

สมดุลการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนด้วยถ่านดูดซับ  
จากกะลามะพร้าวที่ต้มในสารละลายกรดซัลฟิวริก



นางสาวอารีญา บุญเกลี้ยง

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1025-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADSORPTION EQUILIBRIA OF CARBON DIOXIDE AND NITROGEN WITH CARBON ADSORBENT  
FROM COCONUT SHELL BOILED IN SULFURIC ACID SOLUTION



Miss Areeya Boonkliang

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-1025-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมดุผลการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนด้วย
	ถ่านดูดซับจากกะลามะพร้าวที่ต้มในสารละลายกรดซัลฟิวริก
โดย	นางสาว อารีญา บุญเกลี้ยง
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรา จงวิศาล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาวสันต์)

อารีญา บุญเกลี้ยง : สมดุลการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนด้วยถ่าน  
ดูดซับจากกะลามะพร้าวที่ต้มในสารละลายกรดซัลฟิวริก. (ADSORPTION EQUILIBRIA OF  
CARBON DIOXIDE AND NITROGEN WITH CARBON ADSORBENT FROM  
COCONUT SHELL BOILED IN SULFURIC ACID SOLUTION) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วย  
ศาสตราจารย์ ดร.เดชา นัทรศิริเวช, 65 หน้า. ISBN 974-17-1025 -9.

ตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากการต้มกะลามะพร้าวในสารละลายกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 70%  
โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส พบว่า กะลามะพร้าวขนาด 8x8 ตารางเซนติเมตร จะเปลี่ยน  
เป็นถ่านหมดหลังต้มนาน 3 ชั่วโมงขึ้นไป ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านดูดซับมีค่า ระหว่าง 272-342  
มิลลิกรัมต่อกรัม สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของเฮนรี โดยที่ค่า  
คงที่สมดุลการดูดซับของเฮนรีมีค่า 0.0045, 0.0127 และ 0.0192 มิลลิโมลต่อกรัม.บรรยากาศ ที่อุณหภูมิ  
-10, 0 และ 30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สอดคล้องกับ  
แบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ โดยที่ค่าปริมาณการดูดซับสูงสุดมีค่า 0.0182, 0.0308 และ 0.0340  
มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิ -10, 0 และ 30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา 2545

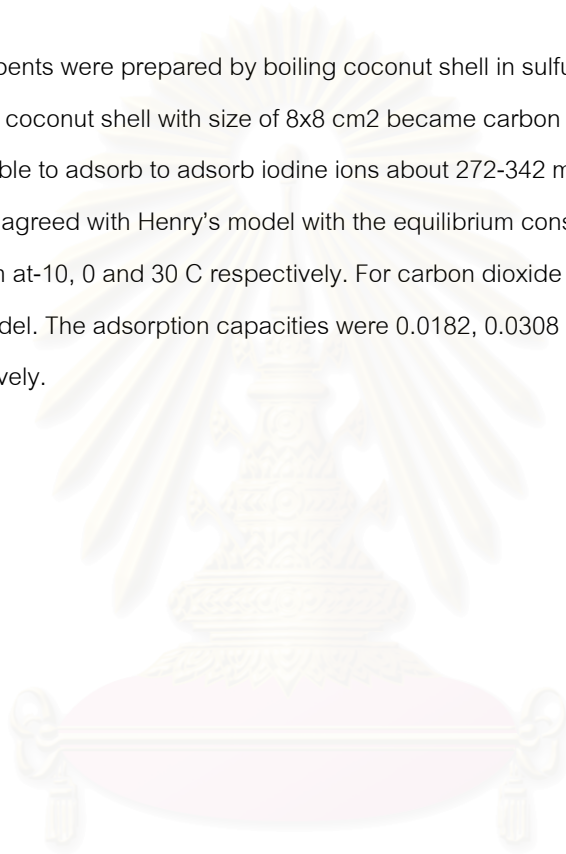
## 437 06245 21 : MOJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: ADSORPTION / ACTIVATED CARBON / CARBON DIOXIDE / NITROGEN /

AREEYA BOONKLIANG : ADSORPTION EQUILIBRIA OF CARBON DIOXIDE AND  
NITROGEN WITH CARBON ADSORBENT FROM COCONUT SHELL BOILED IN

SULFURIC ACID SOLUTION. THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR DEACHA  
CHATSIRIWECH, Ph.D., 65 pp. ISBN 974-17-1025-9.

Carbon adsorbents were prepared by boiling coconut shell in sulfuric acid solution of 70 % v/v at 180C. A whole coconut shell with size of 8x8 cm<sup>2</sup> became carbon after boiling for 3 hrs. The adsorbents were able to adsorb iodine ions about 272-342 mg/g. Nitrogen isotherms on all adsorbents were agreed with Henry's model with the equilibrium constants of 0.0045, 0.0127 and 0.0192 mmol/g.atm at -10, 0 and 30 C respectively. For carbon dioxide adsorption, all isotherms obeyed Langmuir's model. The adsorption capacities were 0.0182, 0.0308 and 0.0340 mmol/g at -10, 0 and 30 C respectively.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department .....Chemical Engineering.....

Student's signature .....

Field of study .....Chemical Engineering.....

Advisor's signature .....

Academic year            2002

# กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช เป็นอย่างยิ่ง ต่อความกรุณาให้คำปรึกษา ให้ข้อเสนอแนะ ช่วยเหลือและแนะนำในสิ่งที่เป็นประโยชน์ตลอดการทำงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรา จงวิศาล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภูสันต์ ที่สละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่มีค่าสำหรับวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ทางโรงไฟฟ้าบางปะกง ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลของก๊าซเผาไหม้ ขอขอบคุณ การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย ที่ให้การสนับสนุนก๊าซ สำหรับทำงานวิจัย ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือฯ แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือตรวจวัด (SEM) ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับผลการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปี (FT-IR) และเครื่องมืออุปกรณ์การวิจัย

งานวิจัยนี้จะไม่สำเร็จล่วงไปได้ หากไม่ได้รับความช่วยเหลือจากสมาชิกกลุ่มวิจัย PSE กลุ่มวิจัย SEPARATION รวมถึง กลุ่มวิจัย ORGANOMETALLICS ที่ให้ความช่วยเหลือเรื่องอุปกรณ์และการวิเคราะห์ผล

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่และสมาชิกครอบครัว ที่ให้ความสนับสนุน และเป็นกำลังใจ ตลอดงานวิจัยนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
สัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ณ
1 บทนำ.....	1
2 การผลิตถ่านดูดซับและสมดุลงการดูดซับก๊าซ.....	5
2.1 การผลิตถ่านดูดซับ.....	5
2.2 การดูดซับก๊าซ.....	8
2.3 การวัดสมดุลงการดูดซับก๊าซ.....	10
3 ขั้นตอนการผลิตถ่านดูดซับและวัดสมดุลงการดูดซับก๊าซ.....	12
3.1 การเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่าน.....	12
3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	12
3.1.2 วิธีการเตรียมถ่านดูดซับด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก.....	13
3.2 การตรวจสอบลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่าน.....	13
3.3 การวัดสมดุลงการดูดซับก๊าซของค้ประกอบเดี่ยวในระบบ.....	14
3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	14
3.3.2 การวัดสมดุลงการดูดซับก๊าซ.....	14
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	16
4.1 ลักษณะของถ่านดูดซับ.....	16
4.2 การเพิ่มพื้นที่ผิวถ่านดูดซับ.....	19
4.3 การดูดซับก๊าซ.....	22

4.3.1	ปริมาณการดูดซับก๊าซ.....	22
4.3.2	สมดุลการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจน.....	22
4.3.3	ค่าความร้อนของการดูดซับ.....	26
4.3.4	การเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยอื่น.....	27
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	30
5.1	บทสรุป.....	30
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	30
	รายการอ้างอิง.....	31
	ภาคผนวก.....	34
ก	ตัวอย่างการคำนวณ.....	34
ก.1	การหาค่าการดูดซับไอโอดีน.....	34
ก.1.1	วัสดุอุปกรณ์.....	34
ก.1.2	สารเคมี.....	34
ก.1.3	การเตรียมสารเคมีสำหรับการทดลอง.....	35
ก.1.4	การหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย.....	36
ก.1.5	วิธีการทดสอบการดูดซับไอโอดีน.....	37
ก.1.6	ตัวอย่างการคำนวณค่าการดูดซับไอโอดีน.....	38
ก.2	สมดุลการดูดซับของเฮนรีและแลงเมียร์.....	39
ก.3	การหาค่าความร้อนของการดูดซับ.....	41
ก.4	วิธีการคำนวณหาปริมาณการดูดซับ.....	43
ข	ข้อมูลการทดลอง.....	45
ค	ไอโซเทิร์มการดูดซับ.....	48
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	65



# สารบัญตาราง

1.1	องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าบางปะกง .....	1
1.2	องค์ประกอบของก๊าซหลังการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติในอากาศของโรงไฟฟ้าบางปะกง.....	2
2.1	การประยุกต์ใช้ตัวดูดซับชนิดต่างๆในอุตสาหกรรม.....	5
2.2	สภาวะการผลิตถ่านดูดซับและลักษณะของถ่านดูดซับที่ผลิตได้.....	7
2.3	งานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตถ่านดูดซับโดยการต้มกะลามะพร้าวในสารละลายกรด.....	8
2.4	แบบจำลองคณิตศาสตร์ สำหรับการดูดซับก๊าซ.....	9
4.1	แสดงลักษณะเบื้องต้นของถ่านดูดซับที่ได้จากการต้มกะลามะพร้าวในสารละลายกรดซัลฟิวริก.....	16
4.2	แสดงค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านดูดซับ เมื่อต้มด้วยเวลาและขนาดกะลาต่างกัน.....	19
4.3	แสดงค่าคงที่ในแบบจำลองของเฮนรีของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน.....	24
4.4	แสดงค่าคงที่ในแบบจำลองของแลงเมียร์ และปริมาณการดูดซับสูงสุดของการดูดซับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	24
4.5	แสดงผลการคำนวณค่าความร้อนของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 208, ถ่าน 308 และถ่าน 358.....	27
4.6	เปรียบเทียบค่าความร้อนของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ของถ่าน 358 กับ PHO 8 และ Bergbau-Forschung CMS.....	29
ก.1	แสดงค่า compressibility factor (Z) ที่สภาวะต่างๆ ในการทดลอง.....	54
ข.1	มวลของตัวดูดซับ (กรัม).....	45
ข.2	ปริมาตรของชุดอุปกรณ์การทดลองหลังบรรจุตัวดูดซับ (ลูกบาศก์เซนติเมตร).....	45
ข.3	ค่าคงที่ในแบบจำลองของเฮนรีของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน โดยการดูดซับด้วยวิธีวัดปริมาณก๊าซที่เหลือในระบบ (mmol.g-1.atm-1).....	46

ข.4	ค่าคงที่ในแบบจำลองของแลงเมียร์ของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการดูดซับด้วยวิธีวัดปริมาณก๊าซที่เหลือในระบบ ( $\text{mmol.g}^{-1}.\text{atm}^{-1}$ ).....	46
ข.5	ปริมาณการดูดซับสูงสุดของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการดูดซับด้วยวิธีวัดปริมาณก๊าซที่เหลือในระบบ ( $\text{mmol.g}^{-1}$ ).....	47
ข.6	แสดงผลการคำนวณ ค่าความร้อนของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 308 และ ถ่าน 358.....	47
ข.7	แสดงผลการคำนวณ ค่าความร้อนของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 208 และ ถ่าน 202.....	47



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญรูป

2.1	ลักษณะของไอโซเทิร์มที่พบทั่วไป.....	8
2.2	McBain spring adsorption and Adsorption microbalance.....	10
2.3	ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซที่ถูกดูดซับด้วยวิธีเชิงปริมาตร .....	11
3.1	อุปกรณ์วัดสมดุลการดูดซับ.....	15
4.1	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเซลล์โลสกับสารละลายกรดซัลฟิวริก ทำให้กะลามะพร้าว มีสัดส่วนธาตุคาร์บอนมากขึ้นจนกลายเป็นถ่านทั่วทั้งชิ้น.....	17
4.2	แสดงขึ้นกะลามะพร้าวและทิศทางการเข้าทำปฏิกิริยาของสารละลายกรด.....	18
4.3	แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเซลล์โลสในกะลามะพร้าวกับสารละลายกรดซัลฟิวริก บางส่วนได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว.....	20
4.4	พื้นผิวภายนอกของถ่านดูดซับ.....	21
4.5	สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเส้นแสดงแบบจำลอง การดูดซับ ด้วยถ่าน 308 ที่อุณหภูมิ -10, 0 และ 30 °C.....	23
4.6	FT-IR สเปกตรัมแสดงหมู่ฟังก์ชันของถ่านดูดซับจากกะลามะพร้าวด้วย .....	25
4.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_H$ กับ $1000/T$ ( $K^{-1}$ ) ของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 308, ถ่าน 358 และ PHO 8.....	26
4.8	แสดงสมดุลการดูดซับของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเส้นแบบ จำลองสมดุลการดูดซับด้วยถ่าน 358 และ PHO 8 และถ่าน ASC และถ่าน COLUMBIA GRADE L ที่อุณหภูมิ 30 °C.....	28
ก.1	ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนที่ 0 °C ด้วยถ่าน 358 และแบบ จำลองของเฮนรี่.....	39
ก.2	ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ 0 °C ด้วยถ่าน 358.....	40
ก.3	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_H$ กับ $1000/T$ สำหรับการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ของถ่าน 208.....	42





## สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
ค.27	สมดุลงการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่าน PHO 8 และเส้นแบบจำลองสมดุลงการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ $-10, 0$ และ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....61
ค.28	สมดุลงการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 308, ถ่าน 358 และเส้นแบบจำลองสมดุลงการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....62
ค.29	สมดุลงการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 308, ถ่าน 358 และเส้นแบบจำลองสมดุลงการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....62
ค.30	สมดุลงการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 308, ถ่าน 358 และเส้นแบบจำลองสมดุลงการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....63
ค.31	สมดุลงการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่าน 202, ถ่าน 208 และเส้นแบบจำลองสมดุลงการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....63
ค.32	สมดุลงการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่าน 202, ถ่าน 208 และเส้นแบบจำลองสมดุลงการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....64
ค.33	สมดุลงการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่าน 202, ถ่าน 208 และเส้นแบบจำลองสมดุลงการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....64

# สัญลักษณ์และอักษรย่อ

## สัญลักษณ์

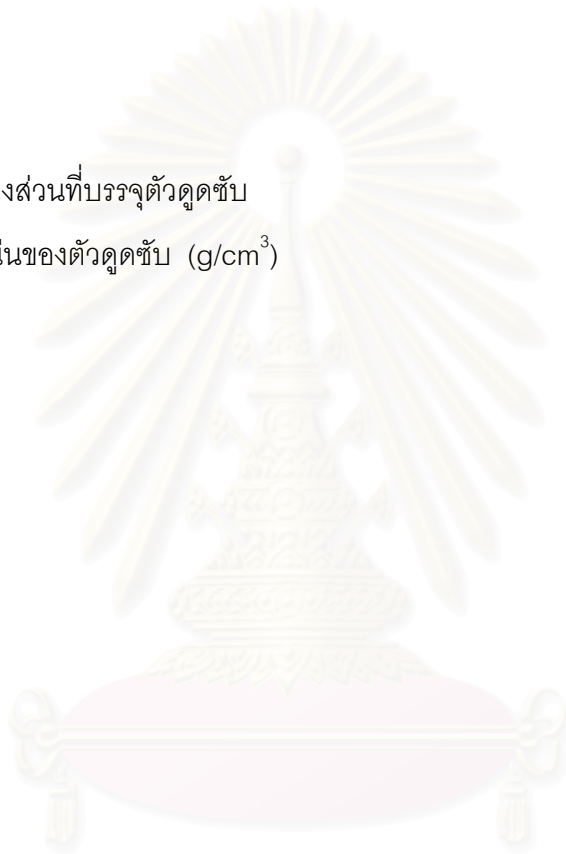
$a_s$	พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
$C$	ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ )
$C_b$	ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เฟสของก๊าซ ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ )
$C_e$	ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่มีตัวประสานเฟสของก๊าซ ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ )
$C_s$	ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เฟสของก๊าซหนึ่ง ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ )
$D_k$	การแพร่แบบน็ดเซน (Knudsen diffusivity, $\text{cm}^2/\text{sec}$ )
$D_m$	การแพร่แบบโมเลกุล (Molecular diffusivity, $\text{cm}^2/\text{sec}$ )
$D_p$	เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับ (cm)
$\Delta H$	ค่าความร้อนของการดูดซับ (kJ/mol)
$K_H$	ค่าคงที่การดูดซับของเฮนรี ( $\text{mmol}/\text{g}\cdot\text{atm}$ )
$K_L$	ค่าคงที่การดูดซับของแลงเมียร์ ( $\text{atm}^{-1}$ )
$K_F$	ค่าคงที่การดูดซับของฟรอยดลิช ( $\text{mmol}/\text{m}^2 \cdot \text{atm}^{1/n}$ )
$K_{BET}$	ค่าคงที่ของสมการดูดซับตามแนวความคิดของ BET
$q$	ปริมาณการดูดซับ ( $\text{mmol}/\text{g}$ )
$q_s$	ปริมาณการดูดซับสูงสุด ( $\text{mmol}/\text{g}$ )
$P$	ความดัน (atm)
$P_r$	ความดันย่อย (atm)
$P_s$	ความดันไออิ่มตัวของสารที่ถูกดูดซับได้ (atm)
$R$	ค่าคงที่ของก๊าซ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{atm} / \text{mol} \cdot \text{K}$ )
$R_{ads}$	อัตราการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มหรือในรูพรุน ( $\text{mol}/\text{g} \cdot \text{sec}$ )
$R_p$	รัศมีของตัวดูดซับ (cm)
$M$	มวลโมเลกุลของตัวดูดซับ
$T$	อุณหภูมิ (K)

กลุ่มไวยกรณ์

$Re$  เรย์โนลด์นัมเบอร์  
 $Sc$  เซอร์มิคินัมเบอร์  
 $Sh$  เซอร์วูดนัมเบอร์

อักษรกรีก

$\epsilon$  ความพรุนของส่วนที่บรรจุตัวดูดซับ  
 $\rho_s$  ความหนาแน่นของตัวดูดซับ ( $g/cm^3$ )



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



# บทที่ 1

## บทนำ

ในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมาก ในก๊าซเผาไหม้ที่เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น ในโรงไฟฟ้าบางปะกง มีการใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในการเดินเครื่องจักรเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า องค์ประกอบต่างๆ ของก๊าซธรรมชาติที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าบางปะกง แสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าบางปะกง

องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติ	สัดส่วนของก๊าซที่พบ (%)
CH <sub>4</sub>	73
CO <sub>2</sub>	15.79
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	6.5
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1.7
N <sub>2</sub>	1.67
isobutane	0.35
n-Butane	0.335
isopentane	0.11
Hexane	0.08
n-Pentane	0.07
อื่นๆ	0.395
รวม	100

จากการเผาไหม้ของก๊าซธรรมชาติในอากาศ จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซอื่น ๆ ออกมา ดังแสดงในตารางที่ 1.2 ซึ่งถ้าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณมากและปล่อยสู่บรรยากาศ จะทำให้สมดุลของวัฏจักรคาร์บอนไดออกไซด์เสียไป แนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหานี้คือ การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาใช้ประโยชน์

ตารางที่ 1.2 องค์ประกอบของก๊าซหลังการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติในอากาศของโรงไฟฟ้าบางปะกง

องค์ประกอบของก๊าซหลังการเผาไหม้	สัดส่วนของก๊าซที่พบ (%)
CO <sub>2</sub>	17
CO	0.0182
NO <sub>x</sub>	0.0162
NO <sub>2</sub>	0.003
SO <sub>2</sub>	0.003
H <sub>2</sub> O	12
N <sub>2</sub> และ Opacity	70.96
รวม	100

ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจน ในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยอาจใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตหรือเป็นตัวช่วยในกระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆได้อีก

แนวทางการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมต่างๆ สามารถแยกการใช้ประโยชน์ได้ดังนี้ [1]

1. ทางการแพทย์ - ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ในการผ่าตัด ศัลยกรรม
2. อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม - ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เติมลงไป เครื่องดื่ม เช่น น้ำอัดลม เบียร์ ไวน์ เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในเครื่องดื่ม และป้องกันการปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้เครื่องดื่มเสียรสไป
3. อุตสาหกรรมด้านอาหาร - ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพในการรักษาอาหารให้มีความสดได้ยาวนานขึ้น ทั้งในรูปของตัวทำความเย็นและทำให้บรรยากาศมีลักษณะเฉื่อย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำหน้าที่หยุดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในอาหาร
4. มีประสิทธิภาพ ใช้เป็นก๊าซทำให้สัตว์สลบก่อนนำไปฆ่า
5. อุตสาหกรรมการทำน้ำดื่ม หรือน้ำใช้ที่เหมาะสม สำหรับใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม - ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ใช้ทำให้น้ำกระด้างมีฤทธิ์เป็นกลางได้ ทั้งยังป้องกันการผุกร่อนของภาชนะบรรจุได้ดี

6. อื่นๆ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ ในอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกและยาง ใช้ในงานหล่อและงานเชื่อมและอื่นๆ อีกมาก

ในอากาศมีก๊าซไนโตรเจนในปริมาณมาก ส่งผลให้ในก๊าซเผาไหม้มีก๊าซไนโตรเจนอยู่ด้วย ดังนั้น ถ้าสามารถแยกก๊าซไนโตรเจนออกจากก๊าซเผาไหม้ได้ก็นำไปใช้ประโยชน์ได้เช่นเดียวกัน

การประยุกต์ใช้ก๊าซไนโตรเจนในกระบวนการผลิต [2]

1. ประยุกต์ใช้ในโตรเจนเป็นก๊าซเฉื่อยในกระบวนการผลิตต่างๆ
2. ในกระบวนการกลั่นน้ำมัน ใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นระบบป้องกันการปลอมปนการผสมของน้ำมันกับอากาศเพื่อลดความเสี่ยงต่อการระเบิดหรือติดไฟ
3. ใช้ไนโตรเจนเหลว สำหรับเป็นสารทำความเย็น เพื่อควบคุมหรือลดอุณหภูมิในกระบวนการผลิตห้องทดลอง หรือเพื่อถนอมอาหารสด

การดูดซับ เป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจในการแยกก๊าซผสม ซึ่งสามารถแยกก๊าซได้ที่อุณหภูมิห้อง ในการแยกก๊าซผสมด้วยการดูดซับขึ้นกับสมดุลการดูดซับ หรืออัตราการดูดซับ และกระบวนการดูดซับ ซึ่งพัฒนาเป็นกระบวนการแยกก๊าซผสมแล้วหลายกระบวนการ สำหรับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นก๊าซซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในก๊าซเผาไหม้ โดยทั่วไป สามารถแยกออกจากก๊าซเผาไหม้ได้ด้วยคาร์บอนโมเลคูลาร์ซีฟ และซีโอไลต์ ภายใต้การดำเนินการแบบความดันสลับ [3]

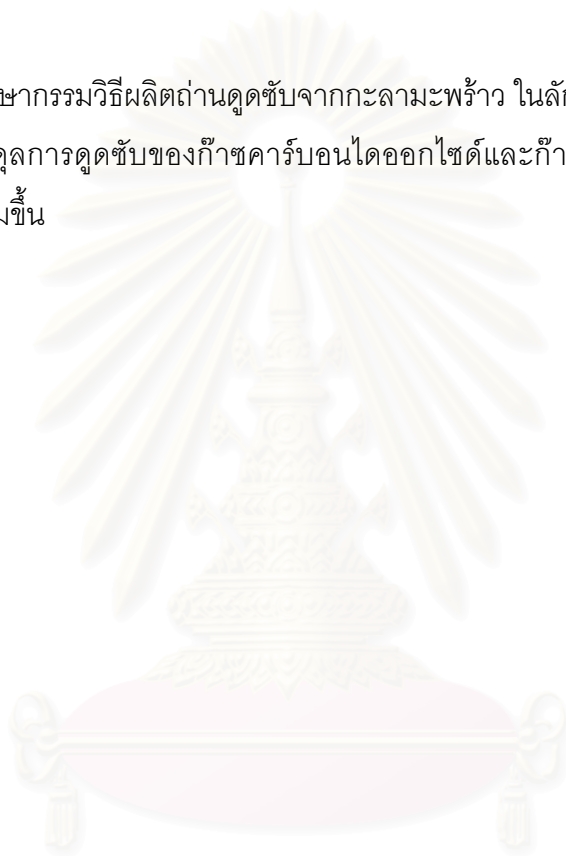
ถ่านดูดซับสามารถใช้ดูดซับก๊าซและองค์ประกอบในของเหลวผสมได้ดี และถ่านดูดซับสามารถผลิตได้จากวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร เช่น แกลบ ชี้เลี้ยง ชานอ้อย ชัง ข้าวโพด และกะลามะพร้าว เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กะลามะพร้าวมีลักษณะแข็งและสามารถหาได้โดยไม่จำกัดฤดูกาล จึงเลือกใช้เป็นวัตถุดิบ สำหรับการผลิตถ่านดูดซับในอุตสาหกรรม [4]

งานวิจัยที่ใช้ตัวดูดซับชนิดถ่านดูดซับก๊าซเผาไหม้ ส่วนใหญ่ ศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจน และศึกษา ณ ที่อุณหภูมิไม่สูงนัก กล่าวคือ ก๊าซเผาไหม้ที่ได้จากการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติ มักมีอุณหภูมิสูง การดูดซับที่อุณหภูมิสูงเกิดขึ้นไม่ดี จึงต้องลดอุณหภูมิลง เพื่อให้ดูดซับได้ การเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติ นอกจากจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนแล้ว ยังได้อิทธิพลปริมาณมากอีกด้วย แต่ในการศึกษาจะศึกษาเฉพาะการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจน เนื่องจากการดูดซับที่อุณหภูมิไม่สูงนัก ใอน้ำที่เกิดขึ้น จะเกิดการควบแน่นเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ปริมาณไอน้ำที่เหลือมีไม่มากนัก เช่น ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะมีสัดส่วนของไอน้ำ 0.12 และเมื่อลดอุณหภูมิลดลงเหลือ 30 องศาเซลเซียส พบว่า มีสัดส่วนของไอน้ำ

เหลือเพียง 0.042 เท่านั้น ซึ่งน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับก๊าซไนโตรเจน จึงไม่พิจารณาผลกระทบต่ออากาศ [5]

จากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมาข้างต้น พบว่า กะลามะพร้าวที่เป็นผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ ชนิดหนึ่ง นำศึกษาวิจัยเพิ่มเติม ในด้านขั้นตอนการผลิตเป็นถ่านดูดซับ เพื่อให้มีการใช้พลังงาน ความร้อนลดลง และในด้านการประยุกต์ใช้งานสำหรับการแยกก๊าซผสม ดังนั้น จุดประสงค์ของ งานวิจัยนี้ คือ

1. เพื่อศึกษากรรมวิธีผลิตถ่านดูดซับจากกะลามะพร้าว ในลักษณะเป็นชั้น
2. วัดสมมูลการดูดซับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่านดูดซับ ที่เตรียมขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### การผลิตถ่านดูดซับและสมดุลงการดูดซับก๊าซ

การดูดซับ เป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของสารในวัฏภาคก๊าซ ยึดเกาะที่ผิวของตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์พื้นที่ผิวของแข็ง ที่เรียกว่า ตัวดูดซับ โมเลกุลของก๊าซอาจยึดเกาะติดเพียงชั้นเดียวหรือมากกว่าก็ได้ ดังนั้น โดยทั่วไปจึงมักให้ความสำคัญต่อตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมาก ๆ ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของกรรมวิธีการเตรียมถ่านดูดซับ สำหรับการประยุกต์ใช้งานยังคงต้องทดสอบความสามารถในการดูดซับ สมดุลงการดูดซับและอัตราการดูดซับของก๊าซชนิดต่างๆ ในก๊าซผสมนั้น ณ คุณสมบัติต่างๆ สำหรับประกอบการพิจารณาเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการแยกก๊าซต่อไป

#### 2.1 การผลิตถ่านดูดซับ

ตัวดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรมแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ถ่านดูดซับที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักและชนิดสารประกอบอนินทรีย์ ซึ่งการประยุกต์ใช้งานของตัวดูดซับแต่ละชนิด สรุปในตารางที่ 2.1 [6]

ตารางที่ 2.1 การประยุกต์ใช้ตัวดูดซับชนิดต่างๆ ในอุตสาหกรรม

ตัวดูดซับ	การประยุกต์ใช้
ถ่านดูดซับ, คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ	ใช้ในการแยกก๊าซและสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว เช่น ตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน, แยกกลิ่น หรือสารมีพิษต่างๆ ใช้ในกระบวนการแยกอากาศ
ซีโอไลต์ : สังเคราะห์ : ธรรมชาติ	กำจัดความชื้น แยกอากาศหรือแยกสารอะโรมาติก เพิ่มความบริสุทธิ์ของไฮโดรเจน
ซิลิกาเจล	กำจัดความชื้นในก๊าซ ที่อุณหภูมิห้อง
อะลูมินา	กำจัดความชื้นในก๊าซ ที่อุณหภูมิห้อง

ถ่านดูดซับเป็นตัวดูดซับชนิดหนึ่งที่มีการประยุกต์ใช้งานมาก ถ่านดูดซับสามารถผลิตได้หลายวิธี โดยต้องใช้ปฏิกิริยาเคมี ณ อุณหภูมิต่างๆ และกรรมวิธีการผลิตถ่านดูดซับ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนหลัก ดังนี้ [7]

1. การเผาเป็นถ่าน ซึ่งเป็นกระบวนการสลายพันธะเคมีขององค์ประกอบในวัตถุดิบที่ระเหยยากหรือไม่ระเหยด้วยความร้อน ในขณะที่เดียวกันความชื้นและสารระเหยง่ายจะออกจากวัตถุดิบ เมื่อวัตถุดิบเปลี่ยนสภาพเป็นถ่านแล้ว มักจะมีลักษณะเปราะ แตกหักได้ง่าย ดังนั้น จึงมักเผาวัตถุดิบชิ้นใหญ่ที่มีลักษณะแข็ง เช่น กะลามะพร้าว ถ่านหิน เป็นต้น ให้เป็นถ่าน เพื่อความสะดวกในการย่อยให้มีขนาดเล็กลง [8]

2. การเพิ่มพื้นที่ผิว เป็นการทำให้ถ่านดูดซับมีรูพรุนเพิ่มขึ้น หรือเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดซับสารประกอบอื่นๆของถ่านดูดซับ สามารถดำเนินการได้ 2 ลักษณะ ดังนี้

การเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยก๊าซออกซิไดซ์ เช่น ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ เป็นต้น ณ ช่วงอุณหภูมิ 700-1,000 องศาเซลเซียส โดยที่ธาตุคาร์บอนจะเกิดปฏิกิริยากับก๊าซออกซิไดซ์ตัวกลาง ทำให้มีรูพรุนมากขึ้นในลักษณะสุ่ม โดยไม่สามารถควบคุมลำดับ ตำแหน่งดูดซับ และขนาดรูพรุนได้

อีกลักษณะหนึ่ง พื้นที่ผิวอาจเพิ่มขึ้นด้วยการใช้สารละลายกรดหรือเกลือ เช่น การใช้สารละลายเกลือแกง สารละลายซิงค์คลอไรด์ สารละลายกรดซัลฟิวริก สารละลายกรดฟอสฟอริก เป็นต้น และต้องเผา ณ อุณหภูมิไม่เกิน 600 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศก๊าซเฉื่อย [9] ถ่านดูดซับที่ได้จึงมีลักษณะเบื้องต้นแตกต่างกัน ขึ้นกับชนิดและปริมาณของสารละลายดังกล่าวข้างต้น และมีลักษณะแตกต่างจากการเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยก๊าซออกซิไดซ์ ดังที่ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สภาวะการผลิตถ่านดูดซับและลักษณะของถ่านดูดซับที่ผลิตได้

งานวิจัยของ	วัตถุดิบ	วิธีการผลิต	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	คุณสมบัติของ ถ่านดูดซับที่ได้
สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ[10]	กะลา มะพร้าว	ซิงค์คลอไรด์	2-4	700-800	ค่าการดูดซับไอโอดีน 150 มิลลิกรัมต่อกรัม
อุไรวรรณ ธรรมรัตน์พคุณ [11]	กะลา มะพร้าว	ใช้ไอน้ำอิมตัว ยิ่งยวด	0.5-2	700- 1050	ค่าการดูดซับไอโอดีน150 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับเมธิ ลีนบลู 5-371มิลลิกรัมต่อกรัม
พิสุทธิ พันธ์วิชาติกุล[12]	กะลา ตาล	ซิงค์คลอไรด์	2-3	400-450	ถ่านดูดซับที่ได้มีคุณภาพต่ำ
ดำรง ขุนมงคล และอภิสิทธิ์ เจริญกุล[13]	กะลา มะพร้าว ซีล้อย	เกลือแกง		800	ค่าการดูดซับไอโอดีนกะลา มะพร้าว 640ซีล้อย 542 มิลลิกรัมต่อกรัม
มานัด แก้วถาวร [14]	กะลา มะพร้าว	เกลือแกง ซิงค์คลอไรด์ คาร์บอนได ออกไซด์		900	ตัวกระตุ้นทั้งสามชนิดให้ค่าการ ดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น ซิงค์คลอไรด์ให้ค่าดูดซับ ไอโอดีนสูงสุด
สุภาภรณ์ มันไทรทอง [15]	ซังข้าว โพด	กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก ซิงค์คลอไรด์		250, 300, 600	ค่าคงที่สมดุลการดูดซับที่ถูก กระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก มีค่าต่ำสุด
บุญชัย ตระกูลมหชัย [16]	กะลา ตาล	ซิงค์คลอไรด์ และก๊าซ ออกซิไดซ์	1, 2	500	ใช้ซิงค์คลอไรด์ค่าไอโอดีน1100- 1200 เมธิลีนบลู 350-400 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิวจำเพาะ 1600-1700 ตารางเมตรต่อกรัม ใช้ก๊าซออกซิไดซ์ค่าไอโอดีน1000- 1300 เมธิลีนบลู 250-350 มิลลิกรัมต่อกรัม และพื้นที่ผิวจำเพาะ 1800-1900 ตารางเมตรต่อกรัม

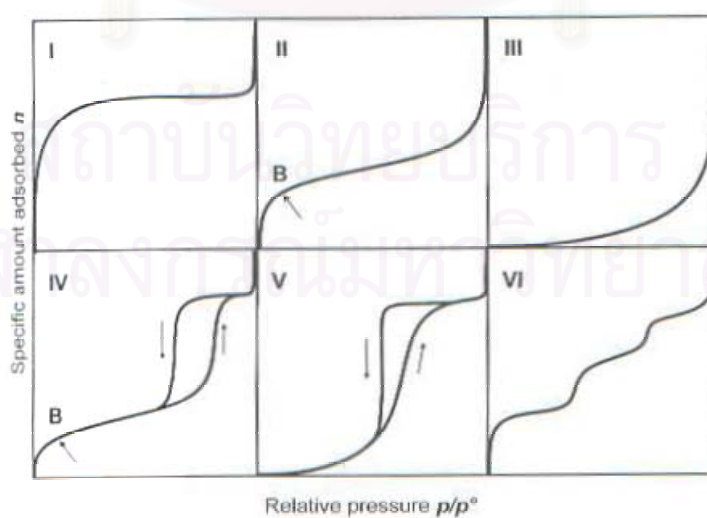
นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตถ่านดูดซับโดยการต้มในสารละลายกรด ซึ่งเป็นการเตรียมถ่านดูดซับ โดยทำให้เป็นถ่านพร้อมกับการเพิ่มพื้นที่ผิว ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตถ่านดูดซับโดยการต้มในสารละลายกรด

งานวิจัยของ	วัตถุดิบ	วิธีการผลิต	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	คุณสมบัติของถ่านดูดซับที่ได้
สุทธินนท์ ศักดิ์สวัสดิ์ [17]	กะลา มะพร้าว	สารละลายกรด ซัลฟิวริก	1, 1.5 2, 3	137	ค่าการดูดซับไอโอดีน 223.2-366.27 มิลลิกรัมต่อกรัม
สิริพร อติเรกกลาก [18]	กะลา มะพร้าว	สารละลาย ซิงค์คลอไรด์	3	156	ค่าการดูดซับไอโอดีน 33-354 มิลลิกรัมต่อกรัม
ยศรักษ์ สุวรรณพันธ์มณี [19]	กะลา มะพร้าว	สารละลาย กรดฟอสฟอริก	1, 2, 3	112	ค่าการดูดซับไอโอดีน 142.63-206.88 มิลลิกรัมต่อกรัม

## 2.2 สมดุลการดูดซับก๊าซ

ข้อมูลสมดุลการดูดซับก๊าซ นอกจากให้ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการดูดซับก๊าซแล้ว ยังให้ข้อมูลด้านพฤติกรรมเคลื่อนที่ของก๊าซที่ถูกดูดซับภายในหลอดดูดซับด้วย ลักษณะสมดุลการดูดซับ แบ่งออกได้เป็น 6 แบบ [20] ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ ที่เลือกไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ส่วนแบบจำลองคณิตศาสตร์ สำหรับการดูดซับก๊าซแบบที่ 1 ถึงแบบที่ 3 สรุปรวมไว้ในตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.1 ลักษณะของไอโซเทิร์มที่พบทั่วไป [20]



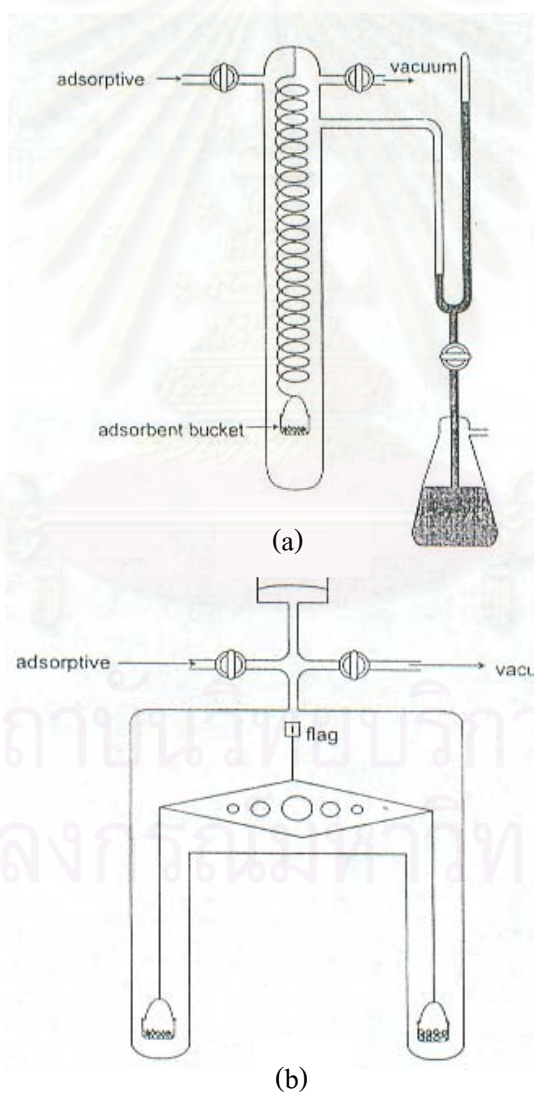
ตารางที่ 2.4 แบบจำลองคณิตศาสตร์ สำหรับการดูดซับก๊าซ [20]

สมการของ	สมการสมดุล	ค่าคงที่	ประเภท สมดุล	หมายเหตุ
Henry	$q = K_H P$	$K_H$	แบบที่ 1	
Langmuir	$\frac{q}{q_s} = \frac{K_L P}{1 + K_L P}$	$K_L, q_s$	แบบที่ 1	
Frendlich	$q = K_F P^{1/n}$	$K_F$	แบบที่ 1 แบบที่ 3	$n > 1$ $n < 1$
BET	$\frac{q}{q_s} = \frac{K_{BET} P}{(1 - P + K_{BET})(1 - P)}$	$K_{BET}, q_s$	แบบที่ 2	
Toth	$q = \frac{q_s P}{[(1/K_T) + P^m]^{1/m}}$	$K_T, q_s, m$	แบบที่ 1	
Radke-Prausnitz	$q = \frac{q_s K_{RP} P}{(1 + K_{RP} P)^m}$	$K_{RP}, q_s$	แบบที่ 1	
Sips	$q = \frac{q_s (K_S P)^m}{1 + (K_S P)^m}$	$K_S, q_s, m$	แบบที่ 1	
UNILAN	$q = \frac{q_s}{2S_i} \ln \frac{1 + K_i e^S P}{1 + K_i e^{-S} P}$	$K_U, q_s, S$	แบบที่ 1	$S_i \rightarrow 0$

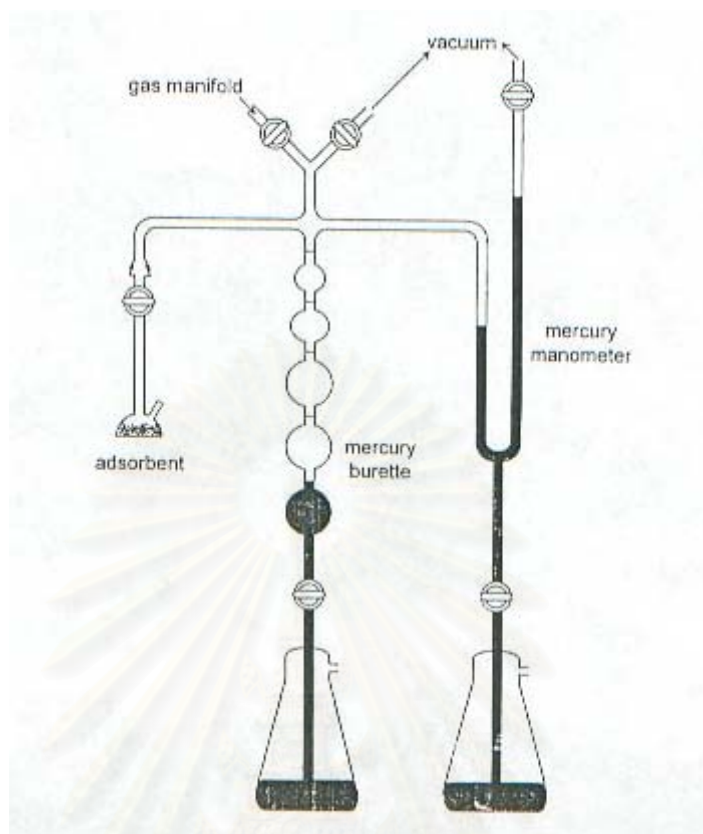
## 2.3 การวัดสมมูลการดูดซับก๊าซ

การวัดสมมูลการดูดซับของก๊าซ ควรวัดทั้งปริมาณของก๊าซที่ถูกดูดซับไว้บนตัวดูดซับ และปริมาณก๊าซที่เหลือในระบบ ณ อุณหภูมิที่เลือกไว้ นั่นคือ ปริมาณการดูดซับสามารถวัดได้จากมวลของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณก๊าซที่เหลือวัดได้จากความดันของระบบที่กำหนดปริมาตรไว้ก่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 อุปกรณ์ลักษณะนี้ จำเป็นต้องใช้เครื่องซึ่งที่มีความแม่นยำสูง และต้องดำเนินการ ณ ความดันใกล้สูญญากาศสมบูรณ์ เพื่อลดการรบกวนของก๊าซอื่นๆ

อีกทางเลือกหนึ่ง สำหรับการวัดสมมูลการดูดซับก๊าซ คือการวัดปริมาณก๊าซที่เติมเข้าสู่ระบบ และปริมาณก๊าซที่เหลือในระบบการดูดซับด้วยความดันของระบบที่กำหนดปริมาตรไว้ก่อนแล้ว ซึ่งเป็นวิธีการเช่นเดียวกับการวัดพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 (a) McBain spring adsorption (b) Adsorption microbalance [4]



รูปที่ 2.3 ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซที่ถูกดูดซับด้วยวิธีเชิงปริมาตร [4]

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการเตรียมถ่านดูดซับและวัสดุผลการดูดซับก๊าซ

การวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนการเตรียมถ่านดูดซับจากกะลามะพร้าวด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก และส่วนการวัดสมมูลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่านดูดซับที่เตรียมจากส่วนแรก

#### 3.1 การเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่าน

นำกะลามะพร้าวมาล้างให้สะอาดและตากให้แห้ง โดยใช้กะลามะพร้าวทั้งแบบชิ้น 2x2 และแบบแผ่น 8x8 ตารางเซนติเมตร แล้วนำไปต้มในสารละลายกรดซัลฟิวริก

##### 3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. สารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 70 % โดยปริมาตร
2. บีกเกอร์ขนาด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร
3. ตู้อบ
4. อุปกรณ์ให้ความร้อนและแห้งแก้ว
5. ชุดกรองสุญญากาศ
6. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1
7. น้ำกลั่น
8. เทอร์โมมิเตอร์
9. นาฬิกาจับเวลา

### 3.1.2 วิธีการเตรียมถ่านดูดซับด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก

1. ต้มกะลามะพร้าวขนาด 8x8 ตารางเซนติเมตร โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกคงที่ 70% โดยน้ำหนัก อุณหภูมิคงที่ 180 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ต้ม 2, 3 และ 3.5 ชั่วโมง
2. รอให้เย็น จากนั้นล้างสารละลายกรดซัลฟิวริกออกโดยใช้น้ำสะอาดล้างหลายๆครั้ง
3. แช่น้ำกลั่นทิ้งไว้ 1-2 วัน
4. ทดสอบความเป็นกรด-ด่างของน้ำด้วยเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง ถ้าน้ำยังคงมีฤทธิ์เป็นกรด ดำเนินการตามข้อ 3 ซ้ำ จนกระทั่งน้ำมีฤทธิ์เป็นกลาง
5. อบไล่น้ำที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนแห้ง (ประมาณ 1-2 วัน)
6. บดและคัดขนาด เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป
7. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1-6 เพียงแต่เปลี่ยนมาต้มกะลามะพร้าวขนาด 2x2 ตารางเซนติเมตร โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกคงที่ 70% โดยน้ำหนัก อุณหภูมิคงที่ 180 องศาเซลเซียส

### 3.2 การตรวจสอบลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่าน

1. การวัดค่าการดูดซับไอโอดีน ตามวิธี ASTM D 4607 [21]
2. การวัดพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยวิธี BET โดยใช้เครื่อง Micromeritic BET รุ่น ASAP 2000
3. ตรวจพื้นที่ผิวภายนอกของถ่านดูดซับโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ด้วยเครื่อง SEM รุ่น JSM 6400
4. การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันนัลของถ่านดูดซับ โดยใช้เทคนิคทางอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ด้วยวิธี KBr-pellet technique โดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น Nicolet FT-IR Impact 410 Spectrophotometer. [22]

### 3.3 การวัดสมมูลการดูดซับก๊าซของค์ประกอบเดี่ยวในระบบปิด

#### 3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. อุปกรณ์วัดสมมูลการดูดซับก๊าซ ประกอบด้วย ภาชนะบรรจุถ่านดูดซับ เทอร์โมมิเตอร์ สำหรับวัดอุณหภูมิในขณะที่ทำการดูดซับ อุปกรณ์วัดความดันชนิดระดับความสูงของปรอท จุดต่อเครื่องสูบลูญญากาศสำหรับปรับสภาพเริ่มต้น และจุดต่อสำหรับเติมก๊าซดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 3.1

2. เครื่องสูบลูญญากาศ

3. กระบอกฉีดก๊าซตัวอย่างปริมาตร 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร

#### 3.3.2 การวัดสมมูลการดูดซับก๊าซ

1. บรรจุตัวดูดซับขนาด 10-18 เมช ที่เตรียมมาได้ ไว้ในภาชนะบรรจุถ่านดูดซับ

2. การวัดปริมาตรของช่องว่างของระบบและการทดลองหาปริมาณการดูดซับ

2.1 บรรจุตัวดูดซับปริมาณ  $30.0 \pm 0.1$  กรัม ในชุดทดลอง

2.2 ปรับความดันภายในอุปกรณ์เป็น 2 มิลลิเมตรปรอทสัมบูรณ์

2.3 เติมก๊าซฮีเลียมภายในชุดอุปกรณ์และบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงความดันและอุณหภูมิกับปริมาณก๊าซฮีเลียมที่เติม

2.4 ดำเนินการซ้ำข้อ 2.2 และ 2.3 โดยใช้ก๊าซไนโตรเจน

2.5 ดำเนินการซ้ำข้อ 2.2 และ 2.3 โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

2.6 ปรับอุณหภูมิเป็น 0 องศาเซลเซียส โดยใช้ น้ำแข็งและเกลือ

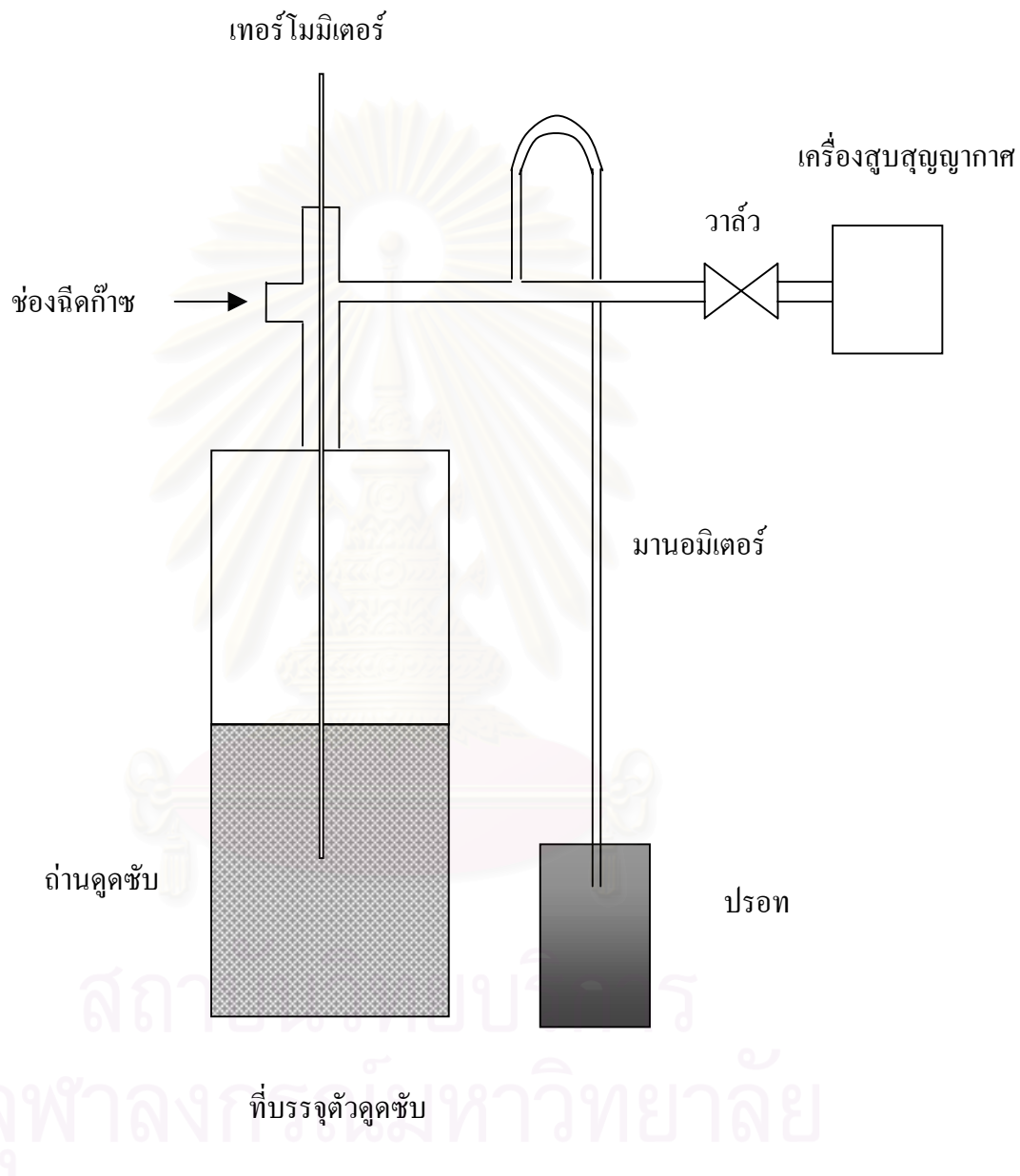
2.7 ดำเนินการซ้ำในข้อ 2.2 และ 2.5

2.8 ปรับอุณหภูมิเป็น -10 องศาเซลเซียส โดยใช้ น้ำแข็งและเกลือ

2.9 ดำเนินการซ้ำในข้อ 2.2 และ 2.5

2.10 คำนวณปริมาณการดูดซับ และหาสมการแบบจำลองสมมูลการดูดซับ

2.11 ดำเนินการซ้ำข้อ 2.1 ถึง ข้อ 2.9 โดยใช้ถ่านดูดซับอื่นๆ จากส่วนแรก



รูป 3.1 อุปกรณ์วัดสมดุลการคูคซั้บ

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

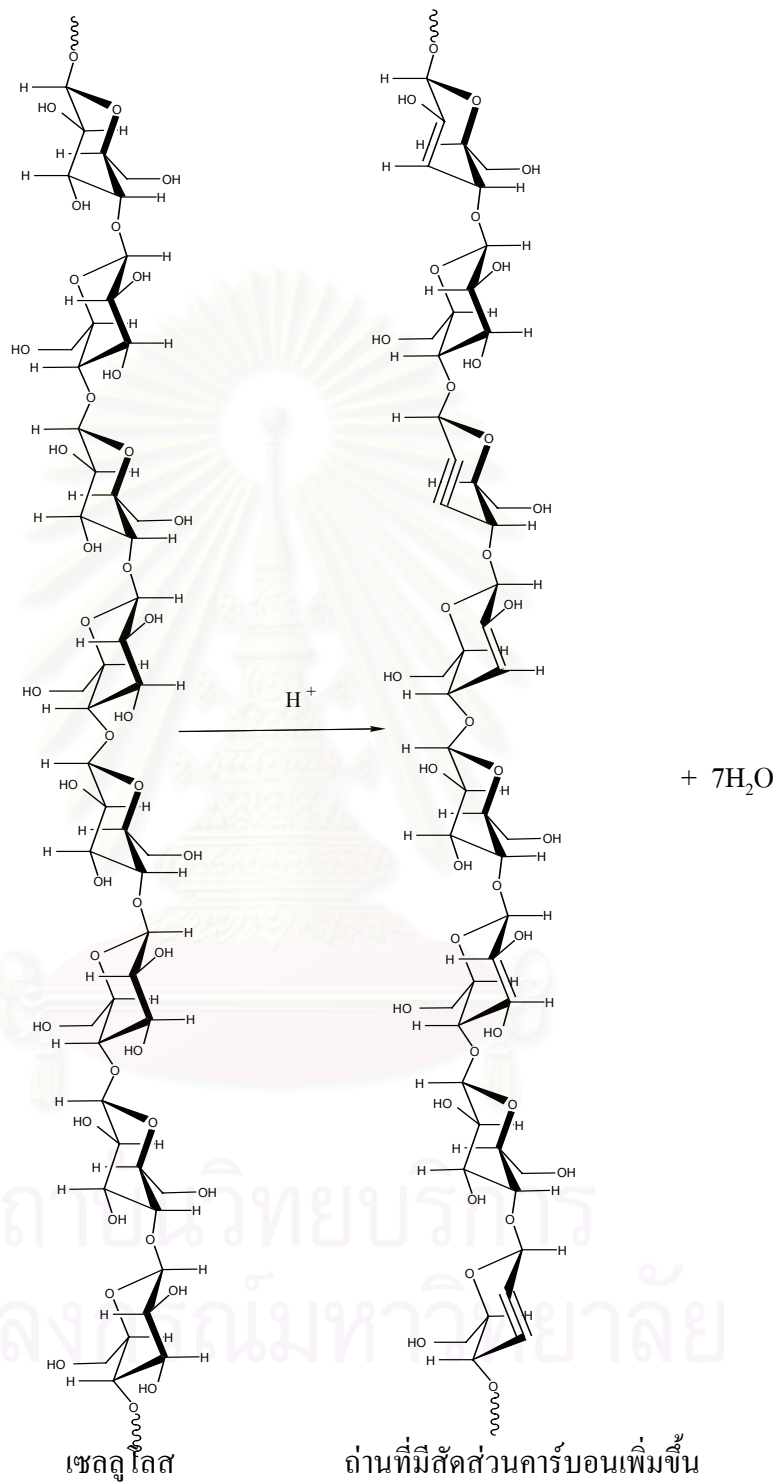
#### 4.1 ลักษณะของถ่านดูดซับ

ในการต้มขึ้นกะลามะพร้าวในสารละลายกรดซัลฟิวริกเพื่อให้เป็นถ่านดูดซับ ซึ่งมีลักษณะเบื้องต้น ดังแสดงในตารางที่ 4.1 กะลามะพร้าวจะเปลี่ยนสภาพเป็นถ่านสีดำทั่วทั้งชิ้น หลังต้มนาน 3 ชั่วโมงขึ้นไป หรือระยะเวลาในการต้มอาจลดลงได้ถ้าชิ้นของกะลามะพร้าวมีขนาดเล็กลง เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารละลายกรดซัลฟิวริกกับกะลามะพร้าวเกิดขึ้นเพียงบางส่วนและเกิดกับกะลามะพร้าวได้มากขึ้นเมื่อต้มนานขึ้น ดังนั้น ชิ้นกะลามะพร้าวจึงเป็นถ่านได้แตกต่างกันสังเกตได้จากถ่านที่ต้มนานกว่าจะหักได้ง่ายกว่า กะลามะพร้าวเปลี่ยนเป็นถ่านได้ด้วยปฏิกิริยาดังน้ำออกจากโมเลกุลของเซลลูโลส ดังแสดงในรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะเบื้องต้นของถ่านดูดซับที่ได้ จากการต้มกะลามะพร้าวในสารละลายกรดซัลฟิวริก

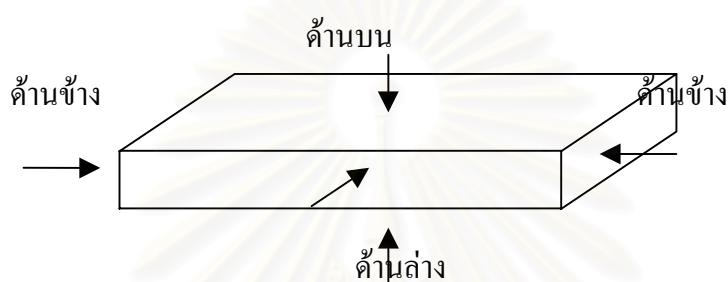
ถ่านดูดซับ	ระยะเวลาต้ม (ชั่วโมง)	ขนาดกะลา (ตารางเซนติเมตร)	ลักษณะทั่วไป	ร้อยละของ ถ่านที่ได้
ถ่าน 208	2	8x8	มีสีดำทั่วผิวนอก หักออกมี สีน้ำตาลเข้มตรงแกนเล็กน้อย	76.67
ถ่าน 308	3	8x8	มีสีดำทั่วทั้งชิ้น เปราะ แตกหักง่าย	73.86
ถ่าน 358	3.5	8x8	มีสีดำทั่วทั้งชิ้น เปราะ แตกหักง่าย	67.94
ถ่าน 202	2	2x2	มีสีดำทั่วทั้งชิ้น เปราะ แตกหักง่าย	72.36





รูปที่ 4.1 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเซลลูโลสกับสารละลายกรดซัลฟิวริก ทำให้กะลามะพร้าวมีสัดส่วนธาตุคาร์บอนมากขึ้นจนกลายเป็นถ่านทั่วทั้งชิ้น [23]

ส่วนในกรณีที่ใช้ระยะเวลาเท่ากัน กะลามะพร้าวเริ่มต้นขึ้นเล็กจะเปลี่ยนเป็นถ่านได้ทั่วขึ้นมากกว่าขึ้นใหญ่ เนื่องจากกะลามะพร้าวมีการเรียงตัวเป็นชั้นๆ หนาแน่นกับพื้นผิวกะลา สังเกตจากสีที่แตกต่างกันเป็นชั้นๆ จึงช่วยให้สารละลายกรดแพร่เข้าทางผิวด้านข้างกะลาได้เร็วกว่าผิวด้านบนและด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ดังนั้น กะลาขึ้นใหญ่เป็นถ่านได้ไม่ทั่วทั้งชิ้น เมื่อเทียบกับกะลาขึ้นเล็กเมื่อต้มนานเท่ากัน ดังผลการทดลองในตารางที่ 4.1 นั่นคือ ถ่าน 202 เป็นถ่านได้หมด ในขณะที่ ถ่าน 208 ยังคงมีส่วนที่ไม่เป็นถ่านเหลืออยู่ที่ตรงกลาง



รูปที่ 4.2 แสดงขึ้นกะลามะพร้าวและทิศทางการเข้าทำปฏิกิริยาของสารละลายกรด

ส่วนร้อยละของถ่านดูดซับที่ได้มีค่าลดลงเมื่อต้มนานขึ้น เนื่องจาก เมื่อต้มนานขึ้น เซลลูโลสจะเกิดการสลายตัวหลุดออกมาบางส่วน ทำให้ร้อยละของถ่านดูดซับที่ได้มีค่าลดลงเมื่อต้มนานขึ้น

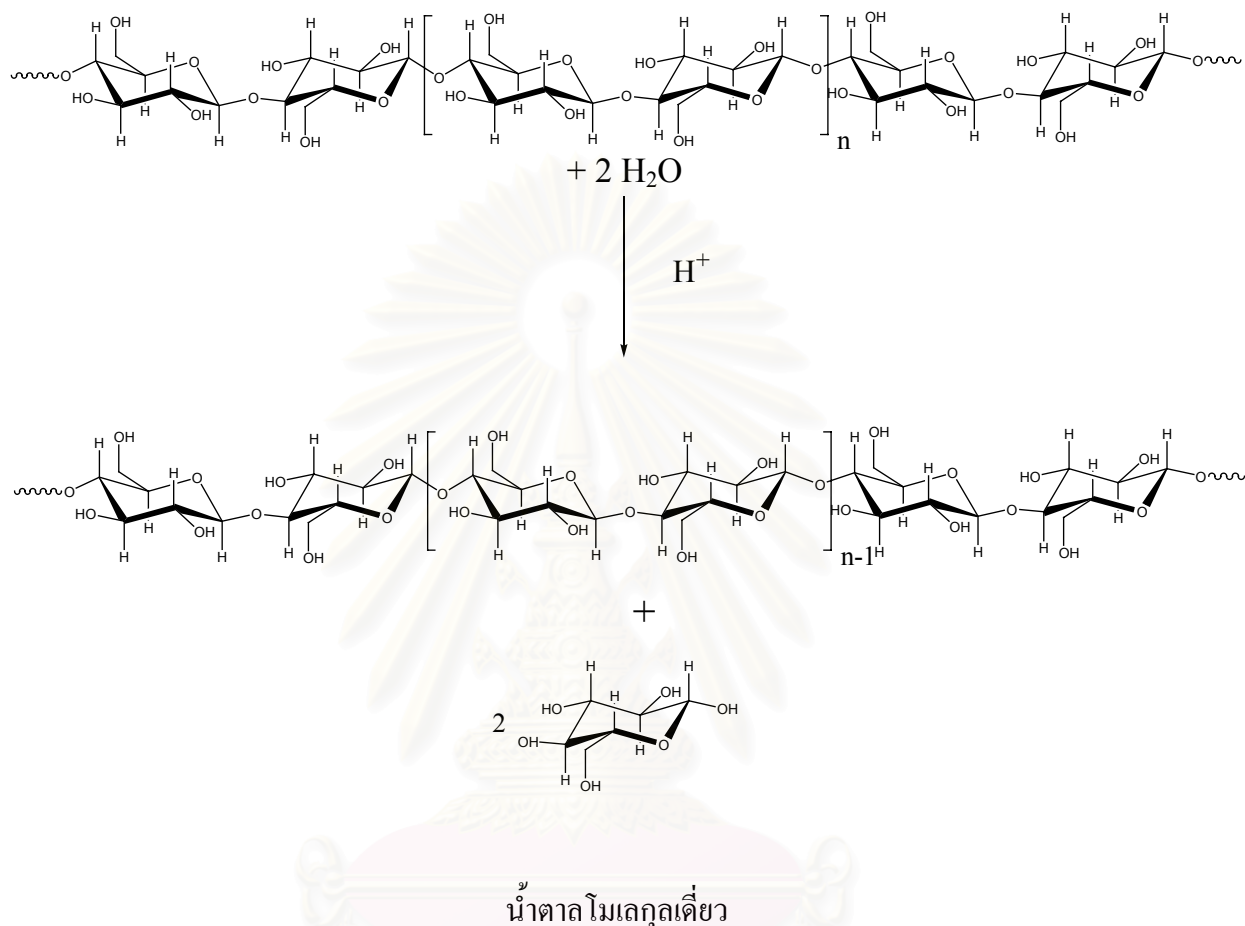
#### 4.2 การเพิ่มพื้นที่ผิวการดูดซับ

พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาณการดูดซับไอโอดีนของถ่านดูดซับที่เตรียมได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านดูดซับเมื่อต้มถ่านดูดซับด้วยเวลาและขนาดกะลาต่างกัน

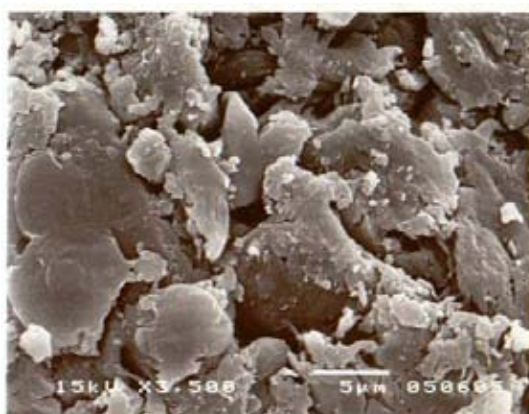
ถ่านดูดซับ	ผลการวิเคราะห์ BET		ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัม / กรัม)
	พื้นที่ผิว (ตารางเมตร/กรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม)	
ถ่าน 202	13.9	0.0219	342
ถ่าน 208	5.8	0.0102	272
ถ่าน 308	6.4	0.0116	285
ถ่าน 358	7.2	0.0128	306

ในงานวิจัยของเกรียงศักดิ์ [8] พบว่า ถ่านกะลาที่นำมาจากผ่านขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวมีค่าการดูดซับไอโอดีน 66 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ 1.4 ตารางเมตรต่อกรัม แสดงว่า การต้มกะลามะพร้าวในสารละลายกรดซัลฟิวริก ถ่านดูดซับที่ได้เกิดรูพรุนเพิ่มขึ้นจริง และค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านดูดซับ เมื่อต้มถ่านดูดซับด้วยระยะเวลาต่างกันและขนาดกะลามะพร้าวต่างกันมีค่าใกล้เคียงกัน อาจเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างกะลามะพร้าวกับสารละลายกรดซัลฟิวริก ทำให้เกิดการสลายตัวของเซลลูโลสบางส่วนหลุดออกไปเป็น น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ทำให้เมื่อต้มกะลามะพร้าวนานๆ ส่งผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย

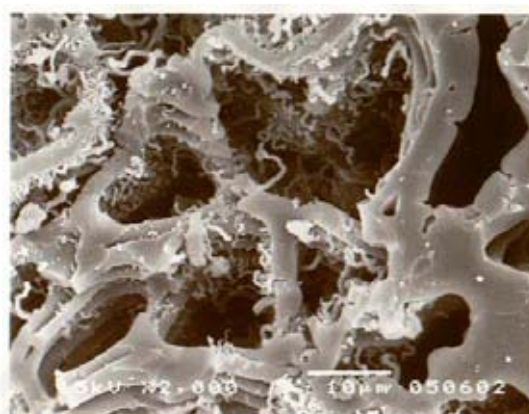


รูปที่ 4.3 แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเซลลูโลสกับสารละลายกรดซัลฟิวริก บางส่วนได้ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว [23]

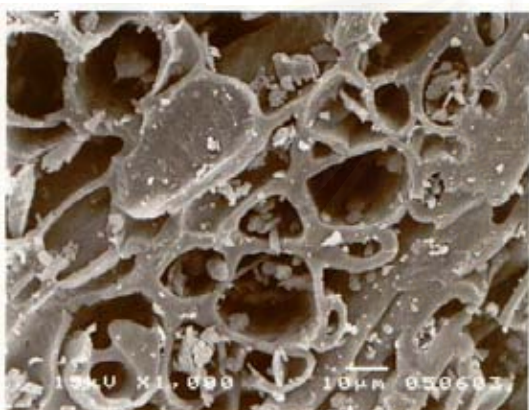
นอกจากนี้ ภาพถ่ายพื้นที่ผิวภายนอกที่ได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ยังแสดงให้เห็น ว่า หลังจากการต้มกะหล่ำในสารละลายกรดซัลฟิวริกแล้ว เกิดรูพรุนขึ้น ดังแสดงใน รูปที่ 4.4



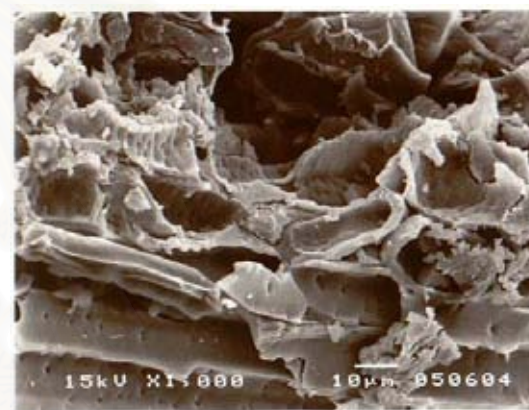
(1)



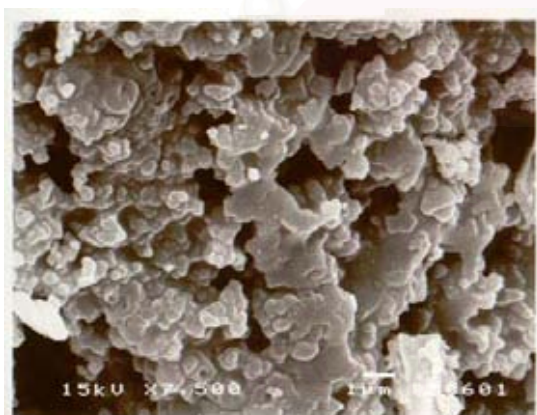
(2)



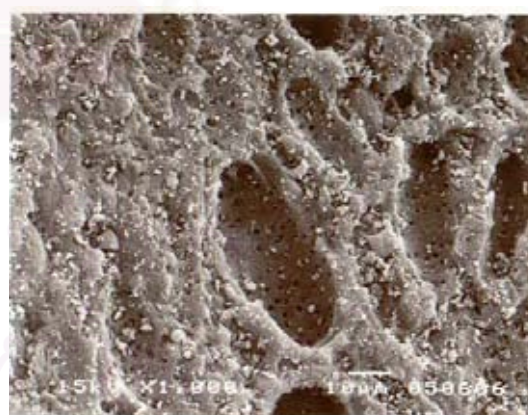
(3)



(4)



(5)



(6)

รูปที่ 4.4 พื้นผิวภายนอกของถ่านดูดซับ (1) ก่อนต้มด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก  
(2) ถ่าน 208 (3) ถ่าน 308 (4) ถ่าน 358 (5) ถ่าน 202 (6) PHO 8

### 4.3 การดูดซับก๊าซ

#### 4.3.1 ปริมาณการดูดซับก๊าซ

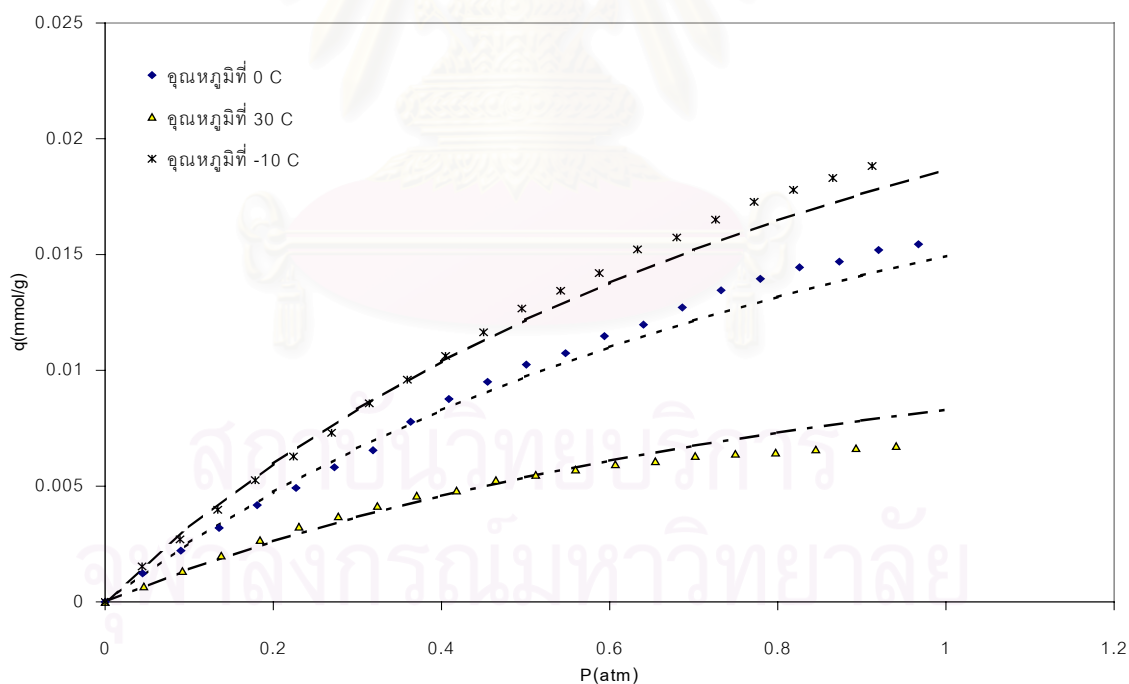
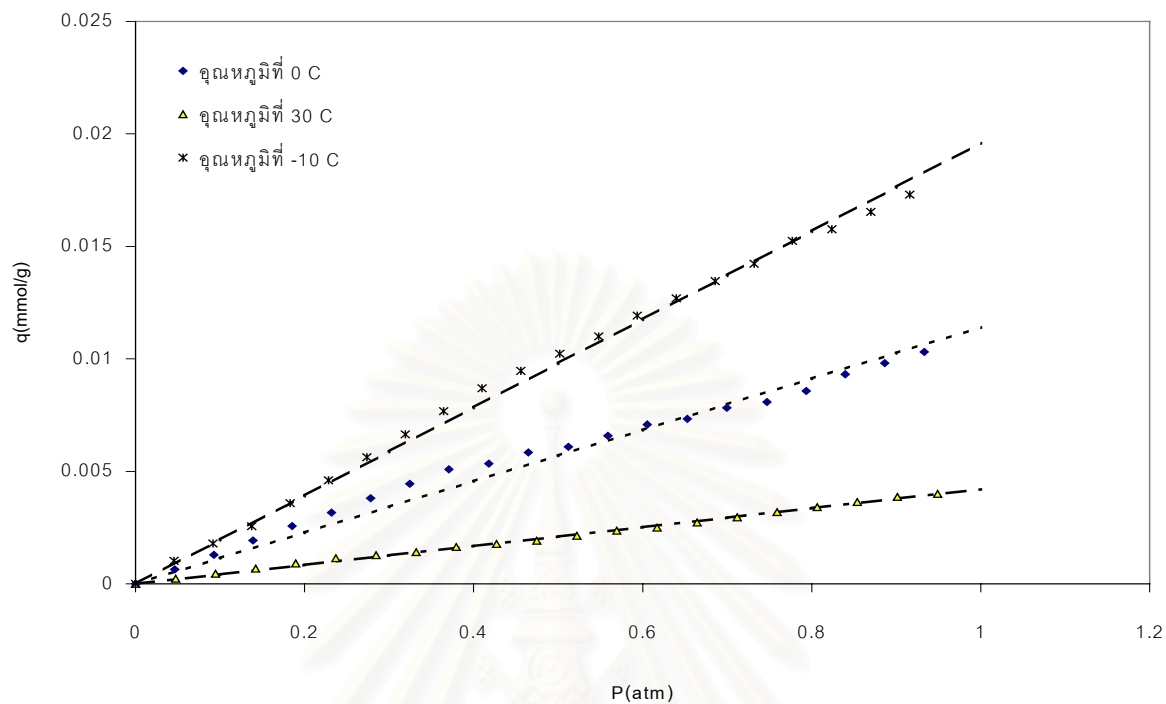
ปริมาณการดูดซับของก๊าซแต่ละชนิด สามารถคำนวณได้จากคุณสมบัติของก๊าซที่เติมเข้าระบบกับปริมาณก๊าซที่เหลืออยู่ในระบบ ซึ่งมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับก๊าซในอุดมคติ เนื่องจากค่า Compressibility factor มีค่าประมาณ 1 ผลการคำนวณแสดงในตาราง ก.2 ภาคผนวก ก ส่วนปริมาตรของชุดทดลองที่คำนวณได้หลังจากบรรจุถ่านดูดซับแล้ว มีค่าระหว่าง 208-211 ลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถหาได้จากการใช้ก๊าซฮีเลียมฉีดเข้าไปในชุดทดลองที่บรรจุถ่านดูดซับแล้ว จากนั้นคำนวณหาปริมาตรโดยคำนวณจากปริมาณก๊าซฮีเลียมที่ฉีดเข้าไป ตั้งแต่ความดัน 2 มิลลิเมตรปรอท จนกระทั่งความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท จะได้ปริมาตรรวมของระบบ ซึ่งปริมาตรของชุดทดลองที่คำนวณได้ แสดงในตารางที่ ข.2 ภาคผนวก ข

#### 4.3.2 สมดุลการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจน

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันของระบบกับปริมาณก๊าซผสมที่เติมเข้าระบบสำหรับกรณี ที่ใช้ก๊าซฮีเลียม ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจน พบว่า ในการฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในระบบที่ความดัน 2 มิลลิเมตรปรอท จนกระทั่งความดันเป็น 760 มิลลิเมตรปรอท ใช้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนมากกว่าก๊าซฮีเลียม แสดงถึงว่ามีการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนเกิดขึ้น ถ่านดูดซับที่เตรียมจากกะลามะพร้าว สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนได้

สำหรับกราฟสมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.5

พบว่า สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของเฮนรี ดังแสดงในรูปที่ ก.1 ภาคผนวก ก และค่าคงที่ของแบบจำลองการดูดซับของเฮนรีสำหรับการดูดซับก๊าซไนโตรเจน แสดงในตารางที่ 4.3 ส่วนการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ ดังแสดงในรูปที่ ก.2 ภาคผนวก ก และค่าคงที่แบบจำลองการดูดซับของ แลงเมียร์และปริมาณการดูดซับสูงสุด สำหรับการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.5 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน (บน) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ล่าง) และเส้นแสดงแบบจำลองการดูดซับ ด้วยถ่าน 308 ที่อุณหภูมิ  $-10$ ,  $0$  และ  $30$  °C

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าคงที่ในแบบจำลองของเฮนรีของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ( $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{atm}^{-1}$ )

ถ่านดูดซับ	อุณหภูมิที่ทดลองการดูดซับ (องศาเซลเซียส)		
	30	0	-10
ถ่าน 202	0.0041	0.0136	0.0195
ถ่าน 208	0.0023	0.0100	0.0154
ถ่าน 308	0.0042	0.0114	0.0196
ถ่าน 358	0.0045	0.0127	0.0192

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าคงที่ในแบบจำลองของแลงเมียร์ ( $\text{atm}^{-1}$ ) และปริมาณการดูดซับสูงสุด ( $\text{mmol/g}$ ) ของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

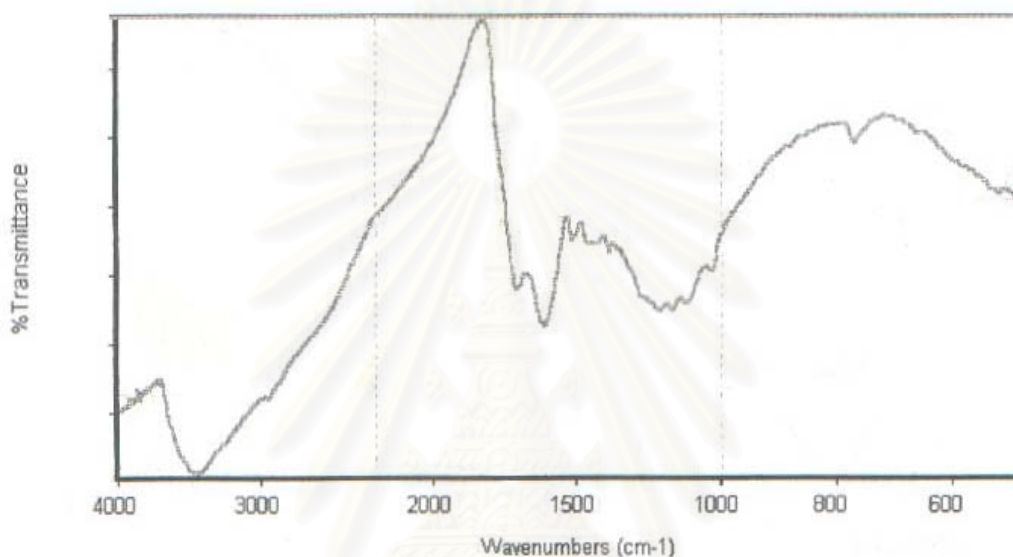
ถ่านดูดซับ	อุณหภูมิที่ทดลองการดูดซับ (องศาเซลเซียส)					
	30		0		-10	
	$K_L$	$q_s$	$K_L$	$q_s$	$K_L$	$q_s$
ถ่าน 202	1.0224	0.149	1.0233	0.0281	1.3227	0.0340
ถ่าน 208	0.8112	0.0139	0.8459	0.0262	0.8431	0.0397
ถ่าน 308	0.8477	0.0181	0.8645	0.0322	0.8806	0.0382
ถ่าน 358	0.8769	0.0182	0.8980	0.0308	0.9379	0.0340

สมดุลการดูดซับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนมีค่าต่างกันว่าความดันต่ำกว่า 0.6 บรรยากาศ แสดงว่า สามารถแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซไนโตรเจนได้

การดูดซับก๊าซไนโตรเจน ค่าคงที่ของแบบจำลองการดูดซับที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิดูดซับเดียวกัน สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าคงที่ของแลงเมียร์และปริมาณการดูดซับสูงสุดที่ได้ ก็มีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกัน ส่วนถ่าน 208 ค่าคงที่ของแบบจำลองการดูดซับที่ได้ มีค่าน้อยกว่าถ่านดูดซับชนิดอื่นๆ เนื่องจากถ่าน 208 ยังมีส่วนที่ไม่เป็นถ่านเหลืออยู่



สำหรับสมมูลการดูดซับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนที่ได้มีค่าต่างกัน เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันของถ่านดูดซับ ในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านดูดซับจากกะลามะพร้าว โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่า หมู่ฟังก์ชันของถ่านดูดซับประกอบไปด้วย หมู่ไฮดรอกซิล หมู่คาร์บอนิล และ หมู่อีเทอร์ ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 3,500 1,600 และ 1,200 เซนติเมตร<sup>-1</sup> ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6

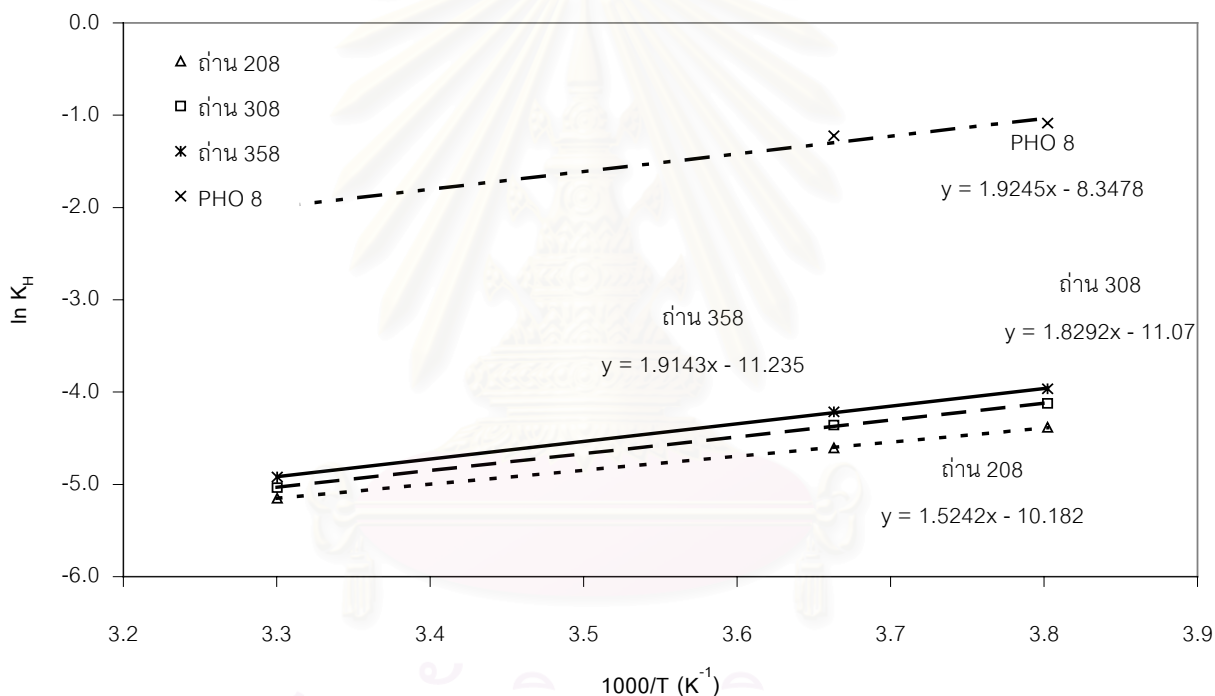


รูปที่ 4.6 FT-IR สเปกตรัมแสดงหมู่ฟังก์ชันของถ่านดูดซับจากกะลามะพร้าว

จากหมู่ฟังก์ชันที่พบแสดงให้เห็นว่า ถ่านดูดซับที่ได้มีทั้งตำแหน่งที่มีขั้วและไม่มีขั้ว ซึ่งมีผลทำให้ถ่านดูดซับชนิดนี้ สามารถดูดซับได้ทั้งตัวถูกดูดซับที่มีขั้วและไม่มีขั้ว ขึ้นกับตำแหน่งที่เกิดการดูดซับ เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นโมเลกุลที่มีความมีขั้ว ในขณะที่ก๊าซไนโตรเจนนั้นเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว จึงทำให้ถ่านดูดซับสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าก๊าซไนโตรเจน เนื่องจากแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับถ่านดูดซับมีค่ามากกว่าก๊าซไนโตรเจนกับถ่านดูดซับ แต่ปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าจำกัดเพียงค่าหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ ดังนั้นที่ความดันสูงๆ อาจดูดซับก๊าซไนโตรเจนแทนได้

### 4.3.3 ค่าความร้อนของการดูดซับ

สำหรับแบบจำลองของเฮนรี่ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับขึ้นกับอุณหภูมิของระบบสอดคล้องกับปฏิกิริยาคายความร้อน คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับจะลดลง [24] ตามสมการของ Van 't Hoff แสดงในข้อ ก.3 ภาคผนวก ก การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln K_H$  กับ  $1000/T$  เพื่อนำค่าความชันมาคำนวณหาค่าความร้อนของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า ค่าความร้อนของการดูดซับของถ่าน 208, ถ่าน 208, ถ่าน 308, ถ่าน 358 และ PHO 8 มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.5 วิธีคำนวณแสดงในตารางที่ ข.8 และ ข.9 ในภาคผนวก ข



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln K_H$  กับ  $1000/T$  (K<sup>-1</sup>) ของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 308, ถ่าน 358 และ PHO 8

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการคำนวณค่าความร้อนของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 202, ถ่าน 208, ถ่าน 308 และถ่าน 358

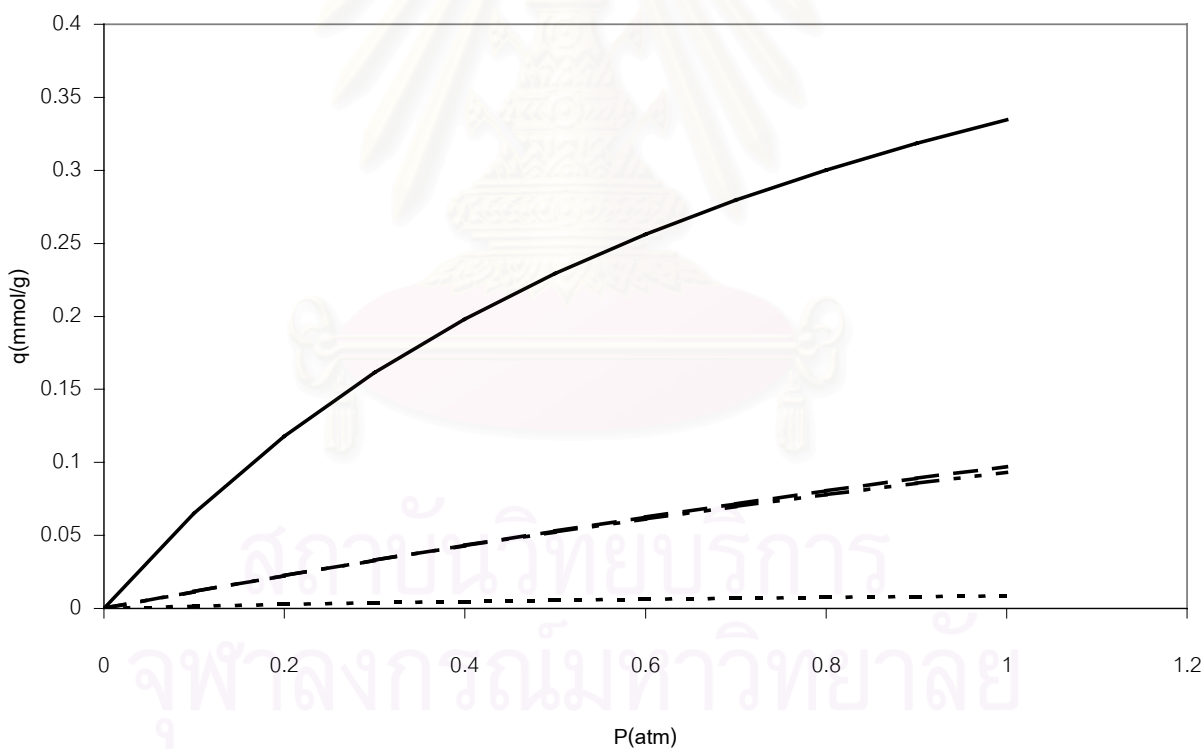
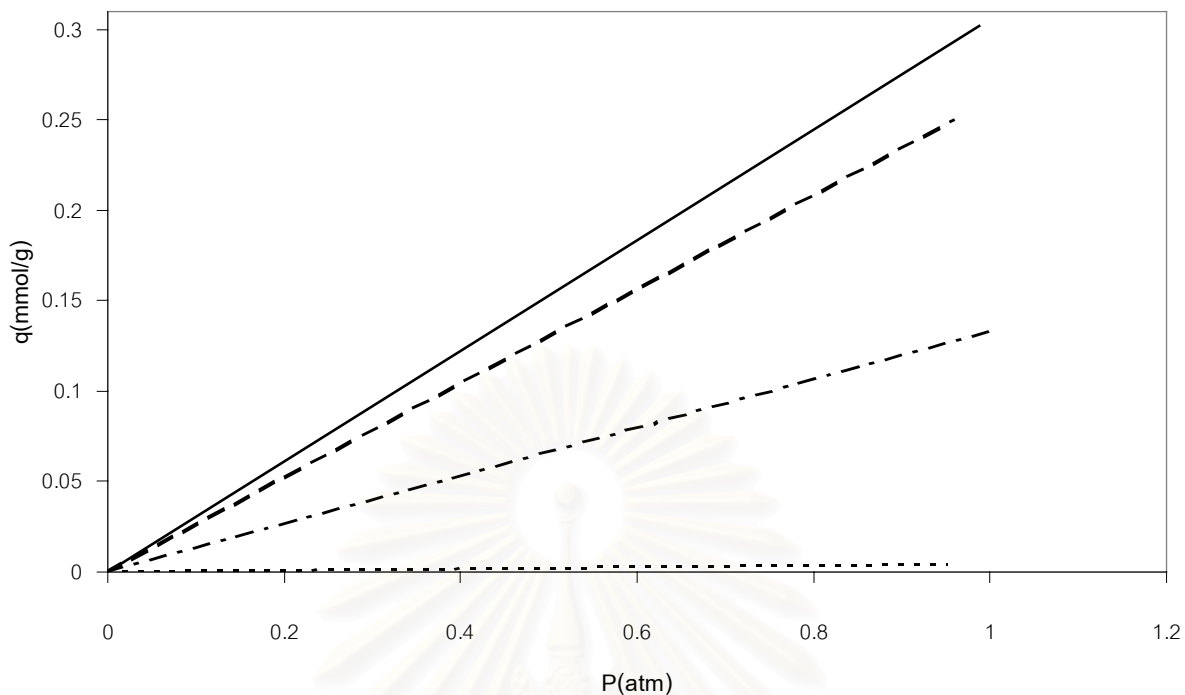
ถ่านดูดซับ	ค่าความร้อนของการดูดซับ (กิโลจูล/โมล)
ถ่าน 202	-14.53
ถ่าน 208	-12.67
ถ่าน 308	-15.21
ถ่าน 358	-15.92

#### 4.3.4 การเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยอื่น

##### 1. การเปรียบเทียบสมดุลการดูดซับของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การเปรียบเทียบสมดุลการดูดซับของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนถ่าน 358 ใช้คุณสมบัติในการดูดซับที่ 30 องศาเซลเซียส กับตัวดูดซับอื่นๆ ในอุตสาหกรรม ดังแสดงในรูป 4.8 [25]

สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของถ่าน 358, ถ่าน PHO 8, ถ่าน ASC และถ่าน COLUMBIA GRADE L มีลักษณะเช่นเดียวกับแบบจำลองการดูดซับของเฮนรี ในขณะที่สมดุลการดูดซับการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านเหล่านั้นสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ แต่ถ่านดูดซับที่เตรียมได้สามารถดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้น้อยกว่าถ่านเหล่านั้น เนื่องจาก พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านดูดซับที่เตรียมได้มีค่าน้อยกว่าถ่านอุตสาหกรรมอื่นๆ มาก



รูปที่ 4.8 แสดงสมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน (บน) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ล่าง) และเส้นแบบจำลองการดูดซับของเฮนรี่ (สำหรับก๊าซไนโตรเจน) ของแลงเมียร์ (สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์) ด้วยถ่าน 358, PHO 8, ถ่าน ASC และถ่าน COLUMBIA GRADE L ที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}C$  ( — PHO 8) ( --- ถ่าน ASC) (- - - - ถ่าน COLUMBIA GRADE L) ( - - - - - ถ่าน 358)

## 2. การเปรียบเทียบค่าความร้อนของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน

จากการทดลอง คำนวณหาค่าความร้อนของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของถ่าน 358 กับ PHO 8 พบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับชนิด Bergbau-Forschung CMS ของ E.S.Kikkinides และ R.T. Yang [26] ได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.6 ซึ่งได้ค่าความร้อนการดูดซับใกล้เคียงกัน แม้ว่าถ่าน 358 ถ่าน PHO 8 และถ่าน Bergbau-Forschung CMS มีพื้นที่ผิวและเตรียมด้วยวิธีที่ต่างกัน แต่ถ่านเหล่านี้ดูดซับก๊าซไนโตรเจนด้วยแรงชนิดเดียวกัน ดังนั้น พลังงานของการดูดซับจึงมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าความร้อนของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของถ่าน 358, PHO 8 และ Bergbau-Forschung CMS

ตัวดูดซับ	ค่าความร้อนของการดูดซับ (กิโลจูล/โมล)
ถ่าน 358	-15.92
PHO 8	-16.00
Bergbau-Forschung CMS	-15.90

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทสรุป

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ระยะเวลาที่ใช้ในการต้ม กรณีต้มถ่านดูดซับขนาด 8x8 ตารางเซนติเมตร ต้องต้มนาน 3 ชั่วโมงขึ้นไป จึงจะกลายเป็นถ่านหมด ส่วนในการต้มถ่านดูดซับขนาด 2x2 ตารางเซนติเมตร ต้มนานเพียง 2 ชั่วโมง ก็กลายเป็นถ่านหมดแล้ว ถ่านดูดซับที่เป็นถ่านหมด สมดุลการดูดซับที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันและมากกว่ากรณีเป็นถ่านไม่หมด
2. แบบจำลองการดูดซับของเฮนรีสำหรับการดูดซับก๊าซไนโตรเจน
3. แบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์สำหรับการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
4. สำหรับการดูดซับก๊าซไนโตรเจนค่าความร้อนของการดูดซับมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเทียบกับถ่าน PHO แม้ว่าถ่าน PHO จะมีปริมาณการดูดซับก๊าซไนโตรเจนได้ดีกว่า
5. สมดุลการดูดซับของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านดูดซับ มีค่าแตกต่างกันที่ความดันต่ำกว่า 0.6 บรรยากาศ จึงสามารถแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซไนโตรเจนได้
6. ถ่านดูดซับที่เตรียมได้ เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชนิดอื่นๆแล้ว มีข้อได้เปรียบคือต้นทุนการผลิตต่ำ และวัตถุดิบหาได้ง่าย

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านดูดซับจากชั้นกะลามะพร้าวที่เหมาะสม เช่น ความเข้มข้นของสารละลายกรด อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเตรียม
2. ถ้าเตรียมถ่านดูดซับด้วยการต้มกะลามะพร้าวในสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำๆ ควรมีระบบควบแน่นไอน้ำที่ระเหย

## รายการอ้างอิง

1. ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ. การผลิตก๊าซสังเคราะห์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทน. รายงานของโครงการวิจัย(จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์ เลขที่ 98-GER-2528).สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
2. Ruthven, D. M. Principle of Adsorption and Adsorption Process. New York: John Wiley&Sons , Inc., 1984.
3. Sircar, S. Air Fractionation by Adsorption. Sep. Sci. Tech. **23**, 1988.
4. Rouquerol, F., Rouquerol, J., King, S. Adsorption by Powders & Porous Solids. Methodology and applications. London: Academic Press, 1999.
5. Derbyshire, F., Jagtoyen, M., *et al.* Carbon Materials in Environmental Applications. In L.R. Radovic (ed.), Chemistry and Physics of Carbon. **27**, New York: Marcel Dekker, Inc., 2001.
6. Yang , R. T. , Gas Adsorption by Adsorption Process. Boston: Butterworths, 1987.
7. กันตสุดา เวชรักษ์ และ เฉลิมพล ใจหนัก. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์.ภาควิชาเคมีเทคนิค. คณะวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544
8. เกียรติศักดิ์ กิตติพิมาน. การดูดซับก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจนด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542
9. วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส Eucalyptus camaldulensis Dehnh. โดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค. คณะวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543

10. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, เลอสรวง เมฆสุด, ลงกลนี เลาหวิจิตร, ประจง โภคสวัสดิ์ และ รุ่งวิภา ไชติรุ่งเรือง. การทำถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว . วารสารเคมีวิศวกรรม เทคโนโลยีทางอาหารและเชื้อเพลิง: ฉบับที่ 1 ปีที่ 2. 2523.
11. อุไรวรรณ ธรรมรัตน์พคุณ. การทำถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยการกระตุ้นด้วย ไอน้ำ. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและการพลังงาน, 2523.
12. พิสุทธิ พันธุ์ชาติกุล และ สมิทธิ รัตนสุทธิพงษ์. การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำ ตาลโตนมมาผลิตถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2535.
13. ดำรง ขุนมงคล และอภิสิทธิ์ เจริญกุล. การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้เกลือแกงเป็นตัว กระตุ้น. วิศวกรรมสาร. เล่มที่ 6. 2533.
14. มานัด แก้วถาวร. ผลของโซเดียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2537.
15. สุภาภรณ์ มั่นไทรทอง. การหาการดูดซับของโทลูอีนและไซลีนบนถ่านกัมมันต์ซึ่งเตรียม จากซังข้าวโพดโดยเทคนิคโครมาโทกราฟี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2541.
16. บุญชัย ตระกูลมหชัย. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาโตนมในฟลูอิโดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2537.
17. สุทธิพนธ์ ศักดิ์สวัสดิ์. การเตรียมตัวดูดซับจากกะลามะพร้าวโดยใช้สารละลายกรด ซัลฟูริก. รายงานโครงการวิศวกรรมเคมี. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2543.
18. สิทธิพร อติเรกลาภ. การเตรียมตัวดูดซับจากกะลามะพร้าวโดยใช้สารละลายซิงค์ คลอไรด์. รายงานโครงการวิศวกรรมเคมี. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2543.
19. ยศรัักษ์ สุวรรณพันธ์มณี. . การเตรียมตัวดูดซับจากกะลามะพร้าว โดยใช้สารละลาย กรดฟอสฟอริก. รายงานโครงการวิศวกรรมเคมี. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2543.
20. Perry, R.H. Perry's Chemical Engineer's Handbook. New York: McGraw-Hill Book Company.,1997



21. ASTM Committee on Standards. American Standard of Testing Materials. Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon ASTM D4067-94. National Institute of Standards and Technology, 1994.
22. แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. ภาควิชา เคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2535.
23. Fukuoka, M. At al. Natural Products Chemistry VOL.2. National Institute of Hygienic Science. New York: Tokyo and Academic Press, Inc. Kodansha LTD., 1975
24. กฤติยา เสือสีนาค. การดูดซับแก๊สโพรเพนด้วยตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากกะลามะพร้าวโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
25. Valenzuela, D. P., Myers, A. L., Adsorption Equilibrium Data Handbook: New York., 1989.
26. Kikkinides ,E. S., Yang ,R. T. Concentration and Recovery of CO<sub>2</sub> from Flue Gas by Pressure Swing Adsorption. Ind. Eng. Chem. Res. 32, (1993): 2714.
27. กัญจนา บุญยเกียรติ. การคำนวณขั้นต้นในวิชาวิศวกรรมเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย:กรุงเทพมหานคร, 2531



## ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### ตัวอย่างการคำนวณ

#### ก.1 การหาค่าการดูดซับไอโอดีน

##### ก.1.1 วัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งแม่นยำ 4 ตำแหน่ง
2. ตู้อบ
3. กรวยกรอง
4. บีกเกอร์
5. บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร
6. บีเปต
7. กระดาษกรอง เบอร์ 1
8. หลอดหยด
9. ขวดสีชา
10. ขวดวัดปริมาตร 1 ลิตร
11. น้ำกลั่น

##### ก.1.2 สารเคมี

1. กรดไฮโดรคลอริก
2. โซเดียมไฮโอซัลเฟต
3. โซเดียมคาร์บอเนต
4. ไอโอดีน
5. โพแทสเซียมไอโอไดด์
6. โพแทสเซียมไอโอเดต
7. น้ำแป้ง

### ก.1.3 การเตรียมสารเคมีสำหรับการทดลอง

#### 1. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาณ 70 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น 550 มิลลิลิตร แล้วคนให้เข้ากัน เทเก็บใส่ขวดไว้

#### 2. สารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตเข้มข้น $0.100 \pm 0.001$ นอร์มอล

ชั่งโซเดียมไฮโอซัลเฟต 24.820 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่นที่เพิ่งต้มเดือดใหม่ๆ ปริมาตรประมาณ  $75 \pm 25$  มิลลิลิตร แล้วคนให้ละลาย จากนั้นจึงเติมโซเดียมคาร์บอเนต  $0.1 \pm 0.01$  กรัม เพื่อป้องกันการสลายตัวของโซเดียมไฮโอซัลเฟตเนื่องจากแบคทีเรีย จากนั้นเจือจางให้มีปริมาตร 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตร เทใส่ขวดสีชา ตั้งทิ้งไว้ 4 วัน ก่อนนำมาใช้งาน

#### 3. สารละลายไอโอดีนเข้มข้น $0.100 \pm 0.001$ นอร์มอล

ชั่งไอโอดีน 12.700 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ 19.100 กรัม ผสมให้เข้ากัน แล้วเติมน้ำกลั่น 2-5 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์คนให้ละลาย จากนั้นค่อยๆ เติมน้ำกลั่นครั้งละ 5 มิลลิลิตร แล้วคนจนละลายหมด จากนั้นเจือจางให้ได้ 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตร เทเก็บในขวดสีชา

#### 4. สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต $0.100$ นอร์มอล

อบโพแทสเซียมไอโอเดตประมาณ 4 กรัม ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จากนั้น ทิ้งให้เย็นในอินดิเคเตอร์ที่อุณหภูมิห้อง นำสารที่อบแห้งแล้ว 3.5667 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นเจือจางให้ได้ 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตร ผสมให้เข้ากัน แล้วเทใส่ขวดเก็บสารที่มีฝาปิด

#### 5. น้ำแป้ง

ผสม  $1 \pm 0.5$  กรัม ของแป้งในน้ำเย็น 5-10 มิลลิลิตร เทสารข้างต้นในน้ำกลั่นที่ต้มเดือดใหม่ๆ จนได้ปริมาตร 1 ลิตร พร้อมกับคนตลอดเวลา ทิ้งให้เย็นแล้วเทเก็บใส่ขวดเก็บสาร สารนี้ควรเตรียมใหม่ทุกครั้งในวันที่ทำการทดลอง

#### ก.1.4 การหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย

##### 1. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตในข้อ 4 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมโพแทสเซียมไอโอไดด์  $2.00 \pm 0.01$  กรัม ลงไป เขย่าให้ละลาย ปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร เติมลงในสารละลายขั้นต้น นำมาไตเตรทด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในข้อ 2 จนได้สารละลายสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแบ่งลงไป 2-3 หยด เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์ แล้วไทเทรตต่อไปจนได้สารละลายไม่มีสี จากนั้นคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้จาก

$$N_1 = \frac{P_1 \times R}{S} \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ	$N_1$	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	(นอร์มอล)
	$P_1$	คือ	ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต	(มิลลิลิตร)
	$S$	คือ	ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	(มิลลิลิตร)
	$R$	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต	(นอร์มอล)

##### 2. ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

ปิเปตสารละลายไอโอดีน 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน จนได้สารละลายสีเหลืองอ่อน หยดน้ำแบ่งลงไป 2-3 หยด เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์แล้วไทเทรตต่อไปจนได้สารละลายไม่มีสี จากนั้นคำนวณหาความเข้มข้นจากสูตร

$$N_2 = \frac{S \times N_1}{I} \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ	$N_2$	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน	(นอร์มอล)
	$S$	คือ	ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	(มิลลิลิตร)
	$N_1$	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	(นอร์มอล)
	$I$	คือ	ปริมาตรของสารละลายไอโอดีน	(มิลลิลิตร)

ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน ต้องมีค่าในช่วง  $0.100 \pm 0.001$  นอร์มอล ถ้าพบว่าความเข้มข้นไม่อยู่ในช่วงดังกล่าวต้องเตรียมไอโอดีนใหม่

#### ก.1.5 วิธีการทดสอบการดูดซับไอโอดีน

1. บดตัวดูดซับที่ต้องการนำมาวิเคราะห์ให้มีขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน (325 เมช)
2. อบไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือ ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์
3. ชั่งตัวดูดซับที่บดแล้ว 1.000-1.600 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปิดฝาสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 % โดยน้ำหนัก 10 มิลลิลิตร ใส่ลงไปเขย่าจนกระทั่งตัวดูดซับเปียกทั้งหมด
4. นำขวดรูปชมพู่ไปวางบนแผ่นให้ความร้อน ต้มจนเดือดประมาณ 30 วินาที เพื่อไล่สารประกอบซัลเฟต ซึ่งเป็นสารมลทินทิ้ง แล้วยกลงตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง
5. ปิดฝาสารละลายไอโอดีน 0.100 นอร์มอล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวด ปิดจุกยาง และเขย่าแรงๆ 30 วินาที
6. กรองโดยอาศัยเครื่องปั๊มสุญญากาศ ด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1
7. ทิ้งส่วนที่กรองได้ 20-30 มิลลิลิตรไป จากนั้นกรองต่อไปจนหมด
8. ปิดฝาสารละลายที่กรองได้ 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.100 นอร์มอล จนได้สารละลายสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแบ่งลงไป 2 มิลลิลิตร เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์ แล้วไทเทรตต่อไปจนได้สารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ทั้งหมด (S)
9. นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณค่าการดูดซับไอโอดีน จากสูตร

$$I_2 No. = \frac{X}{m} D \quad (ก.3)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } \frac{X}{m} &= (A- 2.2 BS) / M \\ A &= N_2 \times 12693.0 \\ B &= N_1 \times 126.93 \end{aligned}$$

เมื่อ	$\frac{X}{m}$	คือ	ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	$N_1$	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (นอร์มอล)
	$N_2$	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (นอร์มอล)
	S	คือ	ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)
	M	คือ	น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ (กรัม)

#### ก.1.6 ตัวอย่างการคำนวณค่าการดูดซับไอโอดีน

กรณีต้มกะหล่ำพว้าขนาด 8x8 เซนติเมตร ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 70% โดยปริมาตร เป็นเวลา 3.5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส  
 ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่ใช้ทดสอบ 0.1030 M  
 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ทดสอบ 0.0982 M

#### ครั้งที่ 1

น้ำหนักผงกะลาที่ใช้ทดสอบ 1.00 กรัม

ปริมาณสารละลายไอโอดีนที่ใช้ในการเขย่า 100 มิลลิลิตร

ปริมาณสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต 36.3 มิลลิลิตร

$$\text{จากสูตร} \quad X = A - (KB \times S)$$

แทนค่า

$$A = 0.1030 \times 100 \times 126.93$$

$$B = 0.0982 \times 126.93$$

$$K = (100+10)/50$$

$$M = 1.00$$

จะได้ค่า

$$X = 311.685 \quad \text{มิลลิกรัม}$$

และการทดลองครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 สามารถนำมาคำนวณหาค่า X ด้วยวิธีเดียวกัน ได้ผลดังนี้

ครั้งที่ 2

$$\begin{aligned} M &= 1.00 && \text{กรัม} \\ X &= 319.913 && \text{มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

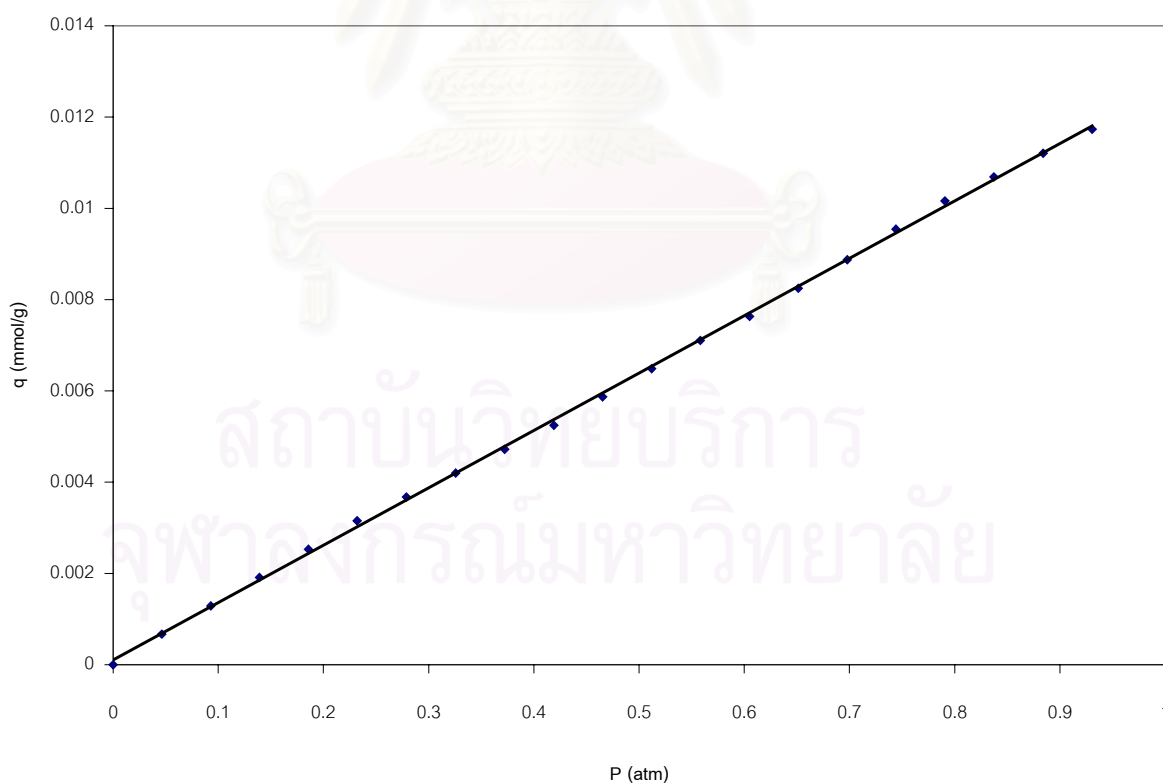
ครั้งที่ 3

$$\begin{aligned} M &= 1.00 && \text{กรัม} \\ X &= 286.998 && \text{มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

ดังนั้น ได้ค่าการดูดซับไอโอดีน  $(311.685+319.913+286.998)/3 = 306.20$  มิลลิกรัม

ก.2 สมดุลการดูดซับของเฮนรีและแลงเมียร์

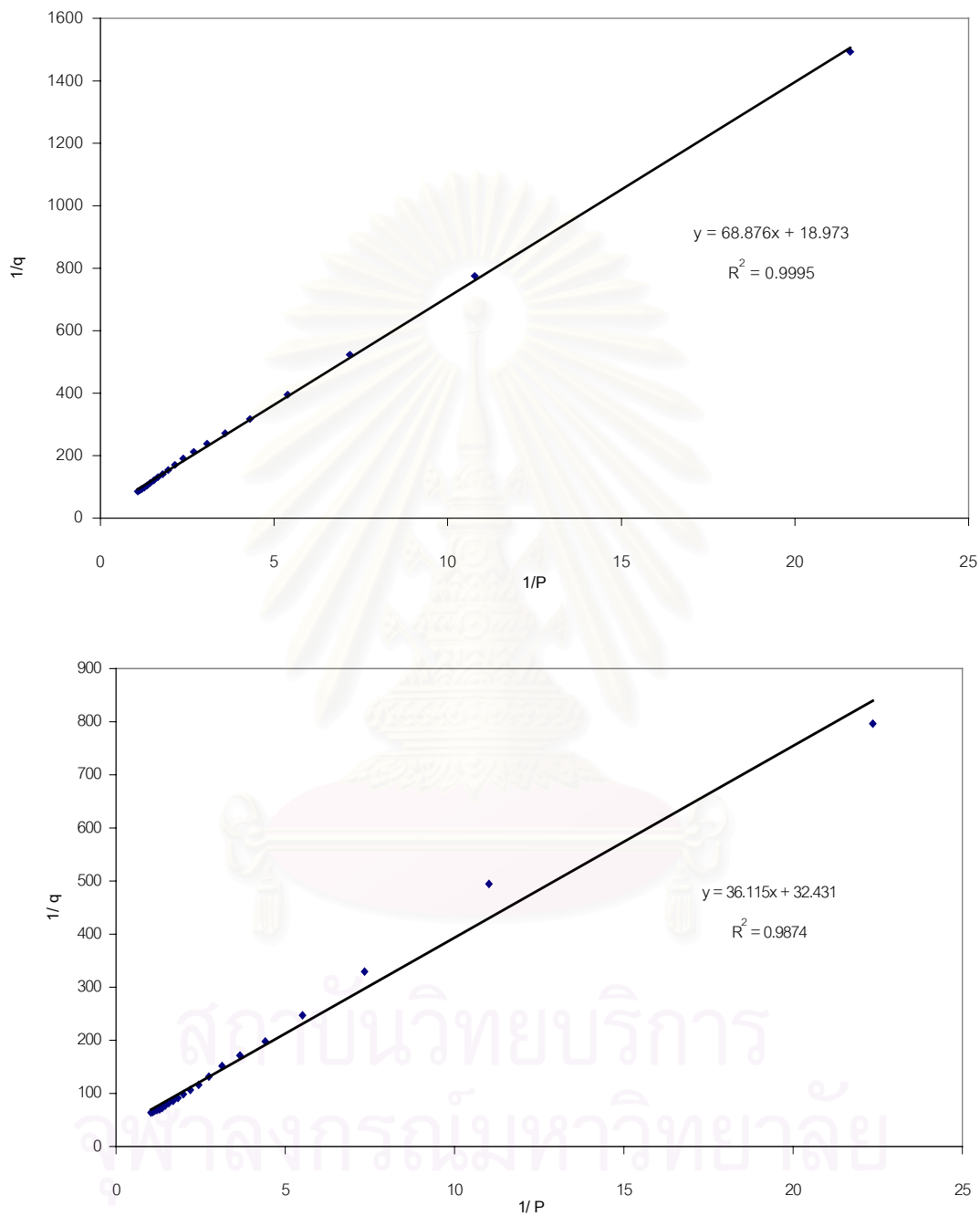
สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนสอดคล้องกับแบบจำลองสมดุลการดูดซับของเฮนรี อาศัยความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณการดูดซับกับความดันย่อยของตัวถูกดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ ก.1 โดยที่ความชันของกราฟ คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของเฮนรี



รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ที่ 0 องศาเซลเซียส ด้วยถ่าน 308 ตามแบบจำลองสมดุลการดูดซับของเฮนรี



ส่วนในแบบจำลองของแลงเมียร์ อาศัยความสัมพันธ์เชิงเส้น ระหว่างส่วนกลับของปริมาณ การดูดซับและส่วนกลับของความดันย่อยของตัวถูกดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน (บน) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ล่าง) ที่  $0^{\circ}\text{C}$  ด้วยถ่าน 358

### ก.3 การหาค่าความร้อนของการดูดซับ

จากสมการของ Van 't Hoff ดังแสดงในสมการ (ก.1)

$$\frac{\partial \ln K}{\partial T} = \frac{\Delta H}{RT^2} \quad (\text{ก.1})$$

ถ้าความร้อนของการดูดซับ ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ จะได้ ลอการิทึมของค่าคงที่สมดุลการดูดซับ ( $\ln K_H$ ) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับส่วนกลับของอุณหภูมิ ( $1/T$ ) แสดงค่า  $\ln K_H$  ในตารางที่ ก.1 ดังนั้น ค่าคงที่ของการดูดซับ สามารถหาได้จากความชันของเส้นตรง จากการสร้างกราฟระหว่าง  $\ln K_H$  กับ  $1/T$  ดังแสดงในรูปที่ ก.3 และสมการ (ก.2)

$$\ln K_H = \ln K_0 - \frac{\Delta H}{RT} \quad (\text{ก.2})$$

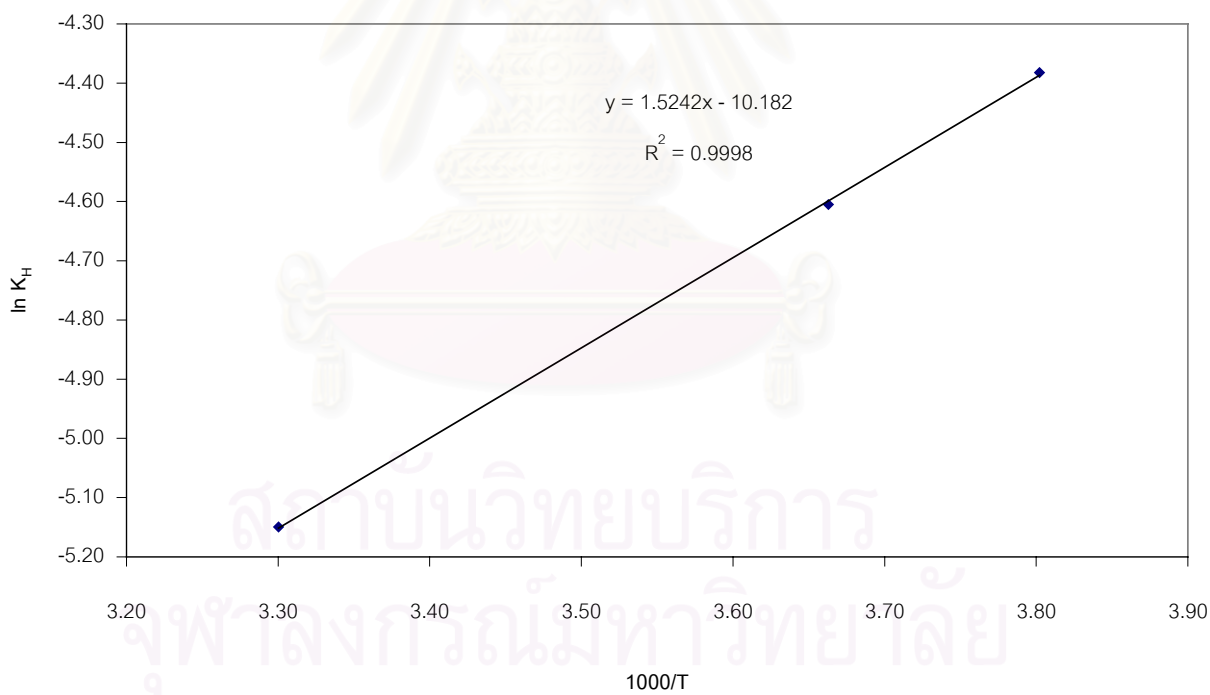
ค่าความชันของกราฟ มีค่าเท่ากับ  $-\frac{\Delta H}{R}$

จากรูปที่ ก.1 สามารถคำนวณหาค่าความร้อนของการดูดซับได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่าความร้อนของการดูดซับ} &= \text{ความชัน} \times R \\ &= 1.5242 \times 8.314 \\ &= 12.6722 \quad \text{กิโลจูลต่อโมล} \end{aligned}$$

ตารางที่ ก.1 แสดงค่า  $\ln K_H$  ของก๊าซไนโตรเจนจากแบบจำลองของเฮนรี ที่อุณหภูมิ-10, 0 และ 30 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (เคลวิน)	1000/T (เคลวิน <sup>-1</sup> )	$\ln K_H$ ของถ่านกะลา				
		ถ่าน 208	ถ่าน 308	ถ่าน 358	ถ่าน 202	PHO 8
303	3.3003	-6.0748	-5.4968	-5.4727	-4.9762	-2.0174
273	3.6630	-4.6052	-4.2977	-4.4741	-4.3275	-1.2221
263	3.8023	-4.1734	-3.9373	-3.9322	-4.1044	-1.0853



รูปที่ ก.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln K_H$  กับ  $1000/T$  สำหรับการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของถ่าน 208

#### ก.4 วิธีในการคำนวณหาปริมาณการดูดซับ

สภาวะของการวิจัยที่ได้กำหนดไว้ ทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนมีพฤติกรรมเป็นก๊าซอุดมคติ ดังแสดงผลในตารางที่ 2

ตารางที่ ก.2 แสดงค่า compressibility factor (Z) ที่สภาวะต่างๆ ในการทดลอง [27]

ความดัน (atm)	อุณหภูมิ (°C)	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
0	-10	$Z \cong 1$	$Z \cong 1$
	0	$Z \cong 1$	$Z \cong 1$
	30	$Z \cong 1$	$Z \cong 1$
1	-10	$Z \cong 1$	$Z \cong 1$
	0	$Z \cong 1$	$Z \cong 1$
	30	$Z \cong 1$	$Z \cong 1$

ดังนั้น ความดันของระบบจึงสัมพันธ์กับปริมาณก๊าซที่เหลือในระบบ ดังนี้

Ideal gas

$$P_{\text{sys}} = (RT/V) n_{\text{sys}}$$

ตัวอย่าง                      ความดัน                      อุณหภูมิ                      ปริมาณโมลของก๊าซที่ไม่ถูก

ดูดซับ

ณ จุดที่ความดันเข้าสู่สมดุล

$$P_1 \qquad T_1 \qquad n_1 = P_1 V / RT_1$$

$$P_2 \qquad T_2 \qquad n_2 = P_2 V / RT_2$$

โดย  $V =$  ปริมาตรของชุดทดลองที่หักปริมาตรของตัวดูดซับที่อยู่ภายในชุดทดลองออก

ปริมาณโมลของก๊าซที่ไม่ถูกดูดซับที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการฉีดก๊าซเพิ่มในแต่ละครั้ง =  $n_2 - n_1$

ปริมาณก๊าซที่เข้าระบบในแต่ละครั้ง =  $P_{\text{SYS}} V_{\text{SYS}} / RT = n_{\text{SYS}}$

โดยที่  $P_{\text{SYS}} =$  ความดันภายในเข็มฉีดยา = 1 atm

$V_{\text{SYS}} =$  ปริมาตรในการฉีดแต่ละครั้ง

ปริมาณโมลของก๊าซที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อมีการฉีดก๊าซเพิ่มแต่ละครั้ง =  $n_{\text{SYS}} - (n_2 - n_1)$



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

### ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ข.1 มวลของตัวดูดซับ (กรัม)

ตัวดูดซับ	มวล (กรัม)
ถ่าน 208	30.0002
ถ่าน 308	29.9998
ถ่าน 358	30.0122
ถ่าน 202	30.0045
PHO 8	29.9986

ตารางที่ ข.2 ปริมาตรของชุดอุปกรณ์การทดลองหลังบรรจุตัวดูดซับ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

ตัวดูดซับ	ปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
ถ่าน 208	208.2607
ถ่าน 308	208.1415
ถ่าน 358	207.8128
ถ่าน 202	208.2751
PHO 8	211.3375

ตารางที่ ข.3 ค่าคงที่ในแบบจำลองของเฮนรี่ของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน โดยการดูดซับด้วยวิธี  
วัดปริมาณก๊าซที่เหลือในระบบ (mmol.g-1.atm-1)

ลักษณะการเพิ่มพื้นที่ผิว ถ่านดูดซับ	อุณหภูมิที่ทำการทดลองการดูดซับ		
	30 องศาเซลเซียส	0 องศาเซลเซียส	-10 องศาเซลเซียส
ถ่าน 208	0.0023	0.0100	0.0154
ถ่าน 308	0.0042	0.0114	0.0196
ถ่าน 358	0.0045	0.0127	0.0192
ถ่าน 202	0.0041	0.0136	0.0195
PHO 8	0.1330	0.2946	0.3378

ตารางที่ ข.4 ค่าคงที่ในแบบจำลองของแลงเมียร์ของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการวัด  
สมดุลการดูดซับด้วยวิธีวัดปริมาณก๊าซที่เหลือในระบบ (mmol.g-1.atm-1)

ลักษณะการเพิ่มพื้นที่ ผิวถ่านดูดซับ	อุณหภูมิที่ทำการทดลองการดูดซับ		
	30 องศาเซลเซียส	0 องศาเซลเซียส	-10 องศาเซลเซียส
ถ่าน 208	0.8112	0.8459	0.8431
ถ่าน 308	0.8477	0.8645	0.8806
ถ่าน 358	0.8769	0.8980	0.9379
ถ่าน 202	1.0224	1.0233	1.3227
PHO 8	1.1781	1.2795	1.6453

ตารางที่ ข.5 ปริมาณการดูดซับสูงสุดของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยวิธีการวัดสมดุล การดูดซับด้วยวิธีวัดปริมาณก๊าซที่เหลือในระบบ ( $\text{mmol.g}^{-1}$ )

ลักษณะการเพิ่มพื้นที่ ผิวถ่านดูดซับ	อุณหภูมิที่ทำการทดลองการดูดซับ		
	30 องศาเซลเซียส	0 องศาเซลเซียส	-10 องศาเซลเซียส
ถ่าน 208	0.0059	0.0262	0.0397
ถ่าน 308	0.0181	0.0322	0.0399
ถ่าน 358	0.0182	0.0308	0.0382
ถ่าน 202	0.149	0.0281	0.0340
PHO 8	0.6187	1.1822	1.2045

ตารางที่ ข.6 แสดงผลการคำนวณค่าความร้อนของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 308 และ ถ่าน 358

ถ่านดูดซับ	ความชื้น	ความชื้น*8.314	H (kJ/mol)
ถ่าน 208	1.5242	12.6722	-12.6722
ถ่าน 308	1.8292	15.2080	-15.2080
ถ่าน 358	1.9143	15.9155	-15.9155

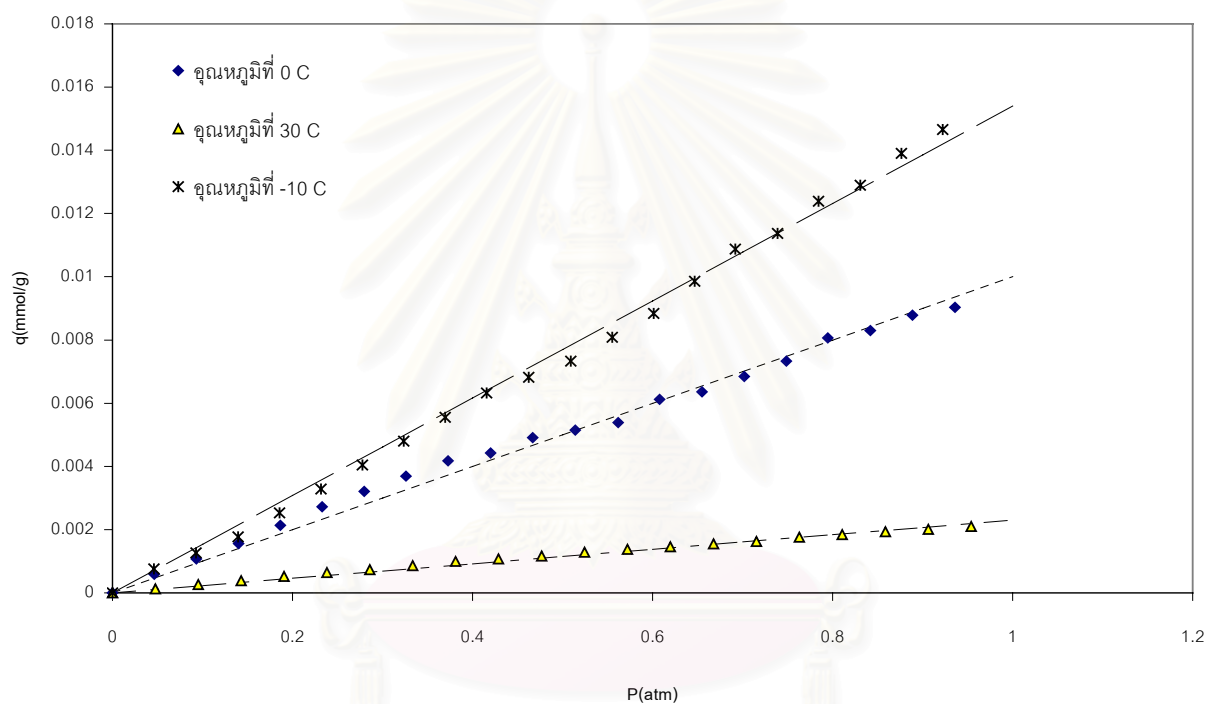
ตารางที่ ข.7 แสดงผลการคำนวณ ค่าความร้อนของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 208 และ ถ่าน 202

ถ่านดูดซับ	ความชื้น	ความชื้น*8.314	H (kJ/mol)
ถ่าน 208	1.5242	12.6722	-12.6722
ถ่าน 202	1.7473	14.5271	-14.5271

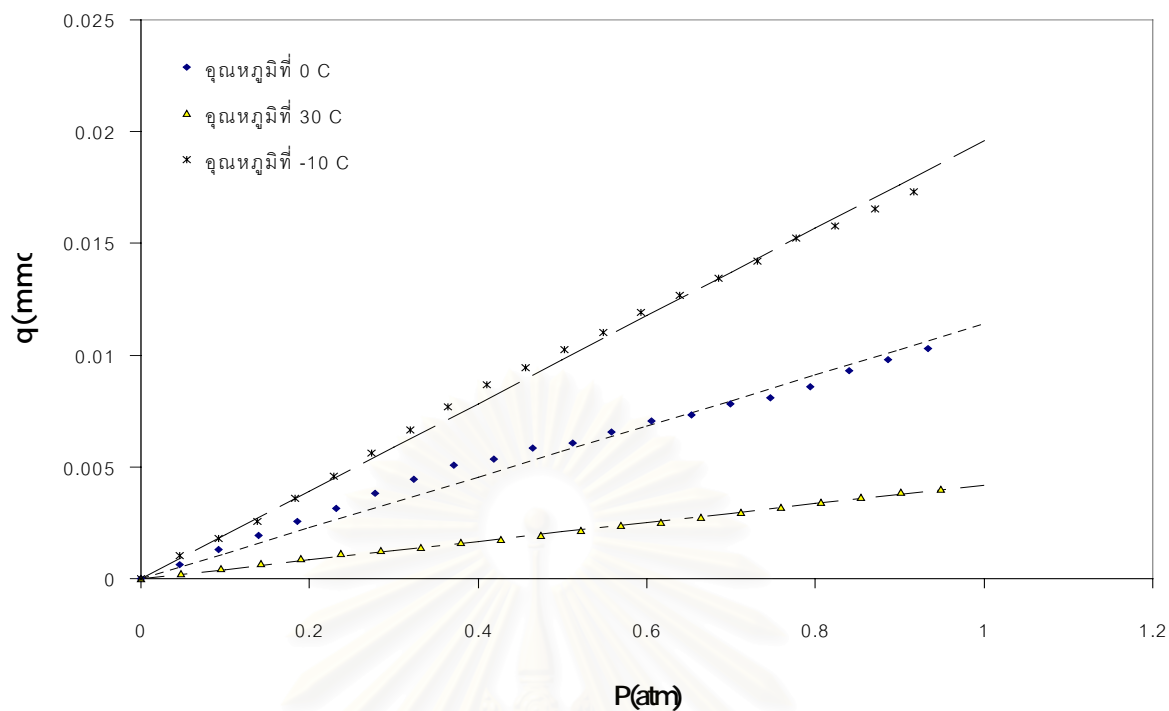


## ภาคผนวก ค

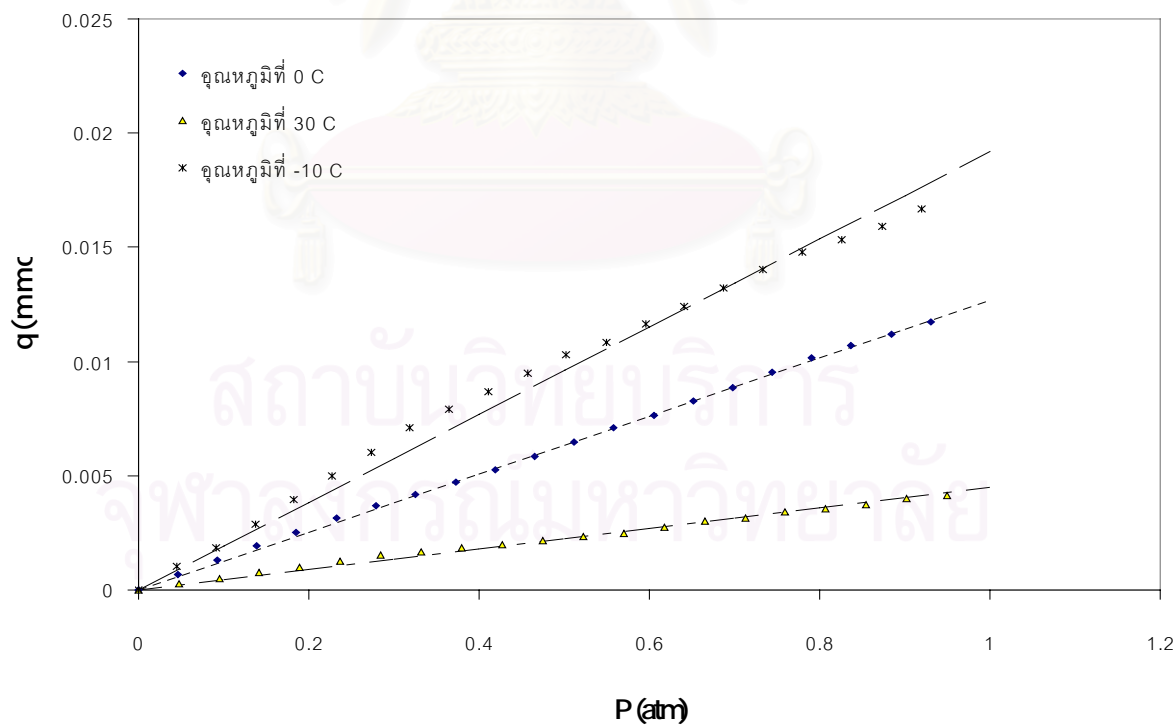
### ไอโซเทิร์มการดูดซับ



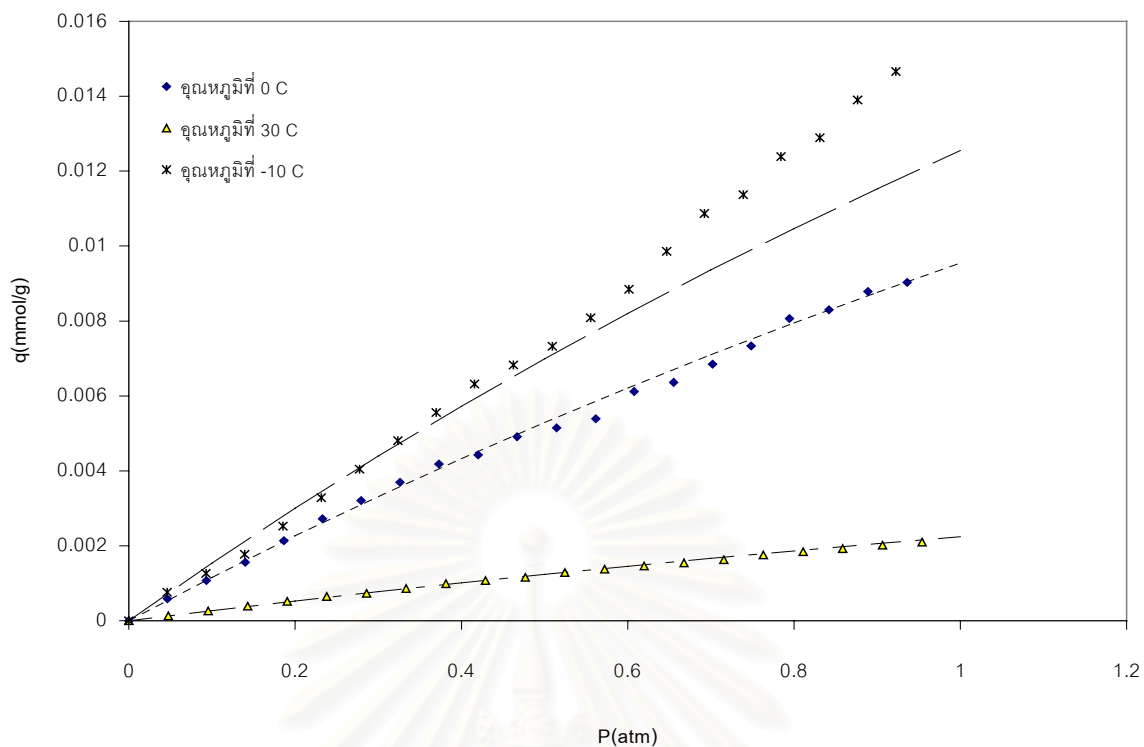
รูปที่ ค.1 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนด้วย ถ่าน 208 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของเฮนรี ที่อุณหภูมิ -10, 0 และ 30 °C



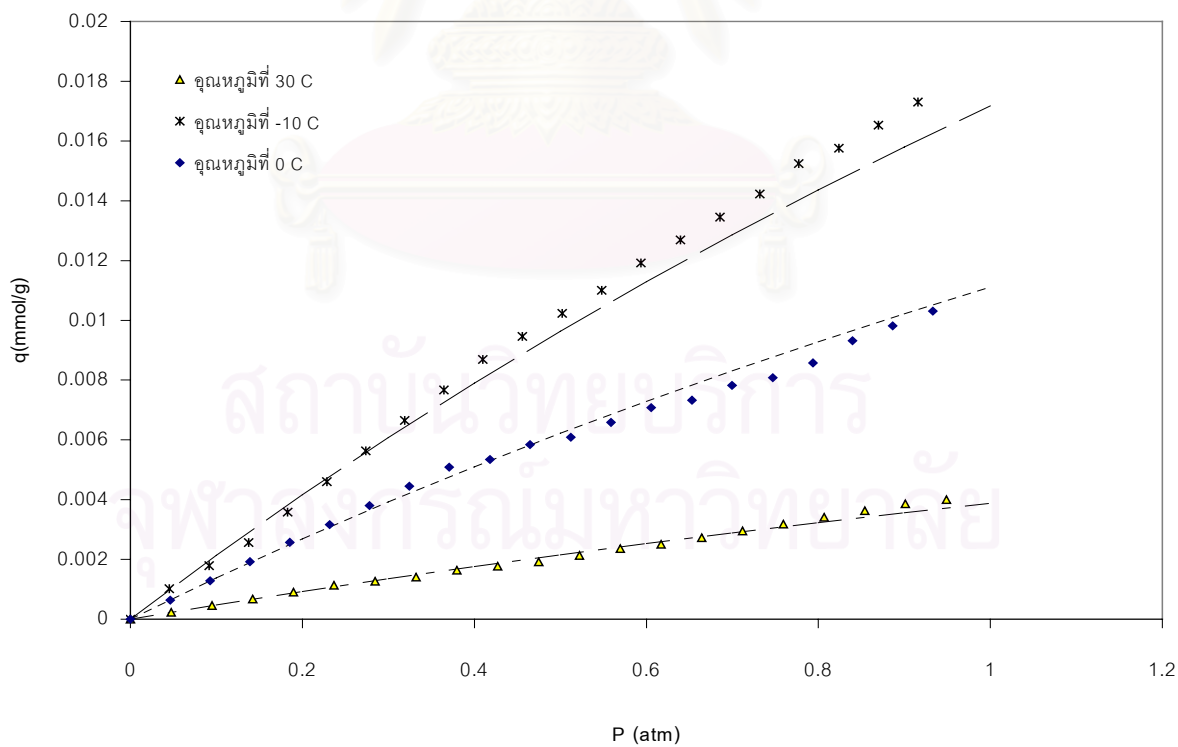
รูปที่ ค.2 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนด้วย ถ่าน 308 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของเฮนรี ที่อุณหภูมิ -10, 0 และ 30 °C



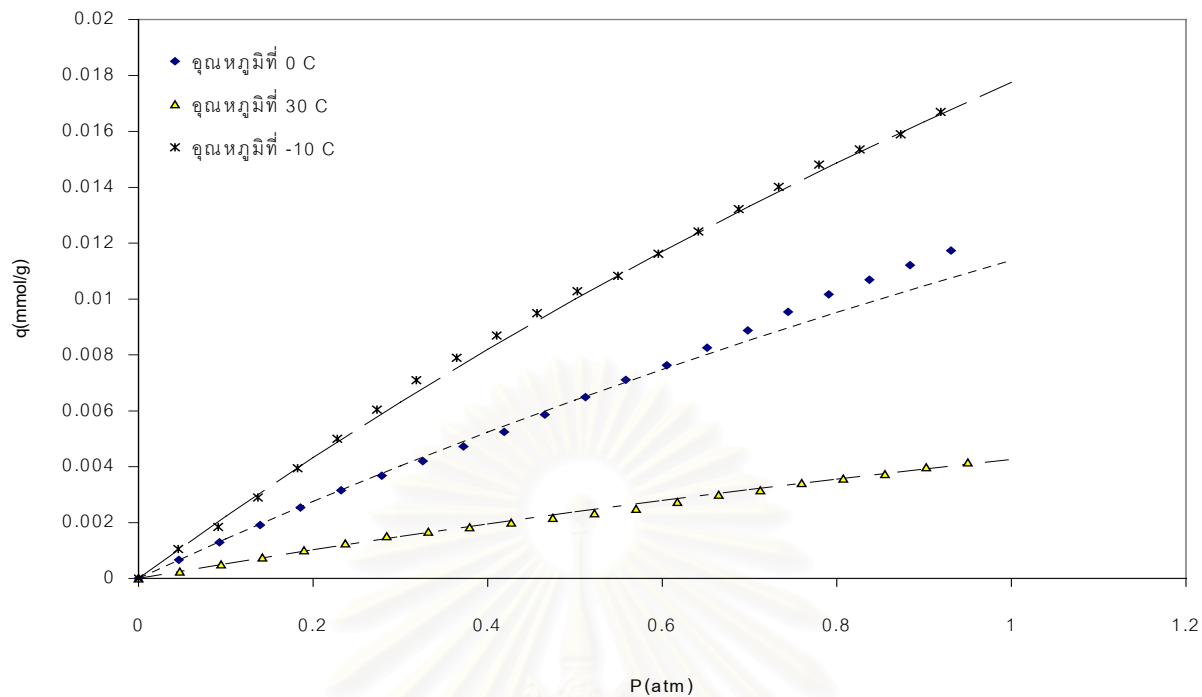
รูปที่ ค.3 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนด้วยถ่าน 358 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของเฮนรี ที่อุณหภูมิ -10, 0 และ 30 °C



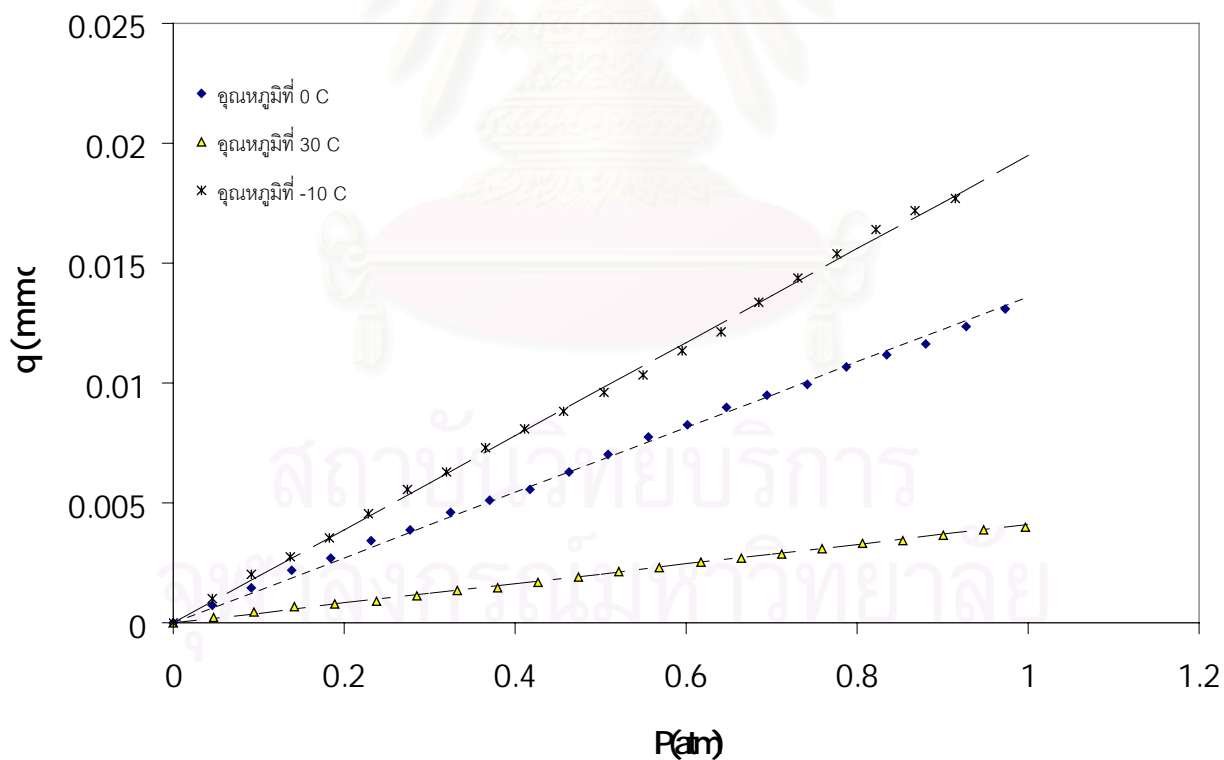
รูปที่ ค.4 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 208 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ  $-10, 0$  และ  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$



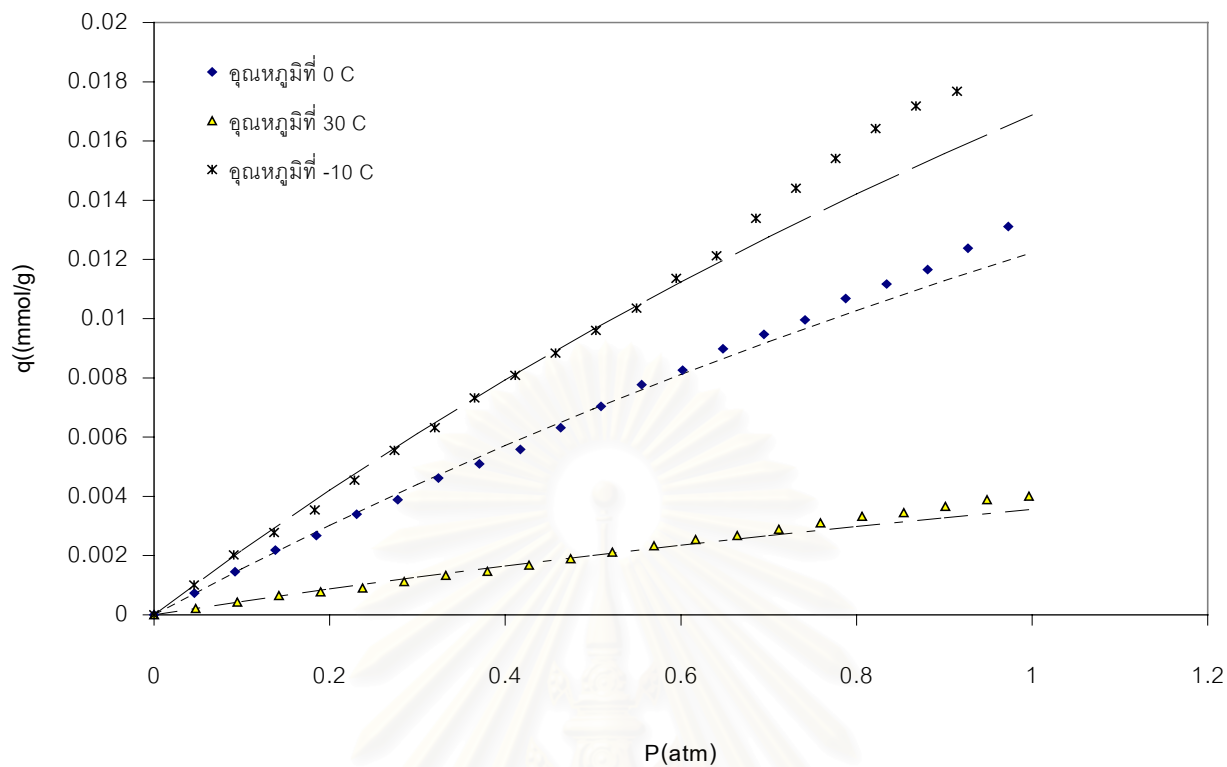
รูปที่ ค.5 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนด้วยถ่านดูดซับถ่าน 308 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ  $-10, 0$  และ  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$



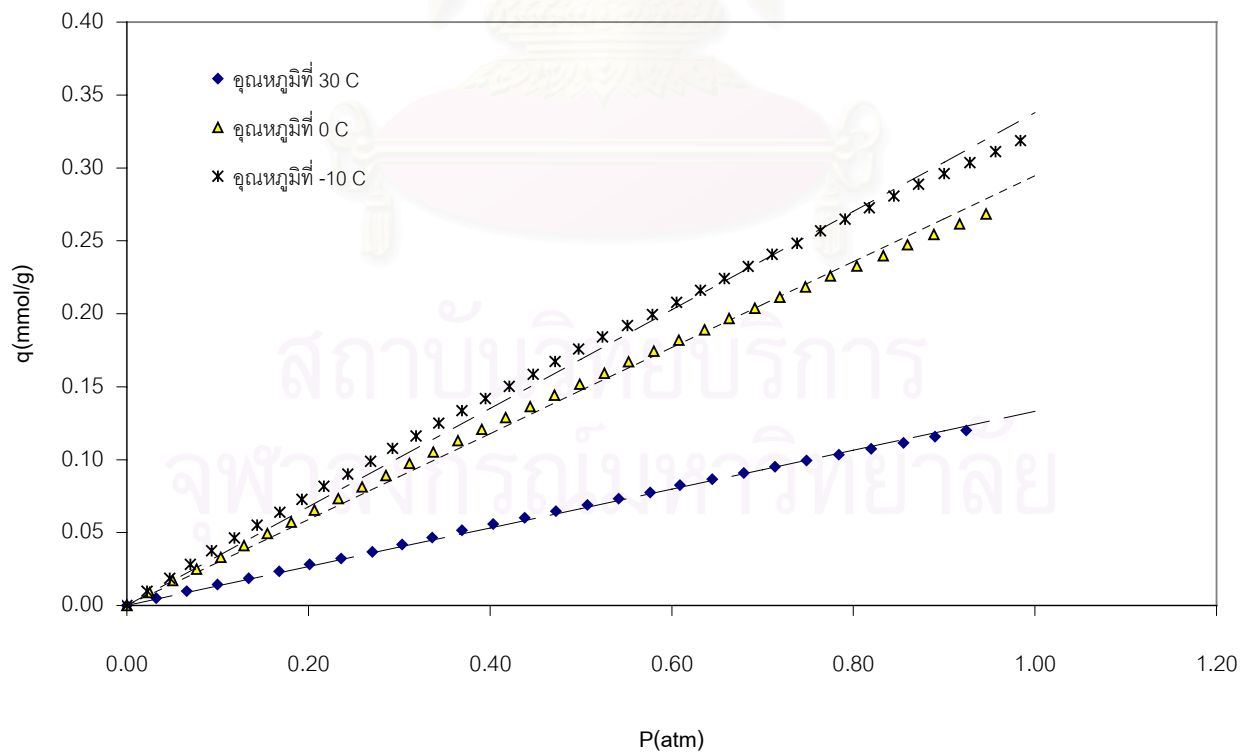
รูปที่ ค.6 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่านดูดซับ ถ่าน 358 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ  $-10$ ,  $0$  และ  $30$  °C



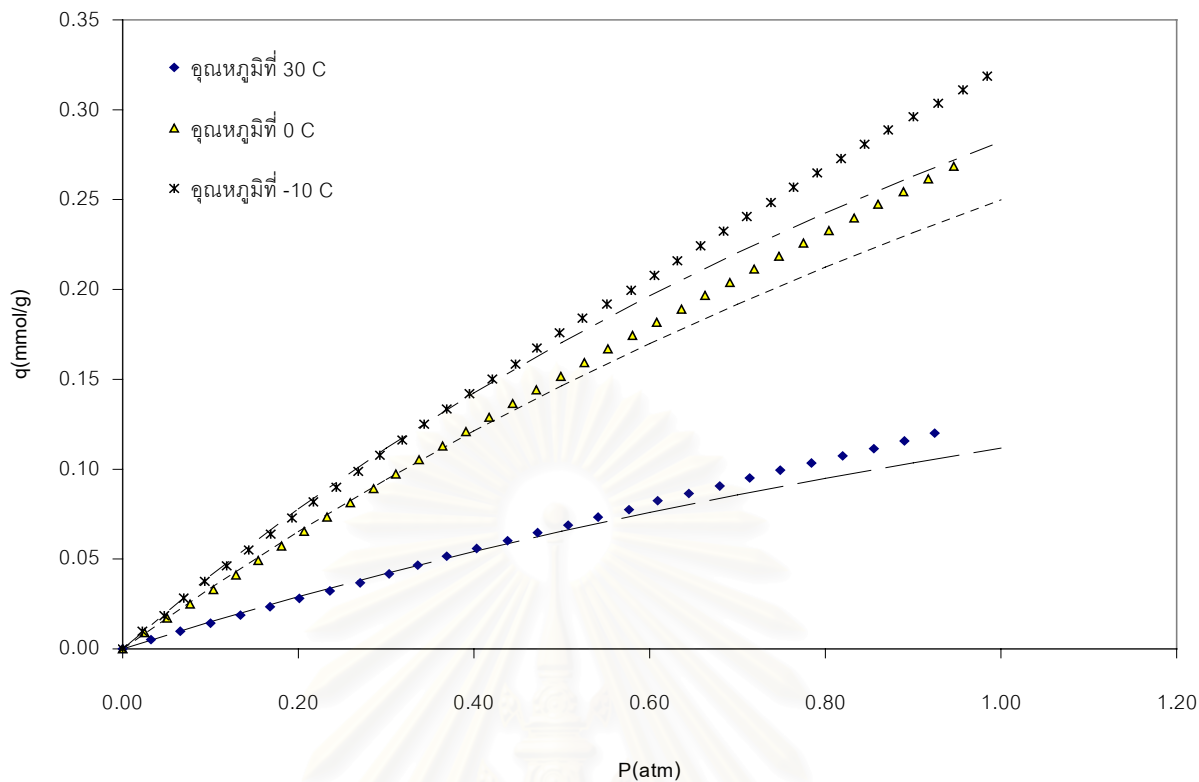
รูปที่ ค.7 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่านดูดซับ ถ่าน 202 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของเฮนรี ที่อุณหภูมิ  $-10$ ,  $0$  และ  $30$  °C



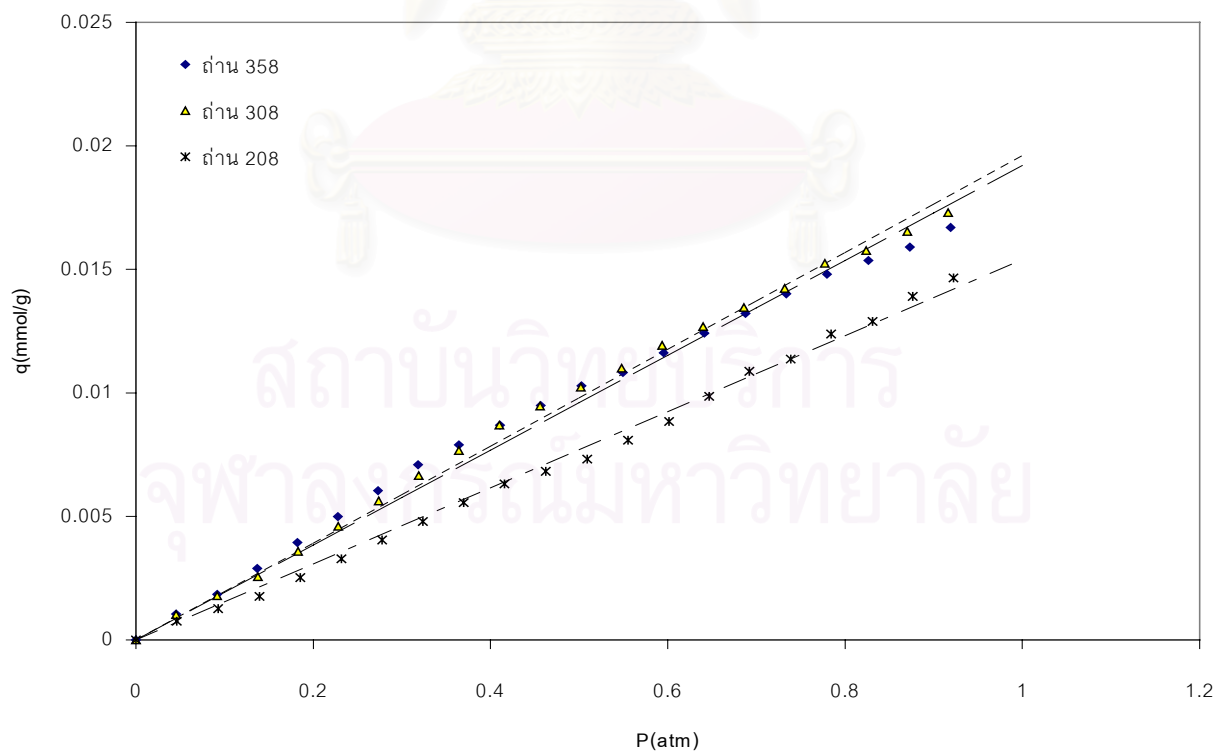
รูปที่ ค.8 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 202 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ  $-10, 0$  และ  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$



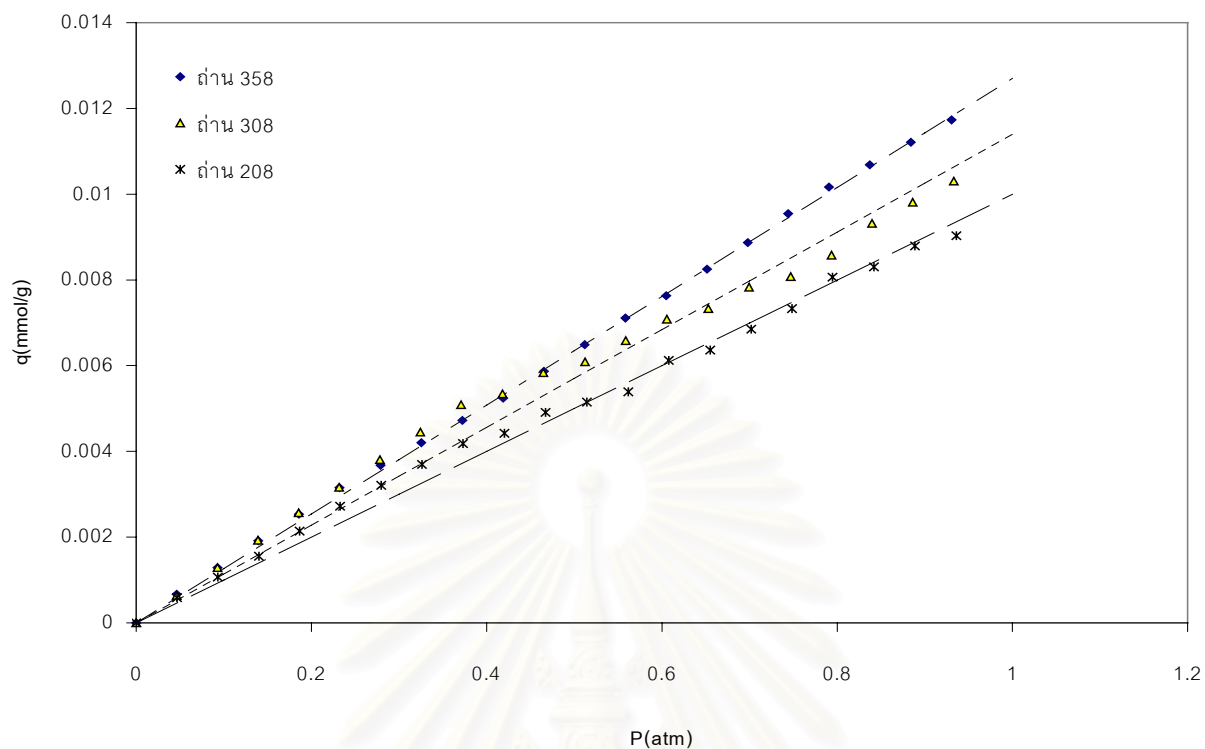
รูปที่ ค.9 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน PHO 8 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของเฮนรี ที่อุณหภูมิ  $-10, 0$  และ  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$



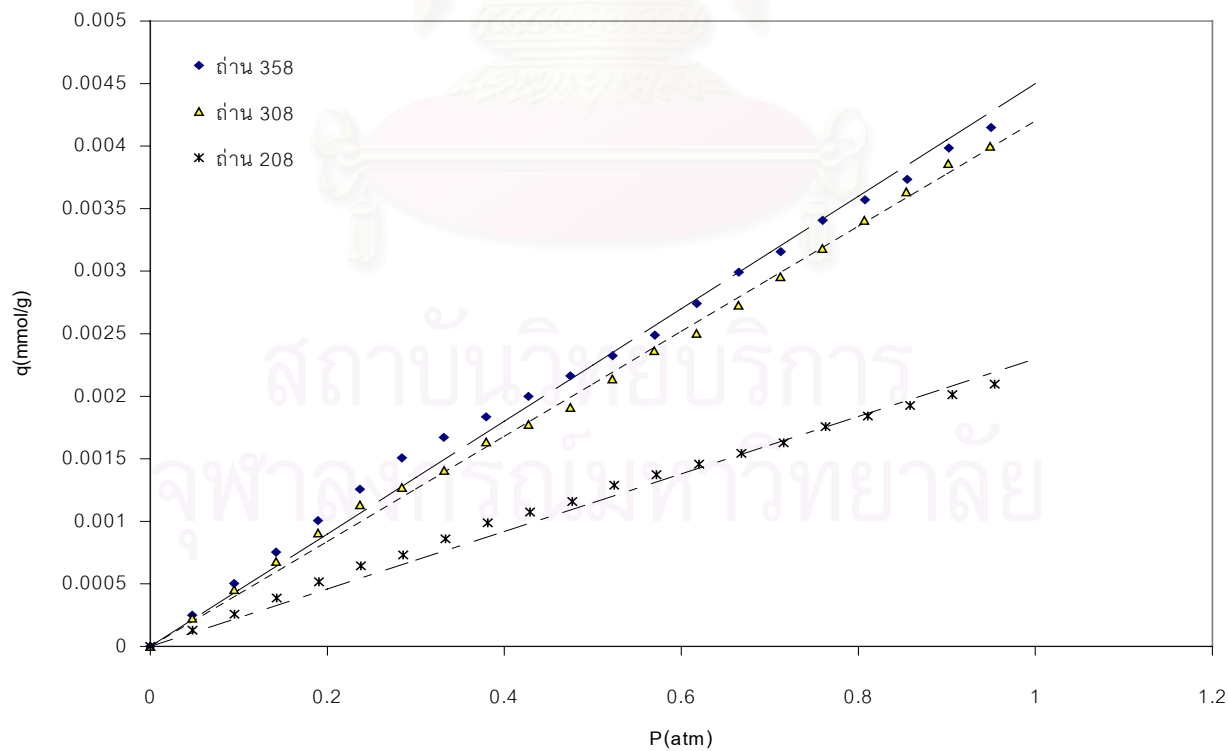
รูปที่ ค.10 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนด้วยถ่าน PHO 8 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ  $-10$ ,  $0$  และ  $30$  °C



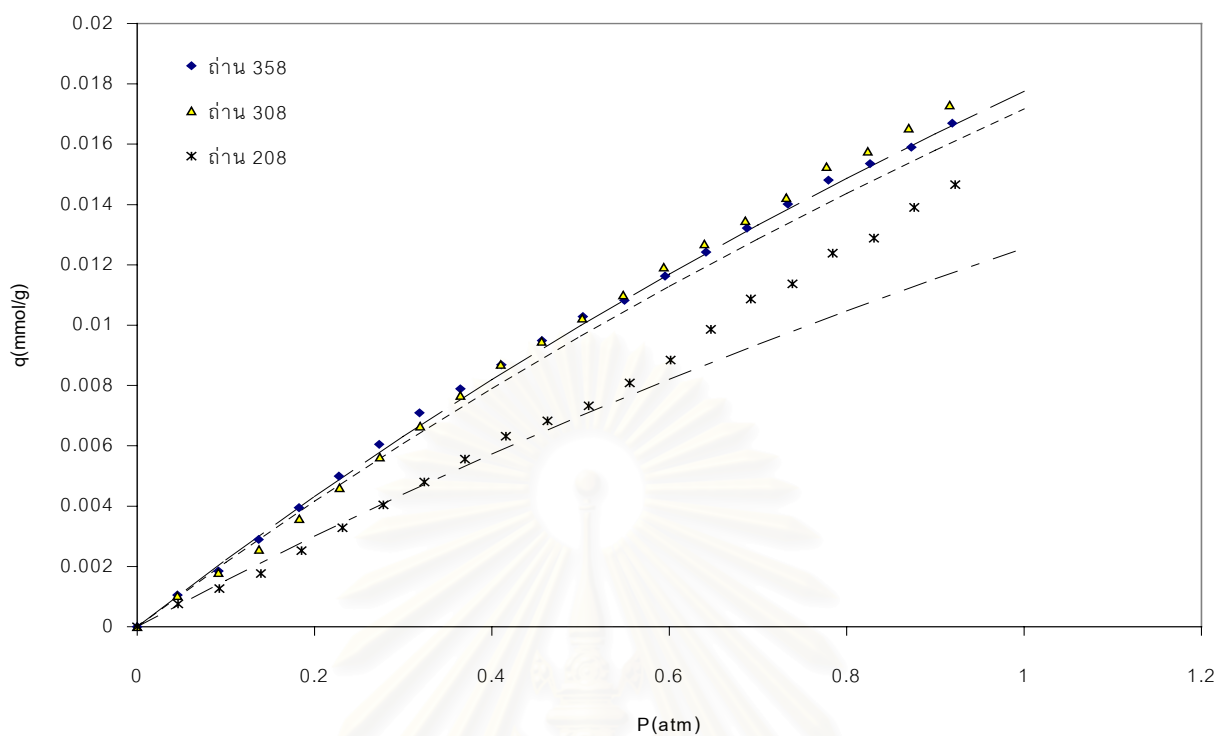
รูปที่ ค.11 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 308 , ถ่าน 358 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของเฮนรี ที่อุณหภูมิ  $-10$  °C



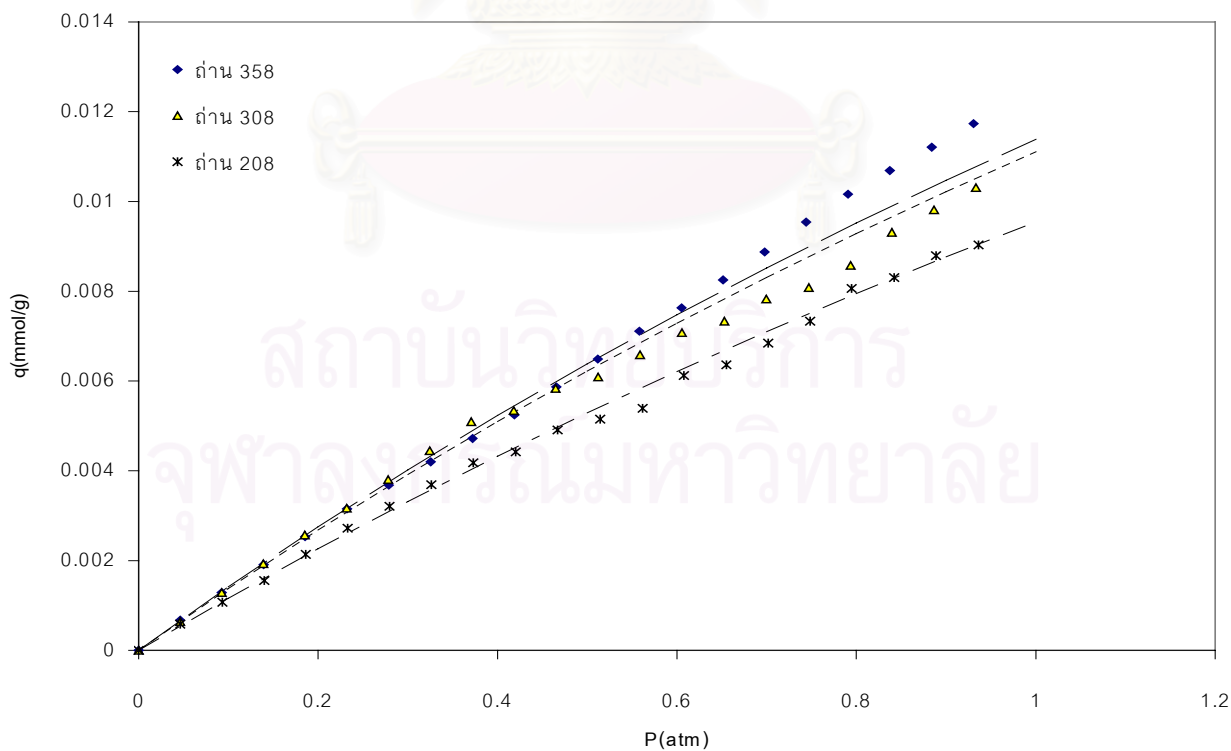
รูปที่ ค.12 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 308, ถ่าน 358 และเส้นสมดุลแบบจำลองการดูดซับของเฮนรี ที่อุณหภูมิ 0 °C



รูปที่ ค.13 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 308, ถ่าน 358 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของเฮนรี ที่อุณหภูมิ 30 °C

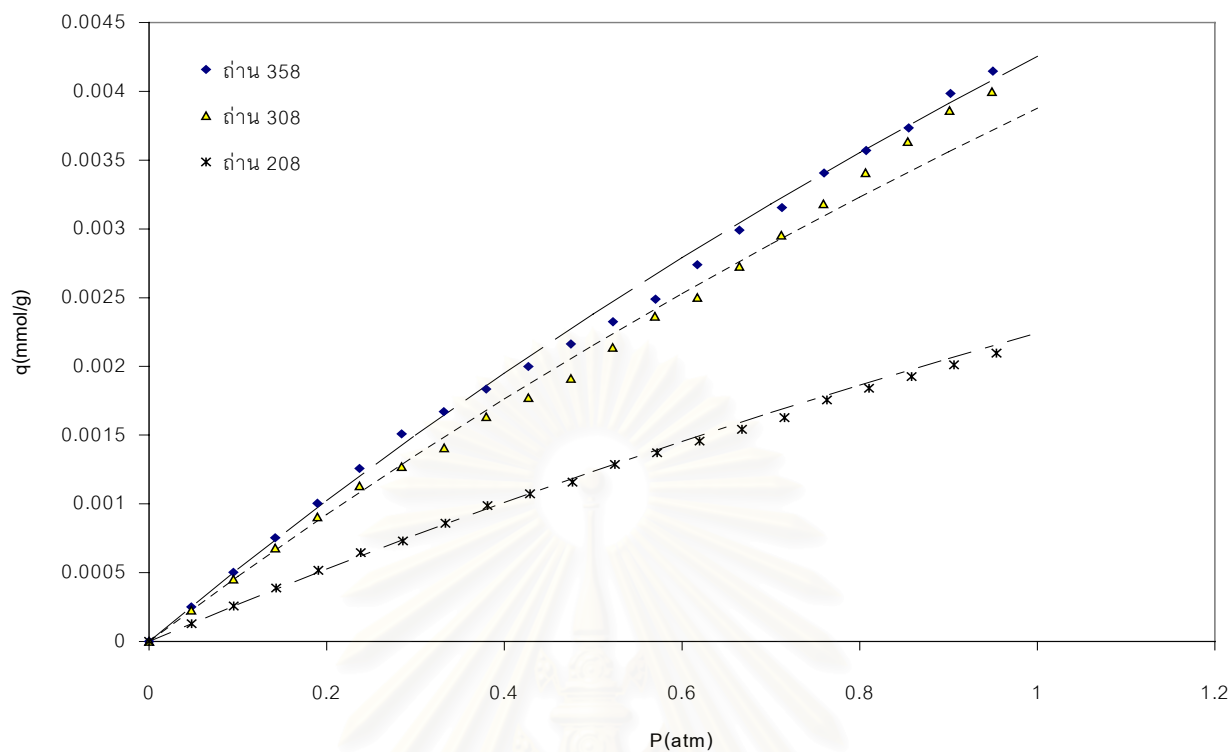


รูปที่ ค.14 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 308, ถ่าน 358 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

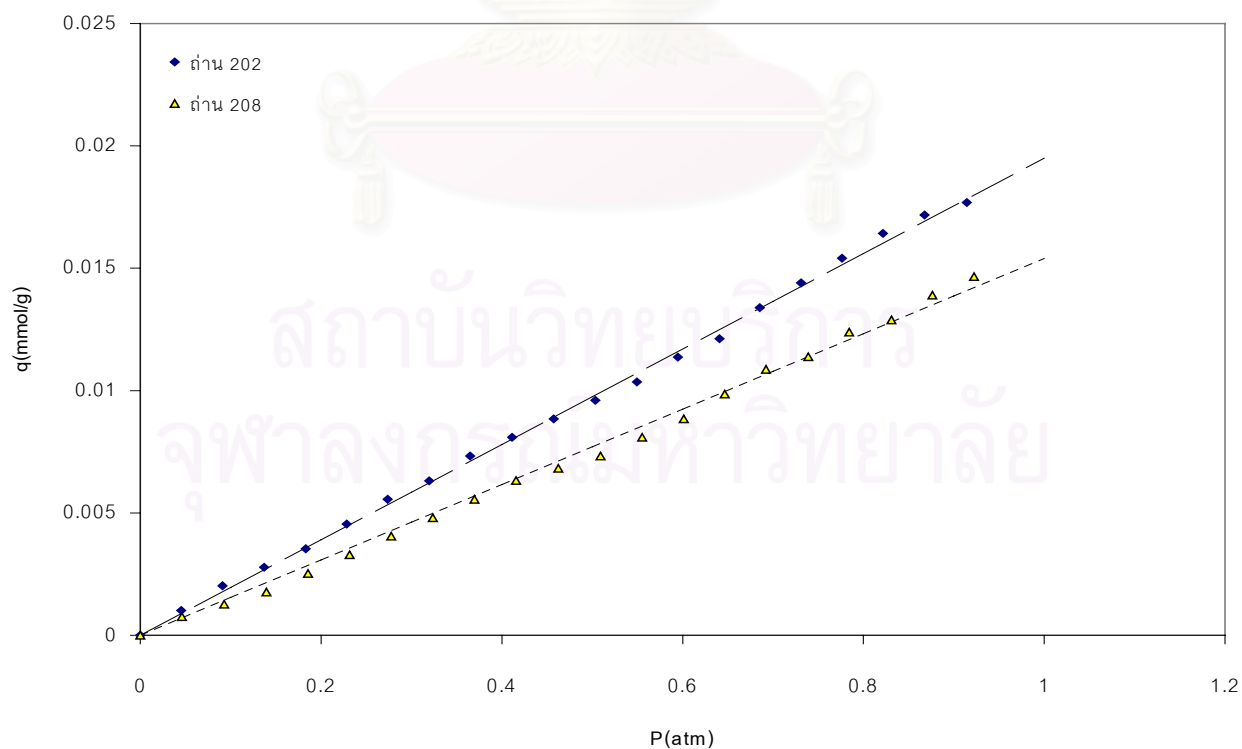


รูปที่ ค.15 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 308, ถ่าน 358 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

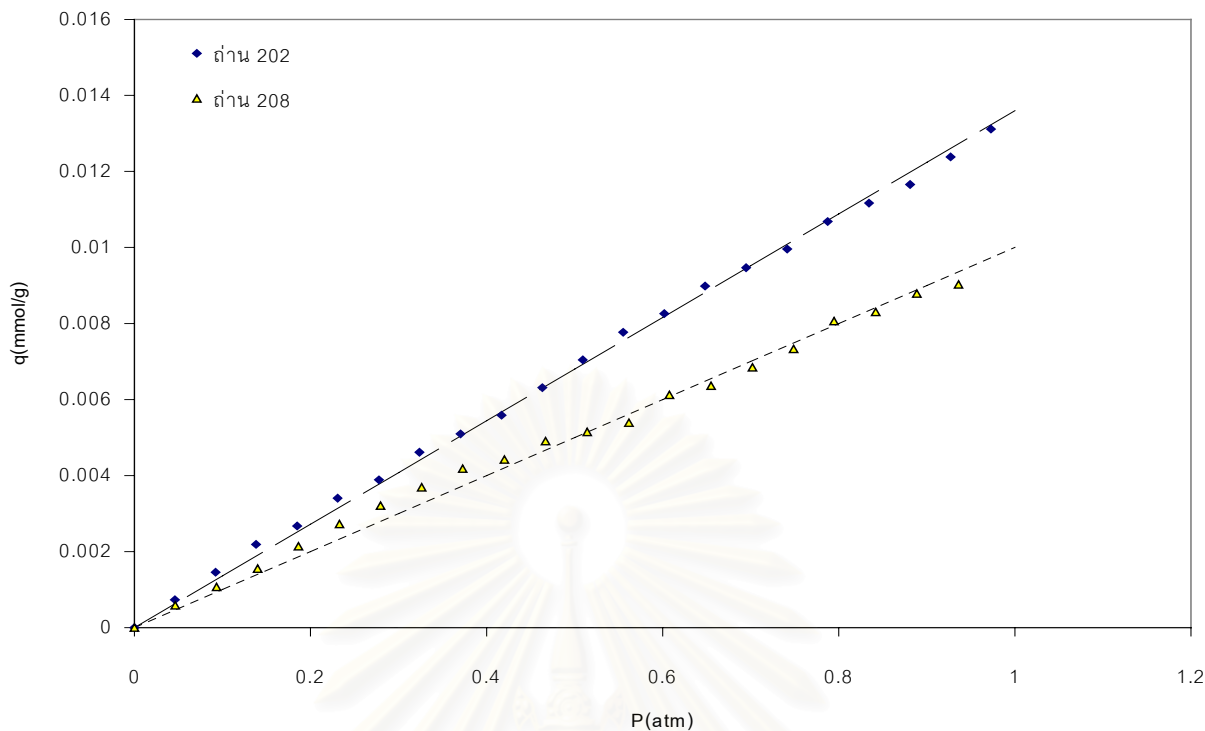




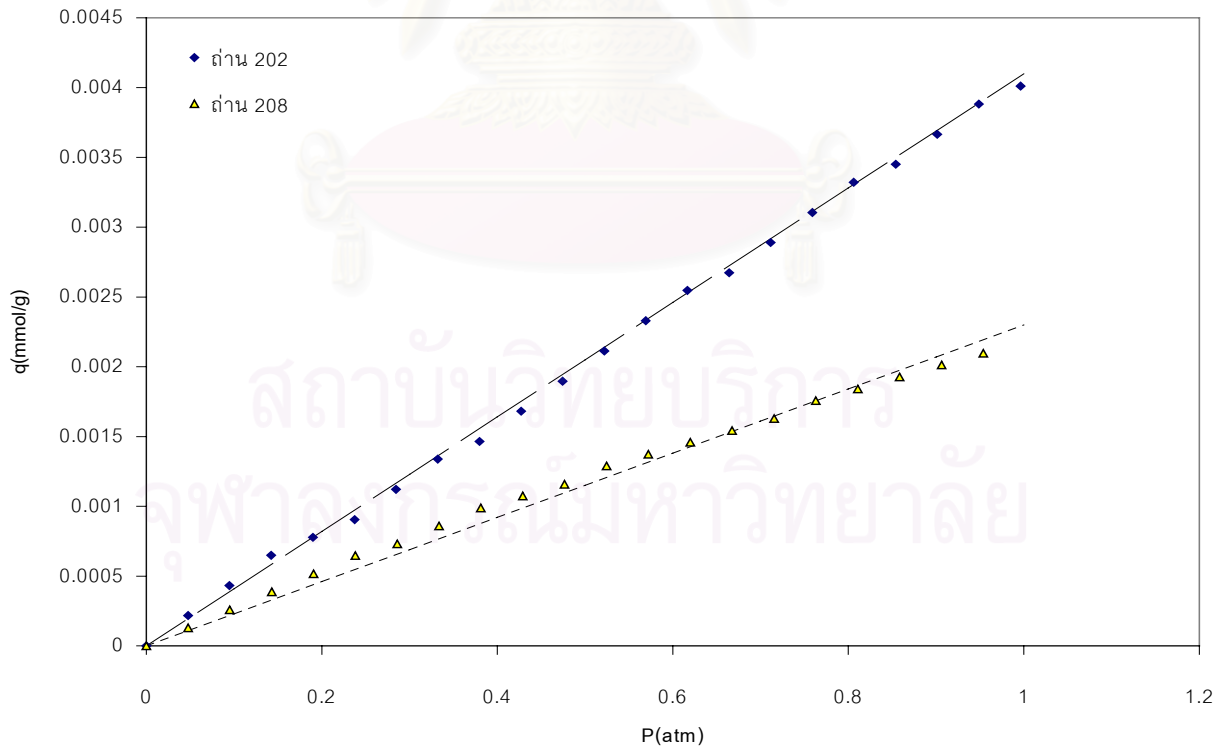
รูปที่ ค.16 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 308, ถ่าน 358 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ 30 °C



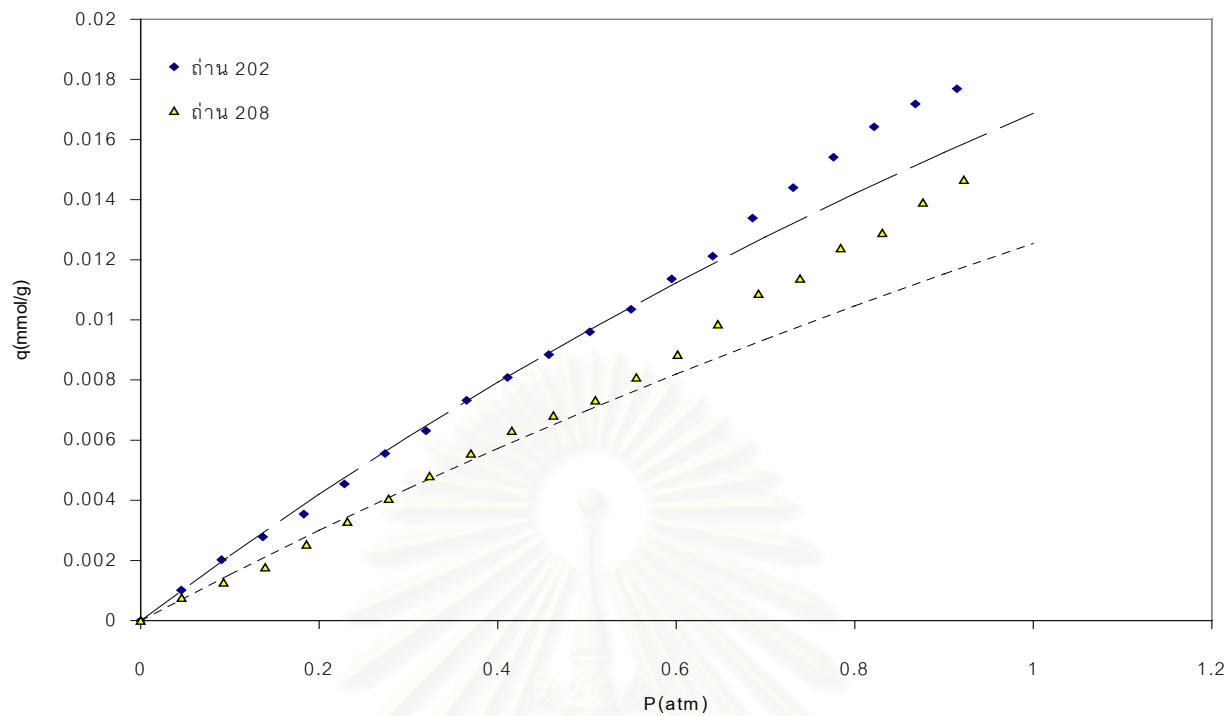
รูปที่ ค.17 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 202 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของเฮนรี ที่อุณหภูมิ -10 °C



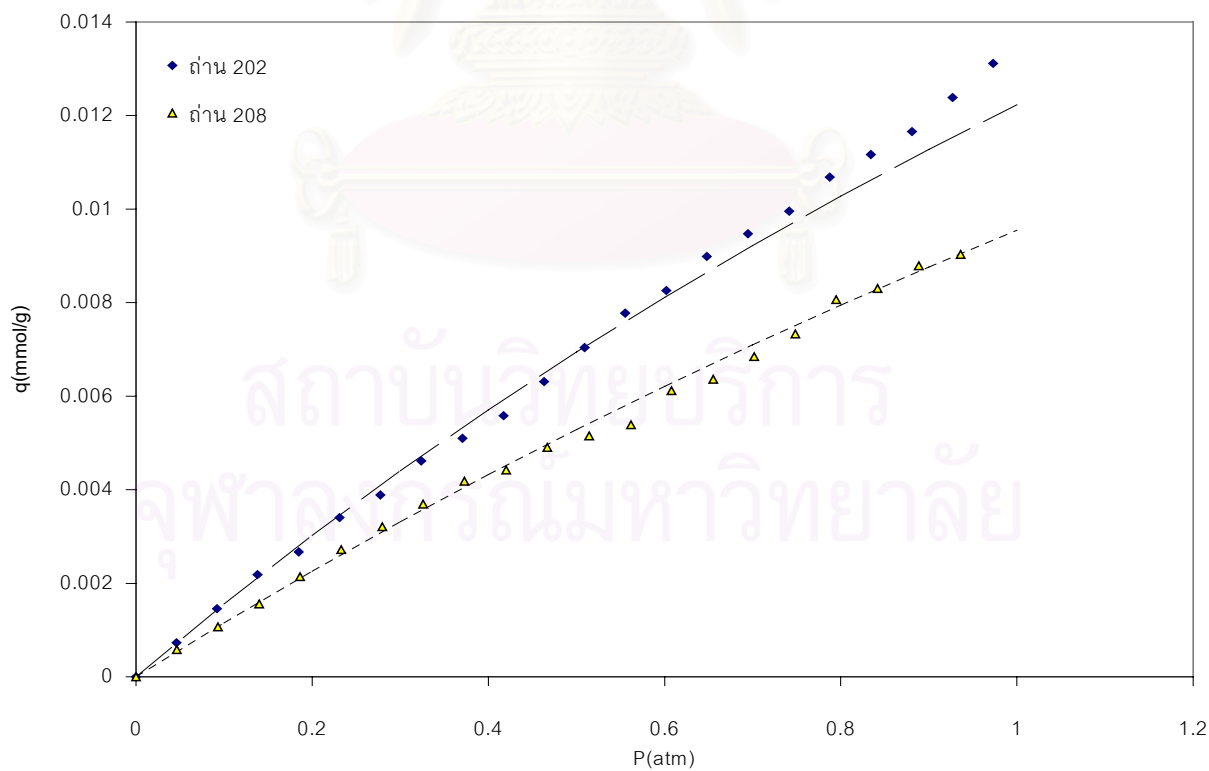
รูปที่ ค.18 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 202 และเส้นแบบจำลอง สมดุลการดูดซับของเฮนรี ที่อุณหภูมิ 0 °C



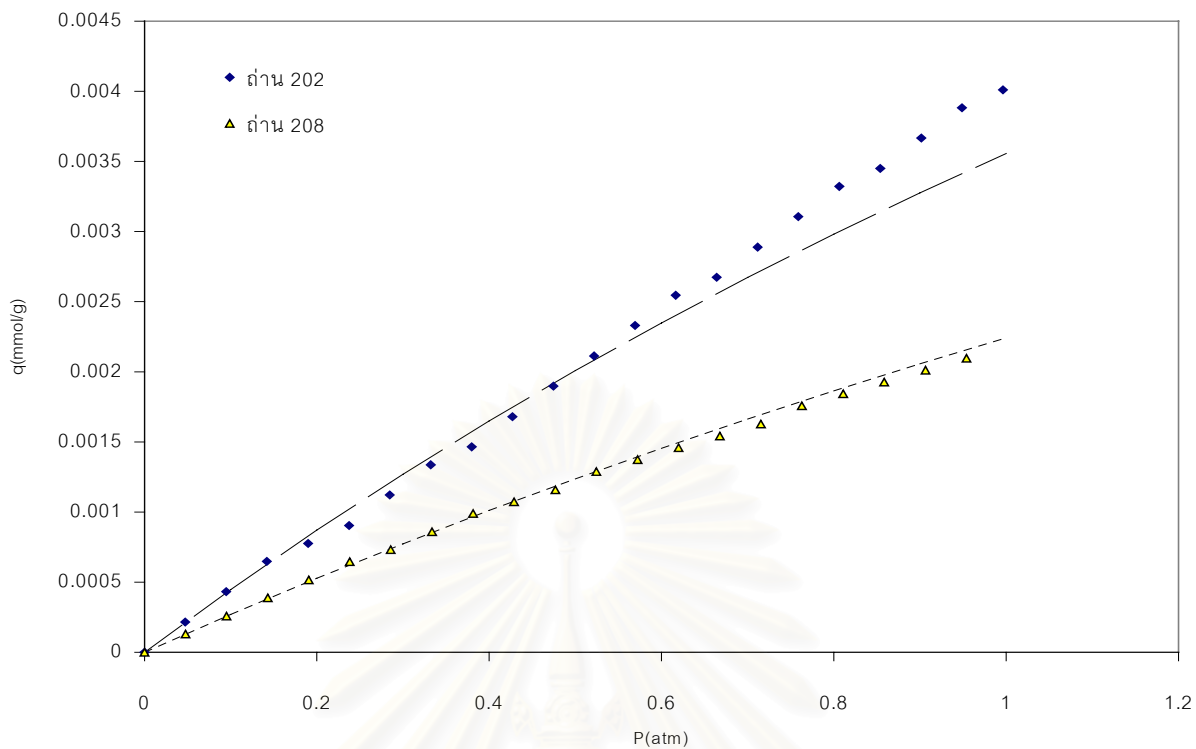
รูปที่ ค.19 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 202 และเส้นแบบจำลอง สมดุลการดูดซับของเฮนรี ที่อุณหภูมิ 30 °C



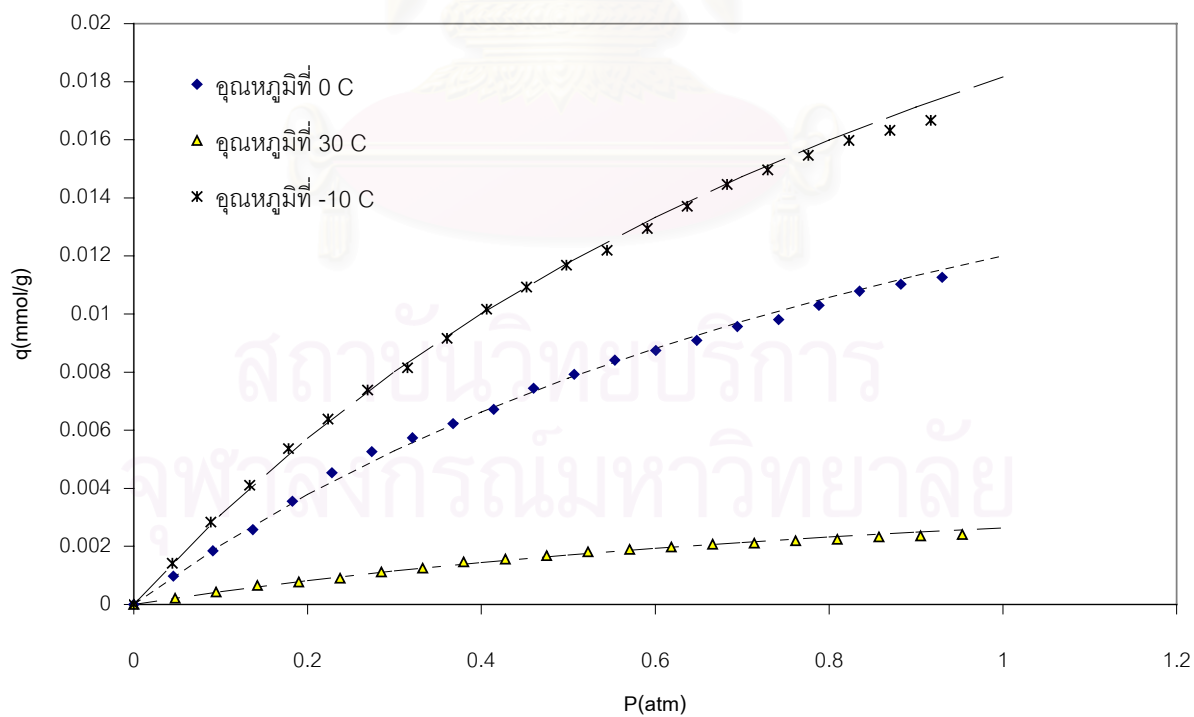
รูปที่ ค.20 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 202 และเส้นแบบจำลอง สมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$



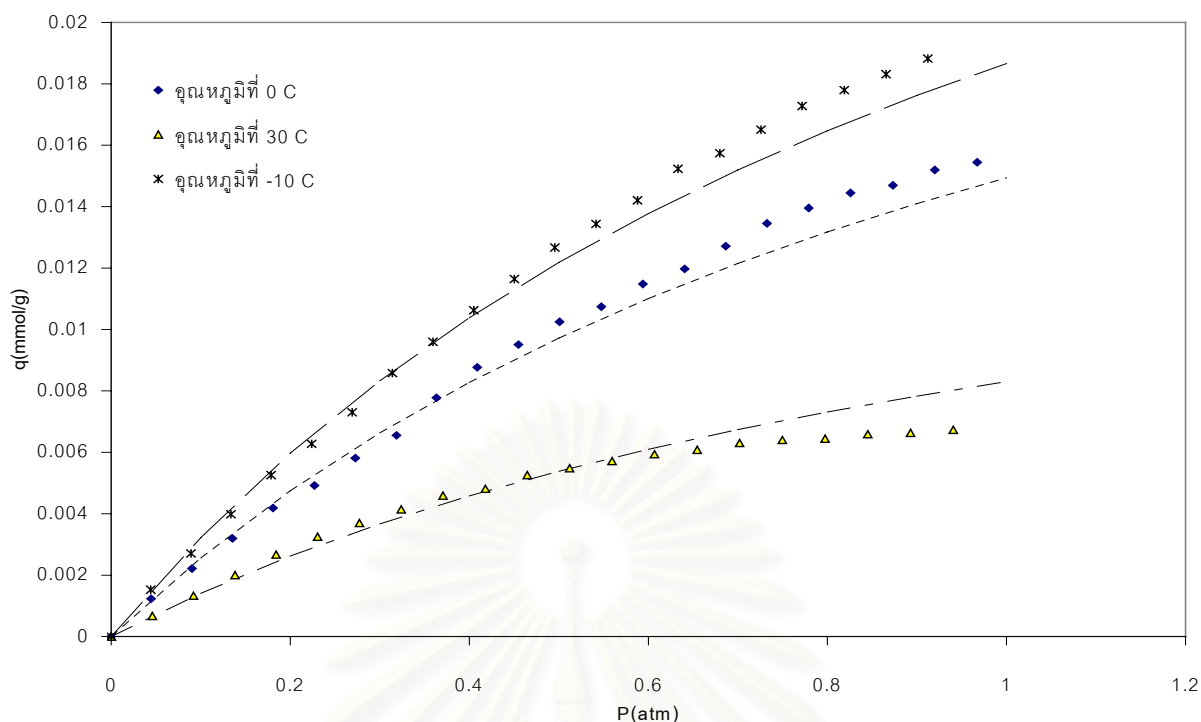
รูปที่ ค.21 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 202 และเส้นแบบจำลอง สมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$



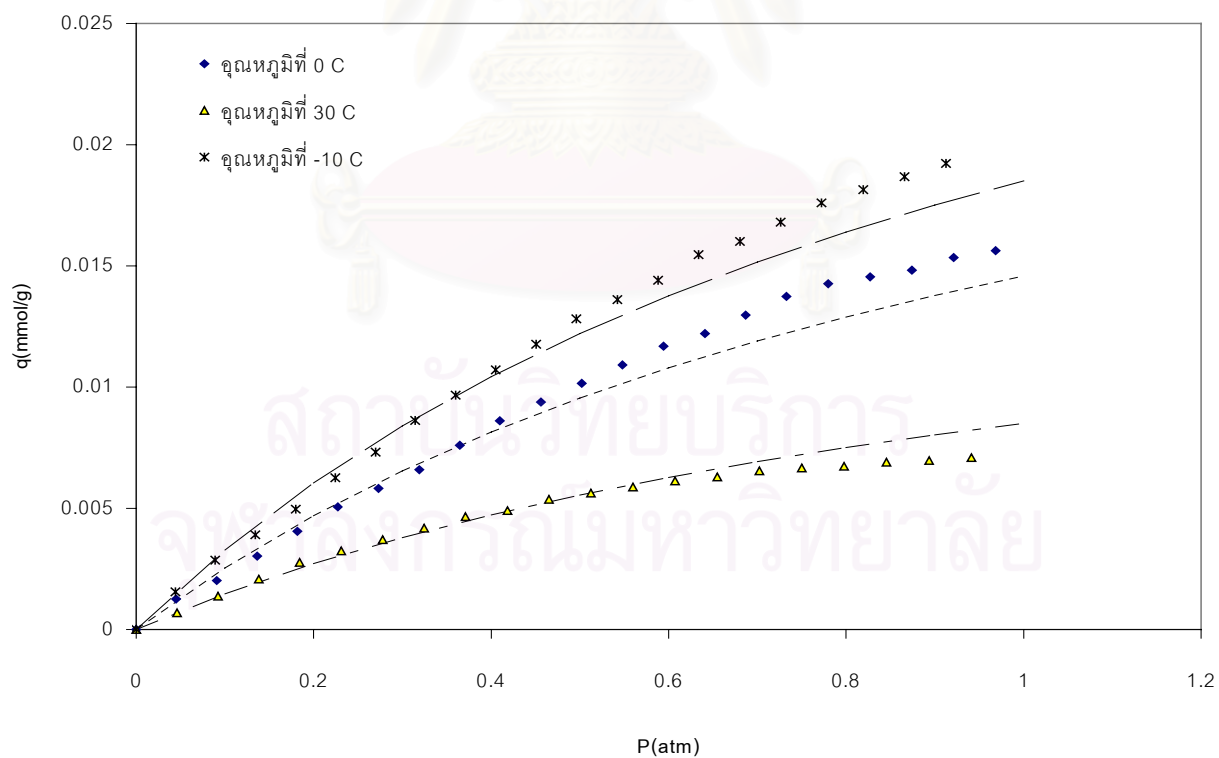
รูปที่ ค.22 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 202 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ 30 °C



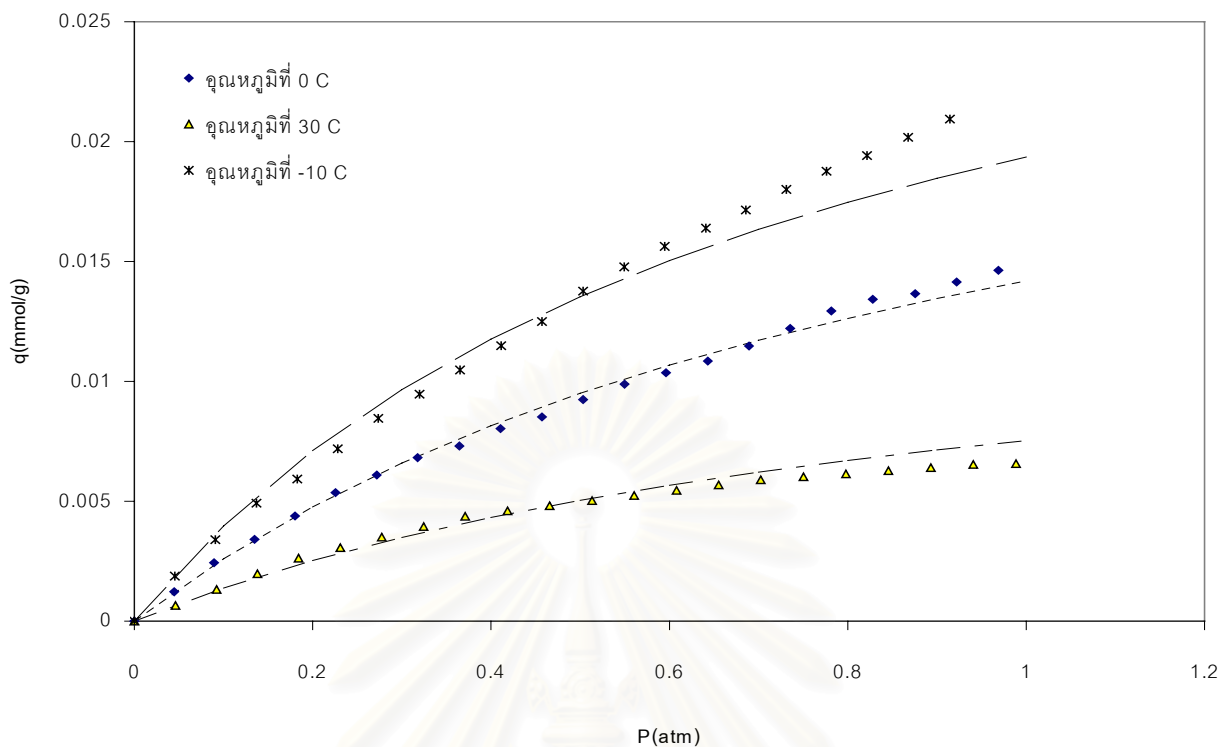
รูปที่ ค.23 สมดุลการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่าน 208 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ -10, 0 และ 30 °C



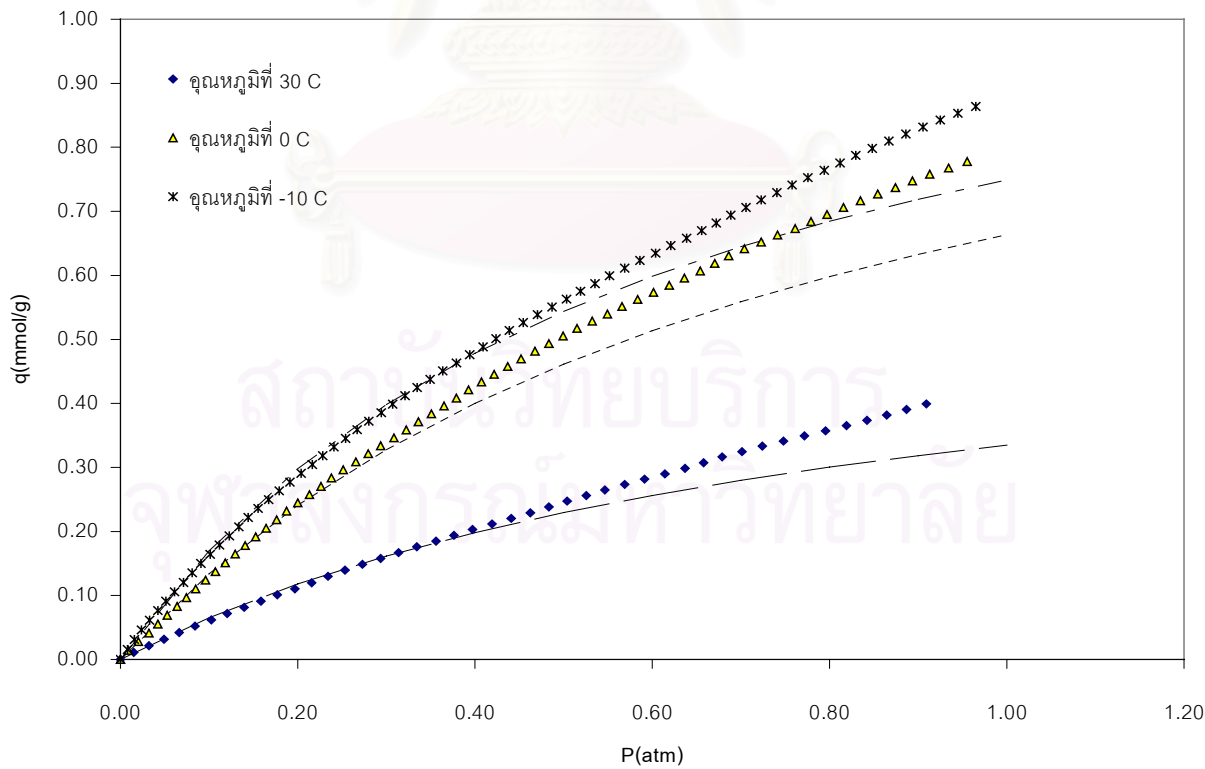
รูปที่ ค.24 สมดุลการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่าน 308 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ  $-10, 0$  และ  $30$  °C



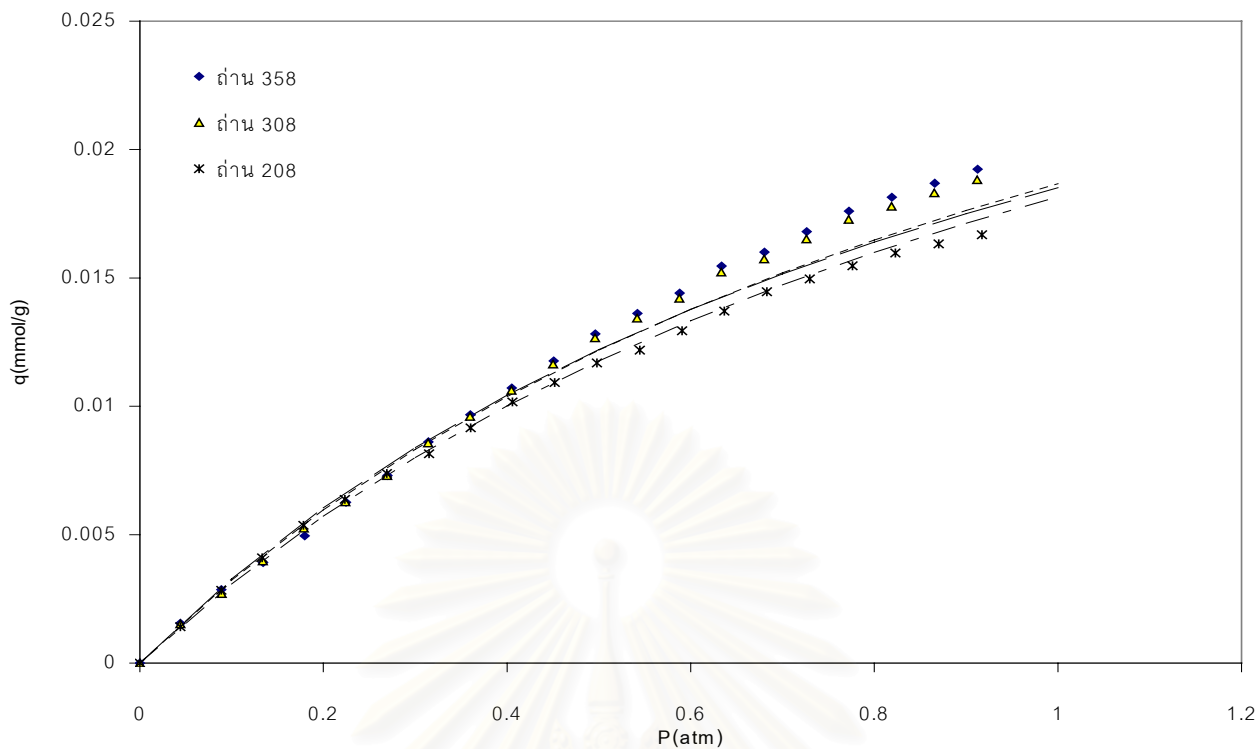
รูปที่ ค.25 สมดุลการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่าน 358 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ  $-10, 0$  และ  $30$  °C



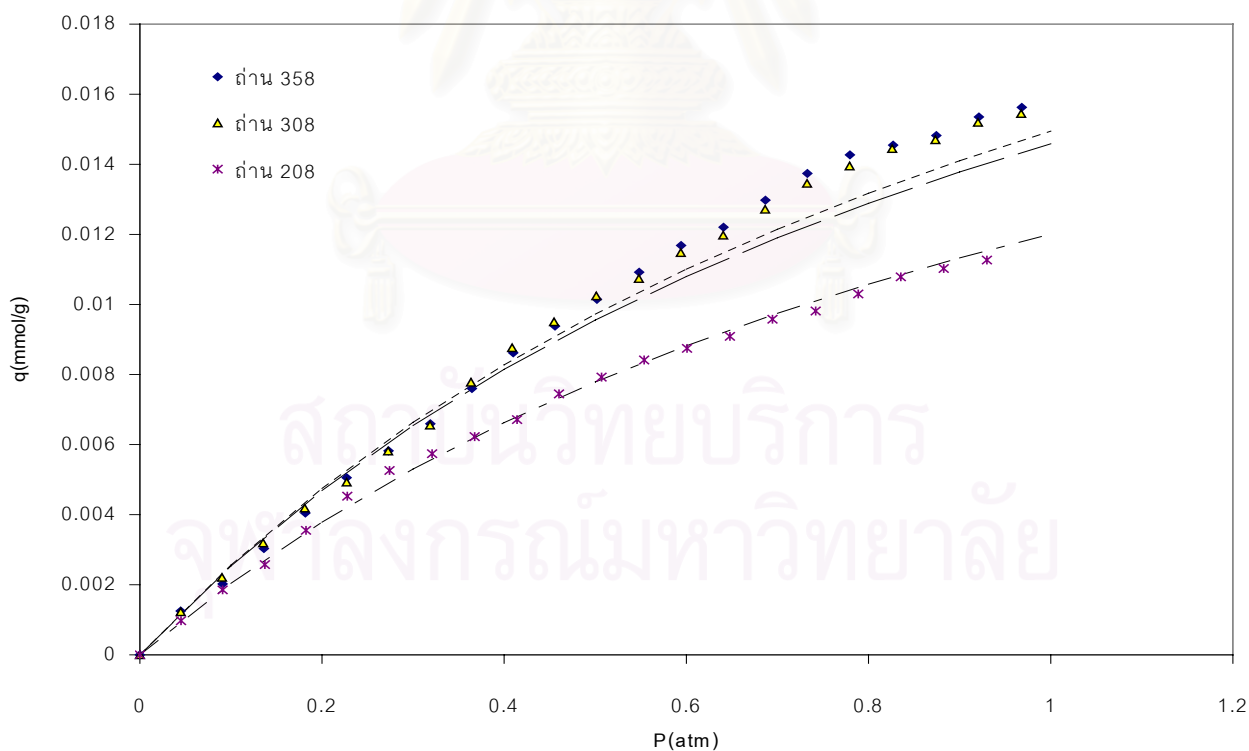
รูปที่ ค.26 สมดุลการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่าน 202 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ -10, 0 และ 30 °C



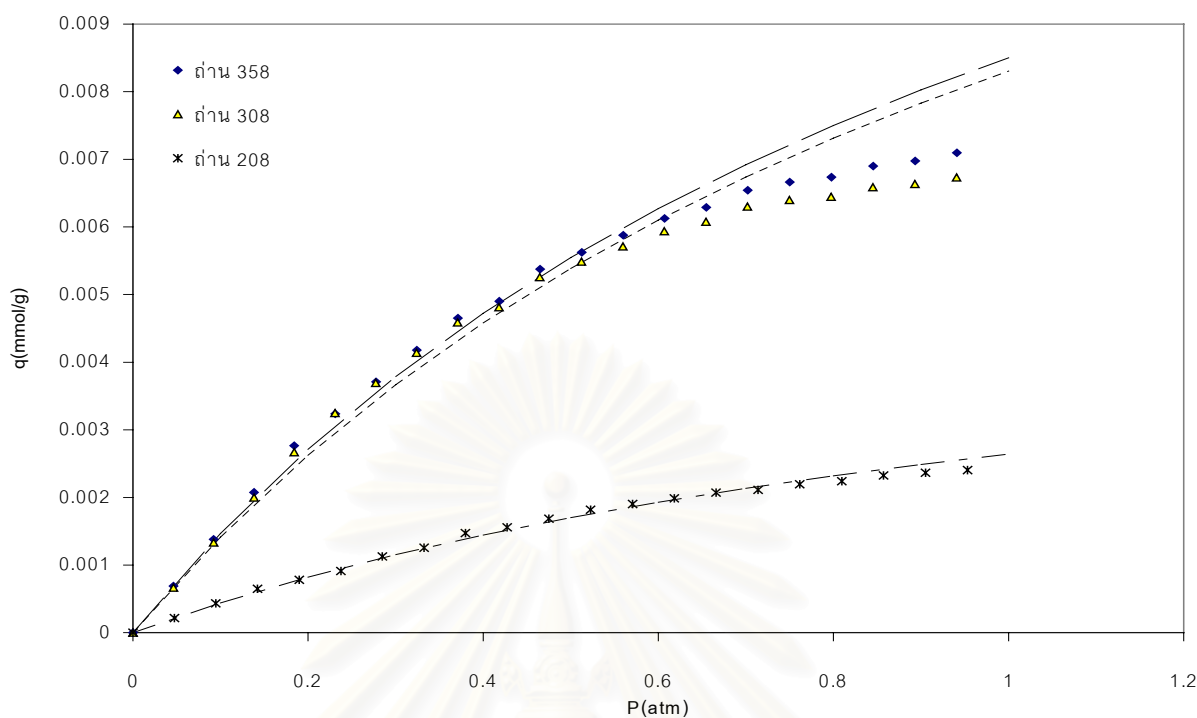
รูปที่ ค.27 สมดุลการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่านPHO 8 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ -10, 0 และ 30 °C



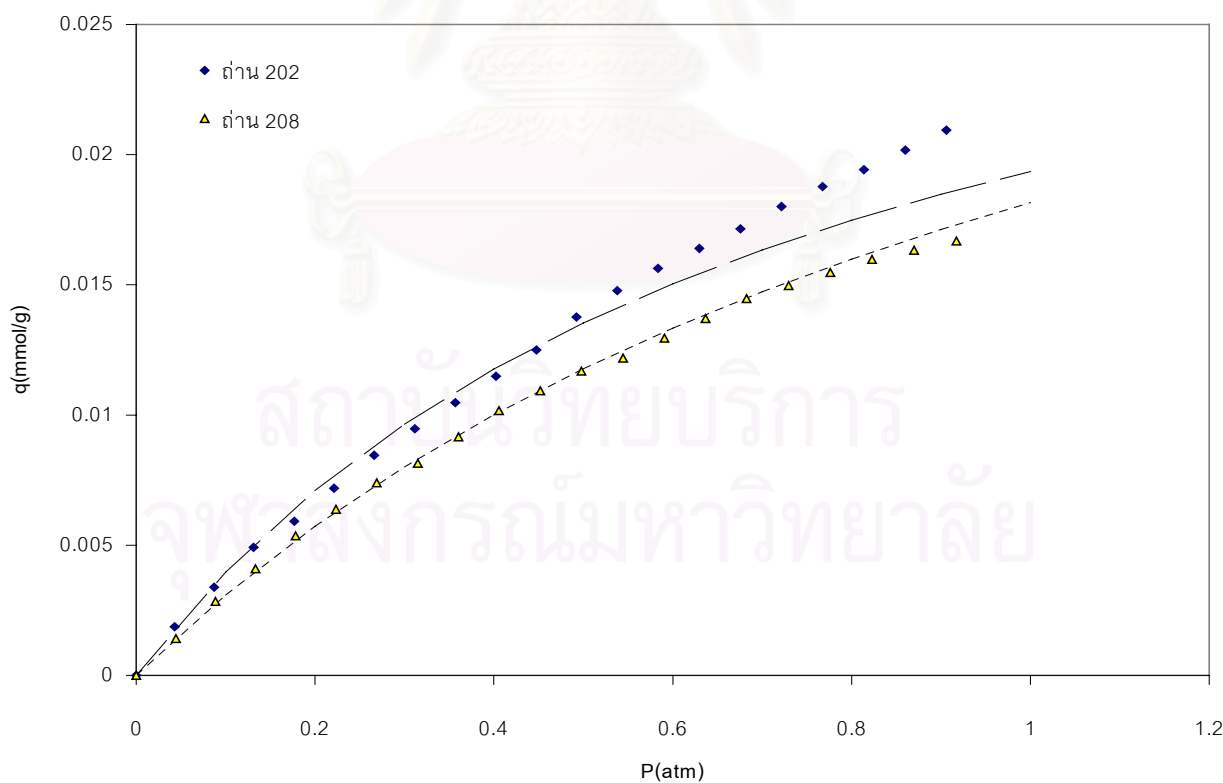
รูปที่ ค.28 สมดุลการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 308, ถ่าน 358 และ  
เส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ ค.29 สมดุลการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 308, ถ่าน 358 และ  
เส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

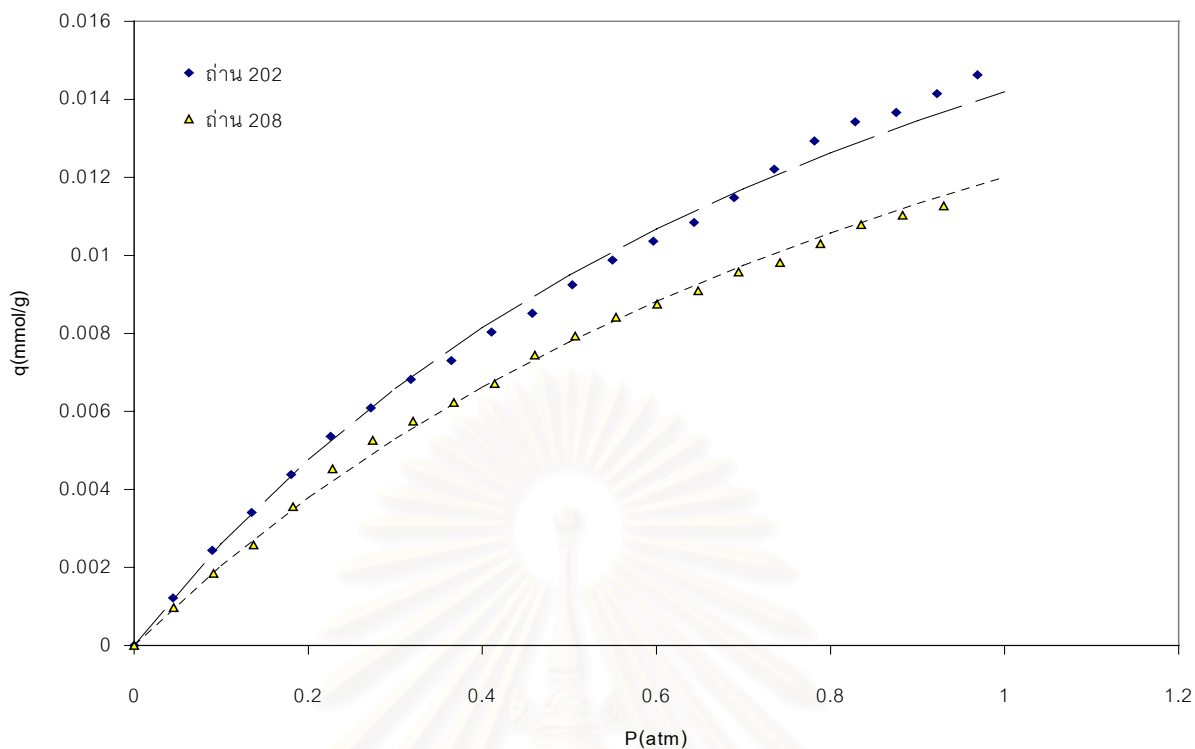


รูปที่ ค.30 สมดุลการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 308, ถ่าน 358 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ 30 °C

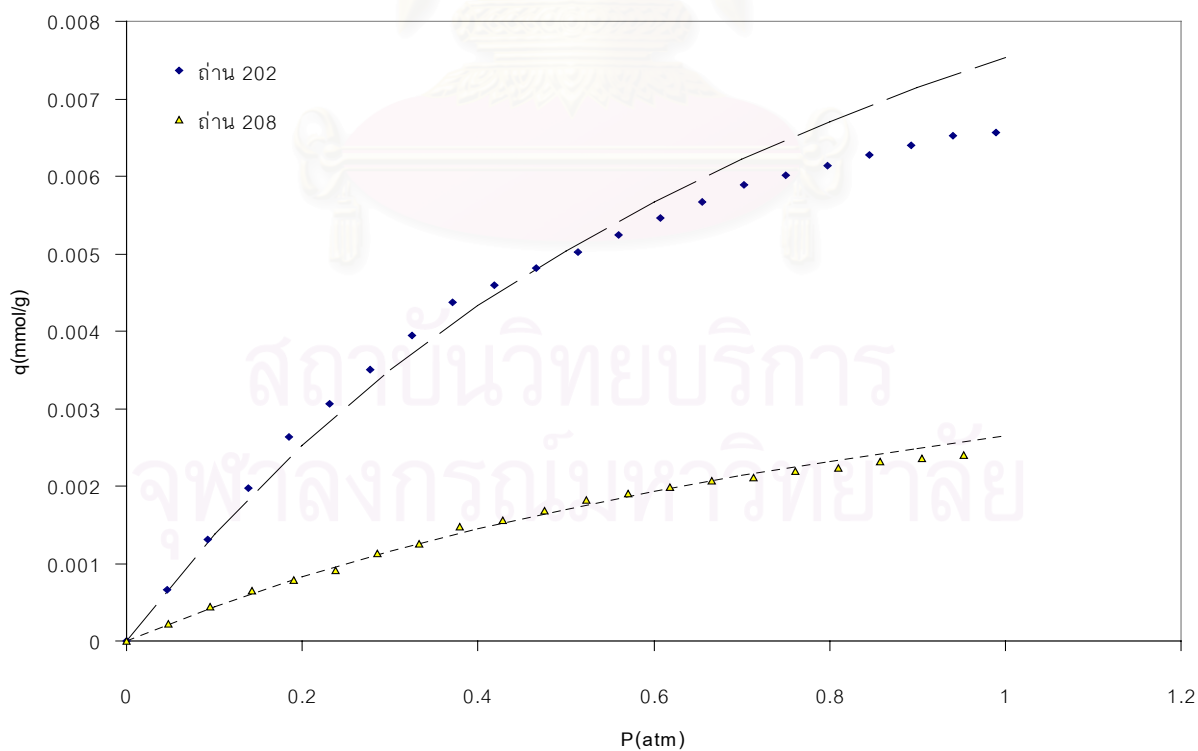


รูปที่ ค.31 สมดุลการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 202 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ -10 °C





รูปที่ ค.32 สมดุลการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 202 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ 0 °C



รูปที่ ค.33 สมดุลการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยถ่าน 208, ถ่าน 202 และเส้นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ 30 °C

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอารีญา บุญเกลี้ยง เกิดเมื่อวันที่ 8 เดือนมีนาคม พ.ศ.2521 ที่จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนท่ามะกาวิทยาคม จังหวัดกาญจนบุรี ในปีการศึกษา 2539 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2543 ศึกษาต่อในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย