ผลของการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านจากเปลือกถั่วลิสงด้วยกรดฟอสฟอริกต่อการดูดซับไอเบนซีนเจือจาง

นาย วิศรุต โลจนานนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-880-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF CARBON ADSORBENT PREPARATION FROM GROUNDNUT SHELLS BY PHOSPHORIC ACID ON ADSORPTION OF DILUTE BENZENE VAPOUR

Mr Wisarut Lochananon

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 1999

ISBN 974-334-880-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านจากเปลือกถั่วลิสงด้วยกรดฟอสฟอริกต่อการดูดซับไอเบนซีนเจือจาง
โดย	นาย วิศรุต โลจนานนท์
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว) คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์) ประธานกรรมการ

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

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย สุกาญจนัจที) กรรมการ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรา จงวิศาล) กรรมการ

วิศรุต โลจนานนท์ : ผลของการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านจากเปลือกถั่วลิสงด้วยกรดฟอสฟอริกต่อการดูดซับไอเบนซีนเจือจาง (EFFECTS OF CARBON ADSORBENT PREPARATION FROM GROUNDNUT SHELLS BY PHOSPHORIC ACID ON ADSORPTION OF DILUTE BENZENE VAPOUR) อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช, 89 หน้า, ISBN 974-334-880-8.

ตัวดูดซับชนิดถ่านถูกเตรียมขึ้นโดยการนำเปลือกถั่วลิสงมาผ่านขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวด้วย สารละลายกรดฟอสฟอริก ที่ความเข้มข้น 20%, 30%, 40%, 50% และ 60% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที หรือ ใช้สารละลายกรดฟอสฟอริก 30% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที หรือ เปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการเผา 15, 30, 60, 90 และ 120 นาที จากผลการทดลองพบว่าที่สภาวะ ความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก 60% โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลาในการเผา 120 นาที ได้ตัวดูดซับชนิดถ่านที่มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุด เท่ากับ 986 ตารางเมตรต่อกรัมของตัวดูดซับ

ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของ ไอเบนซีนที่สภาวะเจือจาง บนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียม จะถูกวัดโดยวิธีโครมาโทกราฟี ที่อุณหภูมิ 180–220 องศาเซลเซียส ค่าคงที่สมดุลการดูดซับที่วัดได้จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงขึ้น ส่วนปริมาณความร้อนของการดูดซับไอเบนซีนบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมมีค่าประมาณ 70–90 กิโลจูลต่อโมล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา	.....วิศวกรรมเคมี.....	ลายมือชื่อนิสิต	วิศรุต โลจนานนท์
สาขาวิชา	.....วิศวกรรมเคมี.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	เดชา ฉัตรศิริเวช
ปีการศึกษา	.....2542.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	.....

4070424021: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEYWORD: ADSORPTION / BENZENE / CARBON ADSORBENT
WISARUT LOCHANANON: EFFECTS OF CARBON ADSORBENT PREPARATION FROM GROUNDNUT SHELLS BY PHOSPHORIC ACID ON ADSORPTION OF DILUTE BENZENE VAPOUR. THESIS ADVISOR: ASSISTANT PROFESSOR DEACHA CHATSIRIWECH,Ph.D., 89 pp., ISBN 974-334-880-8.

Carbon adsorbents were produced from groundnut shell reacting with phosphoric acid solution at concentration of 20%, 30%, 40%, 50% and 60% by weight and temperature of 200 °C for 120 minutes. Production was also carried out at phosphoric concentration of 30% by weight with various temperature of 150 °C, 200 °C, 250 °C, 300 °C and 350 °C for 120 minutes, and with various time of 15, 30, 60, 90 and 120 minutes. It was found that the highest specific surface area, 986 m^2/g, could be obtained under condition of 60% concentration, 350 °C, 120 minutes.

The adsorption equilibrium constants of dilute benzene vapour on prepared carbon adsorbents were measured by chromatographic method at temperature 180–220 °C. The adsorption equilibrium constant increased as an increasing in specific surface area. The heats of adsorption of benzene vapour on all adsorbents were about 70–90 kJ/mol.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา	.....วิศวกรรมเคมี.....	ลายมือชื่อนิสิต	.....
สาขาวิชา	.....วิศวกรรมเคมี.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	.....
ปีการศึกษา	.....2542.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช ที่กรุณาให้แนวคิด คำแนะนำ และ ความเอาใจใส่ ตลอดจนแนวทางการแก้ปัญหาต่างๆอันเป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัยนี้ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ และ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย สุกาญจนัจที และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิจิตรา จงวิศาล สำหรับความช่วยเหลือ ตั้งแต่การตรวจสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ตลอดจนข้อเสนอแนะต่างๆในการศึกษาวิจัย

ขอขอบคุณ คุณพิบูลย์ เกิดโภคทรัพย์ เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ ที่ให้ความช่วยเหลือ และ คำแนะนำต่างๆในการใช้อุปกรณ์วิเคราะห์

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบคุณ ครอบครัว และ เพื่อนๆ ที่ช่วยสนับสนุนและให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบาญ

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ง

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบาญ ..... ช

สารบาญรูป ..... ญ

สารบาญตาราง ..... ฏ

สัญลักษณ์และอักษรย่อ ..... ฐ

1 บทนำ 1

2 ตัวดูดซับชนิดถ่าน 7

2.1 ประวัติความเป็นมาของตัวดูดซับชนิดถ่าน 8

2.2 วัตถุดิบสำหรับผลิตตัวดูดซับชนิดถ่าน 8

2.3 การผลิตตัวดูดซับชนิดถ่าน 9

2.3.1 ขั้นตอนการทำให้เป็นถ่าน 9

2.3.2 ขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิว 9

3 ทฤษฎีการดูดซับ 14

3.1 สมดุลการดูดซับ 15

3.1.1 ไอโซเทิร์มเชิงเส้น (Linear Isotherm) 15

3.1.2 ไอโซเทิร์มที่ไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear Isotherm) 16

3.2 การวัดสมดุลการดูดซับ 18

3.3 กลไกการดูดซับ 20

3.3.1 การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม 21
3.3.2 การแพร่ผ่านรูพรุน 21

4 การดำเนินงานวิจัย 23
4.1 การเตรียมตัวดูดซับ 23
4.1.1 อุปกรณ์ 23
4.1.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก 24
4.1.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 24
4.1.4 การศึกษาผลของช่วงเวลาสำหรับการเผา 25
4.2 การตรวจสอบลักษณะสมบัติของตัวดูดซับ 25
4.3 การดูดซับไอเบนซีนเจือจาง 26
4.3.1 การเตรียมอุปกรณ์การดูดซับ 26
4.3.2 การเตรียมไอเบนซีน 27
4.3.3 การวัดค่าคงที่สมดุลการดูดซับ 28

5 ผลการทดลองและ
วิเคราะห์ผลการทดลอง 31
5.1 ลักษณะของตัวดูดซับชนิดถ่าน 31
5.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก 31
5.1.2 ผลของอุณหภูมิ 35
5.1.3 ผลของเวลา 39
5.2 ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ 43
5.2.1 กรณีเปลี่ยนความเข้มข้น 43
5.2.2 กรณีเปลี่ยนอุณหภูมิ 44
5.2.3 กรณีเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการเผา 45
5.3 ค่าความร้อนของการดูดซับ 47

6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 49
6.1 บทสรุป 49
6.2 ข้อเสนอแนะ 50

รายการอ้างอิง 51

ภาคผนวก 54

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก ตัวอย่างการคำนวณ 55
ก. 1 การคำนวณความเข้มข้นของไอเบนซีนที่ใช้ในการดูดซับ 55
ก. 2 การคำนวณความเข้มข้นไอเบนซีนที่ฉีดเข้าไปพร้อมแก๊สตัวพาในการวิเคราะห์ 55
ก. 3 การคำนวณปริมาณการดูดซับไอโอดีนบนตัวดูดซับชนิดถ่าน 56
ก. 4 การคำนวณความพรุนของหอดูดซับ 56
ก. 5 การคำนวณค่าคงที่สมดุลการดูดซับ 57
ก. 6 การคำนวณค่าความร้อนของการดูดซับ 58

ข การทดสอบการดูดซับไอโอดีน
(Iodine Number) 59
ข. 1 เครื่องมือ 59
ข. 2 สารเคมี 60
ข. 3 การเตรียมสารเคมีสำหรับการทดลอง 60
ข. 4 การหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย 61
ข. 5 วิธีการทดสอบการดูดซับไอโอดีน 62

ค เวลาเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก (t_r) 64

ง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก กับ ความเร็วของแก๊สตัวพา 77

จ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ 85

ประวัติผู้เขียน 89

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบาญรูป

3.1 กลไกการดูดซับของโมเลกุลในวัฏภาคแก๊สบนพื้นผิวของตัวดูดซับ 20

4.1 คอลัมน์ที่บรรจุด้วยตัวดูดซับชนิดถ่านในการทดลองการดูดซับด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี 26

4.2 โครมาโทแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์การดูดซับด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี 27

4.3 เครื่องมือในการเตรียมไอเบนซีนเพื่อนำไปทดสอบการดูดซับ 29

4.4 แผนผังการจัดตั้งเครื่องมือเพื่อศึกษาการดูดซับ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี 30

5.1 ลักษณะพื้นผิวของเปลือกถั่วลิสงและตัวดูดซับ ที่เปลี่ยนความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริก (ก):G000 (ข):G125 (ค):225 (ง):G325 (จ):G425 .(ฉ):G525 (ช):G625 (ซ):G825 32

5.2 คุณสมบัติของวัตถุดิบและตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากเปลือกถั่วลิสงโดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก(1):ร้อยละของผลผลิต(2):ขนาดรูพรุนเฉลี่ย(3):พื้นที่ผิวจำเพาะ(4):ค่าการดูดซับไอโอดีน 34

5.3 ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ ที่ได้จากการเปลี่ยนอุณหภูมิ (ก):G315 (ข):G325 (ค):G335 (ง):G345 (จ):G355 (ฉ):G365 36

5.4 คุณสมบัติของวัตถุดิบและตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากเปลือกถั่วลิสงโดยเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา(1):ร้อยละของผลผลิต(2):ขนาดรูพรุนเฉลี่ย(3):พื้นที่ผิวจำเพาะ(4):ค่าการดูดซับไอโอดีน 38

5.5 ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ ที่ได้จากการเปลี่ยนเวลาในการเผา (ก):G351 (ข):G352 (ค):G353 (ง):G354 (จ):G355 (ฉ):G356 40

5.6 คุณสมบัติของวัตถุดิบและตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากเปลือกถั่วลิสงโดยเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา(1):ร้อยละของผลผลิต(2):ขนาดรูพรุนเฉลี่ย(3):พื้นที่ผิวจำเพาะ(4):ค่าการดูดซับไอโอดีน 41

5.7 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ ที่เตรียมโดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริก (1):เปลือกถั่วลิสง (2):กะลาปาล์ม (3):ซังข้าวโพด (4):ผักตบชวา 42

5.8 สมดุลการดูดซับไอเบนซีนบนตัวดูดซับที่เตรียมโดยเปลี่ยนความเข้มข้น 44
5.9 สมดุลการดูดซับไอเบนซีนบนตัวดูดซับที่เตรียมโดยเปลี่ยนอุณหภูมิ 45
5.10 สมดุลการดูดซับไอเบนซีนบนตัวดูดซับที่เตรียมโดยเปลี่ยนเวลาในการเผา 46
5.11 สมดุลการดูดซับไอเบนซีนบนตัวดูดซับชนิดถ่านชนิดต่างๆ(1):เปลือกถั่วลิสง(2):ซังข้าวโพด(3):ผักตบชวา 47

ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิความเสียดทาน และ เรโนลด์นัมเบอร์ ของหอดูดซับที่บรรจุตัวดูดซับ G225 57

ง.1 ตัวดูดซับที่เตรียมด้วยความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก 20% โดยน้ำหนัก . 77
ง.2 ตัวดูดซับที่เตรียมด้วยความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก 30% โดยน้ำหนัก . 78
ง.3 ตัวดูดซับที่เตรียมด้วยความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก 40% โดยน้ำหนัก . 78
ง.4 ตัวดูดซับที่เตรียมด้วยความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก 50% โดยน้ำหนัก . 79
ง.5 ตัวดูดซับที่เตรียมด้วยความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก 60% โดยน้ำหนัก . 79
ง.6 ตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส 80
ง.7 ตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส 80
ง.8 ตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส 81
ง.9 ตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส 81
ง.10 ตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้เวลา 15 นาที 82
ง.11 ตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้เวลา 30 นาที 82
ง.12 ตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้เวลา 60 นาที 83
ง.13 ตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้เวลา 90 นาที 83
ง.14 ตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้เวลา 120 นาที 84

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบาญตาราง

1.1 คุณสมบัติทางเคมี และ ทางกายภาพของเบนซีน 2
1.2 สถิติการนำเข้าตัวดูดซับชนิดถ่านของประเทศไทย 3

5.1 ลักษณะของคอลัมน์ที่บรรจุตัวดูดซับ 43
5.2 พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากวัตถุดิบชนิดต่างๆ 46
5.3 ค่าความร้อนของการดูดซับเบนซีนบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากเปลือกถั่วลิสง . 48

ค.1 ตัวดูดซับ ชนิดถ่านที่ได้จากการเปลี่ยนความเข้มข้นสารละลายกรดฟอสฟอริก 64
ค.2 ตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้จากการเปลี่ยนอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 69
ค.3 ตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้จากการเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 73

จ.1 ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้จากการเปลี่ยนความเข้มข้นสารละลาย กรดฟอสฟอริก 86
จ.2 ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้จากการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการทำ ปฏิกิริยา 87
จ.3 ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้จากการเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 88

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์และอักษรย่อ

สัญลักษณ์

a	พื้นที่ผิวภายนอกต่อปริมาตรของตัวดูดซับ (cm^2/cm^3)
a_s	พื้นที่ผิวจำเพาะต่อปริมาตรของตัวดูดซับ (cm^2/cm^3)
c	ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ ($mole/cm^3$)
c_b	ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในวัฏภาคของไหล (mol/cm^3)
c_s	ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่บริเวณผิวของตัวดูดซับ (mol/cm^3)
c^*	ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (mol/cm^3)
d_p	เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคตัวดูดซับ (cm)
D_L	สัมประสิทธิ์การกระจายในแนวแกน (cm^2/sec)
ΔH	ปริมาณความร้อนของการดูด ซับ (kJ/mol)
$G000$	เปลือกถั่วลิสง
$G025$	เปลือกถั่วลิสงเผาที่อุณหภูมิ200°Cเวลา120นาที
$G125$	เปลือกถั่วลิสงผสมสารละลายกรดฟอสฟอริก10% เผาที่อุณหภูมิ200°C เวลา120นาที
$G225$	เปลือกถั่วลิสงผสมสารละลายกรดฟอสฟอริก20% เผาที่อุณหภูมิ200°C เวลา120นาที
$G325$	เปลือกถั่วลิสงผสมสารละลายกรดฟอสฟอริก30% เผาที่อุณหภูมิ200°C เวลา120นาที
$G425$	เปลือกถั่วลิสงผสมสารละลายกรดฟอสฟอริก40% เผาที่อุณหภูมิ200°C เวลา120นาที
$G525$	เปลือกถั่วลิสงผสมสารละลายกรดฟอสฟอริก50% เผาที่อุณหภูมิ200°C เวลา120นาที
$G625$	เปลือกถั่วลิสงผสมสารละลายกรดฟอสฟอริก60% เผาที่อุณหภูมิ200°C เวลา120นาที
$G825$	เปลือกถั่วลิสงผสมสารละลายกรดฟอสฟอริก85% เผาที่อุณหภูมิ200°C เวลา120นาที
$G315$	เปลือกถั่วลิสงผสมสารละลายกรดฟอสฟอริก30% เผาที่อุณหภูมิ150°C เวลา120นาที
$G335$	เปลือกถั่วลิสงผสมสารละลายกรดฟอสฟอริก30% เผาที่อุณหภูมิ250°C เวลา120นาที
$G345$	เปลือกถั่วลิสงผสมสารละลายกรดฟอสฟอริก30% เผาที่อุณหภูมิ300°C เวลา120นาที
$G355$	เปลือกถั่วลิสงผสมสารละลายกรดฟอสฟอริก30% เผาที่อุณหภูมิ350°C เวลา120นาที
$G365$	เปลือกถั่วลิสงผสมสารละลายกรดฟอสฟอริก30% เผาที่อุณหภูมิ600°C เวลา120นาที
$G351$	เปลือกถั่วลิสงผสมสารละลายกรดฟอสฟอริก30% เผาที่อุณหภูมิ350°C เวลา15นาที
$G352$	เปลือกถั่วลิสงผสมสารละลายกรดฟอสฟอริก30% เผาที่อุณหภูมิ350°C เวลา30นาที

$G353$	เปลือกถั่วลิสงผสมสารละลายกรดฟอสฟอริก30% เผาที่อุณหภูมิ350°C เวลา60นาที
$G354$	เปลือกถั่วลิสงผสมสารละลายกรดฟอสฟอริก30% เผาที่อุณหภูมิ350°C เวลา90นาที
$G356$	เปลือกถั่วลิสงผสมสารละลายกรดฟอสฟอริก30% เผาที่อุณหภูมิ350°C เวลา150นาที
K_{BET}	ค่าคงที่สมดุลการดูดซับกรณีพิจารณาการดูดซับด้วยไอโซเทิร์ม บี.อี.ที.
K_F	ค่าคงที่สมดุลการดูดซับกรณีพิจารณาการดูดซับด้วยไอโซเทิร์มฟรอยดลิช ($mol/cm^3 \cdot kPa^{1/n}$)
K_H	ค่าคงที่สมดุลการดูดซับกรณีพิจารณาการดูดซับด้วยไอโซเทิร์มเชิงเส้น $(mol/cm^3$ of pellet$)/(mol/cm^3$ of gas$)$
K_L	ค่าคงที่สมดุลการดูดซับกรณีพิจารณาการดูดซับด้วยไอโซเทิร์มแลงเมียร์ (kPa^{-1})
k_f	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารผ่านฟิล์ม (cm/sec)
k_p	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารผ่านรูพรุน (cm/sec)
k_o	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารรวม (cm/sec)
L	ความยาวของหอดูดซับ (cm)
n	ค่าคงที่ของแบบจำลองสมดุลการดูดซับฟรอยดลิช
P	ความดันย่อยของสารถูกดูดซับ (kPa)
P_S	ความดันไออิ่มตัวของสารถูกดูดซับ (kPa)
ΔP	ความดันลด (kPa)
q	ปริมาณการดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับ (mol/g)
q_s	ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (mol/g)
R	ค่าคงที่ของแก๊ส (kJ/mol·K)
R_{ads}	อัตราการดูดซับ (mol/g·sec)
T	อุณหภูมิขณะเกิดการดูดซับ (K)
t_r	ค่าโมเมนต์สัมบูรณ์อันดับที่ 1 (sec)
v	ความเร็วในการไหลของแก๊สตัวพา (cm/sec)

อักษรกรีก

ϵ	ความพรุนของส่วนที่บรรจุตัวดูดซับ
ρ_b	ความหนาแน่นของส่วนที่บรรจุตัวดูดซับ (g/cm^3)
ρ_p	ความหนาแน่นของอนุภาคตัวดูดซับ (g/cm^3)
ρ_s	ความหนาแน่นของอนุภาคตัวดูดซับ (g/cm^3)
σ^2	ค่าโมเมนต์กลางอันดับที่ 2 (sec^2)
μ	ความหนืดของแก๊สตัวพา (g/cm^3)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันสารเคมีจำพวกสารตัวทำละลายอินทรีย์ (Volatile Organic Chemicals) ได้ถูกนำเข้ามาใช้ในงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยเป็นจำนวนมาก โดยมีปริมาณการนำเข้ามากกว่า 120,000 ตันต่อปี ในช่วงปี พ.ศ. 2540 และได้มีปริมาณการนำเข้าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะเริ่มผลิตได้เองบางส่วนในนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดบ้างแล้วก็ตาม สารประกอบในกลุ่มตัวทำละลายอินทรีย์ที่สำคัญและใช้กันมากในโรงงานอุคสาหกรรมได้แก่ เบนซีน โทลูอีน ไวนีลคลอไรด์ ฟีนอล คลีซอล ฟอร์มาลดีไฮด์ คลอโรฟอร์ม และ สารประกอบจำพวกแอลกอฮอลล์ต่างๆ กลุ่มโรงงานที่ใช้สารตัวทำละลายอินทรีย์ในปริมาณมากได้แก่ โรงงานผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้า โรงงานผลิตผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับพลาสติก โรงงานประกอบอุปกรณ์รถยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า เคมีภัณฑ์ โรงงานยา และ โรงงานฟอกย้อม จำนวนโรงงานที่ทำงานสัมผัสกับสารจำพวกนี้มีไม่ต่ำกว่า 4,000 แห่งในประเทศไทย และกำลังมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ปัญหาที่ตามมาคือ สภาวะแวดล้อมเป็นพิษ และ การกำจัดกากของเสีย

สภาวะแวดล้อมในบริเวณที่ทำงานซึ่งมีการสัมผัสสารเคมีที่ระเหยได้รวดเร็ว จะทำให้เกิดปัญหาด้านอุบัติเหตุ และ โรคจากการทำงานเป็นจำนวนมาก ผลจากการให้บริการด้านการตรวจสิ่งแวดล้อมและบริการด้านเวชศาสตร์อุตสาหกรรม ของศูนย์ปฏิบัติการพิษวิทยาสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณะสุข ของมหาวิทยาลัยมหิดลพบว่า คนงานมีอาการทางระบบทางเดินหายใจและผิวหนังมากที่สุด สารหลายตัวเป็นสารก่อมะเร็ง และพนักงานยังขาดความรู้เกี่ยวกับเรื่องอันตรายจากสารเคมี สำหรับสิ่งแวดล้อมภายนอกโรงงานพบว่ามีปริมาณของสารตัวทำละลายอินทรีย์สูงขึ้นตามลำดับในเขตกรุงเทพมหานคร ส่วนในเขตอุตสาหกรรมพบได้เป็นกลุ่มและมีปัญหาเฉพาะ ขึ้นกับประเภทของอุตสาหกรรม ชนิดของของเสียและกากของเหลวที่ต้องนำไปกำจัด ซึ่งขณะนี้มีปัญหามากเนื่องจากขาดแหล่งกำจัด ทำให้อุตสาหกรรมหลายแห่งทิ้งลงไปในดินและแม่น้ำ หรือปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศ ทำให้เกิดการปนเปื้อนในธรรมชาติ มาตรการการป้องกันและการแก้ไขเกี่ยวกับการใช้สารตัวทำละลายอินทรีย์จึงต้องนำมาคิดและปฏิบัติอย่างเร่งด่วน [1,2]

ในจำพวกสารตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้ เบนซีน (Benzene) เป็นสารที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมและมีความเป็นพิษสูง โดยเป็นสารตัวทำละลายที่ใช้มากในอุตสาหกรรมของ สี หนังเทียม พรมน้ำมัน

แลกเกอร์ เรซิน ขี้ผึ้ง และ น้ำมันต่างๆ เบนซีน เป็นสารตัวทำละลายชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ที่อุณหภูมิห้อง ณ.ความดันบรรยากาศเบนซีนมีจุดเดือดต่ำ และ มีความดันไอสูง ทำให้เบนซีนสามารถระเหยได้รวดเร็วที่อุณหภูมิห้อง อีกทั้งยังติดไฟได้ง่ายอีกด้วย เบนซีนเป็นสารที่มีอยู่ในธรรมชาติพบได้ในน้ำมันปิโตรเลียม นอกจากนี้ยังมีการผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรมเป็นปริมาณมาก โดยในปีพ.ศ. 2540 ได้มีการผลิตเบนซีนขึ้นถึง 14.8 ล้านตันทั่วโลก [3]

การแพร่ของเบนซีนไปยังบรรยากาศเกิดได้จากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี การเผาถ่านหิน การผลิตสินค้าอุปโภคบริโภค และ กระบวนการผลิต โทลูอีน ไซลีน และ สารประกอบอะโรเมติกส์อื่นๆ เป็นต้น

ตารางที่ 1.1: คุณสมบัติทางเคมี และ ทางกายภาพของเบนซีน

สูตรโมเลกุล	C_6H_6
น้ำหนักโมเลกุล	78.11
ลักษณะทางกายภาพ	ของเหลวใสไม่มีสี
จุดวาบไฟ	-11.1 องศาเซลเซียส
ปริมาณต่ำสุดในการเกิดเปลวเพลิง	1.3–7.1%
จุดหลอมเหลว	5.5 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	80.1 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	0.878 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ความดันไอ (26 องศาเซลเซียส)	13.3 กิโลปาสคาล
ความร้อนแฝงของการควบแน่น	30.76 กิโลจูลต่อโมล
ปริมาณที่ยอมให้มีได้ในอากาศ	4.8–15.0 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ปริมาณที่ยอมให้มีได้ในน้ำ	0.5–4.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ไอเบนซีนเป็นมลภาวะทางอากาศชนิดหนึ่งซึ่งเกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมทั้งขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ที่ใช้เบนซีนเป็นองค์ประกอบหนึ่งของสารตัวทำละลายอินทรีย์ ไอของเบนซีนมีความเป็นพิษต่อร่างกายสูง ไอเบนซีนในอากาศแม้เพียงปริมาณเล็กน้อยก็ทำให้เกิดปัญหาต่อระบบทางเดินหายใจ ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อดวงตา และ ผิวหนัง ของผู้อาศัยบริเวณใกล้เคียง เมื่อรับเบนซีนเข้าสู่ร่างกายเป็นระยะเวลานาน จะทำให้ปริมาณเม็ดเลือดแดงในเลือดลดลงเป็นสาเหตุของโรคลูคีเมีย (Leukaemia) อีกทั้งยังเป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็งบริเวณกระดูกไขสันหลัง นอกจากนี้เบนซีนยังอาจเป็นต้นเหตุของการเกิดเพลิงไหม้อีกด้วย ดังนั้นการแยกไอเบนซีนออกจากแก๊สที่ปล่อยทิ้งก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศจึงมีความสำคัญต่อการลดมลภาวะทางอากาศ [3]

การดูดซับเป็นวิธีการหนึ่งในหลายวิธีสำหรับการแยกไอเบนซีนจากแก๊สปล่อยทิ้ง และอาจเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการแยกไอเบนซีนเจือจางจากแก๊สปล่อยทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะ

แก๊สปล่อยทิ้งที่มีอุณหภูมิสูง หรือมีความเข้มข้นต่ำ เนื่องจากตัวดูดซับที่น่าจะใช้ประโยชน์ได้มีหลายชนิด โดยการเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานภายใต้สภาวะหนึ่งจำเป็นต้องพิจารณาเลือกจาก สมดุลการดูดซับ และ อัตราการดูดซับของระบบการดูดซับนั้นๆ

ด้วยเหตุดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาถึงการแยกไอเบนซีนออกจากแก๊สที่ปล่อยทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรมก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ โดยวิธีการแยกที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้เลือกวิธีของการดูดซับ เนื่องจากปัจจุบันระบบของการดูดซับได้มีการพัฒนาและมีการนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางมากในอุตสาหกรรม เช่น การแยกแก๊สผสมในสถานะแก๊ส หรือการแยกของเหลวผสมที่แยกได้ยากด้วยการกลั่นลำดับส่วน อีกทั้งตัวดูดซับในปัจจุบันก็มีให้เลือกใช้มากมาย และยังสามารถผลิตได้เองจากวัสดุในธรรมชาติ จึงทำให้ระบบการแยกด้วยการดูดซับสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสมโดยการเปลี่ยนชนิดของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นลักษณะเด่นประการหนึ่งของการแยกด้วยระบบการดูดซับที่เหนือกว่าระบบการแยกของผสมอื่นๆ [4]

ปัจจุบันจากสถิติการนำเข้าตัวดูดซับชนิดถ่านจากต่างประเทศของกรมศุลกากร ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีแนวโน้มสูงขึ้นดังแสดงในตารางที่ 1.2 เนื่องจากบริษัทที่ผลิตในประเทศมีน้อยราย ขาดการยอมรับทางด้านคุณภาพ และค่านิยมที่มุ่งเน้นสินค้าจากต่างประเทศ ดังนั้นจึงสมควรที่จะพัฒนางานวิจัยและเทคนิคต่างๆในการผลิตตัวดูดซับที่มีคุณภาพดีเพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ตัวดูดซับชนิดถ่านในประเทศ และอาจมีแนวทางการขยายออกสู่ตลาดต่างประเทศถ้าหากคุณภาพของตัวดูดซับที่ผลิตได้เป็นที่ยอมรับ [5]

ตารางที่ 1.2: สถิติการนำเข้าตัวดูดซับชนิดถ่านของประเทศไทย

พ.ศ.	ปริมาณการนำเข้า (ตัน)	มูลค่าการนำเข้า (ล้านบาท)
2540	3,598	127.140
2539	3,047	100.837
2538	2,883	124.605
2537	2,816	103.186
2536	2,808	96.311

ที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาตัวดูดซับชนิดถ่านอย่างต่อเนื่องโดยได้มีการนำเอาวัตถุดิบชนิดต่างๆมาผลิตเป็นตัวดูดซับโดยการผ่านกรรมวิธีต่างๆ โดย เกศรา นุตาลัย และผู้ร่วมงาน [6] ศึกษาการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านจากดินพรุในห้องปฏิบัติการโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำยิ่งยวด จากการทดลองพบว่าเมื่อนำดินพรุมาอัดเป็นแท่งแล้วผ่านขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยไอน้ำยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้ตัวดูดซับชนิดถ่านที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนประมาณ 1,200 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ และมีค่าพื้นที่ผิว 881 ตารางเมตรต่อกรัม แต่ค่าร้อยละของผลผลิตของการทำปฏิกิริยาด้วยไอน้ำมีค่าน้อยมากเพียงร้อยละ 8

คณิต กฤษณังกูร และ จงจิตร์ หิรัญลาภ [7] ศึกษาการทำตัวดูดซับชนิดถ่านจากแกลบ โดยการนำแกลบมาเผาที่อุณหภูมิ 400–800 องศาเซลเซียส แล้วนำถ่านที่ได้มาสกัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซิลิกาจะถูกสกัดออกมาทำให้ได้ถ่านที่มีความพรุนสูง มีคุณสมบัติในการดูดสีและกลิ่นดีขึ้น โดยเมื่อเผาแกลบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะได้ถ่านที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด 540 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ

นราพร หาญวจนวงศ์ และผู้ร่วมงาน [8] ศึกษาการทำตัวดูดซับชนิดถ่านจากซังข้าวโพด โดยการผ่านขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยซิงค์คลอไรด์ พบว่า การเผาซังข้าวโพดให้เป็นถ่านที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วผสมซิงค์คลอไรด์โดยใช้อัตราส่วนซิงค์คลอไรด์ต่อถ่านเป็น 2 ต่อ 1 แล้วทำการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ตัวดูดซับชนิดถ่านที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด 777 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ

ดำรง ขุมมงคล และ อภิสิทธิ์ เจริญกุล [9] ศึกษาการทำตัวดูดซับชนิดถ่านจากกะลามะพร้าว และ ขี้เลื่อย โดยใช้เกลือแกงเป็นสารเคมีในการเพิ่มพื้นที่ผิว จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตตัวดูดซับจากกะลามะพร้าว และ ขี้เลื่อย คือ ใช้อัตราส่วนน้ำหนักเกลือแกง ต่อ กะลามะพร้าว หรือ ขี้เลื่อยเท่ากับ 3 ต่อ 1 เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้จะมีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด 640 และ 542 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับตามลำดับ

K. Periasamy, K. Srinivasan และ P.K. Murugan [10] ได้ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านจากเปลือกถั่วลิสง ด้วยกรดฟอสฟอริก เพื่อนำไปดูดซับ โครเมียม(VI) จากผลการทดลองพบว่าตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 3 ส่วน ต่อเปลือกถั่วลิสง 4 ส่วน ทำการเผาที่อุณหภูมิ 800–850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที มีพื้นที่ผิว 194 ตารางเมตรต่อกรัม โดยสามารถดูดซับโครเมียม(VI) ได้ถึง 80 % โดยน้ำหนัก ที่สภาวะความเป็นกรด เท่ากับ 2

K. Periasamy และ C. Namasivayam [11] ได้ศึกษาการกำจัด แคดเมียม(II) โดยใช้ตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมขึ้นจากเปลือกถั่วลิสงซึ่งมีพื้นที่ผิว 208 ตารางเมตรต่อกรัม พบว่าค่าคงที่สมดุลการดูดซับของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้มีค่าสูงกว่าค่าคงที่สมดุลการดูดซับของตัวดูดซับที่ใช้ในทางการค้าถึง 31 เท่า

ตัวดูดซับที่เลือกมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้คือตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากเปลือกถั่วลิสงเนื่องจากตัวดูดซับที่เตรียมได้มีพื้นผิวในการดูดซับและมีรูพรุนสูง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการดูดซับ อีกทั้งเปลือกถั่วลิสงที่นำมาใช้ในการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านยังเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร สามารถหาได้ง่าย และ มีราคาถูก ดังนั้นการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านจากเปลือกถั่วลิสงจึงเป็นการนำวัสดุทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่เปลือกถั่วลิสง และ เป็นประโยชน์ในทางเศรษฐกิจต่อไป

สำหรับการวิเคราะห์การดูดซับโดยการวัดสมดุลการดูดซับสามารถวัดโดยอ้อมได้ด้วยวิธีโครมาโทกราฟี (Chromatographic method) ซึ่งเป็นวิธีวัดค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับ สำหรับระบบที่ลักษณะสมดุลการดูดซับเป็นแบบเชิงเส้น โดยสามารถวัดค่าคงที่สมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆได้

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยง่าย และไม่จำเป็นต้องวัดภายใต้สภาวะสูญญากาศดังเช่นวิธีวัดสมดุลการดูดซับโดยตรงอื่นๆ การวัดค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับด้วยวิธีโครมาโทกราฟีทำได้โดยการป้อนแก๊สตัวอย่างปริมาณน้อยๆพร้อมกับแก๊สตัวพาเข้าสู่เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี แล้วจึงวิเคราะห์ผลของโครมาโทแกรมที่ได้ด้วยวิธีทางโมเมนต์ ซึ่ง F.J. Reineke และ K. Bachmann [12] ได้ทำการศึกษาการตรวจวัดค่าการดูดซับของสารประกอบคาร์บอนตั้งแต่ C_6–C_8 ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี จากการทดลองจะทราบถึงข้อมูลของเวลาของเวลาเฉลี่ยของตัวถูกดูดซับในหอดูดซับของสารประกอบคาร์บอนตั้งแต่ C_6–C_8 ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง

Roger D. Blanchard และ James K. Hardy [13] ได้ศึกษาการกำจัดสารตัวทำละลายอินทรีย์ โดยใช้วิธีการสกัดด้วยเยื่อเหลว โดยทำการตรวจวัดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี จากผลการทดลองพบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของสารตัวทำละลายอินทรีย์ต่ำๆ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่วัดได้ กับ ความเข้มข้นของสารตัวทำละลายอินทรีย์เป็นเส้นตรง

J.H. Yun และ D.K. Choi [14] ได้ทำการวัดไอโซเทิร์มของ ไอเบนซีน และ ไอโทลูอีน บนตัวดูดซับชนิดถ่าน โดยใช้เครื่องมือวัดเชิงปริมาตร ทำการทดลองที่ความดัน 7 กิโลปาสคาล สำหรับเบนซีน และ 2 กิโลปาสคาล สำหรับโทลูอีน โดยข้อมูลที่ได้สามารถนำมาคำณวนสมดุลการดูดซับโดยใช้สมการของ UNILAN

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านเพื่อนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมเป็นอันมาก การวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาและพัฒนาเทคนิคในการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งในที่นี้ได้เลือกเปลือกถั่วลิสงเป็นวัตถุดิบในการผลิต เนื่องจากมีปริมาณมากสามารถพัฒนาไปสู่การผลิตในระดับอุตสาหรรมได้ หาได้ง่าย และ มีราคาถูก โดยสารเคมีที่เลือกมาใช้เป็นตัวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคือ สารละลายกรดฟอสฟอริก เนื่องจากสามารถผลิตให้ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง โดยใช้อุณหภูมิในการเผาต่ำ และ เป็นสารเคมีที่มีราคาไม่แพงนัก โดยตัวดูดซับที่ผลิตได้ ได้ถูกนำมาศึกษาการดูดซับไอเบนซีนเจือจางเนื่องจากเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษสูง มักอยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิสูง และ มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมในการดักจับด้วยวิธีของการดูดซับ

ในการศึกษาวิจัย ได้มุ่งเน้นถึง

1. ศึกษาผลของสภาวะที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านจากเปลือกถั่วลิสง ต่อลักษณะสมบัติของตัวดูดซับที่เตรียมได้ โดยที่สภาวะการเตรียมนั้นประกอบด้วย
   - ความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกที่ใช้ในการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่าน
   - อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่าน
   - ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่าน
2. ศึกษาสมดุลการดูดซับไอเบนซีนเจือจางบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้ โดยการวัด

- ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ (K)
- ค่าความร้อนของการดูดซับ (ΔH)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ตัวดูดซับชนิดถ่าน

ตัวดูดซับชนิดถ่าน (Carbon Adsorbent) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำเอาวัตถุดิบธรรมชาติที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกระบวนการทางเคมีจนได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่าน มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสามารถ ในการดูดซับสาร ต่างๆได้เป็นอย่างดี โดยทั่วไปตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้มักมีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 300–2500 ตารางเมตรต่อกรัม และ ลักษณะพื้นผิวที่ได้มักเป็นพื้นผิวที่ไม่มีขั้ว หรือมีความเป็นขั้วอ่อนๆ จึงเหมาะสมกับการดูดซับสารประเภทไม่มีขั้ว นอกจากนี้ขนาดของรูพรุนที่ได้มีหลายขนาด โดยสามารถแบ่งตามมาตรฐานของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) [15] ได้ดังนี้

- รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) เป็นตัวดูดซับชนิดถ่านที่มีรัศมีของรูพรุนเล็กกว่า 1 นาโนเมตร มักนิยมใช้ประโยชน์ในการดูดซับไอระเหย และ แก๊ส

- รูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) เป็นตัวดูดซับชนิดถ่านที่มีรัศมีรูพรุนระหว่าง 1–25 นาโนเมตร เป็นขนาดรูพรุนที่ใช้งานเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากเป็นช่วงที่สามารถดูดซับสารที่อยู่ในวัฏภาคแก๊ส และ ของเหลวได้เป็นอย่างดี

- รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) เป็นตัวดูดซับชนิดถ่านที่มีรูพรุนใหญ่กว่า 25 นาโนเมตร มักนิยมใช้ในการดูดซับสารที่มีโมเลกุลใหญ่ โดยปกติถ้าขนาดของรูพรุนมีขนาดใหญ่มากๆ บริเวณที่เป็นรูพรุนขนาดใหญ่จะไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ แต่จะเป็นตัวช่วยให้สารที่จะถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนเล็กๆได้ง่ายขึ้น

เนื่องจากตัวดูดซับชนิดถ่านมีลักษณะสมบัติในการดูดซับที่ดี ปัจจุบันจึงมีการใช้ตัวดูดซับชนิดถ่านในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ในโรงงานน้ำตาล มีการใช้ตัวดูดซับชนิดถ่านในการฟอกสีน้ำตาล ในโรงงานไขมันและน้ำมัน ใช้ตัวดูดซับชนิดถ่านในการดูดสิ่งปลอมปนที่มีอยู่ในน้ำมันพืช ในโรงงานเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ ใช้ตัวดูดซับชนิดถ่านในการกำจัดรสและกลิ่นที่ไม่ต้องการออกจากไวน์ หรือ ใช้ในการดูดซับไอของตัวทำละลายเพื่อลดมลภาวะทางอากาศและเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ เป็นต้น ตัวดูดซับชนิดถ่านจึงมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางโดยสามารถใช้ในการดูดซับสารที่อยู่ในสถานะของของเหลว หรือ แก๊สได้ [16]

2.1 ประวัติความเป็นมาของตัวดูดซับชนิดถ่าน

ในศตวรรษที่ 17 และ 18 ได้มีการผลิตถ่านขึ้นมาใช้โดยนำไม้มาเผาในบริเวณที่มีอากาศจำกัด ถ่านที่ได้ถูกนำมาใช้ในโรงงานถลุงแร่และใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อน ต่อมามีการค้นพบว่าถ่านที่ได้มีความสามารถในการดูดซับได้ดี และพบว่าการใช้ถ่านเพียงปริมาณเล็กน้อยสามารถกำจัดสีและกลิ่นในของเหลวชนิดต่างๆได้ เช่น ไวน์ น้ำตาล เป็นต้น จากจุดนี้เองจึงมีความพยายามที่จะทำให้ถ่านมีความสามารถในการดูดซับดีขึ้นโดยผ่านกระบวนการเพิ่มพื้นที่ผิว ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ไอน้ำ ขณะนั้นความต้องการใช้ตัวดูดซับในทวีปยุโรปได้เติบโตขึ้น และนิยมใช้ถ่านที่ได้จากกระดูกมาใช้ในโรงงานน้ำตาล เพื่อฟอกสีน้ำตาลโดยใช้ในรูปผงถ่านผสมลงในสารละลายที่ร้อนแล้วกรองสารละลายออก

ต่อมาเมื่อสงครามโลกครั้งที่ 1 อุบัติขึ้น ความต้องการหน้ากากสำหรับป้องกันแก๊สพิษมีมากขึ้น เนื่องจากตัวดูดซับที่ผลิตขึ้นสำหรับฟอกสีน้ำตาลมีลักษณะพองและเบา ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้สำหรับทำไส้กรองแก๊สพิษเนื่องจากต้องใช้ปริมาณมาก จากจุดนี้เองจึงส่งผลให้มีการค้นคว้าวิจัยตัวดูดซับชนิดอื่นซึ่งมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นเพื่อใช้เป็นไส้กรองในหน้ากากกันแก๊สพิษ ทำให้เกิดการพัฒนาตัวดูดซับชนิดต่างๆเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน [16]

2.2 วัตถุดิบสำหรับผลิตตัวดูดซับชนิดถ่าน

วัตถุดิบที่นำมาผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านจะขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ใช้ในการผลิต และ คุณสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ต้องการ จากการศึกษาพบว่าการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านสามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่นำมาใช้ โดยวัตถุดิบที่ใช้ผลิตตัวดูดซับมักพิจารณาจากสารที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเป็นหลัก อินทรีย์วัตถุที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านสามารถแบ่งเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

- พวกเซลลูโลสที่มาจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ขี้เลื่อย ชานอ้อย ซังข้าวโพด ผักตบชวา เปลือกถั่ว เป็นต้น
- พวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ (Lignite) พีท (Peat) บิทูมินัส (Bituminous)
- วัตถุดิบที่มาจากสัตว์ เช่น กระดูก

สำหรับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตตัวดูดซับในรูปของถ่านนั้นพบว่าส่วนใหญ่มักใช้ถ่านที่ได้จากการเผาอินทรีย์วัตถุ หรือใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติ ซึ่งเรียกว่า ถ่านสังเคราะห์ (Artificial char) โดยถ่านที่ได้จากอินทรีย์วัตถุยังแบ่งออกตามอินทรีย์วัตถุที่นำมาใช้เป็น 2 ประเภทคือ

- ถ่านสังเคราะห์ชนิดแข็ง (Hard artificial char) เช่น ถ่านที่ได้จากเปลือก หรือ เมล็ดของผลไม้ ถ่านไม้ที่เผาที่ความดันสูง
- ถ่านสังเคราะห์ชนิดอ่อน (Soft artificial char) เช่น ถ่านชานอ้อย ถ่านแกลบ ถ่านกากน้ำตาล ถ่านซังข้าวโพด เป็นต้น

ถ่านหรือวัตถุอินทรีย์เหล่านี้ยังไม่มีลักษณะสมบัติในการดูดซับที่ดีจำเป็นต้องนำไปผ่านขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยกระบวนการทางเคมีเพื่อทำให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นต่อไป [17]

2.3 การผลิตตัวดูดซับชนิดถ่าน

ปัจจุบันได้มีผู้วิจัยและพัฒนาการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านทั้งในประเทศและต่างประเทศอย่างแพร่หลาย การผลิตตัวดูดซับภายในประเทศส่วนใหญ่ยังคงจำกัดอยู่เพียงในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากพบว่าโดยส่วนใหญ่ยังไม่สามารถควบคุมให้ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ผลิต ได้ให้คงที่เมื่อต้องการผลิตในปริมาณมากๆ และบางกระบวนการไม่เหมาะสมในแง่ของเศรษฐศาสตร์ ส่วนในต่างประเทศได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตตัวดูดซับเพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรม โดยหลักการออกแบบเครื่องมือจะเน้นถึงประสิทธิภาพในการผลิต ความประหยัด และความปลอดภัย

การผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านมีด้วยกันหลายวิธีขึ้นอยู่กับความต้องการใช้ตัวดูดซับที่มีลักษณะสมบัติอย่างไร และต้องการนำไปดูดซับสารชนิดใด วิธีการโดยทั่วไปจะประกอบด้วย ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ เช่น การบด การอบแห้ง การทำให้เป็นเม็ด แล้วจึงเข้าสู่ขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวเพื่อทำให้เป็นตัวดูดซับชนิดถ่านต่อไป [18]

โดยทั่วไปการผลิตตัวดูดซับจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกเป็นการแปรสภาพอินทรีย์วัตถุให้เป็นถ่านเรียกว่าขั้นตอนการทำให้เป็นถ่าน ขั้นตอนที่สองเป็นขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิว ถ่านที่ได้จะมีความพรุน และ พื้นที่ผิวสูงขึ้น ทำให้เหมาะสมในการนำไปดูดซับสารต่างๆ

2.3.1 ขั้นตอนการทำให้เป็นถ่าน

การทำให้เป็นถ่าน (Carbonization) สามารถทำได้โดยการนำเอาวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาเผาในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน ในขั้นตอนนี้แร่ธาตุต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และ ไนโตรเจน จะถูกไล่ออกไปทำให้ได้ถ่านที่มีสัดส่วนของธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมากขึ้น โดยในการทำให้เป็นถ่านมักจะใช้อุณหภูมิในการเผาไม่สูงนัก โดยทั่วไปจะเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส จะได้ถ่านที่มีร้อยละของผลผลิตต่ำมากซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่หมาะสมในการผลิต

อย่างไรก็ตามพบว่าถ่านที่ผ่านขั้นตอนการทำให้เป็นถ่านมีความสามารถในการดูดซับต่ำ เพราะมีพื้นที่ผิว และรูพรุนน้อย จึงจำป็นต้องนำถ่านที่ได้ไปผ่านขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับต่อไป

2.3.2 ขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิว

ขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิว (Activation) เป็นกระบวนการที่สำคัญในการช่วยเพิ่มความพรุน และ พื้นที่ผิวให้กับถ่านที่ได้จากกระบวนการทำให้เป็นถ่านเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารต่างๆ โดยการนำถ่านที่ได้มาผ่านกระบวนการทางเคมี โดยใส่สารเคมีที่มีความสามารถใน

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (Oxidation) กับโมเลกุลของคาร์บอนในถ่านให้เป็น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ เพื่อให้ถ่านที่ได้มีรูพรุน และ พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น แต่ปฏิกิริยาเคมีอาจแตกต่างกันไปตามชนิดของสารประกอบ (Oxidant) ที่ใช้ โดยทั่วไปวิธีที่ใช้ในการเพิ่มพื้นที่ผิวมี 2 วิธี คือ การเกิดปฏิกิริยาเคมีกับแก๊สออกซิไดส์ และ การเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรด

การเกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยแก๊สออกซิไดส์

เป็นการนำถ่านที่ได้จากกระบวนการทำให้เป็นถ่านมาทำปฏิกิริยาเคมีด้วยแก๊ส ซึ่งเรียกแก๊สที่ใช้กระตุ้นว่า แก๊สออกซิไดส์ (Oxidizing Gas) แก๊สพวกนี้จะไปทำปฏิกิริยากับน้ำมันดินที่ยังเหลืออยู่ และคาร์บอนบางอะตอมในถ่านให้หลุดไป ทำให้ถ่านมีรูพรุน และมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น โดยแก๊สที่นิยมใช้ได้แก่ ไอน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สออกซิเจน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ปฏิกิริยาเคมีกับไอน้ำ

ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับไอน้ำมีผู้ศึกษาเป็นจำนวนมาก โดยเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งมีค่าความร้อนของปฏิกิริยาประมาณ 31 กิโลแคลลอรีต่อกรัมโมลของถ่าน เรียกปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับไอน้ำว่าปฏิกิริยา วอเตอร์-แก๊ส (Water-Gas reaction) ปฏิกิริยาสามารถแสดงในรูปสมการเคมีได้ดังนี้ [16]

$$C_x + H_2O = H_2 + CO + C_{x-1} \tag{2.1}$$

เนื่องจากปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนดังนั้นปฏิกิริยาน่าจะเกิดได้ดีถ้าหากใช้อุณหภูมิสูงขึ้น แต่จากการศึกษาพบว่าถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาจะถูกควบคุมโดยกลไกการแพร่ของไอน้ำ โดยอะตอมของธาตุคาร์บอนที่อยู่ในชั้นนอกๆจำนวนมากจะถูกเผาไหม้ ทำให้ความพรุนของถ่านที่ได้ลดลง ทำให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านลดลง

ปฏิกิริยาเคมีกับไอน้ำจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 750–950 องศาเซลเซียส โดยออกซิเจนที่มาจากไอน้ำจะถูกกำจัดออกไปในรูปของออกไซด์ของคาร์บอนเมื่อมากระทบกับคาร์บอน ทำให้ปริมาณคาร์บอนลดลง ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับไอน้ำสามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ได้แก่ สารประกอบออกไซด์ และ คาร์บอเนตของโลหะหมู่ 1

ปฏิกิริยาเคมีกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ปฏิกิริยานี้ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับถ่านที่อุณหภูมิประมาณ 800–900 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาเป็นแบบดูดความร้อนมีค่าความร้อนของปฏิกิริยาประมาณ 38.2 กิโลแคลลอ

รีต่อกรัมโมลของถ่าน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในรูปสมการเคมีได้ดังนี้ [16]

$$C_x + CO_2 = 2CO + C_{x-1} \tag{2.2}$$

สำหรับปฏิกิริยานี้ความดันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะมีผลต่ออัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา โดย Blackwood และผู้ร่วมงาน [19] ได้ศึกษาและให้ข้อสรุปว่า อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะเป็นอันดับหนึ่งเทียบกับความดันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันต่ำกว่า 1 บรรยากาศ และ อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะเป็นอันดับศูนย์ที่ความดันสูงขึ้น

ปฏิกิริยาเคมีกับแก๊สออกซิเจน

ปฏิกิริยานี้ใช้แก๊สออกซิเจนทำปฏิกิริยากับถ่านซึ่งทำได้ 2 วิธี คือ

- ใช้แก๊สออกซิเจนทำปฏิกิริยากับถ่านที่อุณหภูมิ 800–900 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาเป็นแบบคายความร้อนมีค่าความร้อนของปฏิกิริยาเป็น -54 กิโลแคลลอรีต่อกรัมโมล ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในรูปสมการเคมีได้ดังนี้ [16]

$$C_x + O_2 = 2CO + C_{x-2} \tag{2.3}$$

- ใช้แก๊สออกซิเจนทำปฏิกิริยากับถ่านที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาเป็นแบบคายความร้อนมีค่าความร้อนของปฏิกิริยาเป็น -92 กิโลแคลลอรีต่อกรัมโมล ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในรูปสมการเคมีได้ดังนี้ [16]

$$C_x + O_2 = CO_2 + C_{x-1} \tag{2.4}$$

การเกิดปฏิกิริยาเคมีกับแก๊สออกซิเจนมักไม่ค่อยนิยมใช้มากนัก เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนทำให้ควบคุมปฏิกิริยาได้ยาก และออกซิเจนทำให้ถ่านไหม้ทำให้เกิดการสูญเสียอย่างมาก โดยถ้าเปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับแก๊สออกซิเจนทั้ง 2 วิธีข้างต้น พบว่าวิธีที่ 2 นิยมใช้มากกว่าแต่ต้องใช้ร่วมกับสารอินทรีย์ตัวอื่นเพื่อทำให้ปฏิกิริยาเกิดช้าลง

การผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านโดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับแก๊สออกซิไดส์ มีข้อดีคือ หลังจากผ่านขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีจนได้ตัวดูดซับชนิดถ่านแล้วสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เลย ไม่ต้องเปลืองแรงงานในการล้างสารติดค้างหรือสารพิษที่เหลืออยู่ ส่วนข้อเสียคือ ต้องใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเคมีสูงทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก

การเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารละลายชนิดกรด

การผลิตตัวดูดซับโดยวิธีนี้เป็นการนำเอาวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาผสมกับสารละลายชนิดกรด ปฏิกิริยาเคมีมักเกิดขึ้นได้เร็วเมื่อได้รับความร้อน เช่น ทำให้เกิดรูพรุน ทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบกับวิธีการเผาให้เป็นถ่านธรรมดา ผลที่ได้จากการทำเช่นนี้จะทำให้ร้อยละของคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น ยิ่งกว่านั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาก็ลดต่ำลงด้วย โดยวิธีการนี้มักนิยมใช้กับวัตถุดิบที่มีโครงสร้างอ่อน และ เป็นรูพรุน เช่น เปลือกถั่ว ซังข้าวโพด แกลบ เป็นต้น สารเคมีที่ใช้มักเป็นเกลืออนินทรีย์ของพวกเกลือโลหะคลอไรด์ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์ ซึ่งละลายน้ำได้ดี ต่อมานิยมใช้ซิงค์คลอไรด์

หลักการของการผลิตตัวดูดซับโดยวิธีนี้อธิบายได้ดังนี้ เมื่อนำวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาผสมกับเกลืออนินทรีย์ด้วยอัตราส่วนต่างๆ แล้วนำไปเผาในที่อับอากาศ ณ อุณหภูมิที่จะทำให้อินทรีย์วัตถุสลายตัว เกลืออนินทรีย์จะเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุให้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ และยังลดปริมาณของสารที่ระเหยได้ให้น้อยลง เนื่องจากเกลืออนินทรีย์เหล่านี้มีความคงทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงๆ จึงยังคงสภาพหุ้มอยู่รอบๆ และแทรกอยู่ภายในถ่าน และเนื่องจากคุณสมบัติในการดูดความชื้นของเกลืออนินทรีย์ ทำให้เกิดการดูดโมเลกุลของน้ำซึ่งแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนอยู่ทั่วไปบนวัตถุดิบ ระหว่างนั้นเมื่อให้ความร้อนเข้าสู่ระบบจะทำให้ไฮโดรเจนไอออนที่อยู่ทั่วไปเกิดการกัดกร่อนวัตถุดิบขึ้น ทำให้ได้ตัวดูดซับชนิดถ่านที่มีความพรุนและพื้นที่ผิวสูง

โดยหลักการแล้วเกลืออนินทรีย์ทุกชนิดที่ทนต่อการเผาไหม้ได้น่าจะนำมาใช้ได้แต่จากการทดลองพบว่าคุณสมบัติการดูดสี และ ดูดกลิ่นของตัวดูดซับที่เตรียมได้จากซิงค์คลอไรด์นั้นจะสูงกว่าเกลืออนินทรีย์ชนิดอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากซิงค์คลอไรด์มีความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิได้ดีกว่าเกลืออนินทรีย์ชนิดอื่นทำให้มีปริมาณซิงค์คลอไรด์เหลืออยู่บนวัตถุดิบได้มากกว่ากลือชนิดอื่น ทำให้สามารถดูดความชื้นและให้ไฮโดรเจนไอออนได้มากกว่า

นอกจากเกลืออนินทรีย์ที่นิยมใช้เป็นสารเคมีสำหรับปฏิกิริยาเคมีเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวแล้ว กรดอนินทรีย์ก็นิยมใช้ในการเพิ่มพื้นที่ผิวเช่นกัน เนื่องจากสารละลายกรดสามารถแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนได้ด้วยตัวของมันเอง โดยกรดที่นิยมใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวคือ กรดซัลฟุริก และกรดฟอสฟอริก โดยการผสมสารละลายเหล่านี้ลงไปจะกระจายอยู่ทั่วไปในถ่าน วิธีนี้มีข้อดีกว่าการเพิ่มพื้นที่ผิวโดยใช้เกลืออนินทรีย์คือ นอกจากกรดที่ใส่เข้าไปจะทำหน้าที่แตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนได้ด้วยตัวของมันเอง กรดบางตัว เช่น กรดฟอสฟอริก ยังมีความสามารถในการดูดความชื้นอันเป็นการเพิ่มปริมาณของไฮโดรเจนไอออน ได้อีกทางหนึ่งด้วย โดยกรดที่นิยมใช้ในการเพิ่มพื้นที่ผิวได้แก่ กรดฟอสฟอริก เนื่องจากมีความสามารถในการทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง

ข้อดีของการใช้สารละลายชนิดกรดในการเกิดปฏิกิริยาเคมีคือ ได้ตัวดูดซับที่มีรูพรุนแทรกซึมอยู่ทั่วเนื้อถ่านโดยใช้อุณหภูมิในการผลิตไม่สูงมากนัก ส่วนข้อเสียก็คือต้องล้างสารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวออกให้หมดไม่ให้เหลือตกค้างอยู่เพื่อความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน จึงเป็นการ

สิ้นเปลืองเวลา แรงงาน เละค่าใช้จ่ายในการล้าง อบ และค่าสารเคมีซึ่งมีราคาสูงนอกจากนี้สารเคมีบางชนิดที่ใช้เช่น ซิงค์คลอไรด์ยังมีฤทธิ์กัดกร่อนภาชนะบรรจุหรือเครื่องมือที่ใช้ในการผลิต เป็นเหตุให้อายุการใช้งานของเครื่องมือนั้นสั้นลง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของสารในวัฏภาคของไหลไปเกาะอยู่บนผิวของของแข็งทั้งภายในและภายนอก โดยสารที่ไปเกาะเรียกว่า สารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) และของแข็งที่พื้นที่ผิวถูกสารนั้นเกาะเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับเกิดเนื่องจากแรงดึงดูดที่พื้นที่ผิวของของแข็งซึ่งเป็นตัวดูดซับ มีค่ามากกว่าค่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารนั้นในวัฏภาคของไหล ทำให้เกิดการแพร่ของโมเลกุลของสารถูกดูดซับบนบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยมีข้อจำกัด คือ อัตราการแพร่ของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ และ ปริมาณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ การเกาะติดบนพื้นผิวดังกล่าวสามารถจำแนกเป็นการเกาะติดด้วยแรงทางกายภาพ หรือ ด้วยพันธะเคมี ขึ้นกับลักษณะสมบัติของสารที่ถูกดูดซับ และลักษณะสมบัติของพื้นผิวตัวดูดซับ ซึ่งแรงทางกายภาพเกิดจากความแตกต่างของพลังงานอย่างอ่อนๆ ได้แก่ แรงดึงดูดระหว่างมวล แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล หรือ แรงดึงดูดระหว่างขั้ว โดยทั่วไปการดูดซับด้วยแรงทางกายภาพนี้เรียกว่า การดูดซับเชิงกายภาพ (Physical adsorption) ขณะเกิดการดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะปลดปล่อยพลังงานออกมาเรียกว่า ความร้อนของการดูดซับ (Heat of adsorption) พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาทำให้การดูดซับเป็นปรากฏการณ์แบบคายความร้อน (Exothermic) ในขณะที่การดูดซับด้วยพันธะเคมี เป็นการดูดซับที่ตัวถูกดูดซับยึดเกาะกับตัวดูดซับด้วยพันธะเคมี โดยเกิดจากการที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ และ ผิวของตัวดูดซับมีการแลกเปลี่ยนอิเลคตรอน ใช้อิเลคตรอนร่วมกันเสมือนเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น ซึ่งเรียกว่าการดูดซับเชิงเคมี (Chemisorption) อย่างไรก็ตามพบว่าการดูดซับที่เกิดขึ้น และที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมนั้นเป็นการดูดซับที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีและพิจารณาให้เป็นการดูดซับเชิงกายภาพเท่านั้น [20]

ในอดีต ระบบการดูดซับถูกนำไปใช้สำหรับดูดซับความชื้นในแก๊ส ใช้สำหรับดูดซับกลิ่นในอากาศ ใช้สำหรับดูดซับสารพิษหรือแก๊สพิษ ใช้สำหรับดูดซับเพื่อฟอกสีในของเหลว ปัจจุบันนี้ ระบบการดูดซับถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางมากขึ้นในอุตสาหกรรมโดยใช้กันมากในเรื่อง การแยกแก๊สในสถานะแก๊ส เช่น การแยกอากาศเพื่อผลิตแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ หรือ แก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ การแยกของเหลวผสมที่แยกด้วยการกลั่นได้ยาก การแยกสารปนเปื้อนที่เจือปนอยู่เพื่อทำให้สารมี

ความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้น การแยกไอของสารตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษสูงจากแก๊สปล่อยทิ้งก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ โดยระบบของการแยกด้วยการดูดซับสามารถเลือกใช้ความแตกต่างของสมดุลการดูดซับของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ หรือ เลือกใช้ความแตกต่างของอัตราการดูดซับของแต่ละองค์ประกอบกับตัวดูดซับที่เลือกไว้ ตามความเหมาะสม และในกรณีที่ทั้งสมดุลการดูดซับ และ อัตราการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับที่เลือกไว้มีลักษณะใกล้เคียงกัน ยังสามารถเลือกตัวดูดซับชนิดอื่นๆที่มีลักษณะความแตกต่างของสมดุลการดูดซับ หรือ อัตราการดูดซับอย่างใดอย่างหนึ่งได้ ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของกระบวนการแยกโดยใช้ระบบการดูดซับ

การพิจารณาเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานภายใต้สภาวะหนึ่ง จำเป็นต้องพิจารณาจากสมดุลการดูดซับ และ อัตราการดูดซับของระบบการดูดซับนั้นๆ เนื่องจากการดูดซับเป็นการใช้ประโยชน์บนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นของแข็ง การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมควรมีพื้นที่ผิว และรูพรุนมาก สามารถดูดซับสารองค์ประกอบที่ต้องการออกจากของผสมได้ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย ไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่จะถูกดูดซับทั้งในขั้นตอนการดูดซับ และการฟื้นฟูสภาพ โครงสร้างมีความคงตัว และ มีราคาไม่แพง ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ยากที่จะพบในตัวดูดซับชนิดใดชนิดหนึ่ง ดังนั้นการเลือกตัวดูดซับจึงต้องพิจารณาตามความเหมาะสมต่อการแยกสารชนิดต่างๆ เพื่อให้การแยกมีประสิทธิภาพสูงที่สุด [21]

3.1 สมดุลการดูดซับ

ในการประยุกต์ใช้กระบวนการดูดซับสำหรับการแยกของไหลผสม โดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น จะพิจารณาเฉพาะการดูดซับเชิงกายภาพเท่านั้น ปัจจัยหนึ่งที่ใช้สำหรับพิจารณาความเป็นไปได้ในการแยกของไหลผสมด้วยการดูดซับ คือ สมดุลการดูดซับ ซึ่งจะมีชื่อเรียกแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ควบคุมไว้ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือ ปริมาณการดูดซับ เป็นต้น

โดยทั่วไปเมื่อปล่อยให้ตัวถูกดูดซับสัมผัสสารถูกดูดซับในช่วงระยะเวลาที่นานอย่างเพียงพอจะเกิดสภาวะสมดุลขึ้น เรียกว่า สมดุลการดูดซับ ซึ่งในขณะนั้นปริมาณสารถูกดูดซับที่ถูกดูดซับจะสมดุลกับปริมาณสารถูกดูดซับที่ถูกปลดปล่อย (Desorption) ในวัฏภาคของของไหล และสำหรับกรณีดูดซับแก๊สสมดุลการดูดซับขึ้นอยู่กับคู่ของตัวดูดซับ และสารถูกดูดซับ ความดัน อุณหภูมิ และ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคแก๊ส โดยจะดูดซับได้ดีขึ้นเมื่อความดัน หรือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคแก๊สเพิ่มขึ้น แต่จะดูดซับได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งสมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิของระบบคงที่ เรียกว่า ไอโซเทิร์ม (Isotherm) โดยอาจมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือไม่ก็ได้ โดยไอโซเทิร์มที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมีดังนี้ [21,22,23]

3.1.1 ไอโซเทิร์มเชิงเส้น (Linear Isotherm)

ที่ภาวะสมดุลภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง หรือ ในกรณีที่สารถูกดูดซับมีปริมาณน้อยๆ สารที่ถูกดูดซับมักมีพฤติกรรมคล้ายแก๊สอุดมคติซึ่งมีผลให้แต่ละโมเลกุลที่ถูกดูดซับจะไม่ส่งผลกระทบต่อโมเลกุล

อื่นที่ถูกดูดซับไปแล้ว ซึ่งปริมาณสารที่ถูกดูดซับไว้ เป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารนั้นในของไหล สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$q = K_H c \tag{3.1}$$

โดยที่ K_H คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ ซึ่งความสัมพันธ์เชิงเส้นดังกล่าวสอดคล้องตามกฎของเฮนรี่ (Henry's Law) โดยในกรณีที่สารถูกดูดซับมีความเข้มข้นต่ำๆ โมเลกุลของสารจะมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับแก๊สอุดมคติมาก ดังนั้น ไอโซเทิร์มการดูดซับชนิดนี้จึงประยุกต์ใช้ได้ดีกับกรณีที่ มีปริมาณการดูดซับน้อยๆ หรือ สารถูกดูดซับที่มีความเข้มข้นเจือจาง

เนื่องจากการดูดซับเป็นปรากฏการคายความร้อน ดังนั้น ค่าคงที่สมดุลการดูดซับจึงขึ้นกับอุณหภูมิเท่านั้น โดยสอดคล้องตามสมการของ แวนต์ฮอฟฟ์ (Van't Hoff) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{d\ ln K}{dT} = \frac{\Delta H}{RT^2} \tag{3.2}$$

โดยที่ ΔH คือ ปริมาณความร้อนของการดูดซับ ซึ่งกรณีที่ปริมาณความร้อนของการดูดซับไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ทำการอินทิเกรทสมการที่ 3.2 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K$ และ $1/T$ เป็นเส้นตรง โดยปริมาณความร้อนของการดูดซับจะคำนวณได้จากความชันของกราฟเชิงเส้นดังกล่าว

3.1.2 ไอโซเทิร์มที่ไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear Isotherm)

สำหรับระบบการดูดซับที่สารที่ถูกดูดซับมีความเข้มข้นสูง สารที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวตัวดูดซับมักมีปริมาณมาก แน้วโน้มของไอโซเทิร์มจึงมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรงซึ่งไอโซเทิร์มที่มีลักษณะดังกล่าวที่ใช้กันทั่วไปคือ ไอโซเทิร์มแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) ไอโซเทิร์มฟรอยดลิช (Freundlich Isotherm) และ ไอโซเทร์ม บี.อี.ที (BET Isotherm)

ไอโซเทิร์มแลงเมียร์

แนวความคิดของการดูดซับตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า การดูดซับเสมือนการเกิดปฏิกิริยาเคมี แก๊สที่ถูกดูดซับมีพฤติกรรมแบบแก๊สอุดมคติเมื่ออยู่ในวัฏภาคแก๊ส พื้นผิวของตัวดูดซับทั้งหมดมีคุณสมบัติเหมือนกัน โมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ ไม่ได้เคลื่อนที่ไปทั่วทั้งพื้นผิวบนพื้นผิว ดังนั้น โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจึงเกาะ ติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น หรือเป็นการดูดซับเพียงชั้นเดียว อย่างไรก็ตามแต่ละโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้แล้ว จะไม่มีผลกระทบต่อการดูดซับของโมลกุลอื่นๆ ซึ่งคล้ายกับแนวความคิดของการดูดซับสารละลายเจือจางตามกฎของเฮนรี่ โดยไอโซเทิร์ม

สำหรับการดูดซับแก๊สซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณแก๊สที่ถูกดูดซับ กับความเข้มข้นของแก๊สถูกดูดซับ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{q}{q_s} = \frac{K_L\, c}{1 + K_L\, c} \tag{3.3}$$

ที่สภาวะอุณหภูมิที่กำหนด เมื่อความเข้มข้นของแก๊สที่ถูกดูดซับในวัฏภาคแก๊สเพิ่มขึ้นปริมาณการดูดซับจะเข้าใกล้ปริมาณการดูดซับสูงสุด (q_s) ซึ่งเทียบเท่ากับพื้นที่ผิวทั้งหมดสำหรับการดูดซับแก๊สชนิดนั้นในขณะที่ K_L คือค่าคงที่สมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ซึ่งเท่ากับสัดส่วนของค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ ต่อ ค่าคงที่ของอัตราการคายการดูดซับ นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่าไอโซเทิร์มของแลงเมียร์จะลู่เข้าสู่ไอโซเทิร์มเชิงเส้นเมื่อความเข้มข้นของแก๊สที่ถูกดูดซับเจือจาง และค่าคงที่สมดุลการดูดซับของแลงเมียร์จะมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่สมดุลการดูดซับของเฮนรี่ ดังนี้

$$\lim_{c \to 0} \frac{q}{c} = q_s\, K_L = K_H \tag{3.4}$$

ไอโซเทิร์มฟรอยดลิช

ไอโซเทิร์มฟรอยดลิชสามารถอธิบายในกรณีที่เกิดการดูดซับแบบหลายชั้น โดยเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้นปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นแบบไม่มีขีดจำกัด ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปของสมการสมดุลการดูดซับที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่ถูกดูดซับ กับ ความเข้มข้นของแก๊สที่ถูกดูดซับ อยู่ในรูปของสมการโพลิโนเมียล ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการทดลอง สามารถเขียนได้ดังนี้

$$q = K_F\, c^{\frac{1}{n}} \tag{3.5}$$

โดยที่ K_F คือค่าคงที่สมดุลการดูดซับของฟรอยดลิช และ n คือค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งมีค่ามากกว่า 1

จากสมการพบว่าปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างไม่จำกัดเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ จึงไม่สามารถใช้ไอโซเทิร์มฟรอยดลิชอธิบายกระบวนการดูดซับในกรณีที่มีความเข้มข้นของสารถูกดูดซับสูงๆได้

ไอโซเทิร์ม บี.อี.ที.

ในปี คศ. 1938 Brunauer, Emmett และ Teller ได้ทำการปรับปรุงสมการของแลงเมียร์ เพื่อให้อธิบายการดูดซับแบบเกิดการดูดซับหลายชั้นได้ โดยข้อสมมุติฐานเบื้องต้นของสมการนี้คือ โมเลกุลที่ดูดซับในชั้นแรกจะเป็นพื้นผิวในการเกาะของสารที่ถูกดูดซับในชั้นที่สอง และชั้นถัดๆไป โดยเฉพาะการดูดซับบนโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ก่อน ต้องเป็นการซ้อนกันในแนวที่ตั้งฉากกับพื้นผิวของตัวดูดซับ ในขณะที่โมเลกุลใหม่แต่ละโมเลกุลสามารถที่จะเลือกบริเวณการดูดซับได้อย่างอิสระ แตกต่างจากในชั้นแรกที่โมเลกุลสัมผัสกับพื้นผิวของตัวดูดซับโดยตรง นอกจากนี้แต่ละโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่ส่งผลกระทบต่อการดูดซับของโมเลกุลอื่นๆ สมการการดูดซับที่สมดุลสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{q}{q_s} = \frac{PK_{BET}}{P_s(1-\frac{P}{P_s})(1-\frac{P}{P_s}+\frac{K_{BET}P}{P_s})} \tag{3.6}$$

โดยที่ q_s คือ ปริมาณการดูดซับเต็มพื้นผิวของตัวดูดซับ หรือบนพื้นผิว 1 ชั้น K_{BET} คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับตามแนวความคิดของ BET และ P_s คือ ค่าความดันไออิ่มตัวของตัวถูกดูดซับ ที่อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ โดยสมการนี้ใช้อธิบายการดูดซับทางกายภาพ ที่มีค่าความดันลดอยู่ในช่วง $0.35 < \frac{P}{P_s} < 0.5$

3.2 การวัดสมดุลการดูดซับ

ภายใต้สภาวะสมดุลของระบบการดูดซับ ปริมาณของสารถูกดูดซับที่ถูกดูดซับไว้ จะสมดุลกับปริมาณสารถูกดูดซับนั้นที่อยู่ในวัฏภาคแก๊ส ซึ่งสามารถวัดได้โดยตรงด้วยการวัดปริมาณของสารถูกดูดซับที่หลืออยู่ในวัฏภาคแก๊ส หรือ ปริมาณของสารถูกดูดซับที่อยู่บนตัวดูดซับ โดยการวัดโดยตรงนี้เหมาะกับในกรณีที่สารที่ถูกดูดซับมีความเข้มข้นสูง หรือ มีปริมาณในการดูดซับมากๆ การวัดโดยตรงที่ใช้โดยทั่วไปมี 2 วิธีคือ วิธีเชิงปริมาตร (Volumetric method) หรือ วิธีเชิงน้ำหนัก (Gravimetric method) ในกรณีที่ปริมาณการดูดซับน้อยหรือความเข้มข้นของสารถูกดูดซับต่ำๆอาจวัดได้โดยทางอ้อม ด้วยวิธีโครมาโทการฟี (Chromatographic method) โดยการวัดเวลาที่ใช้ในการดูดซับแล้วนำมาคำนวณค่าคงที่สมดุลการดูดซับต่อไป

วิธีเชิงปริมาตร

ในการที่จะเร่งให้ระบบเข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้นสามารถทำได้โดยทำให้ระบบมีสภาวะใกล้ๆสูญญากาศสัมบูรณ์ และ บรรจุตัวดูดซับสำหรับวัดสมดุลซึ่งผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้ว (Regenerate) จากนั้นทำการป้อนสารถูกดูดซับเข้าสู่ระบบการดูดซับที่เป็นระบบปิด ซึ่งทราบปริมาตรที่แน่นอน และสามารถควบคุมอุณหภูมิของระบบได้ การวัดสมดุลการดูดซับสามารถทำได้โดยวัดปริมาณการดูดซับ

ซึ่งสามารถคำนวณได้จากผลต่างของปริมาณสารถูกดูดซับที่ป้อนเข้า และ ที่เหลืออยู่ในระบบหลังการดูดซับเข้าสู่สมดุล ซึ่งพิจารณาได้จาก ความดัน ปริมาตร และ อุณหภูมิของระบบ โดยมีหลักการเดียวกับการทำงานของครื่อง BET

วิธีเชิงน้ำหนัก

การวัดสมดุลการดูดซับ ทำได้เช่นเดียวกับวิธีเชิงปริมาตร โดยการทำให้สภาวะของระบบใกล้ๆ สูญญากาศสัมบูรณ์ ทำการทดลองในระบบปิด สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ แตกต่างกันที่ปริมาณการดูดซับสามารถวัดด้วยน้ำหนักของแก๊สที่ถูกดูดซับที่สมดุลบนตัวดูดซับ โดยการชั่งน้ำหนักตัวดูดซับที่เปลี่ยนไป ณ. สภาวะสมดุล โดยเครื่องชั่งสูญญากาศ (Micro-vacuum balance) ที่ใช้ต้องมีความแม่นยำสูงซึ่งสามารถวัดปริมาณการดูดซับได้ละเอียดถึง 0.1 ไมโครกรัม

วิธีโครมาโทกราฟี

ในกรณีที่สารที่ถูกดูดซับมีความเข้มข้นต่ำๆ หรือ มีปริมาณในการดูดซับน้อยๆทำให้ค่าที่ได้จากการวัดโดยตรงให้ข้อมูลที่ไม่น่าเชื่อถือ จึงต้องทำการวัดสมดุลการดูดซับด้วยวิธีทางอ้อม โดยที่สภาวะความดันปกติ แก๊สถูกดูดซับที่มีความเข้มข้นต่ำๆจะถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซับที่มีตัวดูดซับบรรจุอยู่ในลักษณะเป็นช่วงๆ (Pulse injection) โดยให้แก๊สที่ถูกดูดซับไหลไปพร้อมกับแก๊สตัวพา (Carrier gas) แล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์โดยใช้วิธีทางโมเมนต์ (Moment analysis)

การวิเคราะห์โดยวิธีโมเมนต์

การวิเคราะห์โดยวิธีโมเมนต์สามารถทำได้โดยใช้โครมาโทแกรมที่ได้จากการป้อนแก๊สถูกดูดซับเข้าสู่หอดูดซับในเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี นำมาวิเคราะห์หาค่าเวลาเฉลี่ยของตัวถูกดูดซับในหอดูดซับแบบถ่วงน้ำหนัก หรือ ค่าโมเมนต์สัมบูรณ์อันดับที่ 1 (t_r, Weighted mean residence time) โดยสามมารถคำณวนได้จากสมการ [21]

$$t_r = \frac{\int_0^\infty c\,(t)tdt}{\int_0^\infty c(t)dt} \approx \frac{\sum t_i c_i \Delta t_i}{\sum c_i \Delta t_i} \tag{3.7}$$

จากนั้นนำค่าโมเมนต์สัมบูรณ์อันดับที่ 1 ที่ได้ไปคำนวณหาค่าคงที่สมดุลการดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทิร์มเชิงเส้น โดยอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง ช่วงเวลาเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก และค่าคงที่สมดุลการดูดซับ ซึ่งสามารถเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้ [24]

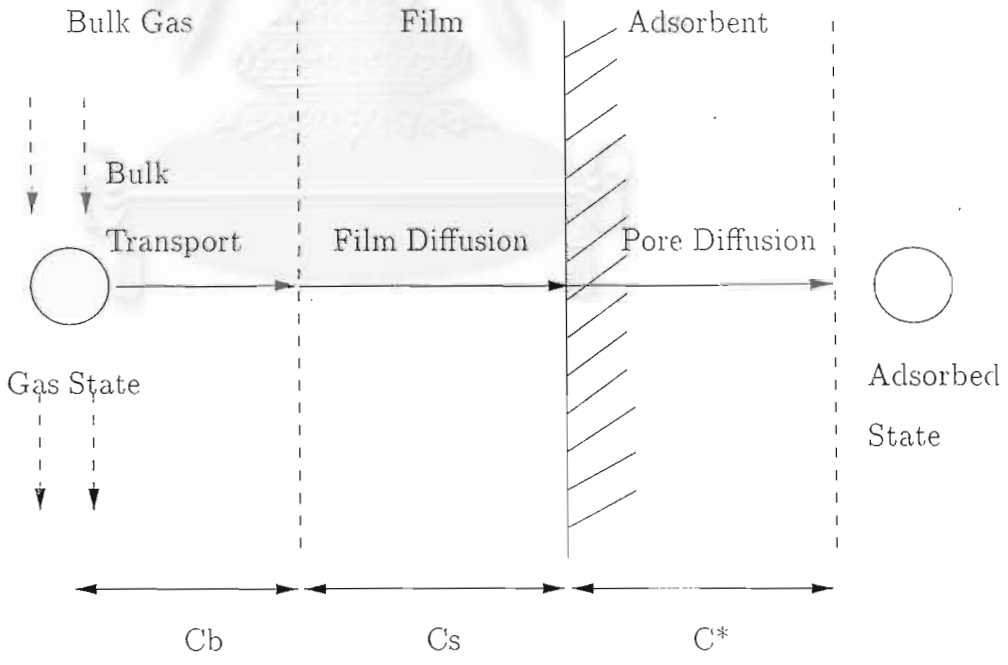
$$t_r = \frac{L}{v}\left(1 + (\frac{1-\epsilon}{\epsilon})K_H\right) \tag{3.8}$$

เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นจากการทดลองทำได้โดย การเปลี่ยนอัตราการไหลของแก๊สพาที่ใช้หลายๆค่า และ นำค่าเวลาเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักที่อัตราการไหลต่างๆที่ได้มาคำณวนหาค่าคงที่สมดุลการดูดซับ โดยสามารถคำณวนได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก กับ ส่วนกลับของความเร็วของแก๊สพา ดังสมการที่ 3.8

3.3 กลไกการดูดซับ

เนื่องจากการดูดซับส่วนมากเกิดขึ้นที่ภายในบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับ ดังนั้นอัตราการดูดซับจึงขึ้นกับอัตราการแพร่ของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไปบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งอาจเป็นพื้นผิวภายนอก หรือ พื้นผิวภายใน โดยโมเลกุลของสารในวัฏภาคแก๊สจะแพร่ไปบนพื้นผิวของตัวดูดซับโดยผ่านชั้นฟิล์มรอบตัวดูดซับ (external film) รูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) รูพรุนขนาดเล็ก (micropore) และ แพร่ลงบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับของสารชนิดนั้น

นอกจากนี้ ขนาดสัมพัทธ์ระหว่างขนาดและรูปร่างของของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ กับขนาดและรูปร่างของรูพรุนของตัวดูดซับ มีผลต่ออัตราการดูดซับด้วย ตลอดจนมีผลต่อการเลือกดูดซับโมเลกุลของสารที่มีขนาด หรือรูปทรงที่เหมาะสม เช่น โมเลกุลทรงกลม โมเลกุลเส้นตรง หรือ โมเลกุลวงแหวน เป็นต้น



รูปที่ 3.1: กลไกการดูดซับของโมเลกุลในวัฏภาคแก๊สบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.1 การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม

ในกรณีที่ขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ อัตราการดูดซับสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารได้ดังนี้ [24]

$$R_{ads} = (k_f a)\frac{1}{\rho_s}\left(\frac{\epsilon}{1-\epsilon}\right)(c_b - c_s) \tag{3.9}$$

โดยที่ k_f คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารผ่านฟิล์ม และ a เป็นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะภายนอกของตัวดูดซับ

3.3.2 การแพร่ผ่านรูพรุน

ในกรณีที่ขั้นตอนการแพร่ผ่านรูพรุนเป็นขั้นตอนที่ช้าที่สุด อัตราการดูดซับสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารได้ดังนี้ [24]

$$R_{ads} = (k_p a_s)\frac{1}{\rho_s}\left(\frac{\epsilon}{1-\epsilon}\right)(c_s - c^*) \tag{3.10}$$

โดยที่ k_p คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารผ่านรูพรุน และ a_s เป็นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ เนื่องจากค่า k_p ซึ่งสามารถหาได้จากการทำการทดลองเท่านั้น มีความยุ่งยาก และ ซับซ้อนในการหา เพื่อความสะดวกจึงใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารรวม (k_o) แทน ซึ่งได้จากการรวมสมการที่ 3.9 กับสมการที่ 3.10 โดยสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการดูดซับได้ดังนี้ [24]

$$R_{ads} = k_o(c_s - c^*) \tag{3.11}$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารรวมสามารถหาได้โดยง่ายจากการทำการทดลองด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี โดยนำโครมาโทแกรมที่ได้มาคำณวนด้วยวิธีทางโมเมนต์ โดยจะได้ค่าโมเมนต์กลางอันดับที่สอง ดังสมการต่อไปนี้ [21]

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^\infty c(t)(t-t_r)^2 dt}{\int_0^\infty c(t)dt} \approx \frac{c_i(t_i - t_r)^2 \Delta t_i}{c_i \Delta t_i} \tag{3.12}$$

จากค่าโมเมนต์กลางอันดับที่สอง สามารถนำไปคำนวณหาค่า k_o ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารรวม และค่าโมเมนต์กลางอันดับที่สอง สามารถเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้ [24]

$$\frac{\sigma^2}{2t_r^2}\frac{L}{v} = D_L\left(\frac{1}{v^2}\right) + \left(\frac{\epsilon}{1-\epsilon}\right)\left(\frac{1}{k_0 K_H}\right)\left(1+\frac{\epsilon}{(1-\epsilon)K_H}\right)^{-2} \tag{3.13}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การดำเนินงานวิจัย

ในส่วนของการดำเนินงานวิจัยจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ การเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่าน การทดสอบคุณสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่าน การวิเคราะห์การดูดซับระหว่างตัวดูดซับที่เตรียมได้กับไอเบนซีนเจือจาง

4.1 การเตรียมตัวดูดซับ

ในการศึกษานี้ได้เลือกเปลือกถั่วลิสงซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร หาได้ง่าย และ มีราคาถูกมาใช้ในการเตรียมตัวดูดซับ โดยสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้เลือกใช้สารละลายกรดฟอสฟอริก เนื่องจากสามารถให้พื้นที่ผิวของวัตถุดิบที่สูงและใช้อุณหภูมิในการเผาต่ำ โดยการทดลองนี้จะศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรชนิดต่างๆที่มีผลในการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านจากเปลือกถั่วลิสงโดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก, อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

4.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งที่มีความแม่นยำ 3 ตำแหน่ง
2. บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. แท่งแก้วคนสาร
4. ครูซิเบิล
5. เตาเผา รุ่น FP21
6. กรวยกรองขนาด 1 ลิตร
7. ปั๊มสูญญากาศ
8. จานแก้ว
9. เตาอบ

10. เดซิกเคเตอร์

4.1.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก

1. บดเปลือกถั่วลิสงที่นำมาทำการทดลองให้ละเอียดเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา
2. นำเปลือกถั่วลิสงในข้อ 1. ผสมกับสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 20% โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนเปลือกถั่วลิสง 1 ส่วนต่อสารละลายกรดฟอสฟอริก 3 ส่วน คลุกเคล้าให้เข้ากันแล้วนำไปใส่ในครูซิเบิล
3. นำครูซิเบิลที่บรรจุตัวอย่างในข้อ 2. ไปใส่ในเตาไฟฟ้า รุ่น FP 21 โดยตั้งอุณหภูมิในการเผาที่ 200 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่กำหนดเริ่มทำการจับเวลา โดยใช้เวลาในการเผา 120 นาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็นในเตาเผา
4. นำตัวอย่างที่เตรียมได้ในครูซิเบิลไปล้างด้วยน้ำร้อนจนน้ำที่ล้างไม่มีความเป็นกรดเหลืออยู่ โดยทดสอบจากการเปลี่ยนสีของกระดาษลิตมัส
5. นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ทิ้งให้เย็นในเดซิกเคเตอร์แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าร้อยละของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้
6. เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกใหม่เป็น 30%, 40%, 50% และ 60% โดยน้ำหนัก แล้วดำเนินการทดลองตามข้อ 1–6 ใหม่เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกต่อคุณสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้

4.1.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

1. บดเปลือกถั่วลิสงที่นำมาทำการทดลองให้ละเอียดเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา
2. นำเปลือกถั่วลิสงในข้อ 1. ผสมกับสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 30% โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนเปลือกถั่วลิสง 1 ส่วนต่อสารละลายกรดฟอสฟอริก 3 ส่วน คลุกเคล้าให้เข้ากันแล้วนำไปใส่ในครูซิเบิล
3. นำครูซิเบิลที่บรรจุตัวอย่างในข้อ 2. ไปใส่ในเตาเผาโดยตั้งอุณหภูมิในการเผาที่ 150 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่กำหนดเริ่มทำการจับเวลา โดยใช้เวลาในการเผา 120 นาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็นในเตาเผา
4. นำตัวอย่างที่เตรียมได้ในครูซิเบิลไปล้างด้วยน้ำร้อนจนน้ำที่ล้างไม่มีความเป็นกรดเหลืออยู่ โดยทดสอบจากการเปลี่ยนสีของกระดาษลิตมัส

5. นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ทิ้งให้เย็นในเดซิกเคเตอร์แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าร้อยละของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้

6. เปลี่ยนอุณหภูมิในเตาเผาใหม่เป็น 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส แล้วดำเนินการทดลองตามข้อ 1–6 ใหม่เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อคุณสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้

4.1.4 การศึกษาผลของช่วงเวลาสำหรับการเผา

1. บดเปลือกถั่วลิสงที่นำมาทำการทดลองให้ละเอียดเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา

2. นำเปลือกถั่วลิสงในข้อ 1. ผสมกับสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 30% โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนเปลือกถั่วลิสง 1 ส่วนต่อสารละลายกรดฟอสฟอริก 3 ส่วน คลุกเคล้าให้เข้ากันแล้วนำไปใส่ในครูซิเบิล

3. นำครูซิเบิลที่บรรจุตัวอย่างในข้อ 2. ไปใส่ในเตาเผาโดยตั้งอุณหภูมิในการเผาที่ 350 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเผา 15 นาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็นในเตาเผา

4. นำตัวอย่างที่เตรียมได้ในครูซิเบิลไปล้างด้วยน้ำร้อนจนน้ำที่ล้างไม่มีความเป็นกรดเหลืออยู่

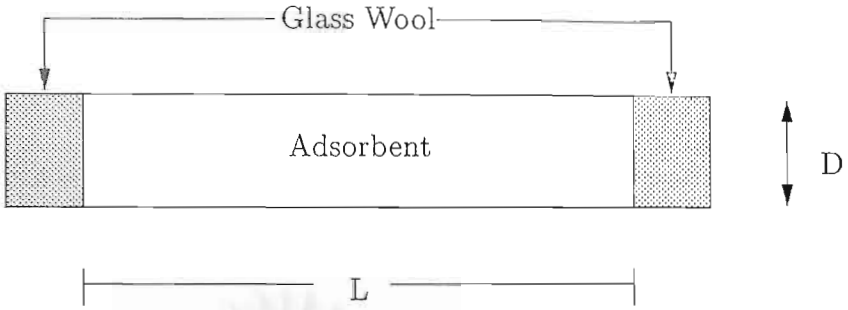
5. นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ทิ้งให้เย็นในเดซิกเคเตอร์แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าร้อยละของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้

6. เปลี่ยนเวลาในการเผาใหม่เป็น 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที และ 120 นาที แล้วดำเนินการทดลองตามข้อ 1–6 ใหม่เพื่อศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อคุณสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้

4.2 การตรวจสอบลักษณะสมบัติของตัวดูดซับ

ในส่วนของการทดสอบคุณสมบัติของตัวดูดซับจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ การศึกษาโครงสร้างของตัวดูดซับที่เตรียมได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอน การทดสอบหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และการทดสอบหาค่าการดูดซับไอโอดีน

- ลักษณะพื้นผิวภายนอก ด้วยเครื่อง SEM รุ่น JSM 6400
- พื้นที่ผิวจำเพาะ ด้วยเครื่อง BET รุ่น ASAP 2000
- การดูดซับไอโอดีน ด้วยมาตรฐานของ AWWA B 604–74 [25]



รูปที่ 4.1: คอลัมน์ที่บรรจุด้วยตัวดูดซับชนิดถ่านในการทดลองการดูดซับด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

4.3 การดูดซับไอเบนซีนเจือจาง

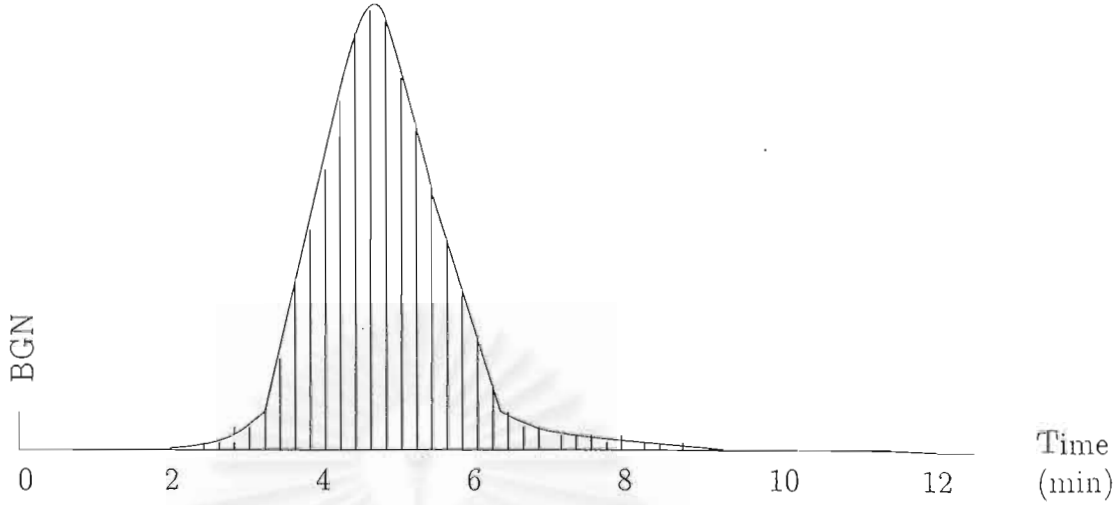
4.3.1 การเตรียมอุปกรณ์การดูดซับ

1. ทำการบดและคัดขนาดตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้ให้มีขนาด 60-80 เมช
2. บรรจุตัวอย่างที่ทำการคัดขนาดแล้วลงในคอลัมน์แสตนเลสสตีลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1/4 นิ้ว โดยมีสารที่ไม่มีผลกับการดูดซับเช่น ใยแก้ว ปิดหัวท้ายเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของตัวดูดซับ ดังรูปที่ 4.1

   โดยที่ความยาวของคอลัมน์ที่ใช้ในการบรรจุตัวดูดซับต้องเลือกความยาวที่เหมาะสม ทำได้โดยนำไปทดสอบการดูดซับด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี สังเกตโครมาโทแกรมที่ได้ให้มีลักษณะสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยทำการเปลี่ยนความยาวของคอลัมน์จนกว่าจะได้โครมาโทแกรมที่มีลักษณะสมมาตร เพื่อให้ได้โครมาโทแกรมที่เหมาะสมในการนำไปคำนวณค่าคงที่สมดุลการดูดซับด้วยวิธีทางโมเมนต์
3. บันทึกค่าน้ำหนักตัวดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของตัวดูดซับ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1 [21]

$$\rho_p = \frac{\rho_b}{(1-\epsilon)} \tag{4.1}$$

โดย ρ_b คือ ความหนาแน่นในส่วนทีบรรจุตัวดูดซับ ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาคตัวดูดซับ และ ϵ คือ ความพรุนของส่วนที่บรรจุตัวดูดซับ



รูปที่ 4.2: โครมาโทแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์การดูดซับด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

โดยความพรุนของส่วนที่บรรจุตัวดูดซับสามารถคำนวณได้จากสมการของ Blake - Kozeney ดังนี้ [24]

$$log\,(\frac{\Delta P}{L})(\frac{d_p}{\rho v^2}) \;=\; -log\,(\frac{d_p \rho v^2}{\mu}) \;+\; log\,(150\frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3}) \qquad (4.2)$$

ซึ่งสามารถคำณวนได้โดยการหาค่าความดันลดของคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลอง โดยวัดเปรียบเทียบกับความดันของคอลัมน์เปล่า จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ในเชิงลอกการิทึม ตามสมการที่ 4.2 โดยความพรุนของส่วนที่บรรจุตัวดูดซับจะสามารถคำณวนได้จากจุดตัดแกน y ของกราฟดังกล่าว

4.3.2 การเตรียมไอเบนซีน

ไอเบนซีนที่ใช้ในการทดลองหาค่าการดูดซับสามารถเตรียมได้โดยใส่เบนซีนปริมาณ 200–250 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่จากนั้นปิดด้วยจุกยางและเคลือบบริเวณรอยต่อด้วยแผ่นพาราฟินให้มิดชิดเพื่อป้องกันการรั่วซึมของไอเบนซีน โดยบริเวณจุกยางทำการติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ และ มานอมิเตอร์ไว้เพื่อวัดอุณหภูมิ และ ความดันของระบบดังแสดงในรูปที่ 4.3

จากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 2–3 วัน เพื่อให้ระบบเข้าสู่สมดุล จากนั้นจึงสามารถนำไอเบนซีนที่ได้มาใช้ในการทำการทดลอง

4.3.3 การวัดค่าคงที่สมดุลการดูดซับ

เครื่องมือการทดลอง

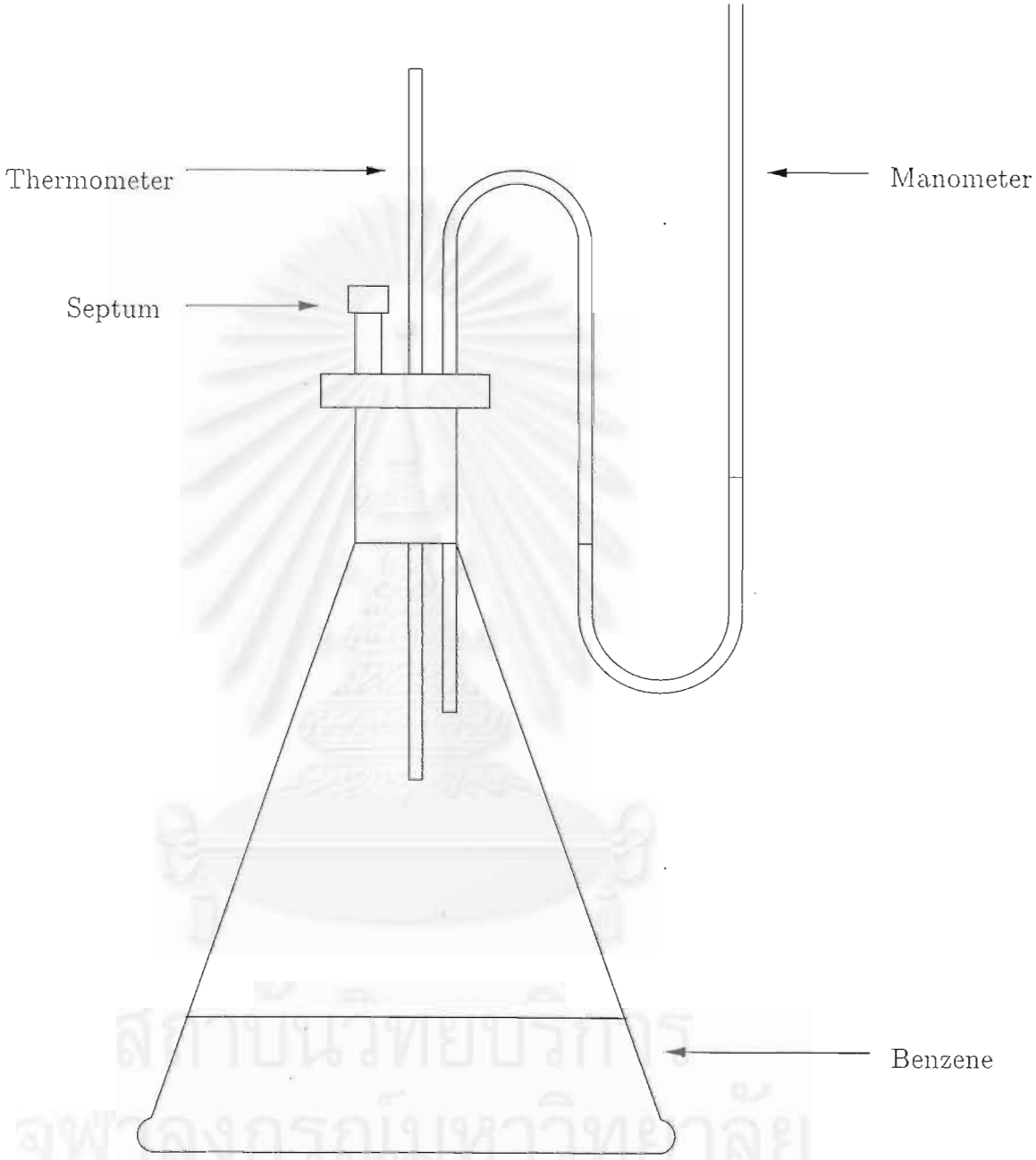
- เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีของ SHIMAZU รุ่น 8A
- เครื่องมือตรวจวัดแบบ วัดการจุดประกายไฟ (Flame Ionization Detector, FID)
- เครื่องแสดงผล (Chromatopac)ของ SHIMAZU รุ่น C-R 6A
- แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สตัวพา

ขั้นตอนการทดลอง

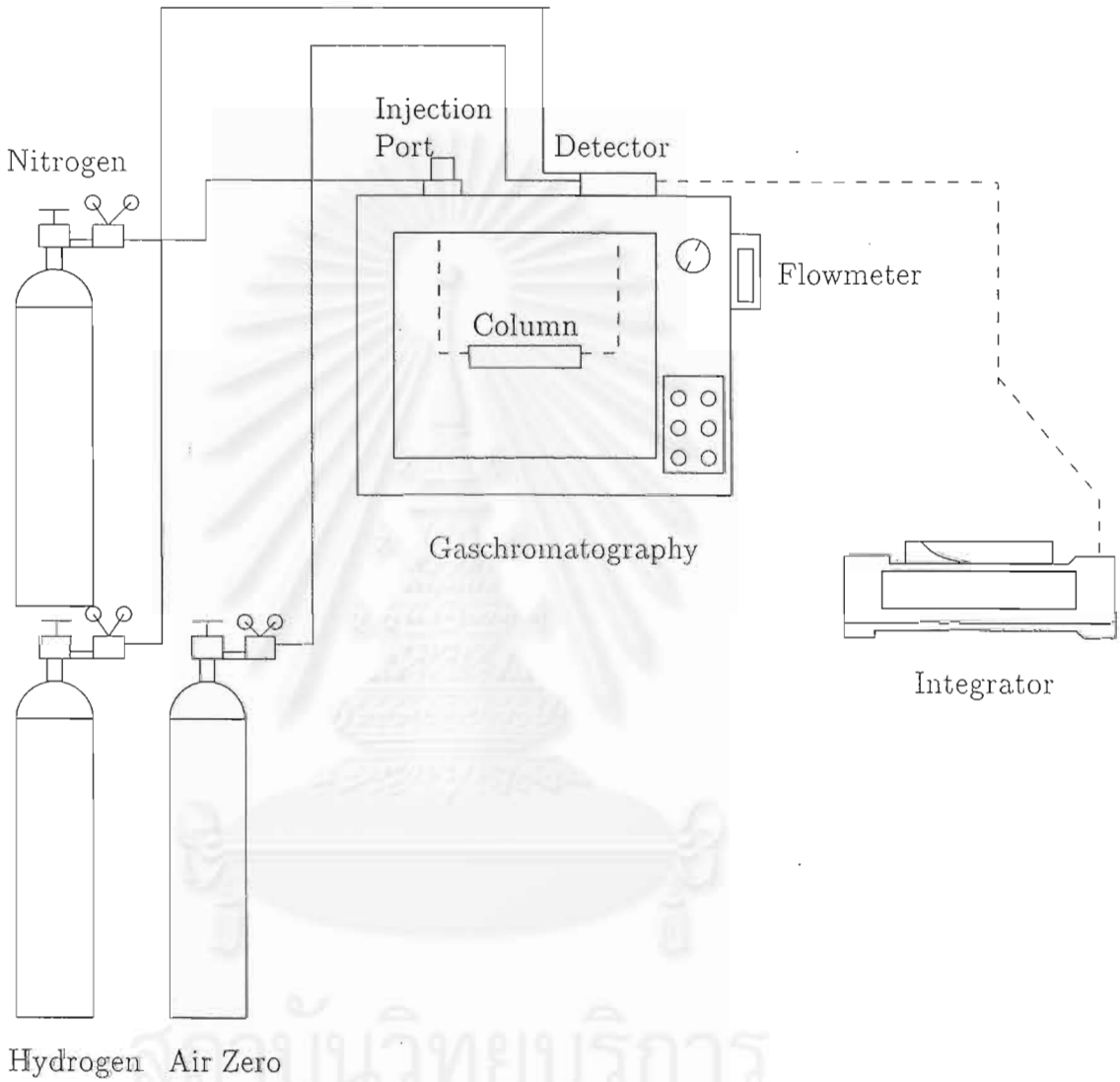
1. ติดตั้งคอลัมน์ที่ความยาวที่เหมาะสมในเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ดังรูปที่ 4.4
2. ตั้งอุณหภูมิของหอดูดซับไว้ที่ 250 องศาเซลเซียส และเปิดให้แก๊สตัวพาไหลผ่านคอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่อยู่ในตัวดูดซับ
3. ป้อนตัวถูกดูดซับแบบเป็นช่วง (Pulse Injection) โดยฉีดไอเบนซีนปริมาณ 100 ไมโครลิตร ให้ไหลไปพร้อมกับแก๊สไนโตรเจน
4. ปรับอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในช่วง 20–100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เพื่อนำโครมาโทแกรมที่ได้ไปคำณวนหาค่าคงที่สมดุลการดูดซับ
5. ปรับอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับในช่วง 180–220 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปคำณวนหาค่าความร้อนของการดูดซับ

นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยวิธีทางโมเมนต์ โดยมีสมมุติฐานว่าเกิดสมดุลการดูดซับแบบเชิงเส้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3: เครื่องมือในการเตรียมไอเบนซีนเพื่อนำไปทดสอบการดูดซับ



รูปที่ 4.4: แผนผังการจัดตั้งเครื่องมือเพื่อศึกษาการดูดซับ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 ลักษณะของตัวดูดซับชนิดถ่าน

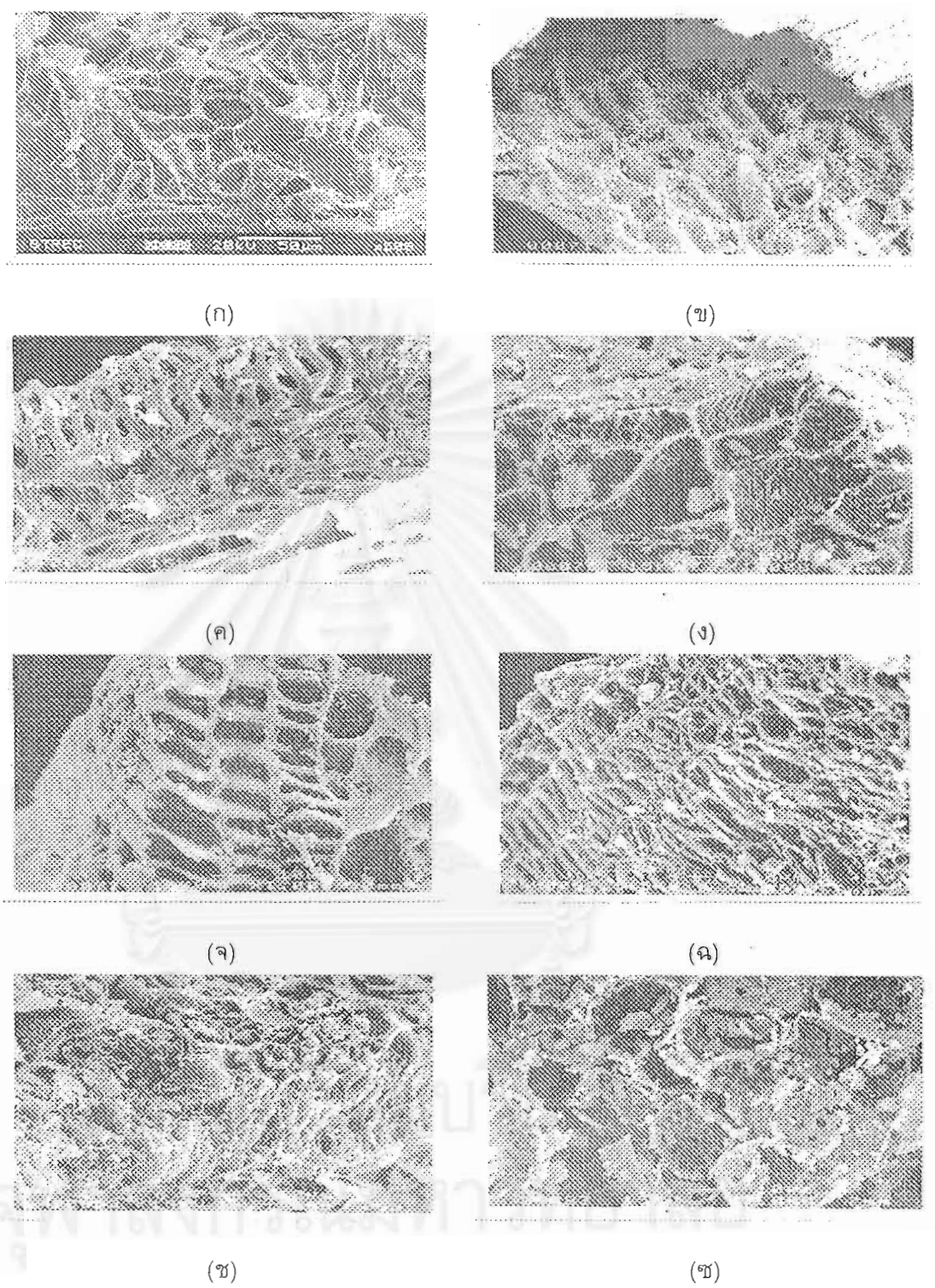
จากการศึกษากระบวนการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านจากเปลือกถั่วลิสงด้วยเตาไฟฟ้ารุ่น FP 21 โดยใช้เปลือกถั่วลิสงที่บดให้มีขนาด 20-40 เมช โดยประมาณ แช่ในสารละลายกรดฟอสฟอริกใส่ในครูซิเบิล แล้วนำไปเผาในเตาไฟฟ้าโดยเริ่มให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่กำหนด ซึ่งใช้เวลา 15-30 นาที โดยประมาณ แล้วจึงเผาต่อเนื่อง ณ อุณหภูมิที่กำหนด ภายในช่วงเวลาที่กำหนดแล้วทิ้งให้เย็นภายในเตา จากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่า ความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก อุณหภูมิของการเผา และ ช่วงเวลาของการเผา ส่งผลกระทบต่อ ลักษณะพื้นผิวภายนอก ร้อยละของผลผลิต พื้นที่ผิวจำเพาะ และ การดูดซับไอโอดีนไอออน ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก

ในการศึกษาวิจัยผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก ได้ทำการทดลองโดยเลือกสภาวะที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเผาในช่วงเวลา 120 นาที โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกที่ 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% และ 85% โดยน้ำหนัก ส่งผลกระทบต่อลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้ดังนี้

ลักษณะพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับ

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัตถุดิบ และ ตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอน ในรูปที่ 5.1 ในรูปที่ 5.1ก เป็นลักษณะพื้นผิวของเปลือกถั่วลิสงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการใดๆ จากรูปพบว่าเปลือกถั่วที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการมีลักษณะพื้นผิวเรียบ ไม่พบว่ามีรูพรุนบนบริเวณพื้นผิว ในรูปที่ 5.1ข เป็นลักษณะพื้นผิวตัวดูดซับที่ได้จากการใช้สารละลาย



รูปที่ 5.1: ลักษณะพื้นผิวของเปลือกถั่วลิสงและตัวดูดซับ ที่เปลี่ยนความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริก (ก):G000 (ข):G125 (ค):225 (ง):G325 (จ):G425 (ฉ):G525 (ช):G625 (ซ):G825

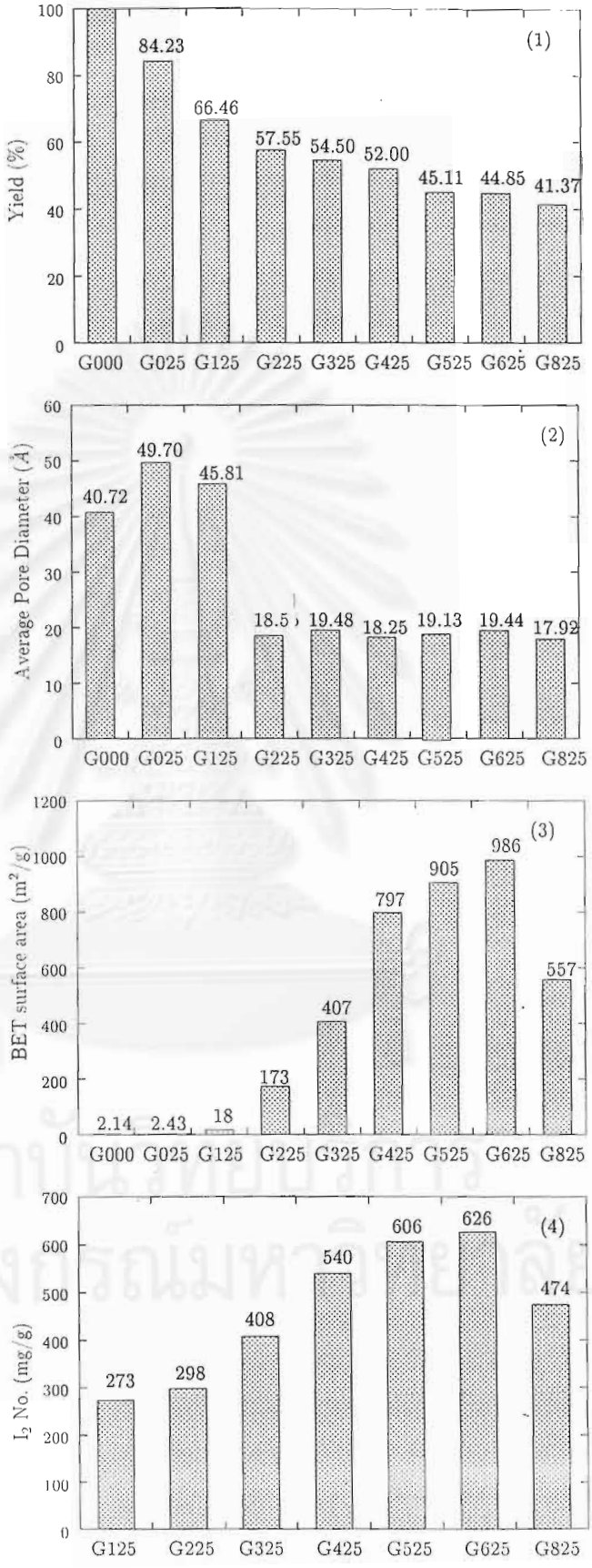
กรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 10% โดยน้ำหนัก ในการทำปฏิกิริยา พบว่าลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับมีความขรุขระมากขึ้น แต่ยังไม่พบว่ามีรูพรุนเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิว เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกเป็น 20% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 5.1ค พบว่าเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงบนบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยจะเริ่มมีรูพรุนเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิว แต่รูพรุนที่เกิดขึ้นยังมีผนังรูพรุนที่ค่อนข้างหนาและมีจำนวนไม่มากนัก

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นเรื่อยๆ จะพบว่าลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้มีจำนวนรูพรุนเพิ่มมากขึ้น และ มีผนังรูพรุนที่บางลงตามความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่เป็นที่น่าสังเกตว่า ที่ความเข้มข้นสารละลายกรดฟอสฟอริก 85% โดยน้ำหนัก พบว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีรูพรุนน้อยลง และลักษณะของพื้นผิวที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับพื้นผิวของตัวดูดซับที่ได้จาก กรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 20% ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าที่สภาวะดังกล่าวความสามารถในการแตกตัวของกรดฟอสฟอริกมีค่าใกล้เคียงกับที่ความเข้มข้น 20% ทำให้ได้ลักษณะพื้นผิวที่ใกล้เคียงกัน

พื้นที่ผิวจำเพาะ และ ค่าการดูดซับไอโอดีน

จากการนำวัตถุดิบ และ ตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเครื่อง BET พบว่าเปลือกถั่วลิสงที่ไม่ผ่านกระบวนการใดเลย และ เปลือกถั่วลิสงที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที โดยไม่ใส่สารละลายกรดฟอสฟอริก ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่น้อยมาก และมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่ ความชื้นและสารที่ระเหยง่าย ระเหยออกไประหว่างขั้นตอนการเผา โดยที่ในขั้นตอนนี้ยังไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เมื่อทำการเติมสารละลายกรดฟอสฟอริก และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที พบว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และ ค่าการดูดซับไอโอดีน ของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้มีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.2

จากรูปที่ 5.2 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกจาก 10% ถึง 60% โดยน้ำหนัก พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และ ค่าการดูดซับไอโอดีน ของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น โดยได้ร้อยละของผลผลิตที่ลดลง ที่ความเข้มข้นสารละลายกรดฟอสฟอริก 10% โดยน้ำหนัก พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ให้ร้อยละของผลผลิตที่ลดลงมาก เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าวปฏิกิริยาเริ่มเกิดได้ แต่เนื่องจากกรดฟอสฟอริกที่ใส่เข้าไปแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนได้ในปริมาณน้อย อัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงดำเนินไปอย่างช้าๆ ทำให้พื้นที่ผิวไม่เพิ่มขึ้นมากนัก ขณะที่ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกับกรณีของเปลือกถั่วที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเพิ่มพื้นที่ผิว และเปลือกถั่วที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นถ่าน พื้นที่ผิวเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงความเข้มข้นของสารละลายกรด 20% ถึง 60% ตามลำดับ เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายกรดที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณไฮโดรเจนไอออนมากขึ้น จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากยิ่งขึ้น จนกระทั่งเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกเป็น 85% โดยน้ำหนัก จะได้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้มีค่าลดลง โดยตั้งแต่ช่วงความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกสูงกว่า 20% โดยน้ำหนัก จะได้



รูปที่ 5.2: คุณสมบัติของวัตถุดิบและตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากเปลือกถั่วลิสงโดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก(1):ร้อยละของผลผลิต(2):ขนาดรูพรุนเฉลี่ย(3):พื้นที่ผิวจำเพาะ(4):ค่าการดูดซับไอโอดีน

ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้มีค่าใกล้เคียงกันโดยจะอยู่ในช่วง 15–20 $\AA$

จากรูปที่ 5.2 พบว่าค่าปริมาณการดูดซับไอโอดีนของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกเพิ่มขึ้น โดยปริมาณการดูดซับจะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกถึง 85% โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้ แต่จากผลที่ได้ จะพบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนกรณีที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก 10% โดยน้ำหนัก มีค่าไม่ต่างกับกรณีที่ใช้ความเข้มข้นอื่นๆมากนัก เมื่อเทียบกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ เนื่องจากโมเลกุลของไอโอดีนเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ ทำให้โมเลกุลของไอโอดีนไม่สามารถเข้าไปถูกดูดซับในส่วนของพื้นผิวที่มีรูพรุนขนาดเล็กได้ จึงทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนไม่ต่างกันมากนัก

จากผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวแปรหนึ่งในการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่าน โดยที่ความเข้มข้น 10% พบว่ากรดฟอสฟอริกที่ใส่เข้าไปไม่เพียงพอต่อการทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายในช่วงเวลาที่ทำการทดลอง โดยจะเห็นได้จาก ลักษณะพื้นที่ผิว และ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ไม่ต่างจากตอนที่ไม่ใส่สารเคมีลงไปมากนัก แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดสูงขึ้นพบว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงของลักษณะพื้นผิว และ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แสดงว่าปฏิกิริยาเคมีระหว่างเปลือกถั่วลิสง กับ สารละลายกรดฟอสฟอริกเริ่มเกิดอย่างรวดเร็วที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก 20% แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกไปจนถึง 85% พบว่าพื้นที่ผิวที่ได้มีค่าลดลง เนื่องจากที่ความเข้มข้นสูงๆ สารละลายกรดฟอสฟอริกมีความสามารถในการแตกตัวได้ลดลง ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้น้อยลง เป็นสาเหตุให้พื้นที่ผิวจำเพาะที่ได้ลดลง

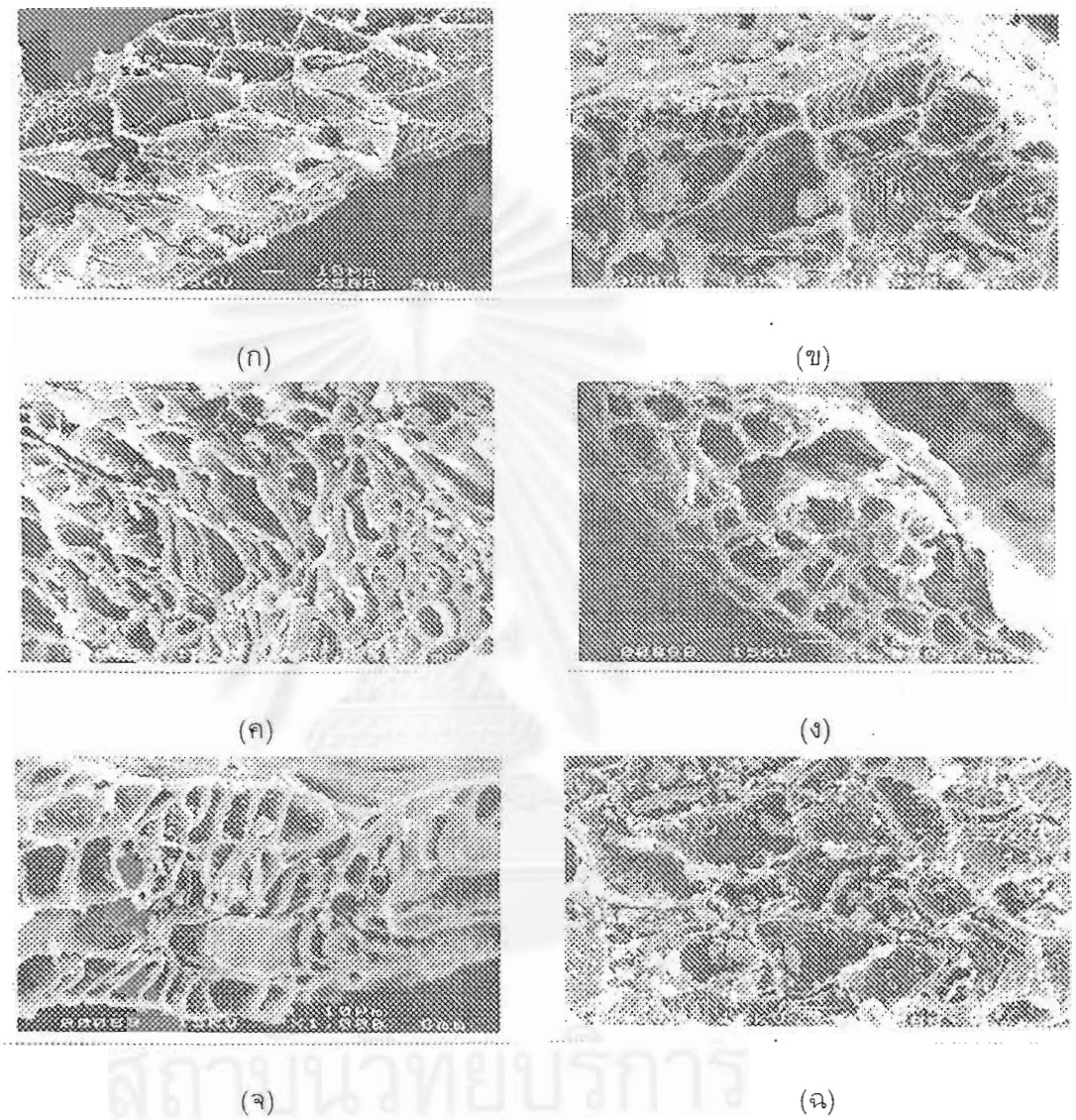
โดยในการทดลองนี้ความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกที่เหมาะสมในการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านจากเปลือกถั่วลิสง ได้แก่ สารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 60% โดยน้ำหนัก

5.1.2 ผลของอุณหภูมิ

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเพิ่มพื้นที่ผิว โดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 30% โดยน้ำหนัก และเผาในช่วงเวลา 120 นาที โดยเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเป็น 150, 200, 250, 300, 350 และ 600 องศาเซลเซียส ส่งผลกระทบต่อลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้ดังนี้

ลักษณะพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับ

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนในรูปที่ 5.3 ในรูปที่ 5.3ก เป็นลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับที่ใช้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในการทำปฏิกิริยา จากรูปพบว่าลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระแต่ยังไม่พบว่ามีรูพรุนเกิดขึ้นบนบริเวณพื้นผิว แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็น 200 องศาเซลเซียส พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงบนบริเวณพื้นผิวเป็นอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 5.3ข โดยพบว่าเริ่มมีรูพรุนขนาดใหญ่



รูปที่ 5.3: ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ ที่ได้จากการเปลี่ยนอุณหภูมิ (ก):G315 (ข):G325 (ค):G335 (ง):G345 (จ):G355 (ฉ):G365

เกิดขึ้น และในรูพรุนขนาดใหญ่มีรูพรุนขนาดเล็กอีกเป็นจำนวนมาก

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นในช่วง 200–350 องศาเซลเซียส พบว่าพื้นผิวของตัวดูดซับที่ได้มีขนาดของรูพรุนที่เล็กลง และ มีจำนวนรูพรุนที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจนถึง 600 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5.3ฉ พบว่าลักษณะของพื้นผิวของตัวดูดซับที่ได้มีจำนวนรูพรุนที่ลดลง โดยลักษณะพื้นผิวมีลักษณะคล้ายกับพื้นผิวของตัวดูดซับในกรณีที่ใช้อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ในการทำปฏิกิริยา

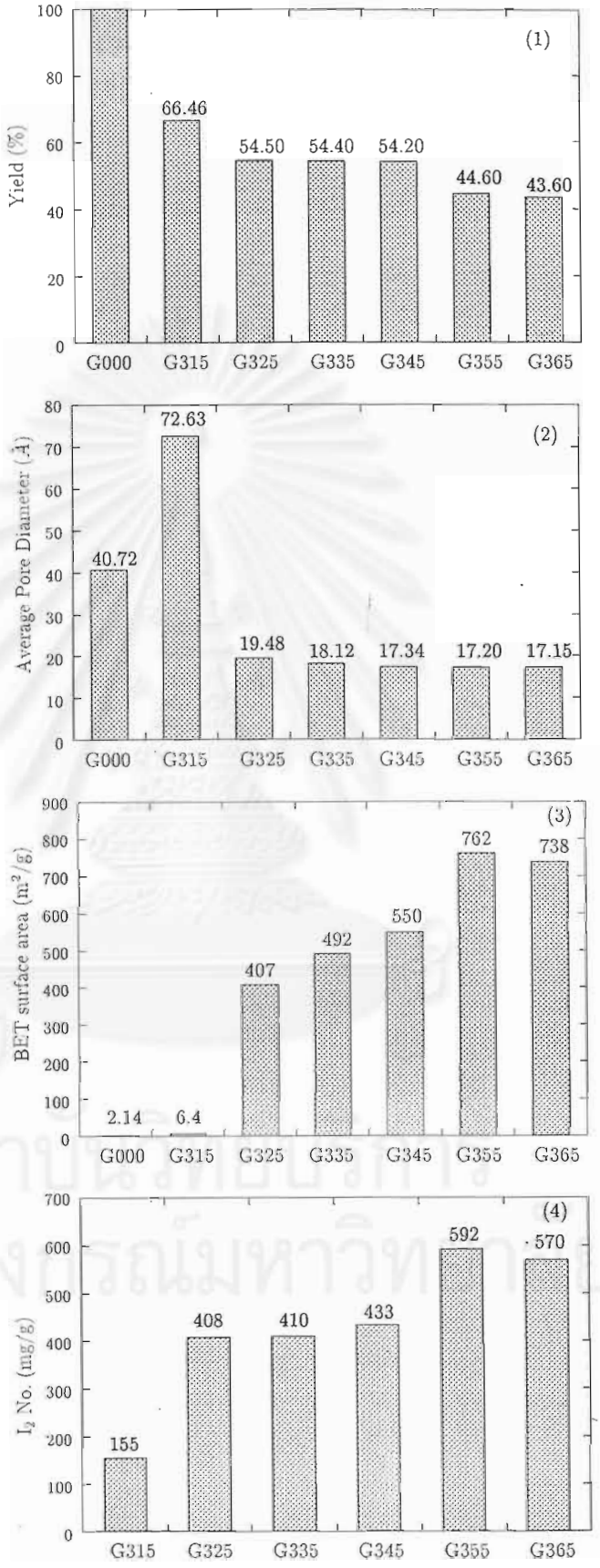
พื้นที่ผิวจำเพาะ และ ค่าการดูดซับไอโอดีน

จากการนำตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้มาวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจะเพาะด้วยเครื่อง BET และ ค่าการดูดซับไอโอดีน พบว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และ ค่าการดูดซับไอโอดีนของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้มีค่าสูงขึ้นในช่วงอุณหภูมิในการเผา 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส และเริ่มมีค่าคงที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาจนถึง 600 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5.4

จากรูปที่ 5.4 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจาก 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ร้อยละของผลผลิตที่ได้มีค่าลดลง โดย ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น เมื่อเทียบกับเปลือกถั่วลิสงในกรณีที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการใดเลย และ เปลือกถั่วลิสงที่ทำการเผาโดยไม่ใส่สารละลายกรดฟอสฟอริก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น พบว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 350 องศาเซลเซียส จนกระทั่งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็น 600 องศาเซลเซียส จะได้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้เริ่มมีค่าคงที่ แต่ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้จะมีค่าใกล้เคียงกันโดยจะอยู่ในช่วง 15–20 $\AA$

จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวแปรหนึ่งในการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านจากเปลือกถั่วลิสงด้วยกรดฟอสฟอริก โดยที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ใช้ยังไม่สูงพอทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังแสดงได้จากรูปที่ 5.3 จะเห็นว่าลักษณะพื้นผิวที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะที่ได้ไม่ต่างจากเปลือกถั่วธรรมดามากนัก ในขณะที่ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิดังกล่าวสารละลายกรดฟอสฟอริกที่ใส่เข้าไป ได้เข้าไปแทรกบริเวณพื้นผิวของเปลือกถั่วลิสง แต่ ปฏิกิริยายังไม่สามารถเกิดได้อย่างเต็มที่ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการเพิ่มพื้นที่ผิว กรดฟอสฟอริกที่แทรกอยู่บริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับ จะถูกล้างออกไปด้วยน้ำร้อน ทำให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเปลือกถั่วลิสงสูงขึ้นในขณะที่ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะไม่เพิ่มขึ้นมากนัก

แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากบนบริเวณพื้นผิว และ พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แสดงว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างเปลือกถั่วลิสงกับ สารละลายกรดฟอสฟอริก เริ่มเกิดได้เร็วขึ้นที่อุณหภูมิตั้งแต่ 200 องศาเซลเซียส โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 350 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.4: คุณสมบัติของวัตถุดิบและตัวดูดซับซนิดถ่านที่เตรียมจากเปลือกถั่วลิสงโดยเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา(1):ร้อยละของผลผลิต(2):ขนาดรูพรุนเฉลี่ย(3):พื้นที่ผิวจำเพาะ(4):ค่าการดูดซับไอโอดีน

เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจนถึง 60๐ องศาเซลเซียส พบว่าพื้นที่ผิวที่ได้มีค่าคงที่ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงๆ กรดฟอสฟอริก และ ฟอสฟอริกแอนไฮไดร์ ซึ่งเป็นสารดูดความชื้น ที่มีหน้าที่แตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนซึ่งเป็นตัวทำปฏิกิริยาเคมีกับเปลือกถั่วลิสงเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อน ทำให้ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นหยุดลง ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะที่ได้มีค่าคงที่

โดยในการทดลองเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านจากเปลือกถั่วลิสงโดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริกนี้ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมคือที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

5.1.3 ผลของเวลา

จากการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 30% โดยน้ำหนัก ใช้อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส โดยเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการทดลองเป็น 15, 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที อธิบายได้จากผลการวิเคราะห์ลักษณะของตัวดูดซับชนิดถ่านดังนี้

ลักษณะพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับ

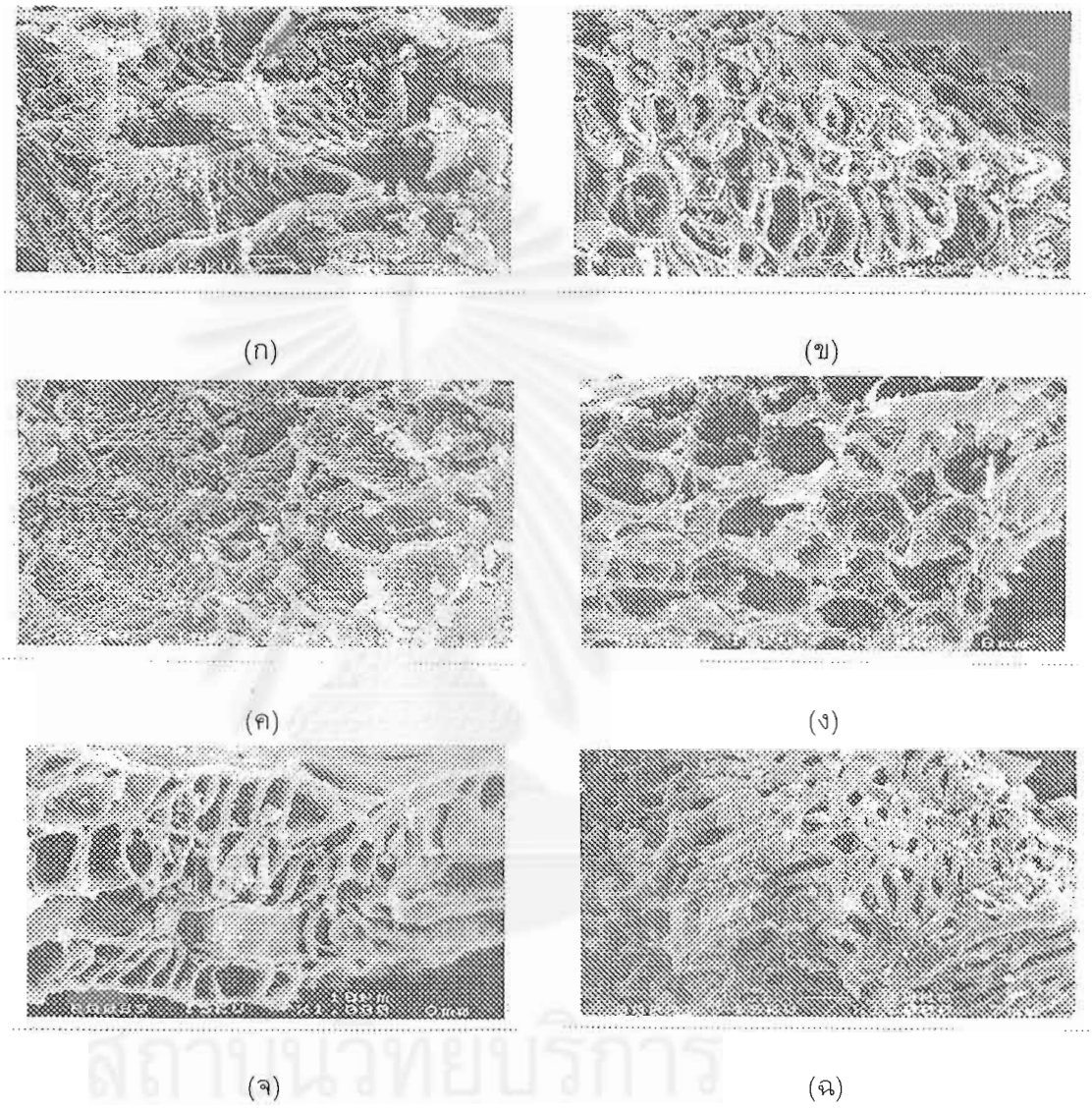
จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอน ในรูปที่ 5.5 พบว่าลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้มีรูพรุนอยู่ทั่วไปบนบริเวณพื้นผิว โดยในรูปที่ 5.5ก เป็นตัวดูดซับที่ได้จากการใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที พบว่าพื้นผิวมีลักษณะเป็นรูพรุนอยู่ทั่วไป เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ในช่วง 15–120 นาที พบว่าลักษณะพื้นผิวมีความพรุนมากขึ้น โดยมีจำนวนรูพรุนมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไปจนถึง 150 นาที พบว่าจำนวนรูพรุนที่ได้ลดลง ผนังของรูพรุนหนาขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.5ฉ

พื้นที่ผิวจำเพาะ และ ค่าการดูดซับไอโอดีน

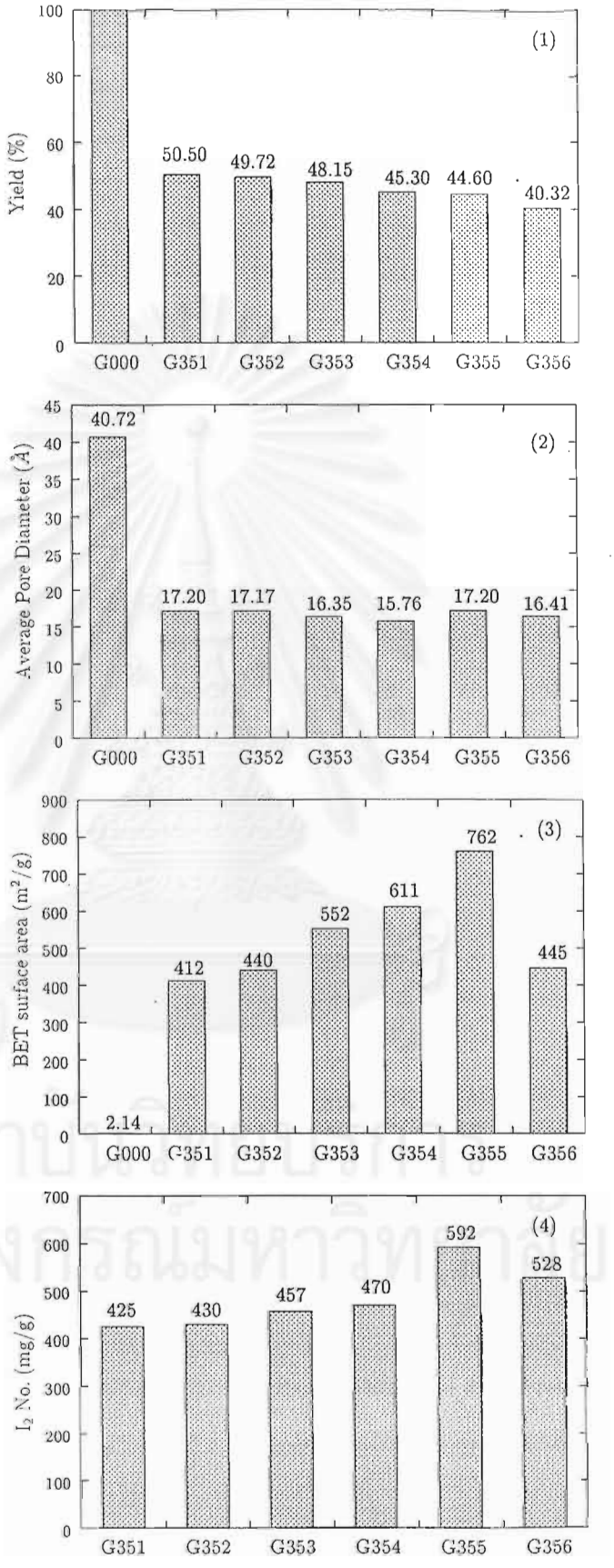
จากการนำตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และ ค่าการดูดซับไอโอดีน พบว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และ ค่าการดูดซับไอโอดีน ของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้มีค่าสูงขึ้นในช่วงเวลาในการเผาตั้งแต่ 15 ถึง 120 นาที และลดลงเมื่อใช้เวลาในการเผา 150 นาที ดังแสดงในรูปที่ 5.6

จากรูปที่ 5.6 เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการเผาจาก 15 ถึง 120 นาที พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับเปลือกถั่วลิสงในกรณีที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการใดเลย และ เปลือกถั่วลิสงที่ทำการเผาโดยไม่ใส่สารละลายกรดฟอสฟอริก โดยการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจะเป็นสัดส่วนกับเวลาที่ใช้ในการเผา จนกระทั่งเมื่อเพิ่มเวลาจนถึง 150 นาที พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้มีค่าลดลง โดยขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับที่เตรียมได้มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน คือ 15–20 Å

จากผลการทดลองพบว่า เวลาที่ใช้ในการเผาเป็นตัวแปรที่ไม่มีผลมากนักในการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านจากเปลือกถั่วลิสงด้วยกรดฟอสฟอริก โดยเป็นไปได้ว่าปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น อาจจะเกิดขึ้นได้ในช่วงเวลาระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิ ไปสู่อุณหภูมิที่กำหนด ทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับพิ่ม



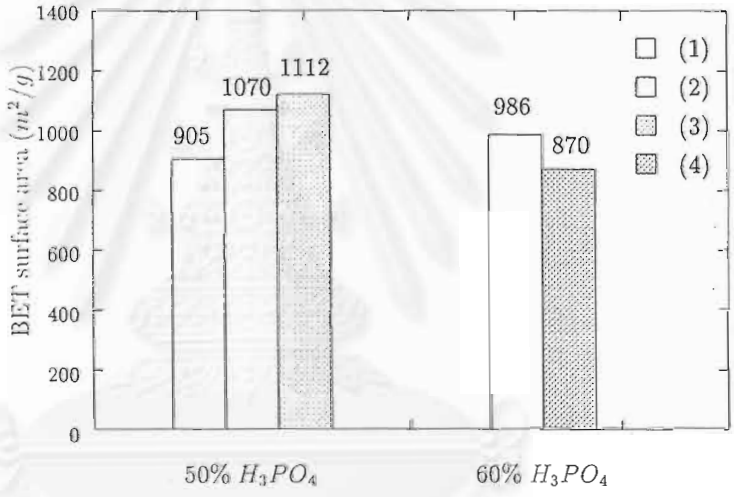
รูปที่ 5.5: ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ ที่ได้จากการเปลี่ยนเวลาในการเผา (ก):G351 (ข):G352 (ค):G353 (ง):G354 (จ):G355 (ฉ):G356



รูปที่ 5.6: คุณสมบัติของวัตถุดิบและตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากเปลือกถั่วลิสงโดยเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา(1):ร้อยละของผลผลิต(2):ขนาดรูพรุนเฉลี่ย(3):พื้นที่ผิวจำเพาะ(4):ค่าการดูดซับไอโอดีน

ขึ้นอย่างมาก แม้ว่าจะใช้เวลาในการเผา ณ อุณหภูมิที่กำหนดเพียงไม่กี่นาที การที่พื้นที่ผิวจำเพาะสูงเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นเนื่องจาก เวลาที่เพิ่มขึ้นทำให้ปฏิกิริยาเคมีสามารถดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้น พื้นที่ผิวที่ได้จึงสูงขึ้นตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มเวลาไปจนถึง 150 นาที พบว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้มีค่าลดลงเนื่องจากเวลาที่นานเกินไปอาจทำให้เกิดการสูญเสียของคาร์บอนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียม ดังจะเห็นได้จากค่าร้อยละของผลผลิตที่มีค่าลดลงเป็นจำนวนมากอันเป็นสาเหตุให้พื้นที่ผิวลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Fukuda และผู้ร่วมงาน [26] ที่ว่าร้อยละของผลผลิตที่ได้ไม่ควรต่ำกว่า 40 % ไม่เช่นนั้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมโดยใช้วัตถุดิบที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ และ ใช้กรดฟอสฟอริกเป็นตัวทำปฏิกิริยา มีค่าลดลง

จากคุณสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากเปลือกถั่วลิสง โดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริก เมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมโดยใช้วัตถุดิบชนิดอื่นๆ โดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริกในการเตรียม ดังแสดงในรูปที่ 5.7 [27,28,29]



รูปที่ 5.7: ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ ที่เตรียมโดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริก (1):เปลือกถั่วลิสง (2):กะลาปาล์ม (3):ซังข้าวโพด (4):ผักตบชวา

จากรูปที่ 5.7 แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากปลือกถั่วลิสง โดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริก มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่น้อยกว่าตัวดูดซับที่เตรียมจาก กะลาปาล์ม และ ซังข้าวโพด แต่จะมีค่าสูงกว่าตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้ ผักตบชวา จึงเห็นสมควรที่จะพัฒนาเทคนิคในการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านเพิ่มเติม โดยทำการเปลี่ยนชนิดของวัตถุดิบเหลือทิ้งทางการเกษตรชนิดอื่นๆ ต่อไป เพื่อให้ได้ตัวดูดซับที่มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงขึ้น โดยควรจะผลิตตัวดูดซับที่ได้ให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า 1000 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เทียบเท่ากับตัวดูดซับในเชิงการค้าที่ใช้กันโดยทั่วไป

5.2 ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ

ตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมขึ้นจากเปลือกถั่วลิสงที่สภาวะต่างๆ ได้ถูกนำมาวิเคราะห์หาความสามารถในการดูดซับไอเบนซีนเจือจางด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ซึ่งลักษณะของคอลัมน์ที่ใช้บรรจุตัวดูดซับแต่ละชนิดแสดงได้ดังตารางที่ 5.1

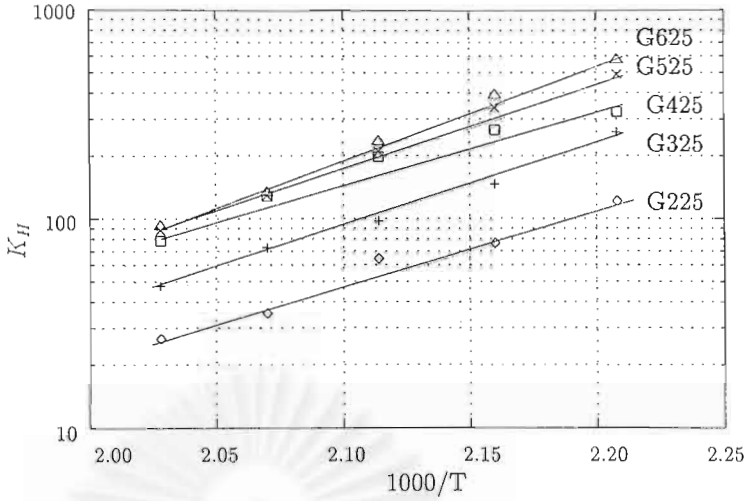
ตารางที่ 5.1: ลักษณะของคอลัมน์ที่บรรจุตัวดูดซับ

ชนิดของตัวดูดซับ	น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)	ความยาวคอลัมน์ (cm)	ϵ	ความหนาแน่น (g/cm^3)
G225	0.3900	6	0.4052	0.3450
G325	0.1312	2	0.3243	0.3065
G425	0.1143	2	0.3228	0.2664
G525	0.1105	2	0.3007	0.2494
G625	0.1053	2	0.2620	0.2252
G315	0.6400	12	0.4680	0.3164
G325	0.1312	2	0.3243	0.3065
G335	0.1332	2	0.2849	0.2940
G345	0.1480	2	0.2975	0.3325
G355	0.1493	2	0.3300	0.3517
G351	0.1498	2	0.3435	0.3601
G352	0.1499	2	0.3275	0.3518
G353	0.1517	2	0.3381	0.3617
G354	0.1391	2	0.3259	0.3257
G355	0.1493	2	0.3300	0.3517

จากนั้นทำการฉีดไอเบนซีนเข้าสู่เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี แล้วจึงวิเคราะห์ผลของโครมาโทแกรมที่ได้ด้วยวิธีโมเมนต์ เพื่อคำนวณช่วงเวลาเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของไอเบนซีนที่เคลื่อนที่อยู่ในคอลัมน์ที่บรรจุไว้ด้วยตัวดูดซับ จากความสัมพันธ์ที่แสดงในสมการที่ 3.8 ค่าคงที่สมดุลการดูดซับสามารถคำนวณได้จากความชันของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าเวลาเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก กับ สัดส่วนความยาวของหอดูดซับกับความเร็วของแก๊สตัวพา ซึ่งให้ความสัมพันธ์เชิงเส้น โดยผลที่ได้จากการคำนวณค่าคงที่สมดุลการดูดซับสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

5.2.1 กรณีเปลี่ยนความเข้มข้น

สำหรับการดูดซับไอเบนซีนบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้จากการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก ค่าคงที่สมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ จ.1 จากความสัมพันธ์

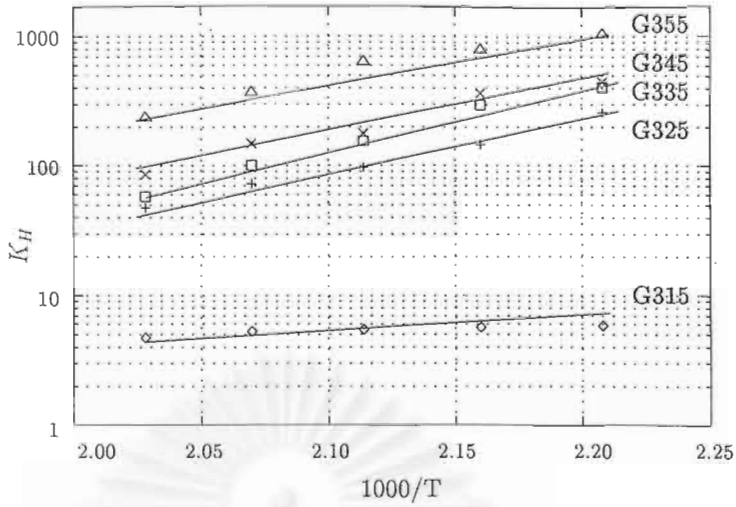


รูปที่ 5.8: สมดุลการดูดซับไอเบนซีนบนตัวดูดซับที่เตรียมโดยเปลี่ยนความเข้มข้น

ตามสมการของ แวนต์ฮอฟ สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่สมดุลการดูดซับ กับส่วนกลับของอุณหภูมิได้ดังรูปที่ 5.8 จากรูปแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่สมดุลการดูดซับของไอเบนซีนมีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง เนื่องจากการดูดซับเป็นปรากฏการณ์คายความร้อน โดยค่าคงที่สมดุลของตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก 60% จะมีค่าสูงที่สุด และ ลดลงตามความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกที่ใช้ โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก 20% จะให้ค่าคงที่สมดุลที่ต่ำที่สุด เนื่องจากที่ความเข้มข้นสารละลายกรดฟอสฟอริก 60% มีปริมาณไฮโดรเจนไอออนในระบบมาก ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้มาก ซึ่งเป็นสาเหตุให้ตัวดูดซับที่ได้มีความพรุนและพื้นที่ผิวสูง จึงมีผลให้ค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับสูงขึ้น

5.2.2 กรณีเปลี่ยนอุณหภูมิ

สำหรับการดูดซับไอเบนซีนบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้โดยการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ค่าคงที่สมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ จ.2 จากข้อมูลที่ได้สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ตามสมการของแวนต์ฮอฟ ได้ดังรูปที่ 5.9 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่สมดุลการดูดซับของไอเบนซีนมีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง โดยค่าคงที่สมดุลของตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส จะมีค่าสูงที่สุด และ ลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลง โดยที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จะให้ค่าคงที่สมดุลที่ต่ำที่สุด เนื่องจากที่อุณหภูมิการเผาสูงอัตราการเกิดปฏิกิริยาถูกเร่งให้เกิดได้เร็วขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้ตัวดูดซับที่ได้มีความพรุนและพื้นที่ผิวมากขึ้น จึงมีผลให้ค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับสูงขึ้น

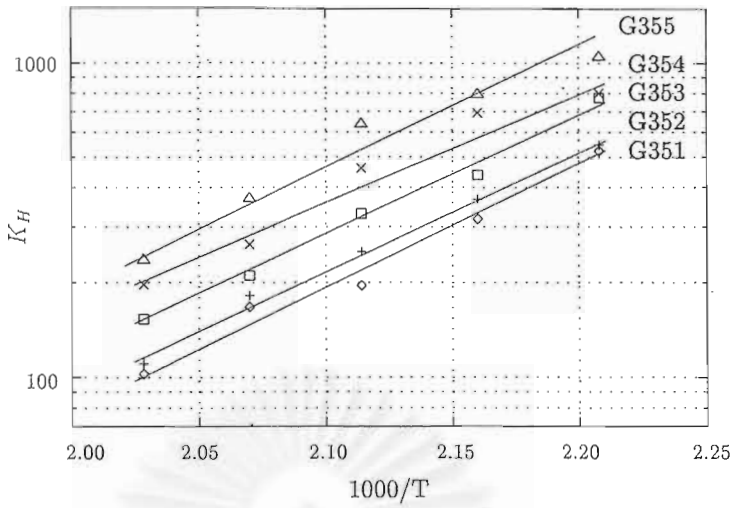


รูปที่ 5.9: สมดุลการดูดซับไอเบนซีนบนตัวดูดซับที่เตรียมโดยเปลี่ยนอุณหภูมิ

5.2.3 กรณีเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการเผา

สำหรับการดูดซับไอเบนซีนจากตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้โดยเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ค่าคงที่สมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงได้จากตารางที่ จ.3 จากข้อมูลที่ได้สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ตามสมการของแวนต์ฮอฟ ได้ดังรูปที่ 5.10 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่สมดุลการดูดซับของไอเบนซีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง โดยค่าคงที่สมดุลของตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาทีจะมีค่าสูงที่สุด และลดลงตามเวลาที่ลดลง โดยที่เวลา 15 นาที จะให้ค่าคงที่สมดุลที่ต่ำที่สุด เนื่องจากเวลาในการเผาที่เพิ่มขึ้นทำให้ปฏิกิริยาสามารถดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้น ทำให้ตัวดูดซับที่ได้มีความพรุนและพื้นที่ผิวมากขึ้น จึงมีผลให้ค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับสูงขึ้น

จากผลที่ได้พบว่า สภาวะในการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก มีผลกระทบต่อค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับไอเบนซีน นั่นคือสอดคล้องกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อพื้นที่ผิวจำเพาะ เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับชนิดถ่านโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นพื้นผิวที่ไม่มีขั้ว หรือ มีความเป็นขั้วอ่อนๆ ส่วนเบนซีนเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว และ โมเลกุลมีลักษณะรูปทรงเหมือนกันทุกทิศทาง ดังนั้นตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้จึงมีความสามารถในการดูดซับไอเบนซีนได้เป็นอย่างดี โดยตัวแปร ที่มีผลการดูดซับเบนซีนบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้จึงมีเพียงแรงดึงดูดระหว่างมวลที่มีอยู่ทั่วไปบนบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับชนิดถ่านที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากจึงมีความสามารถในการดูดซับไอเบนซีนได้มากด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ สุภาภรณ์ มั่นไทรทอง [26] ที่ว่า ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับไอเบนซีนบนตัวดูดซับชนิดถ่านจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ



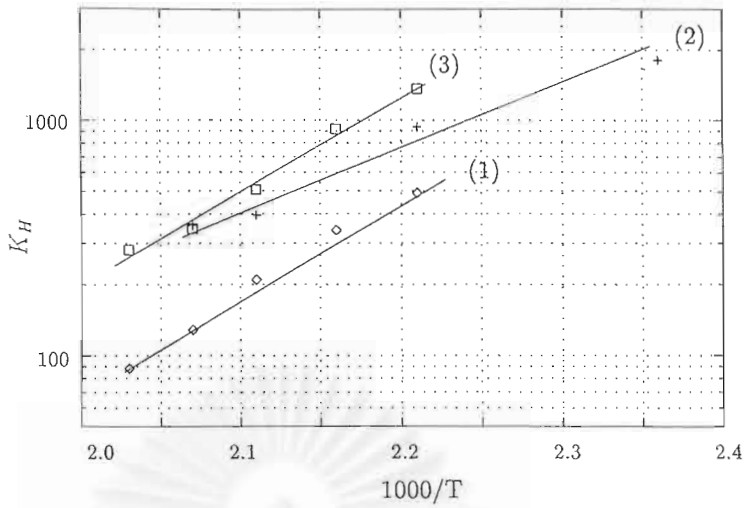
รูปที่ 5.10: สมดุลการดูดซับไอเบนซีนบนตัวดูดซับที่เตรียมโดยเปลี่ยนเวลาในการเผา

โดยความสามารถในการดูดซับไอเบนซีนด้วยตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้จากเปลือกถั่วลิสงสามารถนำมาเปรียบเทียบกับ ตัวดูดซับชนิดต่างๆที่ได้มีการศึกษามาแแล้ว ได้ดังนี้

ตารางที่ 5.2: พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากวัตถุดิบชนิดต่างๆ

ชนิดของตัวดูดซับ วัตถุดิบ:สารเคมี	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)
เปลือกถั่วลิสง:50% H_3PO_4	905
ซังข้าวโพด:50% H_3PO_4	1112 [27]
ผักตบชวา:$ZnCl_2$	1231 [28]

จากรูปที่ 5.11 แสดงให้เห็นว่า ค่าคงที่สมดุลการดูดซับไอเบนซีนบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากเปลือกถั่วลิสง มีค่าน้อยกว่าตัวดูดซับที่เตรียมด้วยวัตถุดิบชนิดอื่น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแต่ละตัว ดังแสดงได้ในตารางที่ 5.2 โดยตัวดูดซับชนิดถ่านที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากจะสามารถดูดซับไอเบนซีนได้ดี ดังนั้นจึงเห็นสมควรที่จะต้อง ศึกษาและพัฒนาเทคนิกในการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านเพื่อให้มีค่าพื้นที่ผิวที่สูงมากขึ้น เพื่อให้ได้ตัวดูดซับชนิดถ่านที่มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับไอเบนซีน



รูปที่ 5.11: สมดุลการดูดซับไอเบนซีนบนตัวดูดซับชนิดถ่านชนิดต่างๆ(1):เปลือกถั่วลิสง(2):ซังข้าวโพด(3):ผักตบชวา

5.3 ค่าความร้อนของการดูดซับ

เนื่องจากการดูดซับเป็นปรากฏการคายความร้อน ดังนั้น ค่าคงที่สมดุลการดูดซับจึงขึ้นกับอุณหภูมิเท่านั้น โดยสอดคล้องตามสมการของ แวนต์ฮอฟฟ์ ปริมาณความร้อนของการดูดซับจะสามารถคำณวนได้จากสมการที่ 3.2 โดยเท่ากับความชันของกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าคงที่สมดุลการดูดซับ กับ ส่วนกลับของอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ จ.1 ซึ่งค่าความร้อนของการดูดซับไอเบนซีน บนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้ แสดงได้ในตารางที่ 5.3

จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าความร้อนของการดูดซับไอเบนซีน บนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้มีค่าอยู่ในช่วง 70–90 กิโลจูลต่อโมล ยกเว้นในกรณีที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย จึงทำให้การดูดซับเกิดได้น้อยดังนั้นค่าความร้อนของการดูดซับที่ได้จึงต่ำ ซึ่งค่าความร้อนของการดูดซับที่ได้ส่วนใหญ่มีค่าประมาณ 2–3 เท่า ของความร้อนที่ใช้ในการควบแน่นของไอเบนซีน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.3: ค่าความร้อนของการดูดซับเบนซีนบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากเปลือกถั่วลิสง

ชนิดของตัวดูดซับ	ความร้อนของการดูดซับ (kJ/mole)
G225	70.5
G325	76.0
G425	66.0
G525	81.7
G625	88.0
G315	6.2
G325	76.0
G335	92.0
G345	78.2
G355	74.3
G351	72.6
G352	72.4
G353	74.0
G354	70.0
G355	74.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปฏิกิริยาเคมีระหว่างการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกจะเริ่มเกิดได้รวดเร็ว ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกตั้งแต่ 20 % โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านจากเปลือกถั่วลิสง คือ สารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 60 % โดยน้ำหนัก

2. ปฏิกิริยาเคมีระหว่างการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกจะเริ่มเกิดได้รวดเร็ว เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 200 องศาเซลเซียส เป็นต้นไป โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านจากเปลือกถั่วลิสง ด้วยกรดฟอสฟอริก คือ ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

3. ปฏิกิริยาเคมีระหว่างการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกจะเริ่มเกิดได้ตั้งแต่ในช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิ ช่วงเวลาในการเผาจึงไม่ส่งผลกระทบมากนัก โดยเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านจากเปลือกถั่วลิสง ด้วยกรดฟอสฟอริก คือ ที่เวลา 120 นาที

4. เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้ไม่มีขั้ว หรือ มีความเป็นขั้วอ่อนๆ ดังนั้นจึงสามารถดูดซับสารที่เป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้วเช่น เบนซีน ได้ดี และ เนื่องจากทั้งโมเลกุลเบนซีน และ พื้นผิวของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้ไม่มีขั้ว ความสามารถในการดูดซับจึงขึ้นกับ

ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับเท่านั้น

5. ความร้อนของการดูดซับระหว่างไอเบนซีนบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้มีค่าอยู่ระหว่าง 70–90 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งมีค่าประมาณ 2–3 เท่า ของค่าความร้อนที่ใช้ในการควบแน่นของไอเบนซีน

6.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากความสามารถในการดูดซับเบนซีนบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวจำเพาะเท่านั้น ดังนั้นจึงเห็นสมควรว่า ควรจะทำการทดลองพิ่มเติมโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ กับวัตถุดิบชนิดอื่นๆ เพื่อนำไปเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านที่ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงที่สุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] ชมภูศักดิ์ พูลเกษ. **วารสารความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม**. ปีที่ 4, ฉบับที่ 3, 2537.

[2] Elyse D. Heilshorn. Removing VOCs From Contaminated Water. **Chemical Engineering**. February, 1991.

[3] Environmental Health Criteria 150. **Benzene**. World Health Organization Geneva, 1993.

[4] Arthur Kohl และ Fred Riesenfield. **Gas Purification**. Gulf Publishing Company, Houston, London, 1979.

[5] กรมศุลกากรแห่งประเทศไทย. ข้อมูลสถิติการค้าระหว่างประเทศ ปี พ.ศ.2536–2540, กรุงเทพ.

[6] เกศรา นุตาลัย, บุญชัย ตระกูลมหาชัย, สุนทรีย์ เพ้ยจันทึก, กรรนิการ์ สถาปิตานนท์, ศิลป์ชัย อรัญยะนาค, เพิ่มสุข มาทะ และ จงจินต์ ศรีวรรณวิทย์. การผลิตถ่านกัมมันต์จากดินพรุในห้องปฏิบัติการ. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. ปีที่ 4, ฉบับที่ 3, 2532: หน้า 50–86.

[7] คณิต กฤษณังกูร และ จงจิตร์ หิรัญลาภ. การทำ Activated Carbon จากแกลบ. **วารสารวิทยาศาสตร์**. ปีที่ 38, ฉบับที่ 5–6, 2527: หน้า 276–284.

[8] นราพร หาญวจนวงศ์, สุนทรี ตันสุวรรณ และ สงวนเกียรติ ล้วนรัตนกร. การทำถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพด. **วารสารคณะคุรุศาสตร์อุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์ สจ.ธ.**. ปีที่ 5, ฉบับที่ 3, 2529: หน้า 291–303.

[9] ดำรง ขุมมงคล และ อภิสิทธิ์ เจริญกุล. การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ NaCl เป็นตัวกระตุ้น.

วิศวกรรมสาร. ฉบับที่6, 2533: หน้า 96–99.

[10] K. Periasamy, K. Srinivasan และ P.K. Murugan. Studies on Chromium(VI) Removal by Activatrd Groundnut Husk Carbon. **Indian Journal Environmental Health**. ปีที่ 33, ฉบับที่ 4, 1991: หน้า 433–439.

[11] K. Periasamy และ C. Namasivayam. Process Development for Removal and Recovery of Cadmium from Wastewater by a Low - Cost Adsorbent : Adsorption Rates and Equilibrium Studies. **Industrial Engineering Chemical Research**. ฉบับที่ 33, 1994: หน้า 317–320.

[12] F.J. Reineke และ K. Bachmann. Gas Chromatographic Determination of C2-C8 Hydrocarbons and Halocarbons in Ambient Air by Simultaneous Use of Three Detectors. **Journal of Chromatography**. ฉบับที่ 323, 1985: หน้า 323–329.

[13] Roger D. Blanchard และ James K. Hardy. Continuous Monitoring Device for the Collection of 23 Volatile Organic Priority Pollutants. **Analytical Chemistry**. ฉบับที่ 58, 1986: หน้า 1529–1532.

[14] J.H. Yun และ D.K. Choi. Adsorption Isotherm of Benzene and Methylbenzene Vapors on Activated Carbon. **Journal Chemical Engineering Data**. ฉบับที่ 42, 1997: หน้า 894–896.

[15] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. ถ่านกัมมันต์ : มอก. 900-2532. 2532: หน้า 2–9.

[16] John W. Hassler. **Purification with Activated Carbon**. Chemical Publishing Co., Inc., 1974.

[17] Berl E.. Formation and Properties of Activated Carbon. **Transactions Faraday Society**. ฉบับที่ 34: หน้า 1040–1056.

[18] Albert Yehaskel. **Activated Carbon Manufacture and Regeneration**. Noyes Data Corporation, 1978.

[19] Blackwood J.D. และ MacTaggart F.K.. The Oxidation of Carbon with Carbon Dioxide. **Australian Journal Chemistry**. ปีที่ 12, ฉบับที่ 2: หน้า 114–121.

[20] C. Mantel. **Adsorption**. McGraw-Hill book company Inc., second edition, 1951.

[21] Ruthven D.M.. **Principles of Adsorption and Adsorption Processes**. John Wiley and Sons Inc., 1984.

[22] Yang R.T.. **Gas Separation by Adsorption Process**. Butterworths, 1987.

[23] M. Suzuki. **Adsorption Engineering**. Kodansha Ltd., 1978

[24] R. Byron Bird, Warren E. Stewart และ Edwin N. Lightfoot. **Transport Phenomena**. John Wiley and Sons Inc., 1976.

[25] AWWA B604-74(First Edition). **AWWA Standard for Granular Activated Carbon**. 1974.

[26] T. Fukuda, N. Ishisaki, S. Iwahori และ M. Shimada. Carbon Fibers from Phosphorous - Treated Cellulosic Fibers. **United States Patent**. ฉบับที่ 3,969,268, 1976.

[27] สุภาภรณ์ มั่นไทรทอง. การหาการดูดซับไอของเบนซีน โทลูอีน และ ไซลีน บนถ่านกัมมันต์ซึ่งเตรียมจากซังข้าวโพดโดยใช้เทคนิคโครมาโทกราฟี. **วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**. 2541.

[28] จิระศักดิ์ แสงพุ่ม. การดูดซับไอของเบนซีน โทลูอีน และ โอไซลีน ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวาโดยการกระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์. **วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญยาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**. 2542.

[29] รุ่งทิพย์ ชัยวัฒนานนท์, ผาสุก คงชาตรี, กรรณิการ์ สถาปิตานนท์ และ นัยนา นิยมวัน. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม. โครงการวิจัยที่ **ภ. 37-14**. ฉบับที่ 1, 2541.

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

ก. 1 การคำนวณความเข้มข้นของไอเบนซีนที่ใช้ในการดูดซับ

ความดันไอของเบนซีน (26 องศาซลเซียส)	=	13.30 กิโลปาสคาล
ความดันรวม	=	ความดันบรรยากาศ + ความดันจากผลต่างของระดับมาโนมิเตอร์
	=	101.33 + 0.04 กิโลปาสคาล
	=	101.37 กิโลปาสคาล
% ความเข้มข้นของไอเบนซีน	=	(ความดันย่อยของเบนซีน/ความดันรวม)×100
	=	(13.30/101.37)×100
	=	13.12 %

ก. 2 การคำนวณความเข้มข้นไอเบนซีนที่ฉีดเข้าไปพร้อมแก๊สตัวพาในการวิเคราะห์

อัตราการไหลโดยเฉลี่ยต่ำสุดของแก๊สตัวพาที่ใช้	50.242	มิลลิลิตร/นาที
ปริมาณไอเบนซีนที่ฉีดเข้าไปเพื่อทำการวิเคราะห์	100	ไมโครลิตร
เวลาในการฉีด	2	วินาที
ปริมาณของแก๊สตัวพาใน 2 วินาที	1.6747	ลูกบาศก์เซนติเมตร
ปริมาณของเบนซีนใน 100 ไมโครลิตร	0.0131	ลูกบาศก์เซนติเมตร

%เบนซีนโดยปริมาตร	=	(ปริมาณของเบนซีน/ปริมาณของแก๊สตัวพา)×100
	=	(0.0131/1.6747)×100
	=	0.7822 %

ก. 3 การคำนวณปริมาณการดูดซับไอโอดีนบนตัวดูดซับชนิดถ่าน

ค่าการดูดซับไอโอดีน = (X/m)×D

X/m = A - (2.2B × S)/M
C = S/F
A = N_1 × 12693.0
B = N_2 × 126.93

สำหรับตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมโดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 30 % โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส 120 นาที

N_1 = 0.0992 นอร์แมล
N_2 = 0.0980 นอร์แมล
A = 1259.273
B = 12.442
S = 17 มิลลิลิตร
F = 50 มิลลิลิตร
C = 0.03333
D = 0.9250
M = 1.80 กรัม
X/m = [1259.273 - (2.2 × 12.442 × 17)]/1.8
= 441.079

ค่าการดูดซับไอโอดีน = (X/m)×D
= 441.079× 0.9250
= 408

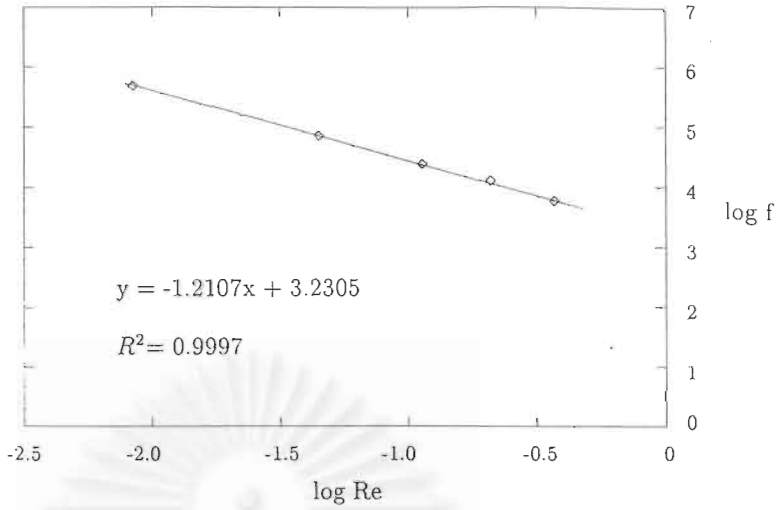
ก. 4 การคำนวณความพรุนของหอดูดซับ

จากสมการของ Blake - Kozeney

$$log\left(\frac{\Delta P}{L}\right)\left(\frac{d_p}{\rho v^2}\right) = -log\left(\frac{d_p \rho v^2}{\mu}\right) + log\left(150\frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3}\right)$$

$$log\, f = -log\, Re + log\left(150\frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3}\right) \qquad (ก.1)$$

ค่าความพรุนของหอดูดซับสามารถคำนวณได้โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log f กับ log Re ดังแสดงในรูปที่ ก.1 จากกราฟจะได้



รูปที่ ก.1: ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิความเสียดทาน และ เรโนลด์นัมเบอร์ ของหอดูดซับที่บรรจุตัวดูดซับ G225

$$
\begin{aligned}
log\ 150(1-\epsilon)^2/\epsilon^3 &= \text{y intercept} \\
log\ 150(1-\epsilon)^2/\epsilon^3 &= 3.3026 \\
(1-\epsilon)^2/\epsilon^3 &= 13.3816 \\
\epsilon &= 0.3243
\end{aligned}
$$

จากสมการที่ 4.1

$$
\begin{aligned}
\rho_p &= \rho_b/(1-\epsilon) \\
&= (\text{น้ำหนักตัวดูดซับ/ปริมาตรหอดูดซับ})/(1-\epsilon) \\
&= (0.1312/0.6335)/(\ 1\ -\ 0.3243\ ) \\
&= 0.3065 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}
\end{aligned}
$$

ก. 5 การคำนวณค่าคงที่สมดุลการดูดซับ

ค่าคงที่สมดุลสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.8 โดยการสร้างกราฟระหว่างค่า L/V กับค่า t_r ดังเช่นที่แสดงในรูปที่ ง.1

$$t_r = \mathrm{L/v}(\ 1 + K_H(\ 1\ -\ \epsilon\ )/\epsilon\ )$$

จากกราฟจะได้ว่าค่าความชันที่ได้ = (1 + K_H(1 - ϵ)/ϵ)
โดยค่าความพรุนของหอดูดซับ = 0.3243
จะได้ K = (ความชัน - 1)(ϵ / (1 - ϵ))
= (540.67 - 1)(0.3243 / (1 - 0.3243))
= 259.0128
K ต่อน้ำหนักตัวดูดซับ = 259.0128 / 0.1312
= 1974.1830

ก. 6 การคำนวณค่าความร้อนของการดูดซับ

จากสมการของแวนต์ฮอฟฟ์

$$\mathrm{dlnK/dT} = \Delta H/RT^2$$

เมื่อปริมาณความร้อนของการดูดซับ (ΔH) คงที่สมการแวนต์ฮอฟฟ์สามารถอินทิเกรตได้เป็น

$$lnK = lnK_0 - \frac{\Delta H}{RT} \qquad (ก.2)$$

สำหรับการดูดซับไอเบนซีนบนตัวดูดซับชนิดถ่านความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง ln K และ 1/T ดังรูปที่ 5.8 ปริมาณความร้อนของการดูดซับสามารถคำนวณได้จากความชันของกราฟดังนี้

ΔH = slope × R
= 8.480 × 8.314
= 70.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การทดสอบการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number)

ค่าการดูดซับไอโอดีนเป็นปริมาณไอโอดีนในหน่วยมิลลิกรัมที่ถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับแห้ง 1 กรัม โดยความเข้มข้นของไอโอดีนในสารละลายเมื่อเริ่มต้นและเมื่อสิ้นสุดการดูดซับจะต้องมีค่าเท่ากับ 0.1 และ 0.02 นอร์แมลตามลำดับ

ข. 1 เครื่องมือ

1. เครื่องชั่งที่มีความแม่นยำ 4 ตำแหน่ง
2. บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร
3. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
4. ตู้อบ
5. บีกเกอร์ขนาดต่างๆ
6. กรวยกรอง
7. ปิเปตขนาดต่างๆ
8. กระดาษกรอง Whatman No.2V หรือเทียบเท่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18.5 เซนติเมตร
9. เครื่องกวนสารด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า
10. หลอดหยด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข. 2 สารเคมี

1. น้ำกลั่น
2. กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
3. ไอโอดีน (I_2)
4. โซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$)
5. โปตัสเซียมไอโอไดด์ (KI)
6. โปตัสเซียมไอโอเดต (KIO_3)
7. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)
8. แป้งมัน

ข. 3 การเตรียมสารเคมีสำหรับการทดลอง

1. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาณ 70 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น 550 มิลลิลิตร แล้วคนให้เข้ากันเทเก็บใส่ขวดไว้

2. สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตเข้มข้น 0.100 ± 0.001 นอร์แมล

ชั่งโซเดียมไธโอซัลเฟต 24.820 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่นที่เพิ่งต้มเดือดใหม่ๆปริมาตร 75 ± 25 มิลลิลิตร แล้วคนให้ละลาย จากนั้นจึงเติมโซเดียมคาร์บอร์เนต 0.1 ± 0.01 กรัม เพื่อป้องกันการสลายตัวของโซเดียมไธโอซัลเฟตเนื่องจากแบคทีเรีย จากนั้นเจือจางให้มีปริมาตร 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตร เทใส่ขวดสีชาตั้งทิ้งไว้ 4 วันก่อนนำมาใช้งาน

3. สารละลายไอโอดีนเข้มข้น 0.100 ± 0.001 นอร์แมล

ชั่งไอโอดีน 12.700 กรัม และโปตัสเซียมไอโอไดด์ 19.100 กรัม ผสมให้เข้ากันแล้วเติมน้ำกลั่น 2–5 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์คนให้ละลาย จากนั้นค่อยๆเติมน้ำกลั่นครั้งละ 5 มิลลิลิตร แล้วคนจนละลายหมด จากนั้นเจือจางให้ได้ 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตร เทเก็บในขวดสีชา

4. สารละลายโปตัสเซียมไอโอเดต 0.100 นอร์แมล

อบโปตัสเซียมไอโอเดตประมาณ 4 กรัม ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องในเดซิกเคเตอร์ นำสารที่อบแห้งแล้ว 3.5667 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นเจือจางให้ได้ 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตรผสมให้เข้ากันแล้วเทใส่ขวดเก็บสารที่มีฝาปิด

5. น้ำแป้ง

ผสม 1 ± 0.5 กรัมของแป้งในน้ำเย็น 5–10 มิลลิลิตร เทสารข้างต้นในน้ำกลั่นที่ต้มเดือดใหม่ๆ จนได้ปริมาตร 1 ลิตร พร้อมกับคนตลอดเวลาทิ้งให้เย็นแล้วเทเก็บในขวดเก็บสาร สารนี้ควรเตรียมใหม่ทุกครั้งในวันที่ทำการทดลอง

ข. 4 การหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย

1. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต

ปิเปตสารละลายโปตัสเซียมไอโอเดตในหัวข้อ 4. ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ 250 มิลลิลิตร เติมโปตัสเซียมไอโอไดด์ 2.00 ± 0.01 กรัม ลงไปเขย่าให้ละลาย ปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร เติมลงในสารละลายข้างต้น นำมาไตรเตรทด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตในหัวข้อ 2. จนได้สารละลายสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแป้งลงไป 2–3 หยดเพื่อเป็นอินดิเคเตอร์ (Indicator) แล้วไตรเตรทต่อไปจนได้สารละลายไม่มีสี จากนั้นคำนวณหาความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตจาก

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

เมื่อ N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (นอร์แมล)
P_1 = ปริมาตรของสารละลายโปตัสเซียมไอโอเดต (มิลลิลิตร)
S = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)
R = ความเข้มข้นของสารละลายโปตัสเซียมไอโอเดต (นอร์แมล)

2. ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

ปิเปตสารละลายไอโอดีน 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วไตรเตรทด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนจนกระทั่งได้สารละลายสีเหลืองอ่อน หยดน้ำแป้งลงไป 2–3 หยดเพื่อเป็นอินดิเคเตอร์แล้วไตรเตรทต่อจนได้สารละลายไม่มีสี จากนั้นคำนวณหาความเข้มข้นจากสูตร

$$N_2 = (S \times N_1)/I \qquad \text{(ข.2)}$$

เมื่อ N_2 = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (นอร์แมล)
S = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)
N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (นอร์แมล)
I = ปริมาตรของสารละลายไอโอดีน (มิลลิลิตร)

ความเข้มข้นของไอโอดีนต้องมีค่าในช่วง 0.100 ± 0.001 นอร์แมล ถ้าความเข้มข้นไม่อยู่ในช่วงดังกล่าวต้องเตรียมสารละลายไอโอดีนใหม่

ข. 5 วิธีการทดสอบการดูดซับไอโอดีน

1. บดตัวดูดซับที่ต้องการนำมาวิเคราะห์ให้มีขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน (325 เมช)
2. อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิกเคเตอร์
3. ชั่งตัวดูดซับที่บดแล้ว 1.000–1.600 กรัมใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปิเปตสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก 10 มิลลิลิตร ใส่ลงไปเขย่าจนกระทั่งตัวดูดซับเปียกทั่วหมด
4. นำขวดรูปชมพู่ไปวางบนแผ่นให้ความร้อน ต้มจนเดือดประมาณ 30 วินาที เพื่อไล่สารประกอบซัลเฟอร์ซึ่งเป็นสารมลทินทิ้ง แล้วยกลงตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง
5. ปิเปตสารละลายไอโอดีน 0.100 นอร์แมล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปิดจุกยางและเขย่าแรง ๆเป็นเวลา 30 วินาที
6. กรองโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 2V
7. ทิ้งส่วนที่กรองได้ 20–30 มิลลิลิตร แรกทิ้งไปจากนั้นกรองต่อไปจนหมด
8. ปิเปตสารละลายที่กรองได้ 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ไตรเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.100 นอร์แมล จนได้สารละลายสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแป้งสุกลงไป 2 มิลลิลิตร เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์แล้วทำการไตรเตรทต่อไปจนได้สารละลายใสไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ทั้งหมด (S)
9. คำนวณความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับโดยตัวดูดซับ (C) จากสูตร

$$C = \frac{N_2 \times S}{F} \qquad (ข.3)$$

ค่า C ที่ได้ต้องมีค่าอยู่ในช่วง 0.008–0.0334 นอร์แมล ถ้าไม่อยู่ในช่วงดังกล่าวต้องทำการทดลองใหม่โดยการเปลี่ยนน้ำหนักของตัวดูดซับ โดยถ้าค่า C น้อยกว่าที่กำหนดต้องลดปริมาณตัวดูดซับลง ถ้า C มากกว่าที่กำหนดต้องเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ จนได้ค่า C อยู่ในช่วงดังกล่าว เมื่อได้ค่า C

แล้วนำมาเทียบหาค่า D (Correction factor)

10.นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าการดูดซับไอโอดีนจากสูตร

$$I_2\ No. = \frac{X}{m} \times D \qquad (ข.4)$$

โดย X/m = (A - (2.2B× S))/M

C = (N_2× S)/F

A = N_1× 12693.0

B = N_2× 126.93

เมื่อ X/m = ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เตรียม (นอร์แมล)

N_2 = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต (นอร์แมล)

S = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ในการไตรเตรท (มิลลิลิตร)

F = ปริมาตรของสารละลายไอโอดีนที่ใช้ในการไตรเตรท (มิลลิลิตร)

C = ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับ (นอร์แมล)

D = ค่าตัวแปรปรับค่า (Correction factor)

M = น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ (กรัม)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

เวลาเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก (t_r)

ตารางที่ ค.1: ตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้จากการเปลี่ยนความเข้มข้นสารละลายกรดฟอสฟอริก

ชนิดของตัวดูดซับ	อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (°C)	อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (cm^3/min)	t_r (sec)
G225	180	50.242	507.118
		59.470	460.806
		68.697	413.279
		77.925	367.526
		87.152	337.842
	190	50.242	354.984
		59.470	315.127
		68.697	283.862
		77.925	260.319
		87.152	248.746
	200	50.242	246.203
		59.470	217.173
		68.697	190.117
		77.925	169.418
		87.152	156.644
	210	50.242	163.726
		59.470	152.994
		68.697	136.093
		77.925	127.204
		87.152	112.226

ต่อหน้าต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ต่อจากหน้าที่แล้ว

ชนิดของตัวดูดซับ	อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (°C)	อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (cm^3/min)	t_r (sec)
	220	50.242	121.437
		59.470	107.906
		68.697	98.023
		77.925	91.948
		87.152	81.227
G325	180	50.242	501.133
		59.470	466.479
		68.697	408.400
		77.925	364.212
		87.152	333.401
	190	50.242	324.084
		59.470	305.863
		68.697	277.458
		77.925	249.741
		87.152	226.970
	200	50.242	196.494
		59.470	185.265
		68.697	162.886
		77.925	144.913
		87.152	134.065
	210	50.242	161.911
		59.470	145.475
		68.697	130.972
		77.925	123.178
		87.152	112.406
	220	50.242	100.323
		59.470	91.964
		68.697	83.851
		77.925	74.709
		87.152	68.338
G425	180	50.242	928.853
		59.470	845.099
		68.697	800.047
		77.925	740.907

ต่อหน้าต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ต่อจากหน้าที่แล้ว

ชนิดของตัวดูดซับ	อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (°C)	อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (cm^3/min)	t_r (sec)
		87.152	712.872
	190	50.242	622.720
		59.470	560.236
		68.697	516.153
		77.925	481.741
		87.152	437.897
	200	50.242	380.981
		59.470	331.231
		68.697	294.486
		77.925	269.717
		87.152	247.853
	210	50.242	285.030
		59.470	253.328
		68.697	228.472
		77.925	215.033
		87.152	197.761
	220	50.242	167.122
		59.470	147.466
		68.697	133.557
		77.925	122.831
		87.152	113.870
G525	180	50.242	959.730
		59.470	819.514
		68.697	727.764
		77.925	667.065
		87.152	582.361
	190	50.242	727.871
		59.470	624.565
		68.697	579.833
		77.925	529.941
		87.152	458.491
	200	50.242	490.362
		59.470	430.299
		68.697	396.541
		77.925	356.732

ต่อหน้าต่อไป

ต่อจากหน้าที่แล้ว

ชนิดของตัวดูดซับ	อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (°C)	อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (cm^3/min)	t_r (sec)
		87.152	333.095
	210	50.242	324.439
		59.470	278.381
		68.697	265.904
		77.925	242.458
		87.152	223.677
	220	50.242	223.763
		59.470	199.215
		68.697	183.328
		77.925	165.446
		87.152	159.557
G625	180	50.242	1291.325
		59.470	1094.541
		68.697	948.247
		77.925	860.529
		87.152	767.884
	190	50.242	812.426
		59.470	684.555
		68.697	588.979
		77.925	520.742
		87.152	459.325
	200	50.242	550.321
		59.470	458.322
		68.697	408.952
		77.925	369.122
		87.152	335.374
	210	50.242	349.751
		59.470	301.021
		68.697	269.092
		77.925	248.998
		87.152	227.521
	220	50.242	237.528
		59.470	199.327
		68.697	181.602
		77.925	166.944

ต่อหน้าต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ต่อจากหน้าที่แล้ว

ชนิดของตัวดูดซับ	อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (°C)	อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (cm^3/min)	t_r (sec)
		87.152	151.217

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.2: ตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้จากการเปลี่ยนอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

ชนิดของตัวดูดซับ	อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (°C)	อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (cm^3/min)	t_r (sec)
G315	180	50.242	18.000
		59.470	18.000
		68.697	18.000
		77.925	18.000
		87.152	18.000
	190	50.242	17.580
		59.470	17.580
		68.697	17.580
		77.925	17.580
		87.152	17.580
	200	50.242	16.980
		59.470	16.980
		68.697	16.980
		77.925	16.980
		87.152	16.980
	210	50.242	16.500
		59.470	16.500
		68.697	16.500
		77.925	16.500
		87.152	16.500
	220	50.242	15.000
		59.470	15.000
		68.697	15.000
		77.925	15.000
		87.152	15.000
G325	180	50.242	501.133
		59.470	466.479
		68.697	408.400
		77.925	364.212
		87.152	333.401
	190	50.242	324.084
		59.470	305.863
		68.697	277.458

ต่อหน้าต่อไป

ต่อจากหน้าที่แล้ว

ชนิดของตัวดูดซับ	อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (°C)	อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (cm^3/min)	t_r (sec)
		77.925	249.741
		87.152	226.970
	200	50.242	196.494
		59.470	185.265
		68.697	162.886
		77.925	144.913
		87.152	134.065
	210	50.242	161.911
		59.470	145.475
		68.697	130.972
		77.925	123.178
		87.152	112.406
	220	50.242	100.323
		59.470	91.96
		68.697	83.851
		77.925	74.709
		87.152	68.338
G335	180	50.242	1013.616
		59.470	893.618
		68.697	804.135
		77.925	742.005
		87.152	684.145
	190	50.242	669.875
		59.470	580.144
		68.697	514.278
		77.925	473.297
		87.152	426.966
	200	50.242	369.612
		59.470	323.642
		68.697	290.626
		77.925	263.590
		87.152	245.116
	210	50.242	249.852
		59.470	219.569
		68.697	199.423

ต่อหน้าต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ต่อจากหน้าที่แล้ว

ชนิดของตัวดูดซับ	อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (°C)	อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (cm^3/min)	t_r (sec)
		77.925	249.741
		87.152	226.970
	200	50.242	196.494
		59.470	185.265
		68.697	162.886
		77.925	144.913
		87.152	134.065
	210	50.242	161.911
		59.470	145.475
		68.697	130.972
		77.925	123.178
		87.152	112.406
	220	50.242	100.323
		59.470	91.96
		68.697	83.851
		77.925	74.709
		87.152	68.338
G335	180	50.242	1013.616
		59.470	893.618
		68.697	804.135
		77.925	742.005
		87.152	684.145
	190	50.242	669.875
		59.470	580.144
		68.697	514.278
		77.925	473.297
		87.152	426.966
	200	50.242	369.612
		59.470	323.642
		68.697	290.626
		77.925	263.590
		87.152	245.116
	210	50.242	249.852
		59.470	219.569
		68.697	199.423

ต่อหน้าต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ต่อจากหน้าที่แล้ว

ชนิดของตัวดูดซับ	อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (°C)	อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (cm^3/min)	t_r (sec)
		77.925	180.999
		87.152	168.573
	220	50.242	144.663
		59.470	127.745
		68.697	115.212
		77.925	105.315
		87.152	97.857
G345	180	50.242	1155.872
		59.470	1027.879
		68.697	948.197
		77.925	866.169
		87.152	815.814
	190	50.242	779.128
		59.470	697.793
		68.697	604.718
		77.925	570.153
		87.152	496.020
	200	50.242	444.713
		59.470	415.268
		68.697	383.033
		77.925	345.568
		87.152	306.835
	210	50.242	337.155
		59.470	296.707
		68.697	263.909
		77.925	241.772
		87.152	225.257
	220	50.242	231.861
		59.470	208.592
		68.697	189.162
		77.925	178.044
		87.152	166.713
G355	180	50.242	2174.766
		59.470	1903.233

ต่อหน้าต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ต่อจากหน้าที่แล้ว

ชนิดของตัวดูดซับ	อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (°C)	อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (cm^3/min)	t_r (sec)
		68.697	1770.366
		77.925	1621.738
		87.152	1465.592
	190	50.242	1413.662
		59.470	1219.773
		68.697	1100.078
		77.925	966.983
		87.152	901.080
	200	50.242	942.793
		59.470	803.985
		68.697	694.786
		77.925	619.446
		87.152	586.200
	210	50.242	587.215
		59.470	508.736
		68.697	454.391
		77.925	406.992
		87.152	375.564
	220	50.242	376.245
		59.470	327.292
		68.697	288.172
		77.925	262.322
		87.152	240.923

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.3: ตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้จากการเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ชนิดของตัวดูดซับ	อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (°C)	อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (cm^3/min)	t_r (sec)
G351	180	50.242	984.728
		59.470	904.890
		68.697	793.446
		77.925	716.667
		87.152	678.470
	190	50.242	610.360
		59.470	560.394
		68.697	496.229
		77.925	454.008
		87.152	419.785
	200	50.242	354.743
		59.470	319.693
		68.697	288.163
		77.925	255.040
		87.152	236.608
	210	50.242	288.602
		59.470	265.556
		68.697	234.008
		77.925	206.955
		87.152	188.266
	220	50.242	178.636
		59.470	156.205
		68.697	141.645
		77.925	124.287
		87.152	116.198
G352	180	50.242	1056.928
		59.470	965.251
		68.697	837.699
		77.925	769.332
		87.152	704.746
	190	50.242	695.596
		59.470	600.056
		68.697	524.725

ต่อหน้าต่อไป

ต่อจากหน้าที่แล้ว

ชนิดของตัวดูดซับ	อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (°C)	อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (cm^3/min)	t_r (sec)
		77.925	498.467
		87.152	449.867
	200	50.242	536.968
		59.470	475.800
		68.697	409.700
		77.925	365.929
		87.152	334.349
	210	50.242	326.550
		59.470	281.511
		68.697	252.506
		77.925	225.593
		87.152	205.961
	220	50.242	217.355
		59.470	182.576
		68.697	172.967
		77.925	155.584
		87.152	140.675
G353	180	50.242	1295.719
		59.470	1117.797
		68.697	1022.360
		77.925	878.419
		87.152	809.940
	190	50.242	807.476
		59.470	703.571
		68.697	636.524
		77.925	564.486
		87.152	537.564
	200	50.242	536.968
		59.470	475.800
		68.697	409.700
		77.925	365.929
		87.152	334.349
	210	50.242	370.583
		59.470	322.360
		68.697	288.673

ต่อหน้าต่อไป

ต่อจากหน้าที่แล้ว

ชนิดของตัวดูดซับ	อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (°C)	อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (cm^3/min)	t_r (sec)
		77.925	253.434
		87.152	241.702
	220	50.242	260.314
		59.470	226.446
		68.697	190.497
		77.925	182.870
		87.152	163.940
G354	180	50.242	1955.654
G354		59.470	1759.170
		68.697	1620.325
		77.925	1516.767
		87.152	1419.248
	190	50.242	1344.236
		59.470	1180.843
		68.697	1069.200
		77.925	966.643
		87.152	878.440
	200	50.242	864.527
		59.470	762.112
		68.697	700.501
		77.925	591.801
		87.152	569.456
	210	50.242	559.486
		59.470	506.426
		68.697	457.414
		77.925	416.037
		87.152	385.056
	220	50.242	390.453
		59.470	343.852
		68.697	309.357
		77.925	283.650
		87.152	257.685
G355	180	50.242	2174.766
		59.470	1903.233

ต่อหน้าต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

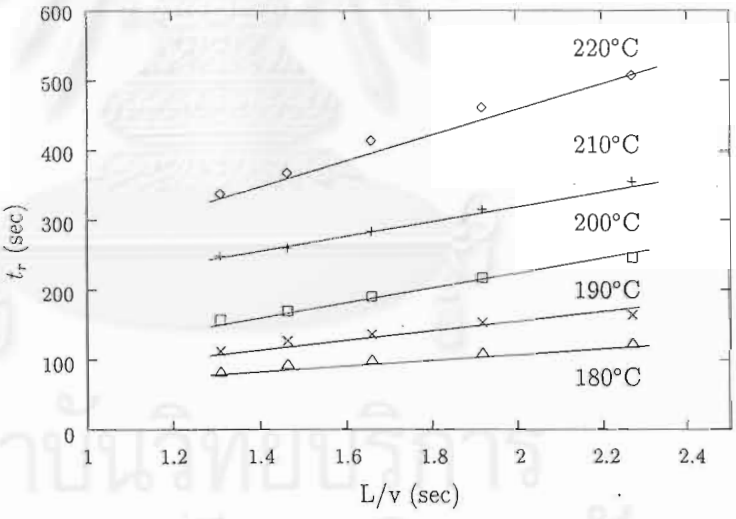
ต่อจากหน้าที่แล้ว

ชนิดของตัวดูดซับ	อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (°C)	อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (cm^3/min)	t_r (sec)
		68.697	1770.366
		77.925	1621.738
		87.152	1465.592
	190	50.242	1413.662
		59.470	1219.773
		68.697	1100.078
		77.925	966.983
		87.152	901.080
	200	50.242	942.793
		59.470	803.985
		77.925	619.446
		87.152	586.200
	210	50.242	587.215
		59.470	508.736
		68.697	454.391
		77.925	406.992
		87.152	375.564
	220	50.242	376.245
		59.470	327.292
		68.697	288.172
		77.925	262.322
		87.152	240.923

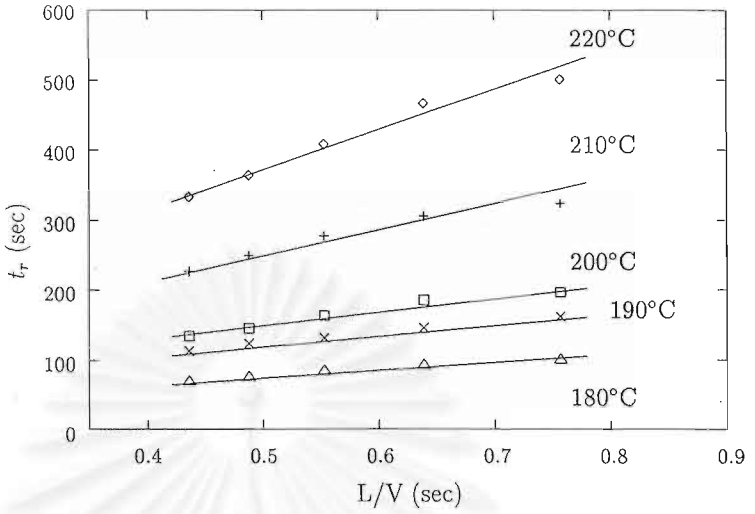
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

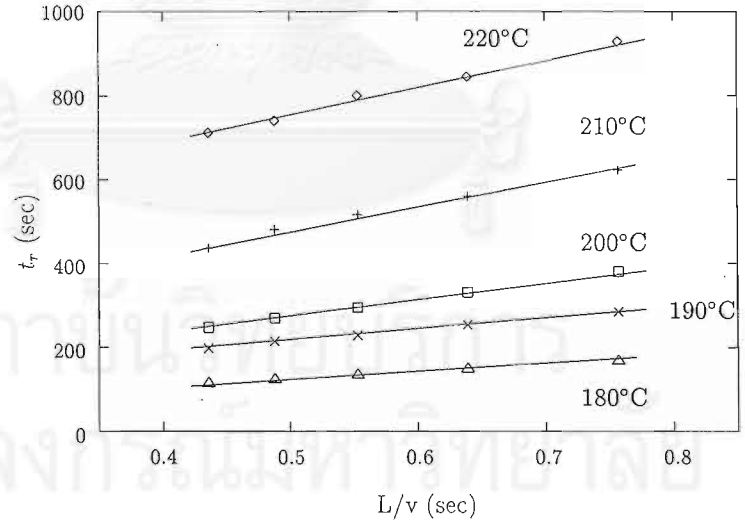
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก กับ ความเร็วของแก๊สตัวพา



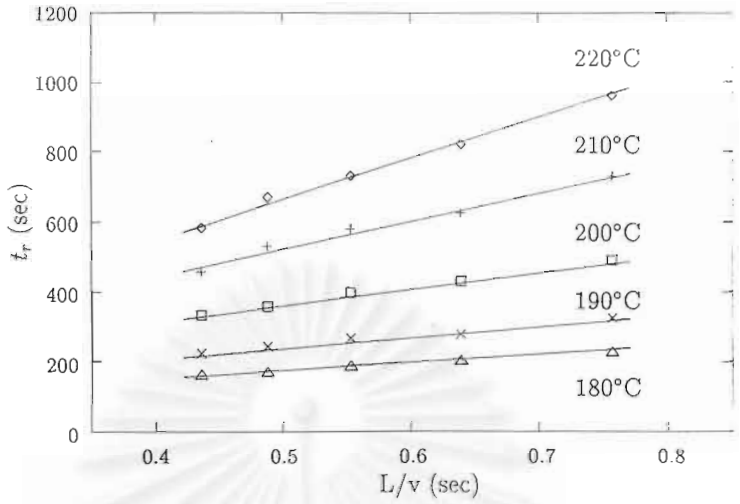
รูปที่ ง.1: ตัวดูดซับที่เตรียมด้วยความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก 20% โดยน้ำหนัก



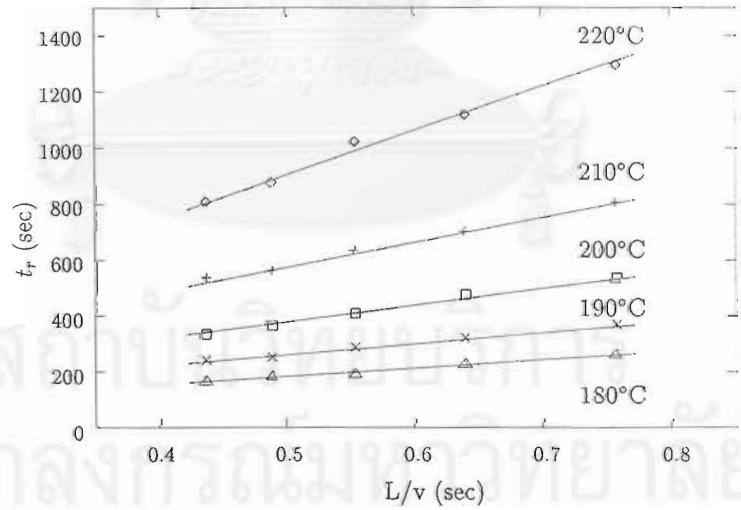
รูปที่ ง.2: ตัวดูดซับที่เตรียมด้วยความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก 30% โดยน้ำหนัก



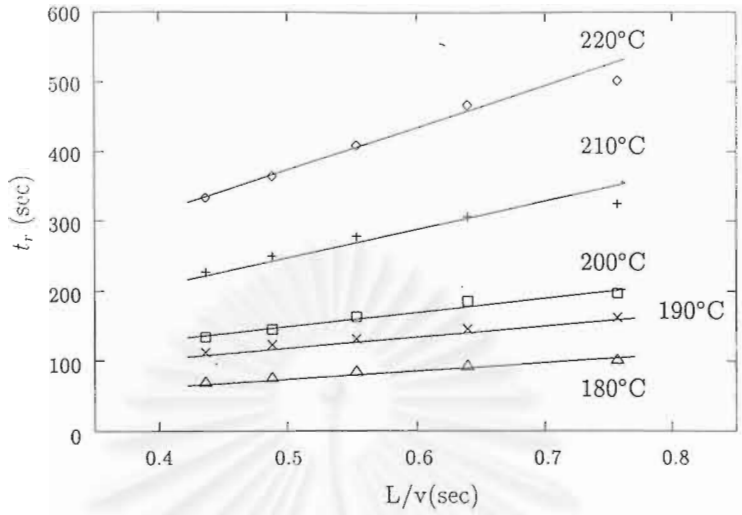
รูปที่ ง.3: ตัวดูดซับที่เตรียมด้วยความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก 40% โดยน้ำหนัก



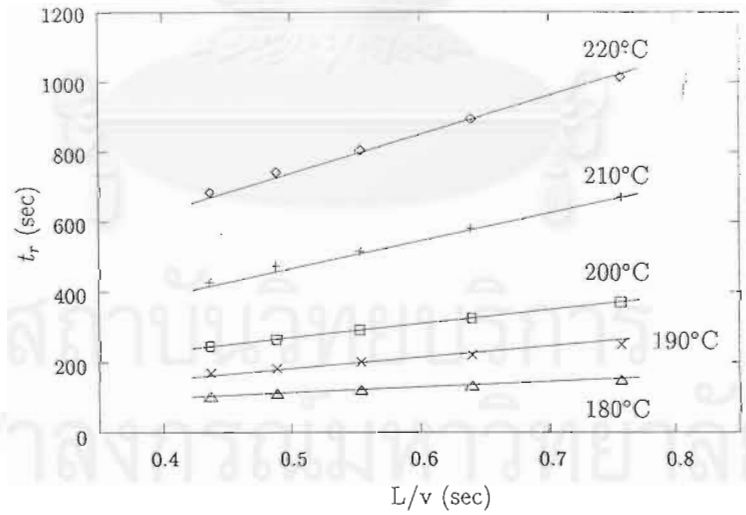
รูปที่ ง.4: ตัวดูดซับที่เตรียมด้วยความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก 50% โดยน้ำหนัก



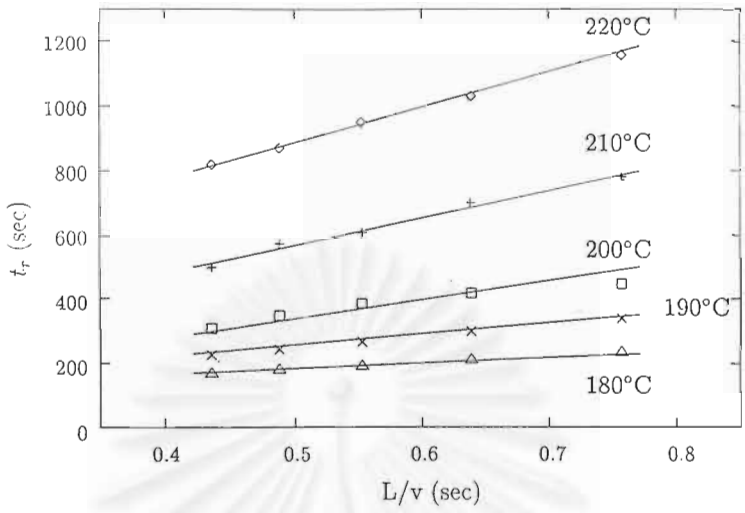
รูปที่ ง.5: ตัวดูดซับที่เตรียมด้วยความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก 60% โดยน้ำหนัก



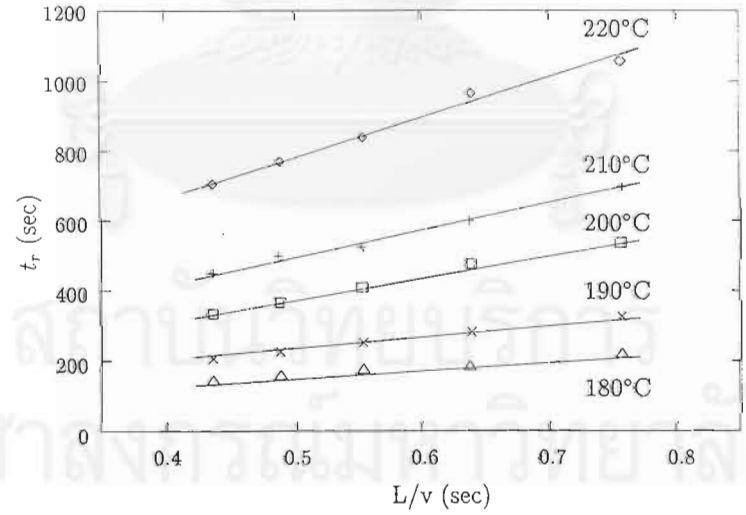
รูปที่ ง.6: ตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



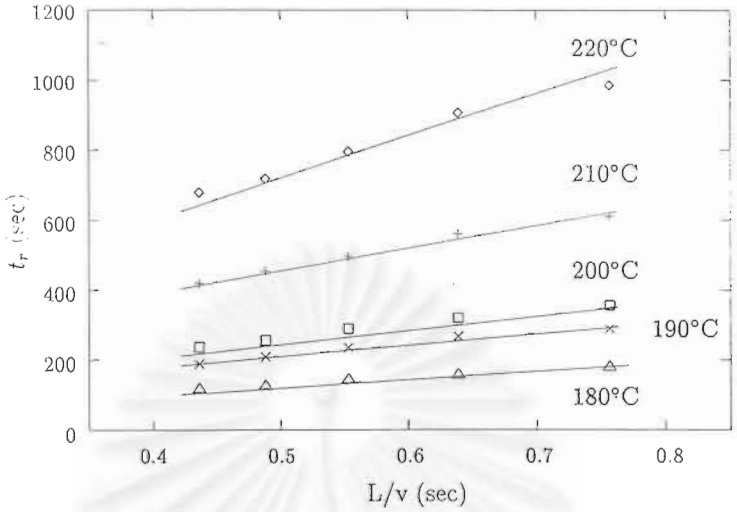
รูปที่ ง.7: ตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส



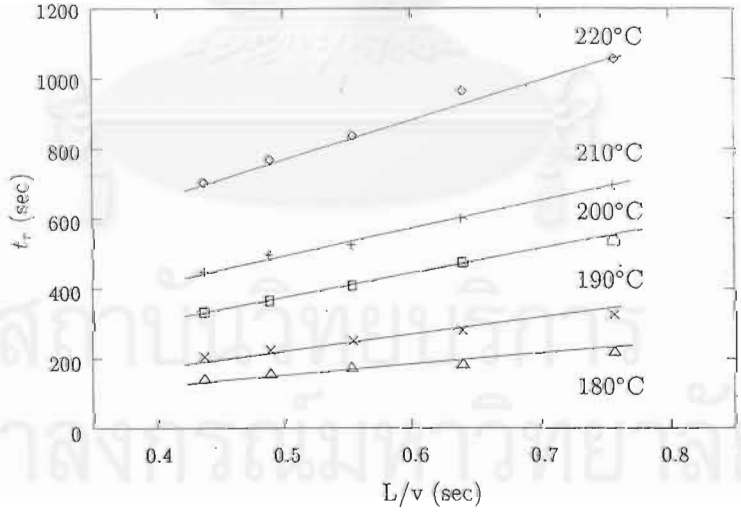
รูปที่ ง.8: ตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



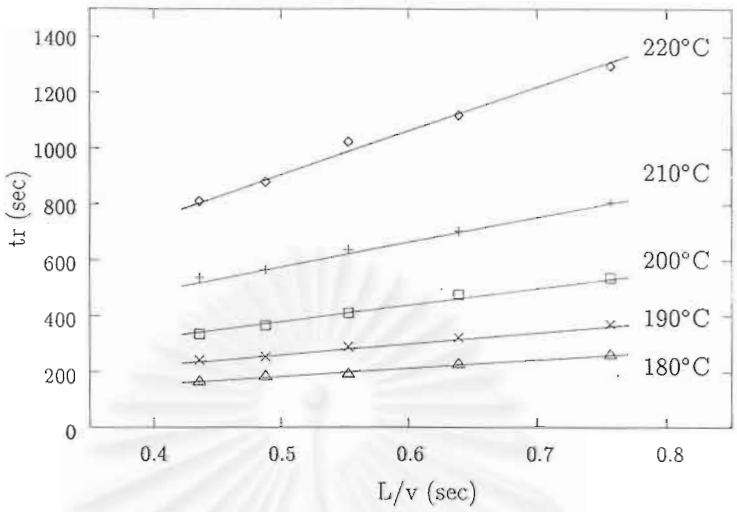
รูปที่ ง.9: ตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส



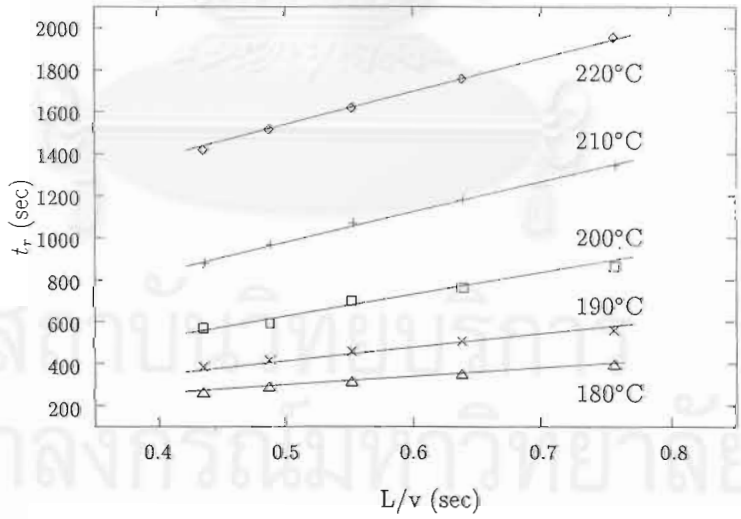
รูปที่ ง.10: ตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้เวลา 15 นาที



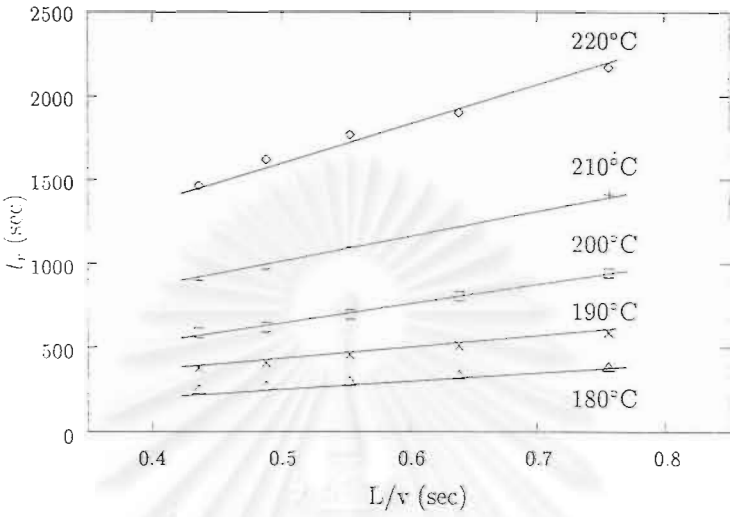
รูปที่ ง.11: ตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้เวลา 30 นาที



รูปที่ ง.12: ตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้เวลา 60 นาที



รูปที่ ง.13: ตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้เวลา 90 นาที



รูปที่ ง.14: ตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้เวลา 120 นาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.1: ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้จากการเปลี่ยนความเข้มข้นสารละลายกรดฟอสฟอริก

ชนิดของตัวดูดซับ	อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (°C)	K	K ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ
G225	180	121.08	310.45
	190	76.13	195.20
	200	64.31	164.90
	210	35.24	90.36
	220	26.63	68.27
G325	180	259.01	1974.18
	190	146.34	1115.40
	200	97.17	740.59
	210	72.60	553.37
	220	47.65	363.18
G425	180	323.64	2831.49
	190	266.01	2327.29
	200	197.90	1731.44
	210	127.56	1116.02
	220	78.46	686.48
G525	180	490.20	4436.21
	190	340.28	3079.47
	200	209.58	1896.64
	210	128.60	1163.84
	220	88.12	797.43
G625	180	574.26	5453.53
	190	389.82	3703.70
	200	233.78	2220.06
	210	133.00	1263.06
	220	92.01	873.79

ตารางที่ จ.2: ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้จากการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ชนิดของตัวดูดซับ	อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (°C)	K	K ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ
G315	180	5.86	9.15
	190	5.70	8.91
	200	5.47	8.55
	210	5.30	8.27
	220	4.73	7.40
G325	180	259.01	1974.18
	190	146.34	1115.40
	200	97.17	740.59
	210	72.60	553.37
	220	47.65	363.18
G335	180	407.01	3055.64
	190	297.65	2234.63
	200	154.75	1161.81
	210	100.70	755.98
	220	57.96	435.11
G345	180	448.94	3033.37
	190	366.23	2474.51
	200	177.70	1200.70
	210	148.71	1004.78
	220	85.55	578.06
G355	180	1048.56	7023.19
	190	793.77	5316.63
	200	637.60	4270.58
	210	368.77	2470.02
	220	235.91	1580.12

ตารางที่ จ.3: ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้จากการเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ชนิดของตัวดูดซับ	อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (°C)	K	K ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ
G351	180	523.86	3497.04
	190	317.42	2118.94
	200	195.67	1306.19
	210	167.16	1115.86
	220	102.60	684.91
G352	180	547.33	3651.28
	190	366.77	2446.74
	200	250.49	1671.06
	210	181.86	1213.18
	220	110.42	736.66
G353	180	774.73	5107.01
	190	438.52	2890.73
	200	329.68	2173.25
	210	210.67	1388.73
	220	152.98	1008.41
G354	180	800.90	5757.72
	190	693.81	4987.87
	200	460.17	3308.17
	210	264.69	1902.90
	220	197.05	1416.63
G355	180	1048.56	7023.19
	190	793.77	5316.63
	200	637.60	4270.58
	210	368.77	2470.02
	220	235.91	1580.12

ประวัติผู้เขียน

นายวิศรุต โลจนานนท์ เกิดในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2518 จบการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ภาควิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2539 และเข้าศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2540

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย