

การเตรียมถ่านดูดซับจากเปลือกผลของยางพารา โดยต้มในสารละลายกรดซัลฟิวริก
สำหรับดูดซับก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจน



น.ส. ปฐมภรณ์ เสวตจินดากร

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1083-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF CARBON ADSORBENTS FROM RUBBER POD SHELLS BOILED IN
SULFURIC ACID SOLUTION FOR OXYGEN AND NITROGEN ADSORPTION



Miss Pathamaporn Sawetjindakorn

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 974-17-1083-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเตรียมถ่านดูดซับจากเปลือกของผลยางพาราโดยต้มในสารละลาย
กรดซัลฟิวริกสำหรับดูดซับก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจน
โดย นางสาว ปฐมาภรณ์ เศวตจินดากร
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....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 ภาวนันต์)

สภามหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปฐมาภรณ์ เสวตจินดากร : การเตรียมถ่านดูดซับจากเปลือกของผลยางพาราโดยต้มในสารละลายกรดซัลฟิวริกสำหรับดูดซับออกซิเจนและไนโตรเจน. (PREPARATION OF CARBON ADSORBENTS FROM RUBBER POD SHELLS BOILED IN SULFURIC ACID SOLUTION FOR OXYGEN AND NITROGEN ADSORPTION) อ. ที่ปรึกษา : อ.เดชา ฉัตรศิริเวช, 53 หน้า. ISBN 974-17-1083-6.

ถ่านดูดซับเตรียมจากเปลือกผลยางพาราโดยต้มในสารละลายกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 70% โดยน้ำหนัก ที่สภาวะอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาต้มถ่าน 1.5 ชม. สามารถทำให้เปลือกผลยางพาราเป็นถ่านได้ทั้งหมด ถ่านดูดซับที่ได้มีค่าพื้นที่ผิว BET 7.34 ตารางเมตรต่อกรัม และมีค่าการดูดซับไอโอดีนประมาณ 360-380 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจนที่อุณหภูมิ 31, 0 และ -13 องศาเซลเซียสพบว่า สมดุลการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจนเป็นไปตามสมการแบบจำลองของเฮนรี โดยมีค่าคงที่ของเฮนรีสำหรับแก๊สไนโตรเจนคือ 0.00017, 0.00067, 0.00105 มิลลิโมลต่อกรัมต่อกิโลพาสคัล ที่อุณหภูมิ 31, 0 และ -13 องศาเซลเซียสตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....

ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

AN ABSTRACT

4370375221 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: ADSORPTION / OXYGEN / NITROGEN / RUBBER POD SHELL / CARBON

PATHAMAPORN SAWETJINDAKORN : THESIS TITLE. (PREPARATION OF CARBON ADSORBENTS FROM RUBBER POD SHELLS BOILED IN SULFURIC ACID SOLUTION FOR OXYGEN AND NITROGEN ADSORPTION) THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR DEACHA CHATSIRIWECH, Ph.D, THESIS COADVISOR : - , 53 pp. ISBN 974-17-1083-6.

Carbon adsorbents were prepared from rubber pod shells by boiling in sulfuric acid solution of 70% w/w at 200 degree celcius. A whole shell was converted to carbon after boiling for one and a half hour. However, the adsorbents had BET surface area of 7.34 squaremeter per gram and they adsorbed iodine about 360-380 mg/g. Adsorption of nitrogen and oxygen were investigated at 31, 0, -13 degee celcius. All isotherms for nitrogen and oxygen obeyed Henry's equation. The Henry's constants were 0.00017, 0.00067, 0.00105 mmol/(g kPa) for nitrogen and 0.00020, 0.00083, 0.00109 mmol/(g kPa) for oxygen at 31, 0, -13 degree celcius respectively.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี.....
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี.....
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนิติต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช ที่กรุณาให้ความเอาใจใส่และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัยนี้ ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรา จงวิศาล และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาวนันต์ สำหรับความช่วยเหลือ ตั้งแต่การตรวจสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ ตลอดจนข้อเสนอแนะต่างๆในงานวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท CARBO KARN ที่ได้เอื้อเฟื้อถ่านดูฉบับชุดสหกรรม (PHO)

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ช่วยให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกด้วยดีตลอดมา

ท้ายที่สุด ขอขอบคุณครอบครัว และเพื่อนๆ ที่ช่วยสนับสนุน และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ญ
สัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ฎ
1 บทนำ.....	1
2 การผลิตถ่านดูดซับและการดูดซับแก๊ส.....	10
2.1 ตัวดูดซับ.....	10
2.2 ถ่านดูดซับ.....	10
2.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ.....	10
2.2.2 การทำให้เป็นถ่าน.....	11
2.2.3 การเพิ่มพื้นที่ผิว.....	11
2.3 ทฤษฎีการดูดซับ.....	12
2.3.1 สมดุลการดูดซับ.....	12
2.3.2 การวัดสมดุลการดูดซับ.....	14
3 วิธีการผลิตถ่านดูดซับและวัดสมดุลการดูดซับแก๊ส.....	15
3.1 การผลิตถ่านดูดซับ.....	15
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์.....	15
3.1.2 การเตรียมถ่านดูดซับ.....	15
3.1.3 วิธีตรวจสอบลักษณะสมบัติของถ่านดูดซับ.....	15
3.2 การวัดสมดุลการดูดซับ.....	16
3.2.1 วัสดุอุปกรณ์.....	16
3.2.2 การวัดสมดุลด้วยวิธีวัดปริมาณแก๊สที่เหลือ.....	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4	ผลการทดลอง.....	18
4.1	ลักษณะสมบัติของถ่านเปลือกผลยางพารา.....	18
4.2	การดูดซับ.....	25
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	30
5.1	บทสรุป.....	30
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	30
	รายการอ้างอิง.....	31
	ภาคผนวก.....	33
ก	ตัวอย่างการคำนวณ.....	34
ก.1	การหาค่าไอโอดีน.....	34
ก.1.1	วัสดุอุปกรณ์.....	34
ก.1.2	การเตรียมสารเคมีสำหรับการทดลอง.....	34
ก.2	วิธีคำนวณหาปริมาณการดูดซับ.....	37
ก.3	การตรวจสอบเครื่องมือวัดสมมูลการดูดซับ.....	39
ข	ข้อมูลการทดลอง.....	40
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	53

สารบัญรูป

รูป	หน้า
1.1 เปลือกผลยางพารา.....	2
1.2 แสดงปริมาณการนำเข้า-ส่งออกถ่านดูดซับในช่วงปี พ.ศ.2534-2544.....	3
2.1 ลักษณะเส้นสมดุผลการดูดซับ 5 แบบ.....	12
3.1 อุปกรณ์ดูดซับด้วยวิธีวัดปริมาณแก๊สที่เหลือ.....	17
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการต้มถ่าน.....	19
4.2 สูตรโครงสร้างของสารในปฏิกิริยา.....	21
4.3 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของถ่านดูดซับที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยและถ่านอุตสาหกรรม.....	24
4.4 สมดุผลการดูดซับด้วยถ่านดูดซับ CA015 (เฮนรี่) ที่อุณหภูมิการดูดซับ 31 °C, 0 °C และ -13 °C ของแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจน.....	26
4.5 สมดุผลการดูดซับด้วยถ่านดูดซับ CA015 (แลงเมียร์) ที่อุณหภูมิการดูดซับ 31 °C, 0 °C และ -13 °C ของแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจน.....	27
ข.1 สมดุผลการดูดซับด้วยถ่านดูดซับ CA015 (บด) (เฮนรี่) ที่อุณหภูมิการดูดซับ 31 °C, 0 °C และ -13 °C ของแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจน.....	49
ข.2 สมดุผลการดูดซับด้วยถ่านอุตสาหกรรม (PHO) (เฮนรี่) ที่อุณหภูมิการดูดซับ 31 °C, 0 °C และ -13 °C ของแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจน.....	50
ข.3 สมดุผลการดูดซับด้วยถ่านดูดซับ CA015 (บด) (แลงเมียร์) ที่อุณหภูมิการดูดซับ 31 °C, 0 °C และ -13 °C ของแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจน.....	51
ข.4 สมดุผลการดูดซับด้วยถ่านอุตสาหกรรม (PHO) (แลงเมียร์) ที่อุณหภูมิการดูดซับ 31 °C, 0 °C และ -13 °C ของแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจน.....	52

สารบัญญัตราสาร

ตาราง	หน้า
1.1 งานวิจัยเกี่ยวกับถ่านดูดซับ.....	5
1.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซับแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจน.....	8
2.1 สมการสมดุลแบบต่างๆ.....	13
4.1 ลักษณะสมบัติของกรดซัลฟิวริก.....	18
4.2 อุณหภูมิและช่วงเวลาในการต้มมีผลต่อลักษณะเบื้องต้นของถ่านเปลือกผลยางพารา.....	19
4.3 ค่าไอโอดีนที่วัดได้ของถ่านเปลือกผลยางพาราที่ระยะเวลาที่ใช้ต้มต่างๆ.....	20
4.4 ค่าไอโอดีนของตัวดูดซับถ่านกะลาต่างๆ.....	22
4.5 พื้นที่ผิว BET ของตัวดูดซับต่างๆ.....	22
4.6 ค่าคงที่ในแบบจำลองของเฮนรี โดยการดูดซับด้วยวิธีวัดปริมาณแก๊สที่เหลือในระบบ.....	28
4.7 ค่าคงที่ในแบบจำลองของแลงเมียร์ โดยการดูดซับด้วยวิธีวัดปริมาณแก๊สที่เหลือในระบบ..	28
ก.1 ค่า compressibility factor (Z) ที่สภาวะต่างๆในการทดลอง.....	37
ข.1 ปริมาณแก๊สที่เข้าระบบ ความดัน และอุณหภูมิด้วยถ่านดูดซับแบบทั้งชิ้นเปลือกผลยางพารา.....	40
ข.2 ปริมาณแก๊สที่เข้าระบบ ความดัน และอุณหภูมิด้วยถ่านดูดซับแบบบดละเอียด.....	43
ข.3 ปริมาณแก๊สที่เข้าระบบ ความดัน และอุณหภูมิด้วยถ่านอุตสาหกรรม (PHO).....	46

สัญลักษณ์และอักษรย่อ

I	ปริมาตรของสารละลายไอโอดีน (มิลลิลิตร)
K_{BET}	ค่าคงที่การดูดซับของ BET
K_{F}	ค่าคงที่การดูดซับของ Freundlich
K_{H}	ค่าคงที่การดูดซับของ Henry
K_{L}	ค่าคงที่การดูดซับของ Langmuir
K_{T}	ค่าคงที่การดูดซับของ Toth
K_{U}	ค่าคงที่การดูดซับของ UNILAN
K_{RP}	ค่าคงที่การดูดซับของ Radke-Prausnitz
K_{S}	ค่าคงที่การดูดซับของ Sips
M	น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ (gram)
N_1	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต (normal)
N_2	ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เตรียม (normal)
P_1	ปริมาตรของสารละลายโปตัสเซียมไอโอดेट (ml)
R(1)	ความเข้มข้นของสารละลายโปตัสเซียมไอโอดेट (normal)
R(2)	ค่าคงที่ของแก๊ส ($\text{kPa}\cdot\text{cm}^3/\text{mol}\cdot\text{K}$)
S	ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (ml)
q	ปริมาณการดูดซับ (mmol/g)
q_s	ปริมาณการดูดซับสูงสุด (mmol/g)
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

อักษรย่อ

ASTM	American Society of Testing and Materials
BET	Brunauer, Emmett และ Teller
SEM	Scanning electron micrography

บทที่ 1

บทนำ



ยางพาราเป็นยางที่ได้มาจากต้นไม้นชนิดหนึ่ง เรียกว่า ต้นยางพารา (เรียกตามภาษาพฤกษศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis*) สามีญชนทั่วไป เรียกว่า ยางพารา หรือ ต้นยางพารา (para rubber) ยางพารามีคุณสมบัติพิเศษกว่าวัตุธรรมชาติอื่นๆ คือ ยางพาราจะทำให้อ่อน ให้นุ่ม ยืดหยุ่นหรือแข็งถึงขนาดใช้แทนโลหะบางชนิดก็ได้ เก็บน้ำได้อัดลมไว้ได้ ไม้ร่วง และยังเป็นฉนวนไฟฟ้าอีกด้วย ปัจจุบันกล่าวได้ว่า แหล่งปลูกยางที่ใหญ่ที่สุดในโลกคือเอเชีย สำหรับประเทศไทย มีพื้นที่ปลูกทั่วทั้งประเทศประมาณ 12 ล้านไร่ ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในภาคใต้และภาคตะวันออก แม้ว่าประเทศไทยผลิตยางธรรมชาติเป็นอันดับ 3 ของโลก แต่ในด้านพันธุ์ยางยังสู้ต่างประเทศไม่ได้ อย่างเช่น ประเทศมาเลเซียได้เปลี่ยนพันธุ์ยางพื้นเมืองเป็นยางพันธุ์ดีไปหมดแล้ว ด้านราคายางพารามีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ยางชั้น ยางแผ่นดิบ ยางแผ่นรมควัน ยางแท่ง และเศษยาง เนื่องจากเป็นช่วงปริมาณยางออกสู่ตลาดน้อย รวมทั้งเป็นผลจากความร่วมมือกันของประเทศผู้ผลิตสำคัญคือ ไทย อินโดนีเซีย และมาเลเซีย ในด้านการผลิตและการกำหนดราคา

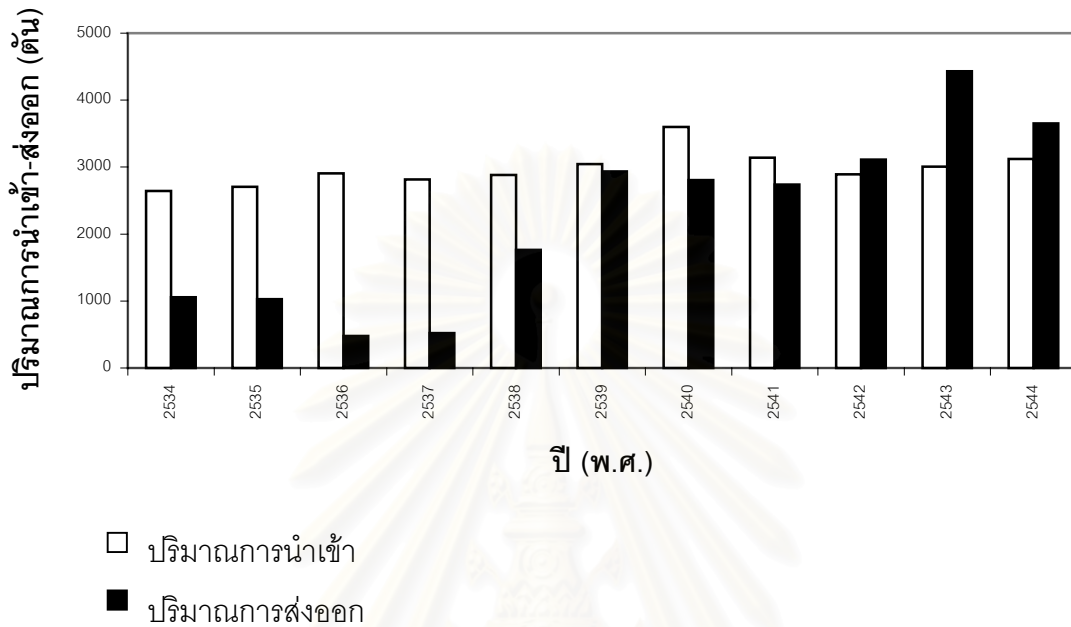
ผลผลิตน้ำยางส่วนใหญ่นำมาทำยางรถยนต์ อะไหล่ ชิ้นส่วนรองเท้า ยางรัดของ ท่อยาง เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ไม้ที่นอน ฯลฯ โดยส่วนใหญ่เป็นผลผลิตจากลำต้น สำหรับผลยางพารา (รูปที่ 1.1) มีเพียงการนำเมล็ดไปสกัดน้ำมันเท่านั้น ต้นยางมักจะออกผลปีละ 2 ครั้ง ระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนมิถุนายนครั้งหนึ่ง ครั้งนี้เป็นการออกดอกออกผลตามฤดูกาล ผลที่ได้จากฤดูนี้ถือว่าเป็นผลที่

สมบูรณ์ดี และระหว่างเดือนสิงหาคมถึงเดือนตุลาคมอีกครั้งหนึ่ง ผลที่เกิดจากดอกในครั้งนี้นี้น้อย ในปีหนึ่งๆ ต้นยางต้นหนึ่งจะมีผลประมาณ 50 ผล โดยในสวนเปลือกผลยางพารามีประมาณ 50 kg ต่อไร่ คิดเป็น 600,000 เมตริกตันต่อพื้นที่ปลูกยางทั่วประเทศ ซึ่งยังไม่มีการศึกษาต่อเกี่ยวกับการนำส่วนเปลือกของผลยางพาราไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น งานวิจัยนี้จึงสนใจนำส่วนของเปลือกผลยางพาราซึ่งมีลักษณะแข็งคล้ายกะลามะพร้าวมาใช้ประโยชน์สำหรับการเตรียมเป็นถ่านดูดซับ ซึ่งการนำเปลือกผลยางพาราซึ่งเป็นส่วนเหลือทิ้งทางเกษตรกรรมจำนวนมากมาพัฒนาเป็นถ่านดูดซับ จะช่วยสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรได้ทางหนึ่ง



รูปที่ 1.1 เปลือกผลยางพารา

อุตสาหกรรมในปัจจุบันได้มีการนำกระบวนการดูดซับ มาใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้บริสุทธิ์ขึ้นหรือใช้ในการดูดซับไอของสารอินทรีย์มากขึ้น ถ่านดูดซับเป็นวัสดุดูดซับชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในกระบวนการดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมาก สามารถผลิตจากวัสดุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบได้หลายชนิด และดูดซับสารประกอบทางเคมีทั้งชนิดมีขั้วและไม่มีขั้วได้หลายชนิด สำหรับประเทศไทยมีแนวโน้มการใช้ถ่านดูดซับภายในประเทศสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยพิจารณาจากสถิติการนำเข้าและส่งออกถ่านดูดซับ [22] ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 แสดงปริมาณการนำเข้า-ส่งออกถ่านดูดซับในช่วงปี พ.ศ.2534-2544

จะเห็นว่าในระยะ 10 ปีที่ผ่านมา อัตราการใช้ถ่านดูดซับมากขึ้น ปริมาณการส่งออกถ่านดูดซับมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ แต่ประเทศไทยยังประสบปัญหาขาดดุลมาโดยตลอดจนในช่วง 4 ปีที่ผ่านมา ก่อนหน้านี้ ประเทศไทยสามารถส่งออกถ่านดูดซับโดยมีมูลค่าการส่งออกมากกว่ามูลค่าการนำเข้า ทำให้ลดการสูญเสียเงินตราออกนอกประเทศ ดังนั้นจึงควรพัฒนากรรมวิธีในการผลิตถ่านดูดซับซึ่งใช้วัตถุดิบภายในประเทศ เพื่อให้ถ่านดูดซับที่ผลิตได้มีคุณภาพดีขึ้นและเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันในตลาดโลก ด้วยเหตุนี้งานวิจัยจึงมุ่งเน้นการพัฒนาวิธีผลิตถ่านดูดซับและลดปริมาณพลังงานที่ใช้เตรียมตัวดูดซับ ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียเงินตราอีกทางหนึ่ง โดยขั้นตอนการผลิตถ่านทั่วไปแสดงได้ดังนี้



การใช้วัตถุดิบเปลือกผลยางพาราซึ่งมีความแข็ง ขนาดไม่ใหญ่มากนัก และมีลักษณะคงรูป จึงลดขั้นตอนการทำให้เป็นเม็ดหรือแท่งก่อนการทำให้เป็นถ่าน ซึ่งลดการใช้พลังงานได้ทางหนึ่ง แม้ว่าในอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น ทำน้ำกากกันแก๊สพิษ ต้องการใช้ถ่านในลักษณะผง ก็สามารถนำถ่านดูดซับที่เตรียมได้นำมาบดก่อนการนำไปใช้งาน ซึ่งจะใช้พลังงานในการบดหลังจากทำให้เป็นถ่านแล้วน้อยกว่าพลังงานที่ใช้บดก่อนการทำให้เป็นถ่าน ถ่านที่นำมาจากวัสดุอื่น เช่น แกลบ ชี้เลื่อย มีลักษณะเป็นผง ซึ่งไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ดังนั้นจึงต้องนำไปอัดเป็นเม็ดก่อนนำไปใช้งาน แต่ถ่านที่ได้จากวัสดุที่แข็งคือเปลือกผลยางพารายังมีลักษณะคงรูปอยู่ จึงไม่จำเป็นต้องนำไปอัดเป็นเม็ดเพื่อการใช้งาน ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานได้อีกทางหนึ่ง ปัจจุบันมีการศึกษาการเตรียมถ่านดูดซับหลายวิธี ดังแสดงในตารางที่ 1.1

กระบวนการผลิตแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจนในปัจจุบัน นิยมกระบวนการกลั่นแยกอากาศที่สภาวะโครโอจินิก (อุณหภูมิต่ำกว่า $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$) ซึ่งจะได้ออกซิเจนและไนโตรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง สภาวะดังกล่าวจำเป็นต้องผ่านกระบวนการควบแน่นอากาศบางส่วน แล้วจึงกลั่นแยกภายใต้ อุณหภูมิและความดันที่เหมาะสม เพื่อการผลิตทั้งออกซิเจนเหลวและไนโตรเจนเหลวสำหรับอุตสาหกรรมบางประเภท แต่การใช้แก๊สออกซิเจนและไนโตรเจนในกระบวนการผลิตบางประเภทต้องดำเนินการในสภาวะแก๊ส และอาจไม่ต้องการความบริสุทธิ์สูง ดังนั้นจึงควรพิจารณากระบวนการแยกอื่นๆ ซึ่งสามารถผลิตออกซิเจนและไนโตรเจนที่เหมาะสมกับกระบวนการที่นำผลิตภัณฑ์ไปใช้ โดยมีการพัฒนากระบวนการแยกอากาศด้วยวิธีอื่นๆ ตั้งแต่ปี ค.ศ.1970 เช่น การดูดซับแบบความดันสลับ (Pressure Swing Adsorption) การแพร่ผ่านเยื่อแผ่น (membrane permeation)

ตารางที่ 1.1 งานวิจัยเกี่ยวกับถ่านดูดซับ

ผู้วิจัย	วัตถุดิบที่ใช้	เพิ่มพื้นที่ผิวโดย	อุณหภูมิ °C	ลักษณะสมบัติทั่วไป	การประยุกต์ใช้
บุญชัย ตระกูลมหชัย (1994) [4]	กะลาตาลโตเนด	ซิงค์คลอไรด์ แก๊สผสม	200 900	I.N. 800-1200 mg/g BET 1725 m ² /g I.N. 869.35-1383.66 mg/g BET 1484-1967 m ² /g	-
พงศธร ด้วงชาภรณ์ (1995) [5]	ซังข้าวโพด	ซิงค์คลอไรด์	400-800	I.N. 800-1075 mg/g	-
วิบูรณ์ ไสภณกิจโกศล ภาวิณี วุฒิกุล (1996) [6]	กะลามะพร้าวและ เปลือกข้าว	สังกะสีคลอไรด์	300-800	I.N. 152.5-249.9 mg/g	-
G.L.Moconnachie และผู้ร่วมงาน (1996) [7]	แกลบและฝักถั่ว	ไอน้ำ	500-800	BET 713-931 m ² /g	ดูดซับโลหะหนัก และกลิ่น

ผู้วิจัย	วัตถุดิบที่ใช้	เพิ่มพื้นที่ผิวโดย	อุณหภูมิ °C	ลักษณะสมบัติทั่วไป	การประยุกต์ใช้
วรารุณี ประชาศิริกุล (1998) [8]	กะลาปาล์มน้ำมัน	พลังงานไมโครเวฟ	350-450	I.N. 411.27 mg/g BET 476.64 m ² /g	-
ธีระชัย สุรวุฒนสกุล (1998) [9]	กะลาปาล์มน้ำมัน	ไอน้ำ	750	I.N. 766.99 mg/g BET 669.75 m ² /g	-
รังสรรค์ ละวรรณภา (1999) [10]	กะลาปาล์มน้ำมัน	พลังงานไมโครเวฟ	400	I.N. 1385 mg/g BET 1172 m ² /g	ดูดซับ SO ₂
กฤตยา เสือสีนาค (1999) [11]	กะลามะพร้าว	ซิงค์คลอไรด์	500	I.N. 898 mg/g BET 711 m ² /g	ดูดซับโพรเพนที่ 50 °C
วิศรุต โจนานนท์ (1999) [12]	เปลือกถั่วลิสง	กรดฟอสฟอริก	200-350	BET 986 mg/g	ดูดซับไอเบนซีน
สุทธิรินทร์ ศักดิ์สวัสดิ์ (2000) [13]	กะลามะพร้าว	กรดซัลฟิวริก	ไม่เกิน 200	I.N. 223.2-366.27 mg/g	-

หมายเหตุ I.N. คือ ค่าไอโอดีน (Iodine number)

BET คือ ค่าพื้นที่ผิว BET (BET Surface Area)

กระบวนการดูดซับสำหรับการแยกแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจนจากอากาศ [3] ได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นเวลาสองทศวรรษแล้ว ในปัจจุบันความต้องการออกซิเจนในโลก 4-5% นำมาจากกระบวนการแยกอากาศด้วยการดูดซับ แต่อย่างไรก็ตามออกซิเจนที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงสุดเพียง 95% กำลังการผลิตไม่เกิน 1 ตันต่อวัน ซึ่งถ้าผลิตมากกว่านี้จะมีผลเรื่องค่าใช้จ่ายที่สูงตามมา แต่ออกซิเจนที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่า 99% นั้นยังเป็นที่ต้องการอยู่ เช่น ประสิทธิภาพการเชื่อมและตัดในกระบวนการต่างๆ ขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของออกซิเจน เป็นต้น สำหรับการผลิตไนโตรเจนสามารถทำให้ไนโตรเจนมีความบริสุทธิ์สูงได้ ความต้องการใช้ออกซิเจนที่มีความเข้มข้นสูงกว่าอากาศ เช่น ระบบบำบัดน้ำเสีย อาจใช้กระบวนการดูดซับเพื่อผลิตออกซิเจนที่ต้องการได้ ปัจจุบันมีการวิจัยเกี่ยวกับการดูดซับแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจนมากมาย ดังแสดงในตารางที่ 1.2

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเปลือกผลยางพารามาเตรียมถ่านดูดซับเพื่อนำมาดูดซับแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจน โดยมีวัตถุประสงค์มุ่งเน้นสภาวะการเตรียมถ่านดูดซับและการดูดซับแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจนดังนี้

1. เพื่อเตรียมถ่านดูดซับจากเปลือกของผลยางพารา
2. เพื่อวัดสมมูลการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซับแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจน

ผู้วิจัย	วิธีการ	ผลการทดลอง
D.M.Ruthven, N.S.Raghavan และ M.M.Hassan (1986) [14]	ดูดซับแก๊สบน carbon molecular sieve โดยใช้ สมมติฐานแบบจำลองการแพร่ในกระบวนการ PSA	การแพร่ของแก๊สออกซิเจนเกิดขึ้นรวดเร็วที่ความ ดัน 0-1 atm แต่เส้นสมมูลของแก๊สทั้งสองเกือบ เป็นเส้นตรงและมีความแตกต่างกันเล็กน้อย
Sherman และผู้ร่วมงาน (1992) [15]	ดูดซับแก๊สบนซีโอไลต์ NaX และ NaA โดยแลกเปลี่ยน ไอออน Na ⁺ ด้วย Li ⁺ , Ca ²⁺ , Sr ²⁺	ซีโอไลต์ LiCaX และ LiSrX ที่มีสัดส่วน Sr ²⁺ ไม่ เกิน 10% และ Ca ²⁺ ไม่เกิน 15% และซีโอไลต์ LiCaA และ LiSrA ที่มีสัดส่วน Sr ²⁺ ไม่เกิน 10%, Ca ²⁺ ไม่เกิน 15% สามารถดูดซับแก๊ส ไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจนได้มากขึ้น ซีโอไลต์ X ดูดซับแก๊สได้ดีกว่า A
Ruthven (1996) [16]	ดูดซับแก๊สผสมโดยใช้ซีโอไลต์ชนิด CaA โดยใช้ สมมติฐานแบบจำลองการดูดซับเฮนรี	ดูดซับแก๊สไนโตรเจนได้ดีกว่าแก๊สออกซิเจนโดย พิจารณาสมมูลการดูดซับและค่าคงที่ของเฮนรี และดูดซับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีที่สุด
Hutson และผู้ร่วมงาน (1999) [17]	ดูดซับแก๊สบนซีโอไลต์ NaX โดยแลกเปลี่ยน ไอออน Na ⁺ ด้วยไอออน Li ⁺	สามารถดูดซับแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น และเมื่อแลกเปลี่ยน Li ⁺ ด้วย Ag ⁺ พบว่าซีโอไลต์ LiAgX สามารถดูดซับแก๊สไนโตรเจนและออกซิเจนมาก กว่าซีโอไลต์ LiX

ตารางที่ 1.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซับแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจน (ต่อ)

ผู้วิจัย	วิธีการ	ผลการทดลอง
เกรียงศักดิ์ กิตติพิมาน (2000) [18]	ดูดซับแก๊สบนถ่านดูดซับที่เตรียมจากกะลามะพร้าวด้วยวิธีไหลผ่านทะเลและวัดปริมาณแก๊สที่เหลือ	สมดุลการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจนใกล้เคียงกัน ภายใต้สภาวะที่ศึกษา
Ralph T. Yang, Nick D. Hutson และ Salil U. Rege (2001) [19]	ดูดซับแก๊สบน Li, Ag-LSX zeolites ในกระบวนการ PSA	ปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ได้เพิ่มขึ้น 12% เมื่อเทียบกับซีโอไลต์ที่ยังไม่แลกเปลี่ยนไอออนของ Ag
อัญชลี จันทร์ไช้ (2001) [20]	ดูดซับแก๊สบนตัวดูดซับชนิดหินพัมมิชโดยแลกเปลี่ยนไอออนกับเกลือในเตรตของโลหะเงิน	ค่าคงที่สมดุลการดูดซับเฮนรีและค่าคงที่สมดุลการดูดซับแลงเมียร์เป็นสัดส่วนกับปริมาณโลหะเงินที่แลกเปลี่ยน ขณะที่ปริมาณการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเข้าสู่ค่าจำกัดกับการเพิ่มปริมาณโลหะเงินที่แลกเปลี่ยนไอออน

บทที่ 2

การผลิตถ่านดูดซับและการดูดซับแก๊ส

2.1 ตัวดูดซับ

ตัวดูดซับสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ตัวดูดซับอสัณฐาน (Amorphous Adsorbent) และ ตัวดูดซับโครงสร้างผลึก (Crystalline Adsorbent)

1. **ตัวดูดซับอสัณฐาน** ได้แก่ ซิลิกาเจล อะลูมินา ถ่านดูดซับ โดยจะมีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 200-2000 ตารางเมตรต่อกรัม แต่โดยทั่วไปถ่านดูดซับสามารถมีพื้นที่ผิวได้สูงกว่านี้ (~1500 ตารางเมตรต่อกรัม) และมีขนาดรูพรุนหลายช่วงตั้งแต่ 0.5 นาโนเมตรจนถึง 1000 นาโนเมตร
2. **ตัวดูดซับโครงสร้างผลึก** ได้แก่ ซีโอไลต์ เป็นสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต มีการแลกเปลี่ยนไอออนของหมู่โลหะได้ มีขนาดของรูพรุนมีค่าเดียว

2.2 ถ่านดูดซับ

ถ่านดูดซับ เป็นถ่านลักษณะอสัณฐาน คือมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ซึ่งผ่านกระบวนการเพื่อทำให้มีพื้นที่ในการดูดซับปริมาณมากหรือมีความสามารถในการดูดซับสูง ถ่านดูดซับเป็นตัวดูดซับที่มีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยแตกต่างกันออกไป ถ่านดูดซับมักผลิตขึ้นจากวัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นธาตุคาร์บอน ลักษณะพื้นผิวเป็นพื้นผิวทั้งไม่มีขั้วและมีขั้ว

กระบวนการผลิตถ่านดูดซับ

กรรมวิธีการผลิตถ่านดูดซับมีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและสมบัติของถ่านดูดซับที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปประกอบด้วยขั้นตอน 3 ขั้นตอน คือ การเตรียมวัตถุดิบ การทำให้เป็นถ่าน และการเพิ่มพื้นที่ผิว

2.2.1 **การเตรียมวัตถุดิบ** ถ่านดูดซับผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ วัสดุที่นำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านดูดซับมักเป็นวัสดุเหลือทิ้งหรือมีราคาถูก มีความสะดวกในการนำมาใช้งาน ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของวัตถุดิบได้ดังนี้

1. กลุ่มเซลลูโลสที่มาจากพืช

แบบลักษณะแข็ง เช่น กะลามะพร้าว ไม้ กะลาตาลโตนด เป็นต้น ย่อยเป็นชิ้นเล็กๆยาก จึงต้องเผาให้เป็นถ่านก่อน ซึ่งจะช่วยลดพลังงานในการย่อยขนาด

แบบลักษณะอ่อน เช่น แกลบ ขี้เลื่อย ชานอ้อย ชังข้าวโพด เปลือกถั่วลิสง เป็นต้น ไม่ต้องย่อยขนาดเพราะมีขนาดเล็กอยู่แล้ว

2. กลุ่มถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ พีท บิทูมินัส เป็นต้น มีลักษณะแข็ง ขึ้นใหญ่ ซึ่งมักเป็นส่วนที่เหลือจากการเผาเพื่อผลิตพลังงาน จึงต้องบดให้มีชิ้นเล็กก่อน
3. กลุ่มชิ้นส่วนต่างๆ ของสัตว์ เช่น กระดูกสัตว์ เป็นต้น ถ้ากระดูกมีชิ้นใหญ่จำเป็นต้องเผาให้เป็นถ่าน แล้วจึงบดให้มีขนาดเล็ก เช่นเดียวกับกลุ่มเซลลูโลสที่มีลักษณะแข็ง

2.2.2 การทำให้เป็นถ่าน เป็นการเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนให้สูงขึ้น โดยการเผาในที่อับอากาศที่อุณหภูมิ 200 – 500 องศาเซลเซียส โดยการระเหยสารประกอบที่ระเหยง่าย เช่น น้ำหรือความชื้น เป็นต้น และสลายธาตุไฮโดรเจนและออกซิเจนในโครงสร้างวัตถุบกลุ่มเซลลูโลส และสลายธาตุไนโตรเจนและกำมะถันในโครงสร้างกลุ่มถ่านหิน

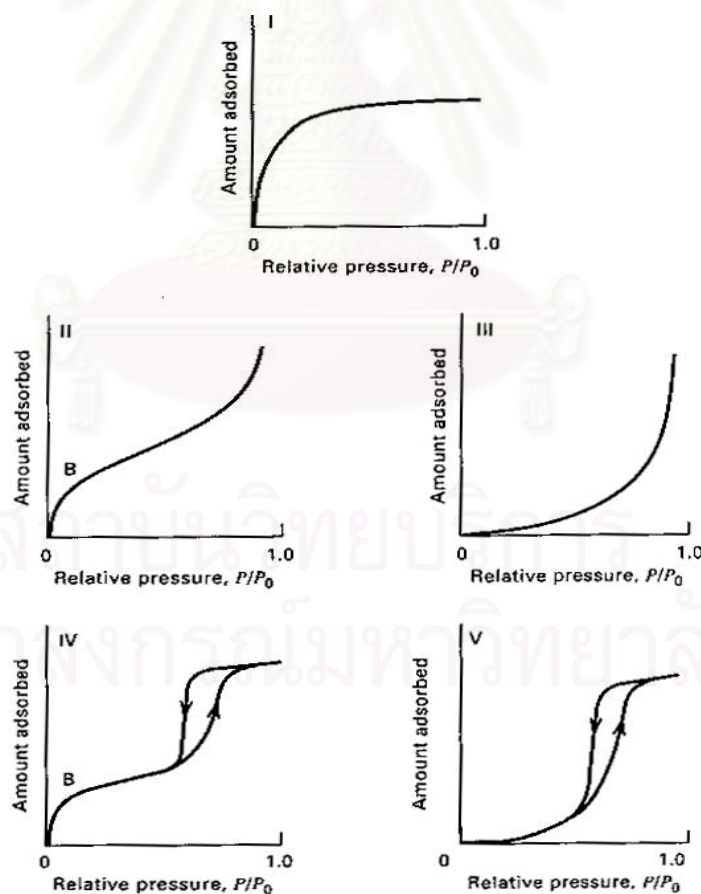
2.2.3 การเพิ่มพื้นที่ผิว หมายถึง การทำให้ถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวหรือทำให้ผิวถ่านมีความสามารถดูดซับได้มากขึ้น เช่น เพิ่มความเป็นขั้ว เป็นต้น พื้นที่ผิวถ่านสามารถเพิ่มขึ้นโดยปฏิกิริยาการสลายตัวของธาตุในวัตถุบิ อุณหภูมิสูงขึ้น พื้นที่ผิวเพิ่มได้เร็วและมากขึ้นด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนด้วยไอน้ำ หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เร็วและดี ณ อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส พื้นที่ผิวของถ่านอาจเพิ่มขึ้นได้ด้วยการใช้สารละลายเกลืออนินทรีย์ เช่น ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) เป็นต้น หรือสารละลายกรด เช่น กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เป็นต้น ในกรณีเช่นนี้ ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 300 องศาเซลเซียสขึ้นไป การใช้สารละลายเกลืออนินทรีย์หรือสารละลายกรดยังสามารถทำให้เป็นถ่านและเพิ่มพื้นที่ผิวได้ในเวลาเดียวกัน ดังงานวิจัยของวิศรุต โจนานนท์ [12] ใช้สารละลายกรดฟอสฟอริก ทำให้เปลือกถั่วลิสงซึ่งเป็นวัตถุดิบเป็นถ่านและเพิ่มพื้นที่ผิวได้เวลาเดียวกัน ที่อุณหภูมิไม่เกิน 350 องศาเซลเซียส และงานวิจัยของสุทธินนท์ ศักดิ์สวัสดิ์ [13] ใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก ทำให้กะลามะพร้าวซึ่งเป็นวัตถุดิบเป็นถ่านและเพิ่มพื้นที่ผิวได้เวลาเดียวกัน ที่อุณหภูมิไม่เกิน 200 องศาเซลเซียส

2.3 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับแก๊สเป็นกระบวนการที่โมเลกุลที่ถูกดูดซับแก๊สเข้าไปยึดเกาะพื้นผิวของของแข็ง โดยมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลหรือแรงดึงดูดระหว่างขั้วถาวรหรือขั้วเหนี่ยวนำ การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ประเภทคายความร้อน ปริมาณการดูดซับจึงลดลงเมื่ออุณหภูมิของระบบการดูดซับเพิ่มขึ้น

2.3.1 สมดุลการดูดซับ

สมดุลการดูดซับแก๊สแต่ละชนิด ณ อุณหภูมิต่างๆ มักถูกเลือกใช้เป็นเกณฑ์ข้อหนึ่งสำหรับการเลือกชนิดตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแก๊สได้ในอัตราที่ใกล้เคียงกัน ลักษณะสมดุลการดูดซับแก๊สจึงแบ่งออกเป็น 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [23] และสมการสมดุลการดูดซับแก๊สแบบต่างๆ ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 2.1 [24]



รูปที่ 2.1 ลักษณะเส้นสมดุลการดูดซับ 5 แบบ

ตารางที่ 2.1 สมการสมดุลแบบต่างๆ

สมการสมดุล	ประเภท สมดุล	สมการแบบจำลอง	ค่าคงที่	หมายเหตุ
Henry	แบบที่ 1,2,3	$q = K_H P$	K_H	ที่ความเข้มข้นต่ำ สมดุลจะเป็นเส้น ตรง
Langmuir	แบบที่ 1	$\frac{q}{q_s} = \frac{K_L P}{1 + K_L P}$	K_L, q_s	
Freundlich	แบบที่ 1 แบบที่ 3	$q = K_F P^{\frac{1}{n}}$	K_F, n	เมื่อ $n > 1$ เมื่อ $n < 1$
BET	แบบที่ 2	$\frac{q}{q_s} = \frac{K_{BET} P}{(1 - P + K_{BET} P)(1 - P)}$	K_{BET}, q_s	
Toth	แบบที่ 1	$q = \frac{P q_{\max}}{[(1/K_T) + P^n]^{1/n}}$	K_T, q_{\max}, n	
UNILAN	แบบที่ 1	$q = \frac{q_{\max}}{2s_i} \ln\left(\frac{1 + K_U e^s P}{1 + K_U e^{-s} P}\right)$	K_U, q_{\max}, s	
Radke-Prausnitz	แบบที่ 1	$q = \frac{K_{RP} q_{\max} P}{(1 + K_{RP} P)^n}$	K_{RP}, q_{\max}, n	
Sips	แบบที่ 1	$q = \frac{q_{\max} (K_s P)^n}{1 + (K_s P)^n}$	K_S, q_{\max}, n	

2.3.2 การวัดสมมูลการดูดซับ

การวัดสมมูลการดูดซับสำหรับแก๊สชนิดหนึ่ง ควรวัดทั้งปริมาณแก๊สที่ถูกดูดซับไว้บนตัวดูดซับ และปริมาณแก๊สที่เหลือในระบบ ณ อุณหภูมิที่กำหนดไว้ โดยการวัดมวลของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้น และปริมาณแก๊สที่เหลือ ในลักษณะของความดันระบบเปลี่ยนไปเมื่อเติมแก๊สที่ต้องการดูดซับเข้าสู่ระบบ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ง่ายและวัดปริมาณการดูดซับได้ถึงระดับ $0.1 \mu\text{g}$ วิธีนี้จำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดมวลที่มีความแม่นยำมาก และอุปกรณ์วัดความดันที่แม่นยำ หรือวัดความดันของระบบที่เปลี่ยนไปกับปริมาณแก๊สที่เติมเข้าสู่ระบบที่กำหนดปริมาตรไว้ก่อน ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณการดูดซับได้ วิธีนี้ต้องการอุปกรณ์วัดความดันที่ละเอียดมากและปริมาตรของระบบที่ถูกต้อง เพื่อลดการรบกวนจากแก๊สชนิดอื่นๆ การวัดสมมูลการดูดซับแก๊สจึงมักเริ่มต้นที่ความดันใกล้สูญญากาศสัมบูรณ์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีการผลิตถ่านดูดซับและวัดสมมูลการดูดซับแก๊ส

3.1 การผลิตถ่านดูดซับ

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

- 1 เปลือกผลยางพารา
- 2 สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 70% โดยน้ำหนัก
- 3 ปีกเกอร์ขนาด 3000 มิลลิลิตร
- 4 ตู้อบ
- 5 ชุดกรองสุญญากาศ
- 6 กระดาษกรองเบอร์ 1 (Whatman)
- 7 น้ำกลั่น
- 8 เทอร์โมมิเตอร์

3.1.2 การเตรียมถ่านดูดซับ

1. ชั่งเปลือกผลยางพารา 80 กรัม
2. นำมาต้มในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 70% ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชม.
3. แช่วเปลือกผลยางพาราในน้ำ ทิ้งไว้ 1 วัน เพื่อให้เปลือกผลยางพาราที่ต้มแล้วมีค่า pH เป็นกลาง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส
4. ดำเนินการทดลองข้อ 1-3 ใหม่ โดยเปลี่ยนเวลาที่ใช้ต้มเป็น 1 ½ ชม. และ 2 ชม.

3.1.3 วิธีตรวจสอบลักษณะสมบัติของถ่านดูดซับ

1. การดูดซับไอโอดีนตามมาตรฐานของ ASTM D 4607
2. การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ Micromeritic BET รุ่น ASAP 2000
3. ตรวจสอบที่ผิวภายนอกของถ่านดูดซับโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ด้วยเครื่อง SEM รุ่น JSM 6400

3.2 การวัดสมดุลการดูดซับแก๊ส

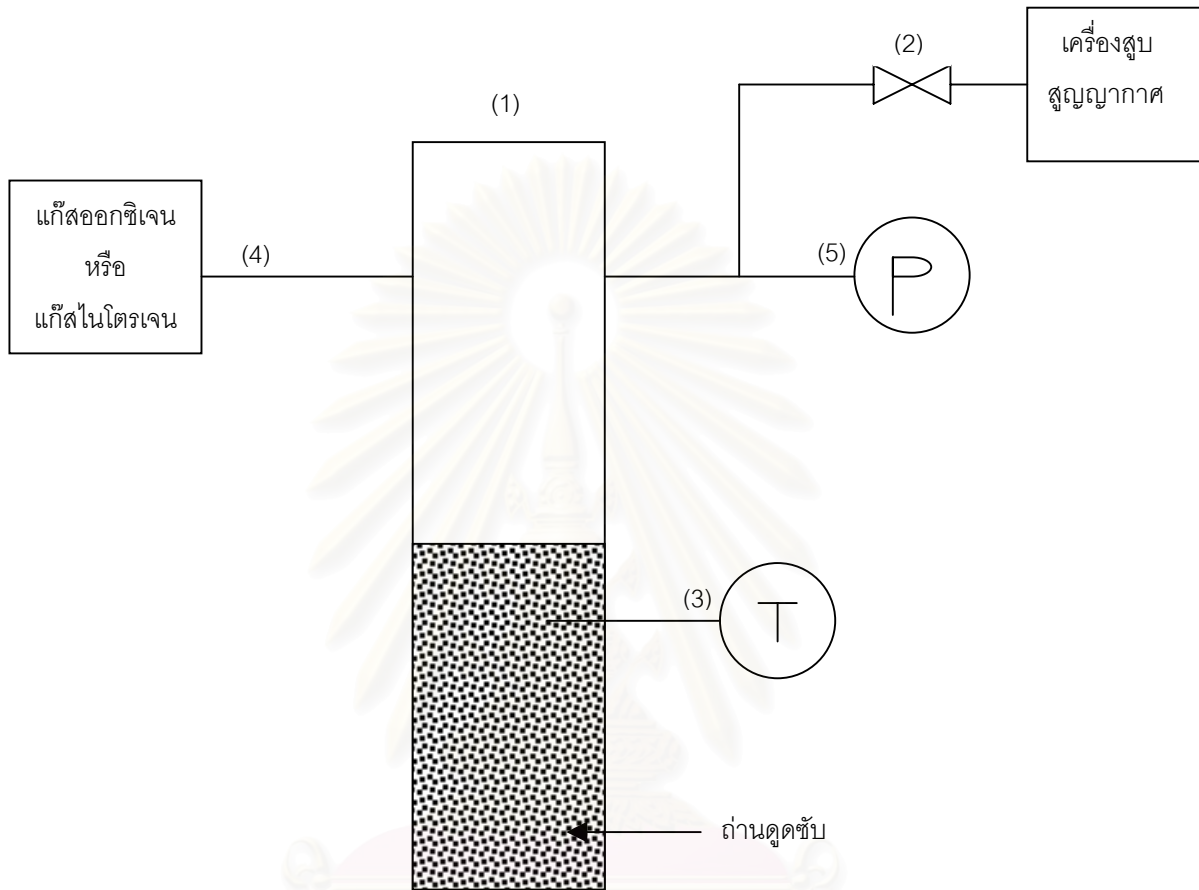
3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. อุปกรณ์วัดสมดุลการดูดซับแก๊ส (ดังรูปที่ 3.1) ประกอบด้วย ภาชนะบรรจุถ่านดูดซับเทอร์โมมิเตอร์ อุปกรณ์วัดความดันแบบมานอมิเตอร์ จุดต่อเครื่องสูบลมสุญญากาศ สำหรับปรับสภาพเริ่มต้น และจุดต่อสำหรับเติมแก๊สดูดซับ
2. เครื่องสูบลมสุญญากาศ
3. กระจกชนิดแก๊สตัวอย่างปริมาตร 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.2.2 การวัดสมดุลด้วยวิธีวัดปริมาณแก๊สที่เหลือ (ดังรูปที่ 3.1)

1. บรรจุตัวดูดซับปริมาณ 10 กรัมไว้ในอุปกรณ์สำหรับวัดการดูดซับที่จุด (1)
2. สูบอากาศออกจากเครื่องวัดการดูดซับโดยใช้เครื่องสูบลมสุญญากาศ สังเกตความดันที่มาตรวัดความดันมานอมิเตอร์จนระดับปรอทหยุดนิ่งที่ความดัน 2 มิลลิเมตรปรอท จากนั้นปิดวาล์วเพื่อป้องกันอากาศจากภายนอกไหลเข้าระบบที่จุด (2)
3. วัดอุณหภูมิของตัวดูดซับจากเทอร์โมมิเตอร์ที่จุด (3) ณ อุณหภูมิห้อง
4. ฉีดแก๊สฮีเลียมภายในอุปกรณ์ที่จุด (4) สังเกตผลการเปลี่ยนแปลงความดันกับปริมาณแก๊สฮีเลียมที่เติมที่จุด (5)
5. ดำเนินการซ้ำข้อ 2 และ 4 โดยใช้แก๊สไนโตรเจน
6. ดำเนินการซ้ำข้อ 2 และ 4 โดยใช้แก๊สออกซิเจน
7. เปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 0 และ -13 องศาเซลเซียส
8. ดำเนินการซ้ำข้อ 2 – 6
9. คำนวณปริมาณการดูดซับ และหาสมการแบบจำลองสมดุลการดูดซับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



T = เทอร์โมมิเตอร์

P = มาตรวัดความดันแบบमानมิเตอร์

รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ดูดซับแก๊สด้วยวิธีวัดปริมาณแก๊สที่เหลือ

บทที่ 4

ผลการทดลอง

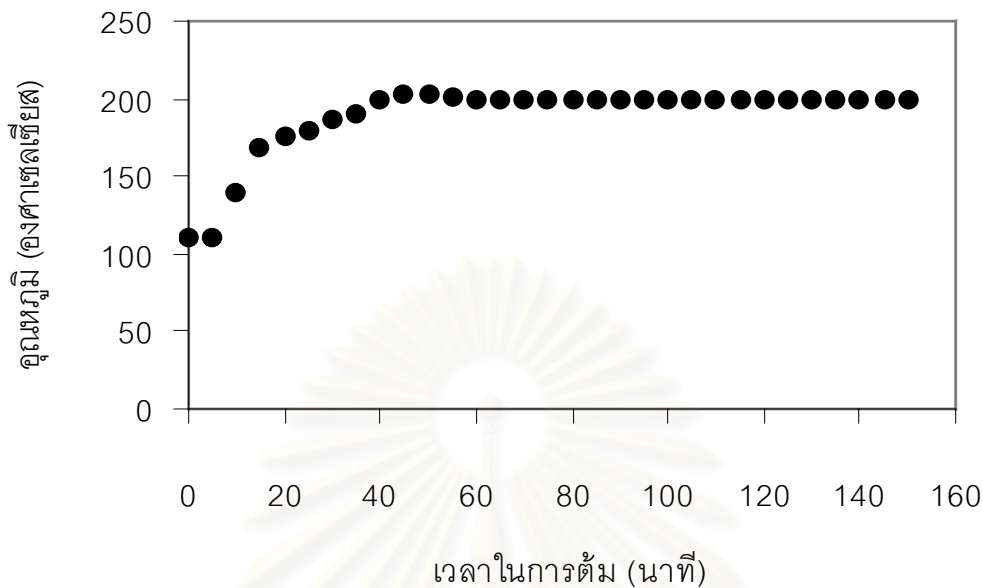
4.1 ลักษณะสมบัติของถ่านเปลือกผลยางพารา

ก่อนทำการต้มเปลือกผลยางพาราในสารละลายกรดซัลฟิวริก พบว่าผิวของเปลือกผลยางพารา ด้านนอกและสารละลายเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีดำที่อุณหภูมิเริ่มต้น 110 องศาเซลเซียส เนื่องจากการสลายตัวของเซลลูโลสโดยโปรตอนที่มีในระบบซึ่งเกิดจากการแตกตัวของกรดซัลฟิวริกในน้ำเข้าไปตั้งหมู่ฟังก์ชันบางตัวในเซลลูโลสและทำให้โมเลกุลของกลูโคสบางโมเลกุลที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในโมเลกุลหลุดออกมา ส่งผลให้สารละลายเกิดการเปลี่ยนสี ในการทดลองใช้ปริมาณสารละลายกรดซัลฟิวริกปริมาตร 300 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 3 ลิตร ซึ่งจะพอดีท่วมเปลือกผลยางพาราเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างทั่วถึง

การผลิตถ่านดูดซับในงานวิจัยนี้ สารละลายกรดซัลฟิวริกเป็นทั้งตัวทำให้เป็นถ่านและเพิ่มพื้นที่ผิว โดยสารละลายกรดซัลฟิวริกมีความเป็นกรดสูงสามารถสลายแป้ง, เซลลูโลสและสารอินทรีย์ต่างๆได้ ลักษณะสมบัติต่างๆของกรดซัลฟิวริกแสดงดังตาราง 4.1

ตาราง 4.1 ลักษณะสมบัติของกรดซัลฟิวริก

มวลโมเลกุล	98.08
สถานะ	ของเหลว
จุดเดือด	98% : 330 °C (626 °F)
จุดหลอมเหลว	98% : -1.1 °C (30 °F)
ความดันไอที่ 40 °C (102 °F)	98% : 0.002 mmHg
ความถ่วงจำเพาะที่ 15 °C (60 °F)	98% : 1.8437
ความหนาแน่น	1.606 g/cm ³
ความสามารถในการละลาย	ละลายได้ดีในน้ำ



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการต้มถ่าน

สารละลายเริ่มเดือดที่อุณหภูมิประมาณ 140°C ที่เวลาผ่านไป 15 นาทีและถึงอุณหภูมิ 200°C ที่เวลา 30 นาที ดังรูปที่ 4.1 โดยเริ่มจับเวลาในการต้มเมื่ออุณหภูมิถึง 200°C และเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชม. อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิและช่วงเวลาในการต้มมีผลต่อลักษณะเบื้องต้นของถ่านของเปลือกผลยางพารา ดังนี้

สภาวะการทำให้เป็นถ่าน	ลักษณะทั่วไป
200°C 1 ชม.	เปลือกค่อนข้างแข็ง เมื่อตัดดูพื้นผิวตัวขวาง พบว่า ด้านในยังมีบางส่วนที่ไม่เป็นถ่าน
200°C 1.5 ชม.	ค่อนข้างเปราะ มีสีดำด้านสนิทเกือบทั้งเปลือก เปลือกเริ่มลีบลง
200°C 2 ชม.	เปราะมาก มีสีดำด้านสนิททั้งเปลือก เปลือกลีบลงมากขึ้น
250°C 1 ชม.	เปลือกแข็ง ด้านในยังไม่เป็นถ่านหมด

จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 200°C องศาเซลเซียสก็สามารถทำให้เปลือกผลยางพาราเป็นถ่านได้ ซึ่งทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสเปลี่ยนไป ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยอาศัยปฏิกิริยาการกำจัดน้ำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการดึงหมู่ฟังก์ชันที่เกาะอยู่กับอะตอมคาร์บอนในโมเลกุลของเซลลูโลสออก ซึ่งจะเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนให้สูงขึ้น ปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นคือ

เซลลูโลส \longrightarrow ถ่านที่มีสัดส่วนคาร์บอนมากขึ้น + น้ำ

สูตรโครงสร้างของสารในปฏิกิริยาแสดงในรูปที่ 4.2

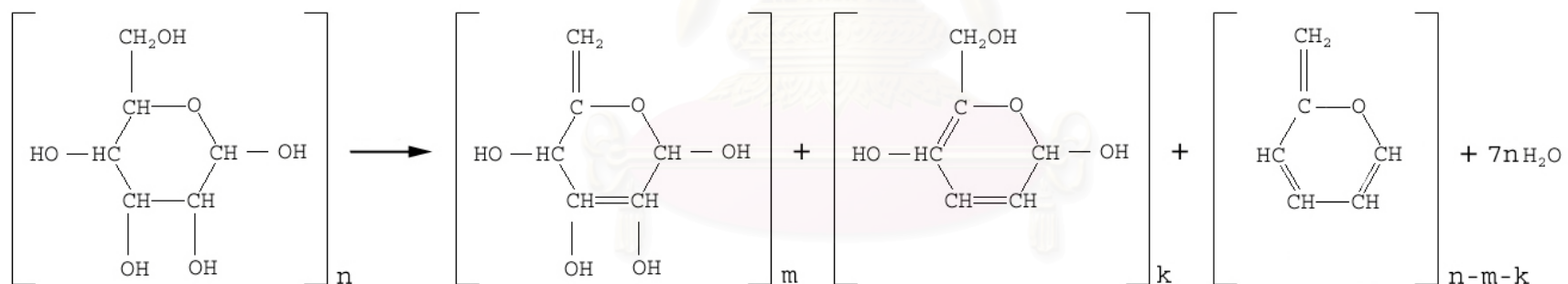
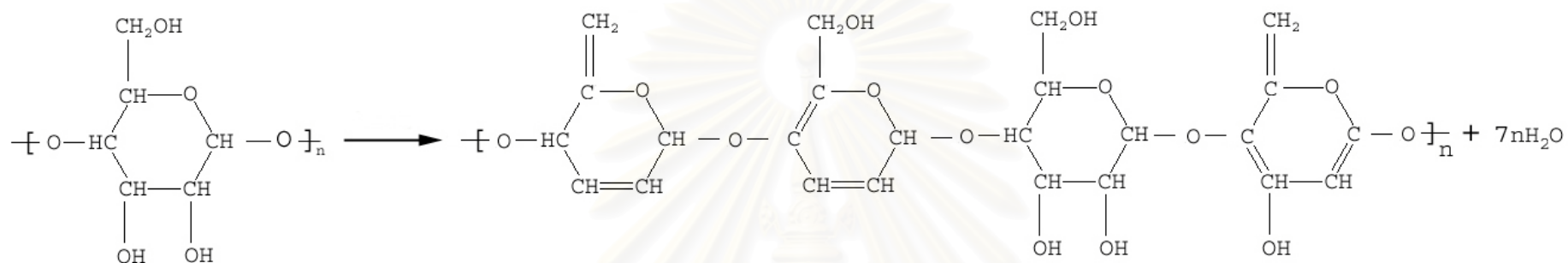
เมื่อผ่านขั้นตอนการทำให้เป็นถ่านและการกระตุ้นโดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกที่ระยะเวลาต้มเปลือกยางพาราต่างๆแล้ว แสดงผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าไอโอดีนที่วัดได้ของถ่านเปลือกผลยางพาราที่ 200 องศาเซลเซียส ณ เวลาที่ใช้ต้มต่างๆ

ถ่าน	ระยะเวลาที่ใช้ต้ม (ชม.)	สัดส่วนของถ่านที่ได้ (%)	ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)
CA010	1	55.76	363.80
CA015	1.5	54.04	383.08
CA020	2	48.25	380.71

จะเห็นว่าค่าดูดซับไอโอดีนมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นระยะเวลาที่ใช้ต้มถ่านนั้น ไม่ทำให้ค่าไอโอดีนแตกต่างกันนัก เนื่องจากสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้มีความเข้มข้นสูง ปริมาณน้ำในสารละลายมีน้อย ทำให้เกิดการแตกตัวของโปรตอนเข้าไปทำปฏิกิริยาในโครงสร้างของเซลลูโลสมีอยู่จำกัด ส่งผลให้ค่าการดูดซับไอโอดีนที่เวลาต้มต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน และจะเห็นว่าสัดส่วนของถ่านที่ได้มีค่าลดลงเนื่องจากผลของระยะเวลาที่ใช้ต้มมากขึ้น ทำให้เกิดการหลุดของโมเลกุลในเซลลูโลสมากขึ้น เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในโมเลกุล และองค์ประกอบที่อยู่ในเซลลูโลสบางส่วนระเหยออกไป ซึ่งถ้าใช้ระยะเวลาต้มมากกว่านี้จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าไอโอดีน แต่จะทำให้สัดส่วนของถ่านลดลงมากขึ้นดังได้กล่าวในข้างต้น

เปรียบเทียบค่าไอโอดีนกับถ่านที่เตรียมจากวัตถุดิบที่มีลักษณะแข็งต่างๆ และวิธีการทำให้เป็นถ่านและเพิ่มพื้นที่ผิวต่างกันดังตารางที่ 4.4 จะเห็นว่าถ่านที่เตรียมจากกะลาปาล์มน้ำมัน โดยเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยดัดวไฮน้า [9] ซึ่งสามารถกระตุ้นและเพิ่มพื้นที่ผิวได้ในเวลาเดียวกันที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ค่าไอโอดีนที่ได้มากกว่างานวิจัยประมาณ 2 เท่า เนื่องจากผลของอุณหภูมิทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนแตกต่างกับงานวิจัย สำหรับถ่านที่เตรียมจากกะลาตาลโตนดโดยเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยซิงค์คลอไรด์และแก๊สผสม (แก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ น้ำมันดีเซลกับไอน้ำ) [4] จะเห็นว่าทั้งการเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยซิงค์คลอไรด์และแก๊สผสมได้ค่าการดูดซับไอโอดีนค่อนข้างสูงและใกล้เคียงกัน โดยทำให้กะลาตาลโตนดเป็นถ่านที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสแล้วเพิ่มพื้นที่ผิวที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสด้วยซิงค์คลอไรด์ และทำให้กะลาตาล



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.2 สูตรโครงสร้างของสารในปฏิกิริยาการกำจัดน้ำ

โตนดเป็นถ่านที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสแล้วเพิ่มพื้นที่ผิวที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสด้วย แก๊สผสม ซึ่งวิธีการเตรียมและอุณหภูมิที่แตกต่างกันกับงานวิจัย ทำให้ผลของค่าการดูดซับไอโอดีนเทียบกับงานวิจัยนี้แตกต่างกันค่อนข้างมาก สำหรับการเตรียมถ่านจากกะลามะพร้าว [13] ซึ่งวิธีการเตรียมมีลักษณะเดียวกับงานวิจัย ที่ความเข้มข้นสารละลายกรดเดียวกัน จะเห็นว่าค่าการดูดซับไอโอดีนไม่แตกต่างกัน

ตาราง 4.4 ค่าไอโอดีนของตัวดูดซับถ่านกะลาต่างๆ

ตัวดูดซับ	ค่าไอโอดีน (mg/g)
ถ่านกะลาปาล์มน้ำมัน	620 - 767
ถ่านกะลาตาลโตนดเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยซิงค์คลอไรด์	1100 - 1200
ถ่านกะลาตาลโตนดเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยแก๊สผสม	1000 - 1300
ถ่านกะลามะพร้าว	223 - 366
ถ่านเปลือกผลยางพารา	364 - 383

สำหรับการเพิ่มพื้นที่ผิวเป็นขั้นตอนการเพิ่มรูพรุนให้กับถ่านดูดซับที่เตรียมได้สำหรับในการทดลอง ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นไปพร้อมๆกับการทำให้เป็นถ่าน สำหรับรูพรุนที่เพิ่มขึ้น อาจเป็นผลเนื่องมาจากการสลายตัวของเซลลูโลสในเนื้อของเปลือกผลยางพาราหลุดออกเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว การหลุดออกของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวนี้อีกเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวการดูดซับด้วย เนื่องจากการว่างของพันธะที่เคยจับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวดังกล่าวไว้ นอกจากนี้หากพิจารณาโมเลกุลเซลลูโลสและโมเลกุลของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เกิดจากการสลายตัวแล้ว ซึ่งจะเป็นการแสดงให้เห็นว่ากรดที่มีในระบบจะเป็นตัวที่ช่วยในการทำปฏิกิริยา โดยเป็นตัวที่คอยรับและจ่ายโปรตอนให้ระบบ ทำให้เกิดโมเลกุลของน้ำหลุดออกมา

พิจารณาเปรียบเทียบพื้นที่ผิว BET กับถ่านอุตสาหกรรม ดังตารางที่ 4.5

ตาราง 4.5 พื้นที่ผิว BET ของตัวดูดซับอุตสาหกรรมต่างๆ

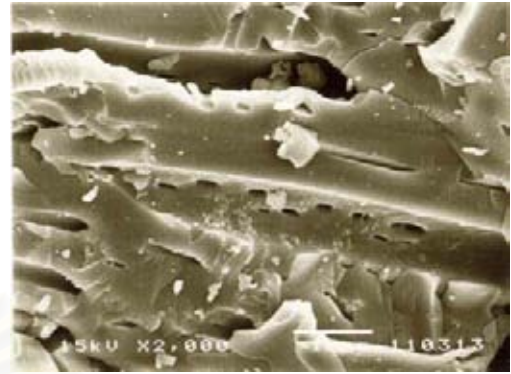
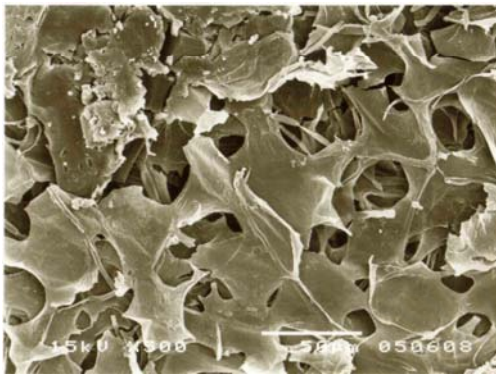
ตัวดูดซับ	พื้นที่ผิว BET (m^2/g)
YAO 4/8	1254
YAO 12/30	1229
PHO	1100
ถ่านเปลือกผลยางพารา	7.34

เนื่องจากพื้นที่ผิว BET ของถ่านเปลือกผลยางพารามีค่าน้อย ทำให้พื้นที่ที่สามารถดูดซับไอโอดีนได้มีอยู่จำกัด แม้ว่าจะเปลี่ยนเวลาในการต้มเปลือกผลยางพารา แต่ค่าพื้นที่ผิว BET มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงไม่ส่งผลให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเปลี่ยนแปลงไปมากนัก และแม้ว่าค่าพื้นที่ผิวของถ่านอุตสาหกรรมจะแตกต่างจากถ่านที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยมาก แต่จะให้ผลการดูดซับแตกต่างกันอย่างไร ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้ และปัจจัยต่างๆ เช่น สภาวะที่ใช้สำหรับการดูดซับ เป็นต้น



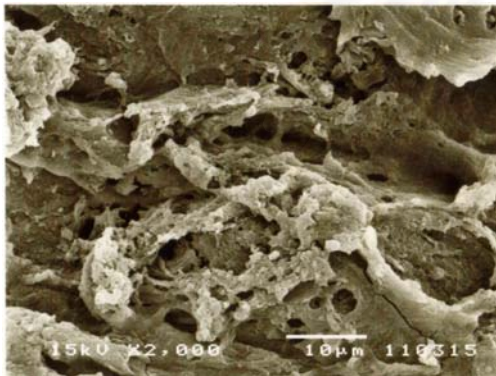
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ่านในงานวิจัยและถ่านอุตสาหกรรม

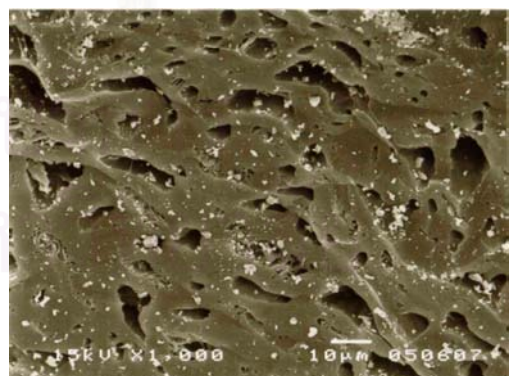
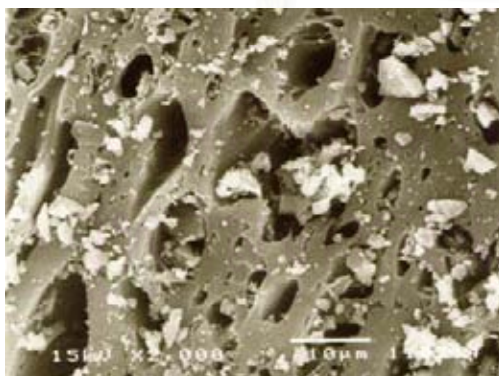


ถ่านเปลือกผลยางพาราก่อนต้มในกรดซัลฟิวริก

CA015



CA020



ถ่านอุตสาหกรรม YAO 4/8

ถ่านอุตสาหกรรม PHO

รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของถ่านดูดซับที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยและถ่านอุตสาหกรรม

4.2 การดูดซับ

ณ สภาวะที่ศึกษา ปริมาณการดูดซับแก๊สแต่ละชนิด สามารถคำนวณจากการคูณมวลสารของแก๊สที่เติมเข้าระบบกับปริมาณแก๊สที่เหลือในระบบโดยมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับแก๊สอุดมคติ โดยพิจารณาจากค่า compressibility factor ในภาคผนวก ก ดังตารางที่ ก.1 ซึ่งมีค่าประมาณ 1 สำหรับแก๊สฮีเลียมที่ฉีดเข้าระบบ ให้ความปริมาตรของชุดทดลอง เนื่องจากแก๊สฮีเลียมไม่ถูกดูดซับในตัวดูดซับชนิดนี้ ข้อมูลการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจนมีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรง ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้แบบจำลองของเฮนรีและแลงเมียร์ได้

พิจารณาแบบจำลองของเฮนรี ซึ่งใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณการดูดซับและความดันย่อยของตัวถูกดูดซับ โดยค่าคงที่ของเฮนรี คำนวณได้จากความชันของกราฟของข้อมูลการทดลองดังสมการที่ 4.1 และค่าคงที่ของเฮนรีสำหรับการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจน แสดงดังตารางที่ 4.6

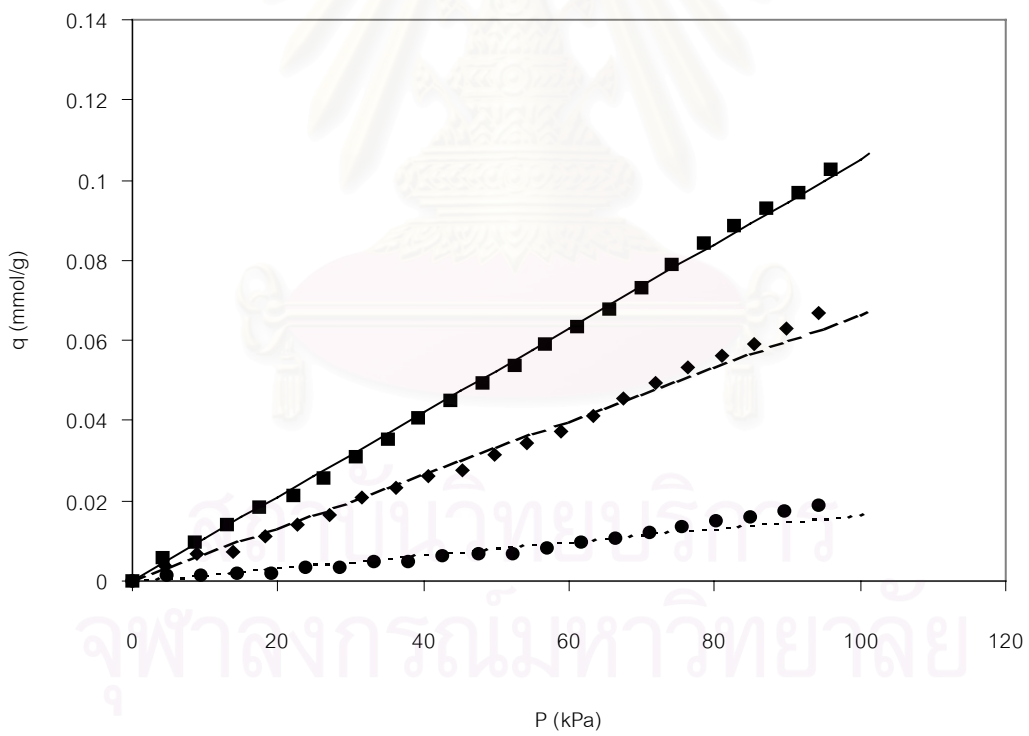
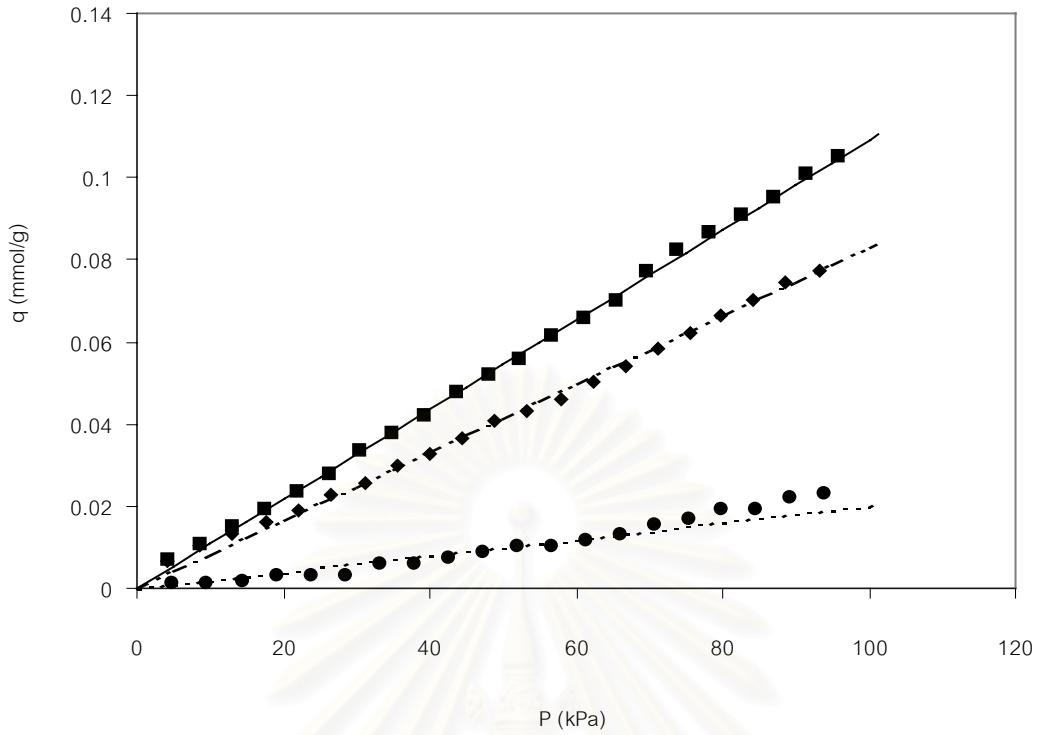
$$q = K_H P \quad (4.1)$$

จะเห็นว่าแบบจำลองของเฮนรีสามารถอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจนได้ใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.4

พิจารณาแบบจำลองของแลงเมียร์ ซึ่งใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างส่วนกลับของปริมาณการดูดซับและความดันย่อยของตัวถูกดูดซับ โดยปริมาณการดูดซับสูงสุด และค่าคงที่ของแลงเมียร์ สามารถคำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q$ กับ $1/P$ ซึ่งปริมาณการดูดซับสูงสุดคำนวณได้จากจุดตัดแกนตั้งและค่าคงที่ของแลงเมียร์คำนวณได้จากความชันของกราฟตามลำดับ ดังสมการที่ 4.2 ค่าคงที่ของแลงเมียร์และปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของตัวดูดซับสำหรับการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจน แสดงดังตารางที่ 4.7

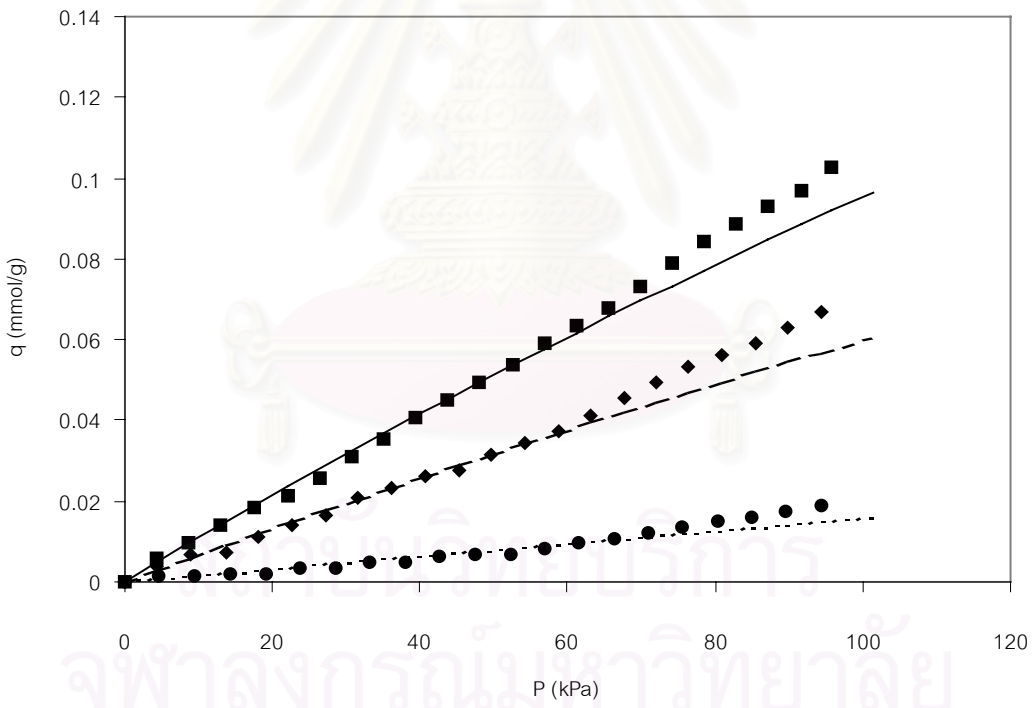
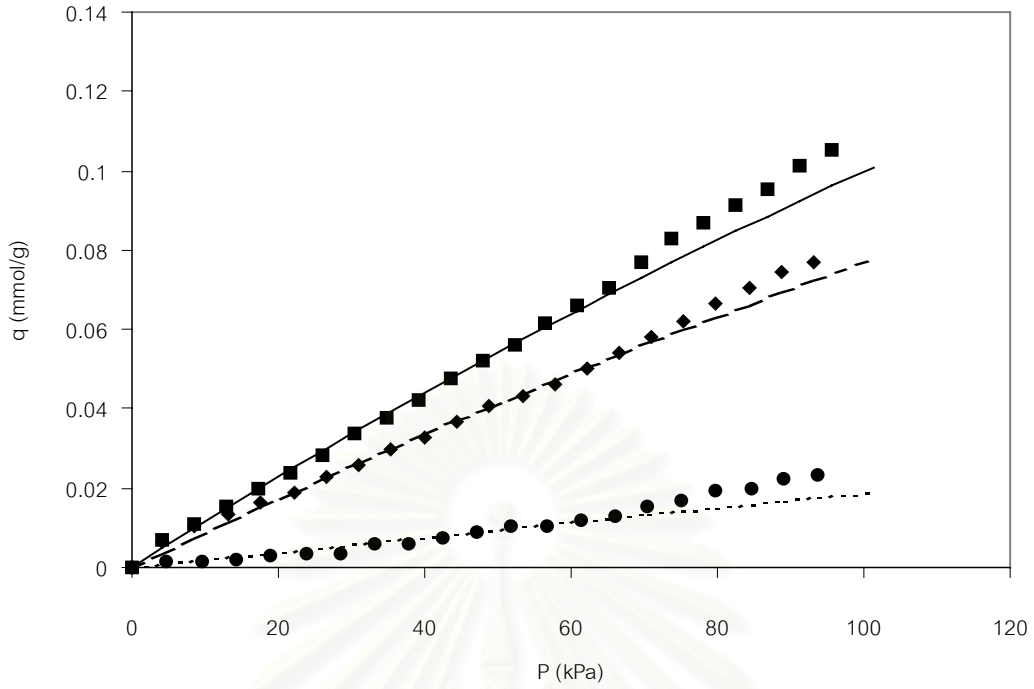
$$\frac{1}{q} = \frac{1}{K_L q_s} \frac{1}{P} + \frac{1}{q_s} \quad (4.2)$$

จะเห็นว่าแบบจำลองของแลงเมียร์ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจนของข้อมูลการทดลองได้ เนื่องจากเกิดความเบี่ยงเบนกับข้อมูลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 สมดุลการดูดซับด้วยถ่านดูดซับ CA015 ที่อุณหภูมิการดูดซับ 304 K,●; 273 K,◆; 260 K,■; 304 K (Hen.),——; 273 K (Hen.), - - -; 260 K (Hen.),- - - -

(บน) แก๊สออกซิเจน (ล่าง) แก๊สไนโตรเจน



รูปที่ 4.5 สมดุลการดูดซับด้วยถ่านดูดซับ CA015 ที่อุณหภูมิการดูดซับ 304 K, ● ; 273 K, ◆ ; 260 K, ■ ; 304 K (Lang.), — ; 273 K (Lang.), - - - ; 260 K (Lang.), - . - . -

(บน) แก๊สออกซิเจน (ล่าง) แก๊สไนโตรเจน

ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่ในแบบจำลองของเฮนรี่ ($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{atm}^{-1}$)

ตัวดูดซับ	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	แก๊สออกซิเจน		แก๊สไนโตรเจน	
		K_H	K_H	K_H	K_H
CA015	31	0.00020	0.00017		
	0	0.00083	0.00067		
	-13	0.00109	0.00105		
CA015 (บด)	31	0.00026	0.00018		
	0	0.00080	0.00065		
	-13	0.00096	0.00100		
ถ่านอุตสาหกรรมกะลามะพร้าว (PHO)	31	0.00110	0.00090		
	0	0.00270	0.00280		
	-13	0.00360	0.00350		

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ในแบบจำลองของแลงเมียร์ (atm^{-1}) และปริมาณการดูดซับสูงสุด (mmol/g)

ตัวดูดซับ	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	แก๊สออกซิเจน		แก๊สไนโตรเจน	
		K_L	q_s	K_L	q_s
CA015	31	0.00039	0.50	0.00034	0.48
	0	0.00161	0.55	0.00135	0.54
	-13	0.00185	0.64	0.00158	0.70
CA015 (บด)	31	0.00045	0.58	0.00033	0.50
	0	0.00120	0.67	0.00100	0.65
	-13	0.00130	0.78	0.00150	0.72
ถ่านอุตสาหกรรมกะลามะพร้าว (PHO)	31	0.00180	0.70	0.00115	0.90
	0	0.00240	1.32	0.00260	1.27
	-13	0.00260	1.59	0.00280	1.47

1. ผลของขนาดถ่านดูดซับและอุณหภูมิกับค่าคงที่ของเฮนรี

สำหรับการดูดซับแก๊สออกซิเจนบนถ่านดูดซับ จากตารางที่ 4.6 พบว่าค่าคงที่ของเฮนรีของถ่านดูดซับทั้งสองขนาดคือแบบทั้งชิ้นและแบบบดละเอียด ภายใต้สภาวะในการดูดซับที่อุณหภูมิ $31\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากถ่านทั้งสองขนาดผ่านขั้นตอนการทำถ่านในสภาวะเดียวกัน ต่างกันที่ตัวอย่างหนึ่งนำมาบดภายหลังการต้มในกรดซัลฟิวริก ดังนั้นสมบัติของตัวดูดซับจึงไม่ต่างกัน ค่าคงที่สมดุลการดูดซับจึงไม่ค่อยแตกต่างกัน สำหรับการดูดซับแก๊สไนโตรเจนก็ให้ผลในลักษณะเดียวกันกับแก๊สออกซิเจน

2. เปรียบเทียบค่าคงที่ของเฮนรีกับถ่านอุตสาหกรรม

สำหรับการดูดซับแก๊สออกซิเจน ด้วยถ่านที่ผลิตขึ้นในงานวิจัย และถ่านดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรม (ดูตารางที่ 4.6) ที่สภาวะเดียวกัน สมดุลการดูดซับของถ่านอุตสาหกรรมโดยใช้แบบจำลองของเฮนรีก็สามารถอธิบายพฤติกรรมการดูดซับแก๊สออกซิเจนได้ใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลองเช่นเดียวกับถ่านที่ผลิตขึ้นในงานวิจัย ดังแสดงในรูป ข.2 ซึ่งค่าคงที่ของเฮนรีของถ่านอุตสาหกรรมมีค่ามากกว่าถ่านที่ผลิตขึ้น ดังนั้นปริมาณการดูดซับของถ่านอุตสาหกรรมจึงมากกว่าถ่านที่ผลิตขึ้น เนื่องจากถ่านอุตสาหกรรมมีค่าพื้นที่ผิว BET มากกว่าในงานวิจัยประมาณ 160 เท่า จึงส่งผลให้ปริมาณการดูดซับของถ่านอุตสาหกรรมมากกว่าถ่านในงานวิจัย สำหรับการดูดซับแก๊สไนโตรเจนก็ให้ผลในลักษณะเดียวกันกับแก๊สออกซิเจน

จะเห็นว่าสมดุลการดูดซับของเฮนรีของแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจนให้ผลในลักษณะเดียวกัน ทั้งนี้สามารถอธิบายถึงลักษณะความเป็นขั้วของแก๊สทั้งสองชนิด เนื่องจาก การเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้า โมเลกุลของออกซิเจนและโมเลกุลของไนโตรเจนจึงเกิดการบิดเบี้ยวไปจากเดิมทำให้เกิดลักษณะความเป็นขั้วขึ้น ซึ่งค่าความเป็นขั้ว (Polarizability) ของแก๊สทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงส่งผลให้สมดุลการดูดซับของแก๊สทั้งสองไม่แตกต่างกัน

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ภายใต้สภาวะที่ศึกษา ที่ระยะเวลาต้มเปลือกผลยางพารา 1-2 ชม. ไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของค่าไอโอดีนและพื้นที่ผิว BET
2. สมดุลการดูดซับของแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจนของถ่านที่ผลิตขึ้นในงานวิจัย มีค่าใกล้เคียงกัน และสมดุลการดูดซับแก๊สของถ่านดูดซับแบบขึ้นกับถ่านดูดซับแบบบดไม่แตกต่างกัน
3. แบบจำลองของเฮนรีสามารถทำนายพฤติกรรมการดูดซับได้ใกล้เคียงผลการทดลองมากกว่าแบบจำลองของแลงเมียร์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาสมดุลการดูดซับของแก๊สอื่นๆ โดยเป็นแก๊สที่ถูกปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น แก๊สคลอรีน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์
2. ควรศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดต่อค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิว BET ซึ่งเมื่อต้องการใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดลดลง ควรเพิ่มอุปกรณ์สำหรับการทำรีฟลักซ์ในขั้นตอนการต้มถ่าน
3. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิธีการแยกแก๊สผสม

รายการอ้างอิง

1. รัตน์ เพชรจันทร์, ยางพารา (2527), หน้า 43.
2. กรมศุลกากร, Import classified by commodity and country of origin, Commodity 3802.100-004/ KGM Activated Carbon, (2534-2544).
3. Douglas M.Ruthven, Encyclopedia of Separation Technology 1, (1997) : 72-77.
4. Ralph T. Yang, Gas Separation by Adsorption Process, (1987).
5. บุญชัย ตระกูลมหชัย, "การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตนดในฟลูอิดไคซ์เบด" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (2537).
6. พงศธร ใควคชาภรณ์, "ถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพด" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (2542).
7. วิบุรณม์ ไสภณากิจโกศล, ภาวิณี วุฒิกุล, "ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและเปลือกข้าว", (2539).
8. G.L.McConnachie, A.M.Warhurst, S.J.Pollard, Uk and V.Chipofya, "Activated carbon from Moringa husks and pods", (1996).
9. วราวุฒิ ประชาศิริกุล, "การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมัน โดยการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (1998).
10. ธีระชัย สุรวัฒนสกุล, "การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมัน โดยไฟโรไลซิสและการกระตุ้นด้วยไอน้ำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (2541).
11. รังสรรค์ ละวรรณ, "การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยรีดักชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับบนถ่านชาร์จากกะลาปาล์มน้ำมันด้วยพลังงานไมโครเวฟ" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (2542).
12. กฤตยา เสือสีนาค, "การดูดซับแก๊สโพเพนด้วยตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากกะลามะพร้าว โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (2542).
13. วิศรุต โฉจนานนท์, "ผลของการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านจากเปลือกถั่วลิสงด้วยกรดฟอสฟอริกต่อการดูดซับไอเบนซีนเจือจาง" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (1999).
14. สุทธิพันธ์ คักดีสวัสดิ์, "การเตรียมถ่านดูดซับจากกะลามะพร้าวโดยใช้กรดซัลฟิวริก" โครงการวิจัยสำหรับนิสิตระดับปริญญาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (2543).

15. D.M.Ruthven, N.S.Raghavan and M.M.Hassan, "Adsorption and diffusion of nitrogen and oxygen in a carbon molecular sieve", Chemical Engineering Science 41, (1986).
16. Sherman, J.T, "Mixed Ion-Exchanged Zeolites and Process for the Use Thereof In Gas Separation" U.S.Patent No.5,174,979, (1992).
17. Douglas M.Ruthven, "Sorption of Oxygen Nitrogen Carbonmonoxide Methane and These Gases in 5A Zeolite" AIChE 22, No.6, (1996).
18. Nick D.Huston, "Mixed Cation Zeolites: LiAgX as a Superior Adsorbent for air separation" AIChE 45, No.4, (1999).
19. เกียรติศักดิ์ กิตติพิมาน, "การดูดซับออกซิเจนและไนโตรเจนด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกะลามะพร้าวโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (2542).
20. Nick D.Hutson, Salil U.Rege and Ralph T.Yang, "Air separation by pressure swing adsorption using superior adsorbent", (2001).
21. อัญชลี จันทไช้, "ผลของเงินในหินภูเขาไฟผสมซิงค์ต่อการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนและออกซิเจน" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (2544).
22. Diego P.Valenzuela, Alan L.Myers, Adsorption Equilibrium Data Handbook, (1989): 151-152.
23. J.D.Seader, Ernest J.Henley, Separation Process Principles, (1998).
24. Robert H.Perry, Perry's Chemical Engineering Handbook, 7th edition, (1997).



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

ก. 1 การหาค่าไอโอดีน

ก.1.1 วัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งที่มีความแม่นยำ 4 ตำแหน่ง
2. บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร
3. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร
4. จุกปิดขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร
5. ตู้อบ
6. ปีกเกอร์
7. กรวยกรอง
8. บีเปต
9. กระดาษกรอง Whatman No.1
10. เครื่องกวนสารด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า
11. หลอดหยด
12. เดซิเคเตอร์

สารเคมี

1. น้ำกลั่น
2. สารละลายไอโอดีน
3. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก
4. สารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต
5. โปตัสเซียมไอโอไดด์
6. โปตัสเซียมไอโอเดต
7. โซเดียมคาร์บอเนต
8. แป้งมัน

ก.1.2 การเตรียมสารเคมีสำหรับการทดลอง

1. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก
เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ปริมาณ 70 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น 550 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน เทเก็บใส่ขวด
2. สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) เข้มข้น 0.100 ± 0.001 นอร์แมล
ชั่ง $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ มา 24.820 กรัม เติมน้ำกลั่นที่เพิ่งต้มเดือดใหม่ๆ ปริมาตร 75 ± 25 มิลลิลิตร แล้วคนให้ละลาย จากนั้นเติมโซเดียมคาร์บอเนต 0.1 ± 0.01 กรัม เพื่อป้องกันการสลายตัวของโซเดียมไธโอซัลเฟตเนื่องจากแบคทีเรีย จากนั้นเจือจางให้มีปริมาตร 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตร เทเก็บในขวดสีชาและตั้งทิ้งไว้ 4 วันก่อนนำมาใช้งาน
3. สารละลายไอโอดีน เข้มข้น 0.100 ± 0.001 นอร์แมล
ชั่งไอโอดีน 12.700 กรัม และโปตัสเซียมไอโอไดด์ 19.100 กรัม ผสมให้เข้ากัน แล้วเติมน้ำกลั่น 2-5 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ให้ละลาย จากนั้นค่อยๆ เติมน้ำกลั่นครั้งละ 5 มิลลิลิตร แล้วคนให้ละลายจนหมด แล้วเจือจางให้ได้ 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตร เทเก็บในขวดสีชา
4. สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต 0.100 นอร์แมล
อบโปตัสเซียมไอโอเดตประมาณ 4 กรัม ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องในเดซิเคเตอร์ นำสารที่อบแห้งแล้ว 3.5667 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นเจือจางให้ได้ 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตรผสมให้เข้ากันแล้วเทใส่ขวดเก็บสารที่มีฝาปิด
5. น้ำแป้ง
ผสม 1 ± 0.5 กรัมของแป้ง ในน้ำเย็น 5-10 มิลลิลิตร เทลงในน้ำกลั่นที่ต้มเดือดใหม่ๆ จนได้ปริมาตร 1 ลิตร พร้อมกับคนตลอดเวลา ทิ้งให้เย็นแล้วเทเก็บในขวดเก็บสาร ควรเตรียมใหม่ทุกครั้งในวันที่ทำการทดลอง

การหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย

1. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต
ปิเปตสารละลายโปตัสเซียมไอโอเดต ในข้อ 4. ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ 250 มิลลิลิตร เติมโปตัสเซียมไอโอไดด์ 2.00 ± 0.01 กรัม ลงไปเขย่าให้ละลาย ปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นในสารละลายข้างต้น นำมาไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตในข้อ 2 จนได้สารละลายสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแป้งลงไป 2-3 หยด เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์ แล้วไทเทรตต่อไปจนได้สารละลายไม่มีสี จากนั้นคำนวณหาความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตจาก

$$N_1 = \frac{P_1 \times R}{S}$$

2. ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

ปิเปตสารละลายไอโอดีน 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน จนได้สารละลายสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแบ่งลงไป 2-3 หยดเพื่อเป็นอินดิเคเตอร์ แล้วไทเทรตต่อไปจนได้สารละลายไม่มีสี จากนั้นคำนวณหาความเข้มข้นจากสูตร

$$N_2 = \frac{(S \times N_1)}{I}$$

ความเข้มข้นของไอโอดีนต้องมีค่าในช่วง 0.100 ± 0.001 นอร์แมล ถ้าความเข้มข้นไม่อยู่ในช่วงดังกล่าวต้องเตรียมสารละลายไอโอดีนใหม่

การไทเทรตแต่ละช่วง ต้องทำ 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย โดยความแตกต่างในแต่ละครั้งต้องไม่เกิน 0.003 นอร์แมล

วิธีการทดสอบการดูดซับไอโอดีน

1. บดตัวดูดซับที่ต้องการนำมาวิเคราะห์ให้มีขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน (325 เมช)
2. อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์
3. ชั่งตัวดูดซับที่บดแล้ว 1.000-1.600 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปิเปตสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก 10 มิลลิลิตร ใส่ลงไปจนกระทั่งตัวดูดซับเปียกทั่วหมด
4. นำขวดรูปชมพู่ไปวางบนแผ่นให้ความร้อน ต้มจนเดือดประมาณ 30 วินาที เพื่อไล่สารประกอบซัลเฟตซึ่งเป็นสารมลทิน แล้วยกกลงตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง
5. ปิเปตสารละลายไอโอดีน 0.100 นอร์แมล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปิดจุกยาง และเขย่าแรงๆ เป็นเวลา 30 วินาที
6. กรองโดยอาศัยเครื่องบีบสุญญากาศ ด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1
7. ทิ้งส่วนที่กรองได้ 20-30 มิลลิลิตร แยกไป จากนั้นกรองต่อไปจนหมด
8. ปิเปตสารละลายที่กรองได้ 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.100 นอร์แมล จนได้สารละลายสีเหลืองอ่อน

เติมน้ำแบ่งลงไป 2 มิลลิลิตร เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์ แล้วไทเทรตต่อไปจนได้สารละลายไม่มีสี
บันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ทั้งหมด

9. นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณค่าการดูดซับไอโอดีน จากสูตร

$$I_2 No. = \left(\frac{X}{M} \right) \times D$$

โดย X/M = $(A - (2.2B \times S)) / M$

A = $N_2 \times 12693.0$

B = $N_1 \times 126.93$

เมื่อ X/M = ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต (นอร์แมล)

N_2 = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เตรียม (นอร์แมล)

S = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร)

F = ปริมาตรของสารละลายไอโอดีนที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร)

M = น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ (กรัม)

ก.2 วิธีการคำนวณหาปริมาณการดูดซับ

ภายใต้สภาวะของการศึกษาวิจัยที่ได้กำหนดไว้ข้างต้น ทั้งแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจนมีพฤติกรรมเป็นแก๊สอุดมคติ ซึ่งพิจารณาจากค่า compressibility factor (Z) ดังตารางที่ ก.1

ตาราง ก. 1 แสดงค่า compressibility factor (Z) ที่สภาวะต่างๆ ในการทดลอง

ความดัน (kPa)	อุณหภูมิ (K)	O ₂	N ₂
0	260	$Z \cong 1$	$Z \cong 1$
	273	$Z \cong 1$	$Z \cong 1$
	304	$Z \cong 1$	$Z \cong 1$
101.32	260	$Z \cong 1$	$Z \cong 1$
	273	$Z \cong 1$	$Z \cong 1$
	304	$Z \cong 1$	$Z \cong 1$

นำค่าความดันและอุณหภูมิแต่ละครั้งที่เข้าสู่สมดุล มาคำนวณหาปริมาณโมลของแก๊สที่สมดุลอยู่ในเครื่องดูดซับ ซึ่งก็คือปริมาณโมลของแก๊สที่ไม่ถูกดูดซับ โดยใช้สมมติฐานแก๊สอุดมคติ (Ideal gas) และนำปริมาณโมลของแก๊สที่ฉีดเข้าไปในเครื่องดูดซับมาหักลบกับปริมาณโมลของแก๊สที่ไม่ถูกดูดซับ จะได้ปริมาณโมลที่ถูกดูดซับ นำค่าแต่ละครั้งมารวมกัน จะได้ปริมาณโมลที่ถูกดูดซับทั้งหมดในการทดลองแต่ละครั้ง จากแก๊สอุดมคติ

$$PV = RT$$

หรือ

$$PV = nRT$$

ตัวอย่าง

ความดันที่อ่านได้แต่ละครั้ง P_1, P_2

อุณหภูมิที่อ่านได้แต่ละครั้ง T_1, T_2

ดังนั้น ปริมาณโมลของแก๊สที่ไม่ถูกดูดซับที่จุดความดันเข้าสู่สมดุล $(n_2 - n_1)$

เท่ากับ
$$(n_2 - n_1) = \left[\frac{P_2}{T_2} - \frac{P_1}{T_1} \right] \frac{V}{R}$$

โดยที่ V คือ ปริมาตรของชุดทดลองที่หักลบปริมาตรตัวดูดซับภายในเครื่องมือออก

และ จำนวนโมลของแก๊สที่ป้อนเข้าระบบแต่ละครั้ง (n_s) เท่ากับ $P_s V_s / RT$

โดยที่ P_s คือ ความดันภายในกระบอกฉีดยา

V_s คือ ปริมาตรในการฉีดแต่ละครั้ง

ดังนั้น จำนวนโมลของแก๊สที่ถูกดูดซับแต่ละครั้งเท่ากับ $n_s - (n_2 - n_1)$

ก.3 การตรวจสอบเครื่องมือวัดสมดุลการดูดซับ

วิธีที่ 1

1. ประกอบเครื่องมือดูดซับแก๊สโดยไม่ต้องใส่ตัวดูดซับ
2. ใช้เครื่องปั๊มสุญญากาศดูดอากาศภายในเครื่องมือดูดซับแก๊สออก เพื่อให้อยู่ในสภาวะความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ
3. ปิดวาล์วหยุดการดูดอากาศ แล้วปิดปั๊มสุญญากาศ จดค่าความดันที่อ่านได้จากเครื่องตรวจวัดความดัน
4. ทิ้งไว้อย่างน้อย 1 วันเพื่อดูความเปลี่ยนแปลงค่าความดัน
5. ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงแสดงว่าไม่มีการรั่วซึม

วิธีที่ 2

1. เตรียมน้ำสบู่และปั๊มที่สามารถเพิ่มความดันได้
2. ต่อเครื่องปั๊มเพื่อเพิ่มความดัน
3. นำน้ำสบู่ชะโลมบริเวณข้อต่อและจุดเชื่อมต่อของเครื่องมือดูดซับแก๊ส
4. ถ้ามีฟองเกิดขึ้น แสดงว่ามีการรั่วซึมเกิดขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ปริมาณแก๊สที่เข้าระบบ ความดัน และอุณหภูมิด้วยถ่านดูดซับแบบทั้งชิ้นเปลี่ยนผลยางพารา

ไนโตรเจน			ออกซิเจน		
ปริมาณแก๊สที่ฉีดเข้าระบบ (ml)	P (KPa)	T (°C)	ปริมาณแก๊สที่ฉีดเข้าระบบ (ml)	P (KPa)	T (°C)
0	0	31	0	0	31
10	4.6662	31	10	4.6662	31
10	9.4658	31	10	9.4658	31
10	14.2655	31	10	14.2655	31
10	19.0650	31	10	18.9317	31
10	23.7313	31	10	23.7313	31
10	28.5309	31	10	28.5309	31
10	33.1972	31	10	33.0639	31
10	37.9968	31	10	37.8634	31
10	42.6630	31	10	42.5297	31
10	47.4626	31	10	47.1960	31
10	52.2622	31	10	51.8623	31
10	56.9285	31	10	56.6619	31
10	61.5948	31	10	61.3281	31
10	66.2610	31	10	65.9944	31
10	70.9273	31	10	70.5273	31
10	75.5936	31	10	75.1936	31
10	80.2598	31	10	79.7266	31
10	84.9261	31	10	84.5261	31
10	89.5924	31	10	89.0591	31
10	94.2587	31	10	93.7254	31

ไนโตรเจน			ออกซิเจน		
ปริมาณแก๊สที่ฉีดเข้าระบบ (ml)	P (KPa)	T (°C)	ปริมาณแก๊สที่ฉีดเข้าระบบ (ml)	P (KPa)	T (°C)
0	0	0	0	0	0
10	4.3996	0	10	4.1329	0
10	8.9325	0	10	8.5326	0
10	13.7322	0	10	13.0656	0
10	18.1318	0	10	17.5985	0
10	22.6647	0	10	22.1315	0
10	27.1977	0	10	26.5311	0
10	31.5973	0	10	31.064	0
10	36.1303	0	10	35.4637	0
10	40.6632	0	10	39.9966	0
10	45.3295	0	10	44.3962	0
10	49.7291	0	10	48.7959	0
10	54.2621	0	10	53.3288	0
10	58.7950	0	10	57.8617	0
10	63.1946	0	10	62.2614	0
10	67.5943	0	10	66.6610	0
10	71.9939	0	10	71.0606	0
10	76.3935	0	10	75.4603	0
10	80.9265	0	10	79.8599	0
10	85.4594	0	10	84.2595	0
10	89.8590	0	10	88.6591	0
10	94.2587	0	10	93.1921	0

ไนโตรเจน			ออกซิเจน		
ปริมาณแก๊สที่ฉีดเข้าระบบ (ml)	P (KPa)	T (°C)	ปริมาณแก๊สที่ฉีดเข้าระบบ (ml)	P (KPa)	T (°C)
0	0	-13	0	0	-13
10	4.2663	-13	10	4.1329	-13
10	8.6659	-13	10	8.5326	-13
10	13.0656	-13	10	12.9322	-13
10	17.4652	-13	10	17.3319	-13
10	21.9981	-13	10	21.7315	-13
10	26.3978	-13	10	26.1311	-13
10	30.6641	-13	10	30.3974	-13
10	35.0637	-13	10	34.7970	-13
10	39.3300	-13	10	39.1967	-13
10	43.7296	-13	10	43.4630	-13
10	48.1292	-13	10	47.8626	-13
10	52.5289	-13	10	52.2622	-13
10	56.7952	-13	10	56.5285	-13
10	61.1948	-13	10	60.9282	-13
10	65.5944	-13	10	65.3278	-13
10	69.8607	-13	10	69.4608	-13
10	74.1270	-13	10	73.7271	-13
10	78.3933	-13	10	78.1267	-13
10	82.7930	-13	10	82.5263	-13
10	87.1926	-13	10	86.9259	-13
10	91.5922	-13	10	91.1922	-13
10	95.8585	-13	10	95.5919	-13

ตารางที่ ข.2 ปริมาณแก๊สที่เข้าระบบ ความดัน และอุณหภูมิด้วยถ่านดูดซับแบบบดละเอียด

ไนโตรเจน			ออกซิเจน		
ปริมาณแก๊สที่ฉีดเข้าระบบ (ml)	P (KPa)	T (°C)	ปริมาณแก๊สที่ฉีดเข้าระบบ (ml)	P (KPa)	T (°C)
0	0	31	0	0	31
10	4.7996	31	10	4.3996	31
10	9.7325	31	10	9.3325	31
10	14.6654	31	10	14.2655	31
10	19.5983	31	10	19.1984	31
10	24.5313	31	10	23.9980	31
10	29.3308	31	10	28.7976	31
10	34.1304	31	10	33.5971	31
10	38.9300	31	10	38.5301	31
10	43.7296	31	10	43.1963	31
10	48.6625	31	10	47.9959	31
10	53.4621	31	10	52.7955	31
10	58.2617	31	10	57.7284	31
10	63.0613	31	10	62.5280	31
10	67.7276	31	10	67.1943	31
10	72.5272	31	10	71.9939	31
10	77.3268	31	10	76.7935	31
10	82.1264	31	10	81.4597	31
10	86.7926	31	10	86.2593	31
10	91.5922	31	10	91.0589	31
10	96.3918	31	10	95.8585	31

ไนโตรเจน			ออกซิเจน		
ปริมาณแก๊สที่ฉีดเข้าระบบ (ml)	P (KPa)	T (°C)	ปริมาณแก๊สที่ฉีดเข้าระบบ (ml)	P (KPa)	T (°C)
0	0	0	0	0	0
10	4.5329	0	10	4.5329	0
10	9.1992	0	10	9.1992	0
10	13.8655	0	10	13.8655	0
10	18.5318	0	10	18.5318	0
10	23.1980	0	10	23.0647	0
10	27.8643	0	10	27.5977	0
10	32.5306	0	10	32.1306	0
10	37.1968	0	10	36.6636	0
10	41.7298	0	10	41.0632	0
10	46.3961	0	10	45.5961	0
10	50.9290	0	10	50.1291	0
10	55.5953	0	10	54.6620	0
10	60.2615	0	10	59.1950	0
10	64.7945	0	10	63.7279	0
10	69.1941	0	10	68.2609	0
10	73.8604	0	10	72.7938	0
10	78.3933	0	10	77.3268	0
10	82.9263	0	10	81.8597	0
10	87.5926	0	10	86.3927	0
10	92.2588	0	10	90.9256	0
10	96.9251	0	10	95.4586	0

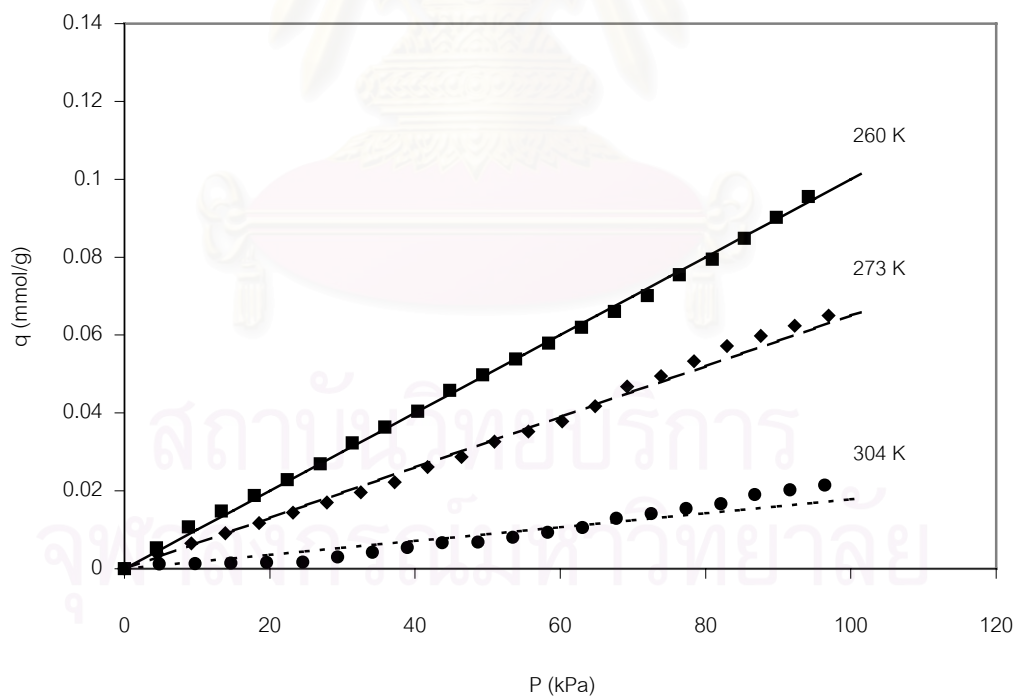
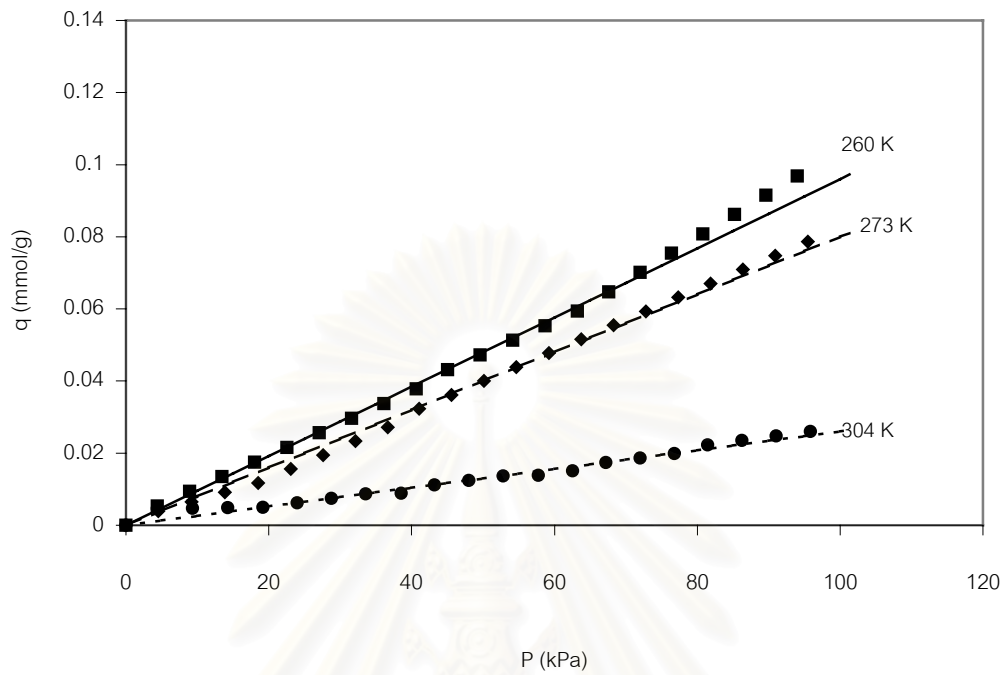
ไนโตรเจน			ออกซิเจน		
ปริมาณแก๊สที่ฉีดเข้าระบบ (ml)	P (KPa)	T (°C)	ปริมาณแก๊สที่ฉีดเข้าระบบ (ml)	P (KPa)	T (°C)
0	0	-13	0	0	-13
10	4.3996	-13	10	4.3996	-13
10	8.7993	-13	10	8.9326	-13
10	13.3322	-13	10	13.4655	-13
10	17.8652	-13	10	17.9985	-13
10	22.3981	-13	10	22.5314	-13
10	26.9310	-13	10	27.0644	-13
10	31.3307	-13	10	31.5973	-13
10	35.8636	-13	10	36.1303	-13
10	40.3966	-13	10	40.6632	-13
10	44.7962	-13	10	45.0628	-13
10	49.3291	-13	10	49.5958	-13
10	53.8621	-13	10	54.1288	-13
10	58.3950	-13	10	58.6617	-13
10	62.9280	-13	10	63.1947	-13
10	67.4609	-13	10	67.5943	-13
10	71.9939	-13	10	71.9939	-13
10	76.3935	-13	10	76.3935	-13
10	80.9265	-13	10	80.7931	-13
10	85.3261	-13	10	85.1928	-13
10	89.7257	-13	10	89.5924	-13
10	94.1253	-13	10	93.9920	-13

ตารางที่ ข.3 ปริมาณแก๊สที่เข้าระบบ ความดัน และอุณหภูมิด้วยถ่านอุตสาหกรรมกะลามะพร้าว (PHO)

ไนโตรเจน			ออกซิเจน		
ปริมาณแก๊สที่ฉีดเข้าระบบ (ml)	P (KPa)	T (°C)	ปริมาณแก๊สที่ฉีดเข้าระบบ (ml)	P (KPa)	T (°C)
0	0	31	0	0	31
10	3.5997	31	10	3.8663	31
10	7.9993	31	10	8.1326	31
10	12.3990	31	10	12.3990	31
10	16.7986	31	10	16.6653	31
10	21.1982	31	10	21.0649	31
10	25.5978	31	10	25.3312	31
10	29.8641	31	10	29.5975	31
10	34.2638	31	10	33.8638	31
10	38.6634	31	10	38.2634	31
10	43.0630	31	10	42.5297	31
10	47.5960	31	10	46.9293	31
10	52.3956	31	10	51.3290	31
10	56.7952	31	10	55.7286	31
10	61.1948	31	10	59.9949	31
10	65.4611	31	10	64.3945	31
10	69.7274	31	10	68.5275	31
10	74.1270	31	10	72.7938	31
10	78.5267	31	10	77.0601	31
10	82.9263	31	10	81.4597	31
10	87.1926	31	10	85.7261	31
10	91.7256	31	10	90.1257	31

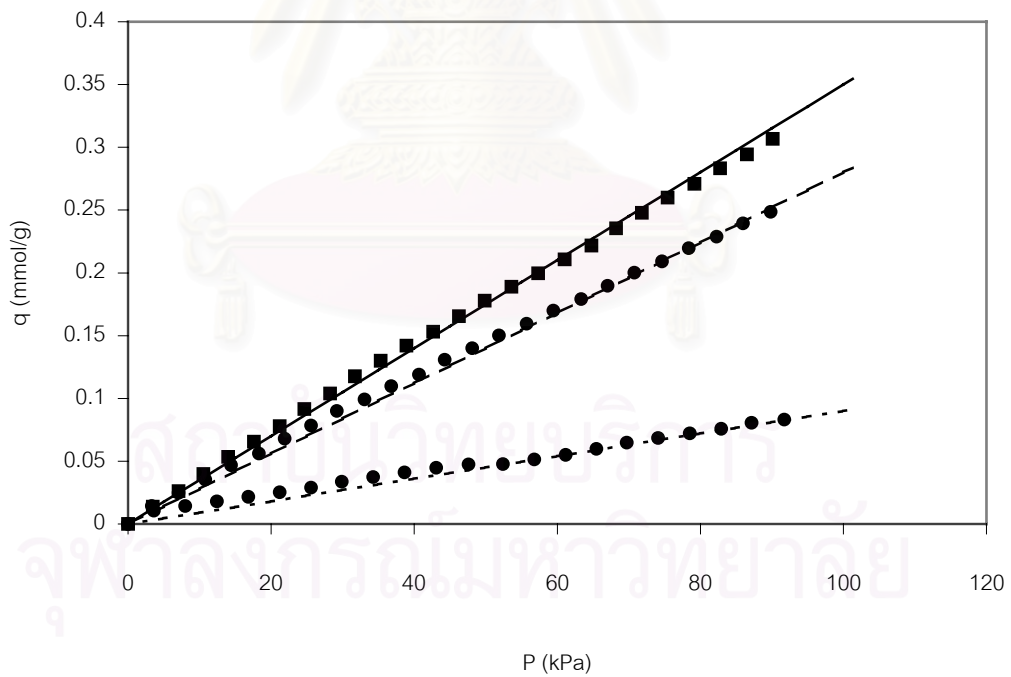
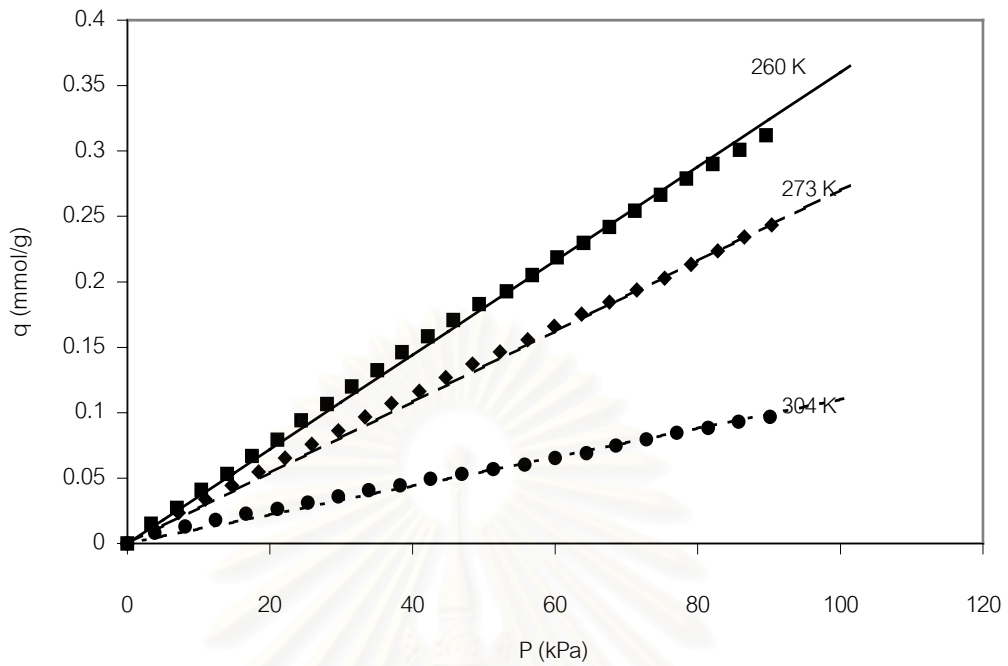
ไนโตรเจน			ออกซิเจน		
ปริมาณแก๊สที่ฉีดเข้าระบบ (ml)	P (KPa)	T (°C)	ปริมาณแก๊สที่ฉีดเข้าระบบ (ml)	P (KPa)	T (°C)
0	0	0	0	0	0
10	3.3331	0	10	3.4664	0
10	7.0661	0	10	7.1994	0
10	10.7991	0	10	10.9324	0
10	14.3988	0	10	14.6654	0
10	18.2651	0	10	18.3984	0
10	21.8648	0	10	22.1315	0
10	25.5978	0	10	25.8645	0
10	29.1975	0	10	29.5975	0
10	33.0639	0	10	33.3305	0
10	36.7969	0	10	37.0635	0
10	40.6632	0	10	40.9299	0
10	44.2629	0	10	44.6629	0
10	48.1292	0	10	48.3959	0
10	51.8623	0	10	52.2622	0
10	55.7286	0	10	56.1286	0
10	59.4616	0	10	59.8616	0
10	63.3280	0	10	63.7279	0
10	67.0610	0	10	67.5943	0
10	70.7940	0	10	71.4606	0
10	74.6603	0	10	75.3269	0
10	78.3933	0	10	79.0560	0
10	82.2597	0	10	82.7930	0
10	85.9927	0	10	86.5260	0
10	89.8590	0	10	90.3923	0

ไนโตรเจน			ออกซิเจน		
ปริมาณแก๊สที่ฉีดเข้าระบบ (ml)	P (KPa)	T (°C)	ปริมาณแก๊สที่ฉีดเข้าระบบ (ml)	P (KPa)	T (°C)
0	0	-13	0	0	-13
10	3.4664	-13	10	3.3331	-13
10	7.0661	-13	10	6.9327	-13
10	10.5324	-13	10	10.3991	-13
10	13.9988	-13	10	13.9988	-13
10	17.5985	-13	10	17.4652	-13
10	21.1982	-13	10	21.0649	-13
10	24.6646	-13	10	24.3979	-13
10	28.2643	-13	10	27.9976	-13
10	31.7306	-13	10	31.4640	-13
10	35.3303	-13	10	35.0637	-13
10	38.9300	-13	10	38.5301	-13
10	42.6630	-13	10	42.1298	-13
10	46.2627	-13	10	45.7295	-13
10	49.8624	-13	10	49.3291	-13
10	53.5954	-13	10	53.1955	-13
10	57.3285	-13	10	56.7952	-13
10	61.0615	-13	10	60.2615	-13
10	64.7945	-13	10	63.9946	-13
10	68.2609	-13	10	67.5943	-13
10	71.8606	-13	10	71.1940	-13
10	75.4603	-13	10	74.7936	-13
10	79.1933	-13	10	78.3933	-13
10	82.7930	-13	10	82.1264	-13
10	86.5260	-13	10	85.8594	-13
10	90.1257	-13	10	89.5924	-13

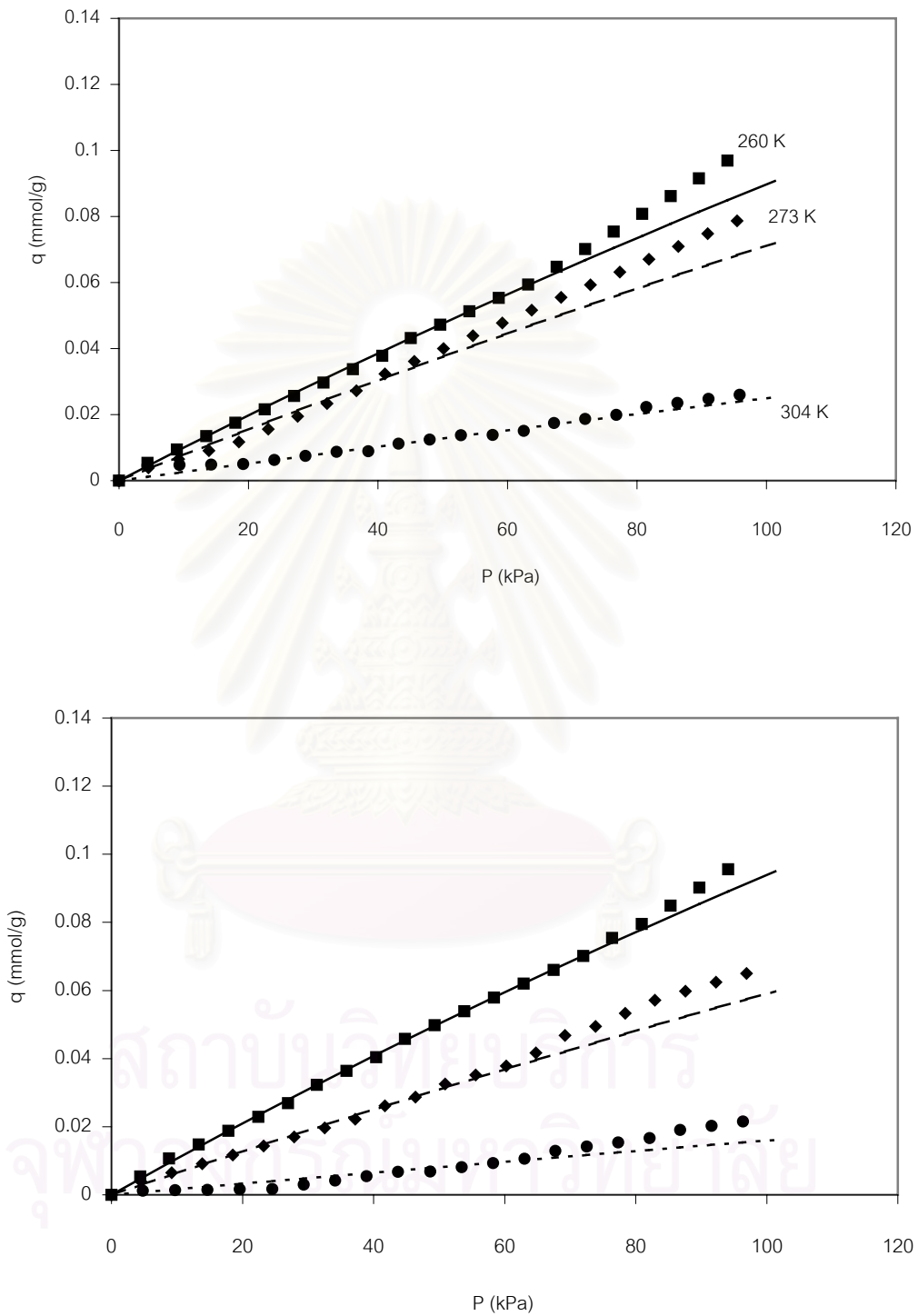


รูป ข.1 สมดุลการดูดซับด้วยถ่านดูดซับ CA015 (บด) ที่อุณหภูมิการดูดซับ 304 K, ●; 273 K, ◆; 260 K, ■; 304 K (Hen.), ———; 273 K (Hen.), - - -; 260 K (Hen.), - . - . -

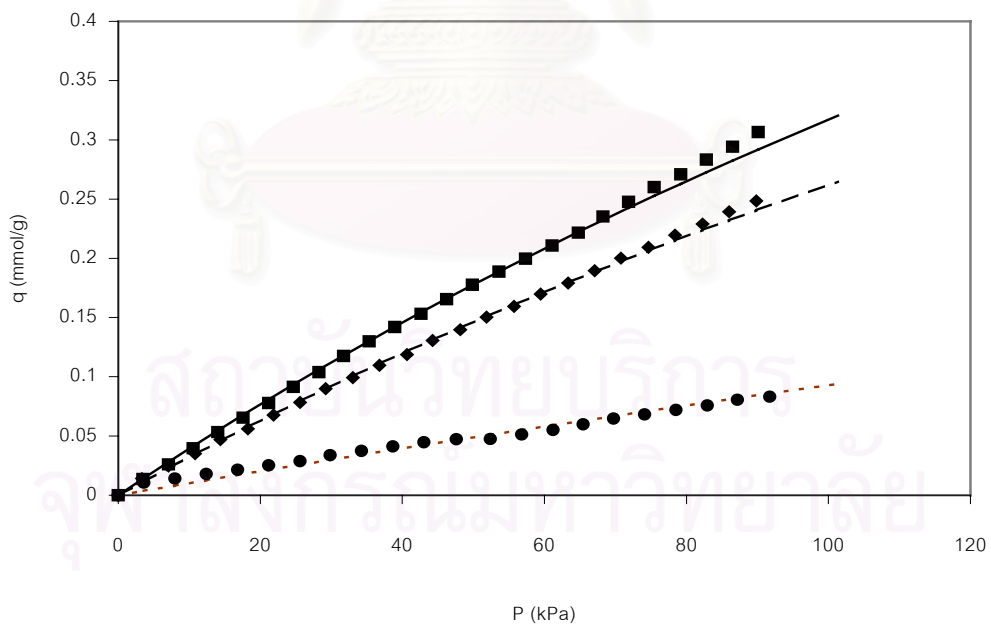
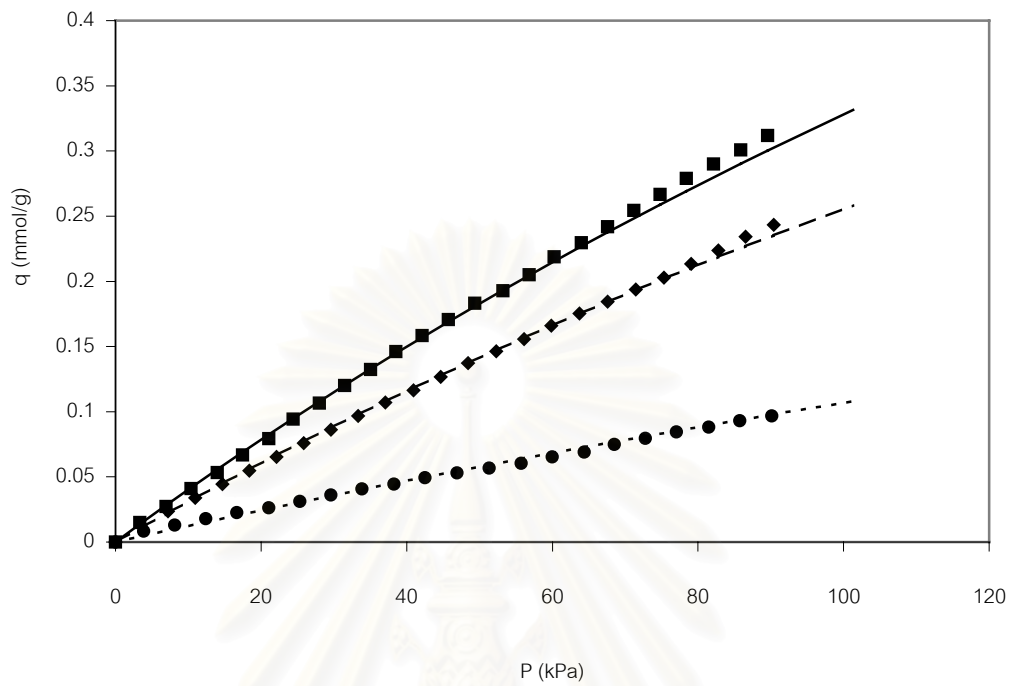
(บน) แก๊สออกซิเจน (ล่าง) แก๊สไนโตรเจน



รูป ข.2 สมดุลการดูดซับด้วยถ่านอุตสาหกรรมมะพร้าว (PHO) ที่อุณหภูมิการดูดซับ 304 K, ● ; 273 K, ◆ ; 260 K, ■ ; 304 K (Hen.), — ; 273 K (Hen.), - - - ; 260 K (Hen.), - - - - (บน) แก๊สออกซิเจน (ล่าง) แก๊สไนโตรเจน



รูป ข.3 สมดุลการดูดซับด้วยถ่านดูดซับ CA015 (บน) ที่อุณหภูมิการดูดซับ 304 K, ● ; 273 K, ◆ ; 260 K, ■ ; 304 K (Lang.), — ; 273 K (Lang.), - - - ; 260 K (Lang.), - - - -
 (บน) แก๊สออกซีเจน (ล่าง) แก๊สไนโตรเจน



รูป ข.4 สมดุลการดูดซับด้วยถ่านอุตสาหกรรมกะลามะพร้าว (PHO) ที่อุณหภูมิการดูดซับ 304 K, ● ; 273 K, ◆ ; 260 K, ■ ; 304 K (Lang.), — ; 273 K (Lang.), - - - ; 260 K (Lang.), - - - - (บน) แก๊สออกซิเจน (ล่าง) แก๊สไนโตรเจน

ประวัติของผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ปฐมาภรณ์ เศวตจินดากร เกิดเมื่อวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2521 ณ จังหวัดยะลา ย้ายภูมิลำเนาเดิมมาอยู่ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เมื่อปี พ.ศ.2522 บิดาชื่อ นายอนุกุล เศวตจินดากร มารดาชื่อ นางหทัยา ตันท์มานะธรรม เป็นบุตรคนที่ 1 ในจำนวนพี่น้อง 2 คน เข้าศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนทุ่งมหาเมฆ ระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนสตรีศรีสุริโยทัย และเข้าศึกษาต่อระดับอุดมศึกษาที่คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย