

การดูดซับแก๊สโพรเพนด้วยตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากกะลามะพร้าว  
โดยการกระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์

นางสาว กฤติยา เสือสีนาค



สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

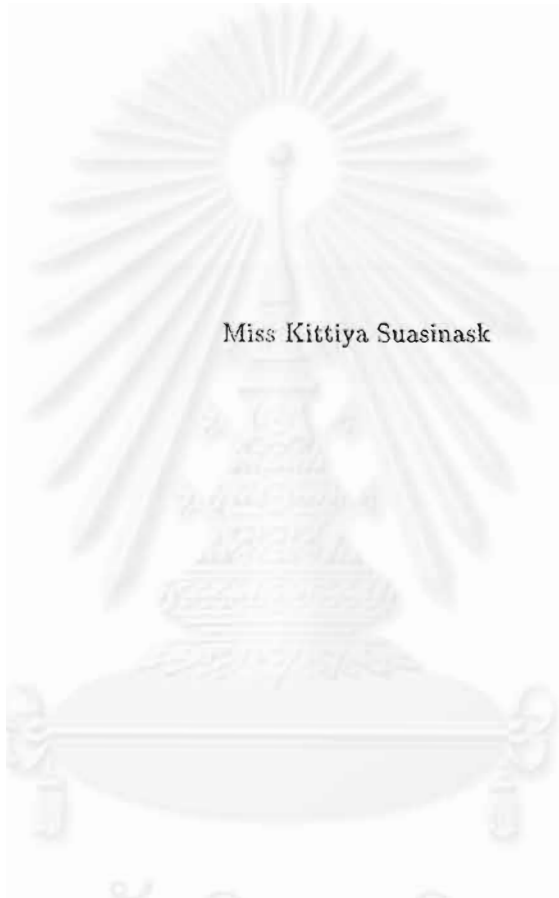
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-879-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADSORPTION OF PROPANE WITH CARBON ADSORBENT FROM COCONUT SHELLS  
ACTIVATED BY ZINC CHLORIDE



Miss Kittiya Suasinask

สถาบันวิทยบริการ

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-334-879-4



กฤติยา เสือสีนาค : การดูดซับแก๊สโพรเพนด้วยตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากกะลามะพร้าว  
โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ (ADSORPTION OF PROPANE WITH CARBON  
ADSORBENT FROM COCONUT SHELLS ACTIVATED BY ZINC CHLORIDE)  
อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช, 73หน้า, ISBN 974-334-879-4

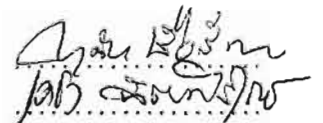
ตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากการเผากะลามะพร้าวด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ ได้ศึกษาผลของ  
ความเข้มข้นของสารละลาย อุณหภูมิและช่วงเวลาในการเตรียม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นถึง 50% โดย  
มวล พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นถึง 711 ตารางเมตรต่อกรัม ขณะที่ค่าการดูดซับไอโอดีนก็เพิ่มขึ้นถึง 898  
มิลลิกรัมต่อกรัม ลักษณะสมบัติทั้งสองยังเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิจนถึง 500 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้น  
ตามช่วงเวลาจนถึง 60 นาที

ส่วนการดูดซับแก๊สโพรเพนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ปริมาณการดูดซับสามารถวัดได้  
จากเส้นโค้งผ่านทะลุสำหรับหอดูดซับซึ่งมีความยาว 11 เซนติเมตร แบบจำลองสมดุลการดูดซับ  
ทั้งหมดสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ พบว่าปริมาณการดูดซับสูงสุดสอดคล้องกับ  
พื้นที่ผิวของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมขึ้น ขณะที่ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ของทุกตัวดูด  
ซับจะมีค่าใกล้เคียงกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... วิศวกรรมเคมี.....  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมเคมี.....  
ปีการศึกษา ..... 2542.....

ลายมือชื่อนิสิต  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม



๙๙ 4070203721: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: ADSORPTION / PROPANE / CARBON ADSORBENT

KITTIYA SUASINASK: ADSORPTION OF PROPANE WITH CARBON ADSORBENT FROM COCONUT SHELLS ACTIVATED BY ZINC CHLORIDE. THESIS ADVISOR ASSISTANT PROFESSOR DEACHA CHATSIRIWECH, Ph.D., 73pp., ISBN 974-334-879-4

Carbon adsorbent was prepared from carbonized coconut shells with zinc chloride solution. Effects of concentrations of the solution, temperature and periods of preparation were investigated. As an increase in concentration to 50% w/w, surface area increased slightly to 711 m<sup>2</sup>/g, while iodine adsorption rised significantly to 898 mg/g. Both characteristics were also increased with an increase in temperature to 500°C and with increase in period to 60 min.

On propane adsorption at 50°C, the amount adsorbed was measured from breakthrough curves for a packed column with the length of 11 cm. All isotherms were agreed with Langmuir model. It was found that the maximum amount adsorbed corresponded to the surface area of prepared adsorbent. While the adsorption Langmuir constants of all adsorbents were close to one another.



ภาควิชา ..... วิศวกรรมเคมี.....  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมเคมี.....  
ปีการศึกษา ..... 2542.....

ลายมือชื่อนิสิต  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม


# กิตติกรรมประกาศ



ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช ที่กรุณาให้ความเอาใจใส่และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัยนี้ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศศิธร บุญ-หลง และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย สุกาญจน์จักษ์ และ อาจารย์ ดร. สิริรุ่ง ปรีชานนท์ สำหรับความช่วยเหลือ ตั้งแต่การตรวจสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ ตลอดจนข้อเสนอแนะต่างๆ ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณเชิดชัย บุญชูช่วย และการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย ที่ให้การสนับสนุนแก๊สในงานวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณครอบครัว พี่ๆ และเพื่อนๆ ที่ช่วยสนับสนุนและให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา



# สารบัญ

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญรูป .....	ญ
สารบัญตาราง .....	ฎ
สัญลักษณ์และอักษรย่อ .....	ฬ
1 บทนำ .....	1
2 ทฤษฎีการดูดซับแก๊ส .....	6
2.1 ตัวดูดซับในอุตสาหกรรม .....	6
2.1.1 ตัวดูดซับชนิดถ่าน .....	6
2.1.2 มะพร้าว .....	8
2.1.3 การผลิตตัวดูดซับชนิดถ่าน .....	9
2.1.4 โครงสร้างของตัวดูดซับชนิดถ่าน .....	10
2.1.5 ตัวดูดซับชนิดอลูมินา .....	12
2.1.6 ตัวดูดซับชนิดซิลิกาเจล .....	12
2.1.7 ตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์ .....	12
2.2 สมดุลการดูดซับ .....	13
2.2.1 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของเฮนรี่ .....	14
2.2.2 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ .....	14
2.2.3 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรอยด์ลิช .....	14
2.3 กลไกการดูดซับ .....	15
2.4 การวัดสมดุลการดูดซับ .....	15
2.4.1 วิธีวัดโดยตรง .....	15
2.4.2 วิธีวัดโดยอ้อม .....	16

3	การทดลอง	17
3.1	การเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่าน	17
3.1.1	การเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์	17
3.1.2	การเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่าน ณ อุณหภูมิต่างๆ	18
3.1.3	การเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่าน ณ ช่วงเวลาต่างๆ	18
3.1.4	วิธีการตรวจสอบลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่าน	19
3.2	การวัดสมมูลการดูดซับ	20
3.2.1	ตัวดูดซับ	20
3.2.2	แก๊สถูกดูดซับ	20
3.2.3	แก๊สเฉื่อยผสม	20
3.2.4	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	20
3.2.5	วิธีวัดเส้นโค้งผ่านทะเล	23
4	ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	24
4.1	ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่าน	24
4.1.1	ลักษณะของถ่านกะลามะพร้าว	24
4.1.2	ผลของสารละลายซิงก์คลอไรด์	25
4.1.3	ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา	26
4.1.4	ผลของการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการเผาเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว	27
4.1.5	ลักษณะโครงสร้างของพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับชนิดถ่าน	27
4.1.6	การเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยอื่น	33
4.2	การดูดซับแก๊สไซโรเพน	34
4.2.1	แบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์	35
4.2.2	การอธิบายสมมูลการดูดซับด้วยแบบจำลองสมมูลการดูดซับของแลงเมียร์	36
4.2.3	การเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยอื่น	40
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	44
5.1	บทสรุป	44
5.2	ข้อเสนอแนะ	45
	รายการอ้างอิง	46
	ภาคผนวก	49
ก	ตัวอย่างการคำนวณ	50
ก. 1	ค่าไอโอดีน	50
ก. 1.1	สารเคมีสำหรับทดสอบค่าไอโอดีน	50
ก. 1.2	การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารเคมีที่เตรียมได้	50
ก. 1.3	การหาค่าไอโอดีน	51
ก. 2	การหาค่าความพรุนของส่วนที่บรรจุตัวดูดซับและความหนาแน่นของตัวดูดซับชนิดถ่าน	52
ก. 3	ปริมาณการดูดซับ	54



ก. 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่สมมูลแลงเมียร์ สำหรับกรณีพิจารณาการดูดซับ ต่อมวล และต่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับชนิดถ่าน . . . . .	56
ข ปริมาณการดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน	57
ค เส้นโค้งผ่านทะเล	65
ประวัติผู้เขียน . . . . .	73



# สารบัญรูป

3.1	แผนผังการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง . . . . .	21
4.1	ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับชนิดถ่านกะลา . . . . .	28
4.2	ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากสารละลายซิงค์คลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ . . . . .	29
4.3	ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากอนุหภูมิต่างๆ . . . . .	30
4.4	ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากช่วงเวลาต่างๆ . . . . .	31
4.5	ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ใช้ในอุตสาหกรรม . . . . .	32
4.6	เส้นโค้งผ่านทะลุคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60min ณ สภาวะอนุหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	35
4.7	แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ของข้อมูลสมดุลการดูดซับแก๊สไพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60min ณ สภาวะอนุหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	36
4.8	แสดงแบบจำลองของสมดุลการดูดซับแก๊สไพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่านกะลา ณ สภาวะอนุหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	38
4.9	แสดงแบบจำลองของสมดุลการดูดซับแก๊สไพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากสารละลายซิงค์คลอไรด์ความเข้มข้นต่างๆ ณ สภาวะอนุหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	39
4.10	แสดงแบบจำลองของสมดุลการดูดซับแก๊สไพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากอนุหภูมิต่างๆ ณ สภาวะอนุหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	39
4.11	แสดงแบบจำลองของสมดุลการดูดซับแก๊สไพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากช่วงเวลาต่างๆ ณ สภาวะอนุหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	40
4.12	แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองสมดุลการดูดซับแก๊สไพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60 min กับตัวดูดซับชนิดคาร์บอนไมล็กูลาซีฟ MSC-5A ณ สภาวะอนุหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	41
4.13	แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองสมดุลการดูดซับแก๊สไพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60 min กับตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์ NaA ณ สภาวะอนุหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	42
4.14	แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองสมดุลการดูดซับแก๊สไพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60 min กับตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์ NaX ณ สภาวะอนุหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	42
4.15	แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองสมดุลการดูดซับแก๊สไพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60 min กับตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์ NaY ณ สภาวะอนุหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	43

4.16 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองสมดุลการดูดซับแก๊สโพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60 min กับตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์ 13X ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . .	43
ก.1 แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของการหาค่าความพรุนของส่วนที่บรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 1:1 50% 500c 1h . . . . .	53
ก.2 แสดงเส้นโค้งผ่านทะลุ (breakthrough curve) . . . . .	54
ค.1 เส้นโค้งผ่านทะลุคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่านกะลา ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	65
ค.2 เส้นโค้งผ่านทะลุคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่านกะลาอย่างเดี่ยว ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	66
ค.3 เส้นโค้งผ่านทะลุคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่านกะลาผสมน้ำ ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	66
ค.4 เส้นโค้งผ่านทะลุคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 30% 500c 60min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	67
ค.5 เส้นโค้งผ่านทะลุคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 40% 500c 60min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	67
ค.6 เส้นโค้งผ่านทะลุคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	68
ค.7 เส้นโค้งผ่านทะลุคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 60% 500c 60min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	68
ค.8 เส้นโค้งผ่านทะลุคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 300c 60min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	69
ค.9 เส้นโค้งผ่านทะลุคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 400c 60min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	69
ค.10 เส้นโค้งผ่านทะลุคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 450c 60min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	70
ค.11 เส้นโค้งผ่านทะลุคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 475c 60min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	70
ค.12 เส้นโค้งผ่านทะลุคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 600c 60min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	71
ค.13 เส้นโค้งผ่านทะลุคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 15min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	71
ค.14 เส้นโค้งผ่านทะลุคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 30min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	72
ค.15 เส้นโค้งผ่านทะลุคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 45min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส . . . . .	72

# สารบัญตาราง

2.1 องค์ประกอบของกะลามะพร้าว . . . . .	9
2.2 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของซิงก์คลอไรด์ . . . . .	11
2.3 ขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ชนิด A ที่ดูลประจุลบด้วยโลหะหมู่ I และ หมู่ II . . . . .	13
2.4 ขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ชนิด X และชนิด Y ที่ดูลประจุลบด้วยโลหะหมู่ I และ หมู่ II . . . . .	13
3.1 สมบัติทางกายภาพของแก๊สโพรเฟน . . . . .	20
3.2 สมบัติทางกายภาพของแก๊สฮีเลียมที่อุณหภูมิ 232 องศาเซลวิน . . . . .	21
3.3 ลักษณะของตัวดูดซับชนิดถ่านที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ซึ่งมีความยาวของส่วนที่บรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 11 เซนติเมตร . . . . .	22
4.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายซิงก์คลอไรด์ . . . . .	25
4.2 ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียม ณ อุณหภูมิต่างๆ . . . . .	26
4.3 ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมในช่วงเวลาต่างๆ . . . . .	27
4.4 ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ใช้ในอุตสาหกรรม . . . . .	33
4.5 แสดงผลการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่าน . . . . .	34
4.6 แสดงค่าคงที่ในแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์สำหรับการดูดซับบนตัวดูดซับชนิดถ่าน . . . . .	37
ข.1 ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเฟนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่านกะลา . . . . .	57
ข.2 ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเฟนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่านกะลาอย่างเดียว . . . . .	58
ข.3 ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเฟนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่านกะลาผสมน้ำ . . . . .	58
ข.4 ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเฟนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 30% 500c 60min . . . . .	59
ข.5 ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเฟนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 40% 500c 60min . . . . .	59
ข.6 ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเฟนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60min . . . . .	60
ข.7 ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเฟนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 60% 500c 60min . . . . .	60
ข.8 ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเฟนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 300c 60min . . . . .	61
ข.9 ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเฟนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 400c 60min . . . . .	61
ข.10 ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเฟนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 450c 60min . . . . .	62
ข.11 ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเฟนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 475c 60min . . . . .	62
ข.12 ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเฟนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 600c 60min . . . . .	63
ข.13 ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเฟนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 15min . . . . .	63
ข.14 ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเฟนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 30min . . . . .	64

ข.15 ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 45min . . . 64



# สัญลักษณ์และอักษรย่อ

## สัญลักษณ์

$A_c$	พื้นที่หน้าตัดของหลอดดูดซับ ( $m^2$ )
$A$	พื้นที่ผิวต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน ( $m^2/g$ )
$c_0$	ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ ( $mole/cm^3$ )
$D_p$	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคตัวดูดซับชนิดถ่าน(cm)
$K_F$	ค่าคงที่ของการดูดซับของฟรอยดิส
$K_H$	ค่าคงที่ของการดูดซับของเฮนรี่
$K_L$	ค่าคงที่ของการดูดซับของแลงเมียร์ กรณีพิจารณาการดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน ( $atm^{-1}$ )
$K_{LA}$	ค่าคงที่ของการดูดซับของแลงเมียร์ กรณีพิจารณาการดูดซับต่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับชนิดถ่าน( $atm^{-1}$ )
$L$	ความยาวของส่วนบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน (m)
$M$	สารถูกดูดซับที่สะสมในหลอดดูดซับ (mol)
$n$	ค่าคงที่ของแบบจำลองสมดุลการดูดซับฟรอยดลิส
$\Delta P$	ความดันลดภายในคอลัมน์
$P_i$	ความดันย่อย
$P$	ความดันสัมบูรณ์
$Q$	อัตราการไหลเชิงปริมาตร (ml/min)
$q$	ปริมาณการดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน (mmol/g)
$q_s$	ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน (mmol/
$R$	ค่าคงที่ของแก๊ส ( $cm^3 atm/mol K$ )
$R^2$	ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง
$T$	อุณหภูมิ (K)
$t_b$	เวลาที่เริ่มเคลื่อนที่ออกจากหลอดดูดซับ (s)
$t_m$	เวลาเฉลี่ยที่สารถูกดูดซับอยู่ในหลอดดูดซับ (s)
$t_e$	เวลาที่เริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ (s)
$v$	ความเร็วในการไหลของแก๊สตัวพา(cm/s)
$y_i$	สัดส่วนโมลของสารถูกดูดซับ

## อักษรกรีก

- $\epsilon$  ความพรุนของส่วนที่บรรจุตัวดูดซับ
- $\rho_b$  ความหนาแน่นของส่วนที่บรรจุตัวดูดซับ ( $\text{g/cm}^3$ )
- $\rho_p$  ความหนาแน่นของอนุภาคตัวดูดซับ ( $\text{g/cm}^3$ )
- $\rho_s$  ความหนาแน่นของอนุภาคตัวดูดซับ ( $\text{g/cm}^3$ )
- $\mu$  ความหนืดของแก๊สตัวพา ( $\text{g/cm s}$ )



# บทที่ 1



## บทนำ

การแยกแก๊สธรรมชาติเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมากกระบวนการหนึ่งในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เนื่องจากแก๊สธรรมชาติที่ถูกรับในอ่าวไทยนั้นเป็นของผสม ซึ่งประกอบด้วยธาตุไฮโดรเจน และธาตุคาร์บอน หรือสารประกอบกลุ่มพาราฟินส์อิ่มตัว เช่น มีเทน อีเทน โพรเพน และบิวเทน เป็นต้น และสารประกอบอินทรีย์ เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไนโตรเจน เป็นต้น ซึ่งมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับสารประกอบกลุ่มแรก จุดมุ่งหมายหลักของการแยกแก๊สธรรมชาตินั้นเพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์ได้สูงสุด นอกจากการใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมเคมี และในครัวเรือน สารประกอบในกลุ่มพาราฟินส์ข้างต้นแต่ละชนิดสามารถใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และอุตสาหกรรมเคมี ตัวอย่างเช่น มีเทน เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตแอมโมเนีย กรดไนตริก และปุ๋ยเคมี เช่น ปุ๋ยยูเรีย เป็นต้น เมทิลอัลกอฮอล์ กรดอะซิติก สารประกอบเอมีน คลอโรฟอร์ม และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ เป็นต้น อีเทน เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตเอทิลีน ซึ่งใช้ผลิตเป็นพลาสติกต่างๆ เช่น โพลีไวนิลคลอไรด์ โพลีเอทิลีน และโพลีสไตรีน เป็นต้น เอทิลีนออกไซด์ เอทิลีนไกลคอล และเอทานอล เป็นต้น โพรเพน เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตโพรพิลีน ซึ่งใช้ผลิตเป็นโพลีโพรพิลีน เป็นต้น โพรพิลีนออกไซด์ และไอโซโพรพานอล เป็นต้น บิวเทน เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตบิวทิลีน เมทิลเอทิลคีโตน ไอโซบิวทิลีน เป็นต้น[1,2,3]

การแยกสารประกอบต่างๆ ในแก๊สธรรมชาติออกจากกัน มักเป็นการกลั่นแยกตามลำดับส่วน ทำให้กระบวนการแยกแก๊สธรรมชาติ จึงต้องมีขั้นตอนการเปลี่ยนอุณหภูมิและความดันของแก๊สผสม เพื่อให้เหมาะสมกับการกลั่นแยก เนื่องจากอุณหภูมิของสมดุลไอ-ของเหลวของสารประกอบบางชนิดในกลุ่มพาราฟินส์ค่อนข้างต่ำมาก เช่น ต่ำกว่า  $-150$  องศาเซลเซียส เป็นต้น ภายใต้อุณหภูมิต่ำที่เลือกไว้ นอกจากนี้อุณหภูมิของการดำเนินการที่เหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และอุตสาหกรรมเคมีมักสูงกว่า  $50$  องศาเซลเซียส (โดยประมาณ) จึงจำเป็นต้องดึงพลังงานความร้อนออกจากแก๊สธรรมชาติ และให้พลังงานความร้อนกับสารประกอบที่แยกแล้วอีกครั้ง ซึ่งเป็นลักษณะของการจัดการพลังงานความร้อนที่มีประสิทธิภาพต่ำ จึงมีแนวความคิดที่จะพัฒนากรรมวิธีการแยกสารประกอบต่างๆ ในแก๊สธรรมชาติออกจากกันโดยไม่ต้องลดอุณหภูมิให้ต่ำมาก เช่นเดียวกับการกลั่นแยก กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการแยกแก๊สผสมกระบวนการหนึ่งที่สามารถดำเนินการได้ ภายใต้อุณหภูมิปกติ ยิ่งกว่านั้นแก๊สธรรมชาติมักมีความดันสูง เช่น  $200$  บรรยากาศ สำหรับแก๊สธรรมชาติในอ่าวไทย เป็นต้น ดังนั้นกระบวนการดูดซับแบบความดันสลับ (pressure swing adsorption, PSA) อาจนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการแยกแก๊สธรรมชาติได้ แต่จำเป็นต้องเลือกใช้ตัวดูด



ชั้นที่เหมาะสม

ในการออกแบบการดูดซับ ข้อมูลสมดุลการดูดซับและอัตราการดูดซับของสารประกอบแต่ละชนิดบนตัวดูดซับแต่ละชนิด เป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกใช้ตัวดูดซับที่เหมาะสม ซึ่งข้อมูลสมดุลการดูดซับสามารถหาได้จากการวัดปริมาณของสารประกอบที่ถูกดูดซับไว้ที่สมดุลกับปริมาณความเข้มข้นขององค์ประกอบนั้นที่อยู่ในวัฏภาคแก๊สด้วยวิธีเชิงปริมาตร (volumetric method) หรือวิธีเชิงน้ำหนัก (gravimetric method) หรืออาจวัดได้โดยทางอ้อม ด้วยวิธีโครมาโตกราฟี (chromatography) หรือด้วยวิธีเชิงไดนามิก เรียกว่า วิธีไหลผ่านทะลุ (breakthrough method) ซึ่ง Danner R.P. และ Chai E.C.F.[4] ได้ศึกษาสมดุลการดูดซับของแก๊สองค์ประกอบเดี่ยว และแก๊สสององค์ประกอบของอัลเคนและอัลซีน บนตัวดูดซับซีโอไลต์ NaX ในระบบปิดด้วยวิธีเชิงปริมาตร ส่วน T. Victor Lee และ J. Chang Huang[5] ได้ศึกษาสมดุลการดูดซับของแก๊สอีเทนและอะเซทีลีน และแก๊สผสมระหว่างอีเทนและอะเซทีลีนบนตัวดูดซับชนิดถ่าน Columbia 4LXC 12/38 โดยวิธีโครมาโตกราฟี และ T. Victor Lee และ R. Madey[6] ศึกษาทดลองเพิ่มเติมโดยการวัดสมดุลการดูดซับของแก๊สโพรเพน และ แก๊สผสมระหว่างแก๊สอีเทนและโพรเพนบนตัวดูดซับชนิดเดียวกัน Hufton I.R. และ Danner R.P.[7] ได้วัดสมดุลการดูดซับของแก๊สพวกอัลเคน บนซิลิกา พร้อมทั้งคำนวณหาค่าคงที่สมดุลการดูดซับด้วย และ Schneider P. และ Smith J.M. [8] กับ Kershenbaum L.S. และ Kohler M.A.[9] ได้ศึกษาและวัดค่าคงที่สมดุลการดูดซับซึ่งอยู่ในช่วงการดูดซับเชิงเส้น และหาอัตราการดูดซับแก๊สอีเทนโพรเพน และนอมัลบิวเทน บนตัวดูดซับชนิดซิลิกาและอลูมินา โดยใช้วิธีโครมาโตกราฟี นอกจากนี้ A. Malek และ S. Farooq[10] เสนอวิธีการหาสมดุลการดูดซับของแก๊สองค์ประกอบเดี่ยวของ มีเทน อีเทน และโพรเพน บนตัวดูดซับชนิดถ่านและซิลิกา ด้วยวิธีเชิงไดนามิกแบบไหลผ่านทะลุ (dynamic column breakthrough (DCBT) method) และวิธีการคายการดูดซับแบบอัตราการไหล คงที่ที่สภาวะสมดุล (constant flow equilibrium desorption (CFED) method) และ E. Costa และผู้ร่วมงาน[11] ได้ศึกษาวัดสมดุลการดูดซับของแก๊สผสมสององค์ประกอบและสามองค์ประกอบ ของแก๊สมีเทน อีเทน เอทิลีน และโพรพิลีน บนตัวดูดซับชนิดถ่าน โดยใช้วิธีไหลผ่านทะลุ G. Calleja และผู้ร่วมงาน[12] ได้ศึกษาสมดุลการดูดซับของแก๊สเอทิลีน โพรเพน โพรพิลีน และคาร์บอนไดออกไซด์ และของผสมของแก๊สดังกล่าว บนซีโอไลต์ ด้วยวิธีไหลผ่านทะลุ เพื่อหาข้อมูลสมดุลการดูดซับ Harj J. และ James R. F.[13] ได้ศึกษากรรมวิธีการแยกแก๊สผสมโพรพิลีนและโพรเพนที่สามารถใช้แทนวิธีการกลั่นลำดับส่วนซึ่งคือ วิธีการแยกด้วยการดูดซับ โดยตัวดูดซับที่ใช้ คือ ซีโอไลต์ อลูมินา ซิลิกาเจล และตัวดูดซับชนิดถ่าน เพื่อหาข้อมูลสมดุลการดูดซับและอัตราของการดูดซับด้วยวิธีไหลผ่านทะลุ

การดูดซับซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์บนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ดังนั้น ตัวดูดซับจึงต้องมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับ อย่างไรก็ตามตัวดูดซับที่ใช้สำหรับการดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ เช่น ตัวดูดซับชนิดถ่าน ชนิดอลูมินา ชนิดซิลิกาเจล หรือชนิดซีโอไลต์ เป็นต้น ซึ่งตัวดูดซับดังกล่าวส่วนใหญ่มักถูกนำเข้ามาจากต่างประเทศ จึงเห็นควรที่จะมีการพัฒนาการผลิตตัวดูดซับใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ภายในประเทศ ด้วยเหตุนี้ตัวดูดซับชนิดถ่านจึงถูกนำมาใช้ในการดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอน เนื่องจากมีความพรุนและมีพื้นที่ผิวมาก อีกทั้งยังสามารถผลิตจากวัสดุเหลือใช้หรือเศษวัสดุทางการเกษตรที่มีอยู่ภายในประเทศ เช่น กะลามะพร้าว แกลบ ขี้เลื่อย ชังข้าวโพด และชานอ้อย เป็นต้น วัสดุที่ที่น่าสนใจในการที่จะนำมาผลิตตัวดูดซับชนิดถ่าน คือ กะลามะพร้าว ทั้งนี้เพราะในประเทศไทยก็มีการปลูกมะพร้าวกันแทบทุกภาค จังหวัดที่มี

การเพาะปลูกกันมาก ได้แก่ ชุมพร นครศรีธรรมราช สุราษฎร์ธานี ประจวบคีรีขันธ์ และชลบุรี [14] ส่วนใหญ่นำเนื้อมะพร้าวไปเป็นวัตถุดิบสำหรับการสกัดเอาน้ำมัน ด้วยเหตุนี้จึงมีกะลามะพร้าวเหลืออยู่มาก ซึ่งมักจะใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือทิ้งไป นอกจากนี้กะลามะพร้าวยังมีลักษณะแข็งมาก จึงควรศึกษาวิจัยการสังเคราะห์ตัวดูดซับชนิดถ่านจากกะลามะพร้าว

สำหรับกรรมวิธีในการผลิตตัวดูดซับที่เตรียมจากกะลามะพร้าวได้มีผู้ศึกษาหลายท่าน อาทิเช่น Mukherjee,S. และผู้ร่วมงาน[15] ได้ทดลองผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านจากวัตถุดิบ 2 ชนิด คือ กะลามะพร้าว และเปลือกถั่วลิสง โดยใช้สารประกอบต่างๆคือซิงก์คลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดกำมะถัน ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว โดยเผาที่อุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าการใช้ซิงก์คลอไรด์จะได้ตัวดูดซับชนิดถ่าน ที่มีลักษณะสมบัติในการดูดซับสูงสุดคือ การดูดซับไอโอดีน , การดูดซับเมทิลีนบลู และดูดซับคาร์บอนมีค่าสูงทั้งหมด ส่วนการใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารกระตุ้น จะได้ตัวดูดซับชนิดถ่านที่ดูดซับคาร์บอนได้ดีเท่านั้น และการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดกำมะถันเป็นสารกระตุ้น จะได้ตัวดูดซับชนิดถ่านที่มีลักษณะสมบัติในการดูดซับน้อยที่สุด

ผาสุก คงชาติและผู้ร่วมงาน[16] ศึกษาการเปรียบเทียบการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านจากกะลามะพร้าว เนื้อเมล็ดตาลโตนด และเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้สารละลายซิงก์คลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยการศึกษาตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลาและวัตถุดิบที่นำมาเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่าน พบว่ากรณีของกะลามะพร้าวได้ให้ค่าการดูดซับไอโอดีน 777-1091 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 12-369 มิลลิกรัมต่อกรัม กรณีของเนื้อเมล็ดตาลโตนดได้ให้ค่าการดูดซับไอโอดีน 814-4082 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 39-402 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนกรณีของเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ได้ให้ค่าการดูดซับไอโอดีน 486-922 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 8.8-286 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งค่าที่ได้นี้จะแตกต่างกันไปในแต่ละสภาวะการทดลอง

อุไรวรรณ ธรรมรัตน์พคุณ[17] ได้ทดลองเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านจากกะลามะพร้าวโดยใช้ไอน้ำอิมมัลชันช่วยในการเพิ่มพื้นที่ผิวโดยสภาวะที่ใช้คือ ถ่านขนาด 4-10 เมช (2.00-4.76 มิลลิเมตร) ครึ่งละ 500 กรัม อุณหภูมิ 700-1050 องศาเซลเซียส ช่วงเวลาดังแต่ 30-130 นาที พบว่าตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้มีลักษณะสมบัติของค่าการดูดซับไอโอดีนเป็น 1540 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูเป็น 5-371 มิลลิกรัมต่อกรัม และความหนาแน่นเป็น 0.31-0.59 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ และผู้ร่วมงาน[18] ได้ศึกษาการทำตัวดูดซับชนิดถ่านจากกะลามะพร้าว โดยใช้สารละลายซิงก์คลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น พบว่าต้องเผากะลามะพร้าวให้เป็นถ่านก่อน ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำถ่านที่ได้ผสมกับสารละลายซิงก์คลอไรด์ โดยใช้ปริมาณของสารละลายซิงก์คลอไรด์เทียบอัตราส่วนกับถ่านดังนี้ 1.5 ต่อ 1, 2 ต่อ 1, 2.5 ต่อ 1 และ 3 ต่อ 1 เผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 700-800 องศาเซลเซียสและใช้เวลาในการกระตุ้น 2-4 ชั่วโมง จากผลการทดลองสรุปว่าการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านจากกะลามะพร้าวอัตราส่วนของสารละลายซิงก์คลอไรด์มีผลกระทบต่อลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่านน้อยมาก และควรเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เนื่องจากถ้าใช้อุณหภูมิต่ำจะต้องใช้เวลาในการกระตุ้นนานกว่า สำหรับการให้ค่าไอโอดีนเท่ากัน และจากการทดลองได้ค่าไอโอดีน 150 มิลลิกรัมต่อกรัม

นเรศ จันทรทัยน และผู้ร่วมงาน[19] ได้ศึกษาการนำกะลาตาลโตนดมาผลิตเป็นตัวดูดซับชนิด

ถ่านโดยใช้ไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด และสารละลายซิงก์คลอไรด์ พบว่าการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านต้องเผา  
 กะลาตาลโตนดในเตาเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนนำมาบดและคัด  
 ขนาดถ่าน 2-5 มิลลิเมตร ในการใช้ไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวดทำการทดลองที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส  
 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู ประมาณ 0.17 มิลลิกรัมต่อกรัม  
 ค่าการดูดซับไอโอดีน 600 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนการใช้สารละลายซิงก์คลอไรด์ ทำการทดลองโดยใช้  
 สารละลายซิงก์คลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 50 โดยอัตราส่วนของถ่าน 3 กรัมต่อสารละลายซิงก์คลอไรด์ 9  
 มิลลิลิตร นำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า ค่าเมทธิ  
 ลีนบลูประมาณ 362-376 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน 1088-1117 มิลลิกรัมต่อกรัม

พิสุทธิ์ พันธุ์ชาติกุล และ สมิทธิ์ รัตนสุทธิพงษ์[20] ได้ศึกษาการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านจาก  
 กะลาตาลโดยใช้สารละลายซิงก์คลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 50 ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว นำหนักของสารละลาย  
 ซิงก์คลอไรด์ต่อวัตถุดิบเท่ากับ 2 ต่อ 1 แปรอุณหภูมิที่ใช้คือ 400-450 องศาเซลเซียส และแปรระยะ  
 เวลาที่ใช้คือ 2-3 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าได้ตัวดูดซับชนิดถ่านที่มีคุณภาพต่ำ

บุญชัย ตระกูลมหชัย[21] ทดลองผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านจากกะลาตาลโตนด โดยใช้สารละลาย  
 ซิงก์คลอไรด์ พบว่าต้องเผากะลาตาลโตนดที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อ  
 ให้บดง่ายและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านคือ ผสมกับสารละลายซิงก์คลอไรด์เพิ่ม  
 ข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก นำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้ตัว  
 ดูดซับชนิดถ่านที่มีพื้นที่ผิว 1600-1700 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าไอโอดีน 1100-1200 มิลลิกรัมต่อกรัม  
 ค่าเมทธิลีนบลู 350-400 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนการใช้แก๊สออกซิไดซ์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือการใช้  
 เตาเผาที่ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กระตุ้นด้วยแก๊สผสมที่มีความเร็ว 6.44 เมตร  
 ต่อวินาที ได้ตัวดูดซับชนิดถ่านที่มีพื้นที่ผิว 1800-1900 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าไอโอดีน 1000-1300  
 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าเมทธิลีนบลู 250-350 มิลลิกรัมต่อกรัม

มานัด แก้วถาวร[22] ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อลักษณะสมบัติของตัวดูดซับ  
 ชนิดถ่านจากกะลามะพร้าว พบว่าเวลาที่ใช้ในการเผาเพิ่มขึ้นทำให้ได้ถ่านที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูง  
 ขึ้น ส่วนการใช้เกลือแกง ซิงก์คลอไรด์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าตัวกระตุ้นทั้งสามชนิดให้  
 ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงขึ้น โดยซิงก์คลอไรด์ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด

ดำรง ขุนมงคล และ อภิลีทธิ์ เจริญกุล[23] ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะใช้เกลือแกง  
 มาเป็นตัวกระตุ้นตัวดูดซับชนิดถ่าน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านจากกะลา  
 มะพร้าว คือใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเกลือแกงต่อกะลามะพร้าวเท่ากับ 3 และเผาที่อุณหภูมิ 800  
 องศาเซลเซียส ส่วนการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านจากขี้เลื่อย ใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเกลือแกงต่อ  
 ขี้เลื่อยมากกว่า 5 และเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ซึ่งจะให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเป็น  
 640 และ 542 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ

จากผลสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมา กะลามะพร้าวเป็นวัตถุดิบที่น่าจะศึกษาวิจัยต่อ โดยการเพิ่ม  
 พื้นที่ผิวด้วยการใช้สารละลายซิงก์คลอไรด์ โดยงานวิจัยมุ่งเน้น สภาวะการเตรียมตัวดูดซับ และการ  
 ดูดซับแก๊สโพรเพนดังนี้

1. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายซิงก์คลอไรด์และอุณหภูมิในการเตรียมตัวดูดซับ ชนิด  
 ถ่านที่มีต่อลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่านจากกะลามะพร้าว

2. เพื่อวัตถุประสงค์การดูดซับแก๊สโพรเพนด้วยตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะต่างๆ ข้างต้น



## บทที่ 2

# ทฤษฎีการดูดซับแก๊ส

การดูดซับ (Adsorption) เป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของสารในวัฏภาคแก๊สยึดเกาะที่ผิวของของแข็ง ที่เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) ซึ่งอาจเป็นพื้นผิวภายนอกหรือภายใน โดยที่โมเลกุลของสารประกอบนั้นอาจยึดเกาะบนพื้นผิวเพียงหนึ่งชั้นหรือมากกว่า ซึ่งการยึดเกาะบนพื้นผิวดังกล่าว สามารถจำแนกได้เป็นการยึดเกาะด้วยแรงทางกายภาพ เช่น แรงดึงดูดระหว่างมวล หรือระหว่างโมเลกุล และแรงดึงดูดระหว่างขั้ว เป็นต้น ซึ่งเรียกว่า การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) หรือด้วยพันธะเคมี ซึ่งเป็นการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน และเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (chemisorption)[31] การประยุกต์ใช้การดูดซับเพื่อแยกแก๊สผสม สามารถเลือกใช้ตัวดูดซับที่มีสมมูลการดูดซับแตกต่างกัน สำหรับกรณีที่สมมูลการดูดซับเกิดขึ้นได้เร็ว หรืออาจเลือกใช้ประโยชน์ของอัตราการดูดซับที่แตกต่างกัน ซึ่งเหมาะสำหรับระบบการดูดซับที่ถึงสมมูลการดูดซับได้ค่อนข้างช้า[32]

### 2.1 ตัวดูดซับในอุตสาหกรรม

ในการเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมเพื่อใช้สำหรับการแยกแก๊สผสม จำเป็นต้องพิจารณาลักษณะสมบัติเฉพาะของตัวดูดซับแต่ละชนิด ซึ่งจะมีความแตกต่างกันด้านการประยุกต์ใช้งาน ลักษณะสมบัติทั่ว ๆ ไปของตัวดูดซับ คือ จะต้องสามารถเลือกดูดซับบางองค์ประกอบจากของผสมได้ มีความจุในการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับสูง สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารประกอบต่าง ๆ ในของผสมทั้งในขั้นตอนการดูดซับและการฟื้นฟูสภาพ โครงสร้างมีความคงตัว และราคาไม่แพง ลักษณะสมบัติต่าง ๆ ดังกล่าวนี้นยากที่จะพบในตัวดูดซับชนิดใดชนิดหนึ่งทั้งหมดได้ ดังนั้นการเลือกตัวดูดซับจึงต้องพิจารณาตามความเหมาะสมต่อการแยกของผสมชนิดต่าง ๆ เพื่อให้การแยกนั้นมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น[31,32]

#### 2.1.1 ตัวดูดซับชนิดถ่าน

ตัวดูดซับชนิดถ่าน (carbon adsorbents) เป็นตัวดูดซับชนิดหนึ่งมีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ อาจมีลักษณะเป็นผงหรือเม็ด มักใช้สำหรับการดูดซับกลิ่น สี หรือไออินทรีย์ โดยทั่วไปตัวดูดซับชนิด

ถ่าน มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก มีพื้นที่ผิวมากหรือมีความพรุนสูง เพื่อให้สามารถดูดซับได้เป็นปริมาณมาก ตั้งแต่คริสต์ศตวรรษที่ 15 ตัวดูดซับชนิดถ่านได้ถูกนำมาใช้สำหรับการดูดซับสีในของเหลว ในขณะที่การประยุกต์ใช้ดูดซับแก๊สเริ่มเป็นที่สนใจในระหว่างช่วงสงครามโลกครั้งที่ 1 ซึ่งเป็นการนำไปใช้ทำหน้าที่ปกป้องกันแก๊สพิษ ต่อมานักวิทยาศาสตร์สนใจในด้านการประยุกต์ใช้สำหรับการทำแก๊สให้บริสุทธิ์ จากผลของการศึกษาการทดลองต่างๆ พบว่าตัวดูดซับชนิดถ่านที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้สำหรับการฟอกสีน้ำตาลจากอ้อยนั้นไม่เหมาะกับการประยุกต์ใช้ทำหน้าที่ปกป้องกันแก๊สพิษ เนื่องจากมีลักษณะเบาและพอง ทั้งยังต้องใช้เป็นจำนวนมาก จึงมีนายทุนพยายามผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านชนิดใหม่ที่มีความหนาแน่นสูงขึ้นสำหรับการดูดซับแก๊สโดยเฉพาะ ครั้งต่อมาสงครามสิ้นสุดลงการค้นคว้าได้บรรลุผลสำเร็จและมีผู้นำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย เช่น การดูดซับไอของสารตัวทำละลายชนิดต่างๆ เช่น ไอเบนซิน การแยกอากาศ เป็นต้น[24]

สำหรับการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่าน เนื่องจากตัวดูดซับชนิดถ่านมีธาตุเป็นองค์ประกอบหลัก วัตถุประสงค์จึงมักเป็นวัสดุของสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ ดังนี้[25]

1. กลุ่มเซลลูโลส เช่น กะลามะพร้าว แกลบ ชี้เลื่อย ชังข้าวโพด และชานอ้อย เป็นต้น
2. กลุ่มถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ และพีท เป็นต้น
3. กลุ่มวัตถุติดจากสัตว์ เช่น เลือด และกระดูก เป็นต้น

ตัวดูดซับชนิดถ่านได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม[25] คือ

#### 1. การดูดซับแก๊สหรือไอ

- กำจัดไอระเหยของตัวทำละลายอินทรีย์และอนินทรีย์ที่มีผลต่อสภาวะแวดล้อม หรือแก๊สปล่อยทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น ใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก ผลิตภัณฑ์ยาง เป็นต้น
- กำจัดกลิ่นในชั้นบรรยากาศ โดยเฉพาะในบริเวณปิดที่ซึ่งถ่ายเทอากาศได้ยากหรือไม่บ่อย ตัวอย่างเช่น ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น
- ใช้ดูดความชื้น
- ใช้ในการแยกอากาศ

#### 2. การดูดซับในของเหลว

- ใช้ดูดกลิ่น ตัวอย่างเช่น ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ เช่นไวน์ วิสกี้ และอุตสาหกรรมการทำน้ำ เป็นต้น
- ใช้ฟอกสีหรือทำให้ใส ตัวอย่างเช่น ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาลทรายขาว อุตสาหกรรมน้ำมันและไขมัน อุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมการทำน้ำ เป็นต้น
- ใช้ดูดความชื้น ตัวอย่างเช่น ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมน้ำมันและไขมัน เป็นต้น

## 2.1.2 มะพร้าว

ปัจจุบันประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะมีการใช้ตัวดูดซับชนิดถ่านในอุตสาหกรรมต่างๆ มากขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่ก็ต้องมีการสั่งซื้อมาจากต่างประเทศ เนื่องจากยังไม่มีการผลิตผลิตภัณฑ์ภายในประเทศให้เพียงพอกับความต้องการ ประเทศไทยเป็นประเทศกสิกรรม มีวัตถุดิบจำพวกไม้และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก จากการพิจารณาแนวโน้มการใช้ตัวดูดซับชนิดถ่าน วัตถุดิบที่น่าสนใจในการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร คือ กะลามะพร้าว ทั้งนี้เพราะในประเทศไทยก็มีการปลูกมะพร้าวกันแทบทุกภาค โดยเฉพาะทางภาคใต้ ภาคตะวันตก และภาคตะวันออก จังหวัดที่มีการเพาะปลูกกันมาก ได้แก่ ชุมพร นครศรีธรรมราช สุราษฎร์ธานี ประจวบคีรีขันธ์ และชลบุรี[14] มะพร้าวที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการสกัดน้ำมัน ด้วยเหตุนี้จึงมีกะลามะพร้าวเหลืออยู่มากและราคาถูก กะลามะพร้าวเหล่านี้มักจะทำเป็นเชื้อเพลิงหรือทิ้งไป ดังนั้นกะลามะพร้าวจึงเป็นวัตถุดิบที่มีคุณค่าควรแก่การศึกษาเพื่อทำเป็นตัวดูดซับชนิดถ่าน

### ลักษณะทั่วไปและการใช้ประโยชน์ของมะพร้าว

มะพร้าวเป็นพืชยืนต้น ใบเลี้ยงเดี่ยวในตระกูลปาล์มชนิดหนึ่ง มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ ว่า *Cocos nucifera L.* มีขึ้นอยู่มากมายในบริเวณเขตร้อน และกระจายอยู่ทั่วไปในบริเวณย่อยเอเชียแปซิฟิก ริมชายฝั่งทะเลที่มีน้ำทะเลเข้าถึง และมีปริมาณน้ำฝนมากพอ การใช้ประโยชน์ของมะพร้าวสามารถกล่าวได้ว่าเกือบทุกส่วนของต้นมะพร้าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งสิ้น ตัวอย่างเช่น[26,27]

- ไม้มะพร้าว นำมาใช้ในการก่อสร้างบ้านเรือน เช่น ทำเป็นไม้ปูพื้นจำพวกไม้ปาร์เก้ ทำไม้ฝาบ้าน ทำจั่ว ทำโครงหลังคา ทำวงกบประตูและหน้าต่าง เป็นต้น
- กาบมะพร้าวและเส้นใยมะพร้าว นำมาใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ต่อไปนี้ เช่น เชือก พรหมเช็ดเท้า พรหมปูพื้น ทำเยื่อกระดาษ ทำแท่งเพาะชำเป็นส่วนผสมของปุ๋ย ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุก่อสร้างบางชนิด เช่น กระเบื้องแผ่นเรียบ ใช้ทำเครื่องประดับชนิดต่างๆ เป็นต้น
- เนื้อมะพร้าว ใช้ทำเป็นแป้งมะพร้าว สำหรับป้อนโรงงานผลิตอาหาร เช่น โรงงานขนมปัง โรงงานไอศกรีม เป็นต้น
- น้ำมันมะพร้าว ได้มาจากการหีบเนื้อมะพร้าว สามารถนำไปทำเป็นน้ำมันสำหรับบริโภค นอกจากนี้ยังนำมาทำเป็นส่วนผสมทำเนยเทียม นมข้น เป็นต้น รวมทั้งการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ เช่น สบู่ ผงซักฟอก เครื่องสำอางค์ ใช้ทำเป็นเชื้อเพลิงเดินเครื่องยนต์ เป็นต้น
- กากมะพร้าว นิยมนำมาใช้ทำเป็นอาหารสัตว์
- กะลามะพร้าว สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงและผลิตเป็นตัวดูดซับชนิดถ่าน ซึ่งถ่านที่ได้มีลักษณะสมบัติในการดูดซับได้เป็นอย่างดี ตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้จากกะลามะพร้าวนี้มีความพรุนสูงจึงเป็นที่ต้องการของตลาด เนื่องจากกะลามะพร้าวเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่าย มีลักษณะแข็ง ราคาถูก และมีปริมาณมากเพียงพอสำหรับการใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่าน

องค์ประกอบของกะลามะพร้าวมีความคล้ายคลึงกับไม้เนื้อแข็ง ต่างกันตรงที่กะลามะพร้าวมีเซลลูโลสน้อยกว่าเมื่อเทียบกับไม้เนื้อแข็ง แต่มีลิกนินสูงกว่าไม้เนื้อแข็ง ซึ่งองค์ประกอบของกะลามะพร้าวแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 2.1

ตารางที่ 2.1: องค์ประกอบของกะลามะพร้าว

คุณสมบัติ	ร้อยละโดยมวล
ความชื้น	8
เถ้า	0.4
ตัวถูกละลายที่สกัดได้	4.2
ลิกนิน	29.4
เซลลูโลส	26.6
เพนโตซาน	27.7
ยูโรนิคแอนไฮไดรด์	3.1

### 2.1.3 การผลิตตัวดูดซับชนิดถ่าน

โดยทั่วไปประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ การเตรียมวัตถุดิบ การทำให้เป็นถ่าน (Carbonization) และการเพิ่มพื้นที่ผิว (Activation) ตามลำดับ

#### 1. การเตรียมวัตถุดิบ

ตัวดูดซับชนิดถ่านส่วนใหญ่ผลิตจากวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ชานอ้อย ลิกไนต์ พีท และกระดูก เป็นต้น ถ้าวัตถุดิบมีลักษณะเป็นชิ้นใหญ่ มักถูกย่อยให้มีขนาดเล็กพอเหมาะ แต่ถ้าวัตถุดิบมีลักษณะแข็งมาก ทำให้อยู่ได้ยาก อาจเผาให้เป็นถ่านก่อน แล้วจึงบดและคัดขนาด[20] ส่วนวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นผง อาจนำมาทำเป็นเม็ดโดยใช้ตัวประสาน เช่น แป้ง น้ำมันเตา หรือน้ำมันทา เป็นต้น ก่อนแล้วจึงทำให้เป็นถ่าน

#### 2. การทำให้เป็นถ่าน

การทำให้เป็นถ่าน คือ การเผาในบรรยากาศที่อับแก๊สออกซิเจน โดยอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการเผาประมาณ 300-600 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนนี้สารที่ไม่ใช่ธาตุคาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน และออกซิเจน หรือสารประกอบที่ระเหยง่ายจะถูกไล่ออกจากวัตถุดิบในลักษณะของแก๊สทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านที่มีองค์ประกอบเป็นธาตุคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่

#### 3. การเพิ่มพื้นที่ผิว

การเพิ่มพื้นที่ผิวเป็นการทำให้ถ่านมีรูพรุนเพิ่มมากขึ้น และเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวการดูดซับ ในขั้นตอนนี้สามารถดำเนินการได้โดยให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารละลายต่างๆ เช่น ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก กรดกำมะถัน เป็นต้น หรือกับแก๊สออกซิไดซ์ต่างๆ เช่น ไอ้ น้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สออกซิเจน เป็นต้น



#### 2.1.4 โครงสร้างของตัวดูดซับชนิดถ่าน

ตัวดูดซับชนิดถ่านมีโครงสร้างคล้ายกับกราไฟต์ แต่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่าผลึกกราไฟต์ ซึ่งประกอบด้วยชั้นของอะตอมคาร์บอนในรูปร่างเบนซิน หรือกลุ่มของอะตอมคาร์บอนที่มีโครงสร้างรูปหกเหลี่ยม ซึ่งแต่ละอะตอมจะเกิดพันธะเดียวกับอีก 3 อะตอมในระนาบเดียวกันในลักษณะที่สมมาตรกัน แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) จากการพิจารณาลักษณะผิวของตัวดูดซับชนิดถ่านพบว่ามีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้กระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบและไม่สม่ำเสมอ ซึ่งรูปร่างลักษณะของรูพรุนนั้นไม่สามารถบอกได้แน่นอน ขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมและวัตถุดิบที่ใช้ สามารถจำแนกขนาดรูพรุนของตัวดูดซับชนิดถ่านออกเป็น

ขนาดเล็ก (micropore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร นิยมใช้ประโยชน์เกี่ยวกับการดูดซับไอระเหยและแก๊ส

ขนาดกลาง (mesopore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร มักนำไปใช้ประโยชน์สำหรับดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น การฟอกสี

ขนาดใหญ่ (macropore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมากกว่า 50 นาโนเมตร เป็นตัวช่วยให้สารที่จะถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนขนาดเล็กได้ง่ายขึ้น

การผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านโดยใช้สารละลายซิงก์คลอไรด์

สารประกอบซิงก์คลอไรด์เป็นสารดูดความชื้นที่นิยมใช้ในการเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับชนิดถ่าน มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว มีความหนาแน่น 2.91 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 136.28 มักอยู่ในรูปไฮเดรต ลักษณะสมบัติอื่นๆ แสดงดังในตารางที่ 2.2 เกลือซิงก์คลอไรด์ละลายได้ดีเมื่อมีความเข้มข้น 0.5 - 1 กรัมต่อลิตร สารละลายเข้มข้นของซิงก์คลอไรด์มีฤทธิ์เป็นกรด ซึ่งสามารถสลายแป้ง เซลลูโลส และสารประกอบอินทรีย์ต่างๆได้ เชื่อกันว่าวัตถุดิบที่นำมาผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านด้วยวิธีใช้ซิงก์คลอไรด์ ควรจะมีเซลลูโลสสูง เช่น ชานอ้อย จะได้ตัวดูดซับชนิดถ่านที่มีคุณภาพสูง

แม้ว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยายังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่ก็ได้มีการนำซิงก์คลอไรด์มาใช้ผลิตตัวดูดซับชนิดถ่าน พบว่าเคยมีการใช้สารประกอบซิงก์คลอไรด์เผาพร้อมกับไม้ เซลลูโลส หรือฟัก โดยใช้อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อซิงก์คลอไรด์เท่ากับ 1 ต่อ 6 เติมน้ำเท่าที่จำเป็น นำไปอบแห้งและเผาที่อุณหภูมิ 400-900 องศาเซลเซียส[28] ประเทศแถบยุโรปได้ใช้วัตถุดิบ เช่น ผงฟักหรือผงขี้เลื่อยต่อ สารละลายซิงก์คลอไรด์เข้มข้นเป็น 1 ต่อ 0.5 ถึง 4 ในบางครั้งมีการเติมกรดเกลือหรือกรดฟอสฟอริกด้วยจากนั้นจึงนำไปอบแห้ง และเผาที่อุณหภูมิ 400-900 องศาเซลเซียส ล้างซิงก์คลอไรด์ออกจากถ่านที่ได้ด้วยสารละลายกรดและน้ำ นอกจากนี้การผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านด้วยวัตถุดิบจากพืชโดยใช้สารดูดความชื้นเป็นผลมาจากความสามารถในการสลายลิกนิน หรือเซลลูโลสของสารที่ใช้ ดังนั้นวัสดุที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบจึงควรมีปริมาณลิกนินสูง ซึ่งต่อมา Mrkherjee [15] ได้ทดลองผลิตตัวดูดซับชนิดถ่านจากกะลามะพร้าว ซึ่งมีปริมาณลิกนินร้อยละ 20.7 พบว่าที่สภาวะเดียวกันตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้จากกะลามะพร้าว มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้จากเปลือกถั่วลิสง นอกจากนี้ยังพบว่า ซิงก์คลอไรด์สามารถละลายกัมมะถันออกจากวัตถุดิบ

ในลักษณะของสารประกอบซิงก์ซัลเฟอร์ (ZnS) ด้วย(30)

โดยทั่วไปตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้ คือ ปริมาณซิงก์คลอไรด์ อุณหภูมิและเวลาในการทำให้เป็นถ่าน

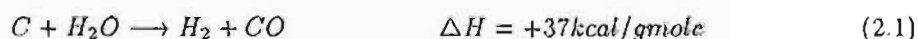
ตารางที่ 2.2: ลักษณะสมบัติทางกายภาพของซิงก์คลอไรด์

ลักษณะสมบัติทางกายภาพ	
น้ำหนักโมเลกุล	136.28
จำนวนโมเลกุลของน้ำที่เกิดไฮเดรต	4,3,2.5,1.5,1,0
สี	ขาว
ความหนาแน่น(กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	2.91
จุดเดือด ณ ความดันบรรยากาศ(องศาเซลเซียส)	756
จุดหลอมเหลว ณ ความดันบรรยากาศ(องศาเซลเซียส)	275
ความร้อนในการหลอมเหลว(แคลอรีต่อกรัมโมล)	5,540
ความร้อนในการระเหย(แคลอรีต่อกรัมโมล)	28,700
ความจุความร้อน ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (แคลอรีต่อกรัมโมลต่อองศาเซลเซียส )	18.3
ความสามารถในการละลาย ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (กรัมต่อ100 กรัม น้ำ)	432
ความสามารถในการละลาย ณ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (กรัมต่อ100 กรัม น้ำ)	614

#### การเพิ่มพื้นที่ผิวโดยใช้ไอน้ำ

ในกระบวนการเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ธาตุคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิไดซ์ เช่น ไอน้ำ เป็นต้น เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ หรือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นบนถ่านเพียงบางส่วน จึงทำให้เกิดเป็นรูพรุนขนาดต่างๆ จำนวนมาก โดยขึ้นอยู่กับปริมาณของแก๊สออกซิไดซ์ อุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาเคมี และช่วงเวลาของการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ไอน้ำเป็นแก๊สออกซิไดซ์ที่นิยมใช้สำหรับการผลิตตัวดูดซับชนิดถ่าน เพราะหาได้ง่าย ราคาถูก สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวได้มาก และควบคุมได้ง่าย แต่จำเป็นต้องดำเนินการภายใต้อุณหภูมิในช่วง 750-950 องศาเซลเซียส เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีเป็นปฏิกิริยาชนิดดูดความร้อน ดังแสดงในสมการ 2.1

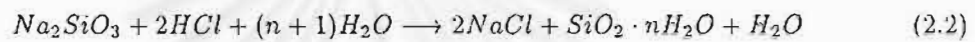


### 2.1.5 ตัวดูดซับชนิดอลูมินา

อลูมินา (Alumina) สามารถผลิตได้จากการเผาไหม้โมเลกุลของน้ำออกจากสารประกอบ อลูมินัม ไตรไฮเดรต (aluminum trihydrate,  $Al(OH)_3$ ) ซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติ ที่อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส ณ ความดันบรรยากาศ เพื่อให้ได้ผลึกของอลูมินา ซึ่งจะมีพื้นที่ผิวประมาณ 250 ตารางเมตรต่อกรัม หรืออาจเผาไหม้โมเลกุลของน้ำ ที่อุณหภูมิประมาณ 400-800 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาสั้น ๆ จะได้ผลึกของอลูมินา ที่มีพื้นที่ผิวประมาณ 300-350 ตารางเมตรต่อกรัม นอกจากนี้อลูมินายังมีลักษณะพื้นผิวที่มีความเป็นขั้วสูง จึงเหมาะสำหรับการดูดซับโมเลกุลที่มีขั้ว โดยเฉพาะการดูดซับความชื้นที่อุณหภูมิสูง ๆ [32]

### 2.1.6 ตัวดูดซับชนิดซิลิกาเจล

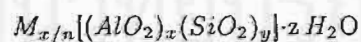
ซิลิกาเจล (Silica Gel) สามารถผลิตได้จากปฏิกิริยาเคมีระหว่าง สารประกอบโซเดียมซิลิเกต (sodium silicate) และกรดเกลือ (hydrochloric acid) ดังสมการเคมี ที่แสดงดังนี้



ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ผลึกของซิลิกาที่รวมกับโมเลกุลของน้ำ หรือ ไฮโดรซอล (hydrosol,  $SiO_2 \cdot nH_2O$ ) ซึ่งมีลักษณะคล้ายเจล เมื่อถูกทำให้แห้งจะได้ผลึกของซิลิกาเจล ผลึกนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ซิลิกาเจลชนิดธรรมดา มีพื้นที่ผิวประมาณ 750-850 ตารางเมตรต่อกรัม และซิลิกาเจลชนิดความหนาแน่นต่ำ จะมีพื้นที่ผิวประมาณ 300-350 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นของซิลิกา อุณหภูมิ และความเป็นกรดต่างในขบวนการผลิต เนื่องจากลักษณะพื้นผิวของซิลิกาเจลมีความเป็นขั้วเช่นเดียวกับอลูมินา จึงสามารถดูดซับโมเลกุลที่มีขั้วได้ดี นิยมใช้ดูความชื้นในช่วงอุณหภูมิปกติ หรือสูงกว่าเล็กน้อย [32]

### 2.1.7 ตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์

ซีโอไลต์ (Zeolites) คือ ผลึกของสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) ของโลหะหมู่ I หรือหมู่ II เช่น โซเดียมและโปแตสเซียม หรือแคลเซียม ผลึกของซีโอไลต์มีสูตรโมเลกุลดังนี้



โดยที่ M แทนโลหะหมู่ I หรือหมู่ II ซึ่งมีประจุบวกเท่ากับ n เพื่อดุลประจุกับประจุลบที่ตำแหน่งของ อะตอมของธาตอลูมิเนียม ขณะที่ x และ y เป็นเลขจำนวนเต็ม และอัตราส่วน  $y : x$  ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 1 ซึ่งมักใช้เป็นดัชนีตัวหนึ่งสำหรับบ่งบอกชนิดของซีโอไลต์ ส่วน z คือจำนวนโมเลกุลของน้ำที่มีอยู่ในผลึกซีโอไลต์ ซึ่งยังคงสามารถไล่ออกจากผลึกได้ด้วยการใช้ความร้อน [32]

โครงสร้างของผลึกซีโอไลต์ประกอบด้วยผลึกทรงสี่หน้า (tetrahedral) ของ  $SiO_4$  และ  $AlO_4$  ซึ่งแต่ละหน่วยเรียงต่อกันโดยใช้ออกซิเจนร่วมกัน เกิดเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นวงของธาต้ออกซิเจน (oxygen ring) และต่อกันเป็นลักษณะรูปทรงหลายเหลี่ยม ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวนี้

จะประกอบเข้าด้วยกันในลักษณะสามมิติเกิดเป็นโครงผลึกของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ โดยลักษณะโครงสร้างและขนาดรูพรุนจะมีผลต่อลักษณะสมบัติการดูดซับของผลึกซีโอไลต์ ดังนั้นชนิดของซีโอไลต์จึงขึ้นกับสัดส่วนของอะตอมซิลิกอนต่ออะตอมอลูมิเนียม ชนิดของไอออน และโลหะที่ใช้ดูลประจุของผลึก ตัวอย่างเช่น

ซีโอไลต์ชนิด A คือ ผลึกอลูมิโนซิลิเกต ที่มีอัตราส่วน  $Si/Al$  เท่ากับ 1 รูพรุนของผลึก ประกอบด้วยอะตอมของธาตุดอกซิเจนของ  $SiO_4$  และ  $AlO_4$  จำนวน 8 อะตอมของธาตุดอกซิเจนเรียงตัวกันเป็นวง ซึ่งขนาดของรูพรุนจะขึ้นกับชนิดของโลหะประจุบวกที่ใช้สำหรับดูลประจุบนอะตอมอลูมิเนียม ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3: ขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ชนิด A ที่ดูลประจุลบด้วยโลหะหมู่ I และ หมู่ II

ชนิด	ประจุบวก	สูตรโมเลกุล	ขนาดรูพรุน (Å)
3A(KA)	$K^+$	$K_{12}[(AlO_2)_{12}(SiO_2)_{12}]$	2.9
4A(NaA)	$Na^+$	$Na_{12}[(AlO_2)_{12}(SiO_2)_{12}]$	3.8
5A(CaA)	$Ca^{2+}$	$Ca_5Na_2[(AlO_2)_{12}(SiO_2)_{12}]$	4.4

ซีโอไลต์ชนิด X และ Y มีลักษณะโครงสร้างเหมือนกัน แต่แตกต่างกันที่อัตราส่วน  $Si/Al$  นั้นคือ 1.0-1.5 และ 1.5 ตามลำดับ ส่วนรูพรุนของผลึกประกอบด้วยอะตอมของออกซิเจนของ  $SiO_4$  และ  $AlO_4$  จำนวน 12 อะตอมเรียงตัวกันเป็นวง ซึ่งขนาดของรูพรุนจะขึ้นกับชนิดของโลหะประจุบวกที่ใช้สำหรับดูลประจุบนอะตอมอลูมิเนียมเช่นเดียวกับซีโอไลต์ชนิด A ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.4 [31]

ตารางที่ 2.4: ขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ชนิด X และชนิด Y ที่ดูลประจุลบด้วยโลหะหมู่ I และ หมู่ II

ชนิด	อัตราส่วน Si/Al	ขนาดรูพรุน (Å)
NaX	1.0-1.5	8.4
CaX	1.0-1.5	8.0
NaY/KY	1.5-3.0	8.0

## 2.2 สมดุลการดูดซับ

ในระบบการดูดซับ เมื่อสารถูกดูดซับได้สัมผัสกับตัวดูดซับในช่วงเวลาที่นานเพียงพอ สมดุลการดูดซับจึงเกิดขึ้น โดยที่ปริมาณการดูดซับขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความดันย่อย (สำหรับระบบแก๊ส) หรือความเข้มข้น (สำหรับระบบของเหลว) แบบจำลองของสมดุลการดูดซับ ณ อุณหภูมิคงที่ ซึ่งเรียกว่า ไอโซเทิร์ม (Isotherm) ของการดูดซับ ที่หลายลักษณะดังนี้

### 2.2.1 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของเฮนรี

สำหรับการดูดซับปริมาณน้อยๆ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไว้มีผลกระทบต่อกันค่อนข้างน้อย ซึ่งมักเกิดขึ้นภายในอุณหภูมิสูงๆ ปริมาณการดูดซับมักเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันย่อยหรือความเข้มข้นของสารนั้น ดังนั้นแบบจำลองคณิตศาสตร์ของสมดุลการดูดซับ คือ

$$q = K_H P \quad (2.3)$$

โดยที่  $K_H$  คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของเฮนรี แบบจำลองสมดุลการดูดซับชนิดนี้ใช้ได้กับสารที่ถูกดูดซับที่มีความเข้มข้นเจือจางหรือ ณ อุณหภูมิสูง

### 2.2.2 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์

สำหรับการดูดซับปริมาณมากๆ โดยจำกัดให้การดูดซับเกิดขึ้นได้เพียงชั้นเดียว และโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้แล้วไม่ส่งผลกระทบต่อโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้นปริมาณการดูดซับจึงขึ้นอยู่กับความดัน (หรือความเข้มข้น) และสัดส่วนของพื้นที่ว่าง ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{q}{q_s} = \frac{K_L P}{1 + K_L P}; P < P_{sat}(T) \quad (2.4)$$

โดยที่  $q_s$  คือ ปริมาณการดูดซับสูงสุด ณ สภาวะอุณหภูมิที่กำหนด เมื่อความดันของแก๊สที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับจะเข้าใกล้ปริมาณการดูดซับสูงสุด ซึ่งเทียบเท่ากับพื้นที่ผิวทั้งหมดของการดูดซับแก๊สชนิดนั้น และ  $K_L$  คือ ค่าคงที่การดูดซับของแลงเมียร์

### 2.2.3 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรอยด์ลิช

ลักษณะของสมดุลการดูดซับเหมือนกับแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ แต่แตกต่างกันที่รูปแบบของสมการสมดุล ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความดันย่อยของสารที่ถูกดูดซับ จะอยู่ในรูปของฟังก์ชันโพลีโนเมียล ซึ่งเป็นผลจากการทดลอง สามารถแสดงได้ดังนี้

$$q = K_F P^n; n > 1, P < P_{sat}(T) \quad (2.5)$$

โดยที่  $K_F$  คือ ค่าคงที่ของฟรอยด์ลิช และ  $n$  คือ ค่าที่ซึ่งได้จากการทดลอง เป็นเลขจำนวนเต็ม จากสมการแสดงความสัมพันธ์ของสมดุลการดูดซับของฟรอยด์ลิช นั้นหมายความว่าถึงเมื่อความดันของแก๊สที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับจะไม่มีขีดจำกัดสูงสุดซึ่งเป็นสมดุลการดูดซับที่เหมาะสมกับการดูดซับแบบหลายชั้น

## 2.3 กลไกการดูดซับ

การดูดซับ เป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่จากวัฏภาคของไหลเข้าสู่ภายในตัวดูดซับ ถ้าต้องการให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวในการดูดซับมาก ภายในตัวดูดซับจึงต้องมีรูพรุนจำนวนมาก ดังนั้นอัตราการดูดซับจึงขึ้นกับอัตราการแพร่ของโมเลกุลสารถูกดูดซับ ไปบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งอาจจะเป็นพื้นผิวภายนอก หรือพื้นผิวภายใน โดยโมเลกุลของสารในวัฏภาคแก๊ส จะแพร่ไปบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยผ่านชั้นฟิล์มรอบๆ ตัวดูดซับ (external film) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ออกจากวัฏภาคของไหลเข้าสู่พื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับ และแพร่ผ่านรูพรุนของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ตัวดูดซับเคลื่อนที่จากพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับผ่านเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับตามลำดับ ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุด เป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับของสารชนิดนั้น นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและรูปร่างของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ กับขนาดและรูปร่างของรูพรุนตัวดูดซับ มีผลกระทบต่ออัตรา การดูดซับ ชนิดของการแพร่เข้าไปในรูพรุน และการเลือกดูดซับโมเลกุลของสารที่มีขนาด หรือรูปร่างที่เหมาะสม[33]

## 2.4 การวัดสมมูลการดูดซับ

ภายใต้สภาวะสมดุลของระบบการดูดซับ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับไว้ จะสมดุลกับปริมาณสารถูกดูดซับนั้นที่อยู่ในวัฏภาคแก๊ส ซึ่งมีวิธีวัดปริมาณการดูดซับ 2 วิธี ดังนี้ วัดโดยตรงด้วยวิธีเชิงปริมาตร (volumetric method) หรือวิธีชั่งน้ำหนัก (gravimetric method) หรืออาจวัดโดยอ้อมด้วยวิธีโครมาโตกราฟี (chromatography method)[32]

### 2.4.1 วิธีวัดโดยตรง

#### วิธีเชิงปริมาตร

เป็นการหาปริมาณการดูดซับที่สมดุล จะต้องหาปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับในสถานะแก๊สก่อนและหลังการดูดซับ โดยมีสภาวะเริ่มต้นที่สภาวะสูญญากาศ ซึ่งเป็นการวัดปริมาณการดูดซับโดยอ้อม ณ ความดันต่างๆ และต้องควบคุมอุณหภูมิของอุปกรณ์ให้คงที่ ข้อจำกัดของวิธีการนี้คือ เวลาที่ใช้ในการวัดนานมาก

#### วิธีชั่งน้ำหนัก

เป็นการหาปริมาณการดูดซับที่ทำได้เช่นเดียวกับวิธีเชิงปริมาตร แต่แตกต่างกันที่ปริมาณการดูดซับนั้นหาได้โดยการวัดน้ำหนักของแก๊สที่ถูกดูดซับที่สมดุลบนตัวดูดซับโดยตรง ในระบบปิดที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ ภายใต้สภาวะใกล้ๆ สูญญากาศ โดยใช้เครื่องชั่งละเอียดที่มีความแม่นยำสูง

## 2.4.2 วิธีวัดโดยอ้อม

### วิธีโครมาโตกราฟี

เป็นวิธีการศึกษาการดูดซับของแก๊ส โดยการให้แก๊สไหลไปพร้อมกับแก๊สดำพา ผ่านการดูดซับที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ แล้ววิเคราะห์ด้วยหลักการทางโครมาโตกราฟี ข้อดีของวิธีการนี้ คือ สะดวกและรวดเร็วในการรับผลของข้อมูล



## บทที่ 3

### การทดลอง

ในส่วนของการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านจากกะลามะพร้าวด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์และการวัดสมมูลการดูดซับด้วยแก๊สไอโพรเพน

#### 3.1 การเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่าน

การเตรียมวัตถุดิบ คือ กะลามะพร้าว ซึ่งได้มาจากตลาดสดผู้ขายได้นำเนื้อมะพร้าวออกไปจำหน่ายแล้ว จากนั้นจึงนำเอากะลามะพร้าวนั้นมาทุบให้เป็นชิ้นเล็กๆ เพื่อให้สามารถใส่เข้าไปในเตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle furnace รุ่น FP 21) ได้เนื่องจากกะลามะพร้าวมีความแข็งและเหนียว จึงจำเป็นต้องทำการเผากะลามะพร้าวให้เป็นถ่านก่อนเพื่อสะดวกในการบดให้ได้ขนาดตามที่กำหนด ก่อนนำมาทำการเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์ต่อไป รายละเอียดของการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านมีดังนี้

##### 3.1.1 การเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์

1. เผากะลามะพร้าวที่ได้ขนาดที่ต้องการที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้ถ่านกะลา นำมาบดและคัดขนาดด้วยร่อนขนาด 8-16 เมช
2. กรณีของการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านอย่างเดียว ซึ่งถ่านกะลาในข้อ 1. จำนวน 30 กรัม
3. นำไปเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องและเปลี่ยนอุณหภูมิทุกๆ 50 องศาเซลเซียส เป็นช่วงเวลาละ 15 นาที จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่กำหนด (เพื่อป้องกันการเดือดอย่างรุนแรงของสารละลายซิงก์คลอไรด์)
4. ทิ้งไว้ให้เย็นภายในเตา แล้วจึงนำออกมาล้างด้วยน้ำร้อนและกรองจนสารละลายที่ล้างได้เป็นกลาง
5. อบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปบดและคัดขนาดด้วยร่อนขนาด 40-60 เมช นำไปวิเคราะห์ลักษณะสมบัติ
6. นำไปบรรจุคอลัมน์ เพื่อวัดสมมูลการดูดซับแก๊สไอโพรเพน



7. กรณีของการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านผสมน้ำ ซึ่งถ่านกะลาในข้อ 1 จำนวน 30 กรัม ผสมกับ น้ำกลั่น จำนวน 30 กรัม (ให้มีอัตราส่วนของถ่านกะลา : น้ำ เป็น 1:1) แล้วดำเนินการทดลองตามข้อ 3-6 ใหม่
8. กรณีของการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์ ซึ่งถ่านกะลาในข้อ 1 จำนวน 30 กรัมและซิงก์คลอไรด์จำนวน 30 กรัม (ให้มีอัตราส่วนของถ่านกะลา : ซิงก์คลอไรด์ เป็น 1:1) แล้วเติมน้ำกลั่น เพื่อให้เป็นสารละลายซิงก์คลอไรด์ เข้มข้นร้อยละ 30,40,50 และ 60 โดยมวล ตามลำดับ ปิดฝาตั้งทิ้งไว้ 3 วัน เพื่อให้สารละลายซิงก์คลอไรด์ซึมเข้าไปในเม็ดถ่านโดยไม่ต้องเขย่า แล้วดำเนินการทดลองตามข้อ 3-6 ใหม่

### 3.1.2 การเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่าน ณ อุณหภูมิต่างๆ

1. เฝือกมะพร้าวที่ได้ขนาดที่ต้องการที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้ ถ่านกะลา นำมาบดและคัดขนาดด้วยร่อนขนาด 8-16 เมช
2. ซึ่งถ่านกะลาในข้อ 1.จำนวน 30 กรัม และซิงก์คลอไรด์จำนวน 30 กรัม (ให้มีอัตราส่วนของ ถ่านกะลา : ซิงก์คลอไรด์ เป็น 1:1) แล้วเติมน้ำกลั่น เพื่อให้เป็นสารละลายซิงก์คลอไรด์ เข้มข้นร้อยละ 50 โดยมวล ปิดฝาตั้งทิ้งไว้ 3 วัน เพื่อให้สารละลายซิงก์คลอไรด์ซึมเข้าไปในเม็ดถ่าน โดยไม่ต้องเขย่า
3. นำไปเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยการเพิ่ม อุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องและเปลี่ยนอุณหภูมิทุกๆ 50 องศาเซลเซียส เป็นช่วงเวลาระยะ 15 นาที จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่กำหนด (เพื่อป้องกันการเดือดอย่างรุนแรงของสารละลายซิงก์คลอไรด์)
4. ทิ้งไว้ให้เย็นภายในเตา แล้วจึงนำออกมาล้างด้วยน้ำร้อนและกรองจนสารละลายที่ล้างได้เป็น กลาง
5. อบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปบดและคัดขนาดด้วยร่อนขนาด 4(1-6) เมช นำไปวิเคราะห์ลักษณะสมบัติ
6. นำไปบรรจุคอลัมน์ เพื่อวัดสมมูลการดูดซับแก๊สโพรเพน
7. เปลี่ยนอุณหภูมิในเตาเผาใหม่เป็น 400, 450, 475, 500 และ 600 องศาเซลเซียส แล้วดำเนินการทดลองตามข้อ 3-6 ใหม่

### 3.1.3 การเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่าน ณ ช่วงเวลาต่างๆ

1. เฝือกมะพร้าวที่ได้ขนาดที่ต้องการที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้ ถ่านกะลา นำมาบดและคัดขนาดด้วยร่อนขนาด 8-16 เมช
2. ซึ่งถ่านกะลาในข้อ 1.จำนวน 30 กรัม และซิงก์คลอไรด์จำนวน 30 กรัม (ให้มีอัตราส่วนของ ถ่านกะลา : ซิงก์คลอไรด์ เป็น 1:1) แล้วเติมน้ำกลั่น เพื่อให้เป็นสารละลายซิงก์คลอไรด์ เข้มข้นร้อยละ 50 โดยมวล ปิดฝาตั้งทิ้งไว้ 3 วัน เพื่อให้สารละลายซิงก์คลอไรด์ซึมเข้าไปในเม็ดถ่าน โดยไม่ต้องเขย่า

3. นำไปเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที โดยการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องและเปลี่ยนอุณหภูมิทุกๆ 50 องศาเซลเซียส เป็นช่วงเวลาละ 15 นาที จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่กำหนด (เพื่อป้องกันการเดือดอย่างรุนแรงของสารละลายซิงก์คลอไรด์)
4. ทิ้งไว้ให้เย็นภายในเตา แล้วจึงนำออกมาล้างด้วยน้ำร้อนและกรองจนสารละลายที่ล้างได้เป็นกลาง
5. ออบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปบดและคัดขนาดด้วยร่อนขนาด 40-60 เมช นำไปวิเคราะห์ลักษณะสมบัติ
6. นำไปบรรจุคอลัมน์ เพื่อวัดสมมูลการดูดซับแก๊สโพรเพน
7. เปลี่ยนช่วงเวลาในการเผาใหม่เป็น 30, 45 และ 60 นาที แล้วดำเนินการทดลองตามข้อ 3-6 ใหม่

### 3.1.4 วิธีการตรวจสอบลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่าน

ในส่วนของการตรวจสอบลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่าน แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ การวัดการดูดซับไอโอดีน และการศึกษาโครงสร้างของพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับชนิดถ่านโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

#### 1. การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ

การวัดพื้นที่ผิวจะใช้หลักของการดูดซับแก๊สบนพื้นผิวของแข็ง ซึ่งวิธีการหนึ่งที่ยอมรับใช้คือวิธีการของ Brunauer, Emmett และ Teller (BET) ปกติจะใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นตัวดูดซับที่จุดสมมูลย์ ณ สภาวะมาตรฐาน ปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดันซึ่งสามารถวัดได้และนำไปคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวได้ เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์คือ Micromeritic BET รุ่น ASAP 2000

#### 2. การวัดการดูดซับไอโอดีน

ค่าไอโอดีน (Iodine number) หมายถึง ปริมาณไอโอดีนมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมที่ถูกดูดซับไว้ด้วยตัวดูดซับชนิดถ่าน 1 กรัม การทดสอบการดูดซับไอโอดีนเป็นการทดสอบการดูดซับสารประกอบออกจากรู้น้ำของตัวดูดซับชนิดถ่าน โดยใช้ไอโอดีนเป็นสารที่ถูกดูดซับ[20] สำหรับการวิเคราะห์ในการวิจัยนี้ใช้วิธีของ AWWA (American Water Works Association)

#### 3. การศึกษาโครงสร้างของพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับชนิดถ่านโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM) อาศัยหลักการสะท้อนของลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างเข้าสู่ตัวขยายสัญญาณ แล้วแปรสัญญาณให้เกิดเป็นภาพทางจอโทรทัศน์ ซึ่งสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าหรือบันทึกไว้ในฟิล์มได้ โดยจะช่วยให้สามารถมองเห็นรายละเอียดของพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับชนิดถ่านได้ เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์คือ เครื่อง SEM รุ่น JSM 6400

## 3.2 การวัดสมมูลการดูดซับ

### 3.2.1 ตัวดูดซับ

สำหรับตัวดูดซับที่ใช้คือตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากกะลามะพร้าวโดยใช้สารละลายซิงก์คลอไรด์ ซึ่งตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมขึ้นมานี้จะผ่านการบดและคัดขนาดด้วยร่อนขนาด 40-60 เมช ก่อนนำมาบรรจุในคอลัมน์ ซึ่งเป็นท่อเหล็กไร้สนิม เพื่อศึกษาสมมูลการดูดซับ

### 3.2.2 แก๊สถูกดูดซับ

แก๊สโพรเพน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งในแก๊สธรรมชาติจากแหล่งแก๊สในอ่าวไทย ได้รับการสนับสนุนจาก การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย ใช้เป็นแก๊สถูกดูดซับ โดยมีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 99.8 โดยปริมาตร ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพดังแสดงตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1: สมบัติทางกายภาพของแก๊สโพรเพน

สมบัติทางกายภาพ	
มวลโมเลกุล	44.10
เส้นผ่านศูนย์กลางจลนพลศาสตร์ของเลนาร์ดโจน (Lennard-Jone Kinetic Dimeter, อังสตรอม)	5.06
จุดเดือด ณ ความดันบรรยากาศ (องศาเซลเซียส)	-41.4
อุณหภูมิวิกฤต (องศาเซลเซียส)	96.8
ความดันวิกฤต (บรรยากาศ)	42.00
อุณหภูมิการลุกติดไฟ (องศาเซลเซียส)	485.72
ความร้อนแฝงของการควบแน่น (กิโลจูลต่อโมล)	18.80
ความสามารถในการถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วโดยสนามไฟฟ้า	5.00

### 3.2.3 แก๊สเฉื่อยผสม

แก๊สบอลลูอนฮีเลียมมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 โดยปริมาตร จากบริษัท ไทยอินดัสเตเรียลแก๊ส จำกัด ใช้เป็นแก๊สพาในเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี และเป็นแก๊สเฉื่อยผสมสำหรับปรับความเข้มข้นต่างๆ ของแก๊สถูกดูดซับ ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพดังแสดงตามตารางที่ 3.2

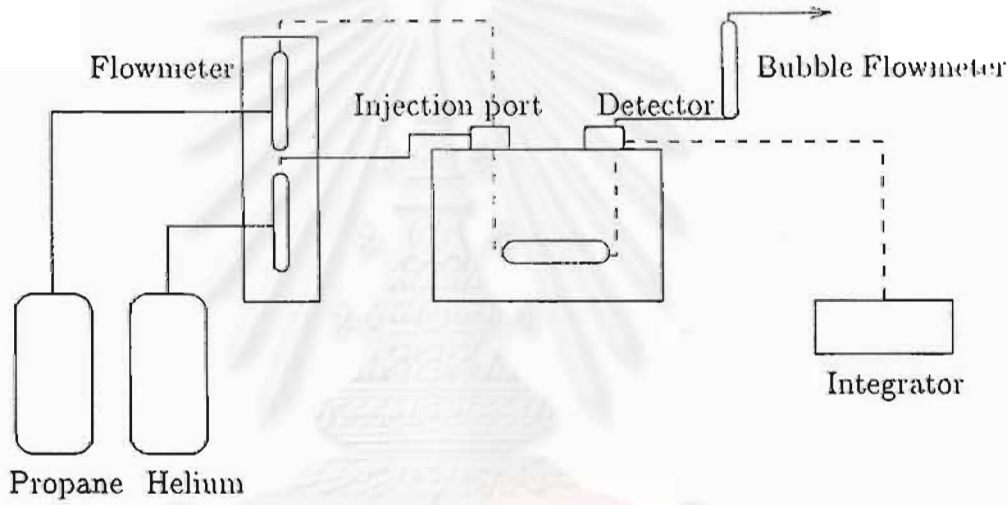
### 3.2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมมูลการดูดซับ โดยใช้เทคนิคการไหลผ่านทะเลคอลัมน์ที่บรรจุตัวดูดซับชนิดถ่านของแก๊สถูกดูดซับแบบต่อเนื่องแสดงได้ดังรูปที่ 3.1

ตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากกะลามะพร้าวโดยใช้สารละลายซิงก์คลอไรด์เป็นตัวกระตุ้นในการเพิ่มพื้นที่ผิว แต่ละชนิดจะถูกบดและคัดขนาดด้วยร่อนขนาด 40-60 เมช และถูกบรรจุอยู่ใน

ตารางที่ 3.2: สมบัติทางกายภาพของแก๊สฮีเลียมที่อุณหภูมิ 232 องศาเซลวิน

สมบัติทางกายภาพ	
มวลโมเลกุล	4.00
ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	$1.78 \times 10^{-14}$
ความหนืด ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (กรัมต่อเซนติเมตรต่อวินาที)	0.019
จุดเดือด ณ ความดันบรรยากาศ (องศาเซลเซียส)	-268.9
อุณหภูมิวิกฤต (องศาเซลเซียส)	-267.74
ความดันวิกฤต (บรรยากาศ)	2.26



รูปที่ 3.1: แผนผังการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

คอลัมน์ที่เป็นท่อเหล็กไร้สนิม ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.46 เซนติเมตร และส่วนที่บรรจุยาวประมาณ 11 เซนติเมตร ปลายทั้งสองข้างของคอลัมน์จะถูกอุดด้วยใยแก้วยาวประมาณ 1 เซนติเมตร เพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายออกของตัวดูดซับชนิดถ่าน และเพื่อปรับสภาพการไหลของแก๊ส

สำหรับความพรุนของส่วนที่บรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน (porosity,  $\epsilon$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ Blake-Kozeny ดังแสดงตามสมการที่ 3.1

$$\log\left(\frac{\Delta P}{\rho_b v^2}\right)\left(\frac{D_p}{L}\right) = -\log\left(\frac{D_p v \rho_b}{\mu}\right) + \log\left(\frac{150(1-\epsilon)}{\epsilon^3}\right) \quad (3.1)$$

เมื่อ  $\Delta P$  คือความดันลดภายในคอลัมน์  $\rho_b$  คือ ความหนาแน่นของตัวดูดซับชนิดถ่าน ที่บรรจุแล้ว (bulk density)  $v$  คือ superficial velocity  $D_p$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคตัวดูดซับชนิดถ่าน และ  $L$  คือ ความยาวของส่วนที่บรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน

ความพรุนของส่วนที่บรรจุตัวดูดซับชนิดถ่านสามารถหาได้จากจุดตัดแกนของกราฟที่แสดงระหว่าง  $\log(\Delta P/\rho_b v^2) (D_p/L)$  กับ  $\log(D_p v \rho_b/\mu)$  ส่วนความหนาแน่นของอนุภาคตัวดูดซับชนิดถ่าน (particle density,  $\rho_p$ ) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.2

$$\rho_p = \frac{\rho_b}{1 - \varepsilon} \quad (3.2)$$

ตารางที่ 3.3: ลักษณะของตัวดูดซับชนิดถ่านที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ซึ่งมีความยาวของส่วนที่บรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 11 เซนติเมตร

ตัวดูดซับชนิดถ่าน	น้ำหนักของตัวดูดซับชนิดถ่าน (กรัม)	ความหนาแน่นของตัวดูดซับชนิดถ่าน (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ความพรุนของส่วนที่บรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน ( $\varepsilon$ )
ถ่านกะลา	1.17	653.37	0.49
ถ่านกะลาอย่างเดี่ยว	0.86	499.16	0.51
ถ่านกะลาผสมน้ำ	0.99	593.57	0.52
30% 500c 60min	1.16	630.68	0.47
40% 500c 60min	1.10	587.32	0.46
50% 500c 60min	0.96	566.52	0.51
60% 500c 60min	1.07	607.64	0.50
50% 300c 60min	0.94	540.67	0.50
50% 400c 60min	1.08	658.69	0.53
50% 450c 60min	1.04	624.67	0.52
50% 475c 60min	0.77	448.54	0.51
50% 500c 60min	0.96	566.52	0.51
50% 600c 60min	1.02	569.94	0.48
50% 500c 15min	0.81	480.08	0.52
50% 500c 30min	1.07	561.99	0.45
50% 500c 45min	0.92	545.55	0.51
50% 500c 60min	0.96	566.52	0.51

คอลัมน์ที่บรรจุตัวดูดซับชนิดถ่านจะถูกติดตั้งไว้ภายในเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี Shimadzu GC-8A เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ปลายข้างหนึ่งของคอลัมน์จะต่อเข้ากับวาล์วสำหรับป้อนแก๊สถูกดูดซับ ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งต่อกับเครื่องตรวจวัดความเข้มข้นของแก๊สที่ถูกดูดซับที่ผ่านออกจากคอลัมน์ ซึ่งเป็นเครื่องวัดชนิดความนำความร้อน (Thermal Conductivity Detector, TCD) สัญญาณที่ตรวจวัดได้จะถูกส่งไปยัง เครื่องแสดงผล Shimadzu C-R3A Chromatopac โดยแสดงผลอย่างต่อเนื่องเป็นเส้นโค้งผ่านทะเล

### 3.2.5 วิธีวัดเส้นโค้งผ่านทะเล

สำหรับการวัดสมดุลการดูดซับแก๊สโพรเฟนจากเส้นโค้งผ่านทะเลจะศึกษาในช่วงความเข้มข้น ประมาณร้อยละ 15-70 โดยปริมาตร ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยก่อนการวัดสมดุลการดูดซับของแก๊สโพรเฟนที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ ตัวคอลัมน์จะถูกปรับคืนสภาพ (regenerate) โดยการให้แก๊สฮีเลียมไหลผ่าน เพื่อที่จะไล่น้ำและแก๊สต่างๆ ที่ถูกดูดซับไว้ให้หมดไป แล้วจึงทำการปรับอุณหภูมิของคอลัมน์ตามที่กำหนด โดยมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. ปรับความเข้มข้นของแก๊สผสม โดยการปรับสัดส่วนของแก๊สโพรเฟนให้มีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 15 โดยปริมาตรและแก๊สฮีเลียมให้มีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 85 โดยปริมาตร จากอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลแบบฟองสปูซึ่งถูกติดตั้ง ณ ตำแหน่งทางออกของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี
2. อ่านความดันของคอลัมน์จากมาตรวัดความดัน บันทึกค่าไว้
3. ปลอ่ยให้สัญญาณจากเครื่องวัดความเข้มข้นของแก๊สโพรเฟนส่งไปยังเครื่องแสดงผลให้มีลักษณะคงที่ โดยสังเกตจากระดับเส้นต้องไม่เปลี่ยนแปลง
4. เริ่มป้อนแก๊สโพรเฟนแบบต่อเนื่อง แก๊สจะไหลจากถังเก็บผ่านวาล์วป้อนสารผสมกับแก๊สฮีเลียมซึ่งไหลผ่านคอลัมน์ในอัตราการไหลที่คงที่อย่างต่อเนื่อง แล้วแก๊สผสมจึงไหลผ่านเข้าสู่คอลัมน์
5. จะได้ว่าสัญญาณจากเครื่องวัดความเข้มข้นของแก๊สโพรเฟนที่ถูกดูดซับที่ออกจากคอลัมน์ซึ่งถูกวัดได้ จะถูกคำนวณและแสดงผลเป็นเส้นโค้งผ่านทะเลออกมาจากเครื่องแสดงผล
6. เมื่อการดูดซับเข้าสู่สภาวะคงที่สังเกตได้จากระดับเส้นไม่เปลี่ยนแปลง ปิดวาล์วป้อนแก๊สโพรเฟน
7. แก๊สโพรเฟนที่เหลืออยู่ในคอลัมน์จะถูกพาออกมาจนหมดด้วยแก๊สฮีเลียม
8. เปลี่ยนสัดส่วนของแก๊สโพรเฟนให้มีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 20-70 โดยปริมาตรและแก๊สฮีเลียมให้มีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 30-80 โดยปริมาตร แล้วดำเนินการทดลองตามข้อ 1-7 ใหม่

ในระหว่างการทดลองแต่ละครั้ง คอลัมน์ซึ่งถูกบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่านชนิดต่างๆ ที่เตรียมขึ้นจะต้องถูกปรับคืนสภาพโดยมีแก๊สฮีเลียมไหลผ่านเป็นระยะเวลาที่นานพอ เพื่อให้สัญญาณจากเครื่องวัดความเข้มข้นที่ส่งไปยังเครื่องแสดงผลมีลักษณะคงที่ และพร้อมสำหรับการทดลอง

ข้อมูลสมดุลการดูดซับสามารถวิเคราะห์ได้จากเส้นโค้งผ่านทะเลของแก๊สโพรเฟน ซึ่งความเข้มข้นต่างๆ ที่ถูกป้อนเข้าสู่คอลัมน์ของตัวดูดซับชนิดถ่าน ณ สภาวะอุณหภูมิที่กำหนด โดยการคูณมวลสารรอบระบบของคอลัมน์ โดยที่เส้นโค้งผ่านทะเลสามารถถูกวัดซ้ำได้เพื่อตรวจสอบผลการทดลองภายใต้สภาวะเดียวกัน

## บทที่ 4

# ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 4.1 ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่าน

ลักษณะสมบัติพื้นฐานของตัวดูดซับชนิดถ่านจากกะลามะพร้าว ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะและการดูดซับไอโอดีน ด้วยการใช้สารละลายซิงก์คลอไรด์ มีลักษณะแตกต่างกันโดยขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายซิงก์คลอไรด์ อุณหภูมิ และช่วงเวลาของขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับดังนี้

#### 4.1.1 ลักษณะของถ่านกะลามะพร้าว

เนื่องจากกะลามะพร้าวมีลักษณะแข็งและค่อนข้างเหนียวจึงต้องมีการทำให้เป็นถ่านก่อน เพื่อให้สามารถย่อยให้มีขนาดเล็กพอเหมาะ ดังนั้นสภาวะการเผาให้เป็นถ่าน จึงมีความสำคัญต่อคุณภาพของตัวดูดซับชนิดถ่าน ซึ่งขั้นตอนของการทำให้เป็นถ่าน อุณหภูมิและช่วงเวลาของการเผา มีผลต่อลักษณะเบื้องต้นของถ่านกะลามะพร้าว อ้างอิงถึงผลงานวิจัยของเกรียงศักดิ์ กิตติพิมาน[33]ดังแสดงในตาราง

สภาวะการทำให้เป็นถ่าน	ลักษณะทั่วไป
200 °C 2 ชั่วโมง	มีลักษณะคล้ายกับกะลา ก่อนเผา โดยมีสีน้ำตาลเข้มมากขึ้น
300 °C 1 ชั่วโมง	มีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ เมื่อตัดดูพื้นผิวตัดขวาง พบว่ากะลามีสีดำเฉพาะผิวภายนอกของกะลาทั้งสองด้าน
300 °C 2 ชั่วโมง	เมื่อตัดดูพื้นผิวตัดขวาง พบว่ากะลามีสีดำบริเวณผิวภายนอกของกะลาทั้งสองด้านเพื่อมากขึ้น
300 °C 3 ชั่วโมง	เมื่อตัดดูพื้นผิวตัดขวาง พบว่ากะลาเปลี่ยนเป็นสีดำทั้งหมด แต่ยังคงมีความแข็งอยู่มาก
350 °C 3 ชั่วโมง	เมื่อตัดดูพื้นผิวตัดขวาง พบว่ากะลาเปลี่ยนเป็นสีดำทั้งหมด และเปราะมากขึ้น
400 °C 1 ชั่วโมง	กะลาเปลี่ยนเป็นเถ้าทั้งหมด

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้คือ การเผาอะลามะพร้าวที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงในสภาวะที่อับแก๊สออกซิเจน พบว่าถ่านอะลามะพร้าวที่ได้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและค่าการดูดซับไอโอดีน 18 ตารางเมตรต่อกรัม และ 66 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ณ สภาวะนี้พลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปจะเร่งให้สารประกอบอินทรีย์ในวัตถุบสลายตัวและหลุดออกจากโครงสร้างได้มาก ถ่านที่ได้จึงมีลักษณะเปราะมากขึ้น

#### 4.1.2 ผลของสารละลายซิงก์คลอไรด์

ข้อมูลของลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่าน แสดงดังตารางที่ 4.1 ภายหลังจากขั้นตอนของการเตรียมถ่านอะลา ทำการทดลองต่อมาคือ การเผาถ่านอะลาอย่างเดี่ยวและถ่านอะลาผสมน้ำ พบว่าลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่าน ทั้งค่าพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องจากพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเผาถูกใช้ไปในการสลายพันธะของสารประกอบอินทรีย์ในวัตถุบสลายต่อ ส่วนกรณีของการเผาถ่านอะลาผสมน้ำ เนื่องจากมีการใส่น้ำลงไปด้วย พลังงานความร้อนจึงถูกนำไปใช้ในการทำให้น้ำระเหยกลายเป็นไอน้ำ และสามารถเกิดปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวของถ่านได้ จึงส่งผลให้ทั้งค่าพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีของการเผาถ่านอะลาเพียงอย่างเดียว

และการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายซิงก์คลอไรด์จากร้อยละ 30-60 โดยน้ำหนัก พบว่า

ตารางที่ 4.1: ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายซิงก์คลอไรด์

ตัวดูดซับชนิดถ่าน	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	ค่าไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)
ถ่านอะลา	18	69
ถ่านอะลาอย่างเดี่ยว	94	228
ถ่านอะลาผสมน้ำ	131	242
30% 500c 60 min	581	592
40% 500c 60 min	670	571
50% 500c 60 min	711	898
60% 500c 60 min	672	600

มีพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นมากกว่า กรณีที่ไม่ได้ใส่สารละลายซิงก์คลอไรด์ ซึ่งค่าพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นถึง 581-711 ตารางเมตรต่อกรัม และค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นถึง 592-898 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากสารละลายซิงก์คลอไรด์มีความเป็นกรดสูง และมีความสามารถในการแตกตัวให้ไฮโดรเจนบวก ถึงแม้ว่าจะมีการแตกตัวน้อยกว่าสารละลายที่เป็นกรดชนิดอื่น แต่สามารถคงสภาพของสารละลายได้เป็นช่วง เวลานานกว่าสารละลายอื่นๆ ทั้งยังมีลักษณะสมบัติดูดความชื้นได้ดี และก็มีฤทธิ์กัดกร่อน ซึ่งสามารถสลายโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ภายในถ่านอะลามะพร้าวได้ เมื่อนำของผสมดังกล่าวไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที ถึงแม้ว่าสารละลายอาจจะหายไปหมดหรือสลายตัวเป็นสารประกอบอื่น



แต่สภาวะเผาที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง ซึ่งของผสมจะมีระยะเวลาอยู่ในเตาเผาจนาน จึงทำให้ปฏิกิริยาเคมีของสารละลายซิงค์คลอไรด์กับองค์ประกอบภายในถ่านกะลามะพร้าว จะถูกเร่งให้เกิดมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้พื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและการดูดซับไอโอดีนสูงขึ้น

#### 4.1.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา

ข้อมูลของลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่าน แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2: ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียม ณ อุณหภูมิต่างๆ

ตัวดูดซับชนิดถ่าน	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	ค่าไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)
50% 300c 60 min	15	48
50% 400c 60 min	121	239
50% 450c 60 min	210	263
50% 475c 60 min	412	408
50% 500c 60 min	711	898
50% 600c 60 min	660	743

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวมีผลกระทบต่อลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่าน ทั้งในค่าพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและค่าการดูดซับไอโอดีน จากการทดลองเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวดังแต่อุณหภูมิ 300-600 องศาเซลเซียส ค่าของพื้นที่ผิวและค่าไอโอดีนมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสูงขึ้น กล่าวคือที่อุณหภูมิในการเผา 300 องศาเซลเซียส ให้ค่าพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและค่าการดูดซับไอโอดีน ใกล้เคียงกับกรณีของถ่านกะลา จะเห็นได้ว่า ณ อุณหภูมินี้ไฮโดรเจนบวกที่อยู่ในสารละลายซิงค์คลอไรด์หรือไอน้ำอาจยังไม่เกิดปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวของถ่านกะลา ส่วนที่อุณหภูมิ 400-475 องศาเซลเซียส ค่าของพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดจากไฮโดรเจนบวกที่อยู่ในสารละลายซิงค์คลอไรด์ถูกเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น พร้อมกับพลังงานความร้อนที่ถูกใช้ในการเผาเพื่อให้ไปสลายพันธะของสารประกอบอินทรีย์ภายในถ่านกะลา จึงทำให้เหลือเฉพาะโครงผลึกของกราฟไฟต์เป็นส่วนประกอบหลักของตัวดูดซับชนิดถ่าน ส่วนกรณีของการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากมีการเกิดปฏิกิริยาเคมีซึ่งถูกเร่งให้เกิดเร็วขึ้นระหว่างถ่านกะลา กับไฮโดรเจนบวกที่อยู่ในสารละลายซิงค์คลอไรด์เป็นส่วนมาก และยังมีปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำกับพื้นที่ผิวของถ่านช่วยด้วย ส่วนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ค่าพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าใกล้เคียงกับที่เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งในกรณีนี้การเพิ่มอุณหภูมิในการเผาเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวโดยใช้อุณหภูมิสูงเกินไปอาจไม่ส่งผลในการเพิ่มค่าพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจน และค่าการดูดซับไอโอดีนของตัวดูดซับชนิดถ่านให้ดีขึ้น ในทางกลับกันที่อุณหภูมิ

สูงอาจไปสลายพันธะของเซลลูโลสทำให้พื้นที่ผิวและค่าไอโอดีนมีค่าลดลงก็เป็นได้

#### 4.1.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการเผาเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว

ข้อมูลของลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่าน แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3: ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมในช่วงเวลาต่างๆ

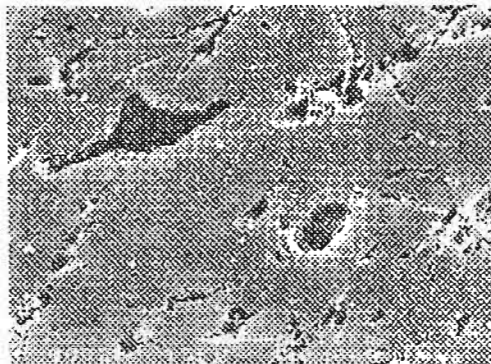
ตัวดูดซับชนิดถ่าน	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	ค่าไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)
50% 500c 15 min	315	353
50% 500c 30 min	411	410
50% 500c 45 min	496	464
50% 500c 60 min	711	898

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเวลาที่ใช้ในการเผาเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวมีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่าน ทั้งในค่าของพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจน และค่าการดูดซับไอโอดีน กล่าวคือ จากการทดลองเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการเผาเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจาก 15-60 นาที ค่าของพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าเพิ่มขึ้น 315-711 ตารางเมตรต่อกรัม และ 353-898 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งเนื่องจากเวลาของการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนบวกในสารละลายซิงค์คลอไรด์กับพื้นผิวของถ่านกะลาเกิดได้มากขึ้น

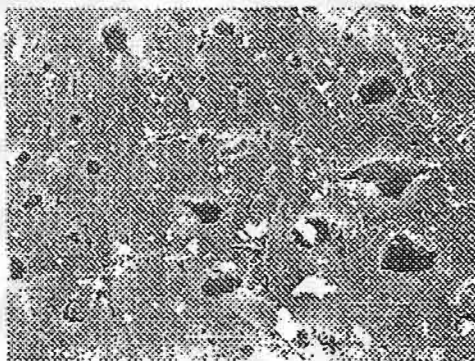
#### 4.1.5 ลักษณะโครงสร้างของพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับชนิดถ่าน

จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างของพื้นผิวภายนอกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมโดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ และตัวดูดซับชนิดถ่าน ที่ใช้ในอุตสาหกรรม[33] ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถทำให้มองเห็นรายละเอียดของพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับชนิดถ่าน และช่วยในการสนับสนุนการวิเคราะห์และวิจารณ์ เช่น มีจำนวนรูพรุนต่อหน่วยพื้นที่ที่มากขึ้น รูพรุนมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวการดูดซับไนโตรเจนมากขึ้น และค่าการดูดซับไอโอดีนสูงขึ้น เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 4.1- 4.5

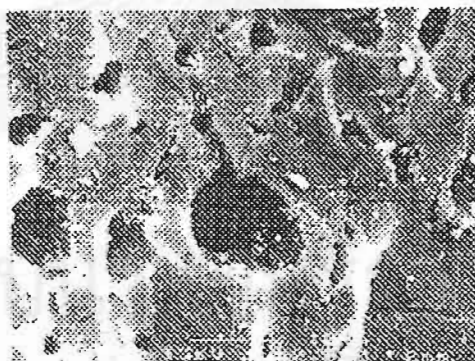
จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างของพื้นผิวภายนอกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมโดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ในรูปที่ 4.1- 4.5 โดยในรูปจะใช้กำลังขยายเท่ากับ 2000 เท่า ในรูปที่ 4.1 เป็นตัวดูดซับชนิดถ่านกะลา รูปบนเป็นถ่านกะลาพบว่ามีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่บนพื้นผิวของอนุภาค ส่วนรูปกลางเป็นถ่านกะลาอย่างเดี่ยวและรูปล่างเป็นถ่านกะลาผสมน้ำพบว่าถ่านมีรูพรุนขนาดเล็กกระจายตัวเพิ่มขึ้นจากกรณีของถ่านกะลา แต่ลักษณะรูพรุนของถ่านกะลาผสมน้ำจะมีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าถ่านกะลาอย่างเดี่ยว รูปที่ 4.2 เป็นตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากการสารละลาย ซิงค์คลอไรด์ความเข้มข้นต่างๆ คือ ร้อยละ 30-60 โดยน้ำหนัก จาก



ถ่านกะลา

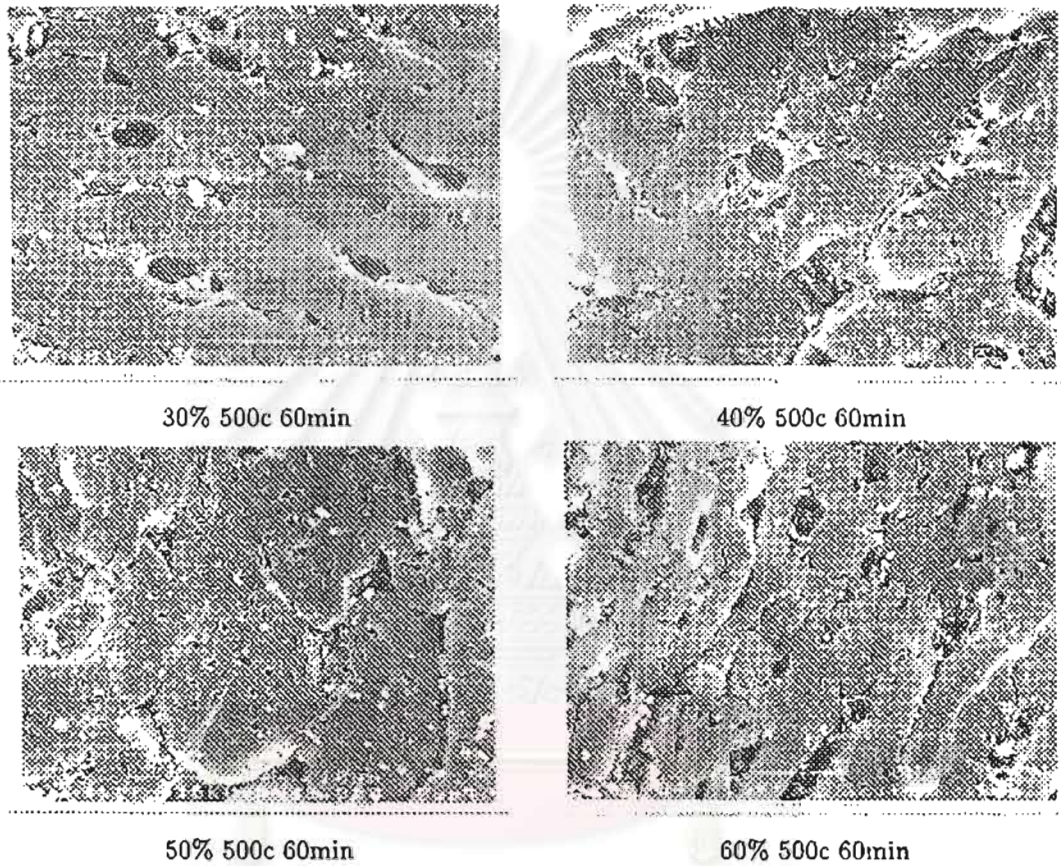


ถ่านกะลาอย่างเดี่ยว



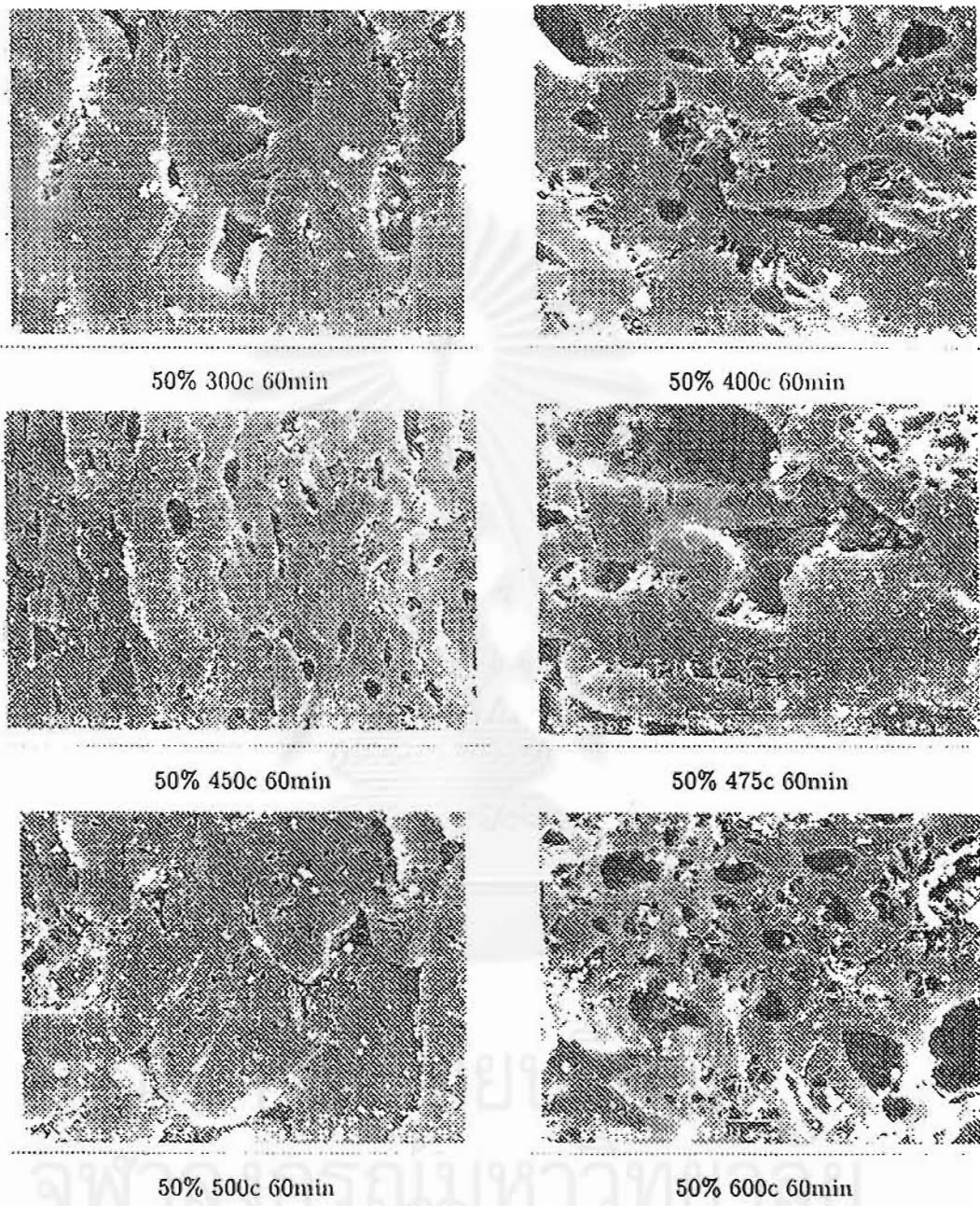
ถ่านกะลาผสมน้ำ

รูปที่ 4.1: ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับชนิดถ่านกะลา

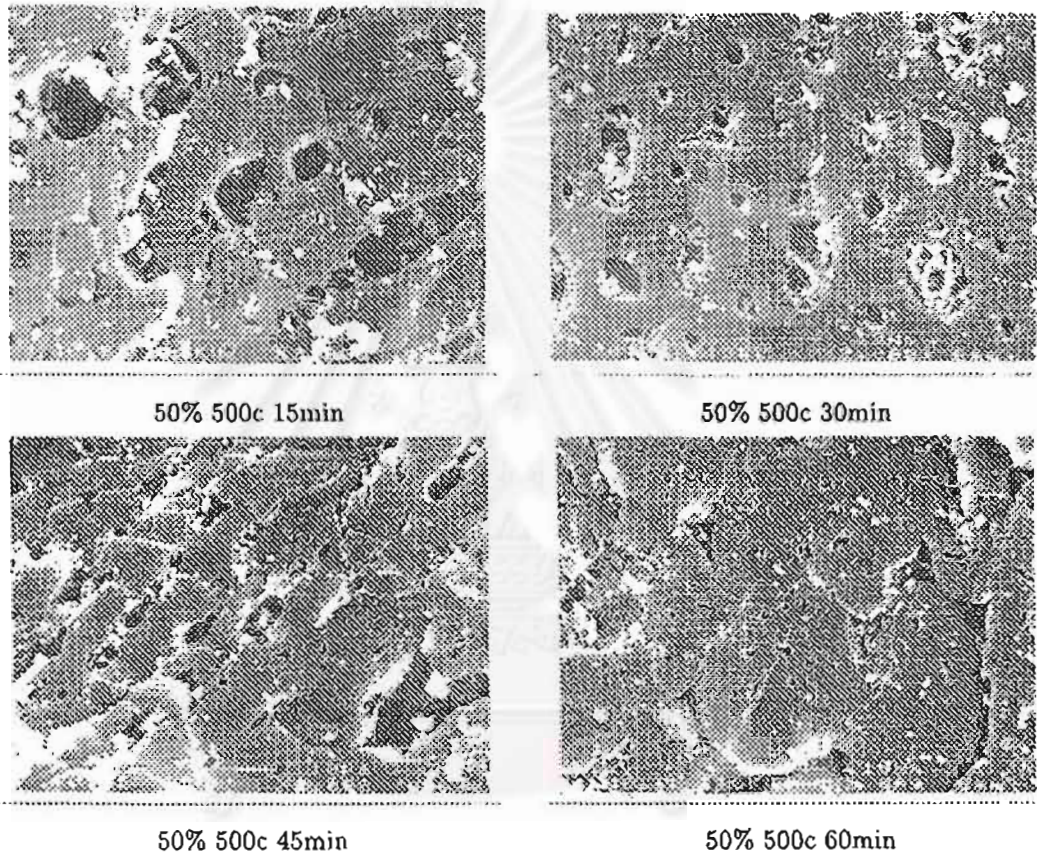


รูปที่ 4.2: ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากสารละลายซิงก์คลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3: ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากอุณหภูมิต่างๆ

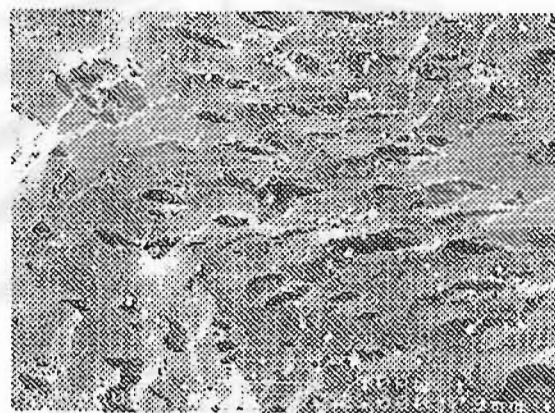


รูปที่ 4.4: ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากช่วงเวลาต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



YAO 4/8



YAO 12/30



คาร์บอนโมเลกุลลาซีฟ

รูปที่ 4.5: ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ใช้ในอุตสาหกรรม

รูปพบว่าบริเวณผิวของตัวดูดซับชนิดถ่านจะมีทั้งรูพรุนขนาดเล็กและขนาดใหญ่ปะปนกัน กระจายอยู่เต็มไปหมดทั้งทั้งบริเวณพื้นผิว และมีการกระจายตัวมากกว่ากรณีที่ไม่ได้ใส่สารละลายซิงก์คลอไรด์ และที่ทุกความเข้มข้นของสารละลายซิงก์คลอไรด์ การกระจายตัวของรูพรุนบนพื้นผิวของตัวดูดซับชนิดถ่านมีความใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนใกล้เคียงกัน รูปที่ 4.3 เป็นตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากอนุกรมต่างๆ ตั้งแต่ 300-600 องศาเซลเซียส จากรูปพบว่า มีรูพรุนทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่กระจายอยู่ตามบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับชนิดถ่าน เมื่ออุณหภูมิของการเผาเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น สังเกตได้ว่าการกระจายตัว รูพรุนบนพื้นผิวของตัวดูดซับชนิดถ่านก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเช่นเดียวกัน ส่วนในรูปที่ 4.4 เป็นตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากช่วงเวลาต่างๆ ตั้งแต่ 15-60 นาที จากรูปพบว่า มีรูพรุนทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่กระจายอยู่ที่บริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับชนิดถ่าน เมื่อเวลาในการเผาเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น แต่สังเกตได้ว่าการกระจายตัว รูพรุนบนพื้นผิวของตัวดูดซับชนิดถ่านมีปริมาณเพิ่มขึ้น ผลเนื่องจากพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น ส่วนในรูปที่ 4.5 เป็นตัวดูดซับชนิดถ่านที่ใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากกะลามะพร้าว เช่นเดียวกับตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้จากงานวิจัย รูปเป็นตัวดูดซับชนิดถ่านชนิด YAO 4/8 ซึ่งใช้ในระบบการแยกอากาศ จะมีรูพรุนขนาดเล็กกว่าตัวดูดซับชนิดถ่านชนิด YAO 12/30 ซึ่งใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียตั้งรูปกลาง และรูปล่างเป็นคาร์บอนโมเลกุลอาชีพ มีลักษณะของรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไป โดยที่ตัวดูดซับชนิดถ่านที่ใช้ในอุตสาหกรรม มีพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและค่าการดูดซับไอโอดีน แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4: ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่านที่ใช้ในอุตสาหกรรม

ตัวดูดซับชนิดถ่าน	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	ค่าไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)
YAO 4/8	1193	1310
YAO 12/30	1229	1305
คาร์บอนโมเลกุลอาชีพ		58

#### 4.1.6 การเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยอื่น

จากการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านจากกะลามะพร้าว โดยใช้สารละลายซิงก์คลอไรด์เป็นตัวกระตุ้นในขั้นตอนของการเพิ่มพื้นที่ผิวโดยการเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ คือความเข้มข้นของสารละลายซิงก์คลอไรด์ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเพิ่มพื้นที่ผิว พบว่าตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมได้นั้นมีค่าพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและค่าการดูดซับไอโอดีนเป็น 15-711 ตารางเมตรต่อกรัม และ 48-898 มิลลิกรัมต่อกรัม พบว่าสภาวะในการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านจะให้ทั้งค่าพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและค่าการดูดซับไอโอดีนต่างๆ กันไป ซึ่งสภาวะการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านที่ให้ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่านสูงสุดคือตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 1h ให้ค่าพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจน 711 ตารางเมตรต่อกรัม และค่าการดูดซับไอโอดีน 898 มิลลิกรัมต่อกรัม



การเปรียบเทียบกับงานวิจัยของผู้ที่ทำการศึกษาค่าการเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านจากกะลามะพร้าว และวัตถุดิบชนิดอื่นๆ โดยใช้สารละลายซิงก์คลอไรด์ หรือสารประกอบอื่นๆ โดยดูจากค่าการดูดซับ ไอโอดีนแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5: แสดงผลการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่าน

งานวิจัยของ	วัตถุดิบ	สารเคมีที่ใช้ ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว	ค่าไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)
จากการทดลอง ผาสุก และผู้ร่วมงาน[16]	กะลามะพร้าว	ซิงก์คลอไรด์	898
	กะลามะพร้าว	ซิงก์คลอไรด์	1037
	เนื้อเมล็ดตาลโตนด	ซิงก์คลอไรด์	1073
	เปลือกเมล็ดมะม่วง หิมพานต์	ซิงก์คลอไรด์	861
อุไรวรรณ[17]	กะลามะพร้าว	ไอน้ำอิมตัว	1540
สมศักดิ์ และผู้ร่วมงาน[18]	กะลามะพร้าว	ซิงก์คลอไรด์	150
	นเรศ และผู้ร่วมงาน[19]	กะลาตาลโตนด	ไอน้ำอิมตัว
บุญชัย[21]	กะลาตาลโตนด	ซิงก์คลอไรด์	1088
	กะลาตาลโตนด	ไอน้ำอิมตัว	1000
ดำรง และผู้ร่วมงาน[23]	กะลาตาลโตนด	ซิงก์คลอไรด์	1100
	กะลามะพร้าว	เกลือแกง	640
เกศรา และผู้ร่วมงาน[24]	ซีลี้อย	เกลือแกง	542
	ดินพรุ	ไอน้ำอิมตัว	1200
คณิต และผู้ร่วมงาน[34]	ดินพรุ	ซิงก์คลอไรด์	1300
	แกลบ	ไซเตียมไฮดรอกไซด์	540
สุภาภรณ์[35]	ซังข้าวโพด	กรดซัลฟูริก	234
	ซังข้าวโพด	กรดฟอสฟอริก	521
	ซังข้าวโพด	ซิงก์คลอไรด์	1242

## 4.2 การดูดซับแก๊สโพรเพน

เนื่องจากการดูดซับเป็นการใช้ประโยชน์บนพื้นผิวของของแข็ง ที่เรียกว่า ตัวดูดซับ โดยทั่วไป เมื่อปล่อยให้สารถูกดูดซับสัมผัสกับตัวดูดซับเป็นระยะเวลาที่นานอย่างเพียงพอ จะเกิดสภาวะที่เรียกว่า สมดุลการดูดซับ และในขณะนั้นปริมาณของสารที่ถูกดูดซับไว้จะสมดุลกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับนั้นในวัฏภาคของไหล จึงพบว่าปริมาณการดูดซับจะมีค่าจำกัดอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ สามารถอธิบายลักษณะการดูดซับลักษณะนี้ได้ แต่ถ้าเป็นแบบจำลองการ

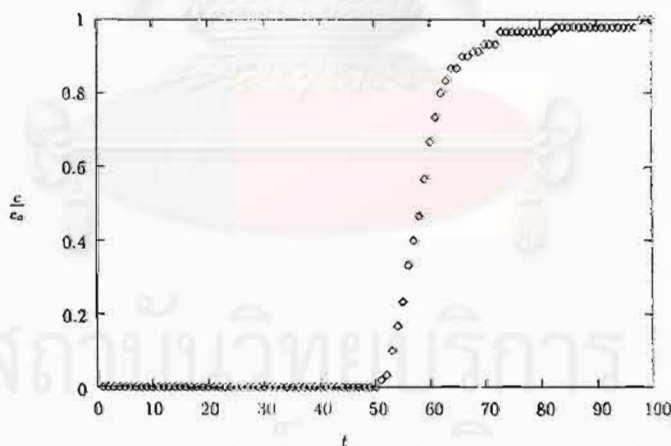
ดูดซับของฟรอยดลธิชปริมาณการดูดซับจะไม่มีขีดจำกัดสูงสุด และเนื่องจากสารถูกดูดซับในงงานวิจัยเป็นแก๊สโพรเพนซึ่ง เมื่อเพิ่มความดันของแก๊สขึ้นไปถึงค่าหนึ่ง แก๊สมีโอกาสดเกิดการควบแน่น จะเห็นได้ว่าสอดคล้องกับการเลือกใช้แบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ ซึ่งมีค่าปริมาณการดูดซับสูงสุดจำกัดอยู่ค่าหนึ่ง

#### 4.2.1 แบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์

การคำนวณหาปริมาณการดูดซับ สามารถคำนวณได้จากผลต่างระหว่างปริมาณสารทั้งหมดที่ไหลเข้ากับ ปริมาณสารทั้งหมดที่ไหลออกจากคอลัมน์และปริมาณสารทั้งหมดที่สะสมในระบบ จากข้อมูลการดูดซับซึ่งวัดได้พบว่า ปริมาณแก๊สโพรเพนที่ถูกดูดซับไว้สมดุลกับความเข้มข้นของโพรเพนในวัฏภาคแก๊ส ซึ่งมีค่าเท่ากับความเข้มข้นที่ไหลเข้าสู่คอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน โดยสมดุลการดูดซับมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง สามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ โดยอาศัยความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างส่วนกลับของปริมาณการดูดซับ และความดันย่อยของแก๊สที่ถูกดูดซับแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์สามารถเขียนได้ดังนี้

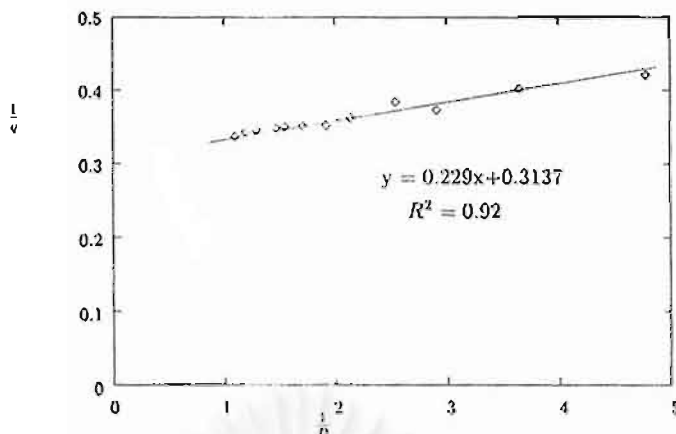
$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_s} + \frac{1}{K_L q_s} \left( \frac{1}{P} \right) \quad (4.1)$$

จากสภาวะของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 50 องศาเซลเซียสแก๊สโพรเพนเข้มข้นร้อยละ 14.98 โดย ปริมาตร ไหลผ่านคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60min ณ บริเวณทางออกของคอลัมน์ ความเข้มข้นของแก๊สโพรเพนจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งเท่ากับความเข้มข้นในแก๊สผสมที่ไหลเข้าสู่คอลัมน์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6: เส้นโค้งผ่านทะเลคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

จากข้อมูลสมดุลการดูดซับแก๊สโพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความสัมพันธ์เชิงเส้น ดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งค่าคงที่สมดุลการดูดซับของแลงเมียร์  $K_L$  และปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน



รูปที่ 4.7: แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ของข้อมูลสมดุลการดูดซับแก๊สโพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

คำนวณได้จากความชันและจุดตัดแกนตั้งของกราฟ ตามลำดับ สำหรับค่าคงที่สมดุลการดูดซับของแลงเมียร์  $K_L$  และปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่านแสดงดังตารางที่ 4.6

#### 4.2.2 การอธิบายสมดุลการดูดซับด้วยแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์

ในการประเมินความสามารถของการดูดซับ สามารถพิจารณา ได้จากลักษณะของไอโซเทิร์มหมายความว่า กรณีที่ความสามารถในการดูดซับสูง ไอโซเทิร์มของการดูดซับมักจะมีแนวโน้มเบี่ยงเบนจากไอโซเทิร์มเชิงเส้น หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์จะมาก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติ เฉพาะที่เหมาะสมระหว่างโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ และลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ เช่นความเป็นขั้วที่บริเวณพื้นผิว สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดความเป็นขั้วบนโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ ซึ่งจะขึ้นกับลักษณะสมบัติการถูกเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของสารนั้นๆ และเนื่องจากโมเลกุลของแก๊สโพรเพนมีลักษณะสมบัติการถูกเหนี่ยวนำให้เกิดความเป็นขั้วได้ จึงเกิดการดูดซับขึ้นเนื่องจากการถูกเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับชนิดถ่าน สำหรับการดูดซับแก๊สโพรเพนภายใต้สภาวะของอุณหภูมิที่ใช้ทดลอง 50 องศาเซลเซียส บนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมขึ้นจากสารละลายซิงก์คลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ อุณหภูมิและช่วงเวลาที่ใช้ในการเผา ข้อมูลของสมดุลการดูดซับจากการทดลองกับไอโซเทิร์มของแลงเมียร์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.8- 4.11

#### ค่าคงที่ของแลงเมียร์

- ผลของสารละลายซิงก์คลอไรด์ ต่อค่าคงที่ของแลงเมียร์

สำหรับการดูดซับแก๊สโพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมโดยวิธีการเตรียมต่างๆ กัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่กำหนด ค่าคงที่ของแลงเมียร์มีค่าใกล้เคียงกันทุกตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมโดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายซิงก์คลอไรด์ร้อยละ 30-60 โดยน้ำหนัก สามารถสังเกตได้ว่าค่าคงที่ของแลงเมียร์ของการดูดซับบนตัวดูดซับชนิดถ่าน มีความแตกต่าง

ตารางที่ 4.6: แสดงค่าคงที่ในแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์สำหรับการดูดซับบนตัวดูดซับชนิดถ่าน

ตัวดูดซับชนิดถ่าน	$K_L$ (ต่อบรรยากาศ)	$q_s$ (มิลลิโมลต่อกรัม)	$R^2$
ถ่านกะลา	4.5	0.3	0.91
ถ่านกะลาอย่างเดี่ยว	5.8	0.6	0.77
ถ่านกะลาผสมน้ำ	6.3	0.8	0.96
30% 500c 60min	14.1	2.4	0.96
40% 500c 60min	11.7	2.6	0.95
50% 500c 60min	13.7	3.2	0.92
60% 500c 60min	12.2	2.8	0.85
50% 300c 60min	4.2	0.4	0.60
50% 400c 60min	5.6	0.7	0.83
50% 450c 60min	7.5	1.1	0.67
50% 475c 60min	11.6	2.0	0.55
50% 500c 60min	13.7	3.2	0.92
50% 600c 60min	13.0	2.8	0.86
50% 500c 15min	8.2	1.5	0.88
50% 500c 30min	10.5	1.9	0.93
50% 500c 45min	11.5	2.0	0.58
50% 500c 60min	13.7	3.2	0.92

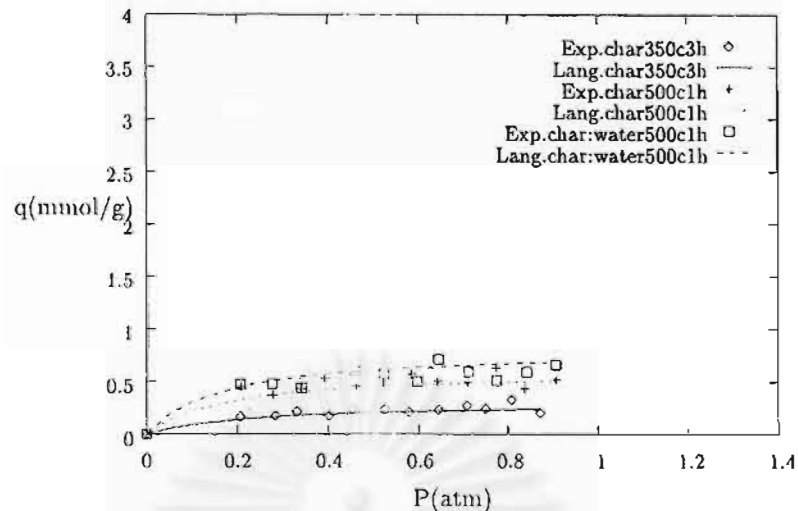
กันกับค่าคงที่ของแลงเมียร์สำหรับการดูดซับบนถ่านกะลาอย่างเห็นได้ชัดเจน อาจเนื่องจากผลของสารละลายซิงก์คลอไรด์ที่ใส่ลงไปเพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว

- ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ต่อค่าคงที่ของแลงเมียร์

สำหรับการดูดซับแก๊สโพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตั้งแต่ 300-600 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่กำหนด พบว่าผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม่มีผลกระทบต่อค่าคงที่ของแลงเมียร์สำหรับการดูดซับบนตัวดูดซับชนิดถ่าน เนื่องจากค่าคงที่ของแลงเมียร์มีค่าใกล้เคียงกัน

- ผลของการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาที่ใช้ในการเผา ต่อค่าคงที่ของแลงเมียร์

สำหรับการดูดซับแก๊สโพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาที่ใช้ในการเผาตั้งแต่ 15-60 นาที ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่กำหนด การเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาไม่มีผลกระทบต่อค่าคงที่ของแลงเมียร์เช่นเดียวกับกรณีของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา เนื่องจากค่าคงที่ของแลงเมียร์มีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.8: แสดงแบบจำลองของสมดุลการดูดซับแก๊สโพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่านกะลา ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

#### ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน

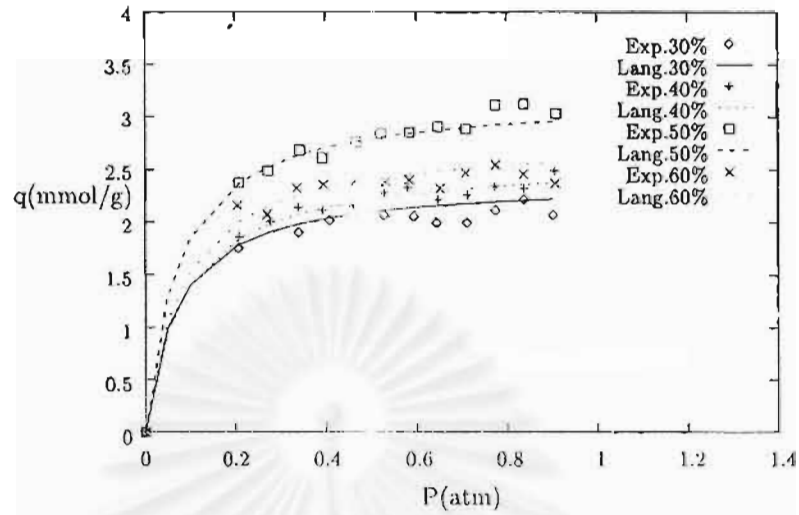
- ผลของสารละลายซิงก์คลอไรด์ ต่อปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน

สำหรับการดูดซับแก๊สโพรเพนบนถ่านกะลาที่เตรียมโดยวิธีการเตรียมต่างๆ กัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่กำหนด ค่าปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน สำหรับถ่านกะลาผสมน้ำ มีค่าใกล้เคียงกับของถ่านกะลาอย่างเดี่ยว และมีค่ามากกว่ากรณีกะลามะพร้าวเผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากค่าพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น ส่วนกรณีของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายซิงก์คลอไรด์ตั้งแต่ร้อยละ 30-60 โดยน้ำหนักพบว่าปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่านมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับชนิดถ่านมีความใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ค่าที่ได้ยังแตกต่างจากกรณีของการเผาถ่านกะลา ถ่านกะลามผสมน้ำและถ่านกะลาอย่างเดี่ยวอย่างชัดเจน

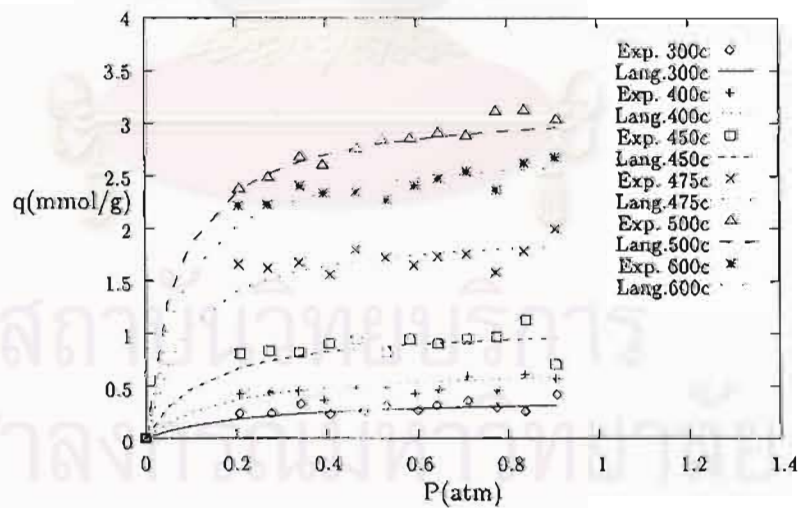
- ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ต่อปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน

สำหรับการดูดซับแก๊สโพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่าน ที่เตรียมจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวดังแต่ 300-600 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่กำหนด พบว่าผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา มีผลกระทบต่อปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน สำหรับตัวดูดซับชนิดถ่าน กล่าวคือ มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา

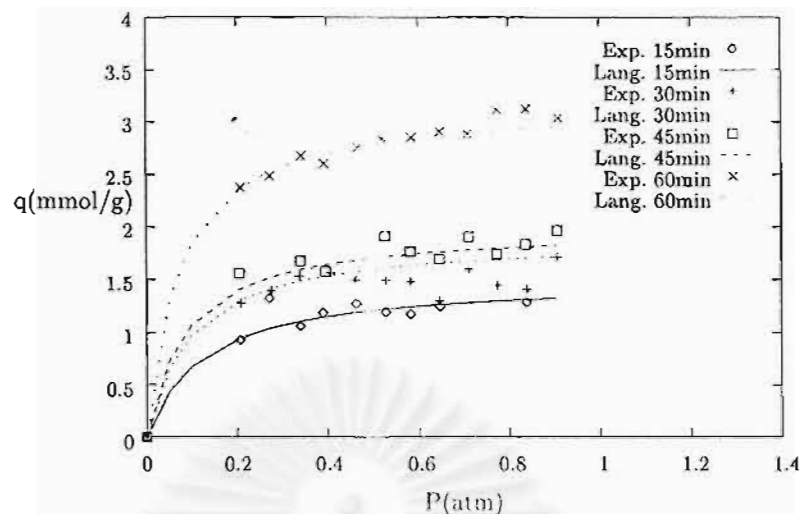
- ผลของการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาที่ใช้ในการเผา ต่อปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน



รูปที่ 4.9: แสดงแบบจำลองของสมดุลการดูดซับแก๊สไพโรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากสารละลายซิงคลอไรต์ความเข้มข้นต่างๆ ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.10: แสดงแบบจำลองของสมดุลการดูดซับแก๊สไพโรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากอุณหภูมิต่างๆ ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.11: แสดงแบบจำลองของสมดุลการดูดซับแก๊สโพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมมาจากช่วงเวลาที่ใช้ในการเผาตั้งแต่ 15-60 นาที ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่กำหนด การเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาที่ใช้ในการเผามีผลกระทบต่อปริมาณการดูดซับสูงสุด ต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่านเช่นเดียวกับกรณีของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่านมีค่าเพิ่มขึ้นตามช่วงเวลาที่มากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น

สำหรับการดูดซับแก๊สโพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาที่ใช้ในการเผาตั้งแต่ 15-60 นาที ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่กำหนด การเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาที่ใช้ในการเผามีผลกระทบต่อปริมาณการดูดซับสูงสุด ต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่านเช่นเดียวกับกรณีของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่านมีค่าเพิ่มขึ้นตามช่วงเวลาที่มากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น

#### 4.2.3 การเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยอื่น

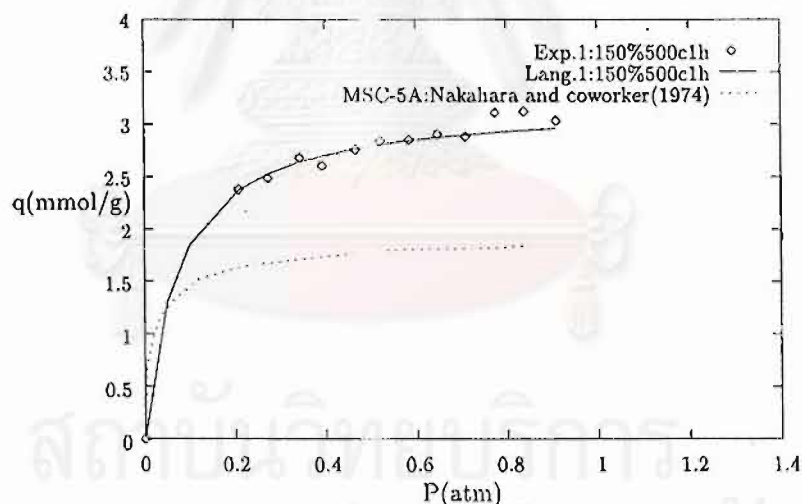
การเปรียบเทียบไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สโพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60 min กับตัวดูดซับชนิดอื่นๆ ในอุตสาหกรรมแสดงดังรูปที่ 4.12- 4.16

จากรูปที่ 4.12 เป็นการเปรียบเทียบแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ของการดูดซับแก๊สโพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60 min กับตัวดูดซับชนิดคาร์บอนโมเลกุลาสีฟ MSC-5A ของ บริษัทTAKEDA COMPANY ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งตัวดูดซับชนิดถ่านมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 650 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นงานวิจัยของ Nakahara T. และผู้ร่วมงาน[36] จากลักษณะของไอโซเทิร์มที่ได้จะเห็นว่าตัวดูดซับชนิดถ่านจากการทดลองสามารถดูดซับแก๊สโพรเพนได้ดีกว่ากับตัวดูดซับชนิดคาร์บอนโมเลกุลาสีฟ MSC-5A ทั้งๆ ที่ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าใกล้เคียงกัน

ส่วนในรูปที่ 4.13- 4.15 เป็นการเปรียบเทียบแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ของการดูดซับแก๊สโพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60 min กับตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์ NaA, NaX และ NaY ตามลำดับ ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นงานวิจัยของ ยงยุทธ แสนสุพรรณ[37] ได้ศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สมีเทน อีเทน และโพรเพนบน

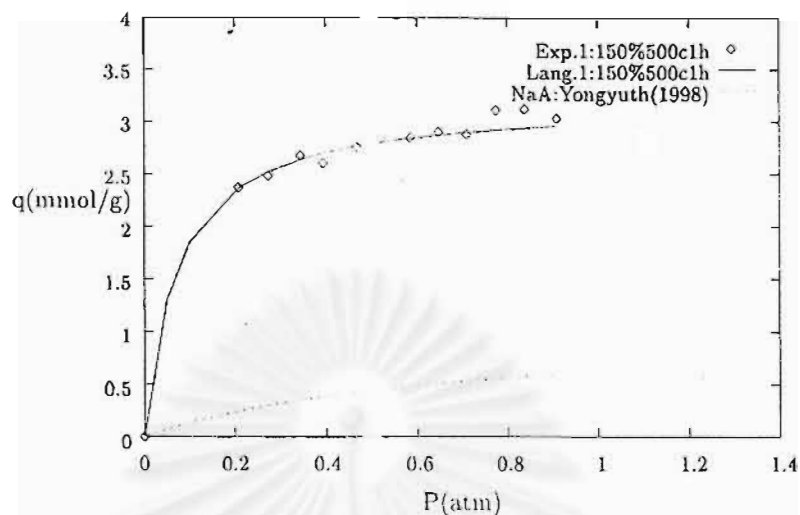
ตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์ โดยตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเป็น 217, 477 และ 777 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สมีเทนบนตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์มีลักษณะเข้าใกล้เส้นตรง ในขณะที่ไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สอีเทนและโพรเพนมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง โดยสอดคล้องกับแบบจำลองสมมูลการดูดซับของแลงเมียร์ และไอโซเทิร์มมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์และ คุณสมบัติการถูกเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าให้เกิดความเป็นขั้วของโมเลกุลของแก๊สไฮโดรคาร์บอนมีมากขึ้น จากลักษณะของไอโซเทิร์มที่ได้จะเห็นว่าตัวดูดซับชนิดถ่านจากการทดลองสามารถดูดซับแก๊สโพรเพนได้ดีกว่ากับตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์ทุกตัวอย่าง ถึงแม้ว่ากรณีของตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์ NaY จะมีพื้นที่ผิวใกล้เคียงกับตัวดูดซับชนิดถ่านที่ได้จากการทดลองก็ตามก็ยังคงดูดซับแก๊สโพรเพนได้ไม่ดี

รูปที่ 4.16 เป็นการเปรียบเทียบแบบจำลองสมมูลการดูดซับของแลงเมียร์ของการดูดซับแก๊สโพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60 min กับตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์ 13X ณ สภาวะอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นงานวิจัยของ Costa E. และผู้ร่วมงาน[12] ได้ศึกษาสมมูลการดูดซับแก๊สเอทิลีน, โพรเพน, โพรพิลีน, คาร์บอนไดออกไซด์ และของผสมของแก๊สดังกล่าว บนตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์ จากลักษณะของไอโซเทิร์มที่ได้จะเห็นว่าตัวดูดซับชนิดถ่านจากการทดลองสามารถดูดซับแก๊สโพรเพนได้ดีกว่ากับตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์ 13X และถ้าทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิเดียวกันตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์ 13X ก็สามารถดูดซับแก๊สโพรเพนได้น้อยกว่าตัวดูดซับชนิดถ่านจากการทดลอง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในการดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง

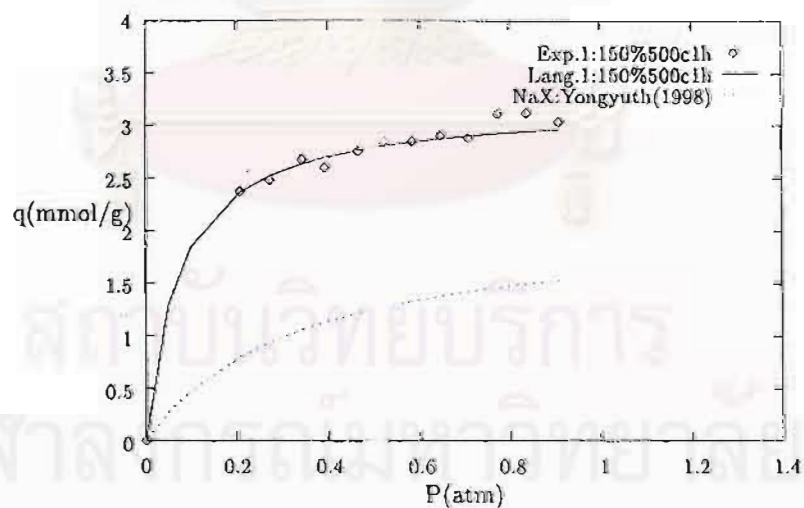


รูปที่ 4.12: แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองสมมูลการดูดซับแก๊สโพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60 min กับตัวดูดซับชนิดคาร์บอนโมเลกุลอาชีพ MSC-5A ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

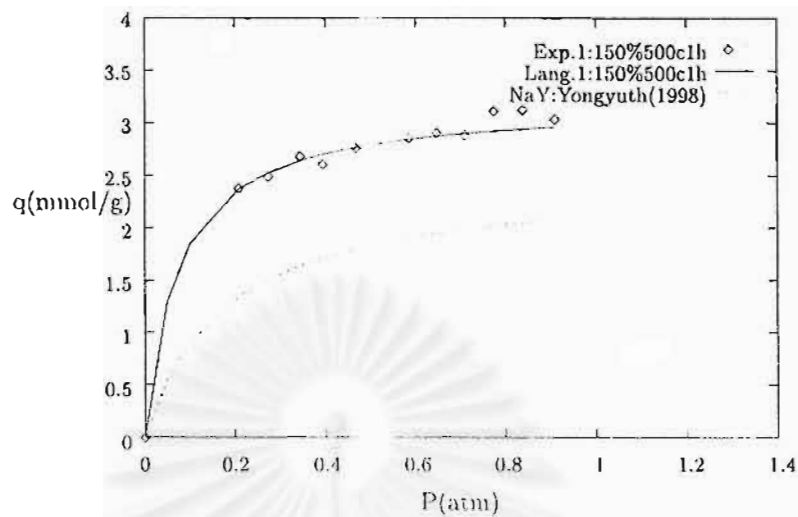




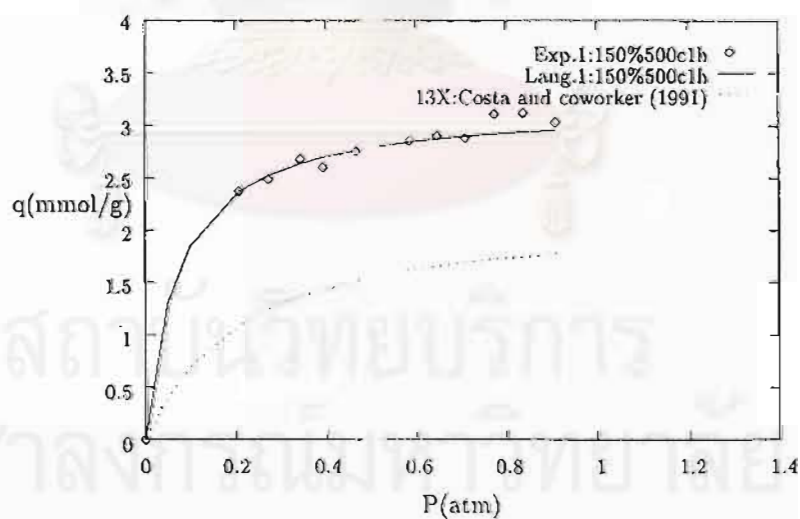
รูปที่ 4.13: แสดงการเปรียบเทียบจำลองสมมูลการดูดซับแก๊สโพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60 min กับตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์ NaA ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.14: แสดงการเปรียบเทียบจำลองสมมูลการดูดซับแก๊สโพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60 min กับตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์ NaX ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.15: แสดงการเปรียบเทียบจำลองสมมูลการดูดซับแก๊สโพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60 min กับตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์ NaY ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.16: แสดงการเปรียบเทียบจำลองสมมูลการดูดซับแก๊สโพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60 min กับตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์ 13X ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

## บทที่ 5

# บทสรุปและข้อเสนอแนะ

### 5.1 บทสรุป

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. กะลามะพร้าวมีลักษณะแข็งและค่อนข้างเหนียวต้องมีการทำให้เป็นถ่านก่อน สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้คือ การเผากะลามะพร้าวที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงในสภาวะที่อับแก๊สออกซิเจน
2. สารละลายซิงก์คลอไรด์มีผลกระทบโดยตรงต่อการทำให้ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิด ถ่านเปลี่ยนแปลงไป จะพบว่าหลังจากที่ใส่สารละลายซิงก์คลอไรด์แล้วนำไปเผาจะให้ค่าของ พื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับกรณี ที่ไม่ได้ใส่สารละลายซิงก์คลอไรด์
3. สารละลายซิงก์คลอไรด์มีฤทธิ์เป็นกรดสามารถในการแตกตัวให้ไฮโดรเจนบวก ถึงแม้ว่าจะมีการแตกตัวน้อยกว่าสารละลายที่เป็นกรดชนิดอื่น แต่สามารถคงสภาพของสารละลายได้เป็น ช่วง เวลานานกว่าสารละลายอื่นๆ ทั้งยังมีลักษณะสมบัติดูดความชื้นได้ดี และก็มีฤทธิ์กัดกร่อน ซึ่งสามารถสลายสารประกอบอินทรีย์ภายในถ่านกะลามะพร้าวได้ เป็นผลให้เมื่อใส่สารละลายซิงก์คลอไรด์ลงไปจึงทำให้ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่านเปลี่ยนแปลงไปในทางที่เพิ่มขึ้น
4. อุณหภูมิที่ใช้ในการเผามีผลกระทบโดยตรงต่อลักษณะสมบัติของตัวดูดซับชนิดถ่าน ทั้งในค่าพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและค่าการดูดซับไอโอดีน เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว ค่าของพื้นที่ผิวและค่าไอโอดีนมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา
5. เวลาที่ใช้ในการเผามีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของตัวดูด ทั้งในค่าของพื้นที่ผิวการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและค่าการดูดซับไอโอดีน เช่นเดียวกับกรณีของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา
6. จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างของพื้นผิวภายนอกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมโดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ทำให้สามารถมองเห็นลักษณะพื้น

ผิว ภายนอกของตัวดูดซับชนิดถ่านได้ ซึ่งในกรณีที่มีการใส่สารละลายซิงก์คลอไรด์จะเห็นได้ชัดเจนว่ามีการกระจายตัวของรูพรุนมากกว่ากรณีที่ไม่ได้ใส่สารละลายซิงก์คลอไรด์

7. ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับชนิดถ่านมีมากขึ้น
8. ไอโซเทิร์มของการดูดซับแก๊สโพรเพนบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมโดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ มีลักษณะใกล้เคียงกันถ้าในกรณีที่พื้นที่ผิวมีค่าใกล้เคียงกัน
9. ค่าคงที่ของแลงเมียร์สำหรับการดูดซับแก๊สโพรเพนของถ่านกะลามะพร้าวและตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมโดยสารละลายซิงก์คลอไรด์ มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆของตัวดูดซับชนิดถ่าน อาจเป็นผลเนื่องมาจากการเตรียมวัตถุดิบชนิดเดียวกัน ที่สภาวะเดียวกัน
10. ปริมาณการดูดซับสูงสุดของตัวดูดซับชนิดถ่านสำหรับการดูดซับแก๊สโพรเพน ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับชนิดถ่าน กล่าวคือจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับชนิดถ่านมีมากขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดลองเตรียมตัวดูดซับชนิดถ่านพบว่า ภายหลังจากการเผาถ่านกะลามะพร้าวที่ผสมกับสารละลายซิงก์คลอไรด์ ของผสมที่ได้มีลักษณะจับตัวกันเป็นก้อนแข็ง แต่เมื่อนำมาแช่น้ำร้อนแล้วก็จะแยกจากกัน แต่ถ้าจะนำมาผลิตในสภาวะกำลังการผลิตสูงๆ อาจทำให้เกิดปัญหาในการผลิตได้
2. ซิงก์คลอไรด์เป็นสารที่มีฤทธิ์ในการกัดกร่อน และไอของซิงก์คลอไรด์อาจจะอันตรายต่อผู้สูดดม จึงควรทำการทดลองในที่ที่มีอากาศระบายผ่านได้ดี ทั้งยังควรมีการป้องกันการกัดกร่อนของอุปกรณ์ จากการทดลองพบว่าซิงก์คลอไรด์ทำให้ชิ้นส่วนของอุปกรณ์ชำรุด เช่น ขดลวดให้ความร้อนของเตา ฝาครอบ เตาเผา เป็นต้น
3. ถ้าในกรณีของการแยกแก๊สผสม ควรมีการทำการศึกษาสมมูลการดูดซับของแก๊สผสม ของแต่ละองค์ประกอบ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# รายการอ้างอิง

1. แก๊สธรรมชาติ *ข่าวกรมวิทยาศาสตร์บริการ* ฉบับที่ 2 (2526).
2. กระบวนการแยกแก๊สธรรมชาติ *วารสารศูนย์วิจัยเทคโนโลยีเพื่อการศึกษา* ปีที่ 11 ฉบับที่ 2 (2530).
3. Lewis F.H. *From Hydrocarbons to Petrochemical* Gulf Publishing Company (1982).
4. Danner R.P. and Chai E.C.F. Mixture Adsorption Equilibria of Ethane and Ethylene on 13X Molecular Sieves, *Ind.Eng.Chem.Fundam.* Vol 17 (1978).
5. T. Victor Lee, J. Chang Huang, D.Rothstein and R. Madey Adsorption of Binary Mixture of Ethane and Acetylene on Activated carbon, *Separation Science and Technology* Vol 19 (1984).
6. T. Victor Lee and R. Madey Adsorption Equilibria for Ethane and Propane Gas Mixtures on Activated Carbon, *Separation Science and Technology* Vol 20 (1985).
7. Hufton I.R. and Danner R.P. Chromatographic Study of Alkanes in Silicalite:Equilibrium Properties, Transport Properties, *AIChE J.* Vol 39 (1993).
8. Schneider P. and Smith J.M. Adsorption Rate Constants from Chromatography, *AIChE J.* Vol 14 (1968).
9. Kerhenbaum L.S. and Kohler M.A. Adsorption in Non-Isobaric Fixed Beds-II.Measurements of Rate of Adsorption, *Chem.Eng.Sci.* Vol 39 (1984).
10. A.Malek and S.Farog Determination of Equilibrium Isotherms Using Dynamic Column Breakthrough and Constant Flow Equilibrium Desorption, *J.Chem.Eng.Data* Vol 41 (1996).
11. E.Costa. J.L. Sotelo, G.Calleja and C. Marron Adsorption of Binary and Ternary Hydrocarbon Gas Mixtures on Activated carbon:Experimental Determination and

Theoretical Prediction of The Ternary Equilibrium Data, *AIChE J.* vol 27 (1981).

12. G.Calleja, E.Costa, A.Jimenez and J.Pau Adsorption Equilibrium of Ethylene, Propane, Propylene, Carbon Dioxide and Their Mixtures on 13X zeolite, *J.Che.Eng.Data* Vol 36 (1991).
13. Harj J. and James R.F. Adsorption Separation of Propylene-Propane Mixtures, *Ind.Eng.Chem.Res.* Vol 32 (1993).
14. เกษตรอุตสาหกรรม *สรุปข่าวธุรกิจ* ปีที่ 23 ฉบับที่ 12 (2532).
15. Mukherjee S. and coworker Effect of Chemical Treatments on The Properties of Activated Charcoal,(1947).
16. อุไรวรรณ ธรรมรัตน์พคุณ การทำถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ *กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการพลังงาน* (2523).
17. สมศักดิ์ ดำรงเลิศ,เลอสรวง เมฆสุด,จงกลณี เลหาวิจิตร,ประจง โภคสวัสดิ์ และรุ่งวิภา โชติรุ่งเรือง การทำถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว *วารสารเคมีวิศวกรรมเทคโนโลยีทางอาหารและเชื้อเพลิง* ฉบับที่ 1 ปีที่ 2 (2523).
18. นเรศ จันทรเทียน, วัชรศักดิ์ ฤกษ์ขุมทรัพย์ และ วิทยา เจนจรัสโชติ *การศึกษาความน่าจะเป็นในการนำเอาตาลโตนดมาทำเป็นถ่านกัมมันต์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย* (2534).
19. พิสุทธิ พันธุ์วิชาติกุล และสมิทธิ รัตนสุทธิพงษ์ *การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตาลโตนดมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย* (2535).
20. บุญชัย ตระกูลมหชัย *การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาโตนดในฟลูอิดไอดีซ์เบด จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย* (2537).
21. มานัด แก้วถาวร *ผลของไซเตียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี* (2537).
22. ดำรง ชุนมงคล และ อภิสิทธิ์ เจริญกุล *การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้เกลือแกงเป็นตัวกระตุ้น วิศวกรรมสาร* เล่มที่ 6 (2533).
23. ทิพย์รัตน์ กฤษฏารักษ์, อ๋ามรงค์ ปาระมีแจ้ และ อัญชลี จันทไช้ *การเตรียมถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ* (2541).
24. เกศรา นุดาลัย, บุญชัย ตระกูลมหชัย, ทศนีย์ เพี้ยจันทัก, กรรณิการ์ สถาปัตานนท์, ศิลปชัย

อรัญยะนาถ,เพิ่มสุข มาทะ และจิตต์ ศรีวรรณวิทย์ การผลิตถ่านกัมมันต์จากพรุในห้วง  
ปฏิบัติการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 4 ฉบับที่ 3 (2531).

25. สุชาติ ไทยเพ็ชร์ การใช้ประโยชน์ดินมะพร้าว *อนุสารไม้ัดบางนา* ปีที่ 17 ฉบับที่ 93 (2531).
26. Hassler J.W. *Activated Carbon* Leonard Hill (1967).
27. R. Bruce Eldridge Olefin/Paraffin Separation Technology: A Review,  
*Ind.Eng.Chem.Res.* vol 32 (1993).
28. Calurla F., Molina Sabio M. and Rodriguez Reinoso F. Preparation of Activated  
Carbon by Chemical Activation with  $ZnCl_2$ , *Carbon* 29 (1991).
29. Ruthven D.M. *Principle of Adsorption and Adsorption Process*, John  
Wiley and Sons Inc.(1984).
30. Yang R.T. *Gas Adsorption by Adsorption Process*. Butterworths (1987).
31. Ruthven D.M. Zeolites as Selective Adsorbent, *Chem. Eng. Progress* (1988).
32. American Water Works Association AWWA *Standard for Granular Carbon  
adsorbent AWWA B604-96* (1996).
33. เกรียงศักดิ์ กิตติพิมาน การดูดซับออกซิเจนและไนโตรเจนด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลา  
มะพร้าวโดยการกระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2542).
34. คณิต กฤษณังกูร และจงจิตร หิรัญลาก การทำถ่านกัมมันต์จากแกลบ *วิทยาศาสตร์* ปีที่ 38  
ฉบับที่ 5-6 (2527).
35. สุภาภรณ์ มั่นไทรทอง การดูดซับไอของโทลูอีนและไซลีนบนถ่านกัมมันต์ซึ่งเตรียมจาก  
ซังข้าวโพดโดยใช้เทคนิคโครมาโตกราฟี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2541).
36. Nakahara T., Hirata M. and Omori T. *J. Chem. Eng. Data* vol 19 (1974).
37. ยงยุทธ แสนสุพรรณ ไอโซเทิร์มการดูดซับของแก๊สไฮโดรคาร์บอนเข้มข้นด้วยซีโอไลต์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2541).



ภาคผนวก



## ภาคผนวก ก

# ตัวอย่างการคำนวณ

### ก. 1 ค่าไอโอดีน

#### ก. 1.1 สารเคมีสำหรับทดสอบค่าไอโอดีน

1. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยนำกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้นร้อยละ 37 โคนน้ำหนัก จำนวน 70 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 550 มิลลิลิตร คนให้ทั่ว
2. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.100 N เตรียมโดยละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ( $Na_2S_2O_3 \cdot H_2O$ ) ในน้ำกลั่นที่ต้มใหม่ๆ ปริมาณ 75 มิลลิลิตร จากนั้นเจือจางให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตร แล้วเทเก็ยใส่ขวดสีชา ก่อนทำการ Standardization เป็นเวลา 4 วัน
3. สารละลายมาตรฐานไอโอดีน 0.100 N เตรียมโดยชั่งไอโอดีน 12.700 กรัม เติมโปแตสเซียมไอโอไดด์ 19.100 กรัม เติมน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์ 2-5 มิลลิลิตร คนให้ละลาย จากนั้นจึงค่อยๆ เติมน้ำกลั่นลงไป อีกทีละน้อย ครั้งละประมาณ 5 มิลลิลิตร แล้วทำให้เจือจางให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตร แล้วเทเก็ยใส่ขวดสีชา
4. สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไอโอเดต 0.100 N เตรียมโดยการอบโปแตสเซียมไอโอเดตให้แห้งอย่างน้อย 4 กรัม เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จากนั้นนำสารที่อบแห้งแล้ว ปริมาณ 3.5667 กรัม นำมาละลายในน้ำกลั่นประมาณ 100 มิลลิลิตร แล้วทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร เก็บไว้ในขวดเก็บสารที่มีจุกปิดมิดชิด
5. น้ำแป้งสุก เตรียมโดยชั่งแป้งประมาณ 1 กรัม เติมน้ำในน้ำเย็นปริมาณ 5-10 มิลลิลิตร ค่อยๆ เติมน้ำกลั่นลงไป 20-30 มิลลิลิตร พร้อมๆ กับกวนตลอดเวลา จากนั้นเจือจางด้วยน้ำกลั่นร้อนๆ ให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร

#### ก. 1.2 การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารเคมีที่เตรียมได้

1. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.100 N
  - ปิเปตสารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไอโอเดต 25 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

- เติมนโปแตสเซียมไอโอไดด์ 2.00 กรัม เขย่าให้ละลายเข้ากันหมด
- บีบเกรตไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก ปริมาณ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวด เขย่าให้เข้ากัน
- ทำการไตเตรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไรโอซัลเฟต จนกระทั่งเห็นสีเหลืองจางๆ จึงเติมน้ำแฉ่งลงไปเล็กน้อยเพื่อเป็นอินดิเคเตอร์ จะเห็นเป็นสารละลายสีน้ำเงินเข้ม ทำการไตเตรต จนได้สารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไรโอซัลเฟตที่ใช้ไป
- ทำการคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไรโอซัลเฟตจากสมการ

$$N_1 = \left( \frac{PR}{S} \right) \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ

- $N_1$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไรโอซัลเฟต (N)  
 $P$  คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไอโอเดต (มิลลิลิตร)  
 $R$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไอโอเดต (N)  
 $S$  คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไรโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)

## 2. สารละลายมาตรฐานไอโอดีน 0.100 N

- บีบสารละลายมาตรฐานไอโอดีน 25 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- ทำการไตเตรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไรโอซัลเฟต จนกระทั่งเห็นสีเหลืองจางๆ จึงเติมน้ำแฉ่งลงไปเล็กน้อยเพื่อเป็นอินดิเคเตอร์ จะเห็นเป็นสารละลายสีน้ำเงินเข้ม ทำการไตเตรต จนได้สารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไรโอซัลเฟตที่ใช้ไป
- ทำการคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอโอดีนจากสมการ

$$N_2 = \left( \frac{SN_1}{I} \right) \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ

- $N_1$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไรโอซัลเฟต (N)  
 $N_2$  คือ ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานไอโอดีน (N)  
 $S$  คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไรโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)  
 $I$  คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานไอโอดีน (มิลลิลิตร)

### ก. 1.3 การหาค่าไอโอดีน

- ชั่งผงตัวดูดซับชนิดถ่านที่ผ่านการอบแห้ง แล้วบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน
- เทผงถ่านลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วเติมนครดไฮโดรคลอริกร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จำนวน 10 มิลลิลิตร เขย่าให้ผงถ่านเปียกทั่ว

- เติมสารละลายมาตรฐานไอโอดีน 0.1 N ลงไป 100 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากันเป็นเวลานาน 15 นาที
- กรองของผสมโดยผ่านกระดาษกรอง เทสารละลาย 20-30 มิลลิลิตร แรกที่กรองได้ทิ้งไป เก็บสารละลายส่วนที่เหลือไว้ แล้วบีบเปิดมา 50 มิลลิลิตร
- ไตเตรตสารละลายนี้กับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 N จนได้สารละลายสีเหลืองเติมน้ำแบ่งลงไปประมาณ 2 มิลลิลิตร แล้วไตเตรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต ต่อ จนสีน้ำเงินของอินดิเคเตอร์จางหายไป
- บันทึกปริมาตรสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ทั้งหมด แล้วคำนวณหาค่าไอโอดีนดังนี้

$$\frac{X}{M} = \frac{A - (2.2BS)}{w} \quad (ก.3)$$

$$C = \frac{N_2 S}{25} \quad (ก.4)$$

$$\text{Iodine number} = \left(\frac{X}{M}\right) \times D \quad (ก.5)$$

เมื่อ

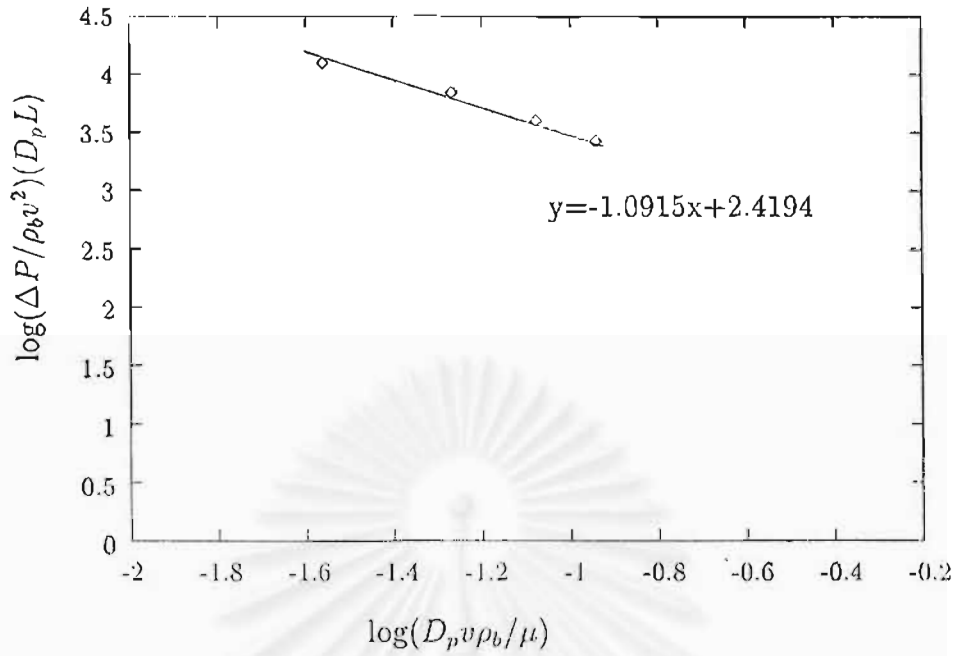
- $\frac{X}{M}$  คือ ปริมาณของไอโอดีนที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม) ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับชนิดถ่าน (กรัม)
- $N_1$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต (N)
- $N_2$  คือ ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานไอโอดีน (N)
- $S$  คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)
- $w$  คือ น้ำหนักของตัวดูดซับชนิดถ่าน (กรัม)
- $A$  คือ  $N_2 \times 12693.0$
- $B$  คือ  $N_1 \times 126.93$
- $C$  คือ นอร์มอลริตี้ของสารที่กรองได้
- $D$  คือ correlation factor

## ก. 2 การหาค่าความพรุนของส่วนที่บรรจุตัวดูดซับและความหนาแน่นของตัวดูดซับชนิดถ่าน

สำหรับความพรุนของส่วนที่บรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน (porosity,  $\epsilon$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ Blake-Kozeny ดังแสดงตามสมการ

$$\log\left(\frac{\Delta P}{\rho_b v^2}\right)\left(\frac{D_p}{L}\right) = -\log\left(\frac{D_p v \rho_b}{\mu}\right) + \log\left(\frac{150(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3}\right) \quad (ก.6)$$

ความพรุนของส่วนที่บรรจุตัวดูดซับชนิดถ่านสามารถหาได้จากจุดตัดแกนของกราฟที่แสดงระหว่าง  $\log(\Delta P / \rho_b v^2) (D_p / L)$  กับ  $\log(D_p v \rho_b / \mu)$



รูปที่ ก.1: แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของการหาค่าความพรุนของส่วนที่บรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 1:1 50% 500c 1h

จากกราฟจุดตัดแกน คือ

$$\log\left(\frac{150(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}\right) = 2.4194$$

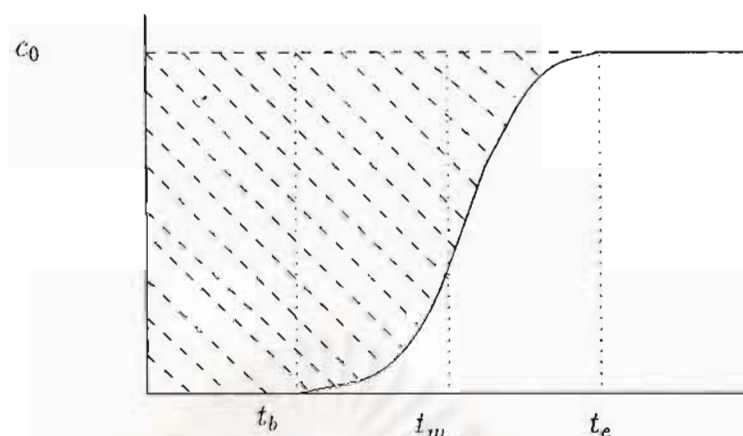
$$\frac{150(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} = 10^{2.4194}$$

$$\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} = 1.7511$$

$$1.7511\varepsilon^3 - 2\varepsilon + 1 = 0$$

$$\varepsilon = 0.51$$

เพราะฉะนั้นจะได้ความพรุนของส่วนที่บรรจุตัวดูดซับชนิดถ่านเป็น 0.51 ส่วนความหนาแน่นของอนุภาคตัวดูดซับชนิดถ่านสามารถคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ ก.2: แสดงเส้นโค้งผ่านทะลุ (breakthrough curve)

$$\begin{aligned}
 1-\varepsilon &= \frac{V_{\text{solid}}}{V_{\text{column}}} \\
 &= \frac{\text{mass } \rho_p}{\pi r^2 L} \\
 1-0.51 &= \frac{0.9615 \rho_p}{(3.14)(0.0032)(0.11)} \\
 \rho_p &= 566.52 \text{ kg/m}^3 \\
 \varepsilon &= 0.51
 \end{aligned}$$

### ก.3 ปริมาณการดูดซับ

ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล ( $q$ ) สำหรับสารป้อนความเข้มข้น  $c_0$  สามารถ คำนวณได้จากเส้นโค้งผ่านทะลุ โดยการคูณมวลสารรอบหอดูดซับ จากรูปที่ ก.1 สารที่ถูกดูดซับไว้จะเริ่มเคลื่อนที่ออกจากหอดูดซับ ที่เวลา  $t_b$  และความเข้มข้นของสารถูกดูดซับจะเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งเท่ากับ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับนั้น แก๊สผสมที่ไหลเข้าหอดูดซับ ที่เวลา  $t_e$  ในขณะนั้น ปริมาณของ สารถูกดูดซับที่ถูกดูดซับไว้จะสมดุลกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับนั้นในวัฏภาคแก๊ส ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ ความเข้มข้นที่ไหลเข้าสู่หอดูดซับ

จากเส้นโค้งผ่านทะลุ พิจารณาการคูณมวลสารรอบหอดูดซับ ปริมาณการดูดซับคำนวณได้จาก ผลต่างของปริมาณสารทั้งหมดที่ป้อนเข้า กับปริมาณสารทั้งหมดที่ไหลผ่านออกจากหอดูดซับ และปริมาณสารทั้งหมดที่สะสมในระบบ ซึ่งเทียบเท่ากับพื้นที่ที่แรเงาดังรูปที่ ก.1 สามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

จำนวนโมลที่เข้า จำนวนโมลที่ออก จำนวนโมลสะสม

$$Qt_c c_o - Q(t_c - t_m) c_o = A_c L (\varepsilon c_o + (1 - \varepsilon) \rho_s q) \quad (\text{ก.7})$$

ดังนั้น

$$M = Qt_m c_o = A_c L (\varepsilon c_o + (1 - \varepsilon) \rho_s q) \quad (\text{ก.8})$$

โดย  $t_m$  คือเวลาเฉลี่ยที่สารถูกดูดซับอยู่ในหอดูดซับ  $M$  คือสารถูกดูดซับที่สะสมอยู่ในหอดูดซับ ซึ่งเทียบเท่ากับพื้นที่ที่แข็งแรง

สำหรับการดูดซับแก๊สโพรเพนเข้มข้นร้อยละ 14.985 โดยปริมาตร ที่ไหลผ่านคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับ ชนิดถ่านที่เตรียมจากถ่านกะลามะพร้าวต่อซิงก์คลอไรด์ในรูป ของแข็งด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 1 ซึ่งให้ความเข้มข้นของสารละลายซิงก์คลอไรด์เป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เมาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากสภาวะของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 50 องศาเซลเซียส

- ความยาวของส่วนบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน (เมตร) = 0.11
- พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ (ตารางเมตร) =  $3.168 \times 10^{-5}$
- น้ำหนักของตัวดูดซับชนิดถ่าน (กรัม) = 0.9615
- ความหนาแน่นของตัวดูดซับชนิดถ่าน (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) = 0.00056652
- อุณหภูมิของคอลัมน์ (เคลวิน) = 323
- ความพรุนของส่วนบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน = 0.431
- ความดันของระบบ (บรรยากาศ) = 1.387
- ความเข้มข้นของสารป้อน (โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)  $c_o = \frac{P_i}{RT}$ 
  - :  $P_i = P \times y_i = 1.387 \times 0.14985 = 0.2078$  บรรยากาศ
  - : ความเข้มข้นของแก๊สโพรเพนในถังแก๊ส = 99.9%
  - :  $R = 82.06$  ลูกบาศก์เซนติเมตร บรรยากาศ / โมล เคลลิล ,  $T = 323$  เคลลิล

ดังนั้น

$$c_o = \left( \frac{0.2078}{82.06 \times 323} \right) \times 0.999 = 7.833 \times 10^{-6}$$

- อัตราการไหลเชิงปริมาตร (มิลลิลิตรต่อนาที) = 99.206
- พื้นที่ที่แข็งแรงจากการอินทิเกรตพื้นที่บนเส้นโค้งผ่านทะลุที่ได้จากการทดลอง = 2.956 นาที

ดังนั้น ปริมาณสารถูกดูดซับที่สะสมอยู่ในหอดูดซับ (โมล) จะได้

$$M = 99.206 \times 7.833 \times 10^{-6} \times 2.956 = 0.0023$$

แทนค่าต่างๆ ในสมการ ก.1 จะได้

$$q = 2.377 \text{ โมลต่อกิโลกรัม หรือ มิลลิโมลต่อกรัม}$$

ก. 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่สมดุลแลงเมียร์ สำหรับกรณีพิจารณาการดูดซับต่อมวล และต่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับชนิดถ่าน

กำหนดให้  $A$  = พื้นที่ผิวต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน ( $m^2/g$ )

1. กรณีพิจารณาปริมาณการดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน,  $q$  [ $= mmol/g$ ] จากแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์

$$\frac{q}{q_s} = \frac{K_L P}{1 + K_L P} \quad (ก.9)$$

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_s} + \frac{1}{K_L \cdot q_s} \left( \frac{1}{P} \right) \quad (ก.10)$$

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{q} - \frac{1}{q_s} K_L \cdot q_s \quad (ก.11)$$

2. กรณีพิจารณาปริมาณการดูดซับต่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับชนิดถ่าน,  $\frac{q}{A}$  [ $= mmol/m^2$ ] จากแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ จะได้

$$\frac{q/A}{q_s/A} = \frac{K_{LA} P}{1 + K_{LA} P} \quad (ก.12)$$

$$\frac{1}{q/A} = \frac{1}{q_s/A} + \frac{1}{K_{LA} \cdot q_s/A} \left( \frac{1}{P} \right) \quad (ก.13)$$

แทนค่าสมการ จะได้

$$\frac{1}{q/A} = \frac{1}{q_s/A} + \frac{1}{K_{LA} \cdot q_s/A} \left( \frac{1}{q} - \frac{1}{q_s} \right) K_L \cdot q_s \quad (ก.14)$$

$$\left( \frac{1}{q/A} - \frac{1}{q_s/A} \right) = \frac{K_L}{K_{LA}} \left( \frac{1}{q/A} - \frac{1}{q_s/A} \right) \quad (ก.15)$$

$$K_{LA} = K_L \quad (ก.16)$$

## ภาคผนวก ข

# ปริมาณการดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับ ชนิดถ่าน

ข้อมูลสมมูลแสดงปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน ณ สภาวะ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ ข.1: ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่านกะลา

c (%V/V)	P (atm)	q (mmol/g)
14.93	0.21	0.17
20.50	0.28	0.18
25.16	0.33	0.22
30.39	0.40	0.18
35.14	0.45	0.24
40.69	0.53	0.24
44.90	0.58	0.21
49.97	0.65	0.24
54.89	0.71	0.28
60.38	0.75	0.25
65.05	0.81	0.33
70.19	0.87	0.21



ตารางที่ ข.2: ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่านกะลาอย่างเดี่ยว

c (%V/V)	P (atm)	q (mmol/g)
15.07	0.21	0.45
20.09	0.28	0.37
25.03	0.34	0.43
29.75	0.40	0.53
35.03	0.46	0.45
39.66	0.52	0.50
45.22	0.60	0.57
49.85	0.65	0.50
54.98	0.71	0.49
60.01	0.78	0.63
64.96	0.84	0.43
70.27	0.91	0.52

ตารางที่ ข.3: ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่านผสมน้ำ

c (%V/V)	P (atm)	q (mmol/g)
14.92	0.27	0.48
20.04	0.28	0.48
25.07	0.34	0.44
30.12	0.40	0.58
34.77	0.46	0.60
39.67	0.52	0.57
45.31	0.60	0.50
49.97	0.65	0.71
55.21	0.71	0.59
60.04	0.78	0.51
65.23	0.84	0.59
70.26	0.90	0.66

ตารางที่ ข.4: ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 30% 500c 60min

c (%V/V)	P (atm)	q (mmol/g)
14.94	0.21	1.76
19.95	0.28	2.29
25.01	0.34	1.91
30.02	0.41	2.03
35.06	0.48	2.89
40.01	0.53	2.07
44.05	0.59	2.06
49.90	0.64	2.00
55.13	0.71	2.00
60.02	0.78	2.12
64.98	0.84	2.23
70.00	0.90	2.08

ตารางที่ ข.5: ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 40% 500c 60min

c (%V/V)	P (atm)	q (mmol/g)
15.04	0.21	1.87
20.10	0.28	2.01
24.91	0.34	2.15
30.10	0.34	2.12
35.03	0.46	2.16
40.06	0.53	2.28
45.01	0.58	2.33
50.13	0.65	2.22
55.15	0.71	2.26
59.98	0.77	2.34
64.99	0.84	2.33
70.18	0.91	2.49

ตารางที่ ข.6: ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60min

c (%V/V)	P (atm)	q (mmol/g)
14.99	0.21	2.38
20.10	0.27	2.49
25.26	0.34	2.68
29.82	0.40	2.61
35.39	0.47	2.76
40.33	0.52	2.84
45.34	0.59	2.85
50.10	0.65	2.91
54.95	0.71	2.89
60.02	0.78	3.11
65.05	0.84	3.13
70.51	0.91	3.04

ตารางที่ ข.7: ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 60% 500c 60min

c (%V/V)	P (atm)	q (mmol/g)
14.84	0.21	2.17
20.05	0.27	2.08
24.75	0.34	2.33
29.99	0.40	2.36
35.09	0.46	2.38
40.23	0.53	2.38
45.28	0.58	2.40
50.56	0.65	2.33
54.87	0.71	2.47
60.04	0.76	2.55
64.96	0.84	2.46
70.34	0.91	2.38

ตารางที่ ข.8: ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 300c 60min

c (%V/V)	P (atm)	q (mmol/g)
14.97	0.21	0.24
20.09	0.28	0.24
25.15	0.34	0.33
29.87	0.41	0.23
35.18	0.48	0.26
40.11	0.53	0.31
45.48	0.60	0.27
49.65	0.64	0.32
55.05	0.71	0.36
59.99	0.77	0.30
65.05	0.84	0.26
70.32	0.91	0.43

ตารางที่ ข.9: ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 400c 60min

c (%V/V)	P (atm)	q (mmol/g)
15.05	0.21	0.43
19.82	0.28	0.44
24.69	0.34	0.45
29.91	0.40	0.37
35.13	0.46	0.48
39.92	0.53	0.49
45.03	0.59	0.43
50.03	0.65	0.47
54.97	0.71	0.59
60.17	0.78	0.46
64.96	0.84	0.61
70.29	0.91	0.57

ตารางที่ ข.10: ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 450c 60min

c (%V/V)	P (atm)	q (mmol/g)
15.05	0.21	0.81
20.08	0.27	0.84
24.99	0.34	0.82
29.76	0.41	0.90
35.20	0.46	0.95
40.13	0.53	0.92
44.18	0.58	0.95
49.98	0.65	0.90
54.93	0.71	0.95
59.94	0.77	0.97
65.09	0.84	1.13
70.21	0.91	0.71

ตารางที่ ข.11: ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 475c 60min

c (%V/V)	P (atm)	q (mmol/g)
14.94	0.21	1.66
19.96	0.27	1.63
25.01	0.34	1.68
30.00	0.41	1.56
35.13	0.46	1.80
40.16	0.53	1.73
44.94	0.59	1.65
50.02	0.65	1.73
54.89	0.71	1.76
60.01	0.77	1.59
64.87	0.84	1.79
70.16	0.91	2.00

ตารางที่ ข.12: ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 600c 60min

c (%V/V)	P (atm)	q (mmol/g)
14.94	0.21	2.22
19.95	0.27	2.23
25.19	0.34	2.41
29.91	0.39	2.34
35.21	0.46	2.35
40.26	0.53	2.29
45.11	0.60	2.41
50.13	0.65	2.48
54.97	0.71	2.55
60.07	0.78	2.37
65.05	0.84	2.63
70.29	0.91	2.68

ตารางที่ ข.13: ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 15min

c (%V/V)	P (atm)	q (mmol/g)
15.02	0.21	0.93
19.97	0.27	1.32
25.03	0.34	1.06
30.21	0.39	1.19
35.12	0.46	1.27
40.03	0.53	1.19
45.11	0.58	1.17
50.07	0.65	1.15
54.88	0.71	1.06
60.18	0.78	0.89
65.02	0.84	1.28
70.03	0.90	1.12

ตารางที่ ข.14: ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 30min

c (%V/V)	P (atm)	q (mmol/g)
15.04	0.21	1.28
19.97	0.28	1.39
24.87	0.39	1.53
29.83	0.41	1.56
35.05	0.46	1.50
40.03	0.53	1.48
45.10	0.58	1.48
49.97	0.65	1.30
55.11	0.71	1.60
60.05	0.78	1.45
65.09	0.84	1.40
70.23	0.91	1.71

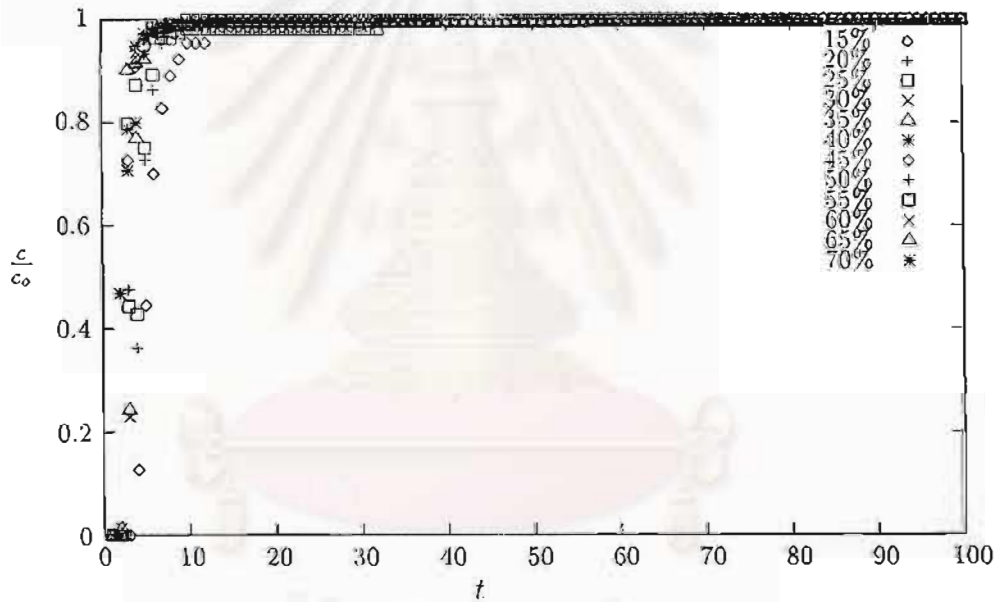
ตารางที่ ข.15: ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อมวลของตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 45min

c (%V/V)	P (atm)	q (mmol/g)
14.87	0.21	1.56
19.85	0.28	1.73
25.04	0.34	1.68
29.99	0.40	1.58
35.13	0.46	1.92
39.88	0.53	1.91
45.03	0.58	1.76
50.00	0.65	1.69
55.03	0.71	1.91
59.92	0.77	1.74
64.87	0.84	1.84
70.29	0.91	1.96

## ภาคผนวก ค

# เส้นโค้งผ่านทะเล

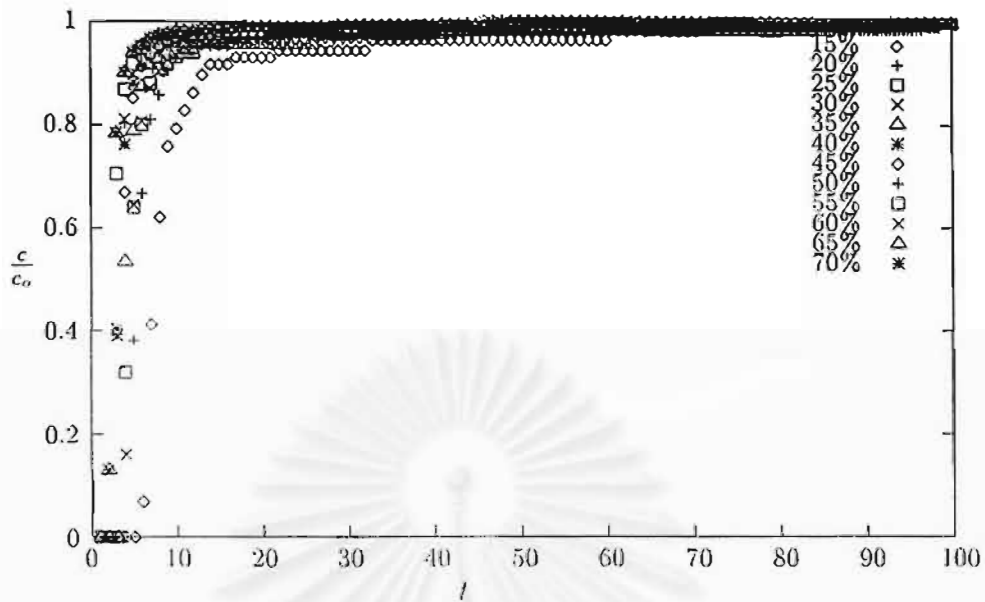
เส้นโค้งผ่านทะเลโคลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดต่างชนิดกันที่เตรียมได้จากการทดลอง ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แสดงดังต่อไปนี้



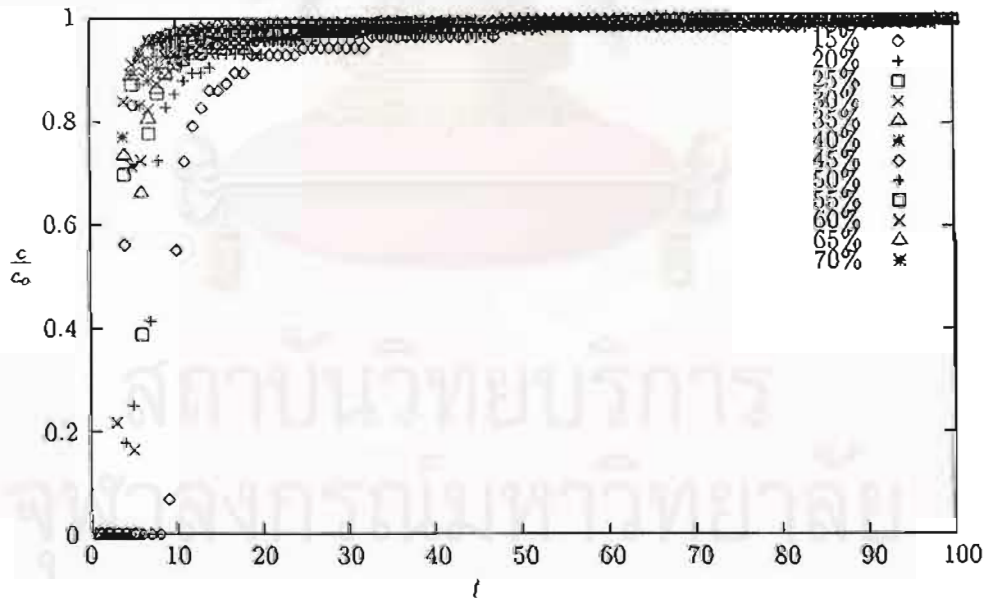
รูปที่ ค.1: เส้นโค้งผ่านทะเลโคลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดต่างชนิดกันที่เตรียมได้จากการทดลอง ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

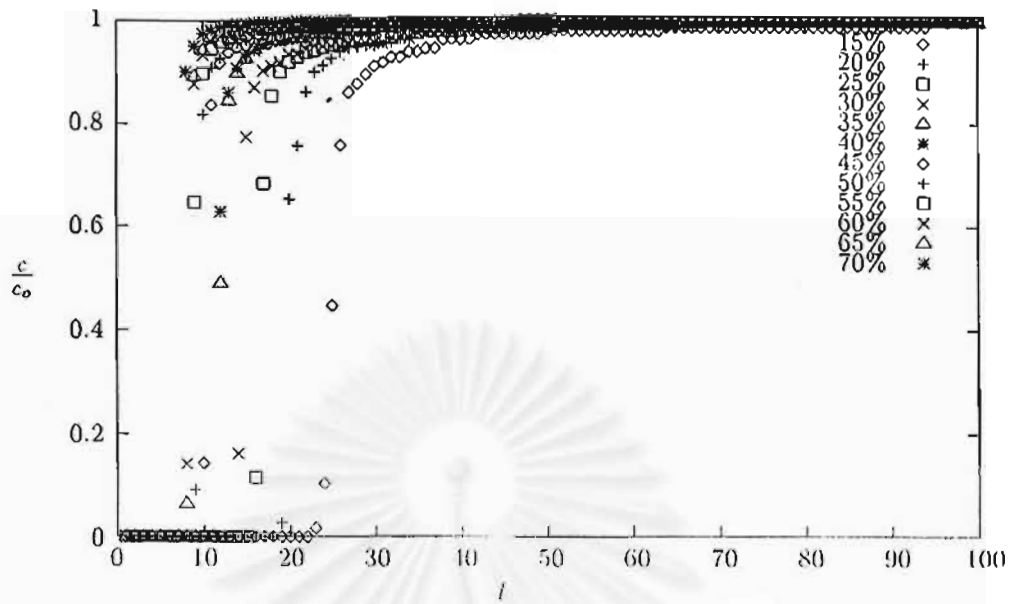




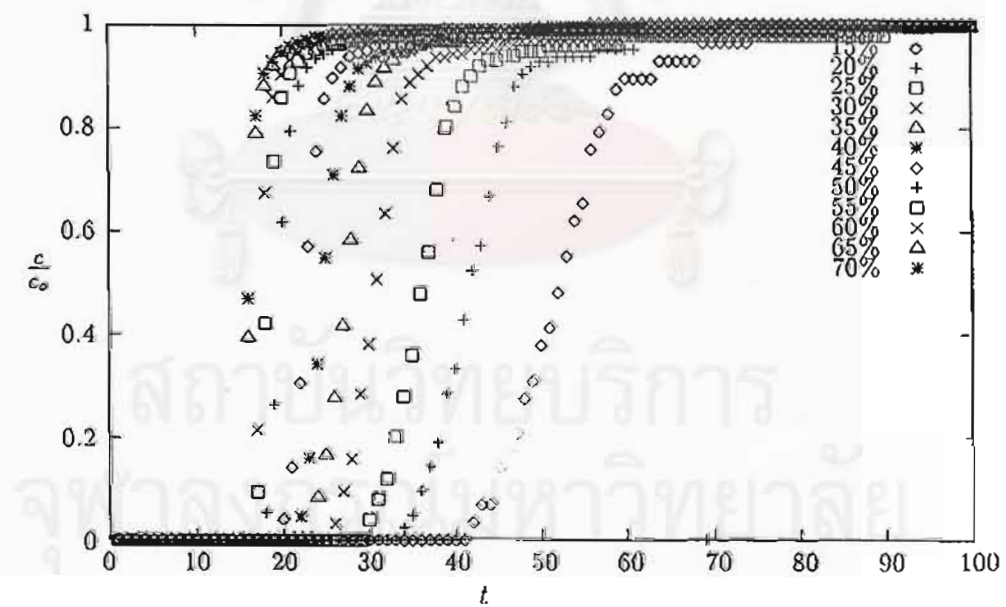
รูปที่ ค.2: เส้นโค้งผ่านทะเลโคลมันน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดกึ่งนำกลายอย่างเดียว ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



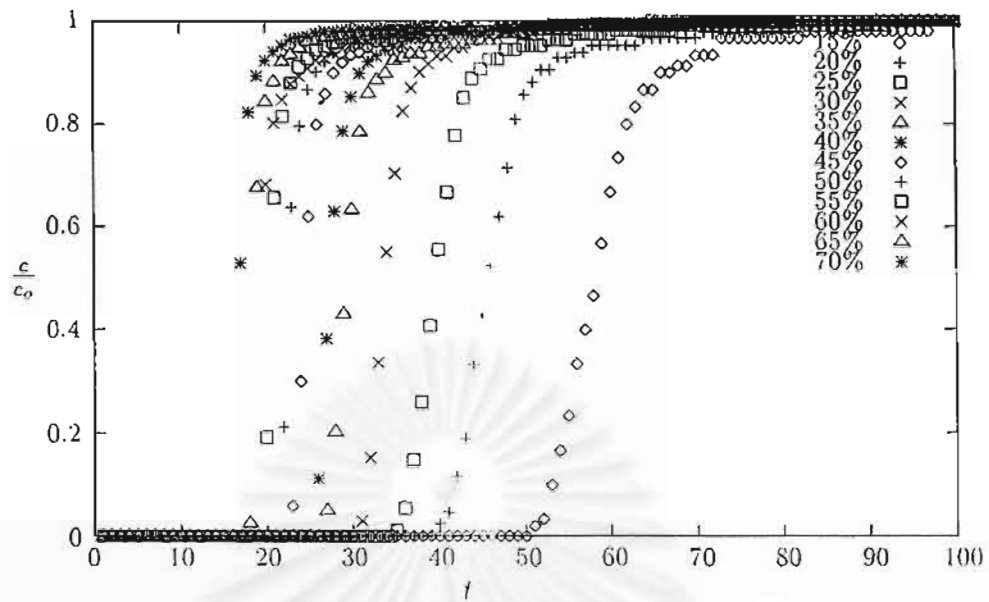
รูปที่ ค.3: เส้นโค้งผ่านทะเลโคลมันน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดนำกลายสมน้ำ ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



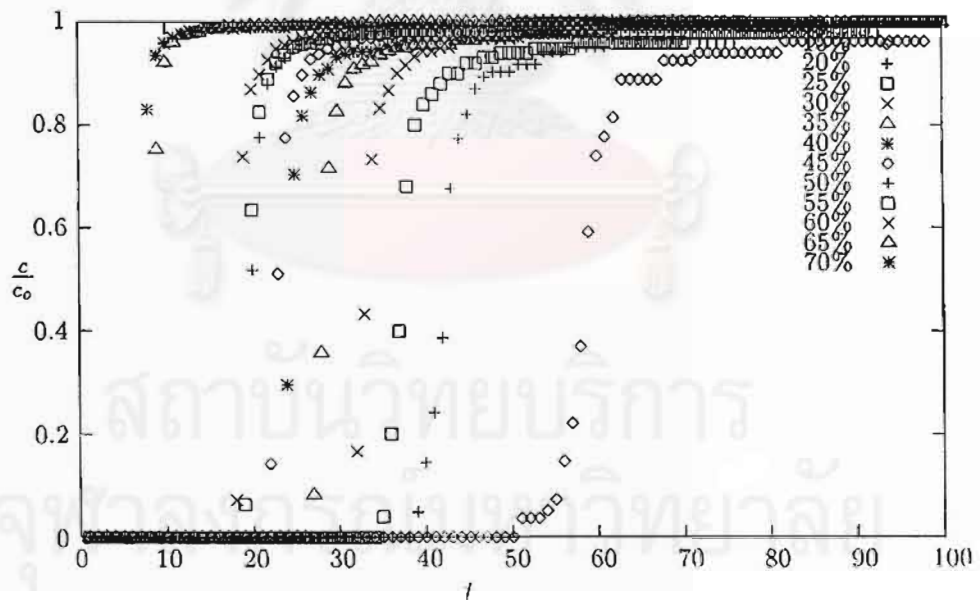
รูปที่ ค.4: เส้นโค้งผ่านทะเลโคลล์มันซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 30% 500c 60min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



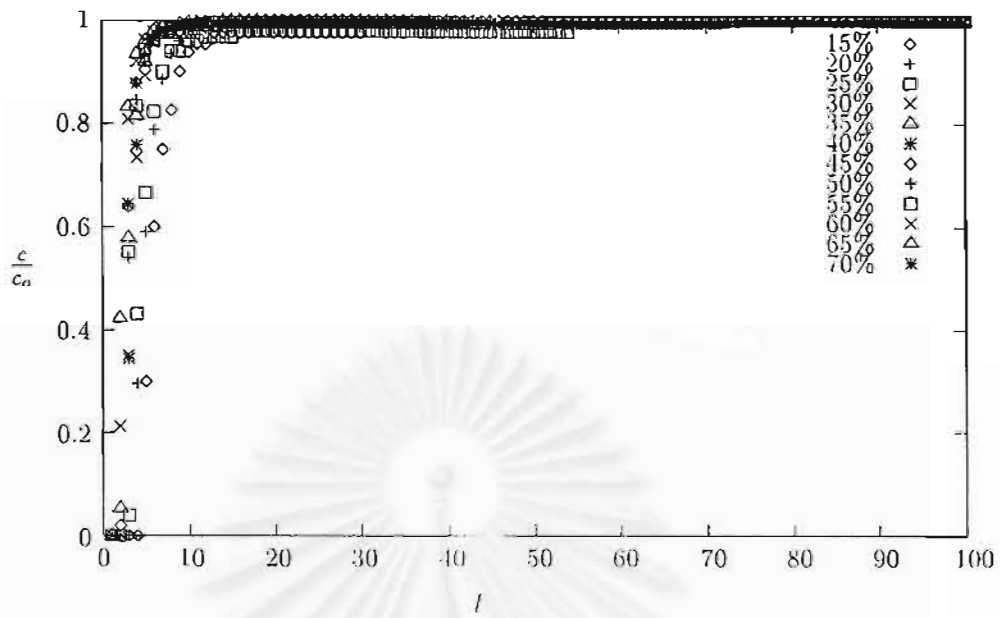
รูปที่ ค.5: เส้นโค้งผ่านทะเลโคลล์มันซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 40% 500c 60min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



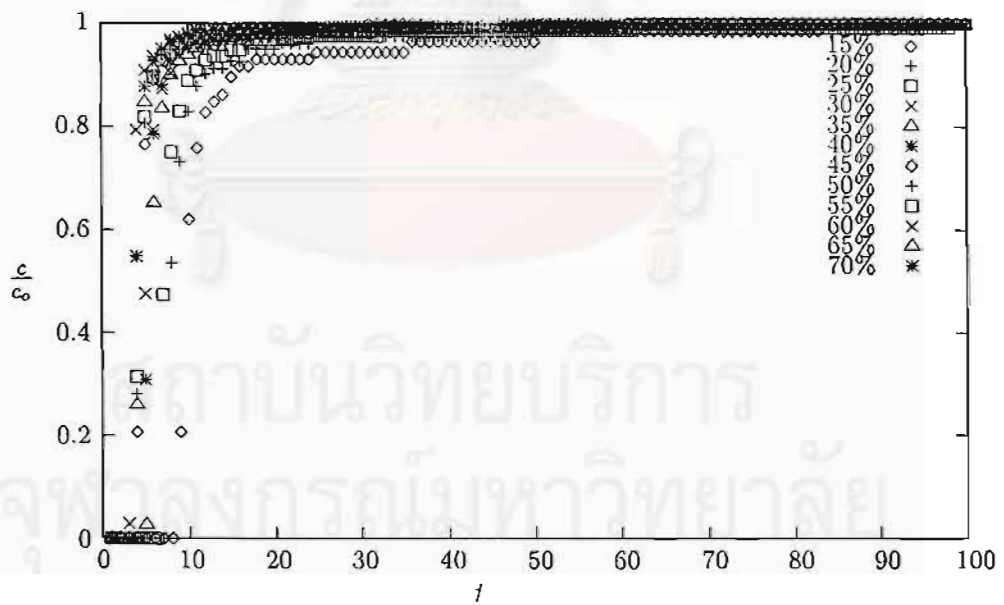
รูปที่ ค.6: เส้นโค้งผ่านทะลุคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 60min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



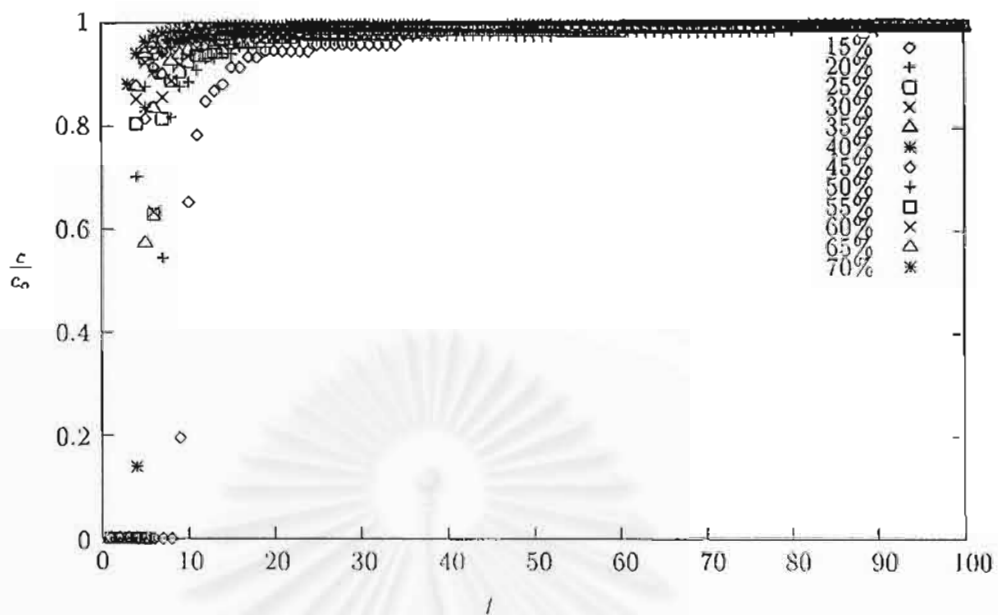
รูปที่ ค.7: เส้นโค้งผ่านทะลุคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 60% 500c 60min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



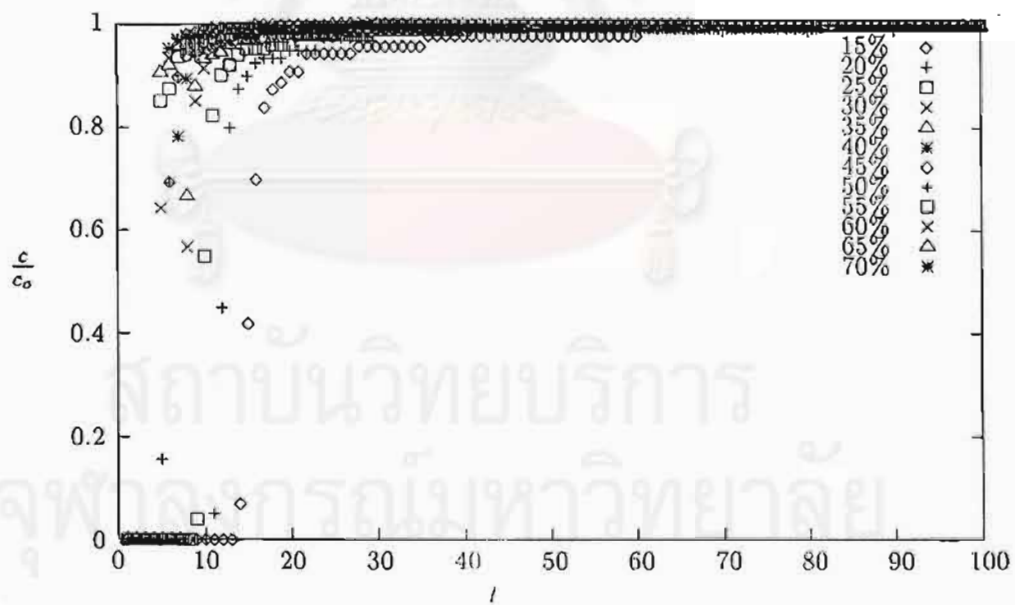
รูปที่ ค.8: เส้นโค้งผ่านทะเลโคล์มันน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 300c 60min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



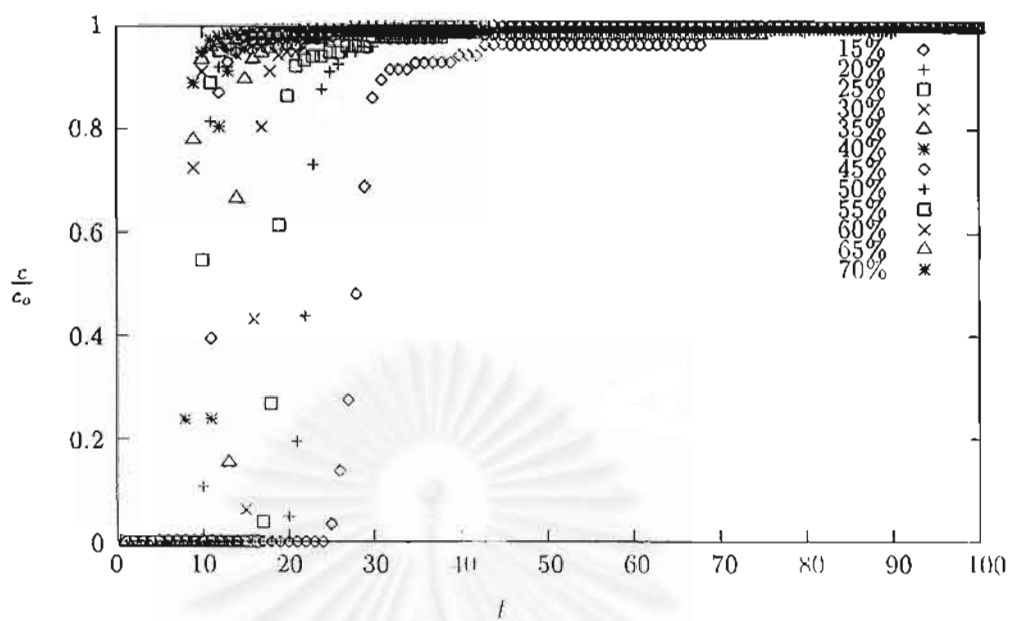
รูปที่ ค.9: เส้นโค้งผ่านทะเลโคล์มันน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 400c 60min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



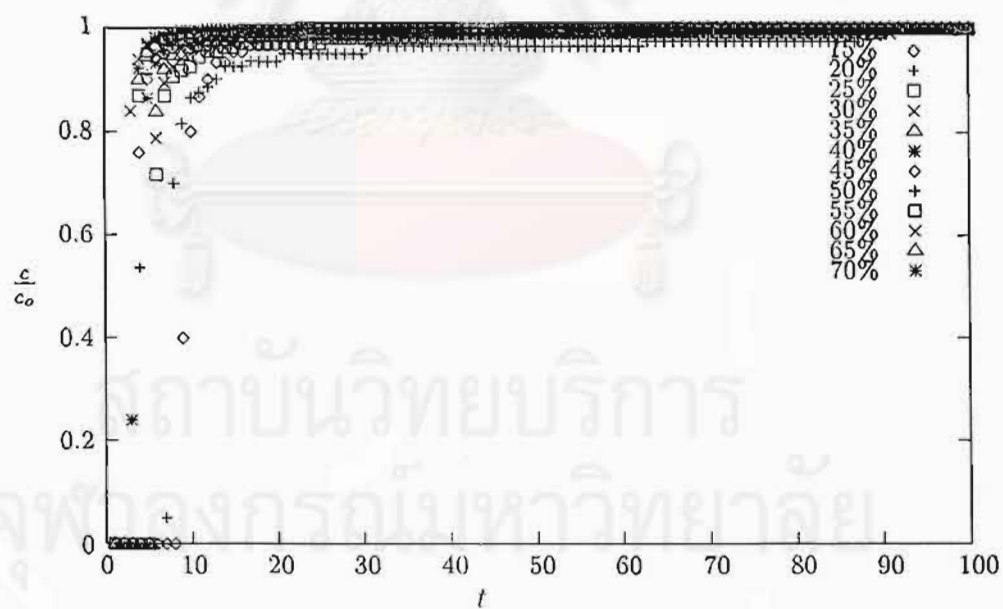
รูปที่ ค.10: เส้นโค้งผ่านทะเลโคลล์มันน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 450c 60min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



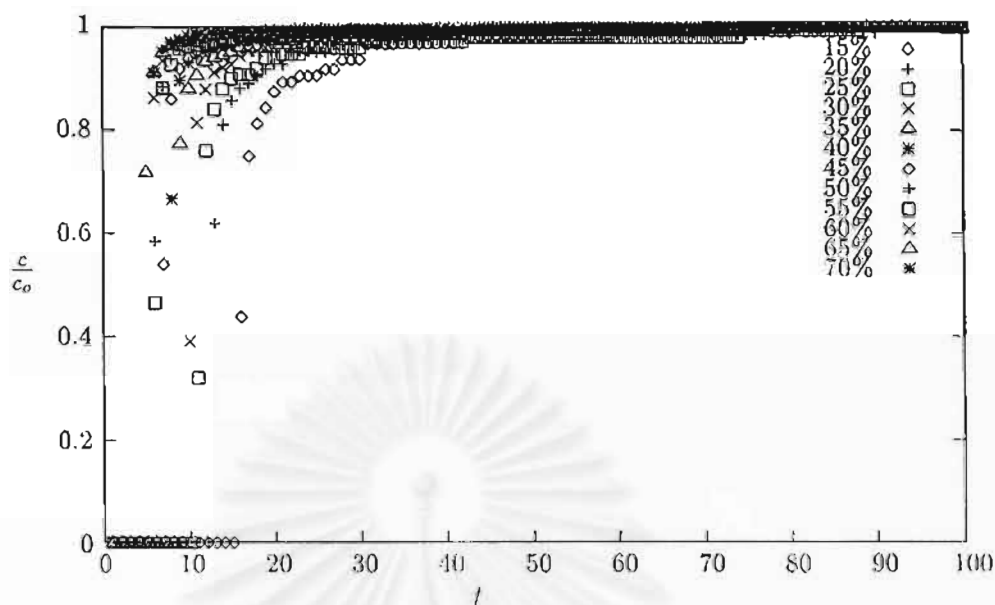
รูปที่ ค.11: เส้นโค้งผ่านทะเลโคลล์มันน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 475c 60min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



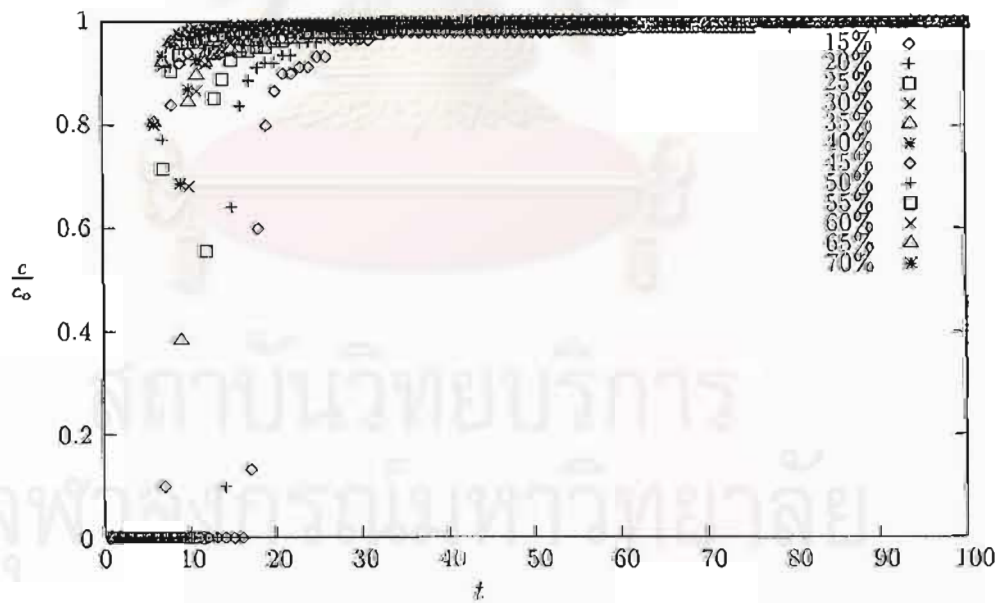
รูปที่ ค.12: เส้นโค้งผ่านทะเลโคลล์มันนี่ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 600c 60min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ ค.13: เส้นโค้งผ่านทะเลโคลล์มันนี่ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 15min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ ค.14: เส้นโค้งผ่านทะเลโคลมันน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 30min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ ค.15: เส้นโค้งผ่านทะเลโคลมันน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่าน 50% 500c 45min ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

# ประวัติผู้เขียน

นางสาวกฤติยา เลือสินาค เกิดในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2518 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จ  
การศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสุรศักดิ์มนตรี ในปีการศึกษา 2535 และสำเร็จการ  
ศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ในปีการศึกษา 2539 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย