	คือ ความหนาแน่นของสารบริสุทธิ์ตัวที่ 1 (kg/m^3)
	ρ_2	คือ ความหนาแน่นของสารบริสุทธิ์ตัวที่ 2 (kg/m^3)
	ξ	คือ ค่าคงที่

สำหรับของผสมเอทานอล-น้ำ กำหนดให้สารตัวที่ 1 คือเอทานอล สารตัวที่ 2 คือน้ำ

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าคงที่ของสารบริสุทธิ์เอทานอลและน้ำที่อุณหภูมิ 28 °c

ความหนาแน่นเอทานอล (ρ_1)	0.7807	g/cm ³
แรงตึงผิวเอทานอล (γ_1)	22.27	mN/m
ความหนาแน่นน้ำ (ρ_2)	0.9962	g/cm ³
แรงตึงผิวเอทานอล (γ_2)	72.75	mN/m
ξ	2.552	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
แบบจำลองสมดุลการดูดซับ

ข.1 แสดงแบบจำลองสมดุลการดูดซับเอทานอลกรณีถ่านก่อนการดูดซับแห้งที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส

แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงมัวร์แสดงดังสมการ:

$$q = \frac{q_m K_L C_2}{1 + K_L C_2} \quad (\text{ข.1})$$

จัดรูปสมการ (4.5) ได้ดังนี้

$$\frac{C_2}{q} = \frac{C_2}{q_m} + \frac{1}{K_L q_m} \quad (\text{ข.2})$$

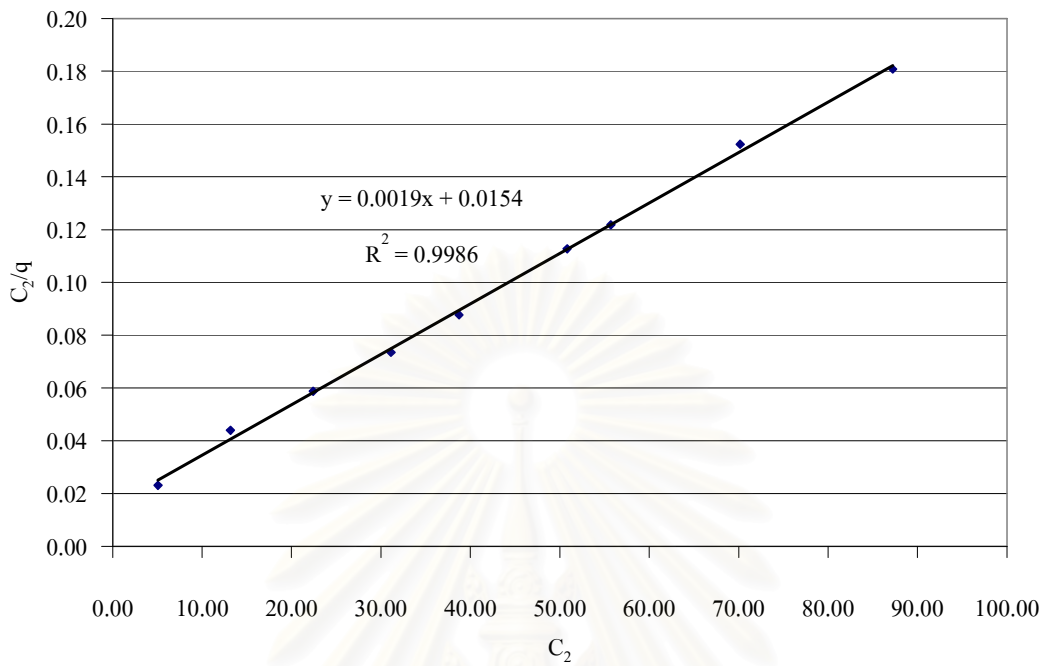
แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดลิชแสดงดังสมการ:

$$q = K_F C_2^{1/n} \quad (\text{ข.3})$$

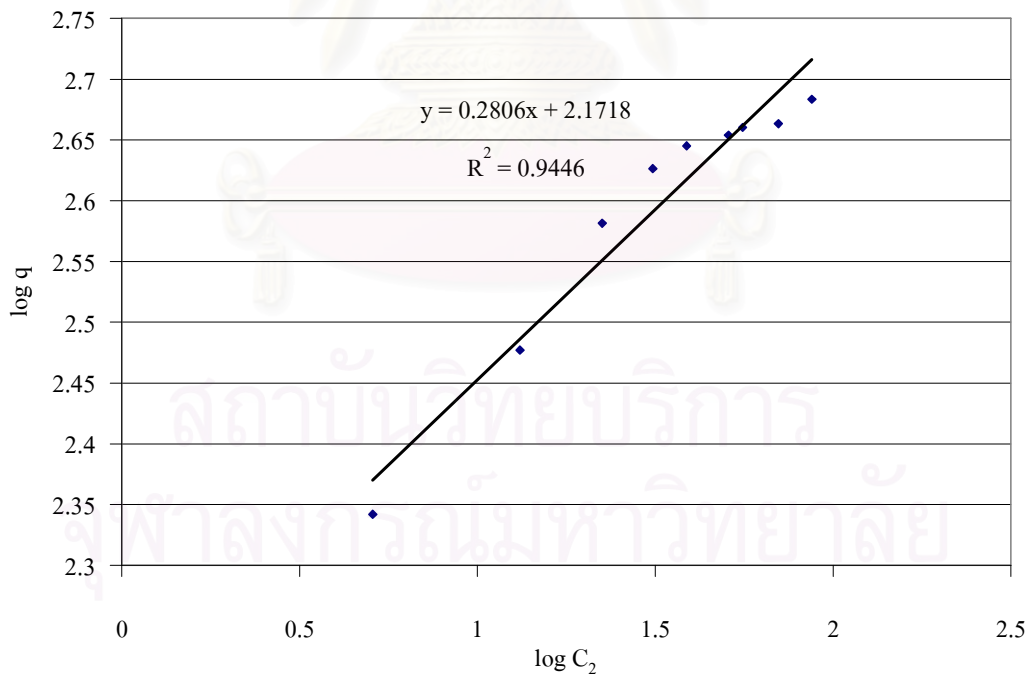
จัดรูปสมการ (4.7) ได้ดังนี้

$$\log q = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_2 \quad (\text{ข.4})$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.1 แสดงการพหุคูณเส้นโค้งข้อมูลสมมูลการดูดซับแบบแลงมัวร์



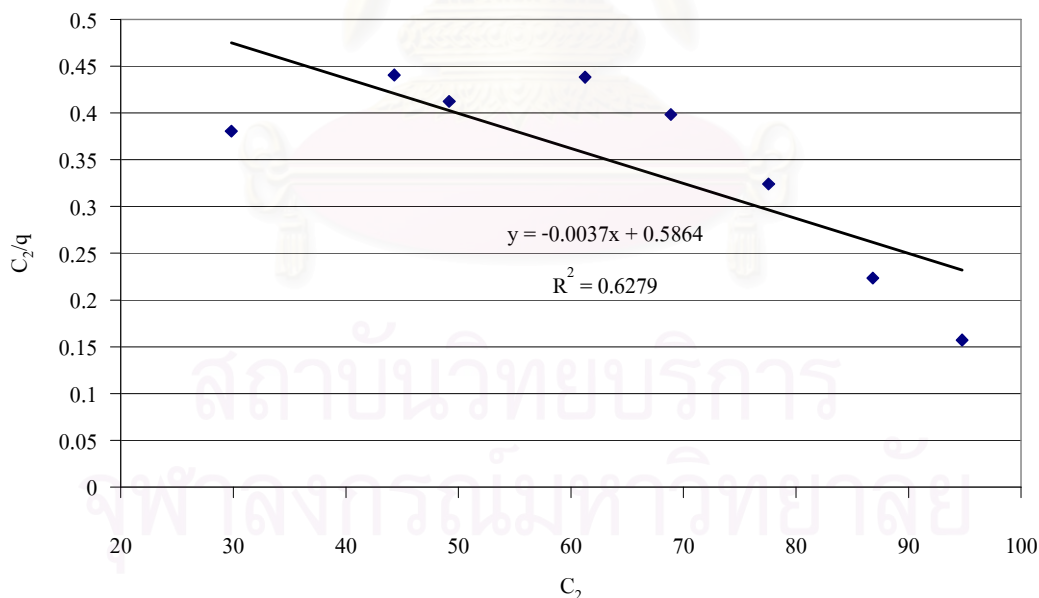
รูปที่ ข.2 แสดงการพหุคูณเส้นโค้งข้อมูลสมมูลการดูดซับแบบฟรุนดลิช

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ ข.1 ค่า R^2 ของการถดถอยเชิงเส้น (Regression Line) ของสมมูลการดูดซับแบบแลงมัวร์ เท่ากับ 0.9986 และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ ข.2 ค่า R^2 ของการถดถอยเชิงเส้น (Regression Line) ของสมมูลการดูดซับแบบฟรุนดลิช เท่ากับ 0.9446 พบว่าค่า R^2 ของการถดถอยเชิงเส้นของสมมูลการดูดซับแบบแลงมัวร์มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าแสดงว่า สมมูลการดูดซับของของผสมเอทานอล-น้ำของถ่านกัมมันต์มีความสอดคล้องกับแบบจำลองสมมูลการดูดซับของแลงมัวร์มากกว่าแบบจำลองสมมูลการดูดซับของฟรุนดลิช

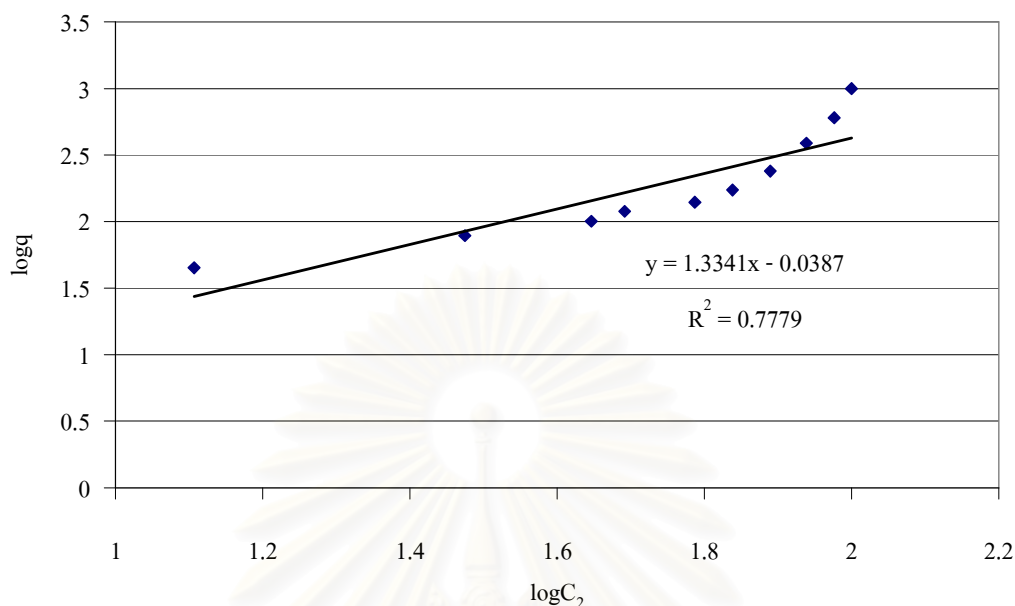
จากกราฟรูปที่ ข.1 สามารถแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างความเข้มข้นของผสมเอทานอล-น้ำหลังการดูดซับ กับความเข้มข้นของผสมเอทานอล-น้ำหลังการดูดซับต่อปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ดังสมการต่อไปนี้ :

$$\frac{C_2}{q} = 0.0019C_2 + 0.0154 \quad (\text{ข.5})$$

ข.2 แสดงแบบจำลองสมมูลการดูดซับน้ำกรณีถ่านก่อนการดูดซับแห้งที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข.3 แสดงการพอดีเส้นโค้งข้อมูลสมมูลการดูดซับแบบแลงมัวร์



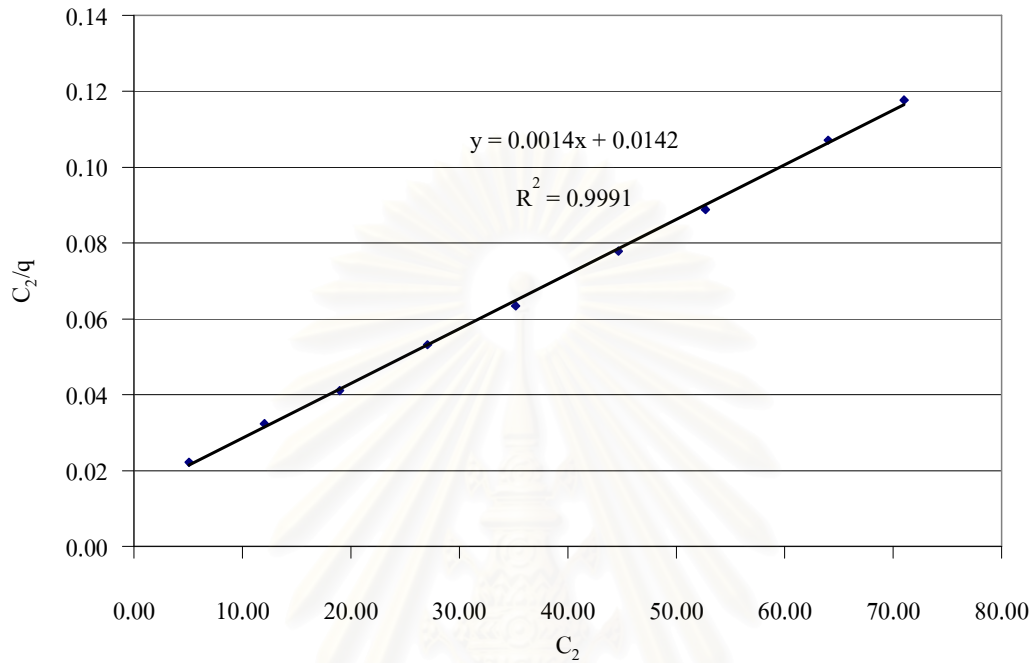
รูปที่ ข.4 แสดงการพหุคูณเส้นโค้งข้อมูลสมมูลการดูดซับแบบฟรุนดิช

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ ข.3 ค่า R^2 ของการถดถอยเชิงเส้น (Regression Line) ของสมมูลการดูดซับแบบแลงมัวร์ เท่ากับ 0.6279 และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ ข.4 ค่า R^2 ของการถดถอยเชิงเส้น (Regression Line) ของสมมูลการดูดซับแบบฟรุนดิช เท่ากับ 0.7779 พบว่าค่า R^2 ของการถดถอยเชิงเส้นของสมมูลการดูดซับแบบฟรุนดิชมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าแสดงว่า สมมูลการดูดซับของของผสมเอทานอล-น้ำของถ่านกัมมันต์มีความสอดคล้องกับแบบจำลองสมมูลการดูดซับของฟรุนดิชมากกว่าแบบจำลองสมมูลการดูดซับของแลงมัวร์

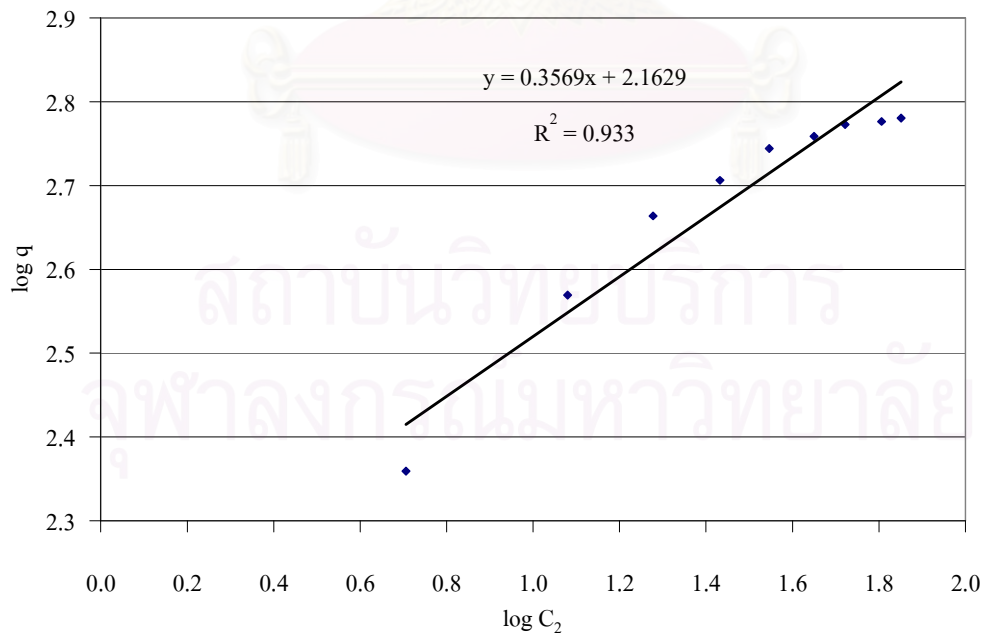
จากกราฟรูปที่ ข.4 สามารถแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างความเข้มข้นของผสมเอทานอล-น้ำหลังการดูดซับ กับความเข้มข้นของผสมเอทานอล-น้ำหลังการดูดซับต่อปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ดังสมการต่อไปนี้ :

$$\log q = 0.0019 \log C_2 + 0.0154 \quad (\text{ข.6})$$

ข.3 แสดงแบบจำลองสมดุลการดูดซับเอทานอลกรณีถ่านก่อนการดูดซับเป็ยกน้ำที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข.5 แสดงแสดงการพอดีเส้นโค้งข้อมูลสมดุลการดูดซับแบบแลงมัวร์



รูปที่ ข.6 แสดงแสดงการพอดีเส้นโค้งข้อมูลสมดุลการดูดซับแบบฟรุนดลิช

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ ข.5 ค่า R^2 ของการถดถอยเชิงเส้น (Regression Line) ของสมดุลการดูดซับแบบแลงมัวร์ เท่ากับ 0.9991 และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ ข.6 ค่า R^2 ของการถดถอยเชิงเส้น (Regression Line) ของสมดุลการดูดซับแบบฟรุนดิช เท่ากับ 0.933 พบว่าค่า R^2 ของการถดถอยเชิงเส้นของสมดุลการดูดซับแบบแลงมัวร์มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าแสดงว่า สมดุลการดูดซับของของผสมเอทานอล-น้ำของถ่านกัมมันต์มีความสอดคล้องกับแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงมัวร์มากกว่าแบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดิช

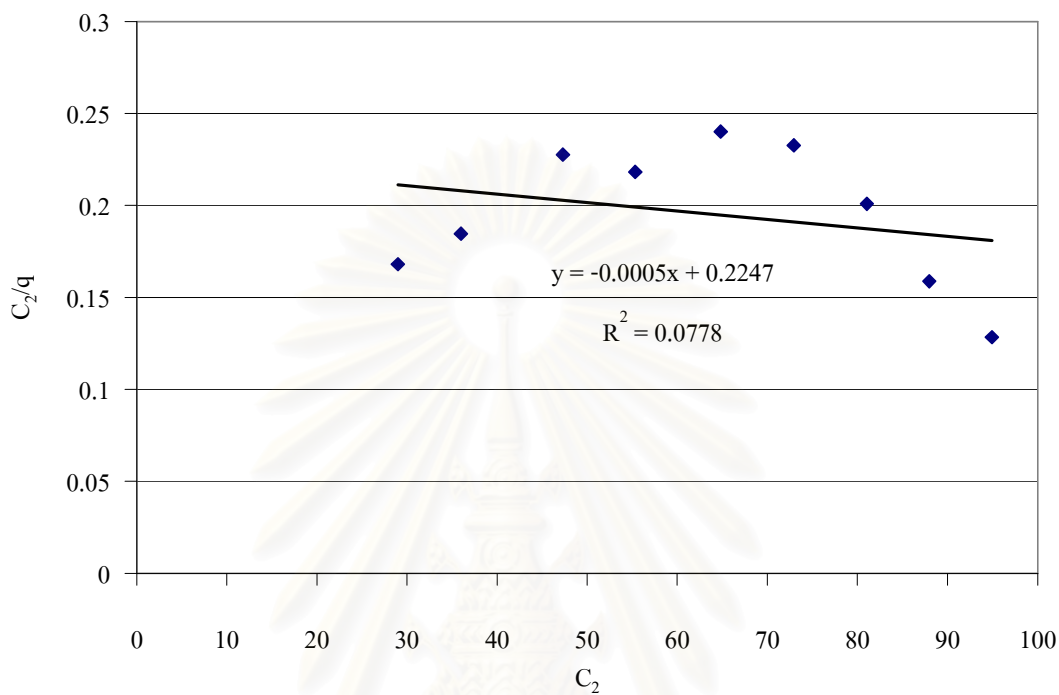
จากกราฟรูปที่ ข.5 สามารถแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างความเข้มข้นของผสมเอทานอล-น้ำหลังการดูดซับ กับความเข้มข้นของผสมเอทานอล-น้ำหลังการดูดซับต่อปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ดังสมการต่อไปนี้ :

$$\frac{C_2}{q} = 0.0014C_2 + 0.0142 \quad (\text{ข.7})$$

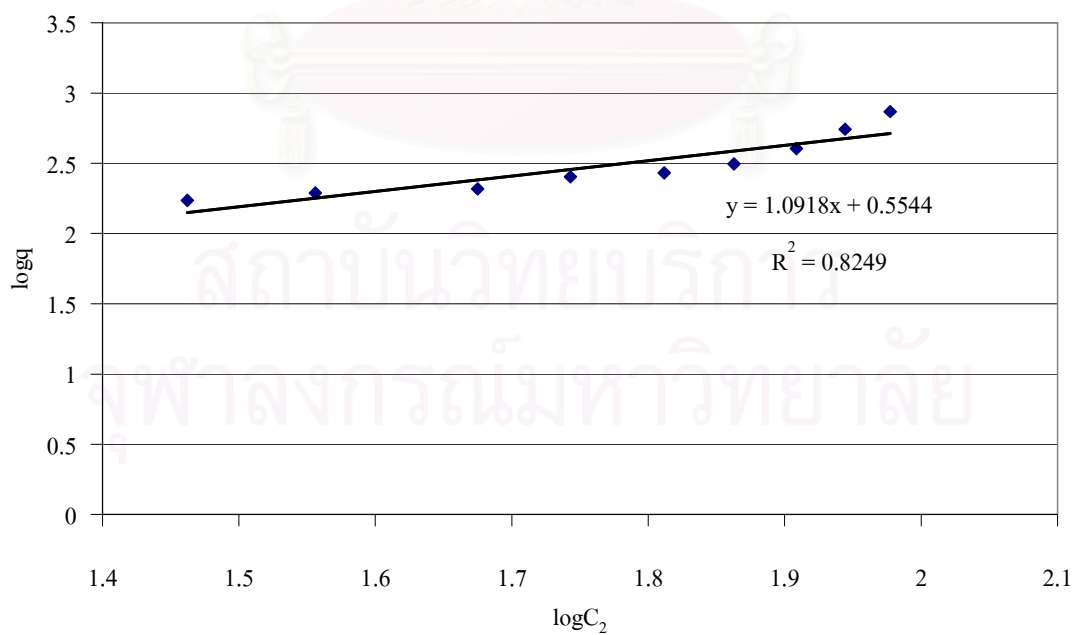
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.4 แสดงแบบจำลองสมมูลการดูดซับน้ำกรณีถ่านก่อนการดูดซับเป็ยกน้ำที่อุณหภูมิ

28 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข.7 แสดงแสดงการพอดีเส้นโค้งข้อมูลสมมูลการดูดซับแบบแลงมัวร์



รูปที่ ข.8 แสดงแสดงการพอดีเส้นโค้งข้อมูลสมมูลการดูดซับแบบฟรุนดลิช

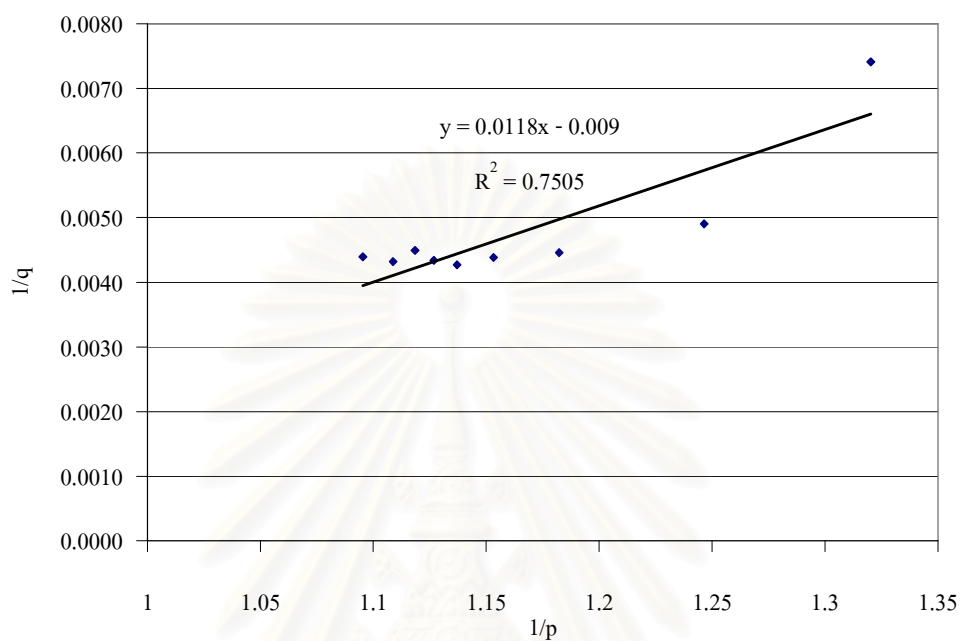
เมื่อพิจารณาจากรูปที่ ข.5 ค่า R^2 ของการถดถอยเชิงเส้น (Regression Line) ของสมดุลการดูดซับแบบแลงมัวร์ เท่ากับ 0.0778 และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ ข.5 ค่า R^2 ของการถดถอยเชิงเส้น (Regression Line) ของสมดุลการดูดซับแบบฟรุนดิช เท่ากับ 0.8249 พบว่าค่า R^2 ของการถดถอยเชิงเส้นของสมดุลการดูดซับแบบฟรุนดิชมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าแสดงว่า สมดุลการดูดซับของของผสมเอทานอล-น้ำของถ่านกัมมันต์มีความสอดคล้องกับแบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดิชมากกว่าแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงมัวร์

จากกราฟรูปที่ ข.8 สามารถแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างความเข้มข้นของผสมเอทานอล-น้ำหลังการดูดซับ กับความเข้มข้นของผสมเอทานอล-น้ำหลังการดูดซับต่อปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ดังสมการต่อไปนี้ :

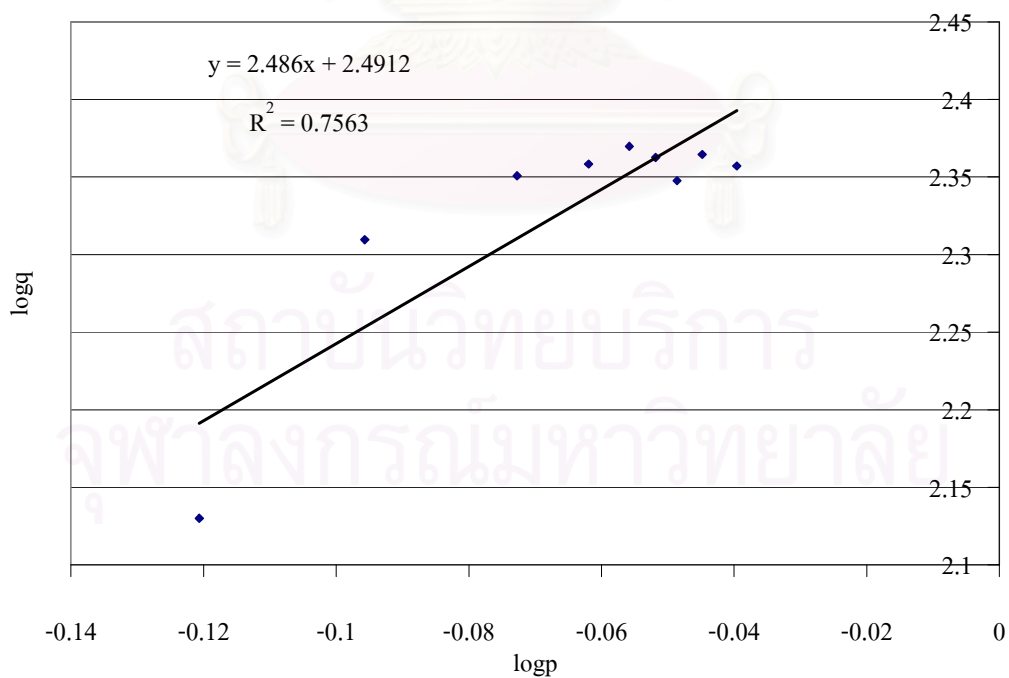
$$\log q = 1.0918 \log C_2 + 0.5544 \quad (\text{ข.8})$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.5 แสดงแบบจำลองสมดุลการดูดซับเอทานอล-น้ำกรณีถ่านก่อนการดูดซับแห้งที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข.5 แสดงผลการพอดิเส้นโค้งข้อมูลสมดุลการดูดซับแบบแลงมัวร์



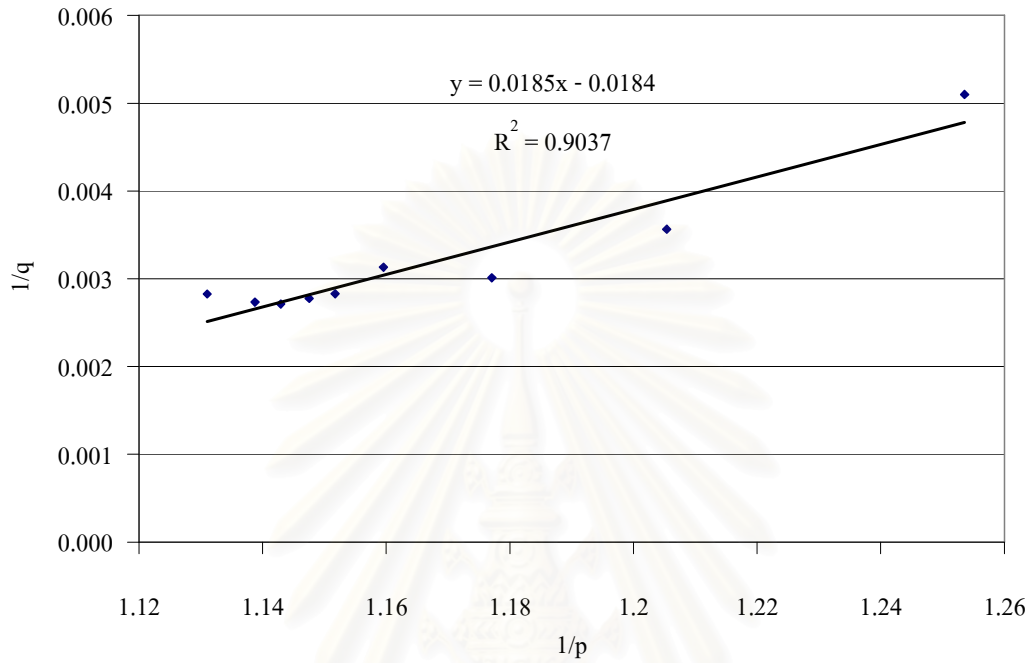
รูปที่ ข.6 แสดงผลการพอดิเส้นโค้งข้อมูลสมดุลการดูดซับแบบฟรุนดลิช

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ ข.5 ค่า R^2 ของการถดถอยเชิงเส้น (Regression Line) ของสมการการคูณแบบแลงมัวร์ เท่ากับ 0.7505 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ ข.6 ค่า R^2 ของการถดถอยเชิงเส้น (Regression Line) ของสมการคูณแบบฟรุนดิช เท่ากับ 0.7563 พบว่าค่า R^2 ของการถดถอยเชิงเส้นของสมการคูณแบบแลงมัวร์มีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองสมการคูณแบบฟรุนดิช

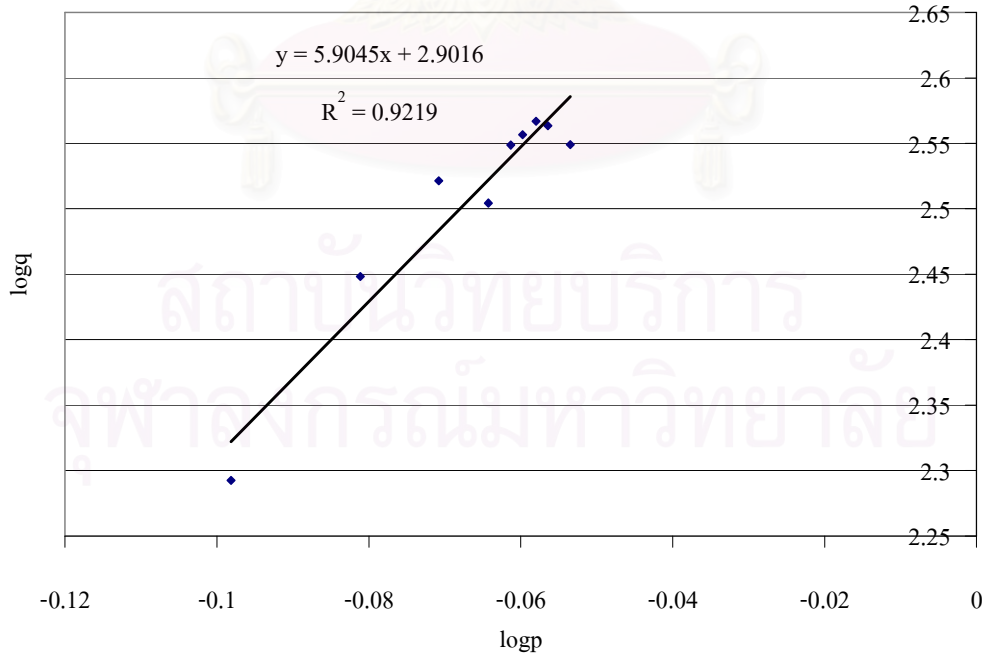


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.3 แสดงแบบจำลองสมดุลการดูดซับเอทานอล-น้ำกรณีถ่านก่อนการดูดซับเป็ยกน้ำที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข.7 แสดงแสดงการพหุคูณเส้นโค้งข้อมูลสมดุลการดูดซับแบบแลงมัวร์



รูปที่ ข.8 แสดงแสดงการพหุคูณเส้นโค้งข้อมูลสมดุลการดูดซับแบบฟรุนดลิช

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ ข.7 ค่า R^2 ของการถดถอยเชิงเส้น (Regression Line) ของสมมูลการดู
ชั้นแบบแลงมัวร์ เท่ากับ 0.9037 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ ข.8 ค่า R^2 ของการถดถอยเชิงเส้น (Regression
Line) ของสมมูลการดูชั้นแบบฟรุนดิช เท่ากับ 0.9219 พบว่าค่า R^2 ของการถดถอยเชิงเส้นของสมมูล
การดูชั้นแบบแลงมัวร์มีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองสมมูลการดูชั้นแบบฟรุนดิช



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค : ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของกราฟสอบเทียบความเข้มข้นกับดัชนีหักเหแสง

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองแสดงความหนาแน่น ความเข้มข้นและดัชนีหักเหแสงของของผสมเอทานอล-น้ำ ที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส

สัดส่วนโดยปริมาตร		น้ำหนัก pycnometer + เอทานอล			น้ำหนัก เอทานอล (g)			ความหนาแน่น เอทานอล (g/cm ³)				ความเข้มข้น %weight	ดัชนีหักเหแสง			
เอทานอล	น้ำ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	10	26.5539	26.5590	26.5591	9.9225	9.9276	9.9277	0.9945	0.9950	0.9951	0.9949	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
0.25	9.75	26.5166	26.5151	26.5161	9.8852	9.8837	9.8847	0.9908	0.9906	0.9907	0.9907	3.4924	2.0	2.0	2.0	2.0
0.50	9.50	26.4855	26.4870	26.4850	9.8605	9.8620	9.8600	0.9883	0.9885	0.9883	0.9884	5.1302	2.8	2.8	2.8	2.8
0.75	9.25	26.4538	26.4520	26.4550	9.8288	9.8270	9.8300	0.9851	0.9850	0.9853	0.9851	7.3275	3.8	3.8	3.8	3.8
1.00	9.00	26.3776	26.3641	26.4042	9.7526	9.7391	9.7792	0.9775	0.9762	0.9802	0.9779	12.0879	3.0	3.2	3.1	3.1
1.50	8.50	26.3197	26.3126	26.3157	9.6947	9.6876	9.6907	0.9717	0.9710	0.9713	0.9713	16.3252	6.0	6.0	6.0	6.0
2.00	8.00	26.2995	26.2778	26.3193	9.6681	9.6464	9.6879	0.9690	0.9669	0.9710	0.9690	17.8036	6.2	6.4	6.0	6.2
3.00	7.00	26.0888	26.1105	26.1101	9.4574	9.4791	9.4787	0.9479	0.9501	0.9501	0.9494	29.4501	9.4	10.6	9.6	9.9
4.00	6.00	26.0025	26.0248	26.0555	9.3711	9.3934	9.4241	0.9393	0.9415	0.9446	0.9418	33.6494	12.4	12.4	12.0	12.3
5.00	5.00	25.8185	25.8944	25.8790	9.1871	9.2630	9.2476	0.9208	0.9284	0.9269	0.9254	42.2290	14.6	14.2	14.0	14.3
6.00	4.00	25.6837	25.6728	25.7716	9.0523	9.0414	9.1402	0.9073	0.9062	0.9161	0.9099	49.7434	15.8	16.0	15.6	15.8
7.00	3.00	25.4698	25.5741	25.5015	8.8384	8.9427	8.8701	0.8859	0.8963	0.8891	0.8904	58.4874	17.4	16.6	17.0	17.0
8.00	2.00	25.1830	25.2996	25.2903	8.5516	8.6682	8.6589	0.8571	0.8688	0.8679	0.8646	69.1603	18.4	18.4	18.3	18.4
9.00	1.00	24.9799	25.0587	25.0415	8.3485	8.4273	8.4101	0.8368	0.8447	0.8429	0.8415	78.1937	18.6	19.0	18.7	18.8
10.00	0.00	24.7728	24.7557	24.7689	8.1414	8.1243	8.1375	0.8160	0.8143	0.8156	0.8153	88.3104	18.6	19.0	18.9	18.8

ตารางที่ ค.2 ผลการทดลองแสดงความหนาแน่น ความเข้มข้นและดัชนีหักเหแสงของของผสมเอทานอล-น้ำ ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส

สัดส่วน โดยปริมาตร		น้ำหนัก pycnometer + เอทานอล			น้ำหนัก เอทานอล (g)			ความหนาแน่น เอทานอล (g/cm ³)				ความเข้มข้น %weight	ดัชนีหักเหแสง			
เอทานอล	น้ำ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	10	26.5603	26.5590	26.5599	9.9289	9.9276	9.9285	0.9952	0.9950	0.9951	0.9951	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
0.25	9.75	26.5198	26.5211	26.5245	9.8884	9.8897	9.8931	0.9911	0.9912	0.9916	0.9913	2.7312	2.0	2.0	2.0	2.0
0.50	9.50	26.4951	26.4914	26.4932	9.8701	9.8664	9.8682	0.9893	0.9889	0.9891	0.9891	4.2465	2.8	2.8	2.8	2.8
0.75	9.25	26.4624	26.4631	26.4595	9.8374	9.8381	9.8345	0.9860	0.9861	0.9857	0.9859	6.3772	3.8	3.8	3.8	3.8
1.00	9.00	26.4127	26.4133	26.4134	9.7813	9.7819	9.7820	0.9804	0.9804	0.9805	0.9804	10.0103	5.0	5.0	5.0	5.0
1.50	8.50	26.3241	26.3245	26.3231	9.6991	9.6995	9.6981	0.9721	0.9722	0.9720	0.9721	15.3125	7.0	7.0	7.0	7.0
2.00	8.00	26.2829	26.3048	26.2989	9.6515	9.6734	9.6675	0.9674	0.9696	0.9690	0.9686	17.4762	7.4	7.4	7.6	7.5
3.00	7.00	26.1904	26.1891	26.1885	9.5590	9.5577	9.5571	0.9581	0.9580	0.9579	0.9580	23.8668	9.8	9.4	9.8	9.7
4.00	6.00	26.0397	26.0489	26.0025	9.4083	9.4175	9.3711	0.9430	0.9439	0.9393	0.9421	32.8446	12.4	12.5	12.6	12.5
5.00	5.00	25.8816	25.8741	25.8521	9.2502	9.2427	9.2207	0.9272	0.9264	0.9242	0.9259	41.2777	14.4	14.8	14.6	14.6
6.00	4.00	25.7050	25.7135	25.6986	9.0736	9.0821	9.0672	0.9095	0.9103	0.9088	0.9095	49.2260	16.4	16.6	17.0	16.7
7.00	3.00	25.5091	25.5412	25.5283	8.8777	8.9098	8.8969	0.8898	0.8930	0.8917	0.8915	57.3338	17.6	18.0	17.6	17.7
8.00	2.00	25.3031	25.3127	25.2952	8.6717	8.6813	8.6638	0.8692	0.8701	0.8684	0.8692	66.6743	18.4	18.8	19.0	18.7
9.00	1.00	25.0673	25.0594	25.0194	8.4359	8.4280	8.3880	0.8455	0.8447	0.8407	0.8437	76.7434	18.8	19.0	19.1	19.0
10.00	0.00	24.7847	24.8794	24.8215	8.1533	8.2480	8.1901	0.8172	0.8267	0.8209	0.8216	85.2532	18.8	19.0	19.0	18.9

ตารางที่ ค.3 ผลการทดลองแสดงความหนาแน่น ความเข้มข้นและดัชนีหักเหแสงของของผสมเอทานอล-น้ำ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

สัดส่วนโดยปริมาตร		น้ำหนัก pycnometer + เอทานอล			น้ำหนัก เอทานอล (g)			ความหนาแน่น เอทานอล (g/cm ³)				ความเข้มข้น %weight	ดัชนีหักเหแสง			
เอทานอล	น้ำ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	10	26.5621	26.5556	26.5456	9.9371	9.9405	9.9305	0.9960	0.9963	0.9953	0.9962	0.00	0	0	0	0.0
0.25	9.75	26.5201	26.5265	26.5260	9.8887	9.8951	9.8946	0.9911	0.9918	0.9917	0.9916	2.20	2.0	2.0	2.0	2.0
0.50	9.50	26.4974	26.4965	26.4941	9.8724	9.8715	9.8691	0.9895	0.9894	0.9892	0.9894	3.67	2.8	2.8	2.8	2.8
0.75	9.25	26.4723	26.4717	26.4721	9.8473	9.8467	9.8471	0.9870	0.9869	0.9870	0.9870	5.27	3.8	3.8	3.8	3.8
1	9	26.4174	26.4165	26.4113	9.7924	9.8014	9.7962	0.9815	0.9824	0.9819	0.9819	8.58	5.0	5.0	5.0	5.0
1.50	8.50	26.3325	26.3298	26.3341	9.7075	9.7048	9.7091	0.9730	0.9727	0.9731	0.9730	14.28	7.0	7.0	7.0	7.0
2	8	26.3225	26.3161	26.3061	9.6975	9.7010	9.6910	0.9720	0.9723	0.9713	0.9722	14.77	7.4	7.4	7.6	7.5
3	7	26.2102	26.2026	26.1926	9.5852	9.5875	9.5775	0.9607	0.9610	0.9600	0.9608	21.61	9.4	9.5	9.4	9.4
4	6	26.0707	26.0652	26.0552	9.4457	9.4501	9.4401	0.9467	0.9472	0.9462	0.9470	29.52	12.2	12.4	12.3	12.3
5	5	25.9163	25.9049	25.8949	9.2913	9.2898	9.2798	0.9313	0.9311	0.9301	0.9312	37.92	14.6	14.6	14.6	14.6
6	4	25.7271	25.7277	25.7177	9.1021	9.1126	9.1026	0.9123	0.9134	0.9124	0.9128	46.98	16.4	16.4	16.4	16.4
7	3	25.515	25.5261	25.5161	8.8900	8.9110	8.9010	0.8910	0.8932	0.8922	0.8921	56.42	17.4	17.7	17.5	17.5
8	2	25.3086	25.2960	25.2860	8.6836	8.6809	8.6709	0.8704	0.8701	0.8691	0.8702	65.63	18.6	18.7	18.6	18.6
9	1	25.0563	25.0714	25.0614	8.4313	8.4563	8.4463	0.8451	0.8476	0.8466	0.8463	75.11	19.2	19.2	19.1	19.2
10	0	24.7813	24.7806	24.7706	8.1563	8.1655	8.1555	0.8175	0.8184	0.8174	0.8180	86.06	19.2	19.2	19.2	19.2

ตารางที่ ค.4 แสดงผลการประเมินทางสถิติของค่าดัชนีหักเหแสงที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ

ความเข้มข้น (%Vol)	ดัชนีหักเหแสง												ค่าความแปรปรวน	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	อุณหภูมิ (°C)									ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด		
	26			28			30							
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3					
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.00
5.0	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	0.0	0.00
7.5	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	0.0	0.00
10.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	0.0	0.00
15.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	0.0	0.00
20.0	7.8	7.6	7.4	7.4	7.4	7.6	7.4	7.4	7.6	7.5	7.8	7.4	0.3	0.14
30.0	10.6	9.6	9.4	9.8	9.4	9.8	9.4	9.5	9.4	9.7	10.6	9.4	0.9	0.37
40.0	12.4	12.4	12.0	12.4	12.5	12.6	12.2	12.4	12.3	12.4	12.6	12.0	0.2	0.16
50.0	14.6	14.2	14.0	14.4	14.8	14.6	14.6	14.6	14.6	14.5	14.8	14.0	0.3	0.23
60.0	16.0	15.8	15.6	16.4	16.6	17.0	16.4	16.4	16.4	16.3	17.0	15.6	0.7	0.40
70.0	17.4	17.0	16.6	17.6	18.0	17.6	17.4	17.7	17.5	17.4	18.0	16.6	0.6	0.39

ตารางที่ ค.5 ต่อ แสดงผลการประเมินทางสถิติของค่าดัชนีหักเหแสงที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ

ความเข้มข้น (%Vol)	ดัชนีหักเหแสง												ค่าความแปรปรวน	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	อุณหภูมิ (°C)									ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด		
	26			28			30							
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3					
80.0	18.4	18.4	18.3	18.4	18.8	19.0	18.6	18.7	18.6	18.6	19.0	18.3	0.4	0.21
90.0	19.0	18.7	18.6	18.8	19.0	19.1	19.2	19.2	19.1	19.0	19.2	18.6	0.2	0.21
100.0	19.0	18.9	18.6	18.8	19.0	19.0	19.2	19.2	19.2	19.0	19.2	18.6	0.2	0.19

ตารางที่ ค.6 แสดงผลการประเมิน P-Value ของกลุ่มประชากรค่าดัชนีหักเหแสงที่วัดได้แต่ละความเข้มข้นเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่ใกล้เคียงกัน

	ความเข้มข้น (%vol)											
	0 vs. 2.5	2.5 vs. 5	5 vs. 7.5	7.5 vs. 10	10 vs. 15	15 vs. 20	20 vs. 30	30 vs. 40	40 vs. 50	50 vs. 60	60 vs. 70	
P-Value	0	0	0	0	0	0	0.0056	0.0172	0.0170	0.0727	0.4556	

	ความเข้มข้น (%vol)		
	70 vs. 80	80 vs. 90	90 vs. 100
P-Value	0.0594	0.4512	0.4215

ตารางที่ ค.7 แสดงผลความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำที่คำนวณได้จากวิธีเจือจางด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส

สัดส่วนโดยปริมาตร		น้ำหนักของผสม ก่อนเจือจาง (g)	ความเข้มข้น ¹ (%weight)	Diff ²	น้ำหนักของผสม หลังเจือจาง(g)	ดัชนีหักเหแสง	ความเข้มข้น หลังเจือจาง (%weight)	ความเข้มข้น ก่อนเจือจาง(%weight)	Diff ²
เอทานอล	น้ำ								
0.25	9.75	2.4788	2.9449	0.5475	2.8052	0.8000	2.4463	2.7685	0.7239
0.50	9.50	2.4721	4.7984	0.3318	2.7894	1.9000	3.7359	4.2154	0.9148
0.75	9.25	2.4651	6.7092	0.6183	4.0430	2.2000	4.1723	6.8430	0.4845
1.00	9.00	2.4553	9.3408	2.7471	5.5875	2.6000	4.8019	10.9276	1.1603
1.50	8.50	2.4417	12.9100	3.4153	5.6607	3.4000	6.2090	14.3945	1.9307
2.00	8.00	2.4067	21.6655	-3.8619	5.4603	4.2000	7.7930	17.6808	0.1228
3.00	7.00	2.3739	29.3353	0.1149	5.8347	5.8000	11.4250	28.0809	1.3692
4.00	6.00	2.3587	32.7234	0.9259	5.1368	7.2000	15.0506	32.7773	0.8721
5.00	5.00	2.2959	45.7025	-3.4735	4.7834	9.0000	20.2545	42.1993	0.0297
6.00	4.00	2.2526	53.8059	-4.0625	4.7254	10.0000	23.3875	49.0612	0.6821
7.00	3.00	2.2368	56.6160	1.8713	4.8788	11.0000	26.6832	58.2000	0.2873
8.00	2.00	2.2268	58.3583	10.8019	4.8468	12.4000	31.5633	68.6998	0.4604
9.00	1.00	2.1422	72.2144	5.9793	4.7034	13.2000	34.4951	75.7372	2.4565
10.00	0.00	2.0851	81.0506	7.2599	4.6966	14.2000	38.3290	86.3345	1.9760

หมายเหตุ

¹ คือ ความเข้มข้นที่ได้จากการวัดความหนาแน่นที่ปริมาตรของของผสมก่อนเจือจางเท่ากับ 2.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร

² คือ ค่าความแตกต่างจากความเข้มข้นที่วัดได้โดยใช้ขวดวัดความหนาแน่นจากตารางที่ 2

ตารางที่ ค.8 แสดงผลความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำที่คำนวณได้จากวิธีเจือจางด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

สัดส่วนโดยปริมาตร		น้ำหนักของผสม ก่อนเจือจาง (g)	ความเข้มข้น ¹ (%weight)	Diff ²	น้ำหนักของผสม หลังเจือจาง(g)	ดัชนีหักเหแสง	ความเข้มข้น หลังเจือจาง (%weight)	ความเข้มข้น ก่อนเจือจาง(%weight)	Diff ²
เอทานอล	น้ำ								
0.25	9.75	2.4788	2.9449	0.547	2.805	0.8	2.45	2.77	0.72
0.50	9.50	2.4721	4.7984	0.332	2.789	1.9	3.74	4.22	0.91
0.75	9.25	2.4651	6.7092	0.618	4.043	2.2	4.17	6.84	0.48
1.00	9.00	2.4553	9.3408	2.747	5.588	2.6	4.80	10.93	1.16
1.50	8.50	2.4417	12.9100	3.415	5.661	3.4	6.21	14.39	1.93
2.00	8.00	2.4067	21.6655	-3.862	5.4603	4.2	7.79	17.68	0.12
3.00	7.00	2.3739	29.3353	0.115	6.0347	5.8	11.42	29.04	0.41
4.00	6.00	2.3587	32.7234	0.926	5.1368	7.2	15.05	32.78	0.87
5.00	5.00	2.2959	45.7025	-3.473	4.7834	9	20.25	42.20	0.03
6.00	4.00	2.2526	53.8059	-4.063	4.7254	10	23.39	49.06	0.68
7.00	3.00	2.2368	56.6160	1.871	4.8788	11	26.68	58.20	0.29
8.00	2.00	2.2268	58.3583	10.802	4.8468	12.4	31.56	68.70	0.46
9.00	1.00	2.1422	72.2144	5.979	4.8034	13.2	34.50	77.35	0.85
10.00	0.00	2.0851	81.0506	7.260	4.6966	14.2	38.33	86.33	1.98

หมายเหตุ ¹ คือ ความเข้มข้นที่ได้จากการวัดความหนาแน่นที่ปริมาตรของของผสมก่อนเจือจางเท่ากับ 2.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร

² คือ ค่าความแตกต่างจากความเข้มข้นที่วัดได้โดยใช้ขวดวัดความหนาแน่นจากตารางที่

ภาคผนวก ง : ผลการทดลองสมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียสและสมดุลการคายกลับที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสของผสมเอทานอล-น้ำในถ่านกัมมันต์
ก่อนการดูดซับแห้ง

ตารางที่ ง.1 แสดงผลความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำที่เปลี่ยนแปลงไปก่อนและหลังดูดซับ

สัดส่วนโดยปริมาตร (ml)		ก่อนการดูดซับ				หลังการดูดซับ			
เอทานอล	น้ำ	น้ำหนักของผสม (g)	ความเข้มข้น (%wt)	น้ำหนักเอทานอล (g)	น้ำหนักน้ำ (g)	น้ำหนักของผสม (g)	ความเข้มข้น (%wt)	น้ำหนักเอทานอล (g)	น้ำหนักน้ำ (g)
1	9	94.1516	7.6923	7.2424	86.9092	82.0629	5.2507	4.3089	77.7540
2	8	92.0144	16.7268	15.3911	76.6233	81.5032	13.1632	10.7284	70.7748
3	7	91.1633	26.2616	23.9409	67.2224	81.7022	22.3592	18.2679	63.4343
4	6	88.5772	35.6845	31.6083	56.9689	79.5268	31.6016	25.1317	54.3951
5	5	86.7535	42.5547	36.9177	49.8358	77.8796	38.7795	30.2013	47.6783
6	4	85.6728	53.6808	45.9898	39.6830	77.0695	50.8180	39.1652	37.9043
7	3	83.5415	58.3057	48.7094	34.8321	75.0905	55.7213	41.8414	33.2491
8	2	82.5967	71.7019	59.2234	23.3733	74.4412	69.9805	52.0943	22.3469
9	1	81.7895	87.7354	71.7584	10.0311	73.7695	87.3160	64.4126	9.3569

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.2 แสดงผลความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำในไอคาบกลับควบแน่น

สัดส่วนโดยปริมาตร (ml)		การคายกลับ			
เอทานอล	น้ำ	น้ำหนักของผสม (g)	ความเข้มข้น (%wt)	น้ำหนักเอทานอล (g)	น้ำหนักน้ำ (g)
1	9	2.215	39.9443	0.8848	1.3302
2	8	2.7849	52.5717	1.4641	1.3208
3	7	3.6579	65.4957	2.3958	1.2621
4	6	4.1025	72.1427	2.9597	1.1428
5	5	4.1493	76.2990	3.1659	0.9834
6	4	4.197	79.0385	3.3172	0.8798
7	3	4.3432	81.8898	3.5566	0.7866
8	2	4.0609	85.4041	3.4682	0.5927
9	1	4.2179	91.9078	3.8766	0.3413

ตารางที่ ๓.3 แสดงสมดุลมวลสารของเอทานอลในระบบ

สัดส่วนโดยปริมาตร (ml)		น้ำหนักเอทานอล (g)				
เอทานอล	น้ำ	เริ่มต้น	ที่ไม่ถูกดูดซับในถ่าน	ที่ถูกดูดซับในถ่าน	ที่คายกลับออกมาจากถ่าน	ที่เหลือในถ่านหลังคายกลับ
1	9	7.2424	4.3089	2.9335	0.8849	2.0487
2	8	15.3911	10.7284	4.6626	1.4723	3.1904
3	7	23.9409	18.2679	5.6730	2.3661	3.3068
4	6	31.6083	25.1317	6.4766	2.9597	3.5169
5	5	36.9177	30.2013	6.7163	3.1799	3.5364
6	4	45.9898	39.1652	6.8246	3.3172	3.5074
7	3	48.7094	41.8414	6.8680	3.4904	3.3776
8	2	59.2234	52.0943	7.1290	3.4636	3.6655
9	1	71.7584	64.4126	7.3458	3.8711	3.4747

ตารางที่ ง.4 แสดงสมดุลมวลสารของน้ำในระบบ

สัดส่วนโดยปริมาตร (ml)		น้ำหนักน้ำ (g)				
เอทานอล	น้ำ	เริ่มต้น	ที่ไม่ถูกดูดซับในถ่าน	ที่ถูกดูดซับในถ่าน	ที่คายกลับออกมาจากถ่าน	ที่เหลือในถ่านหลังคายกลับ
1	9	86.9092	77.7540	9.1552	1.3301	7.8250
2	8	76.6233	70.7748	5.8486	1.3126	4.5359
3	7	67.2224	63.4343	3.7881	1.2918	2.4964
4	6	56.9689	54.3951	2.5738	1.1428	1.4310
5	5	49.8358	47.6783	2.1576	0.9694	1.1882
6	4	39.6830	37.9043	1.7787	0.8798	0.8989
7	3	34.8321	33.2491	1.5830	0.8528	0.7302
8	2	23.3733	22.3469	1.0265	0.5973	0.4291
9	1	10.0311	9.3569	0.6742	0.3468	0.3274

ตารางที่ ๓.5 หาคความชันของเส้น Tie-Line ของสมดุลไอของเหลวของการดูดซับและคายกลับของผสมเอทานอล-น้ำ

z_{EtOH}	x_{EtOH}	T_1	y_{EtOH}	T_2	deltax	deltay	SLOPE
0.24	0.21	86.63	0.40	94.05	0.1920	7.42	38.66
0.44	0.40	82.83	0.53	91.40	0.1228	8.57	69.74
0.61	0.59	80.91	0.65	86.84	0.0660	5.93	89.90
0.71	0.70	79.85	0.72	83.99	0.0210	4.14	197.52
0.76	0.76	79.36	0.76	82.24	0.0063	2.88	458.17
0.79	0.79	79.10	0.79	81.10	0.0030	2.00	670.91
0.82	0.82	78.87	0.82	80.18	-0.0020	1.31	-646.96
0.85	0.86	78.65	0.85	79.17	-0.0013	0.52	-387.08
0.91	0.91	78.38	0.92	78.11	0.0090	-0.27	-30.04

ตารางที่ ๖.6 ใช้หลักการวิเคราะห์เส้น Tie-Line เพื่อคำนวณปริมาณไอน้ำต่อปริมาณของเหลวเปรียบเทียบกับปริมาณไอน้ำต่อปริมาณของเหลวที่วัดจริงจากการทดลอง

Z_{EtOH}	x_{EtOH}	y_{EtOH}	T_1	T_2	$B = y-x$	$A = T_2-T_1$	$\text{sqrt}(A_2+B_2)=C$	$D=z-x$	$E=(D*(C/B))$	$E/(C-E)=V/L$	V/L lab
0.24	0.21	0.40	86.63	94.05	0.19	7.42	7.42	0.04	1.36	0.22	0.22
0.44	0.40	0.53	82.83	91.40	0.12	8.57	8.57	0.03	2.27	0.36	0.36
0.61	0.59	0.65	80.91	86.84	0.07	5.93	5.93	0.03	2.29	0.63	0.63
0.71	0.70	0.72	79.85	83.99	0.02	4.14	4.14	0.01	1.88	0.83	0.83
0.76	0.76	0.76	79.36	82.24	0.01	2.88	2.88	0.00	1.35	0.88	0.88
0.79	0.79	0.79	79.10	81.10	0.00	2.00	2.00	0.00	0.98	0.95	0.95
0.82	0.82	0.82	78.87	80.18	0.00	1.31	1.31	0.00	0.67	1.06	1.06
0.85	0.86	0.85	78.65	79.17	0.00	0.52	0.52	0.00	0.26	0.99	0.99
0.91	0.91	0.92	78.38	78.11	0.01	-0.27	0.27	0.00	0.14	1.11	1.11

ตารางที่ ๗.7 แสดงผลการวัดความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำก่อนการดูดซับ

สัดส่วนโดยปริมาตร		ก่อนเจือจางด้วยน้ำ			หลังเจือจางด้วยน้ำ			คำนวณความเข้มข้นเริ่มต้น ก่อนเจือจางด้วยน้ำ (%wt)
ก่อนการดูดซับ (ml)		ดัชนีหักเหแสง	ความเข้มข้น (%wt)	น้ำหนักของผสม (g) ปริมาตร 2.5 ml	น้ำหนักของผสม (g) ปริมาตร 5 ml	ดัชนีหักเหแสง	ความเข้มข้น (%wt)	
เอทานอล	น้ำ							
1	9	4.2	7.6923	-	-	-	-	-
2	8	7.4	16.7268	-	-	-	-	-
3	7	10.4	26.2616	-	-	-	-	-
4	6	13.2	35.6845	-	-	-	-	-
5	5	14.8	41.2019	2.1655	4.6487	8.4	19.8189	42.5455
6	4	16.8	-	2.1074	4.5342	10	24.9497	53.6808
7	3	17.6	-	2.0720	4.4875	10.6	26.9213	58.3057
8	2	18.4	-	2.0033	4.4501	12.2	32.2780	71.7019
9	1	19.4	-	1.9347	4.3771	14.1	38.7795	87.7354

ตารางที่ ๓.8 แสดงผลการวัดความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำหลังการดูดซับ

สัดส่วนโดยปริมาตร		ก่อนเจือจางด้วยน้ำ			หลังเจือจางด้วยน้ำ			คำนวณความเข้มข้นเริ่มต้น ก่อนเจือจางด้วยน้ำ (%wt)
ก่อนการดูดซับ (ml)		ดัชนีหักเหแสง	ความเข้มข้น (%wt)	น้ำหนักของผสม (g) ปริมาตร 2.5 ml	น้ำหนักของผสม (g) ปริมาตร 5 ml	ดัชนีหักเหแสง	ความเข้มข้น (%wt)	
เอทานอล	น้ำ							
1	9	3.2	5.2507	-	-	-	-	-
2	8	6.2	13.1632	-	-	-	-	-
3	7	9.2	22.3592	-	-	-	-	-
4	6	12.0	31.6016	-	-	-	-	-
5	5	14.1	38.7795	-	-	-	-	-
6	4	16.1	-	2.1178	4.5509	9.6	23.6486	50.8180
7	3	17.4	-	2.0897	4.5477	10.2	25.6043	55.7213
8	2	18.0	-	2.0092	4.4493	12	31.6016	69.9805
9	1	19.2	-	1.9355	4.3971	14	38.4344	87.3160

ตารางที่ 9.9 แสดงผลการวัดความเข้มข้นของผสมเอทานอล-น้ำในไอควบแน่น

สัดส่วนโดยปริมาตร		ก่อนเจือจางด้วยน้ำ			หลังเจือจางด้วยน้ำ			คำนวณความเข้มข้นเริ่มต้น ก่อนเจือจางด้วยน้ำ (%wt)
ก่อนการดูดซับ (ml)		ดัชนีหักเหแสง	ความเข้มข้น (%wt)	น้ำหนักของผสม (g) ปริมาตร 2.5 ml	น้ำหนักของผสม (g) ปริมาตร 5 ml	ดัชนีหักเหแสง	ความเข้มข้น (%wt)	
เอทานอล	น้ำ							
1	9	14.4	39.9443	-	-	-	-	-
2	8	17.2	-	2.10931	4.5638	9.8	24.2977	52.5717
3	7	18.6	-	2.0459	4.5295	11.4	29.5833	65.4957
4	6	19.0	-	1.9992	4.4683	12.2	32.2780	72.1427
5	5	18.8	-	1.9840	4.4111	12.8	34.3173	76.2990
6	4	18.9	-	1.9709	4.3654	13.2	35.6845	79.0385
7	3	19.0	-	1.9601	4.4133	13.4	36.3701	81.8898
8	2	19.0	-	1.9423	4.3550	13.9	38.0897	85.4041
9	1	19.1	-	1.9182	4.3521	14.6	40.5086	91.9078

ตารางที่ 10 แสดงความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักถ่านที่เพิ่มขึ้นหลังดูดซับกับปริมาณเอทานอลและน้ำที่ถูกดูดซับจากการคำนวณสมดุลมวลสาร

สัดส่วนโดยปริมาตร		น้ำหนักถ่าน (g)	น้ำหนักถ่านหลังดูดซับ (g)	น้ำหนักถ่านเพิ่มขึ้น (g)	น้ำหนักเอทานอลและน้ำที่ถูกดูดซับ (g)	% สูญเสีย
ก่อนการดูดซับ (ml)	น้ำ					
เอทานอล	น้ำ					
1	9	15.1835	26.8778	11.6943	12.0887	3.262551
2	8	15.2615	24.8762	9.6147	10.5112	8.528998
3	7	15.238	24.2733	9.0353	9.4611	4.500534
4	6	15.1861	23.7786	8.5925	9.0504	5.059445
5	5	15.2604	23.3394	8.0790	8.8739	8.95773
6	4	15.0906	23.1558	8.0652	8.6033	6.254577
7	3	15.1468	22.78	7.6332	8.4510	9.676961
8	2	15.1299	22.0889	6.9590	8.1555	14.67108
9	1	15.2076	22.0004	6.7928	8.0200	15.30175

ตารางที่ ง.11 แสดงความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักถ่านหลังการคายกลับที่เพิ่มขึ้นจากน้ำหนักถ่านก่อนการดูดซับกับน้ำหนักของเหลวควบแน่นในไอคายกลับ

สัดส่วนโดยปริมาตร ก่อนการดูดซับ (ml)		น้ำหนักถ่าน หลังดูดซับ (g)	น้ำหนักถ่าน หลังคายกลับ (g)	น้ำหนักถ่านที่ลดลง หลังคายกลับ (g)	น้ำหนักไอคายกลับ ควบแน่น (g)	% สูญเสีย
เอทานอล	น้ำ					
1	9	26.8778	24.6382	2.2396	2.2150	1.09841
2	8	24.8762	22.3617	2.5145	2.7849	9.709505
3	7	24.2733	20.9445	3.3288	3.6579	8.996965
4	6	23.7786	20.1129	3.6657	4.1025	10.64717
5	5	23.3394	18.7333	4.6061	4.1493	-11.0091
6	4	23.1558	18.6747	4.4811	4.1970	6.339961
7	3	22.78	18.369	4.411	4.3432	-1.56106
8	2	22.0889	18.1539	3.935	4.0609	3.100298
9	1	22.0004	18.0602	3.9402	4.2179	6.583845

ตารางที่ ๑.12 แสดงความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักของผสมที่วัดจริงกับการคำนวณสมมูลมวลสาร

สัดส่วนโดยปริมาตร ก่อนการดูดซับ (ml)		น้ำหนักของผสม ก่อนการดูดซับ (g)	น้ำหนักถ่านเพิ่มขึ้น หลังดูดซับ (g)	น้ำหนักของผสม หลังการดูดซับ (g)	น้ำหนัก ของผสมก่อน-น้ำหนักถ่านเพิ่มขึ้น = น้ำหนักของผสมหลังดูดซับ (g)	% ความคลาดเคลื่อน
เอทานอล	น้ำ					
1	9	94.1516	11.6943	82.0629	82.4573	0.478308
2	8	92.0144	9.6147	81.5032	82.3997	1.087989
3	7	91.1633	9.0353	81.7022	82.1280	0.518459
4	6	88.5772	8.5925	79.5268	79.9847	0.572484
5	5	86.7535	8.0790	77.8796	78.6745	1.010365
6	4	85.6728	8.0652	77.0695	77.6076	0.69336
7	3	83.5415	7.6332	75.0905	75.9083	1.077353
8	2	82.5967	6.9590	74.4412	75.6377	1.581883
9	1	81.7895	6.7928	73.7695	74.9967	1.636339

ภาคผนวก จ : ผลการทดลองสมมูลการดูดซับที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียสและสมมูลการคายกลับที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสของผสมเอทานอล-น้ำในถ่านกัมมันต์
ก่อนการดูดซับเปียกน้ำ

ตารางที่ จ.1 แสดงผลความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำที่เปลี่ยนแปลงไปก่อนและหลังดูดซับกรณีถ่านก่อนดูดซับเปียกน้ำ

สัดส่วนโดยปริมาตร (ml)		ก่อนการดูดซับ				หลังการดูดซับ			
เอทานอล	น้ำ	น้ำหนักของผสม (g)	ความเข้มข้น (%wt)	น้ำหนักเอทานอล (g)	น้ำหนักน้ำ (g)	น้ำหนักของผสม (g)	ความเข้มข้น (%wt)	น้ำหนักเอทานอล (g)	น้ำหนักน้ำ (g)
1	9	100.2384	8.7302	8.5721	91.6663	100.962	2.6839	5.1312	95.8308
2	8	99.421	17.9516	17.7003	81.7207	100.7175	8.2072	12.1073	88.6102
3	7	98.5757	24.6234	26.1013	72.4744	100.82707	14.9229	19.1167	81.7104
4	6	96.2045	35.6845	34.4133	61.7912	98.6423	23.6486	26.6897	71.9526
5	5	94.1253	45.0612	42.4441	51.6812	96.8014	32.9562	34.0596	62.7418
6	4	93.7972	55.1001	51.6659	42.1313	96.3077	44.6752	44.1593	52.1484
7	3	92.2846	64.1328	59.1851	33.0995	95.3305	52.6889	52.0654	43.2651
8	2	85.7661	76.2133	65.3707	20.3954	88.0167	64.0220	64.9820	23.0347
9	1	84.7947	83.8672	71.0701	13.7246	87.2529	71.0109	70.9989	16.2540

ตารางที่ จ.2 แสดงผลความเข้มข้นของผสมเอทานอล-น้ำในไอคาบกลับควบแน่นกรณีถ่านก่อนดูดซับเปียกน้ำ

สัดส่วนโดยปริมาตร (ml)		การคายกลับ			
เอทานอล	น้ำ	น้ำหนักของผสม (g)	ความเข้มข้น (%wt)	น้ำหนักเอทานอล (g)	น้ำหนักน้ำ (g)
1	9	0.9563	51.2534	0.4901	0.4662
2	8	2.2444	60.5252	1.3584	0.8860
3	7	2.9282	66.6852	1.9527	0.9755
4	6	4.0656	70.2428	2.8558	1.2098
5	5	4.1909	72.5337	3.0398	1.1511
6	4	4.3718	73.1364	3.1974	1.1744
7	3	4.5272	74.5194	3.3736	1.1536
8	2	4.6079	75.6914	3.4878	1.1201
9	1	4.8277	77.5798	3.7453	1.0824

ตารางที่ จ.3 แสดงสมดุลมวลสารของเอทานอลในระบบกรณีถ่านก่อนดูดซับเปียกน้ำ

สัดส่วนโดยปริมาตร (ml)		น้ำหนักเอทานอล (g)				
เอทานอล	น้ำ	เริ่มต้น	ที่ไม่ถูกดูดซับในถ่าน	ที่ถูกดูดซับในถ่าน	ที่คายกลับออกมาจากถ่าน	ที่เหลือในถ่านหลังคายกลับ
1	9	8.5721	5.1312	3.4409	0.4903	2.9506
2	8	17.7003	12.1073	5.5930	1.3610	4.2320
3	7	26.1013	19.1167	6.9846	1.9513	5.0334
4	6	34.4133	26.6897	7.7235	2.8716	4.8519
5	5	42.4441	34.0596	8.3846	3.0392	5.3453
6	4	51.6659	44.1593	7.5066	3.2162	4.2904
7	3	59.1851	52.0654	7.1197	3.3838	3.7358
8	2	65.3707	64.9820	0.3887	3.4949	-3.1062
9	1	71.0701	70.9989	0.0712	3.7651	-3.6939

ตารางที่ จ.4 แสดงสมดุลมวลสารของน้ำในระบบกรณีถ่านก่อนดูดซับเปียกน้ำ

สัดส่วนโดยปริมาตร (ml)		น้ำหนักน้ำ (g)					
เอทานอล	น้ำ	ในถ่านเปียกน้ำ	ในของผสม ก่อนการดูดซับ	ในของผสม หลังดูดซับ	ถูกดูดซับ	ที่คายกลับ ออกมาจากถ่าน	ที่เหลือในถ่าน หลังคายกลับ
1	9	15.2848	91.6663	95.8308	11.1203	0.466021185	10.6543
2	8	15.2467	81.7207	88.6102	8.3572	0.883395475	7.4738
3	7	15.3472	72.4744	81.7104	6.1112	0.976933996	5.1343
4	6	14.9237	61.7912	71.9526	4.7624	1.194012599	3.5684
5	5	15.1405	51.6812	62.7418	4.0798	1.151665217	2.9282
6	4	14.9688	42.1313	53.2821	3.8180	1.155647395	2.6624
7	3	15.1425	33.0995	45.1020	3.1400	1.143364959	1.9967
8	2	14.2116	20.3954	31.6666	2.9404	1.112987243	1.8274
9	1	14.1734	13.7246	25.2938	2.6042	1.062600873	1.5416

ตารางที่ จ.5 หาคความชันของเส้น Tie-Line ของสมดุลไอของเหลวของการดูดซับและคายกลับของผสมเอทานอล-น้ำกรณีผ่านก่อนดูดซับเปียกน้ำ

zEtOH	xEtOH	T1	yEtOH	T2	deltax	deltay	SLOPE
0.24	0.22	86.34	0.51	91.72	0.30	5.38	18.20
0.40	0.36	83.37	0.61	88.58	0.24	5.21	21.28
0.53	0.50	81.84	0.67	86.24	0.17	4.40	25.71
0.62	0.58	81.03	0.71	84.61	0.13	3.58	27.48
0.67	0.65	80.36	0.73	83.83	0.08	3.48	43.94
0.69	0.67	80.12	0.74	83.41	0.06	3.28	50.61
0.74	0.74	79.53	0.75	82.93	0.01	3.40	302.93
0.75	0.75	79.40	0.76	82.49	0.01	3.09	442.94
0.78	0.78	79.20	0.78	81.66	0.00	2.46	661.42

ตารางที่ ๖.6 ใช้หลักการวิเคราะห์เส้น Tie-Line เพื่อคำนวณปริมาณไอต่อปริมาณของเหลวเปรียบเทียบกับปริมาณไอต่อปริมาณของเหลวที่วัดจริงจากการทดลองกรณี ถ่านก่อนดูดซับเปียกน้ำ

zEtOH	xEtOH	yEtOH	T1	T2	B = y-x	A = T2-T1	$\sqrt{A^2+B^2}=C$	D=z-x	E=(D*(C/B))	E/(C-E)=V/L	V/L lab
0.24	0.22	0.51	86.34	91.72	0.30	5.38	5.39	0.02	0.35	0.07	0.07
0.40	0.36	0.61	83.37	88.58	0.24	5.21	5.22	0.04	0.84	0.19	0.19
0.53	0.50	0.67	81.84	86.24	0.17	4.40	4.41	0.04	0.99	0.29	0.29
0.62	0.58	0.71	81.03	84.61	0.13	3.58	3.58	0.04	1.17	0.48	0.48
0.67	0.65	0.73	80.36	83.83	0.08	3.48	3.48	0.03	1.17	0.51	0.51
0.69	0.67	0.74	80.12	83.41	0.06	3.28	3.28	0.02	1.15	0.54	0.54
0.74	0.74	0.75	79.53	82.93	0.01	3.40	3.40	0.00	1.27	0.60	0.60
0.75	0.75	0.76	79.40	82.49	0.01	3.09	3.09	0.00	1.19	0.63	0.63
0.78	0.78	0.78	79.20	81.66	0.00	2.46	2.46	0.00	1.01	0.70	0.70

ตารางที่ จ.7 แสดงผลการวัดความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำก่อนการดูดซับกรณีถ่านก่อนดูดซับเปียกน้ำ

สัดส่วนโดยปริมาตร		ก่อนเจือจางด้วยน้ำ			หลังเจือจางด้วยน้ำ			คำนวณความเข้มข้นเริ่มต้น ก่อนเจือจางด้วยน้ำ (%wt)
ก่อนการดูดซับ (ml)		ดัชนีหักเหแสง	ความเข้มข้น (%wt)	น้ำหนักของผสม (g) ปริมาตร 2.5 ml	น้ำหนักของผสม (g) ปริมาตร 5 ml	ดัชนีหักเหแสง	ความเข้มข้น (%wt)	
เอทานอล	น้ำ							
1	9	4.6	8.7302	-	-	-	-	-
2	8	7.8	17.9516	-	-	-	-	-
3	7	9.9	24.6234	-	-	-	-	-
4	6	13.2	35.6845	-	-	-	-	-
5	5	16	45.3776	2.1517	4.7415	8.6	20.4489	45.0612
6	4	16.4	-	2.2287	4.5615	10.6	26.9213	55.1001
7	3	17.8	-	2.0343	4.5121	11.2	28.9145	64.1328
8	2	18.7	-	1.9856	4.4097	12.8	34.3173	76.2133
9	1	18.8	-	1.9632	4.4431	13.6	37.0570	83.8672

ตารางที่ จ.8 แสดงผลการวัดความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำในไอควมแน่นกรณีถ้ำก่อนดูดซับเปียกน้ำ

สัดส่วนโดยปริมาตร		ก่อนเจือจางด้วยน้ำ			หลังเจือจางด้วยน้ำ			คำนวณความเข้มข้นเริ่มต้น ก่อนเจือจางด้วยน้ำ (%wt)
ก่อนการดูดซับ (ml)		ดัชนีหักเหแสง	ความเข้มข้น (%wt)	น้ำหนักของผสม (g) ปริมาตร 2.5 ml	น้ำหนักของผสม (g) ปริมาตร 5 ml	ดัชนีหักเหแสง	ความเข้มข้น (%wt)	
เอทานอล	น้ำ							
1	9	2	2.6839	-	-	-	-	-
2	8	4.4	8.2072	-	-	-	-	-
3	7	6.8	14.9229	-	-	-	-	-
4	6	9.6	23.6486	-	-	-	-	-
5	5	12.4	32.9562	-	-	-	-	-
6	4	14.4	-	2.079	4.6323	8.4	19.8189	44.1593
7	3	15.8	-	2.0343	4.6046	9.4	23.0024	52.0654
8	2	17.2	-	1.9856	4.4624	11.2	28.9145	64.9820
9	1	18	-	1.9632	4.4107	12	31.6016	70.9989

ตารางที่ จ.9 แสดงผลการวัดความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำหลังการดูดซับกรณีถ่านก่อนดูดซับเปียกน้ำ

สัดส่วนโดยปริมาตร		ก่อนเจือจางด้วยน้ำ			หลังเจือจางด้วยน้ำ			คำนวณความเข้มข้นเริ่มต้น ก่อนเจือจางด้วยน้ำ (%wt)
ก่อนการดูดซับ (ml)		ดัชนีหักเหแสง	ความเข้มข้น (%wt)	น้ำหนักของผสม (g) ปริมาตร 2.5 ml	น้ำหนักของผสม (g) ปริมาตร 5 ml	ดัชนีหักเหแสง	ความเข้มข้น (%wt)	
เอทานอล	น้ำ							
1	9	18.5	-	0.2706	5.1676	2.0	2.6839	51.2534
2	8	18.8	-	2.0653	4.5318	10.8	27.5834	60.5252
3	7	18.6	-	2.0351	4.4857	11.6	30.2541	66.6852
4	6	19.2	-	2.0111	4.4702	12.0	31.6016	70.2428
5	5	19.1	-	1.9781	4.4451	12.2	32.2780	72.5337
6	4	18.8	-	1.9954	4.4282	12.4	32.9562	73.1364
7	3	19.2	-	1.9924	4.4141	12.6	33.6360	74.5194
8	2	19.0	-	1.9987	4.4084	12.8	34.3173	75.6914
9	1	19.2	-	1.9764	4.3808	13.0	35.0002	77.5798

ตารางที่ จ.10 แสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างการวัดน้ำหนักน้ำหนักถ่านที่เพิ่มขึ้นหลังการดูดซับและจากการวัดน้ำหนักน้ำที่หายไปหลังการดูดซับ

ครั้งที่	น้ำหนัก (g)							% ความคลาดเคลื่อน
	ก่อนการดูดซับ		หลังการดูดซับ					
	น้ำ	ถ่าน	น้ำ	ถ่าน	น้ำที่หายไป	ถ่านที่เพิ่มขึ้น	น้ำที่หายไป-ถ่านที่เพิ่มขึ้น	
1	96.60	15.05	77.82	30.33	18.79	15.28	3.50	0.19
2	101.28	15.08	81.93	30.32	19.35	15.25	4.10	0.21
3	96.13	15.15	75.86	30.49	20.27	15.35	4.92	0.24
4	95.50	15.19	75.69	30.11	19.81	14.92	4.89	0.25
5	90.00	15.11	72.25	30.25	17.75	15.14	2.61	0.15
6	102.39	15.06	85.03	30.03	17.36	14.97	2.39	0.14
7	101.58	15.10	87.78	30.25	13.80	15.14	-1.34	-0.10
8	106.00	15.09	91.46	29.31	14.54	14.21	0.33	0.02
9	94.42	15.10	82.29	29.28	12.13	14.17	-2.04	-0.17

ตารางที่ จ.11 แสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างการคำนวณสมดุลมวลสารเพื่อหาน้ำหนักของผสมหลังการดูดซับและจากการวัดจริง

ความเข้มข้น ก่อนการดูดซับ (%weight)	น้ำหนักถ่าน เพิ่มขึ้น หลังดูดซับ (g)	น้ำหนักของผสมหลังการดูดซับ (g)		
		คำนวณ สมดุลมวลสาร	วัดน้ำหนัก จากการทดลองจริง	% ความคลาดเคลื่อน
8.73	13.86	101.66	100.962	0.69
17.95	13.55	101.11	100.7175	0.39
24.62	13.24	100.69	100.82707	-0.14
35.68	12.54	98.59	98.6423	-0.05
45.06	12.49	96.77	96.8014	-0.03
55.10	11.47	97.29	96.3077	1.01
64.13	10.66	96.77	95.3305	1.49
76.21	9.95	90.03	88.0167	2.23
83.87	9.71	89.26	87.2529	2.24

ตารางที่ จ.12 แสดงความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักถ่านที่เพิ่มขึ้นหลังดูดซับกับปริมาณเอทานอลและน้ำที่ถูกดูดซับจากการคำนวณสมดุลมวลสาร
กรณีถ่านก่อนดูดซับเปียกน้ำ

สัดส่วนโดยปริมาตร ก่อนการดูดซับ (ml)		น้ำหนักถ่าน (g)	น้ำหนักถ่านหลังดูดซับ (g)	น้ำหนักถ่านเพิ่มขึ้น (g)	น้ำหนักเอทานอลและน้ำที่ถูกดูดซับ จากการคำนวณ (g)	% สูญเสีย
เอทานอล	น้ำ					
1	9	15.0464	28.9098	13.8634	14.5612	4.792187
2	8	15.0778	28.632	13.5542	13.9502	2.838669
3	7	15.1476	28.3855	13.2379	13.0958	-1.08485
4	6	15.1894	27.7247	12.5353	12.4859	-0.39565
5	5	15.1129	27.6072	12.4943	12.4644	-0.23988
6	4	15.0564	26.5291	11.4727	11.3246	-1.30785
7	3	15.1048	25.7631	10.6583	10.2597	-3.8851
8	2	15.0944	25.047	9.9526	13.3291	-19.96
9	1	15.1017	24.8134	9.7117	12.6754	-20.998

ตารางที่ จ.13 แสดงความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักถ่านหลังการคายกลับที่เพิ่มขึ้นจากน้ำหนักถ่านก่อนการดูดซับกับน้ำหนักของเหลวควบแน่นใน ไอคายกลับ
กรณีถ่านก่อนดูดซับเปียกน้ำ

สัดส่วนโดยปริมาตร ก่อนการดูดซับ (ml)		น้ำหนักถ่าน หลังดูดซับ (g)	น้ำหนักถ่าน หลังคายกลับ (g)	น้ำหนักถ่านที่ลดลง หลังคายกลับ (g)	น้ำหนักเอทานอลและน้ำในไอคายกลับ (g)	% สูญเสีย
เอทานอล	น้ำ					
1	9	28.9098	27.5805	1.3293	0.9563	28.05988
2	8	28.632	26.5848	2.0472	2.2444	8.786313
3	7	28.3855	25.8268	2.5587	2.9282	12.61867
4	6	27.7247	23.9523	3.7724	4.0656	7.211728
5	5	27.6072	23.5451	4.0621	4.1909	3.073326
6	4	26.5291	21.9573	4.5718	4.3718	4.374645
7	3	25.7631	21.5259	4.2372	4.5272	6.405725
8	2	25.047	21.1207	3.9263	4.6079	14.79199
9	1	24.8134	21.0683	3.7451	4.8277	22.42476

ภาคผนวก จ : ผลการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการคายกลับเอทานอลออกจากถ่านกัมมันต์

ตารางที่ จ.1 ผลการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการคายกลับเอทานอลและน้ำออกจากถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับแห้ง

น้ำหนักของผสมเอทานอล-น้ำ		คำนวณช่วงแรก		คำนวณช่วงสอง		คำนวณช่วงสาม		พลังงานความร้อนรวม (KJ/gเอทานอลคายกลับ)
		พลังงานความร้อน		พลังงานความร้อนแฝง (KJ)		พลังงานความร้อน		
ก่อนการคายกลับ (Kg)	ไอลความแน่นคายกลับ (Kg)	(KJ/Kg ก่อนการคายกลับ)	(KJ)	เอทานอล	น้ำ	(KJ/Kg ไอลความแน่นคายกลับ)	(KJ)	
0.0121	0.0022	1958.27	23.67	0.76	3.01	1730.17	3.83	35.34
0.0105	0.0028	1671.72	17.57	1.25	2.98	1538.87	4.29	17.82
0.0095	0.0037	1419.51	13.43	2.05	2.85	1359.41	4.97	9.73
0.0091	0.0041	1268.77	11.48	2.53	2.58	1253.59	5.14	7.35
0.0089	0.0041	1192.88	10.59	2.71	2.22	1192.88	4.95	6.46
0.0086	0.0042	1147.45	9.87	2.84	1.97	1147.45	4.82	5.86
0.0085	0.0043	1102.39	9.32	3.04	1.78	1102.39	4.79	5.32
0.0082	0.0041	1057.69	8.63	2.96	1.34	1057.69	4.30	4.97
0.0080	0.0042	968.93	7.77	3.31	0.77	954.17	4.02	4.10

ตารางที่ ๑.1 ผลการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการคายกลับเอทานอลและน้ำออกจากถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับเปียกน้ำ

น้ำหนักของผสมเอทานอล-น้ำ		คำนวณช่วงแรก		คำนวณช่วงสอง		คำนวณช่วงสาม		พลังงานความร้อนรวม (KJ/gเอทานอลคายกลับ)
		พลังงานความร้อน		พลังงานความร้อนแฝง (KJ)		พลังงานความร้อน		
ก่อนการคายกลับ (Kg)	ไอควบแน่นคายกลับ (Kg)	(KJ/Kg ก่อนการคายกลับ)	(KJ)	เอทานอล	น้ำ	(KJ/Kg ไอควบแน่นคายกลับ)	(KJ)	
0.0146	0.0010	1958.27	28.51	0.42	1.05	1568.53	1.50	64.22
0.0140	0.0022	1730.17	24.14	1.16	2.00	1419.51	3.19	22.40
0.0131	0.0029	1538.87	20.15	1.67	2.21	1329.27	3.89	14.31
0.0125	0.0041	1404.51	17.54	2.46	2.70	1268.77	5.16	9.70
0.0125	0.0042	1329.27	16.57	2.60	2.60	1238.43	5.19	8.87
0.0125	0.0044	1299.05	16.18	2.75	2.61	1223.23	5.35	8.36
0.0121	0.0045	1223.23	14.80	2.89	2.58	1208.06	5.47	7.61
0.0120	0.0046	1208.06	14.45	2.99	2.52	1192.88	5.50	7.28
0.0117	0.0048	1162.57	13.62	3.22	2.40	1162.57	5.61	6.60

ตารางที่ ๑.2 ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ [14]

สาร	ค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอของสารบริสุทธิ์ (J/g)
เอทานอล	855
น้ำ	2260

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชวริน โปยมรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 5 ตุลาคม พ.ศ. 2525 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ หลักสูตรเตรียมวิศวกรรมศาสตร์ สาขาเครื่องกล คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2543 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (โครงการสหกิจศึกษาและอุตสาหกรรมสัมพันธ์ ปฏิบัติงาน ณ บริษัทบางจากปิโตรเลียมจำกัด มหาชนเป็นระยะเวลา 10 เดือน และบริษัทพัฒนากลจักรจำกัดมหาชนเป็นระยะเวลา 2 เดือน) สาขา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2548 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย