

การดูดซับซัลเฟอร์ไดออกไซด์บนถ่านกัมมันต์อิมเพรกเนตด้วยคอสติก



นางสาวสุธีรา สมนิยมไชย

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6616-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADSORPTION OF SULPHUR DIOXIDE ON CAUSTIC IMPREGNATED ACTIVATED CARBON



Miss Suteera Somniyomchai

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6616-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การดูดซับซัลเฟอร์ไดออกไซด์บนถ่านกัมมันต์อิมเพกเมนต์ด้วยคอสติก

โดย

นางสาวสุธีรา สมนิยมไชย

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตตานต์

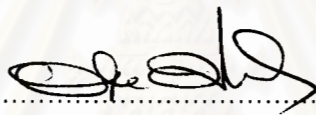
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณะบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมณะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



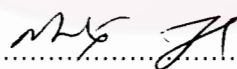
..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)



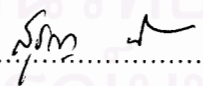
..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตตานต์)



..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชญา นิติวฒนานนท์)

สุธีรา สมนิยมไชย : การดูดซับซัลเฟอร์ไดออกไซด์บนถ่านกัมมันต์อิมเพรกเนตด้วยคอสติก
(ADSORPTION OF SULPHUR DIOXIDE ON CAUSTIC IMPREGNATED ACTIVATED
CABON) อาจารย์ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตรสานต์, จำนวน 96 หน้า. ISBN
974-17-6616-5.

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับที่เตรียมโดยอิทธิพลของ
ต่างบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ การทดลองการดูดซับทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง
กลางขนาด 1.5 และ 3.75 เซนติเมตร ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวดูดซับพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่
บริสุทธิ์ที่มีพื้นที่ผิว 772 ตารางเมตร/กรัม จะมีพื้นที่ผิวดลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณต่างที่ร้อยละสูงขึ้น
แสดงถึงการแทรกตัวของอนุภาคของต่างเข้าไปในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ตัวแปรของการดูดซับซัลเฟอร์ได
ออกไซด์ในเบดที่มีตัวดูดซับ 1 กรัม คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเบด ชนิดของต่าง (KOH, NaOH,
and KI) เปอร์เซ็นต์ของต่างบนถ่านกัมมันต์ และอัตราการไหลของแก๊สผสมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ภาวะ
การทดลองที่เหมาะสมพบว่า ที่เบดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ขนาดอนุภาคของตัวดูดซับ
ระหว่าง 1.18 – 2.00 มิลลิเมตร 3 เปอร์เซ็นต์ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนถ่านกัมมันต์ และอัตรา
การไหลของแก๊สผสมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ 300 มิลลิลิตรต่อนาทีให้ค่าเวลาทะลุผ่านนานที่สุดที่ 30
นาทีและให้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ 0.106 กรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ ผล
การวิเคราะห์ตัวดูดซับที่ทดลองแล้วด้วยฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ พบหมู่ซัลเฟตอยู่
ในองค์ประกอบของตัวดูดซับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4672451923: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: ADSORPTION /ACTIVATED CARBON/ BREAKTHROUGH TIME

SUTEERA SOMNIYOMCHAI: ADSORPTION OF SULPHUR DIOXIDE ON CAUSTIC
 IMPREGNATED ACTIVATED CARBON. THESIS ADVISOR: ASSOC.
 PROF.THARAPONG VITIDSANT, Ph.D.96 pp. ISBN 974-17-6616-5.

This research studied the adsorption of sulphur dioxide on adsorbent, which was prepared by impregnation of caustics on activated carbon. The experiment was performed in two fixed beds of 1.5 and 3.75 cm. Diameter. The surface area analysis of prepared adsorbents showed that the surface area of pure activated carbon, $772 \text{ m}^2/\text{g}$ decreased with the increasing of percentage loading of caustics. It expressed the penetration of caustics through the pore of activated carbon. The parameters of sulphur dioxide adsorption were investigated. They were bed diameter, particle size of adsorbent, type of caustics (KOH, NaOH and KI), percentage loading of caustics and flow rate of sulphur dioxide gas mixture. The optimum condition was 1.5 cm of bed diameter, 1.18-2.00 mm of adsorbent diameter, 3% loading of potassium hydroxide and 300 ml/min flow rate of sulphur dioxide gas mixture. This condition expressed the highest adsorption capacity at 0.106 g. $\text{SO}_2/\text{g.adsorbent}$. Moreover, breakthrough time of potassium hydroxide is more than one of sodium hydroxide and potassium iodide. Functional group of used adsorbent after sulphur dioxide adsorption was analyzed by FT-IR spectrum, which showed strong peak of sulphate.

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Chemical Technology

Student's signature.....

Field of study Chemical Technology

Advisor's signature.....

Academic year 2004

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาซึ่งได้กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆในงานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชญา นิติวฒนานนท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความสนใจ พร้อมให้คำแนะนำต่องานวิจัยฉบับนี้ รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ให้การอบรมสั่งสอนด้านวิชาการตลอดมา

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการซ่อมและสร้างเครื่องมือ และอำนวยความสะดวกต่อสิ่งต่างๆในห้องปฏิบัติการ และที่ขาดไม่ได้คือ กำลังใจจากเพื่อนๆพี่และน้องๆในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกคนที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือข้าพเจ้ามาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนในด้านทุนการศึกษาด้วยดีเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อวิทยานิพนธ์	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	4
2.1.1 สมบัติทางกายภาพของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์	4
2.1.2 ผลกระทบของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์	5
2.2 การกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้.....	5
2.3 การดูดซับ (Adsorption)	7
2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	9
2.5 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	9
2.6 ตัวรองรับ (Support)	12
2.7 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)	13
2.8 การศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์.....	29
2.9 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
3. วิธีดำเนินการวิจัย.....	35
3.1 รูปแบบการศึกษา	35
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	35
3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	35
3.4 วัสดุดิบ	36
3.5 ขั้นตอนการวิจัย	36
3.5.1 การวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับ.....	36
3.5.2 การเตรียมตัวดูดซับ.....	36

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.5.3 การดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบเบตนิ่ง	36
3.5.4 การทดสอบสมบัติเฉพาะตัว	39
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	41
4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับ	41
4.1.1 การหาพื้นที่ผิวโดยเทคนิคการดูดซับแก๊ส (BET method)	41
4.1.2 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของคอสติก และองค์ประกอบบนถ่านกัมมันต์	41
4.2 อิทธิพลของปริมาณคอสติกที่มีต่อตัวดูดซับ	42
4.2.1 วิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ	42
4.2.2 วิเคราะห์ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของตัวดูดซับ	44
4.3 ผลการศึกษาการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์	44
4.3.1 การศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง ..	45
4.3.2 การศึกษาขนาดอนุภาคถ่านกัมมันต์	47
4.3.3 การศึกษาชนิดของคอสติกและความเข้มข้นของคอสติก ที่อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์	49
4.3.3.1. การศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์	50
4.3.3.2. การศึกษาความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์	53
4.3.3.3 ผลการศึกษาความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอโอไดด์ อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์	56
4.3.4 การเปรียบเทียบชนิดของคอสติกที่อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์	58
4.3.5 ผลการศึกษาอัตราการไหลของแก๊สผสม	60
4.3.6 การเปรียบเทียบ 5% KI(เตรียมในห้องทดลอง) 5% KI (ใช้ทางการค้า)	62

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.4 การวิเคราะห์ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ใน ตัวดูดซับก่อนและหลังการทดลอง.....	64
4.4.1 การวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟอร์บนถ่านกัมมันต์โดยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF)	64
4.4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ที่อิมเพรกเนต ด้วยคอสติค.....	65
4.5 เปรียบเทียบงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน.....	66
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	67
รายการอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก.....	73
ภาคผนวก ก	73
ภาคผนวก ข	74
ภาคผนวก ค.....	80
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	96

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ตารางแสดงค่าคงที่ทางกายภาพของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	4
2.2 การนำถ่านกัมมันต์ไปประยุกต์ใช้ในระบบต่าง.....	26
4.1 ผลการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์ที่อิมเพรกเนต ด้วยคอสติคด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF).....	42
4.2 แสดงพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นต่างๆโดย เทคนิคการวิเคราะห์การดูดซับแก๊ส.....	42
4.3 ตารางแสดงความหนาแน่นเชิงปริมาตรของตัวดูดซับตามวิธี ASTM 2854.....	44
4.4 แสดงพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาคต่างๆโดย เทคนิคการวิเคราะห์การดูดซับแก๊ส (BET method).....	47
4.5 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และอัตราการดูดซับ ที่มีขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์ต่างกัน.....	48
4.6 สัดส่วนถ่านกัมมันต์หลังจากคัดขนาดถ่านกัมมันต์ 100 กรัม.....	49
4.7 แสดงพื้นที่ผิวที่ชนิดของตัวดูดซับที่ใช้ทางการค้าต่างกันโดย เทคนิคการวิเคราะห์การดูดซับแก๊ส(BETmethod).....	62
4.8 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟอร์ก่อนและหลังการดูดซับโดยวิธี XRF.....	64
4.9 เปรียบเทียบงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน.....	66
ค1 ผลการทดลองเส้นโค้งผ่านทะเล (Breakthrough curve) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน.....	90
ค 2 ผลการทดลองเส้นโค้งผ่านทะเล (Breakthrough curve) ของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน.....	91
ค 3 ผลการทดลองเส้นโค้งผ่านทะเล (Breakthrough curve) ของ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน.....	92
ค 4 ผลการทดลองเส้นโค้งผ่านทะเล (Breakthrough curve) ของ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน.....	93
ค 5 ผลการทดลองเส้นโค้งผ่านทะเล (Breakthrough curve) ที่อัตราการไหลต่างกัน.....	94
ค 6 ผลการทดลองเส้นโค้งผ่านทะเล (Breakthrough curve) ที่ตัวดูดซับต่างชนิดกัน.....	95

สารบัญรูปรภาพ

รูปรภาพ	หน้า
2.1 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในการคาร์บอนไนซ์	15
2.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์	15
2.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากกระตุ้นทางกายภาพ	16
2.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากกระตุ้นทางกายภาพโดยมี การกำจัดโมเลกุลแปลกปลอม	16
2.5 เปรียบเทียบขนาดและการวางตัวของรูพรุนขนาดต่าง.....	18
2.6 เปรียบเทียบการกระจายขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบและวิธีผลิตต่าง ๆ.....	19
2.7 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ (Mattson et al 1971).....	19
2.8 การเคลื่อนที่ของไอเล็กตรอนในโครงสร้างของถ่านและถ่านกัมมันต์.....	21
2.9 การเคลื่อนที่ของไอเล็กตรอนในโครงสร้างของถ่าน และถ่านกัมมันต์ที่มีอะตอมของออกซิเจน	22
2.10 ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันนัลที่เป็นกรดบนผิวถ่านกัมมันต์.....	23
2.11 ตัวอย่างปฏิกิริยาของถ่านกัมมันต์ที่ผิวเป็นกรด.....	23
2.12 ตัวอย่างการดูดซับโมเลกุลกรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็น.....	24
2.13 ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ (ซ้าย) ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (ขวา) ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด.....	26
2.14 รูปแบบทั่วไปของตำแหน่งการวางหลอดรังสีเอกซ์ สารตัวอย่าง และหัววัดในเครื่องแบบ WDXRF	31
2.15 เปรียบเทียบกราฟสเปกตรัมจาก WDXRF และ EDXRF	32
3.1 ชุดทดสอบการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์	37
3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง.....	38
3.3 แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจน.....	38
3.4 อุปกรณ์ชักตัวอย่างแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	38
3.5 ชุดทดสอบการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์	39
4.1 ลักษณะของถ่านกัมมันต์	41

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
4.2 แบบจำลองการเคลื่อนของคอสติกภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์	43
4.3 เปรียบเทียบแสดงเส้นโค้งทะลุผ่าน (Breakthrough curve) ของ การดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ต่างกัน	45
4.4 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ต่างกัน	46
4.5 เปรียบเทียบแสดงเส้นโค้งทะลุผ่าน (Breakthrough curve) ของการดูดซับ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์ต่างกัน	48
4.6ก เปรียบเทียบแสดงเส้นโค้งทะลุผ่าน (Breakthrough curve) ของการ ดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์ในช่วงเวลา 0-160 นาที	50
4.6ข เปรียบเทียบแสดงเส้นโค้งทะลุผ่าน (Breakthrough curve) ของการ ดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์ในช่วงเวลา 0-40 นาที	50
4.7 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับแก๊สโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความ เข้มข้นต่าง ๆ ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์	52
4.8ก เปรียบเทียบแสดงเส้นโค้งทะลุผ่าน (Breakthrough curve) ของ การดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ของโซเดียมไฮดรอกไซด์อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์ในช่วงเวลา 0-160 นาที	53
4.8ข เปรียบเทียบแสดงเส้นโค้งทะลุผ่าน (Breakthrough curve) ของ การดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ของโซเดียมไฮดรอกไซด์อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์ในช่วงเวลา 0-40 นาที	54
4.9 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของโซเดียมไฮดรอกไซด์อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์	55
4.10ก เปรียบเทียบแสดงเส้นโค้งทะลุผ่าน (Breakthrough curve) ของ การดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ของโพแทสเซียมไอโอไดด์ อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์	56

สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

รูปรภาพ	หน้า
4.10๘ เปรียบเทียบแสดงเส้นโค้งทะลุผ่าน (Breakthrough curve) ของ การดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ของโพแทสเซียมไอโอไดด์ อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์	57
4.11 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของโพแทสเซียมไอโอไดด์อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์	57
4.12 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของคอสติกชนิดต่าง ๆ ที่อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์.....	59
4.13 เปรียบเทียบแสดงเส้นโค้งทะลุผ่าน (Breakthrough curve) ของการ ดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีอัตราการไหลต่างกัน	61
4.14 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีอัตราการไหลต่างกัน.....	61
4.15 เปรียบเทียบแสดงเส้นโค้งทะลุผ่าน (Breakthrough curve) ของการดูดซับแก๊ส ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีชนิดของตัวดูดซับที่ใช้ทางการค้าต่างกัน	63
4.16 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่มีชนิดของตัวดูดซับ ที่ใช้ทางการค้าต่างกัน.....	63
4.17 แสดงFT-IR spectrum ของถ่านกัมมันต์ (ก) ไม่ดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ข) ทำการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	65
ค1 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของถ่านกัมมันต์	80
ค2 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 1% KI/AC.....	80
ค3 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 3% KI/AC.....	81
ค4 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 5% KI/AC.....	81
ค5 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 7% KI/AC.....	82
ค6 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 10% KI/AC.....	82
ค7 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 15% KI/AC.....	83
ค8 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 1% KOH.....	83
ค9 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 3% KOH.....	84
ค10 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 5% KOH.....	84
ค11 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 7% KOH.....	85

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
ค12 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 10% KOH.....	85
ค13 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 1% NaOH	86
ค14 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 3% NaOH	86
ค15 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 5% NaOH	87
ค16 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 7% NaOH	87
ค17 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 10% NaOH	88
ค4.18 แสดงFT-IR spectrum ของถ่านกัมมันต์ (ก) ไม่ดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ข) ทำการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	88
ค4.19 แสดงFT-IR spectrum ของถ่านกัมมันต์อิมเพกเนตโพแทสเซียมไอโอไดด์ (ก) ไม่ดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ข) ทำการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์	89
ค4.20 แสดงFT-IR spectrum ของถ่านกัมมันต์โซเดียมไฮดรอกไซด์ (ก) ไม่ดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ข) ทำการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์	89

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หลังจากที่สถานการณ์พลังงานอยู่ในขั้นวิกฤต สาเหตุมาจากการขาดแคลนน้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากปริมาณสำรองลดลงประกอบกับความต้องการที่เพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการจัดหาพลังงานในรูปแบบอื่น ซึ่งได้แก่ นิวเคลียร์ ถ่านหินและพลังงานทดแทนอื่นๆ เช่น ชีวมวล และแสงอาทิตย์ เป็นต้น มาทดแทน

ถ่านหินจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เพราะ ปริมาณสำรองที่มากและราคาไม่แพง โดยทั่วไป ถ่านหินในประเทศไทยจะมีคุณภาพปานกลางถึงต่ำ ดังนั้น การนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้จะก่อให้เกิดปัญหาสำคัญด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจาก เกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และละอองธุลี (particulate) ในอากาศ โดยเฉพาะ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งมีความเป็นพิษสูง เป็นสาเหตุทำให้เกิด ฝนกรด และอาจกัดกร่อนอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เป็นโลหะและโลหะผสม (Alloy) ในระบบโครงสร้างต่างๆ โดยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ซึ่งมักเรียกรวมกันว่า ซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x) ที่เกิดขึ้นถูกปล่อยสู่บรรยากาศ จะรวมตัวกับความชื้นที่มีอยู่ในอากาศกลายเป็นกรดซัลฟิวริก กรดซัลฟิวริกและซัลเฟต ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการขจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก่อนที่จะปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

การขจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงปกติใช้ของเหลวเป็นตัวดูดซึม (wet scrubber) โดยกระบวนการนี้จะมีประสิทธิภาพในการขจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มากที่สุด แต่จะมีราคาในการติดตั้งและการดำเนินการสูง จึงมีการศึกษากระบวนการที่สามารถนำมาใช้ทดแทนกระบวนการขจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีอยู่เดิม จากงานวิจัยมีการกล่าวถึงกระบวนการดูดซับแบบเบดนิ่งสามารถนำมาประยุกต์สำหรับการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์แต่จำเป็นต้องเลือก ใช้ตัวดูดซับที่เหมาะสมโดยสมบัติที่สำคัญของตัวดูดซับคือ ความพรุนของตัวดูดซับเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสภายใน จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นที่นิยม เพราะ มีราคาถูก หาได้ง่าย มีโครงสร้างเป็นรูพรุน ดูดซับสารได้หลายชนิด และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์ได้โดยการอิมเพกเนตสารเคมีจำพวกเบส และโลหะออกไซด์โดยสารอิมเพกเนตลงไปจะทำให้กลไกในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เปลี่ยนไป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของสารที่อิมเพกเนตบนถ่านกัมมันต์เพื่อช่วยเร่งการดูดซับ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไอโอไดด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งมีผลต่ออัตราการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และ ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่ออัตราการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีตัวแปรดังนี้ อัตราการไหลของแก๊สผสม ชนิดของเบส และอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของเบสกับถ่านกัมมันต์

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยถ่านกัมมันต์
2. ศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของเบสที่อิมเพกเนตบนถ่านกัมมันต์ต่อค่าการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นหาข้อมูล และรายละเอียดที่เกี่ยวกับงานวิจัย
2. เตรียมวัตถุดิบ จัดหาเครื่องมือ อุปกรณ์ และเครื่องวิเคราะห์
3. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์
4. เตรียมถ่านกัมมันต์อิมเพกเนตด้วยคอสติกโดยวิธีอิมเพกเนชัน
5. วิเคราะห์สมบัติเฉพาะตัวของตัวดูดซับ
 - 5.1 การวัดพื้นที่ผิว
 - 5.2 การวัดปริมาณคอสติกที่อิมเพกเนตบนถ่านกัมมันต์
6. ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์
 - 6.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง
 - 6.2 ขนาดอนุภาค
 - 6.3 ชนิดของเบส
 - 6.4 อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของคอสติกกับถ่านกัมมันต์
 - 6.5 อัตราการไหลของแก๊สผสม
7. วิเคราะห์ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในตัวดูดซับก่อนและหลังการทดลอง
 - 7.1 การวัดปริมาณซัลเฟอร์บนตัวดูดซับ
 - 7.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนตัวดูดซับ
8. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์
9. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ถ่านกัมมันต์อิมเพรกเนตด้วยเบสที่เหมาะสมในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์
2. ทราบอัตราการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพื่อเป็นข้อมูลในการนำไปใช้จริงในระดับอุตสาหกรรม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide)⁽¹⁾

แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นแก๊สที่ไม่มีสีแต่มีรส ที่ระดับความเข้มข้นสูงมากพอจะมีกลิ่นฉุนระคายจมูก โดยแสงแดดและมลพิษอื่นๆ เช่น ไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์และกรดกำมะถันในที่สุด นอกจากนี้หากอยู่ร่วมกับอนุภาคมลสารซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น แมกนีเซียม เหล็ก และ วาเนเดียม จะเกิดมีปฏิกิริยาเติมออกซิเจน เกิดเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และกรดกำมะถันเช่นเดียวกัน หรือไม่เช่นนั้นจะองน้ำในอากาศซึ่งมีแอมโมเนียเจือปนอยู่ด้วยก็อาจทำปฏิกิริยากับแก๊สนี้ เกิดเป็นกรดกำมะถันได้อีก

การสันดาปเชื้อเพลิงเพื่อใช้พลังงานในการดำรงชีวิตของมนุษย์ และอุตสาหกรรมทำให้เกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังเกิดจากการผลิตปิโตรเลียม การถลุงโลหะ การทำเยื่อกระดาษ และการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง

2.1.1

สมบัติทางกายภาพของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นแก๊สไม่ติดไฟ ไม่เกิดการระเบิดและไม่มีสี ที่ระดับความเข้มข้นสูงกว่า 0.3-1.0 ppm ในอากาศ จะรับรู้โดยประสาทสัมผัส ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 3.0 ppm จะมีกลิ่นฉุนรู้สึกระคายเคืองต่อโพรงจมูกและเยื่อตา เป็นแก๊สที่ละลายน้ำได้โดยมีค่าการละลายอยู่ที่ 11.29 กรัม/ 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับแก๊สอื่น คือ ออกซิเจน ไนตริกออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์และ คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีการละลาย 0.004, 0.006, 0.003 และ 0.169 กรัม/ 100 มิลลิลิตร ตามลำดับ ที่อุณหภูมิเดียวกันแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีสมบัติทางกายภาพ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงสมบัติทางกายภาพของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

Physical Content of SO₂

Molecular weight	64.06
Density (g/l)(gas)	2.927 at 0 °C 1 atm
Specific gravity (liq)	1.434 at -10 °C
Molecular volume (ml) (liq)	44
Melting point (°C)	-75.64

Physical Content of SO₂

Boiling point (°C)	-10.02
Critical temperature (°C)	157.2
pressure (atm)	77.7
Heat of fusion	1.769
Heat of vaporization	5.96
Molecular boiling point constant (°C/1000g)	1.45

2.1.2

ผลกระทบของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นตัวก่อให้เกิดภาวะทางอากาศ ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ ระคายเคืองต่อเยื่อบุตา อันตรายต่อปอดทำให้มีอาการแน่นหน้าอก หายใจถี่ ทำงานได้น้อยลง และยังมีผลต่อการเพาะปลูก เมื่อพืชได้รับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง ๆ จะผลทำให้เซลล์ตายในระหว่างของใบหรือระหว่างเส้นใบในชั้นแรกจะมีลักษณะบวมน้ำ

2.2 การขจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้

เมื่อนำเอาถ่านหินมาเป็นเชื้อเพลิงจะก่อให้เกิดปัญหาด้านการกัดกร่อนและปัญหาเกี่ยวกับสภาพเป็นพิษ เนื่องจากในถ่านหินมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เมื่อเผาไหม้แล้วจะให้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ออกมา เมื่อแก๊สทั้งสองถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศจะกลายเป็นกรดซัลฟูริกและกรดซัลฟูริก เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาต่าง ๆ จึงมีการกำจัดกำมะถันในถ่านหิน ซึ่งกระบวนการกำจัดกำมะถันสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธีใหญ่ ๆ คือ

1. วิธีทางฟิสิกส์ เช่น electropolitic separation, agetic separation
2. วิธีทางชีววิทยา วิธีการนี้ใช้เชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายกำมะถันให้ลดน้อยลง
3. วิธีทางเคมี คือ ใช้ปฏิกิริยาทางเคมีในการกำจัดกำมะถันให้น้อยลง

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งวิธีการขจัดกำมะถันออกได้ 3 ลักษณะตามช่วงเวลาการขจัด คือ

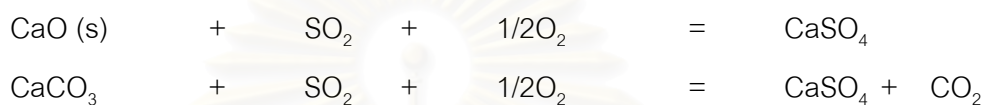
1. วิธีขจัดกำมะถันก่อนการเผาไหม้

- ก. วิธีทางกายภาพ เป็นวิธีที่ง่ายและไม่สลับซับซ้อน แต่กำจัดได้เฉพาะกำมะถันอนินทรีย์เท่านั้น โดยอาศัยหลักของความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะ
- ข. วิธีทางเคมี มีหลายวิธีด้วยกัน เช่น ไฮโดรดีซัลเฟอร์ไรเซชัน และ ออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ไรเซชันโดยให้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยา ซึ่งกำมะถัน

อินทรีย์และกำมะถันไฟโรต์เท่านั้นที่เข้าทำปฏิกิริยา ส่วนกำมะถันซัลเฟตจะไม่เข้าทำปฏิกิริยาและค้างอยู่ในถ้ำนั่นเอง

2. วิธีการขจัดกำมะถันขณะเผาไหม้

วิธีการนี้ทำโดยการเติมสารเคมีบางชนิดลงไปในช่วงที่เกิดการเผาไหม้ และให้สารเคมีที่เติมลงไปรวมตัวกับกำมะถันที่สลายตัวจากการเผาไหม้ เป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่ที่สามารถแยกออกจากการเผาไหม้ได้ ตัวอย่างเช่น การใช้ปูนขาว หินปูน ผสมลงไปในช่วงการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซัลไฟด์เบดโดยถ่านหินที่ใช้มีขนาด 1 นิ้ว เมื่อเผาไหม้ถ่านหินจะเกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งถูกกำจัดตามปฏิกิริยา ดังนี้



จากปฏิกิริยาดังกล่าว เป็นปฏิกิริยาระหว่างแก๊สและของแข็ง ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหรือไม่ขึ้นกับพื้นที่ผิวของการสัมผัสของสารทั้งสอง ส่วนแคลเซียมซัลเฟต ที่เกิดขึ้นสามารถกำจัดออกได้ง่ายโดยใช้เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต หรือ ถุงกรอง เป็นต้น

3. วิธีการขจัดกำมะถันหลังเผาไหม้

วิธีนี้เป็นการดึงเอาแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากฟลูแก๊สโดยมีกระบวนการดูดซึมแก๊สที่เกิดขึ้น ซึ่งมีได้หลายวิธีต่างกันออกไป และมีประสิทธิภาพในการจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

การขจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์หลังเผาไหม้แบ่งออกเป็น 4 กระบวนการดังนี้

1. กระบวนการแบบ Wet absorption process โดยเครื่องปฏิกรณ์จะเป็นแบบ spray column reactor โดย ให้แก๊สกับของแข็งพ่นสวนทางกันลงมา กระบวนการมักแบ่งตามสารเคมีที่ใช้
2. กระบวนการแบบ Catalytic oxidation process แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปะปนอยู่ในฟลูแก๊ส จะผ่านไปบน catalyst bed และถูกออกซิไดซ์ไปเป็น SO₃ แล้วทำปฏิกิริยากับน้ำได้กรดซัลฟูริก
3. กระบวนการแบบ Wet and dry absorption process กระบวนการนี้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกดึงออกจากฟลูแก๊สโดยการดูดซับ (adsorption) ไว้บนผิวของ activated solid สารดูดซับที่มักใช้ในเชิงพาณิชย์มักใช้คาร์บอน
4. กระบวนการแบบ dry absorption process กระบวนการที่นิยม คือ กระบวนการ injection of alkaline solid คือ การพ่นฝุ่นผงที่แห้งของโลหะอัลคาไลนเข้าไปในฟลูแก๊ส เพื่อให้ทำปฏิกิริยากับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แล้วจึงเก็บรวบรวมผงที่ใช้แล้วเหล่านั้นออกมาพร้อมกับเถ้าลอย

2.3 การดูดซับ (Adsorption)⁽²⁾

คือ กระบวนการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารยึดติดอยู่กับผิวของสารอีกสารหนึ่ง เช่น การที่โมเลกุลของแก๊ส ไปเกาะบนผิวของของแข็ง สารที่ไปเกาะติดอยู่บนผิวหน้า เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Absorbate) ส่วนสารที่ตัวถูกดูดซับไปเกาะ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent)

การดูดซับ สามารถแบ่งออกได้ ตามความแข็งแรงของพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ เป็น 2 แบบ คือ

1. การดูดซับทางฟิสิกส์ (Physical adsorption หรือเรียกย่อ ๆ ว่า Physisorption)

เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกันด้วยแรงทุติยภูมิ (Secondary attractive force) เช่น แรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-dipole) หรือ แรงแวนเดอวาล (Van Der Waal) ซึ่งการเกิดการดูดซับทางฟิสิกส์นี้ มีลักษณะคล้าย ๆ กับการควบแน่นจากไอน้ำไปเป็นน้ำ การดูดซับแบบนี้ไม่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างผิวหน้าของของแข็ง (Adsorbent) และสปีชีส์ที่เกิดการดูดซับ (Absorbate) เช่น การดูดซับโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนบนผิวหน้าของอะลูมินา

การดูดซับทางฟิสิกส์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวัดหาพื้นที่ผิวทั้งหมด (Total surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยา ขนาดของรูพรุน (Pore size) และการกระจายของขนาดของรูพรุน (Pore size distribution)

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption)

เป็นการดูดซับทางเคมีโดยเกี่ยวข้องกับแรงหรือพันธะทางเคมี ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยา โดยมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ การเกาะของตัวถูกดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับจะเหมือนกับแรงที่ใช้ยึดเหนี่ยวกันระหว่างอะตอมภายในโมเลกุล ปฏิกิริยาที่มีการเร่งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา การดูดซับจะเป็นการดูดซับทางเคมี โดยสารตั้งต้นจะเกิดการดูดซับบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

การดูดซับทางกายภาพจะต่างจากการดูดซับทางเคมีตามข้อกำหนดเหล่านี้ คือ

1. การดูดซับทางกายภาพไม่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยน หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน การดูดซับทางกายภาพจะไม่จำกัดบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปเกาะยังพื้นผิวส่วนใดก็ได้ แต่การดูดซับทางเคมีจะเหลือเฉพาะบริเวณที่สามารถเกิดพันธะเคมีได้เท่านั้น

2. ค่าความร้อนของการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าต่ำ มีค่าเท่ากับความร้อนของการกลายเป็นของเหลว เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางเคมี ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น แต่ค่าความร้อนของการดูดซับก็ไม่ใช่ว่าที่สำคัญในการพิจารณา

3. การดูดซับทางกายภาพจะเกี่ยวข้องกับการเกิดของชั้นหลายโมเลกุล (multimolecular layers) ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นสมบูรณ์เมื่อมีการเกิดชั้นที่ 1 แล้วซึ่งบางครั้งการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวชั้นบนของการดูดซับทางเคมีก็ได้

4. การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นอย่างทันที เป็นการแพร่เข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับ ซึ่งต้องใช้เวลาพอสมควร ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างทันทีเช่นกัน แต่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น

เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (Exothermic reaction) ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของการดูดซับ ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพ จะมีค่าใกล้เคียงกับความร้อนแฝงของการกลั่นตัวของเหลว และถ้าเป็นการดูดซับทางเคมีความร้อนที่เกิดขึ้น จะมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับการดูดซับทางกายภาพ โดยจะมีค่าน้อยกว่าความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีไม่มากนัก พบว่า การดูดซับที่เกิดขึ้น และที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมนั้น เป็นการดูดซับทางกายภาพ

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

1. สารดูดซับ : ชนิด ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี เช่น พื้นที่ผิวสัมผัส ขนาดรูพรุน องค์ประกอบทางเคมี
2. สารที่ถูกดูดซับ : ชนิด ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี เช่น ขนาดของโมเลกุล ความมีขั้วของโมเลกุล องค์ประกอบทางเคมี
3. ความดันหรือความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ
4. ภาวะของการดูดซับ เช่น pH อุณหภูมิ
5. เวลาที่อยู่ในระบบ

จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetics Adsorption)

ลักษณะการดูดซับ หรือการส่งถ่ายมวลสารที่อยู่ภายในสารละลายไปยังพื้นผิวของของแข็งมีหลายขั้นตอน คือ

- 1) การถ่ายโอนมวลสารของสารที่ถูกดูดซับ จากบริเวณหนึ่งสู่บริเวณรอบนอกที่ใกล้กับพื้นผิวของสารดูดซับ (External Diffusion)
- 2) การถ่ายโอนมวลของสารที่ถูกดูดซับจากรอบนอกที่ใกล้กับพื้นผิวของสารดูดซับเข้าสู่พื้นผิวภายในรูพรุน (Pore) ของสารดูดซับ (Internal Diffusion)
- 3) การดูดซับ คือ การที่โมเลกุลที่อยู่ภายในรูพรุนถูกดูดซับ จากสารละลายไปยังวัฏภาคของแข็ง ซึ่งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับสองขั้นตอนที่ผ่านมา ดังนั้น จึงสมมติว่า ภาวะสมดุลเกิดขึ้นระหว่างวัฏภาคทั้งสองนี้

2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา⁽³⁾

เป็นสารที่เติมลงไปปฏิกิริยาในจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับสารตั้งต้นแล้วทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้นโดยที่ตัวสารเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหลังจากปฏิกิริยาเสร็จสิ้น โดยสมดุลของปฏิกิริยาไม่เปลี่ยน

สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ไม่รบกวนสมดุลของปฏิกิริยา
2. ช่วยลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา (E_a)
3. ต้องเป็นสสารเสมอ

ปฏิกิริยาอะคะตะไลซิส (Catalytic reaction หรือ Catalysis) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. ปฏิกิริยาอะคะตะไลซิสแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalytic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่ทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นอยู่ในสถานะเดียวกัน เช่น การสังเคราะห์ CH_3COOH จาก CH_3OH และ CO โดยใช้ rhodium complex
ประเภทของปฏิกิริยาอะคะตะไลซิสแบบเอกพันธ์
 - 1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแก๊ส ได้แก่ Nitrogen oxide ในปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Sulfur dioxide ในกระบวนการผลิตกรด H_2SO_4
 - 1.2 สภาพที่เป็นของเหลว เช่น การใช้กรดและเบสในกระบวนการไฮโดรลิซิสของพวกเอสเทอร์
2. ปฏิกิริยาอะคะตะไลซิสแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalytic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่สารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยามีสถานที่ต่างกัน ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของโพรเพน
3. Enzymatic Catalysis ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเอนไซม์ (enzyme) มีทั้งแบบเอกพันธ์และแบบวิวิธพันธ์ ส่วนใหญ่ที่ใช้กันในปัจจุบันเป็นแบบเอกพันธ์ (เอนไซม์เป็น mobilized enzyme) แต่ได้มีการพัฒนา immobilized enzyme ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst)

2 . 5 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา
โดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ

1. วิธีการตกตะกอน (Precipitation Method) เป็นการผสมสารละลาย 2 ชนิด หรือมากกว่าทำให้เกิดการตกตะกอนแล้วตามด้วย การกรอง การล้าง การทำให้แห้ง การจัดรูปร่าง และ

การให้ความร้อนเพื่อทำให้เกิดเป็นสารเนื้อเดียวและเกิดเป็นสารประกอบขึ้นโดยการแพร่กระจายของความร้อน

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการแบบตกตะกอน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

1.1. การตกตะกอนแบบธรรมดา

การเตรียม

เติมสารละลายที่เป็นเกลือของโลหะลงในสารละลายพวกแอลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ (Alkaline hydroxide) หรือแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide) หรือแอมโมเนียมคาร์บอเนต (Ammonium carbonate) จะทำให้เกิดการตกตะกอนในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ (Metal hydroxide) แล้วให้ความร้อนเปลี่ยนตะกอนให้อยู่ในรูปของโลหะออกไซด์ (Metal oxide)

1.2. การตกตะกอนร่วม (Coprecipitation)

การเตรียม

เตรียมสารละลายของเกลือโลหะ 2 ชนิด เช่น การเตรียมโลหะบนตัวรองรับแมกนีเซียมออกไซด์ ต้องเตรียมสารละลายเกลือโลหะ และเกลือแมกนีเซียมก่อน จากนั้นเติมสารที่ทำให้เกิดการตกตะกอน (Precipitation agent) เช่น โลหะอัลคาไลน์คาร์บอเนต (NaCO_2 , NaHCO_3) ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งต้น (Catalyst precursor) แล้วให้ความร้อนเพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งต้น (Catalyst precursor) สลายตัว ได้โลหะออกไซด์บนตัวรองรับ (Support) ที่ต้องการ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ และอะลูมินา เป็นต้น

ข้อควรระวังในการเตรียม

1. ควบคุมภาวะในการเตรียม เช่น ความเป็นกรด-เบส (pH) อัตราการผสม อัตราการเติมสารที่ทำให้ตกตะกอน เป็นต้น ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ มีผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นอย่างมาก
2. การเลือกเกลือโลหะเริ่มต้น จะต้องเป็นประเภทที่หาง่ายและละลายน้ำได้ดี บางกรณีต้องหลีกเลี่ยงการใช้ธาตุที่เป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น คลอไรด์ เนื่องจากกรดที่มาจากกรดคลอไรด์ที่อุณหภูมิสูงมีฤทธิ์กัดกร่อน หรือไฮเดียม ซึ่งสารประกอบไฮเดียมจะช่วยให้เกิดการรวมตัวที่อุณหภูมิสูงได้
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวรองรับ ไม่สามารถใช้เป็นโลหะซัลเฟตได้ เนื่องจากโลหะซัลเฟตสามารถถูกรีดิวซ์ไปเป็นซัลไฟด์ที่เป็นสารพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยาได้

2. วิธีการแบบฝัง (Impregnation Method) เป็นวิธีการที่ง่าย และใช้กันมากที่สุด ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ทำได้โดยการเติมตัวรองรับ (Support) เช่น อะลูมินาในสารละลายของเกลือ

โลหะ เช่น เหล็ก ไนเตรต เหล็กโลหะจะแพร่กระจายสู่ตัวรองรับ จากนั้นทำให้เกลือโลหะร้อนเพื่อให้เกลือโลหะที่อยู่บนตัวรองรับสลายตัวให้เกลือโลหะออกไซด์เกาะบนตัวรองรับ

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการแบบฝังตัว สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

2.1. การฝังตัวแบบเปียก (Wet-Impregnation)

การเตรียม

เติมตัวรองรับลงในสารละลายของเกลือโลหะที่มีปริมาณมากเกินพอ โดยปริมาณของเกลือโลหะที่เกาะบนตัวรองรับ จะหาจากปริมาณที่แตกต่างของเกลือโลหะก่อนและหลัง

2.2. การฝังตัวชนิดแห้ง (Impregnation to incipient wetness)

การเตรียม

ตัวรองรับจะถูกทำให้กระจายตัวและพ่นด้วยสารละลายที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสม โดยปริมาตรของสารละลายที่ใช้ต้องมีปริมาณเท่ากับ ปริมาตรของรูพรุนทั้งหมดของตัวรองรับหรือน้อยกว่าเล็กน้อย ซึ่งสามารถควบคุมปริมาณขององค์ประกอบที่ว่องไวที่เกาะบนตัวรองรับได้อย่างถูกต้อง หลังจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกทำให้แห้งและเผาที่อุณหภูมิสูง

กรรมวิธีหลังการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

1. การทำให้แห้ง (Drying)

ทำในตู้อบหรือทิ้งไว้ในอากาศ แต่นิยมทำในตู้อบที่ 100 °C ประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำในโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา

2. การขึ้นรูป (Forming)

- เม็ดเล็ก (Granule)
- ทรงกลม (Sphere)
- เม็ดแบน (Tablet)
- วงแหวน (Ring)
- ทรงกระบอก (Cylinder)

โดยพิจารณาจากปัจจัยหลายอย่าง

คือ

- สมบัติการไหลของของผสม
- ความแข็งแรง
- โครงสร้างของรูเปิด
- ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด
- ราคา

3. การเผาที่อุณหภูมิสูง (Calcination)

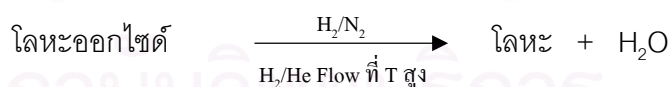
การเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง มีเหตุผลหลายประการ ดังนี้

1. เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ต้องการ เช่น ตัวประสาน (Binder) สารหล่อลื่นของตาย, ไอออนบวก/ไอออนลบที่ไม่เสถียร และสารที่ระเหยได้ง่ายที่เติมลงไปในช่วงตอนต้น
2. อุณหภูมิที่ใช้ควรสูงพอเพื่อทำให้เกิดสภาพการเริ่มต้นของการรวมตัวของผลึก (Incipient sintering) แต่ต้องไม่ให้เกิดการรวมของผลึกของความร้อนที่มากเกินไป (Excessive sintering) ซึ่งถ้าเกิดการรวมตัว (Sintering) จะทำให้พื้นที่ผิว (Surface area) ลด มีผลทำให้ตำแหน่งที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (Active site) ลดลง และอาจเป็นสาเหตุของการจำกัดการแพร่ (Diffusional limitation) เพราะขนาดของรูพรุนที่เล็กลง
3. การเปลี่ยนรูปเกลือโลหะให้เป็นโลหะออกไซด์ โดยการเลือกใช้อุณหภูมิขึ้นกับโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor)

ปัญหาที่พบในระหว่างการเผาที่อุณหภูมิสูง คือ อาจเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวรองรับกับโลหะออกไซด์ เช่น โลหะออกไซด์กับอะลูมินา ได้โลหะอะลูมิเนต (MeAl_2O_4) โลหะออกไซด์กับซิลิกา ได้โลหะซิลิเกต เป็นต้น

4. การรีดิวซ์เป็นโลหะ (Reduction to the Metal)

การรีดิวซ์สามารถทำได้ทั้งในเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor) หรือเตาเผาที่อุณหภูมิสูง (Calcination) ทั้งนี้ขึ้นกับความว่องไวของโลหะหลังจากการรีดิวซ์ โดยบางชนิดสามารถลุกติดไฟได้เอง จึงควรทำในเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor)



อุณหภูมิที่ใช้ในการรีดิวซ์โลหะหมู่ VIII B ประมาณ 300-400 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการรีดิวซ์ต้องไม่มากกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor)

2.6 ตัวรองรับ (Support)

เป็นสารเฉื่อยที่ใช้สำหรับการกระจายตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพง อาจอยู่ในรูปของเม็ด (Pellet) หรือผง (Powder) ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม คือ Al_2O_3 (Alumina), SiO_2 (Silica) และ Activated carbon

หน้าที่ของตัวรองรับ (Support)

- ทำให้เกิดการกระจายตัวของโลหะ (Metal active site) ได้ดีที่สุด
- เพิ่มความแข็งแรงให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาบางตัวที่มีโครงสร้างไม่แข็งแรง
- เพิ่มความเสถียรให้กับโครงสร้างของตำแหน่งว่างไวในการเกิดปฏิกิริยา (Active site)
- เพิ่มความสามารถในการต้านทานภาวะ การรวมตัวกันเนื่องจากความรื้อน (Agglomeration)

การเลือกตัวรองรับ (Support)

- เชื่อยต่อปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ
- มีสมบัติเชิงกลที่ต้องการ เช่น ทนต่อการขัดสี, มีความแข็งแรง หรือ ทนต่อแรงกด เป็นต้น
- เสถียรภายใต้ภาวะของปฏิกิริยาและภาวะที่ใช้เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่
- ควรมีพื้นที่ผิวมาก แต่ต้องคำนึงถึงขนาดของโมเลกุล
- มีรูพรุน ประกอบด้วยขนาดรูพรุนเฉลี่ยและการกระจายตัวของรูพรุน
- ราคาถูก

2.7 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)⁽⁴⁾

หมายถึง ผลิตภัณฑ์ของคาร์บอน ซึ่งเป็นตัวดูดซับชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็น ของแข็งสีดำ อาจอยู่ในรูปของผง หรือเม็ดได้ มีโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวดูดซับสูง ทำให้มีสมบัติการดูดซับที่ดี ใช้ประโยชน์ในการกำจัดกลิ่น สี หรือแก๊ส โดยทั่วไป มักจะเลือกวัสดุที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยเป็นของเหลือทิ้งหรือมีราคาถูก มีปริมาณคาร์บอนสูง มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ มีปริมาณเถ้าต่ำและมีความสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม่สลายตัวเมื่อเก็บไว้นานๆโดยนำวัตถุดิบซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ทะลายปาล์ม มาผ่านกระบวนการกระตุ้นให้มีพื้นที่ผิวสูงมีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก มีการจุในการดูดซับสูง และมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก

2.7.1 วัสดุที่นำมาใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์

วัสดุที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์ควรมีลักษณะดังนี้

- เป็นวัสดุเหลือทิ้ง หรือเป็นวัสดุที่มีราคาถูก
- มีปริมาณคาร์บอนสูง
- มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ
- มีความสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ
- สามารถใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงได้

การเตรียมถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบโดยตรง หรือผลิตจากวัตถุดิบที่ถูกเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นถ่านชาร์แล้วก็ได้ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มักเป็นพวกอินทรีย์วัตถุเป็นส่วนใหญ่

2.7.2 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

การเตรียมถ่านกัมมันต์ คือ การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิว หรือการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น Mukherjee (1947) ได้พิจารณาความหมายของการกระตุ้นไว้ 3 ลักษณะคือ

- การเพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (Active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน
- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้ผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึงการทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
- เป็นการกำจัดอินทรีย์วัตถุและอนินทรีย์วัตถุต่าง ๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ

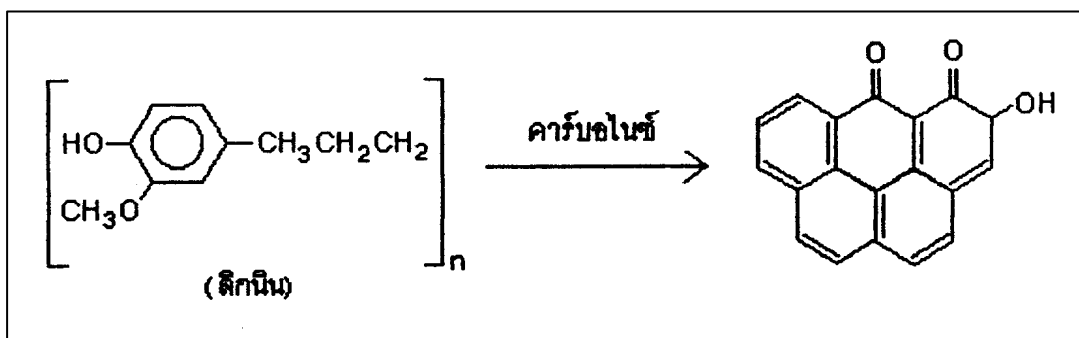
ในปัจจุบันกรรมวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์มีอยู่หลายวิธี ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบ ลักษณะและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ โดยทั่วไปกระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ 2 ขั้นตอน ดังนี้

1) คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

คาร์บอนไนเซชันเป็นกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) รูปแบบหนึ่ง โดยใช้ความร้อนไล่ความชื้น และสารระเหยได้ต่างๆ ออกจากวัตถุดิบ ทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งสีดำ เรียกว่า ถ่านชาร์ (Char) ส่วนที่หลุดออกมา คือ แก๊สและน้ำมันทาร์ กระบวนการคาร์บอนไนเซชันเป็นการเพิ่มร้อยละของคาร์บอนให้สูงขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในการคาร์บอนไนซ์ แสดงดังรูป 2.1

การคาร์บอนไนซ์ให้ได้ถ่านที่มีสมบัติที่ต้องการทำได้โดยการปรับภาวะให้เหมาะสม โดยมีตัวแปรที่สำคัญ ดังนี้

- อุณหภูมิ
- อัตราการให้ความร้อน
- ตัวกลางของปฏิกิริยา
- ธรรมชาติของวัตถุดิบ

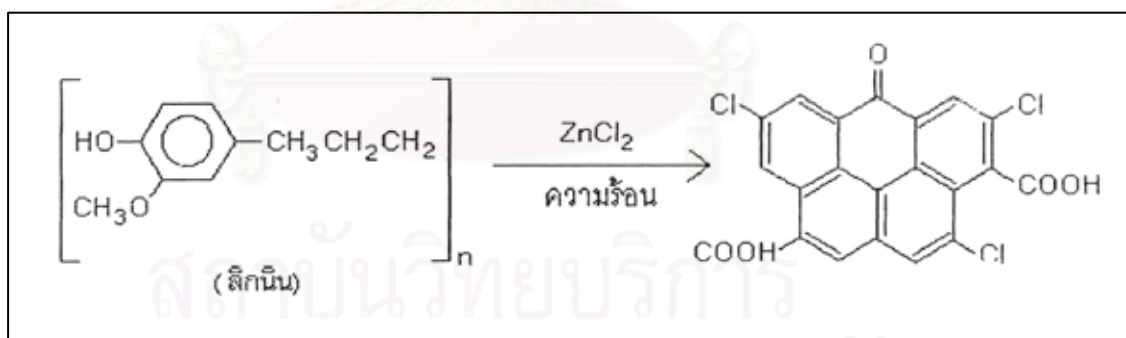


รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในการคาร์บอนไนซ์

2) การกระตุ้น (Activation)

การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ แบ่งตามกลไกที่เกิดขึ้นได้ 2 ประเภท

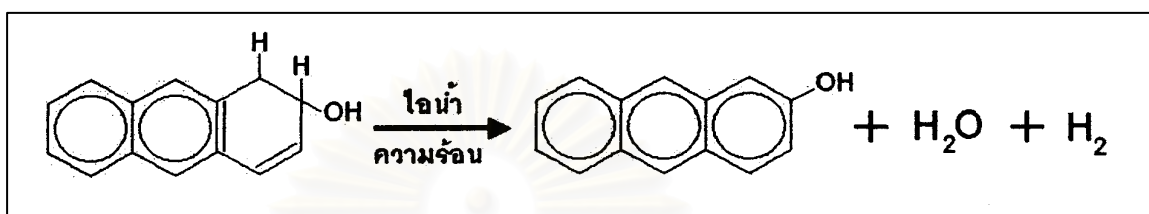
2.1 การกระตุ้นทางเคมี เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยากับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น ข้อดีของวิธีนี้คือใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก (400 – 600 องศาเซลเซียส) แต่มีข้อเสียคือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าวออกเพิ่มขึ้น รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ก็ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ แสดงดังรูป 2.2



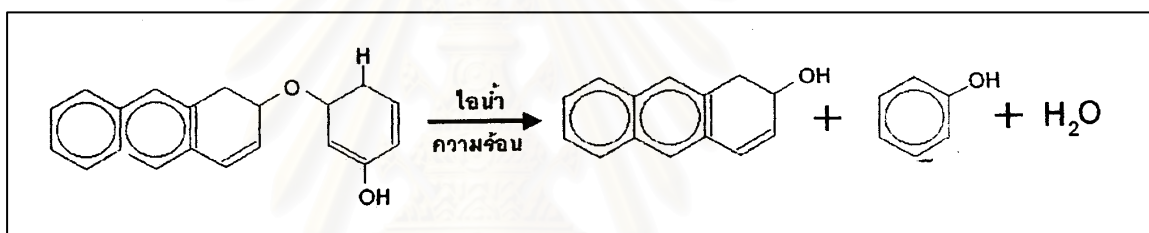
รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์

2.2 การกระตุ้นทางกายภาพ เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวของคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยมีการจัดเรียงตัวใหม่ในโครงสร้างซึ่งเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น นิยมใช้แก๊สออกซิเดชันต่างๆ เช่น ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สออกซิเจน ร่วมกับการใช้ความร้อน ปฏิกิริยากระตุ้นนี้อาจใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้ความ

ร้อนสูงมากถึง 1200 องศาเซลเซียส และพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีคุณภาพต่ำกว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับความร้อน ข้อดีของการกระตุ้นวิธีนี้คือไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่มีข้อเสียคือต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าวิธีกระตุ้นด้วยสารเคมี โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการกระตุ้นทางกายภาพ แสดงดังรูป 2.3 และ 2.4



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการกระตุ้นทางกายภาพ



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากกระตุ้นทางกายภาพโดยมีการกำจัดโมเลกุลแปลกปลอม

2.7.3 ลักษณะและชนิดของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ หมายถึง สารดูดซับชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นของแข็ง มีสีดำ อาจอยู่ในรูปผง หรือเม็ดก็ได้ใช้ประโยชน์ในการดูดซับกลิ่น สี หรือแก๊ส โดยทั่วไปมีลักษณะดังต่อไปนี้

- มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก
- มีพื้นที่ผิวสูง
- มีความจุในการดูดซับสูง
- มีความว่องไวในการดูดซับสูง
- มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (Microporous Structure)

ชนิดของถ่านกัมมันต์ ขึ้นอยู่กับเกณฑ์การแบ่ง ดังนี้

- 1) แบ่งตามชนิดของการกระตุ้น

- การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวคาร์บอน ถ่านกัมมันต์ที่ได้มักเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ตัวกระตุ้นที่ใช้ได้แก่ $ZnCl_2$ และ $NaCl$ เป็นต้น

- การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้แก๊สออกซิไดซ์เช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ ร่วมกับความชื้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้มักเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก

2) แบ่งตามขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์

- ขนาดเล็ก (Micropore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนเล็กกว่า 1.5 นาโนเมตร มักใช้ในการดูดแก๊สหรือสารระเหย

- ขนาดกลาง (Mesopore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 1.5 ถึง 200 นาโนเมตร มักใช้ประโยชน์ในปฏิกิริยาที่มีตัวเร่ง (Catalytic reaction) ใช้ดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น ฟอสฟอรีน

- ขนาดใหญ่ (Macropore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนมากกว่า 200 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่าง ๆ แต่เป็นตัวช่วยให้สารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนขนาดเล็กได้ง่ายขึ้น มักนำไปใช้ประโยชน์ในการฟอสฟอรีนและการผลิตยา

3) แบ่งตามลักษณะของรูปร่าง

- ประเภทผง (Powder) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผง ใช้สำหรับฟอสฟอรีนและดูดกลิ่นในของเหลว

- ประเภทเม็ด (Pellet) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตรไม่เกินกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นเม็ดซึ่งได้จากการอัดผ่านเครื่องอัด หรืออาจทำให้เป็นเกล็ดใช้สำหรับทำแก๊สให้บริสุทธิ์ หรือการทำตัวทำละลายที่ใช้แล้วให้บริสุทธิ์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการปฏิกิริยาของแก๊ส และใช้ทำหน้ากักป้องกันแก๊สและไอพิษต่าง ๆ

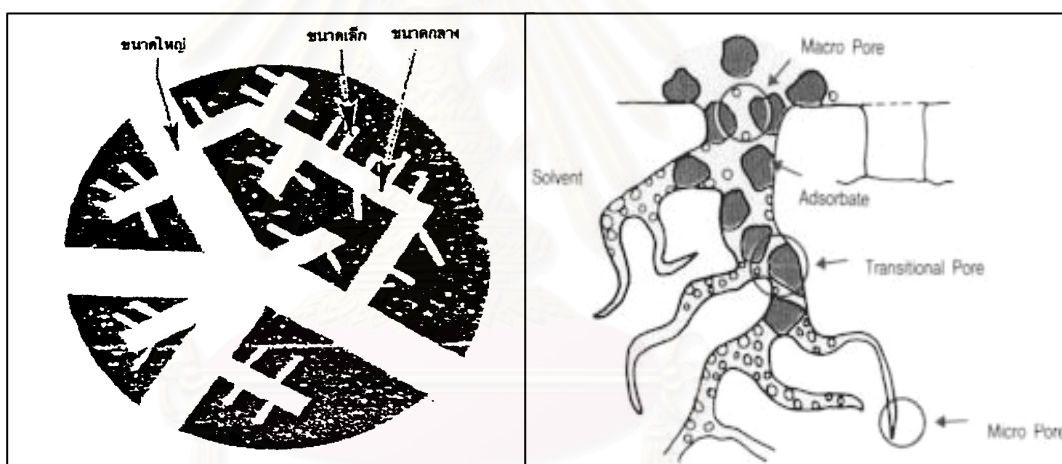
4) แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

- ความหนาแน่นต่ำ มักใช้ประโยชน์ในภาวะที่เป็นสารละลาย เช่น ฟอสฟอรีนน้ำตาลหรือทำน้ำให้บริสุทธิ์

- ความหนาแน่นสูง ใช้ในการดูดซับแก๊ส หรือไอระเหย

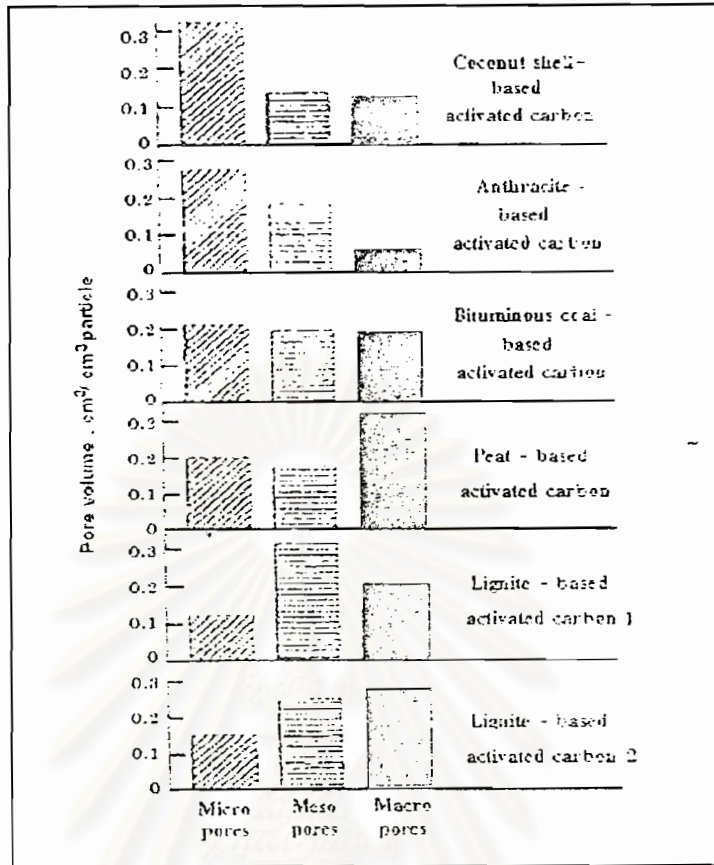
2.7.4 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์

เมื่อพิจารณาลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์แล้วจะพบว่า มีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์ อย่างไม่เป็นระเบียบและความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูพรุนเหล่านี้เปรียบได้กับหลอดแก้วขนาดเล็ก (Capillary tube) ที่เสียบเข้าไปในเนื้อถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปจะเรียกรูพรุนเหล่านี้ตามขนาด (รูปที่ 2.5 และ รูปที่ 2.6) คือ ขนาดเล็ก (Micropore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนน้อยกว่า 2 นาโนเมตร ขนาดกลาง (Mesopore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนประมาณ 2 ถึง 50 นาโนเมตร และขนาดใหญ่ (Macropore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมากกว่า 50 นาโนเมตร รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ เชื่อว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาด หรือที่เรียกว่า การกระจายขนาดรูพรุน (Poresize distribution) จะขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ใช้และวิธีการกระตุ้น



รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบขนาดและการวางตัวของรูพรุนขนาดต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบการกระจายขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบและวิธีผลิตต่าง ๆ

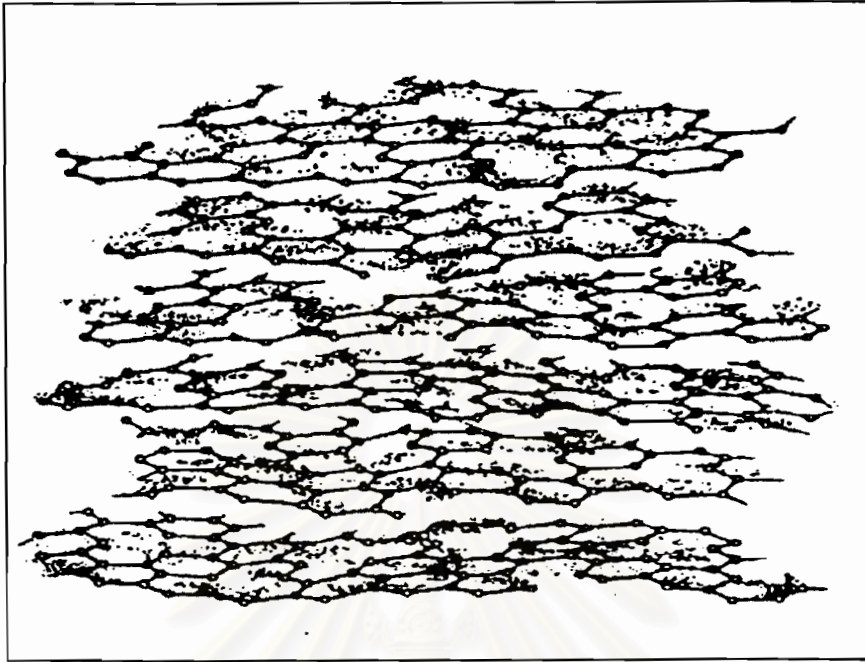
รูพรุนขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิโดซ์ ซึ่งเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ ออกจากช่องว่างของถ่านที่ใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น รวมทั้งเกิดการจัดเรียงและเคลื่อนย้ายอะตอมเพื่อให้เกิดช่องว่างที่มีอำนาจการดูดซับ รูพรุนที่มีขนาดใหญ่จะทำหน้าที่เป็นเพียงทางผ่านของสารถูกดูดซับเข้าไปถึงรูพรุนขนาดเล็ก จึงไม่มีผลต่อความจุในการดูดซับ แต่จะมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ สำหรับรูพรุนขนาดกลางนั้นสามารถดูดซับโมเลกุลของของเหลวได้บ้าง แต่จะมีความสำคัญมากขึ้นเมื่อดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์สูง ๆ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้าจะมีรูพรุนขนาดกลางประมาณ 200 – 300 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับรูพรุนขนาดเล็กมีหน้าที่ในการดูดซับจึงมีผลต่อความจุในการดูดซับ โดยเฉพาะการดูดซับที่มีความดันสัมพัทธ์ต่ำ ถ่านกัมมันต์จะมีรูพรุนขนาดเล็กประมาณร้อยละ 90 ถึง 95 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่า ความจุในการดูดซับยังขึ้นกับลักษณะและธรรมชาติของผิวด้วย กล่าวคือ ถ้าผิวของถ่านกัมมันต์เป็นเพียงระนาบพื้นฐาน (basal planes) ซึ่งไม่มีหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ การดูดซับจะเกิดจากรังแรงเดอวาล หรืออาจเกิดจากไพอเล็คตรอน แรงยึดเหนี่ยวทั้งสองเป็นแรงที่ค่อนข้างอ่อน แม้จะดูดซับได้แต่ก็มีโอกาสจะหลุดออกได้ง่าย แต่ถ้าเป็นผิวบริเวณที่มีหมู่ฟังก์ชันอื่น การดูดซับจะเกิดจาก

แรงที่แข็งแรง โอกาสที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะหลุดออกมาจึงมีน้อยกว่า หมู่ฟังก์ชัน
 นัลบนผิวของถ่านกัมมันต์มี 2 ชนิด คือ พวกออกไซด์ของกรด ซึ่งพบมากในถ่านกัมมันต์ที่
 ผลิตที่อุณหภูมิประมาณ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และพวกออกไซด์ของเบส ซึ่งพบมา
 ในถ่านกัมมันต์ที่ผลิตที่อุณหภูมิประมาณ 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส

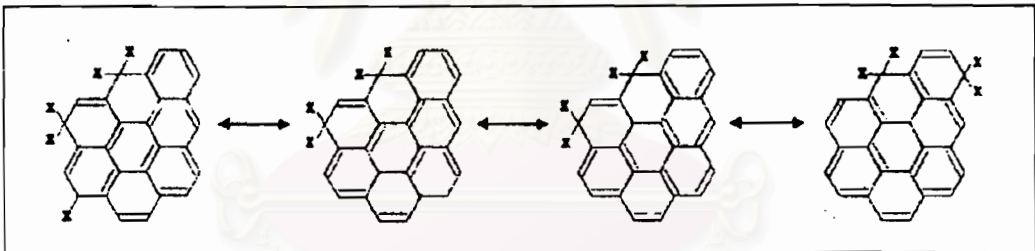
2.7.5 โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์มักเตรียมจากถ่านที่ได้จากการเผาผลาญสารอินทรีย์ด้วยความร้อน
 (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการ
 คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ในระหว่างการเผาผลาญอะตอมต่าง ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน
 เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจนถูกกำจัดออกในรูปแก๊ส อะตอมของคาร์บอนที่
 เหลือจะจัดเรียงเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยวงหกเหลี่ยม (Aromatic ring) เชื่อมโยง
 กันอย่างไม่เป็นระเบียบและเกิดช่องว่างหรือโพรงซึ่งจะเป็นที่อยู่ของพวกทาร์และสารอื่นที่
 ได้จากการเผาผลาญ ช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับด้วย
 กระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้นโดยการล้างพวกทาร์และสารต่าง ๆ ที่ได้จากการเผา
 ผลาญออกจากช่องว่างหรือโพรง และสร้างหมู่ฟังก์ชันนัลขึ้นมาแทน ความสามารถในการ
 ดูดซับถ่านกัมมันต์จึงเป็นผลสืบเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีด้วย

ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างคล้ายผลึกแกรไฟต์ กล่าวคือ อะตอมของคาร์บอน จะ
 เรียงตัวเป็นชั้น ๆ (รูปที่ 2.7) แต่ละชั้นห่างกันประมาณ 0.335 นาโนเมตร แรงยึดเหนี่ยว
 ระหว่างชั้น คือ แรงแวนเดอร์วาลซึ่งเป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนัก แต่ละชั้นจะประกอบไปด้วย
 กลุ่มอะตอมคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม อะตอมคาร์บอนแต่ละตัวจะใช้ซิก
 มาอีเล็กตรอนสร้างพันธะเดียวกับอะตอมข้างเคียง 3 อะตอม ความยาวพันธะระหว่าง
 อะตอมภายในชั้นประมาณ 0.144 นาโนเมตร อิเล็กตรอนที่เหลืออีกหนึ่งตัวเป็นไพ
 อิเล็กตรอนใช้ในการสร้างพันธะที่ไม่อิ่มตัวคือพันธะคู่ แต่โดยทั่วไปถ่านหรือถ่านกัมมันต์
 จะมีอิเล็กตรอนไม่ครบคู่ อะตอมคาร์บอนบางตัวจึงต้องรับอิเล็กตรอนดังกล่าวไว้ ทำให้มี
 ความหนาแน่นประจุสูง อะตอมดังกล่าวจะปล่อยให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังอะตอมข้าง
 เคียงเพื่อลดความหนาแน่นของประจุ (รูปที่ 2.8) เพื่อให้โครงสร้างเสถียรยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.7 โครงสร้างถ่านกัมมันต์



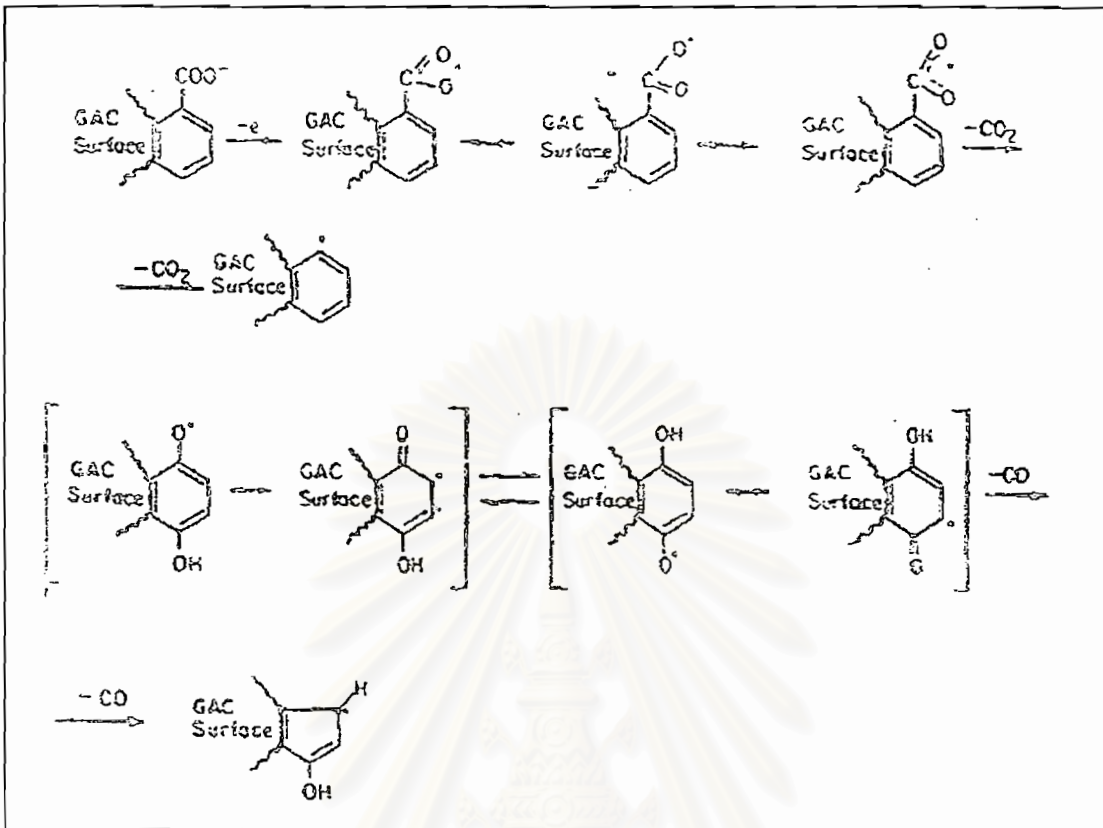
รูปที่ 2.8 การเคลื่อนที่ของไอเล็กตรอนในโครงสร้างของถ่านและถ่านกัมมันต์

Rilry (1947) ได้ศึกษาโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ และได้เสนอโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ไว้ 2 แบบ คือ

1. แบบที่มีลักษณะคล้ายผลึกแกรไฟต์ แต่การวางตัวระหว่างชั้นไม่ตั้งฉากกัน ช่องว่างระหว่างชั้นจึงมีมากทำให้แรงกระทำน้อยกว่าผลึกของแกรไฟต์

2. แบบที่มีลักษณะไม่เป็นระเบียบ คือมีการเชื่อมโยงระหว่างอะตอมที่ไม่อยู่ในตำแหน่งตั้งฉากกัน โครงสร้างแบบนี้จะเสถียรมากขึ้นเมื่อมีอะตอมออกซิเจน เช่นเดียวกับการสร้างเสถียรภาพของถ่านซึ่งไอเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้นแสดงในดังรูปที่

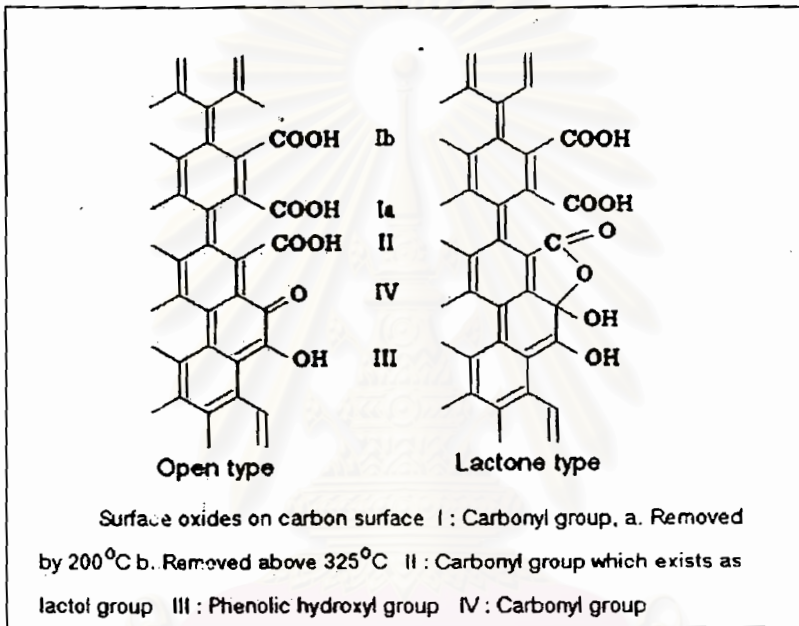
2.9 ประกอบกับอะตอมออกซิเจนมีแรงดึงดูดทางไฟฟ้า จึงช่วยลดความหนาแน่นของอิเล็กตรอนได้ดียิ่งขึ้น



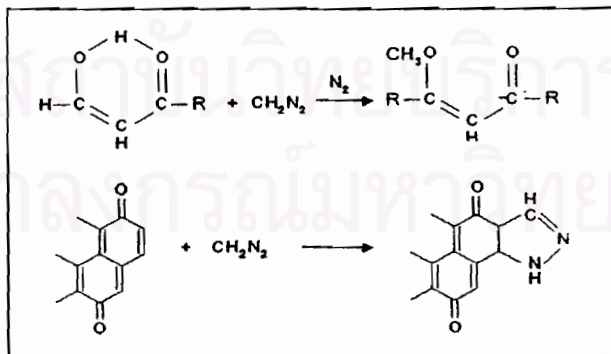
รูปที่ 2.9 การเคลื่อนที่ของโฟอิเล็กตรอนในโครงสร้างของถ่านและถ่านกัมมันต์ที่มีอะตอมของออกซิเจน

ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระในวงโคจรนอกสุดมีไม่ครบ 2 หรือ 8 (Unsaturated valencies) ตามกฎออกเตต จึงพยายามที่จะเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่น เช่น ออกซิเจนในอากาศ หรืออะตอมต่าง ๆ ที่อยู่ในสารตั้งต้น กระบวนการกระตุ้นจะช่วยให้การเกาะกันของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมอื่นกลายเป็นพันธะเคมีที่แข็งแรง มักเกิดกับอะตอมที่อยู่ที่วงอะโรเมติกส์ ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแบบเคมี (Chemisorbtion) กับออกซิเจนที่อุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนเป็นออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงกับอะตอมไฮโดรเจนซึ่งจะไม่หลุดออกแม้จะให้อุณหภูมิสูงถึง 1000 องศาเซลเซียส รวมทั้งสามารถดึงอะตอมของไนโตรเจนออกจากโมเลกุลของแอมโมเนีย ดึงอะตอมซัลเฟอร์ออกจากโมเลกุลของไฮโดรเจนซัลไฟด์ และดึงอะตอมกลุ่มฮาโลเจนออกจากโมเลกุลฮาโลเจน ทั้งที่อยู่ในสภาพแก๊สหรือของเหลวก็ได้ เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันนัลต่าง ๆ บนผิวของถ่านกัมมันต์ ที่สำคัญคือผิวที่เกิดจากอะตอมคาร์บอนและออกซิเจนหรือที่เรียกว่าผิวออกไซด์นั้นมี 2 ชนิด คือ

1. ชนิดที่เป็นกรด มักเกิดในถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิไม่สูงมาก หมู่ฟังก์ชันนัลที่เกาะอยู่บนผิวถ่านกัมมันต์ จะมีสมบัติคล้ายกรดได้แก่ carbonyl , phenols , lactones , aldehydes , ketones , quinones , hydroquinones , anhydride เป็นต้น (รูปที่ 2.10) สามารถดูดซับโมเลกุลที่เป็นเบสได้ (รูปที่ 2.11) โครงสร้างของถ่านกัมมันต์เหล่านี้ค่อนข้างที่จะเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้เล็กน้อย จะสลายตัวเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้มากจะเกิดการสลายตัวให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน



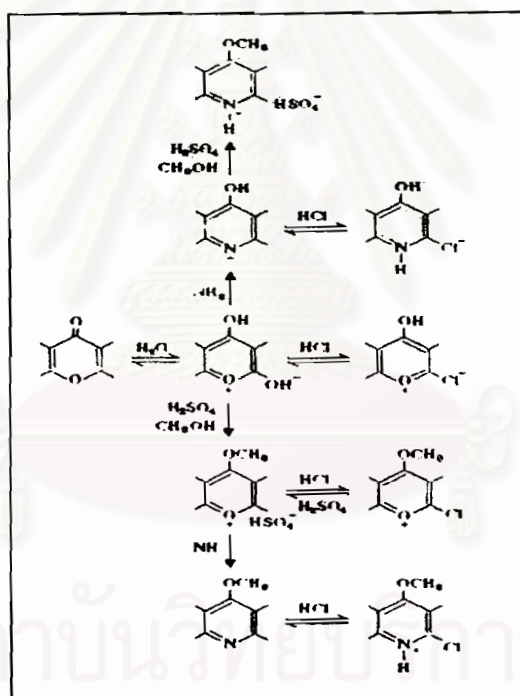
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันนัลที่เป็นกรดบนผิวถ่านกัมมันต์



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างปฏิกิริยาของถ่านกัมมันต์ที่ผิวเป็นกรด

2. ชนิดที่เป็นเบส มักเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส หมู่ฟังก์ชันนัลที่เกาะอยู่บนผิวถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโมเลกุลของกรดได้ดี ได้แก่ hydroxyl , carbonate เป็นต้น ตัวอย่างปฏิกิริยาการดูดซับของถ่าน

กัมมันต์ประเภทนี้แสดงในรูปที่ 2.12 จะสังเกตเห็นว่าเมื่อถ่านกัมมันต์ประเภทนี้เกิดปฏิกิริยาดูดซับกับออกซิเจนและกรดไฮโดรคลอริก จะเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ขึ้นมาด้วย มีผู้อธิบายโดยใช้ทฤษฎีต่าง ๆ เช่น ทฤษฎีโครมีน (Chromene groups) ทฤษฎีออกไซด์ เป็นต้น แต่ปัจจุบันยังไม่เป็นที่ยอมรับ เชื่อกันว่าโมเลกุลของกรดจะถูกดูดซับด้วยแรงทางฟิสิกส์ โปรตอนและไฮดรอกไซด์จะถูกยึดด้วยแรงดูดซับจากผิวของถ่านกัมมันต์ แต่โปรตอนจะถูกแรงกระทำมากกว่าจึงอยู่ใกล้ผิวของถ่านกัมมันต์ แล้วจึงเกิดการดูดซับไฮดรอกไซด์เป็นชั้นที่สอง เมื่อนำมาถ่านกัมมันต์มากกระตุ้นพบว่า เกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงร้อยละ 10 ของปริมาณออกซิเจนที่อยู่ในถ่านกัมมันต์ จึงคาดว่าอะตอมที่อยู่ในถ่านกัมมันต์มี 2 แบบคือ แบบที่สลายตัวกลายเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสและแบบที่สลายตัวไปเป็นสารอื่นที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการดูดซับโมเลกุลกรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็น

2.7.6 ถ่านกัมมันต์ในทางการค้า

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในทางการค้าแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบคือ

1) ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powdered Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ใช้โดยทั่วไปผลิตจากซีลื้อยที่ได้จากไม้ ซึ่งมีขนาดโดยเฉลี่ยของอนุภาคในช่วง 15 – 25 ไมโครเมตร โดยอาจมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ

ลักษณะทางเรขาคณิตประมาณ 0.150 – 0.266 โดยในการออกแบบระบบดูดซับต้องคำนึงถึง

- การเลือกลักษณะของหอดูดซับ
- ลักษณะการผสมเม็ดถ่านกัมมันต์กับผงของเหลว
- ลักษณะการแยกของถ่านกัมมันต์ผงหลังจากที่ดูดซับแล้ว
- วิธีการนำกลับมาใช้ใหม่

ในทางอุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ผง โดยส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในการกำจัดสีในกระบวนการผลิตอาหาร เช่น ใช้ในการผลิตน้ำตาล ผลิตน้ำมัน ผลิตโซเดียมคลอไรด์ และผลิตไวน์ ในภาวะปัจจุบันมีการนำเข้าถ่านกัมมันต์ชนิดผงมาใช้กันอย่างมาก ใช้ในการบำบัดน้ำ ทั้งในการผลิตน้ำดื่มและการบำบัดน้ำเสีย การใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงในระบบของเหลวที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ จะพิจารณาถึงประจุที่ผิวของถ่านกัมมันต์ผงเป็นสำคัญ เนื่องจากประจุที่ผิวจะมีผลต่อขั้นตอนการตกตะกอน ขั้นตอนการกรอง ในการแยกถ่านกัมมันต์ผงออกจากของเหลวหลังจากที่ได้ทำการดูดซับแล้ว โดยขั้นตอนที่นำถ่านกัมมันต์ผงกลับมาใช้ใหม่นั้นค่อนข้างทำได้ยาก จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ถ่านกัมมันต์ผงมากกว่าที่จะผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่

2) ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดที่ใช้กันทั่วไปนั้นมีหลายขนาด โดยขึ้นกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน ในการดูดซับระบบที่เป็นแก๊สมักใช้ถ่านกัมมันต์รูปทรงกระบอกขนาด 4 – 6 มิลลิเมตร ซึ่งการใช้ในระบบที่เป็นแก๊สนั้นคือระบบการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ (solvent recovery) การทำอากาศให้บริสุทธิ์ การทำแก๊สให้บริสุทธิ์ การกำจัดกำมะถันออกจากแก๊ส และใช้ในการแยกระบบแก๊สอื่น ๆ

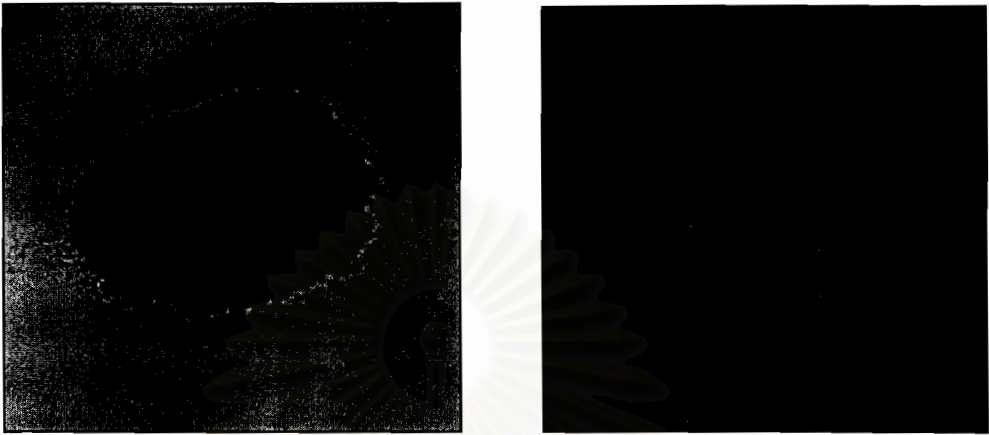
ในระบบที่เป็นของเหลวนั้นมีการใช้ถ่านกัมมันต์มากเช่นกัน เนื่องจาก

- จัดการระบบได้ง่าย
- ในเครื่องปฏิกรณ์มีความดันลดต่ำ
- ทำการล้างเม็ดถ่านได้ง่าย

ซึ่งในภาวะของเหลวนิยมใช้ถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสี การผลิตน้ำตาล กำจัดสารอินทรีย์ กำจัดกลิ่นและสิ่งเจือปนในระบบการผลิตน้ำดื่ม และใช้กันอย่างมากที่สุดในการบำบัดน้ำเสีย

ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดมีการใช้งานมากกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผงเนื่องจากสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ โดยนำถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดที่ใช้แล้วผ่านกระบวนการทาง

ความร้อน หรือกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่แบบอื่น ๆ ซึ่งสามารถทำได้ง่ายกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผง ตัวอย่างถ่านกัมมันต์แสดงดังรูป 2.13



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ (ซ้าย)ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (ขวา) ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด

มีการผลิตถ่านกัมมันต์ทุกแบบทั่วโลกประมาณปีละ 300,000 – 400,000 ตัน มีถ่านกัมมันต์ชนิดผงประมาณ 55 เปอร์เซ็นต์ ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ โดยที่เหลือจะเป็นถ่านกัมมันต์ในรูปแบบอื่น ซึ่ง 80 เปอร์เซ็นต์ของถ่านกัมมันต์ทั้งหมดใช้กับระบบที่เป็นของเหลว และอีก 20 เปอร์เซ็นต์ใช้ในระบบที่เป็นแก๊ส ซึ่งประเทศที่มีการใช้กันมากที่สุดคือ ญี่ปุ่นและสหรัฐอเมริกา โดยมีอัตราการใช้ถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นปีละประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ พบว่าใช้มากในระบบการทำอากาศให้บริสุทธิ์ การทำตัวทำละลายให้บริสุทธิ์ และกระบวนการบำบัดน้ำ นอกจากนี้มีการใช้ในระบบใหม่ ๆ ซึ่งเกี่ยวกับระบบการป้องกันมลพิษจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งระบบใช้ถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่มีดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การนำถ่านกัมมันต์ไปประยุกต์ใช้ในระบบต่าง ๆ

ระบบที่เป็นของเหลว	ระบบที่เป็นแก๊ส
Decolorization	Solvent recovery
Potable water treatment	Dechlorination
Ground water treatment	General air conditioning
Industrial water treatment	Air/Gas purification
Metals recovery (Gold)	Military : respiratory and suiting

ถ่านกัมมันต์เม็ดใช้กันมากในระบบปฏิบัติการที่เป็นเบตนิ่ง เช่นระบบการนำสารละลายกลับมาใช้ใหม่ หรือระบบการบำบัดน้ำ ซึ่งความดันลดในเบตสามารถ

ควบคุมโดยการปรับการกระจายของอนุภาค ประกอบกับถ่านกัมมันต์เม็ดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ โดยผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายจึงมีการใช้กันมาก

อย่างไรก็ตามถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นในตลาดการผลิตถ่านกัมมันต์เม็ด อาจได้รับผลจากการที่ในอุตสาหกรรมบางส่วนได้ใช้ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการผ่านกระบวนการการนำกลับมาใช้ใหม่ ในการพิจารณาถึงการที่จะนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่นั้นจะต้องคำนึงถึง ค่าใช้จ่าย ปริมาณของถ่านกัมมันต์ ชนิดของตัวดูดซับ และเกณฑ์ที่บังคับด้านสิ่งแวดล้อม

ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ใช้จากกระบวนการผลิตน้ำดื่มและกระบวนการบำบัดน้ำเสีย มักจะนำถ่านกัมมันต์นั้นมาทำการบำบัดที่อุณหภูมิสูง ซึ่งอาจทำในเตาเผาแบบหมุน ในขณะที่ผ่านกระบวนการบำบัดเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ถ่านกัมมันต์จะสูญเสียประสิทธิภาพไป 1 – 15 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามเราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพระบบให้เท่าเดิมโดยการนำถ่านกัมมันต์ใหม่เข้ามาใส่เพิ่มเติมในระบบ ซึ่งรูปแบบการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่เป็นที่นิยมมากในอุตสาหกรรมเนื่องจากเสียค่าใช้จ่ายถูกกว่าที่จะซื้อถ่านกัมมันต์ใหม่ ตัวอย่างเช่น การนำถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วมาทำการบำบัดโดยใช้เตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด จะเสียค่าใช้จ่ายเพียง 35 เปอร์เซ็นต์ของค่าใช้จ่ายที่จะซื้อถ่านกัมมันต์ใหม่ แต่ถ่านกัมมันต์แบบผงใช้ในปริมาณน้อยจึงมักนำถ่านกัมมันต์แบบผงที่ใช้แล้วนำไปกำจัดทิ้งโดยการฝังกลบ (Landfill) อย่างไรก็ตามการฝังกลบก็มีข้อจำกัดทางด้านสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีงานวิจัยที่หาวิธีการบำบัดถ่านกัมมันต์แบบผง

2.7.7 การดูดซับของถ่านกัมมันต์

ความจุของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ (Adsorption Capacity) จะขึ้นกับ

- พื้นที่ผิวทั้งหมด (total surface area)
- โครงสร้างรูพรุนในเนื้อถ่าน
- การมีฟังก์ชันนัล (functional group) กรุ๊ปต่าง ๆ บนผิวรูพรุนของถ่าน

ขนาดรูพรุนบริเวณผิวจะเป็นสิ่งหนึ่งที่กำหนดความจุในการดูดซับ โดยโครงสร้างทางเคมีที่ผิวถ่านกัมมันต์ จะมีผลต่อสารที่ถูกดูดซับในกรณีที่มีขั้วหรือไม่มีขั้ว นอกจากนั้นตำแหน่งที่วงโคจรบริเวณผิวถ่านกัมมันต์ จะเป็นสิ่งที่กำหนดชนิดของปฏิกิริยาเคมีที่ผิวถ่านกับโมเลกุลอื่น

ดังนั้น ในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ จึงไม่ได้ขึ้นกับพื้นที่ผิวอย่างเดียว ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวเท่ากันแต่ได้จากการเตรียมที่มีวิธีต่างกัน อาจจะเป็นวิธีการกระตุ้นที่ต่างกันก็สามารถให้ลักษณะการดูดซับ (Adsorption characteristics) ที่ต่างกัน ดังนั้น

ถ่านกัมมันต์ที่ตีจึงควรมีพื้นที่ผิวมากและมีขนาดรูพรุนที่เหมาะสมกับสปีชีส์ (species) ที่ถูกดูดซับ

ที่บริเวณผิวของถ่านกัมมันต์ จะมีผลึกคาร์บอนอยู่ที่บริเวณผิวและขอบของผลึกคาร์บอนโดยจะมีตำแหน่งวาเลนซ์ที่เหลืออยู่จึงทำให้บริเวณดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่ว่องไว จะเห็นได้จากการดูดซับทางเคมีที่บริเวณผิวถ่าน ธาตุที่ถูกดูดซับเข้ามาอาจเป็น ออกซิเจน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน คลอรีน โบรมีน ไอโอดีน และซัลเฟอร์ ซึ่งเป็นการดูดซับแบบซับซ้อนที่บริเวณผิวจึงไม่สามารถเขียนกลไกการดูดซับออกมาในรูปแบบของสมการเคมีได้

เมื่อพิจารณาหมู่ฟังก์ชันนับที่บริเวณผิวของถ่านกัมมันต์ พบว่าหมู่ฟังก์ชันนัลที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบมีความสำคัญมากที่สุด เมื่อตรวจสอบที่บริเวณผิวของคาร์บอนโดยใช้เอกซ์เรย์ พบว่าอะตอมของออกซิเจนจะสร้างพันธะกับอะตอมของคาร์บอน ซึ่งจะมีเป็นจำนวนมากที่บริเวณขอบของโมเลกุลคาร์บอนที่เกาะตัวเป็นแอโรแมติกโดยพันธะระหว่างออกซิเจนและไฮโดรเจนจะมีอิทธิพลมากที่สุดต่อลักษณะพื้นผิวถ่านกัมมันต์ เช่น ความเป็นกรดที่บริเวณผิว การแลกเปลี่ยนไอออนบวก รวมถึงการดูดซับแก๊สและไอที่มีขั้วและไม่มีขั้ว

การที่จะให้เกิดหมู่ฟังก์ชันนัลที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบที่บริเวณผิวถ่านกัมมันต์ ทำได้โดยการออกซิไดซ์ถ่านกัมมันต์ ซึ่งทำได้ทั้งในภาวะแก๊สและภาวะของเหลว จากวิธีการดังกล่าวจะทำให้พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์เป็นได้ทั้งกรด เบส และเป็นกลาง ตัวอย่าง เช่น คาร์บอกซิล ฟีนอลิก ไฮดรอกซิล แล็คโตน และควิโนน ซึ่ง จะได้แบบใดนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการออกซิไดซ์ พบว่าเมื่อมีหมู่ที่แสดงความเป็นกรดที่บริเวณผิวของถ่านกัมมันต์ จะทำให้มีสมบัติในการชอบน้ำมากขึ้น (hydrophilic) และจะมีผลต่อพื้นที่ผิวและลักษณะต่าง ๆ ของถ่านกัมมันต์ จากการมีหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จึงมีบทบาทที่สำคัญต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ ในปัจจุบัน ถ่านกัมมันต์จะมีเทคนิคต่าง ๆ ในการผลิตที่ต่างกัน เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติต่างกัน โดยเทคนิคที่ใช้ต่าง ๆ ในการผลิตพยายามที่จะหาหมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์

2.8 การศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์

การศึกษาสมบัติเฉพาะและพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้รู้และเข้าใจถึงสมบัติเฉพาะทางเคมีและฟิสิกส์ของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้น มีหลายวิธี เช่น

2.8.1 การวิเคราะห์ผลึกภัณฑ์ของแข็งด้วย FT - IR

การวิเคราะห์สารตัวอย่างหรือผลึกภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง (Solid Samples) โดยใช้เครื่องมือฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT - IR) ในกรณีที่ต้องการอินฟราเรดสเปกตรัมของสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง โดยไม่มีผลของตัวทำละลายหรือสารอื่นๆ ผสมอยู่เกี่ยวข้อง นั้นคือมีแต่เฉพาะตัวอย่างเท่านั้น จำเป็นจะต้องทำให้สารตัวอย่างมีลักษณะบางมากๆ เป็นฟิล์ม ที่หนาประมาณ 0.01-0.1 มิลลิเมตร เพื่อให้แสงผ่านได้ เทคนิคต่างๆ ที่จะเลือกใช้ขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของสารนั้นด้วย

เทคนิคที่ใช้คือ KBr-pellet technique ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีประโยชน์มากอีกเทคนิคหนึ่ง โดยใช้สารพวกแอลคาไลเฮไลด์ เช่น โพแทสเซียมโบรไมด์ ที่เป็นของแข็งผสมกับสารตัวอย่าง บดให้เข้ากันในโกรงอะเกต (agate mortar) แล้วนำไปอัดจะได้สารเป็นแผ่นใส สามารถนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ได้เลย ข้อดีของเทคนิคนี้ คือ

1. Background Absorption ของสารประกอบเฮไลด์มีค่าน้อยและใช้ได้ทั่วไป
2. แผ่นใสที่อัดได้ (pellet, disc) อาจจะเก็บไว้ใช้วิเคราะห์ใหม่ได้
3. สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างในระดับไมโครได้

สิ่งที่สำคัญของการใช้เทคนิคนี้คือ โพแทสเซียมโบรไมด์ ควรจะต้องใช้เกรดที่ดีที่สุด อย่างน้อยก็ควรเป็น AR เกรด และจะต้องแห้ง นั่นคือ ควรจะต้องอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำมาเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นที่ใส่ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5) หรือซิลิกาเจลไว้ ก่อนใช้ควรจะต้องบดให้ละเอียดเสียก่อน

2.8.2 Surface Area Measurement (BET method)

The BET equation พัฒนาขึ้นมาโดย Brunauer, Emmett และ Teller (1938) โดยการขยาย langmuir adsorption isotherm ให้เป็นแบบการดูดซับหลายชั้น (multilayer adsorption) ในข้อสมมติฐานของ langmuir บอกว่า สำหรับชั้นแรก อัตราการระเหยเป็นไอ (rate of evaporation) มีค่าเท่ากับอัตราการควบแน่น (rate of condensation) และความร้อนของการดูดซับไม่ขึ้นอยู่กับผิวหน้าที่ไม่ว่าง สำหรับชั้นอื่นที่นอกเหนือชั้นแรก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นจะแปรผันโดยตรงกับเศษส่วนของผิวหน้าชั้นต่ำสุดที่ยังว่างอยู่ อัตราการหลุดออกแปรผันโดยตรงกับปริมาณที่มีอยู่ในชั้นนั้น ความร้อนของการดูดซับสำหรับทุกชั้นยกเว้นชั้นแรกถูกสมมติว่ามีค่าเท่ากับความร้อนของการกลายเป็นของเหลวของก๊าซที่มาดูดซับ จากข้อสมมติฐานทั้งหมดจะให้การ ดังต่อไปนี้

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_0}$$

เมื่อ	V	คือ	ปริมาตรของก๊าซที่ถูกดูดซับที่ความดัน P
	V_m	คือ	ปริมาตรของก๊าซที่ถูกดูดซับเพื่อให้เกิดเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer)
	P_0	คือ	ความดันไออิ่มตัว (saturation pressure) ของก๊าซที่อุณหภูมิทดลอง
	C	คือ	ค่าคงที่

โดยมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนของการดูดซับและค่าความร้อนของการกลายเป็นของเหลวของก๊าซ

$$C = e^{(q_1 - q_L)/RT}$$

เมื่อ	q_1	คือ	ค่าความร้อนของการดูดซับของการเกิดชั้นแรก
เมื่อ	q_L	คือ	ค่าความร้อนของการกลายเป็นของเหลวของก๊าซที่มาดูดซับ บนชั้นอื่นทั้งหมด

จากสมการ เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $P/V(P_0 - P)$ กับ P/P_0 จะให้กราฟเส้นตรงที่มีความชัน (slope) เท่ากับ $(C-1)/V_m C$ และจุดตัด (intercept) เท่ากับ $1/V_m C$ จากค่าความชันและจุดตัดสามารถใช้หาค่า V_m และ C ได้ สมการของ BET สามารถใช้ได้กับการดูดซับจำนวนมากที่มีค่า P/P_0 อยู่ระหว่าง 0.05-0.3 และในช่วงนี้ปกติจะใช้สำหรับวัดค่าพื้นที่ผิว

โดย Inert vapor ใด ๆ ก็ตามที่สามารถควบแน่นได้ สามารถใช้ในวิธีของ BET แต่เพื่อให้ได้ผลการวัดที่น่าเชื่อถือโมเลกุลควรจะเล็กและมีลักษณะเป็นวงกลม จึงนิยมใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวดูดซับและใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นตัวให้ความเย็น เนื่องจากมีราคาถูกและมีความบริสุทธิ์สูง

โดยเมื่อทราบ V_m แล้วค่าพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

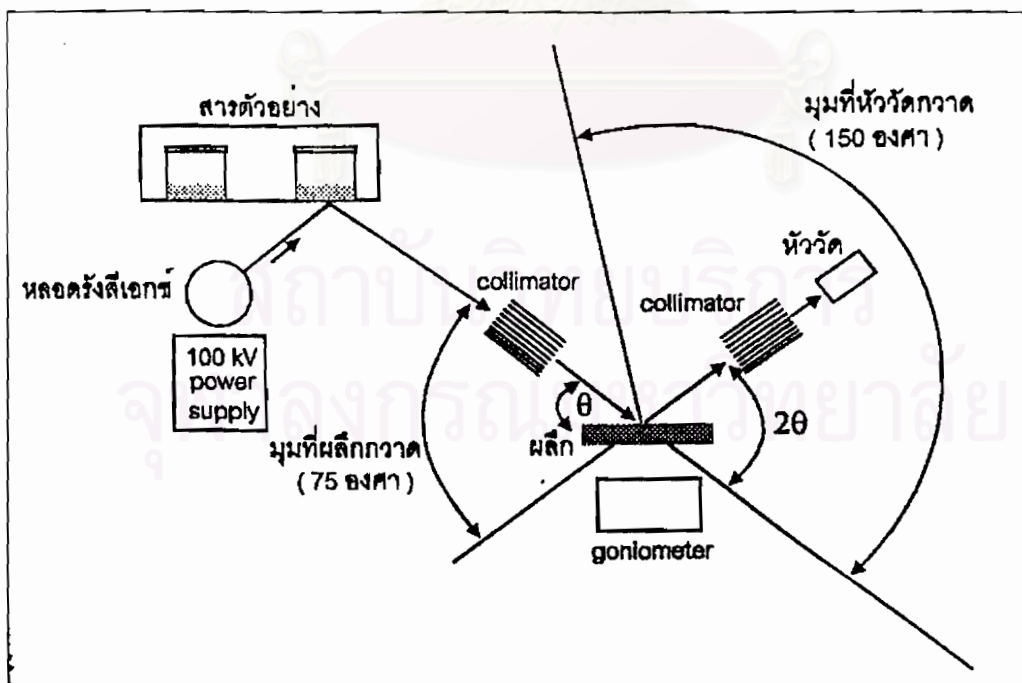
$$S = \frac{N \delta V_m}{M_v}$$

เมื่อ	S	คือ	พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
	N	คือ	เลขอะโวกาโดร (6.02×10^{23} molecules/mole)
	δ	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของก๊าซไนโตรเจน (16.2×10^{-20} m ²)
	M_v	คือ	molar volume at STP (22414 cm ³ /mole)

2.8.3 X-Ray Fluorescence (XRF)⁽⁵⁾

เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์มักนิยมเรียกย่อๆว่า XRF ซึ่งย่อมาจาก X-Ray Fluorescence ในภาษาอังกฤษยังมีอีกชื่อหนึ่งคือ X-Ray spectrometry ซึ่งเป็นชื่อเดิมที่ใช้มาตั้งแต่ต้นสมัยที่เพิ่งเริ่มศึกษาเกี่ยวกับรังสีเอกซ์แต่ในปัจจุบันก็ยังใช้กันอยู่ ทำให้บ่อยครั้งอาจพบว่ามีการใช้สลับกันไปมาระหว่าง 2 คำนี้

เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์เป็นการศึกษาทางสเปกโทรสโคปีที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยพลังงานวิธีนี้ถูกใช้ในการตรวจสอบธาตุที่เป็นองค์ประกอบทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ หลักการของเทคนิคนี้โดยการกระตุ้นสารตัวอย่างด้วยรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาหรืออนุภาค เช่นอิเล็กตรอนหรือโปรตอน ทำให้อะตอมของธาตุต่างๆถูกกระตุ้นและมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์ที่เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุ (characteristic x-ray) ซึ่งรังสีที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในช่วง 1-60 keV โดยชนิดของ XRF แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่คือ เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายคลื่น (Wavelength Dispersive X-Ray fluorescence) นิยมเรียกสั้นๆว่า WDXRF และอีกประเภทหนึ่งคือ เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray fluorescence) นิยมเรียกสั้นๆว่า EDXRF ทั้งสองประเภทนี้จะใช้ศึกษาในสิ่งเดียวกันแต่จะแตกต่างกันในแง่ของการออกแบบเครื่องมือ ซึ่งรูปแบบทั่วไปของตำแหน่งการวางหลอดรังสีเอกซ์และสารตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.14



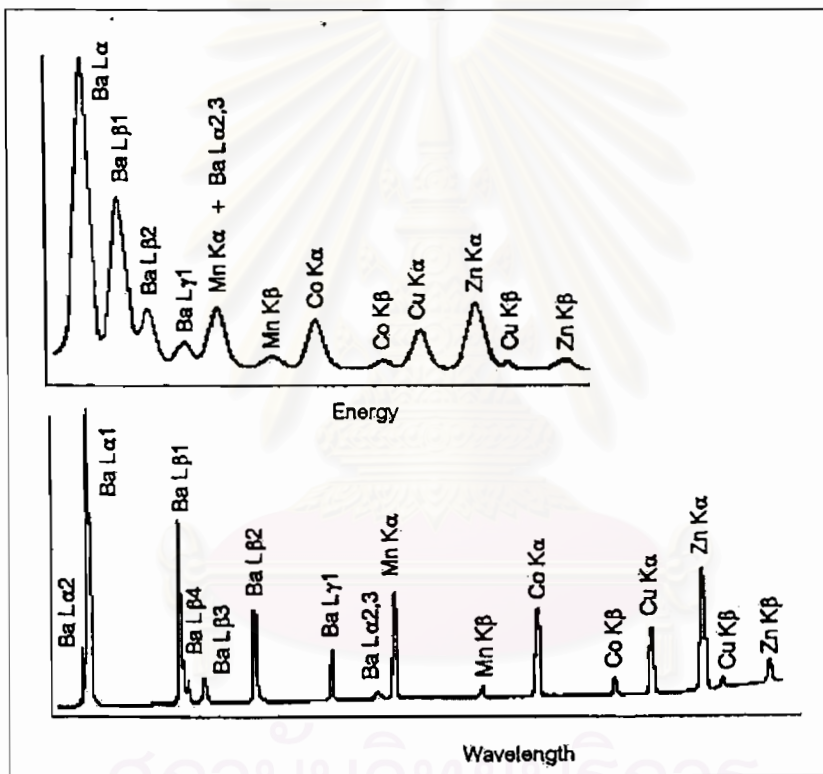
รูปที่ 2.14 รูปแบบทั่วไปของตำแหน่งการวางหลอดรังสีเอกซ์สารตัวอย่างและหัววัดในเครื่องแบบ WDXRF

จากสมการของแบรกก์ (Bragg's equation)

$$n \lambda = 2d \sin \theta$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าค่า d และ θ จะเป็นตัวกำหนดค่าความยาวคลื่นสูงสุดและต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ สำหรับมุม $\theta = 90$ องศาจะให้ค่า \sin มากที่สุดโดย $\sin 90 = 1$ ดังนั้นค่า $\lambda_{\max} = 2d$ และในส่วนของมุม $\theta = 5$ องศาจะให้ค่า \sin น้อยที่สุด(เนื่องจากที่ $\theta = 0$ จะทำให้ $\sin 0 = 0$ ดังนั้นจึงใช้ค่า θ เข้าใกล้ 0 คือ 5 แทน) โดย $\sin 5 = 0.1$ ดังนั้นค่า $\lambda_{\min} = 0.2d$

โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธี(WDXRF, EDXRF)นั้นไม่แตกต่างกันสามารถใช้ในการตรวจสอบธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ได้เช่นเดียวกัน โดยตัวอย่างกราฟที่ได้จากวิธี WDXRF และ EDXRF แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบกราฟสเปกตรัมจาก WDXRF และ EDXRF

โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธี(WDXRF, EDXRF)นั้นไม่แตกต่างกันสามารถใช้ในการตรวจสอบธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ได้เช่นเดียวกัน โดยตัวอย่างกราฟที่ได้จากวิธี WDXRF และ EDXRF

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jia G. และคณะ (1999)⁽⁶⁾ ศึกษาผลของความเข้มข้น เวลา และการกระตุ้นทางเคมีที่มีผลต่อสมบัติเฉพาะตัวและการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์ (oil-palm stone) ที่ อิมเพรกเนตด้วย กรดซัลฟิวริก และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่า หลังจากทำการคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แล้วความหนาแน่นของแข็ง (solid density) เพิ่มขึ้น แต่ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) ลดลง โดยเวลาที่เหมาะสมในการอิมเพรกเนต คือ 12-24 ชั่วโมง และ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกมากขึ้นทำให้ พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นกลับทำให้ พื้นที่ผิว และ ปริมาตรรูพรุนลดลง ถ่านกัมมันต์ที่อิมเพรกเนตด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สามารถดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่อิมเพรกเนตด้วยกรดซัลฟิวริกแต่ดูดซับแก๊สแอมโมเนียได้น้อย แม้ว่าจะมีสมบัติที่เหมือนกันไม่ว่าจะเป็นพื้นที่ผิวและพื้นที่รูพรุนขนาดเล็ก ดังนั้น ตัวที่แสดงถึงปริมาณการดูดซับไม่ใช่แค่สมบัติทางกายภาพ แต่จะเกี่ยวข้องกับสมบัติพื้นที่ผิวทางเคมีด้วยและการอิมเพรกเนตด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟิวริกเหมาะสำหรับการใช้เป็นตัวดูดซับแก๊สที่เป็นกรดและเบสออกตามลำดับ

Foad A. และคณะ(2000)⁽⁷⁾ ได้ศึกษาในเรื่องการดูดซับและปฏิกิริยาออกซิเดชันของ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่มีการเติมไนโตรเจนลงไป ซึ่งได้ศึกษาโดยใช้ถ่านไม้เตมยูเรียและให้ความร้อนที่ 450 °C และ 950 °C โดยศึกษาเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้าทั่วไปซึ่งผลที่ได้พบว่ามีความจุ H₂S ได้ใกล้เคียงกันแต่ถ่านกัมมันต์ที่ได้รับการปรับปรุงมีอัตราในการเปลี่ยน H₂S ไปเป็นสารกลุ่มซัลเฟอร์ที่ละลายน้ำได้มากกว่า เนื่องจากการกระจายตัวของสารเบสไนโตรเจนที่อยู่ในรูพรุนขนาดเล็กของถ่านกัมมันต์ที่ออกซิไดซ์ HS⁻ เป็นอนุมูลอิสระของซัลเฟอร์ตามมาด้วยการเกิดขึ้นของ SO₂ และ H₂SO₄

Chong Lua A. และคณะ (2001)⁽⁸⁾ ศึกษาการเตรียมและสมบัติเฉพาะตัวของ ถ่านกัมมันต์ (oil-palm stone) โดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์พบว่า ภาวะที่ดีที่สุดของการเตรียมถ่านกัมมันต์ คือ การไพโรไลซิสถ่านซาร์ที่ 600 องศาเซลเซียสและกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที โดยทำให้พื้นที่ผิวมีรูพรุนขนาดเล็กและเป็นรูปแบบสัณฐานเพิ่มขึ้นและการศึกษาการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์พบว่า ความเข้มข้นแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ 2000 พีพีเอ็ม มีปริมาณการดูดซับได้ดีที่สุด และ

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้การดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลดลงและตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจะใช้เวลาในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์น้อยกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เท่ากัน

Andrey B. และคณะ(2002)⁽⁹⁾ ได้ทำการศึกษาการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ ซึ่งศึกษาผลในด้านผลของหมู่ฟังก์ชันนัลของไนโตรเจน และขนาดรูพรุน โดยในการศึกษา ผู้วิจัยได้มุ่งไปในประเด็นรูปแบบของหมู่ฟังก์ชันนัลของไนโตรเจนและขนาดรูพรุนในปฏิกิริยาการดูดซับและออกซิเดชันของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าไนโตรเจนในรูปแบบ quaternary และ pyridinic เป็นรูปแบบไนโตรเจนที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้มากขึ้น ซึ่งจะเกิดขึ้นในรูพรุนขนาดเล็ก

Young-Whan L. และคณะ (2003)⁽¹⁰⁾ ศึกษาสมบัติการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่อิมเพรกเนตด้วย โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์บนถ่านกัมมันต์ พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้การดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลดลงแต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อัตราเร็วของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะทำให้การดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มากขึ้นและเมื่ออิมเพรกเนตด้วยโพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์บนถ่านกัมมันต์ทำให้มีการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพิ่มขึ้น 13.2 เท่าของถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้อิมเพรกเนต

Jia G. และคณะ (2003)⁽¹¹⁾ ศึกษาการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ใช้เบดนิ่งที่ภาวะแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เข้มข้น 2000 พีพีเอ็ม อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและ ความดัน 1 บาร์ โดยศึกษาผลของความยาวเบดนิ่ง อัตราการไหลของแก๊สผสม ขนาดของตัวดูดซับและ การอิมเพรกเนตที่มีผลต่อเวลาผ่านทะลุ ความยาวเขตการถ่ายโอนมวล (L_{MTZ}) ความสามารถในการดูดซับ (W) อัตราการดูดซับคงที่ (k) พบว่า เมื่อความยาวของคอลัมน์เพิ่มขึ้นจะทำให้เวลาผ่านทะลุ และ เวลาที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้นโดย อัตราการไหลของแก๊สผสม เพิ่มขึ้นจะทำให้เวลาผ่านทะลุและปริมาณการดูดซับลดลงแต่ความยาวของเขตการถ่ายโอนมวล และ อัตราการดูดซับคงที่เพิ่มขึ้น และ ขนาดของตัวดูดซับมีผลต่อเส้นโค้งผ่านทะลุ โดย ขนาดของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจะทำให้เวลาผ่านทะลุ และความยาวของเขตการถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้นแต่ อัตราการดูดซับคงที่ลดลงโดยถ่านกัมมันต์ที่อิมเพรกเนตด้วยโพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 10 มีปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และ เวลาผ่านทะลุสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่อิมเพรกเนตด้วยกรดฟอสเฟอริกเข้มข้นร้อยละ 40, โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 40 และไม่มีการอิมเพรกเนต

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 รูปแบบการศึกษา

การศึกษากการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีจุดประสงค์ เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารที่อิมเพกเนตบนถ่านกัมมันต์ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮโอไดด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งมีผลต่ออัตราการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และศึกษาภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้อัตราการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีตัวแปรดังนี้ อัตราการไหลของแก๊สผสม ชนิดของคอสติก และอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของคอสติกต่อถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมเพื่อเป็นข้อมูลในการนำไปใช้จริงในระดับอุตสาหกรรม

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 และ 3.75 เซนติเมตร
2. เครื่อง X-Ray Fluorescent
3. เครื่องวิเคราะห์การดูดซับแก๊ส (BET)
4. ชุดทดสอบการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์
5. เครื่อง FT-IR
6. เตาอบ
7. ตะแกรงคัดขนาด

3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. ถ่านกัมมันต์ (กะลามะพร้าว)
2. โพแทสเซียมไฮโอไดด์ เกรด Analytical Reagent
3. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เกรด Analytical Reagent
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกรด Analytical Reagent
5. 6% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เกรด Analytical Reagent
6. 80% ไฮโซโพรพานอล เกรด Analytical Reagent
7. 0.01N แบริยมคลอไรด์ เกรด Analytical Reagent
8. แก๊สไนโตรเจน (TIG)
9. แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (TIG)
10. ทอรินอินดิเคเตอร์

3.4 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นถ่านกัมมันต์ได้มาจาก บริษัท ซีจีซี จำกัด มีลักษณะเป็นของแข็ง สีดำ ขนาดอนุภาค 2.36 มิลลิเมตร- 750 ไมโครเมตร, ความหนาแน่น 0.4863 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3.5 ขั้นตอนการวิจัย

3.5.1 การวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับ

3.5.1.1 การหาพื้นที่ผิวโดยเทคนิคการดูดซับแก๊ส (BET method)

3.5.1.2 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของคอสติก และองค์ประกอบบนถ่านกัมมันต์

3.5.2 การเตรียมตัวดูดซับ

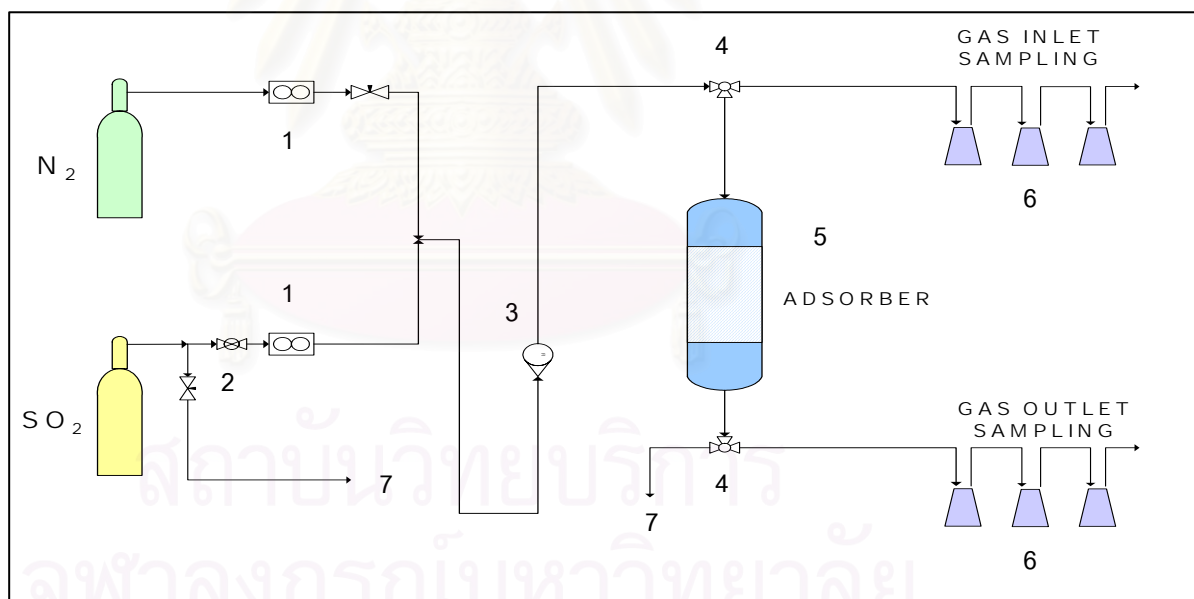
คำนวณปริมาณคอสติก (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์) และถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้ในแต่ละความเข้มข้นที่ต้องการ จากนั้นทำการชั่งคอสติก และถ่านกัมมันต์ที่ต้องการแล้วทำการละลายคอสติกที่ต้องการโดยน้ำกลั่น หลังจากนั้นทำการผสมคอสติกกับถ่านกัมมันต์ ทำการรวน 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสจนแห้ง แล้วทำการอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน จากนั้นนำตัวดูดซับคอสติกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ไปทดสอบสมบัติเฉพาะต่อไป

3.5.3 การดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบเบดนิ่ง

3.5.3.1 ขั้นตอนทำการทดลอง

1. อบถ่านกัมมันต์ที่เตรียมไว้แล้วที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 1 คืน
2. ชั่งถ่านกัมมันต์หนัก 1 กรัม ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง
3. ใส่เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (รูป 3.2)ไปต่อกับชุดการทดลอง ดังรูป 3.1 และรูป 3.5
4. ผ่านแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาที เข้าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อัตราการไหล 300 มิลลิลิตรต่อนาทีเพื่อไล่อากาศ
5. ผสมแก๊สไนโตรเจนและแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (รูป 3.3) ให้อัตราการไหลแก๊สผสมที่ 300 มิลลิลิตรต่อนาทีลงสู่อุปกรณ์ชั่งตัวอย่างแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (รูป 3.4) ที่ซึ่งบรรจุ 6% สารละลาย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จับเวลา 10 นาที

6. นำสารละลาย 6% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ทำปฏิกิริยากับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไปไตเตรตหาปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยวัดปริมาณความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ขาเข้าโดยวิธี Emeryville (ภาคผนวก ข) ทำจนกว่าแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ขาเข้ามีความเข้มข้น 2000 พีพีเอ็ม
7. ผ่านแก๊สผสมเข้าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งให้อัตราการไหลแก๊สผสมที่ 300 มิลลิลิตรต่อนาที ทำการเก็บแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ไม่ถูกดูดซับทุก 10 นาที โดยแก๊สที่ออกจะผ่านเข้า 6% สารละลาย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากนั้นนำมาไตเตรตด้วย 0.01 N แบเรียมคลอไรด์ จนถึงจุดยุติและคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยทำการเก็บแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จนกว่าปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ขาเข้าเท่ากับขาออก คือ 2000 พีพีเอ็ม
8. เปลี่ยนถ่านกัมมันต์ที่อิ่มเฟรกเนทด้วยคอสติกและความเข้มข้นของคอสติกที่ต้องการแล้วทดลองเช่นเดิม
9. ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งสำหรับถ่านกัมมันต์ความเข้มข้นนั้น ๆ



รูปที่ 3.1 ชุดทดสอบการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

- | | |
|--------------------|-------------------------------------|
| 1. Mass flow | 5. Reactor diameter 1.5 and 3.5 cm. |
| 2. Valve | 6. Sampling gas |
| 3. Rotameter | 7. Ventilation |
| 4. three way valve | |



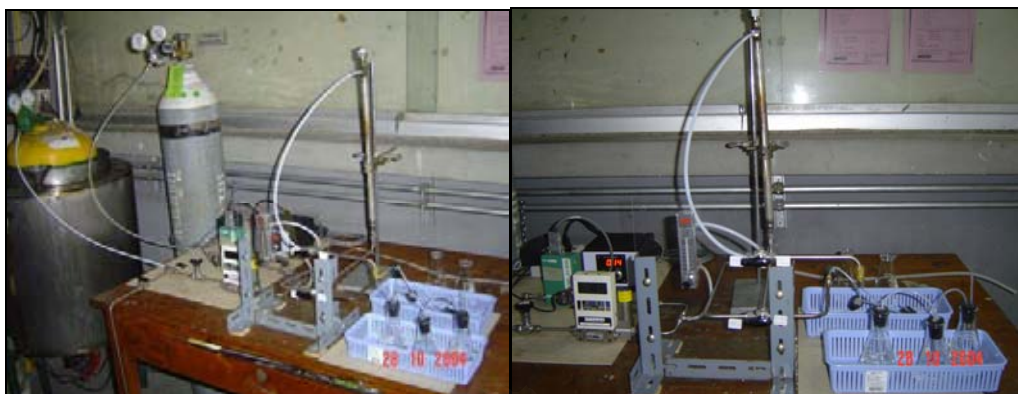
รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง



รูปที่ 3.3 แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจน



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ชักตัวอย่างแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์



รูปที่ 3.5 ชุดทดสอบการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คือ

1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง 1.5 และ 3.75 เซนติเมตร
2. ขนาดอนุภาคถ่านกัมมันต์บริสุทธิ์ 750 ไมโครเมตร – 1.18 มิลลิเมตร, 1.18 - 2.0 มิลลิเมตร และ 2.0 - 2.36 มิลลิเมตร
3. ชนิดของคอสติก (โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และ โพแทสเซียมไอโอไดด์)
4. อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของคอสติกกับถ่านกัมมันต์
5. อัตราการไหลของแก๊สผสม

3.5.4 การทดสอบสมบัติเฉพาะตัว

3.5.3.1 การวิเคราะห์ผลึกภัณฑ์ของแข็งด้วย FT - IR

1. วิธีทำ KBr-pellet ใช้สารตัวอย่างประมาณ 2.0 มิลลิกรัม ผสมกับ KBr ประมาณ 100-200 มิลลิกรัม
2. ใส่ลงใน ball mill แล้วบดให้ละเอียดจนเป็นเนื้อเดียวกัน ตามปกติการทำ KBr-pellet ควรให้มีสารตัวอย่างเข้มข้นประมาณ 0.1-2%
3. นำไปใส่ในเครื่องอัด แล้วนำตัวอย่างที่เป็น pellet ออกมาอย่างระมัดระวัง เพราะอาจแตกหรือหักได้
4. จากนั้นใส่ลงใน disc holder ของเครื่องมือฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

3.5.3.2 วิธีการวิเคราะห์การดูดซับแก๊ส (BET method)

1. ชั่งน้ำหนักตัวรองรับประมาณ 40 มิลลิกรัม
2. บรรจุตัวรองรับที่ชั่งแล้วลงใน sample cell

3. ติดตั้ง sample cell ที่ Sample Preparation Stations โดยทำการ Out gas ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เพื่อทำความสะอาดตัวรองรับ
4. ทำการ Out gas จนกว่าจะมีปริมาณสารระเหยออกมาไม่เกิน 20 ไมโครลิตร ต่อนาที
5. นำ Sample Cell ไปติดตั้งที่ Analysis Station ทำการติดตั้งค่า P/P_0 ให้มีค่า อยู่ระหว่าง 0.05-0.3 เพื่อให้เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวด้วยแก๊สไนโตรเจนที่ อุณหภูมิในการดูดซับเท่ากับ 77.4 K เพื่อหาพื้นที่ทั้งหมดของตัวรองรับ
6. เครื่อง BET จะทำการวัดความดันที่เปลี่ยนไปโดยอัตโนมัติ
7. ทำการบันทึกพื้นที่ผิว



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

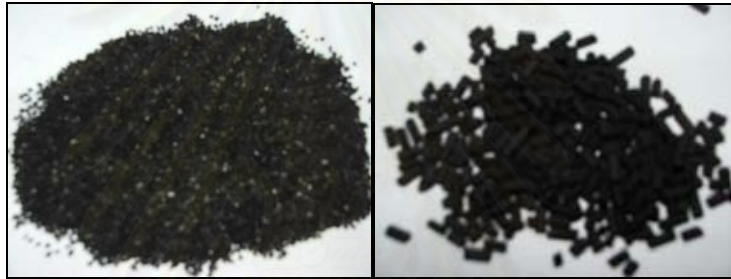
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับ

ผลการวิเคราะห์ตัวดูดซับแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

4.1.1 การหาพื้นที่ผิวโดยเทคนิคการดูดซับแก๊ส (BET method)

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองนี้นำมาจาก บริษัท ซีจีซี จำกัด ลักษณะของถ่านกัมมันต์แสดงดังรูป 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะของถ่านกัมมันต์

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว พบว่า ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวทั้งหมด $772.13 \text{ m}^2/\text{g}$ สมบัติความมีพื้นที่ผิวสูงนี้ จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุที่สามารถดูดซับแก๊สได้

4.2.2 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของคอสติค และองค์ประกอบบนถ่านกัมมันต์

การเตรียมตัวดูดซับจะใช้คอสติค (ไซเดียมไฮดรอกไซด์, โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, โพแทสเซียมไอโอไดด์) อิมเพรกเนตลงบนถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จากนั้นนำตัวดูดซับที่เตรียมได้มาทดสอบหาความเข้มข้นของคอสติคที่เตรียมได้โดยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF)

ตาราง 4.1 การวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์ที่อิมเพรกเนตด้วยคอสติก โดยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF)

ตัวดูดซับ	% concentration by weight		
	K	Na	I
activated carbon	1.406	0.021	-
3% KOH/activated carbon	3.515	0.092	-
5% NaOH/ activated carbon	1.466	4.716	-
10% KI/ activated carbon	10.015	0.124	6.461
commercial	5.732	0.085	14.231

ผลการวิเคราะห์โดยวิธี X-Ray Fluorescence พบว่า ถ่านกัมมันต์มีส่วนประกอบของคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลักประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบของ ออกซิเจน แคลเซียม โพแทสเซียม และโซเดียม ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ได้ดีขึ้น (ภาคผนวก ค) และจากตาราง 4.1 พบว่า ถ่านกัมมันต์หลังจากนำไปอิมเพรกเนตด้วยคอสติกแล้ว ปริมาณคอสติกบนพื้นผิวจะเพิ่มมากขึ้น และปริมาณคอสติกที่เพิ่มขึ้นมีค่าสอดคล้องกับความเข้มข้นที่นำมาอิมเพรกเนต

4.2 อิทธิพลของปริมาณคอสติกที่มีต่อตัวดูดซับ

4.2.1 วิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

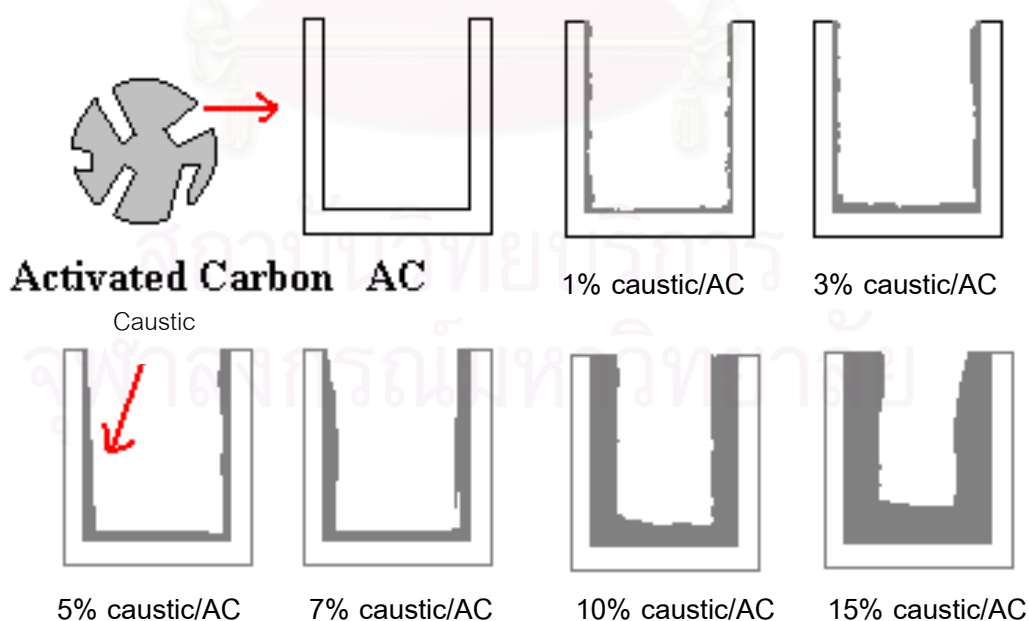
นำถ่านกัมมันต์ที่อิมเพรกเนตคอสติกมาวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวโดยวิธีการวิเคราะห์การดูดซับแก๊ส (BET) ได้ผลการทดลอง ดังตาราง 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงพื้นที่ผิวที่ความเข้มข้นต่างๆของคอสติกอิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์โดยเทคนิคการวิเคราะห์การดูดซับแก๊ส (BET method)

ตัวดูดซับ	พื้นที่ผิว (m^2/g)
AC	772.13
1%KI/AC	718.69
5%KI/AC	719.24
10%KI/AC	641.44

ตัวดูดซับ	พื้นที่ผิว (m^2/g)
1% KOH/AC	770.28
15% KI/AC	592.39
3% KOH/AC	758.08
5% KOH/AC	754.54
7% KOH/AC	691.61
10% KOH/AC	580.56
1% NaOH/AC	754.54
5% NaOH/AC	727.27
10% NaOH/AC	654.76

จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของคอสติกที่อิมเพกเนตบนถ่านกัมมันต์แสดงในตาราง 4.2 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคอสติกเข้าไปที่พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะทำให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวดลดลง เนื่องมาจากความเข้มข้นของคอสติกที่เติมลงไปมากขึ้นจะเข้าไปบดบังหรือเคลือบอยู่ภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ จึงทำให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ลดลง โดย จากงานวิจัยของ Jia G. และคณะ (1999)⁽¹²⁾ เมื่อทำการอิมเพกเนตโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนถ่านกัมมันต์ พบว่า พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ลดลงซึ่งมีแนวโน้มเดียวกับการทดลอง แสดงแบบจำลองการเคลือบของคอสติกภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แบบจำลองการเคลือบของคอสติกภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์

4.2.2 วิเคราะห์ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของตัวดูดซับ

ในการทดลองทำการวิเคราะห์ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของตัวดูดซับตามวิธี ASTM D 2854 ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงความหนาแน่นเชิงปริมาตรของตัวดูดซับตามวิธี ASTM D 2854

เปอร์เซ็นต์ คอสติก	Bulk density(g/cm ³)		
	KI	KOH	NaOH
0	0.4863	0.4863	0.4863
1	0.4812	0.4812	0.4882
3	0.4966	0.4966	0.4908
5	0.5276	0.5246	0.4988
7	0.5246	0.5276	0.5345
10	0.5262	0.5262	0.5419
15	0.5570	-	-

จากตาราง 4.3 พบว่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของตัวดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกชนิดของด่างที่ใช้ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคอสติกเข้าไปที่พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากคอสติกจะเข้าไปอยู่ภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ทำให้น้ำหนักของถ่านกัมมันต์มีค่ามากขึ้น ในขณะที่ปริมาตรของถ่านกัมมันต์ยังคงที่ ดังนั้นน้ำหนักรวมจึงเพิ่มขึ้น

4.3 ผลการศึกษาการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยใช้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งทำการเจือจางด้วยแก๊สไนโตรเจนให้มีความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เข้มข้น 2000 พีพีเอ็ม ซึ่งค่าความเข้มข้นนี้มีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นที่ปล่อยออกมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

การศึกษากการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยผ่านแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่บรรจุด้วยตัวดูดซับ จากนั้นแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ถูกตรวจวัดโดยวิธี Emeryville โดยตัวแปรที่ใช้ศึกษากการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ขนาดอนุภาคถ่านกัมมันต์ ชนิดของเบส อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของเบสกับถ่านกัมมันต์ และอัตราการไหลของแก๊สผสม ซึ่งถ่านกัมมันต์

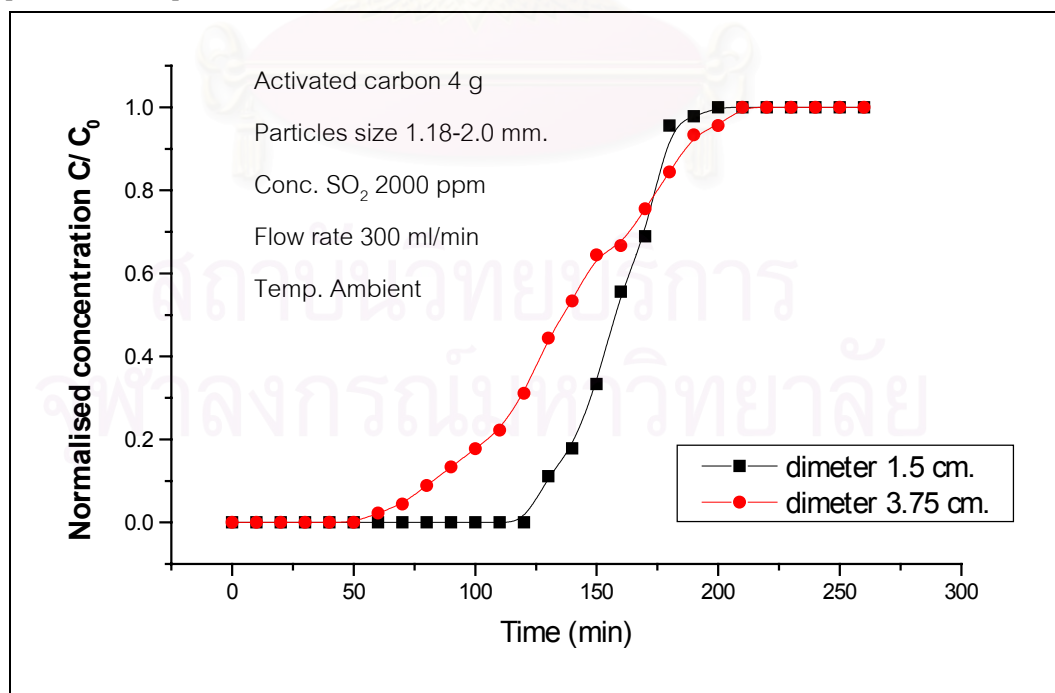
ที่ดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้วจะนำมาวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณซัลเฟอร์ที่เกิดขึ้นโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์หลังจากการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FT-IR) ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าหมู่ฟังก์ชันเกิดขึ้นเป็นอย่างไร

4.3.1. การศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งเป็น 1.5 และ 3.75 เซนติเมตร โดยทำการศึกษาที่ภาวะต่างๆ ดังนี้

ปริมาณถ่านกัมมันต์บริสุทธิ์	4	กรัม
ความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์	2000	พีพีเอ็ม
อัตราการไหลของแก๊สผสม	300	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
ขนาดอนุภาค	1.18 – 2.0	มิลลิเมตร
ภาวะทดลอง อุณหภูมิ	25	องศาเซลเซียส
ความดันเกจ	1	บาร์

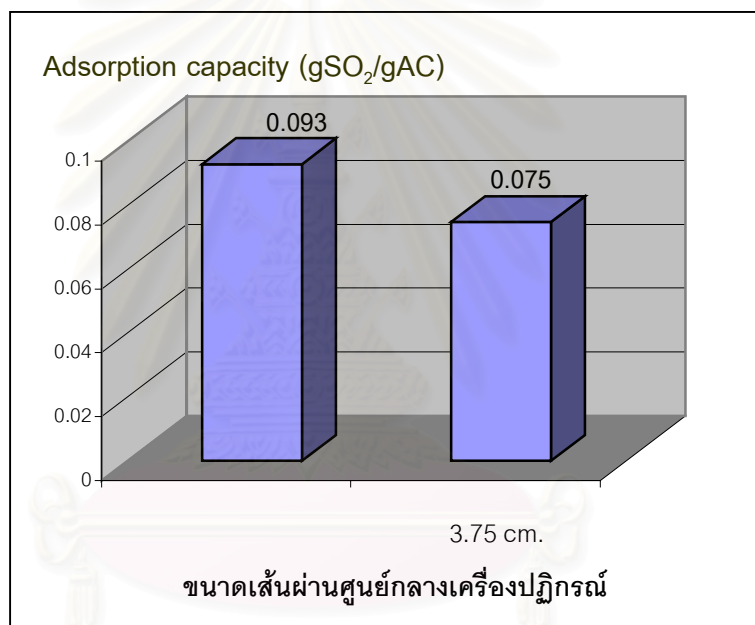
การเปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ต่างกัน แสดงดังรูป 4.3 และค่าที่เราสนใจที่ได้จากเส้นโค้งทะลุผ่าน (Breakthrough curve) โดยค่าเวลาทะลุผ่าน (Breakthrough time) คือ ค่าที่แสดงถึงเวลาที่ตัวดูดซับสามารถดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบแสดงเส้นโค้งทะลุผ่าน (Breakthrough curve) ของการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ต่างกัน

จากรูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ฆาออกต่อแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ฆาเข้ากับเวลา โดยจากผลการทดลองจะเห็นว่า เวลาทะลุผ่านที่ได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1.5 เซนติเมตร คือ 120 นาที และเวลาทะลุผ่านที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 3.75 เซนติเมตร คือ 50 นาที ดังนั้น เครื่องปฏิกรณ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3.75 เซนติเมตร ใช้เวลาทะลุผ่าน เร็วกว่า เครื่องปฏิกรณ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.5 เซนติเมตร ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ จะทำให้การแพร่ผ่านของแก๊สเร็วกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดเล็ก

เมื่อนำค่าที่ได้จากกราฟเส้นโค้งทะลุผ่าน ไปคำนวณหาปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ต่างกันมาเปรียบเทียบกันได้ ดังรูป 4.4



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ต่างกันโดยใช้ตัวดูดซับ คือ ถ่านกัมมันต์บริสุทธิ์

เมื่อพิจารณาค่า Adsorption capacity ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณของซัลเฟอร์ที่ตัวดูดซับสามารถดูดซับได้ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ

โดยทำการศึกษานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ต่างกันมีผลต่อปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์ แสดงดังรูป 4.4 พบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 3.75 เซนติเมตร มีปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คือ 0.075 กรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อ 1 กรัมถ่านกัมมันต์ และ เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด

1.5 เซนติเมตรมีปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คือ 0.093 กรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อ 1 กรัมถ่านกัมมันต์

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ต่างกัน พบว่า เครื่องปฏิกรณ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กจะมีปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ มากกว่า เครื่องปฏิกรณ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดเล็กมีความสูงของตัวดูดซับในเบตติ่งมากกว่า ทำให้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีเวลาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์มากกว่า จึงมีโอกาสที่แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะเลือกสัมผัสกับตัวดูดซับมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงขึ้นจึงทำให้ปริมาณในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มากขึ้น

ดังนั้น ในการทดลองเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตติ่งที่ใช้ในการศึกษาชนิดของคอสติกและความเข้มข้นของคอสติกที่อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์ คือ เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตติ่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร

4.3.2. การศึกษาขนาดอนุภาคถ่านกัมมันต์

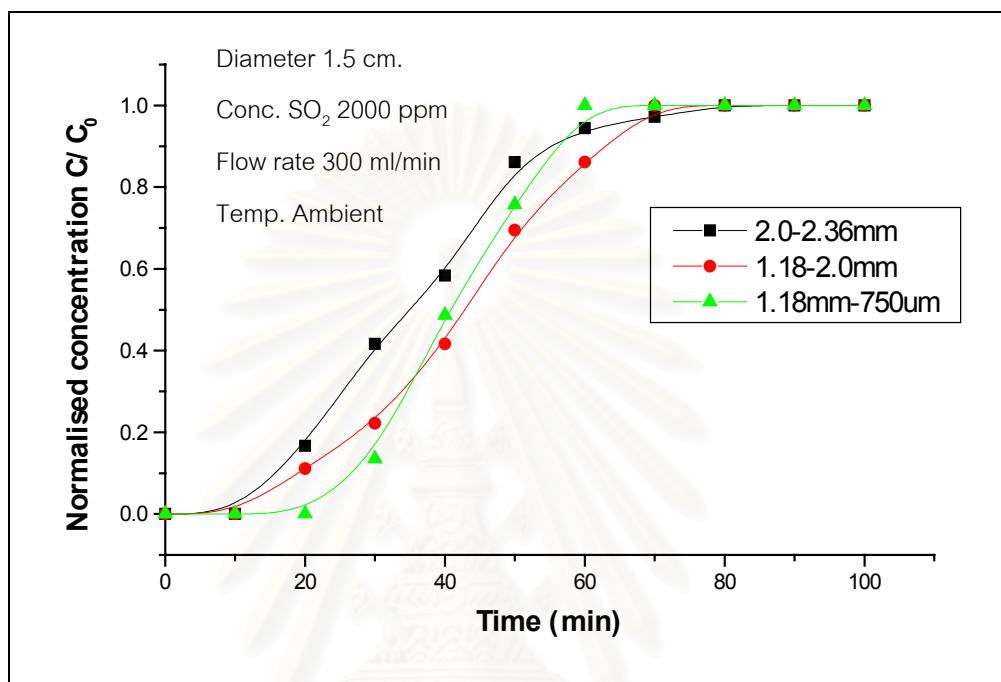
งานวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์บริสุทธิ์ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตติ่งเป็น 750 ไมโครเมตร-1.18 มิลลิเมตร 1.18 –2.0 มิลลิเมตร และ 2.0 – 2.36 มิลลิเมตร โดยทำการศึกษาที่ภาวะต่างๆ ดังนี้

เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตติ่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง	1.5 เซนติเมตร
ความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์	2000 พีพีเอ็ม
อัตราการไหลของแก๊สผสม	300 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
ปริมาณถ่านกัมมันต์บริสุทธิ์	1 กรัม
ภาวะทดลอง อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส
ความดันเกจ	1 บาร์

ตารางที่ 4.4 แสดงพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์บริสุทธิ์ที่ขนาดอนุภาคต่างๆโดยเทคนิคการวิเคราะห์การดูดซับแก๊ส (BET method)

ตัวดูดซับ	พื้นที่ผิว(m ² /g)
750 um-1.18 mm	798.85
1.18 mm- 2.00 mm	772.13
2.0 mm-2.36 mm	762.42

ทำการศึกษากิจกรรมของขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์ที่มีผลต่อเวลาทะลุผ่าน และปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จากผลการทดลอง พบว่า ขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดเล็กจะมีเวลาผ่านทะลุ 20 นาที และเมื่อขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นเวลาทะลุผ่านจะลดลง แสดงดังรูป 4.5



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบแสดงเส้นโค้งทะลุผ่าน ของการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์ต่างกัน

เมื่อนำค่าที่ได้จากกราฟเส้นโค้งทะลุผ่านมาคำนวณหาปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์ต่างกัน เปรียบเทียบกันได้ ดังตาราง 4.5

ตาราง 4.5 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และอัตราการดูดซับที่มีขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์ต่างกัน

ขนาดอนุภาค	ปริมาณการดูดซับ (W) (g SO ₂ /g AC)
750 um-1.18mm	0.0628
1.18 mm-2.0 mm	0.0515
2.0 mm- 2.36 mm	0.0507

การศึกษาขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์ที่ต่างกันมีผลต่อปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แสดงดังตาราง 4.3 พบว่า เมื่อขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์เป็น 750 ไมโครเมตร – 1.18 มิลลิเมตร, 1.18 มิลลิเมตร – 2.0 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร - 2.36 มิลลิเมตร มีปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คือ 0.0628, 0.0515 และ 0.0507 กรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อ 1 กรัมถ่านกัมมันต์ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์มีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ปริมาณพื้นที่ผิวลดลงซึ่งสังเกตได้จากตาราง 4.5

ดังนั้นจากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1.5 เซนติเมตร และถ่านกัมมันต์ขนาด 750 ไมโครเมตร – 1.18 มิลลิเมตร จะมีเวลาทะลุผ่านนานที่สุดและปริมาณการดูดซับสูงสุด

4.3.3 การศึกษาชนิดของคอสติกและความเข้มข้นของคอสติกที่อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์

การศึกษาชนิดของคอสติก และความเข้มข้นของคอสติกที่อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์ เป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เพราะการอิมเพรกเนตสารเคมีลงบนถ่านกัมมันต์อาจจะทำให้กลไกในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เปลี่ยนไป

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองนี้ นำมาจาก บริษัท ซีจีซี จำกัด หลังจากทำการคัดขนาดถ่านกัมมันต์ พบว่า มีปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดอนุภาค 1.18-2.0 มิลลิเมตรมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคต่างๆ โดยแสดงดังตาราง 4.6

ตาราง 4.6 สัดส่วนถ่านกัมมันต์หลังจากคัดขนาดถ่านกัมมันต์ 100 กรัม

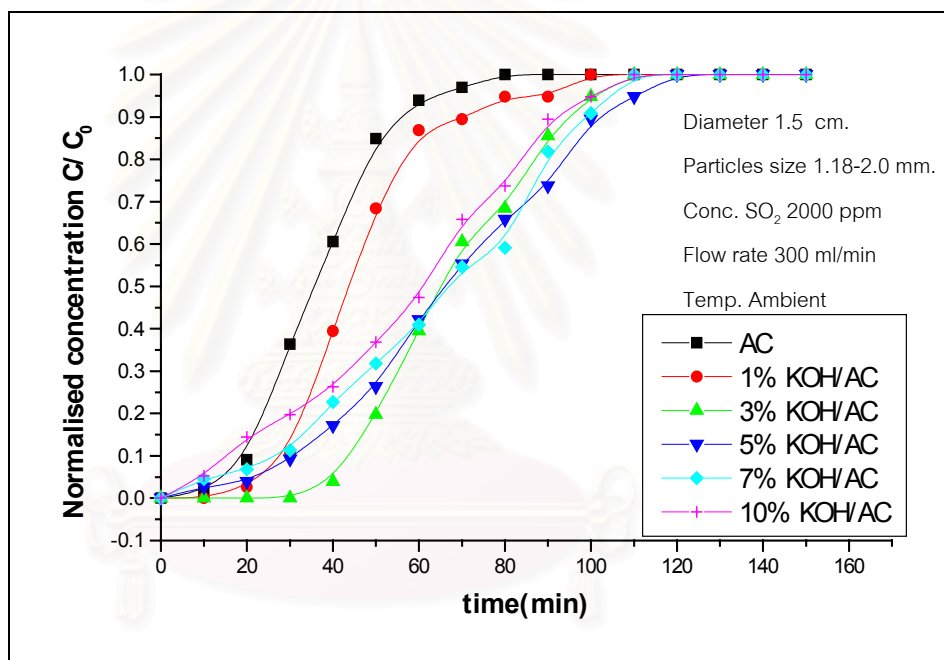
ขนาดอนุภาค	ปริมาณถ่านกัมมันต์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
2.00 mm-2.36 mm	11.54
1.18 mm- 2.00 mm	82.51
1.18 mm - 750 um	3.55
ขนาดต่ำกว่า 750 um	2.40

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงใช้ถ่านกัมมันต์ 1.18 mm- 2.00 mm ในการศึกษาชนิดของคอสติกและความเข้มข้นของคอสติกที่อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์

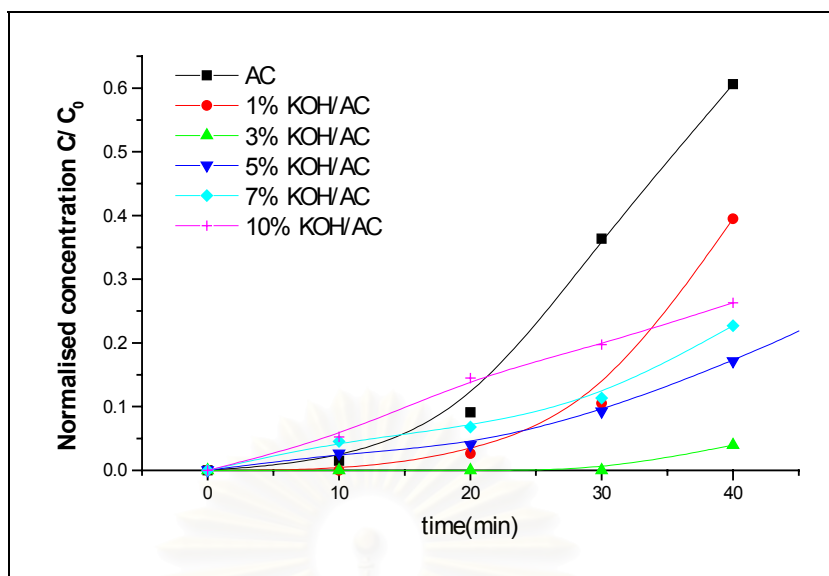
4.3.3.1. การศึกษาความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนถ่านกัมมันต์ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยทำการศึกษาที่ภาวะต่างๆ ดังนี้

เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง	1.5 เซนติเมตร
ความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์	2000 พีพีเอ็ม
อัตราการไหลของแก๊สผสม	300 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
ปริมาณถ่านกัมมันต์	1 กรัม
ภาวะทดลอง	อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
ความดันเกจ	1 บาร์



รูปที่ 4.6ก เปรียบเทียบแสดงเส้นโค้งทะลุผ่าน ของการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์ในช่วงเวลา 0-160 นาที



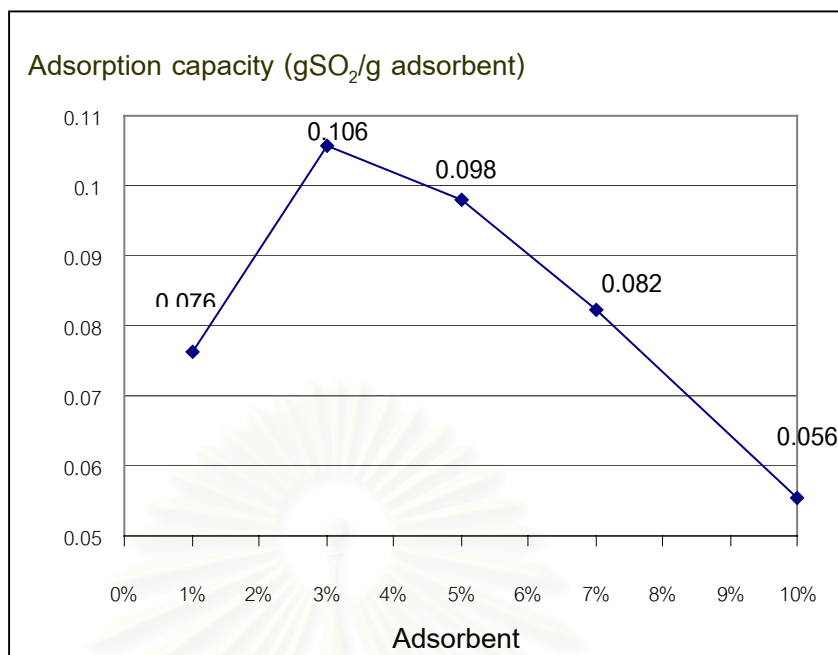
รูปที่ 4.6ข เปรียบเทียบแสดงเส้นโค้งทะลุผ่าน ของการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์ในช่วงเวลา 0-40 นาที

จากรูปที่ 4.6 พบว่า ที่ 3 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะใช้เวลาทะลุผ่านนานที่สุด คือ 30 นาที และที่ 1, 5, 7 และ 10 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะให้เวลาทะลุผ่านลดลงโดยมีแนวโน้ม ดังนี้

$$1\% \text{ KOH} < 3\% \text{ KOH} > 5\% \text{ KOH} > 7\% \text{ KOH} > 10\% \text{ KOH}$$

เมื่อนำค่าที่ได้จากกราฟเส้นโค้งทะลุผ่าน มาคำนวณหาปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์เปรียบเทียบกันได้ ดังรูป 4.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับแก๊สโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์

จากรูปที่ 4.7 เมื่อพิจารณาปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตัวดูดซับสามารถดูดซับได้ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ พบว่า ที่ 3 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะมีปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มากที่สุด โดยมีแนวโน้ม ดังนี้

$$1\% \text{ KOH} < 3\% \text{ KOH} > 5\% \text{ KOH} > 7\% \text{ KOH} > 10\% \text{ KOH}$$

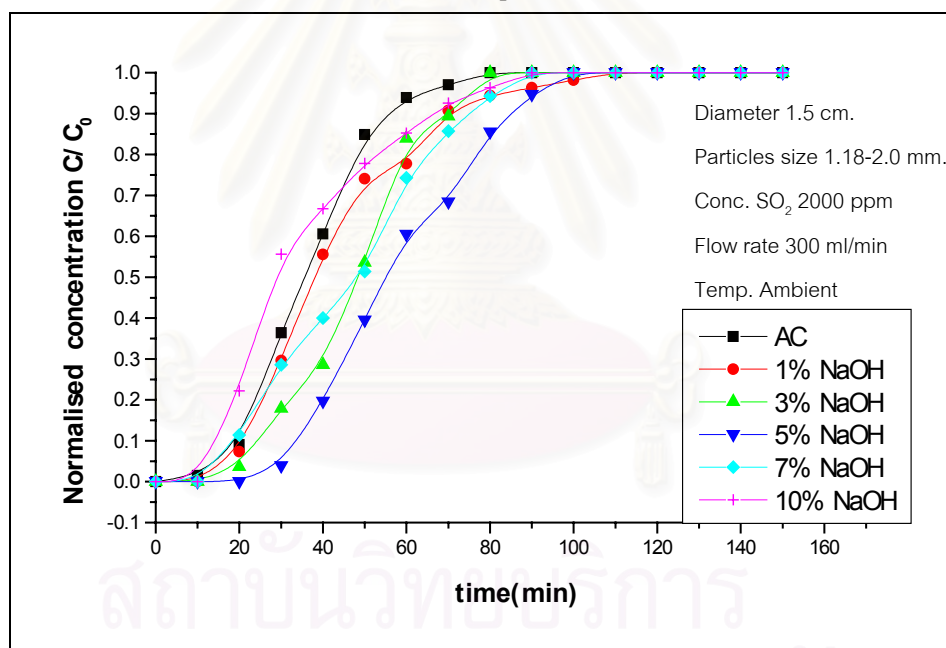
พิจารณาระหว่างตัวดูดซับที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน อธิบายผลได้จากที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีความเข้มข้นต่ำ ทำให้เข้าไปเคลือบภายในรูพรุนไม่เต็มที่ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เข้าไปจึงถูกจับไว้ในรูพรุนได้ไม่ดีเท่ากับ 3, 5, 7 และ 10 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง จึงทำให้ค่าเวลาทะลุผ่าน และค่าปริมาณการดูดซับมากกว่า แต่ที่ 5, 7 และ 10 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อาจมีปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่เข้าไปเคลือบภายในรูพรุนเคลือบมากเกินไป ดังรูป 4.2 ส่งผลต่อพื้นที่ผิวในดูดซับจึงจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้น้อยลงค่าเวลาทะลุผ่าน (Breakthrough time) และค่าปริมาณการดูดซับจึงลดลง โดยที่ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่สามารถจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้นานที่สุด คือ 30 นาทีและปริมาณการดูดซับ คือ 0.106 กรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ อาจเนื่องจาก โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่เข้าไปสามารถเคลือบภายในรูพรุนได้เหมาะสมต่อการดูดซับ

4.3.3.2. การศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์

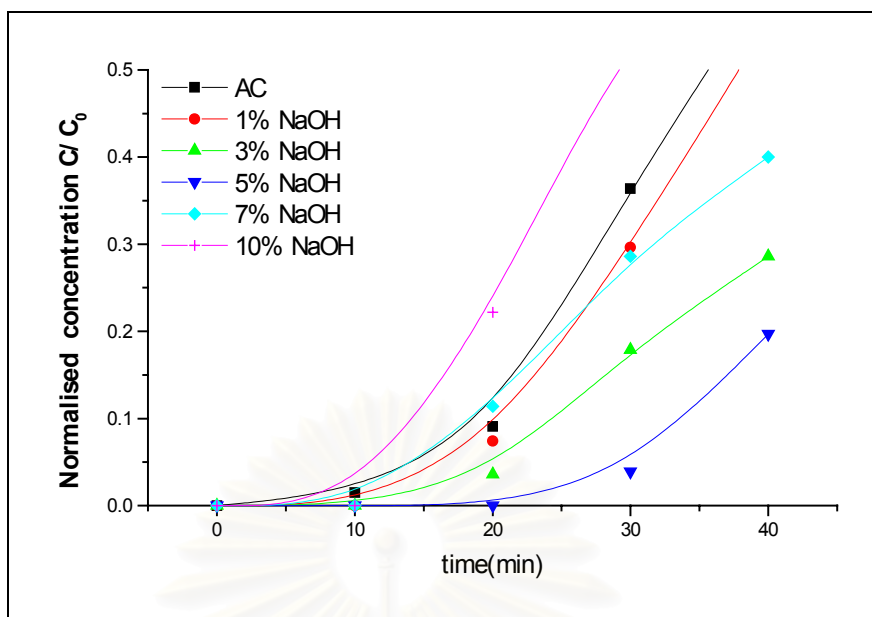
งานวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์บนถ่านกัมมันต์ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง โดยทำการศึกษาที่ภาวะต่างๆ ดังนี้

เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง	1.5 เซนติเมตร
ความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์	2000 พีพีเอ็ม
อัตราการไหลของแก๊สผสม	300 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
ปริมาณถ่านกัมมันต์	1 กรัม
ภาวะทดลอง อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส
ความดันเกจ	1 บาร์

เมื่อทำการเพิ่มปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์บนถ่านกัมมันต์ จากผลการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีการอิมเพรกเนตด้วยปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกันนั้น จะมีความสามารถในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไม่เท่ากัน



รูปที่ 4.8ก เปรียบเทียบแสดงเส้นโค้งทะลุผ่านของการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของโซเดียมไฮดรอกไซด์อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์ในช่วงเวลา 0-160 นาที

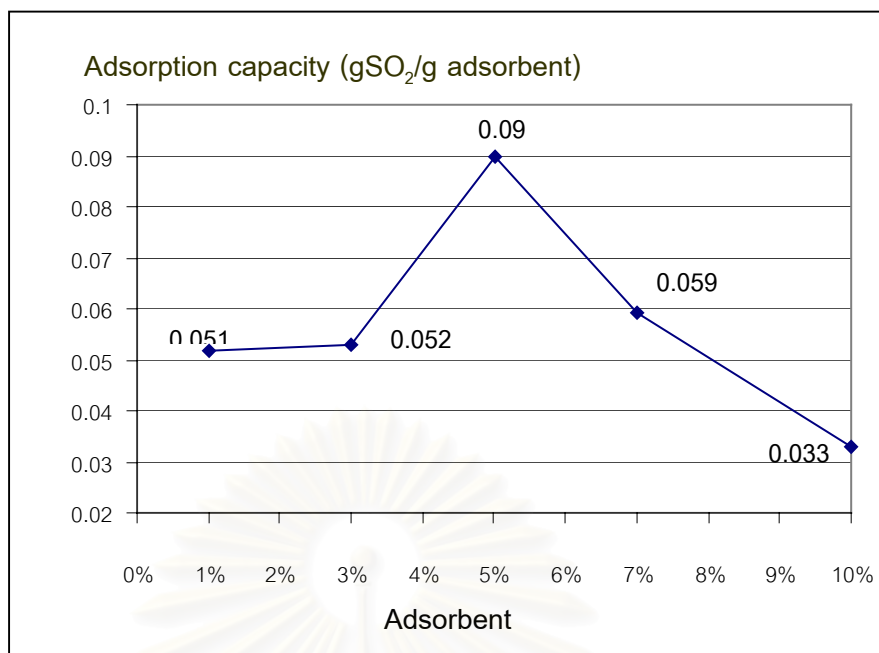


รูปที่ 4.8ข เปรียบเทียบแสดงเส้นโค้งทะลุผ่านของการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างๆของโซเดียมไฮดรอกไซด์อิมเพกเนตบนถ่านกัมมันต์ในช่วงเวลา 0-40 นาที

จากรูป 4.8 พบว่า 5% โซเดียมไฮดรอกไซด์บนถ่านกัมมันต์เวลาทะลุผ่านนานที่สุด คือ 20 นาที แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 7 และ 10 เปอร์เซ็นต์ จะใช้เวลาทะลุผ่านลดลง

เมื่อนำค่าที่ได้จากกราฟเส้นโค้งทะลุผ่าน ไปคำนวณหาปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ บนถ่านกัมมันต์มาเปรียบเทียบกันได้ ดังรูป 4.9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของโซเดียมไฮดรอกไซด์อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์

การศึกษาปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์บนถ่านกัมมันต์ที่ต่างกันมีผลต่อปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แสดงดังรูป 4.9 พบว่า ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ จะมีปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มากที่สุด คือ 0.09 กรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ โดยผลของปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลองกราฟเส้นโค้งทะลุผ่านโดยมีแนวโน้มของเวลาทะลุผ่านและปริมาณการดูดซับดังนี้

$$1\% \text{ NaOH} < 3\% \text{ NaOH} < 5\% \text{ NaOH} > 7\% \text{ NaOH} > 10\% \text{ NaOH}$$

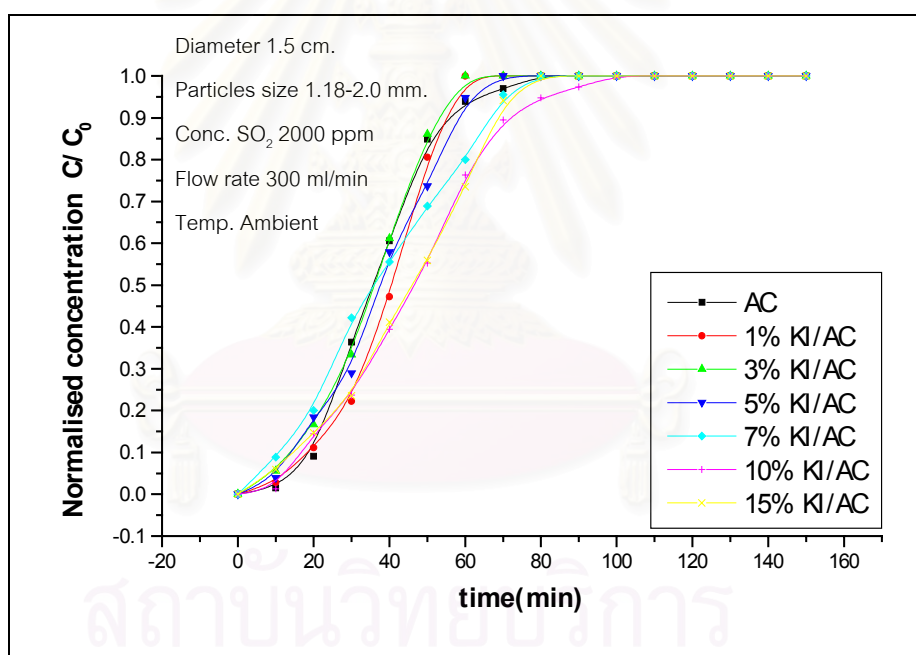
ทั้งนี้เนื่องมาจาก 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ อาจมีปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เคลือบอยู่ในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แต่ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โซเดียมไฮดรอกไซด์ จะมีปริมาณเหมาะสมในการดูดซับ ส่วน 7 และ 10 เปอร์เซ็นต์โซเดียมไฮดรอกไซด์ อาจมีปริมาณมากเกินไปทำให้มีการอุดตันรูพรุน

4.3.3.3 ผลการศึกษาความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอโอไดด์อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์

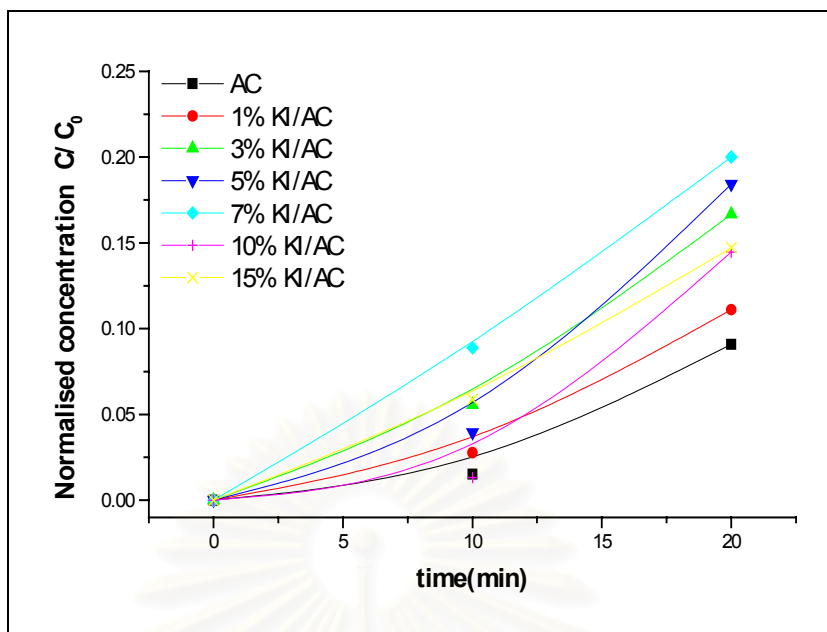
งานวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอโอไดด์บนถ่านกัมมันต์ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยทำการศึกษาที่ภาวะต่างๆ ดังนี้

เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง	1.5 เซนติเมตร
ความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์	2000 พีพีเอ็ม
อัตราการไหลของแก๊สผสม	300 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
ปริมาณถ่านกัมมันต์	1 กรัม
ภาวะทดลอง อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส
ความดันเกจ	1 บาร์

จากการทดลองการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของตัวดูดซับมีเส้นโค้งทะลุผ่านดังรูป 4.10

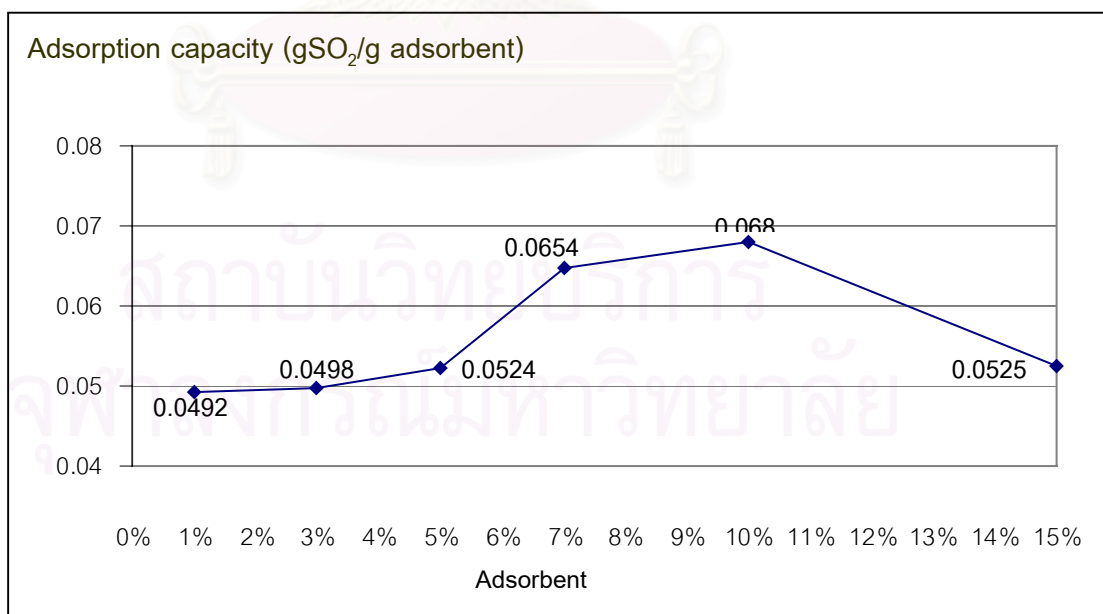


รูปที่ 4.10k เปรียบเทียบแสดงเส้นโค้งทะลุผ่านของการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ ของโพแทสเซียมไอโอไดด์ อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์ในช่วงเวลา 0-160 นาที



รูปที่ 4.10x เปรียบเทียบแสดงเส้นโค้งทะลุผ่านของการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ของโพแทสเซียมไอโอไดด์ อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์ในช่วงเวลา 0-20 นาที

เมื่อนำค่าที่ได้จากกราฟเส้นโค้งทะลุผ่าน มาคำนวณหาปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโพแทสเซียมไอโอไดด์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อิมเพรกเนตลงบนถ่านกัมมันต์เปรียบเทียบได้ ดังรูป 4.11



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของโพแทสเซียมไอโอไดด์อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์

เมื่อพิจารณาเวลาทะลุผ่านซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงเวลาที่ตัวดูดซับดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไว้ได้ จากรูปที่ 4.10 พบว่า ที่ 10 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไอโอไดด์จะใช้เวลาทะลุผ่านนานที่สุด คือ 10 นาที และที่ 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มีเวลาทะลุผ่านสั้นที่สุดโดยมีแนวโน้ม ดังนี้

$$1\% \text{ KI}, 3\% \text{ KI} < 5\% \text{ KI} < 7\% \text{ KI} < 10\% \text{ KI} > 15\% \text{ KI}$$

เมื่อพิจารณาปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตัวดูดซับสามารถดูดซับได้ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ จากรูปที่ 4.11 พบว่า ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ โพแทสเซียมไอโอไดด์ จะมีปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มากที่สุด โดยมีแนวโน้ม ดังนี้

$$1\% \text{ KI} < 3\% \text{ KI} < 5\% \text{ KI} < 7\% \text{ KI} < 10\% \text{ KI} > 15\% \text{ KI}$$

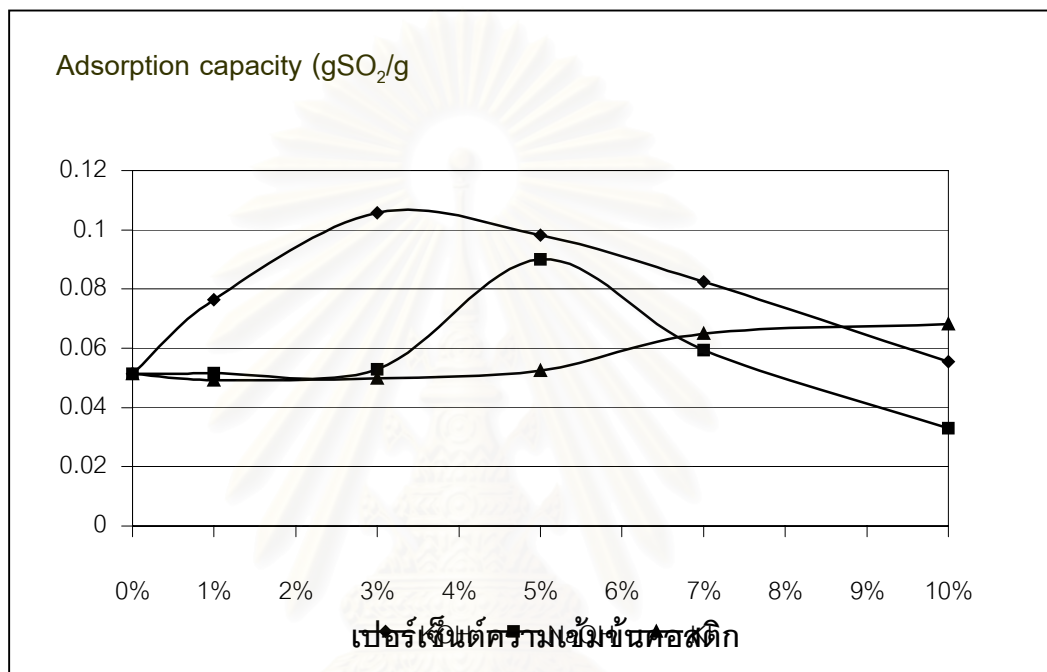
พิจารณาระหว่างตัวดูดซับที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่าง ๆ อธิบายผลได้จากที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอโอไดด์ต่ำ คือ 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไอโอไดด์ ที่เข้าไปเคลือบภายในรูพรุนยังเคลือบรูพรุนไม่เต็มที่ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เข้าไปจึงถูกจับไว้ในรูพรุนได้ไม่ดีเท่ากับที่ความเข้มข้นสูงขึ้น คือ 5, 7 และ 10 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไอโอไดด์ จึงทำให้ค่าเวลาทะลุผ่าน และค่าปริมาณการดูดซับที่ความเข้มข้นสูงมีค่ามากกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ แต่ที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอโอไดด์สูงเกินไป 15 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไอโอไดด์ที่เข้าไปเคลือบภายในรูพรุนเคลือบมากเกินไป ส่งผลต่อพื้นที่ผิวในดูดซับจึงจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้น้อยลงค่าเวลาทะลุผ่าน และค่าปริมาณการดูดซับจึงลดลง โดยที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่สามารถจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้นานที่สุด คือ 10 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไอโอไดด์ โดยโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่เข้าไปจะเคลือบภายในรูพรุนได้เหมาะสมต่อการดูดซับ ค่าเวลาทะลุผ่าน และค่าปริมาณการดูดซับจึงมีค่าสูงที่สุด คือ 0.068 กรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ

4.3.4 การเปรียบเทียบชนิดของคอสติกที่อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการเปรียบเทียบชนิดของคอสติกบนถ่านกัมมันต์ โดยคอสติกที่ใช้ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไอโอไดด์ พบว่าจากการเปรียบเทียบค่าปริมาณการดูดซับ (adsorption capacity) แสดงผลดังรูป 4.12 จะเห็นได้ว่า

เมื่อเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ที่ไม่อิมเพรกเนตกับถ่านกัมมันต์ที่มีการอิมเพรกเนตด้วยคอสติก พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีการอิมเพรกเนตด้วยคอสติก (3 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียม

ไฮดรอกไซด์) จะมีเวลาทะลุผ่าน 30 นาทีและปริมาณการดูดซับเท่ากับ 0.106 กรัมต่อกรัมตัวดูดซับ ซึ่งมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่อิมเพรกเนตมีเวลาทะลุผ่าน 10 นาทีและปริมาณการดูดซับ 0.0513 กรัมต่อกรัมตัวดูดซับ ทั้งนี้อาจเนื่องจากการที่มีการอิมเพรกเนตคอสติกลงไป อาจเกิดการดูดซับทางเคมีกับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จากงานวิจัยของ Jia G. และคณะ (2003)⁽¹³⁾ พบว่า เมื่อทำการอิมเพรกเนตสารเคมีลงไปจะทำให้การดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มากขึ้นซึ่งคล้ายคลึงกับผลการทดลอง



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของคอสติกชนิดต่าง ๆ ที่อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์

เมื่อเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นของคอสติกที่ 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเดียวกันที่ พบว่า โฟแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะมีปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มากที่สุด ยกเว้นที่ 10 เปอร์เซ็นต์จะมีปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลดลง โดยมีแนวโน้มปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังนี้



ทั้งนี้เนื่องจาก โฟแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮไดรด์ที่ 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเดียวกันที่ พบว่า โฟแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะมีความเป็นเบสที่แรงกว่า โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า โฟแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะมีปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้มากที่สุด เมื่อ

เปรียบเทียบกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเดียวกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก โพแทสเซียมมีขนาดอะตอมใหญ่กว่าโซเดียม และเมื่ออะตอมของโลหะมีขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้ความเป็นเบสสูงขึ้นตามลำดับ แต่ที่ 10 เปอร์เซ็นต์อาจเกิดการบดบังรูปทรงทำให้การดูดซับลดลง

เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นที่ต่างกันของคอสติกทั้ง 3 ชนิด พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะมีแนวโน้มของปริมาณการดูดซับลดลง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะมีแนวโน้มของปริมาณการดูดซับเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก ขนาดอะตอมของไฮดรอกไซด์ จะมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของไฮดรอกไซด์ จึงสามารถช่วยให้โพแทสเซียมเข้าไปในรูพรุนได้ดีกว่า ทำให้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีการกระจายตัวได้ดีกว่าโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยมีแนวโน้มในการกระจายตัว ดังนี้



ดังนั้นจากผลการทดลองสรุปได้ว่า ถ่านกัมมันต์ที่อิมเพกเนตด้วย 3 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นตัวดูดซับที่ดีที่สุดในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และนำมาใช้ในการทดลองแปรค่าอัตราการไหลของแก๊สผสมต่อไป

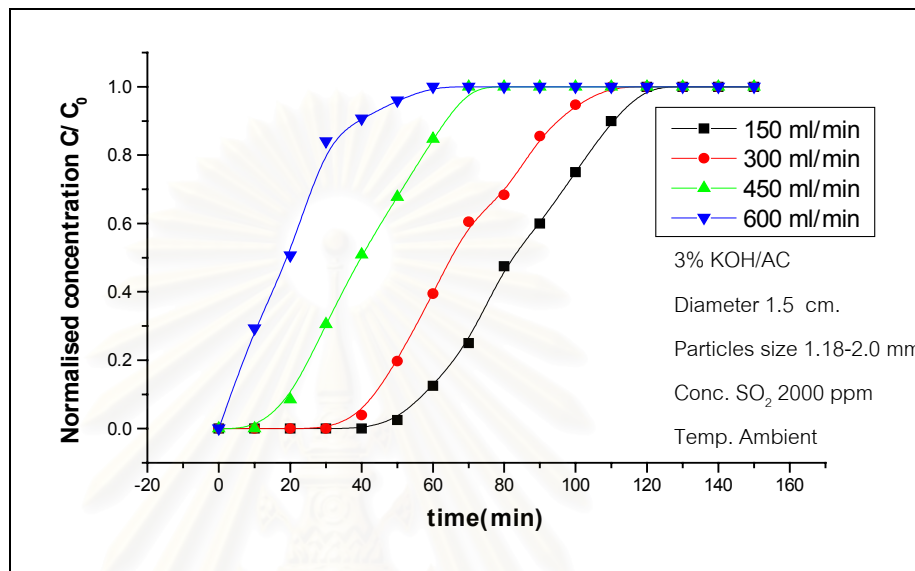
4.3.5 ผลการศึกษาอัตราการไหลของแก๊สผสม

จากผลการทดลองในส่วนที่ผ่านมาทำให้สามารถเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุด คือถ่านกัมมันต์ ที่อิมเพกเนตด้วย 3 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มาใช้ในการทดลองอัตราการไหลของแก๊สผสม

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนอัตราการไหลของแก๊สผสมผ่านเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อัตราการไหลของแก๊สผสม 150, 300, 450 และ 600 มิลลิลิตรต่ออนาที โดยทำการศึกษาที่ภาวะต่างๆ ดังนี้

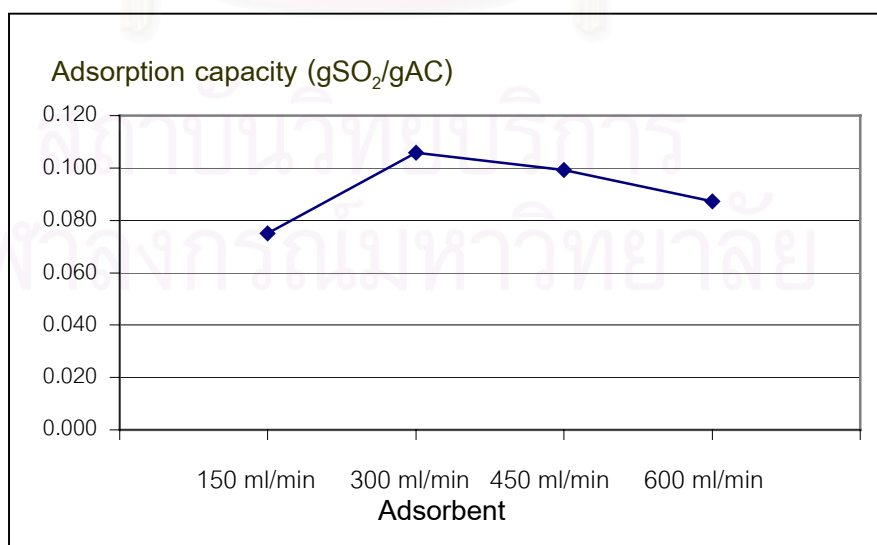
ปริมาณตัวดูดซับ (3%KOH)	1	กรัม
เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง	1.5	เซนติเมตร
ความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์	2000	พีพีเอ็ม
ภาวะทดลอง	อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส
	ความดันเกจ	1 บาร์

ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของแก๊สผสมที่มีผลต่อเวลาทะลุผ่าน และปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พบว่า เมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สผสม 150, 300, 450 และ 600 มิลลิลิตรต่ออนาที จะให้เวลาผ่านทะลุสูงสุด 50 นาทีที่อัตราการไหล 150 มิลลิลิตรต่ออนาที และเมื่ออัตราการไหลของแก๊สผสมเพิ่มขึ้นเวลาทะลุผ่านจะลดลงตามลำดับ แสดงดังรูป 4.13



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบแสดงเส้นโค้งทะลุผ่านของการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีอัตราการไหลต่างกัน

เมื่อนำค่าที่ได้จากกราฟเส้นโค้งทะลุผ่าน มาคำนวณหาปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่มีชนิดของตัวดูดซับที่ใช้ทางการค้าต่างกัน เปรียบเทียบกันได้ ดังรูป 4.14



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีอัตราการไหลต่างกัน

รูปที่ 4.14 พบว่า อัตราการไหลของแก๊สผสม 300 มิลลิลิตรต่อนาที มีปริมาณการดูดซับมากที่สุด คือ 0.106 กรัมต่อกรัมตัวดูดซับ ทั้งนี้เนื่องมาจาก อัตราการไหลที่ 300 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นอัตราการไหลที่เหมาะสมในการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับกับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า อัตราการไหลของแก๊สผสม 300 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นอัตราการไหลที่ดีที่สุดในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และ นำมาใช้ในการทดลองการเปรียบเทียบการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของ 5 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไอโอไดด์ (เตรียมในห้องทดลอง) กับ 5 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไอโอไดด์ (ใช้ในทางการค้า)

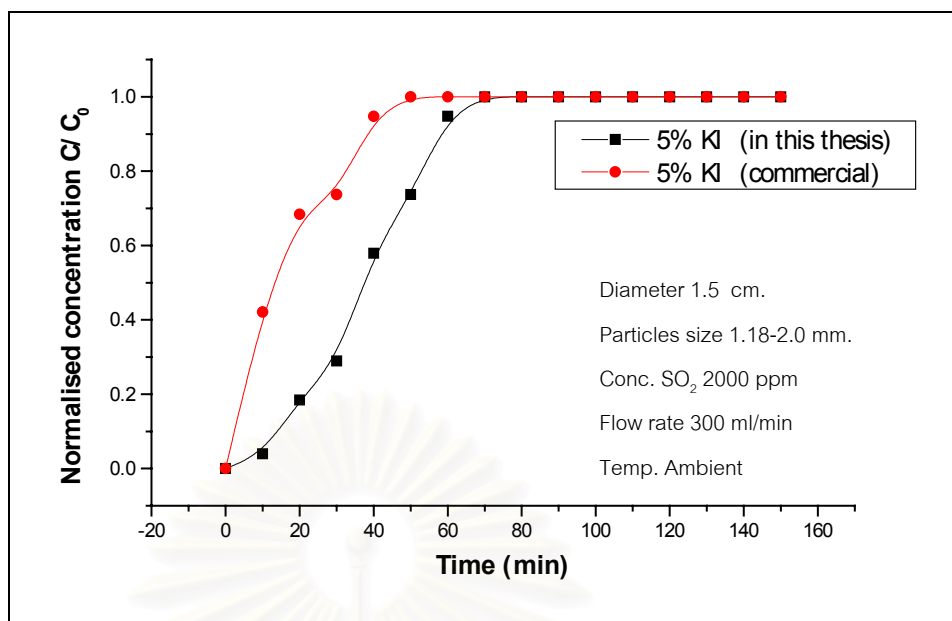
4.3.6 การเปรียบเทียบ 5% KI(เตรียมในห้องทดลอง) กับ 5% KI (ใช้ในทางการค้า)

งานวิจัยนี้ได้ทำการการเปรียบเทียบ 5% KI(เตรียมในห้องทดลอง) กับ 5% KI (ใช้ในทางการค้า) โดยทำการศึกษาที่ภาวะต่างๆ ดังนี้

เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง	1.5 เซนติเมตร
ความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์	2000 พีพีเอ็ม
อัตราการไหลของแก๊สผสม	300 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
ปริมาณตัวดูดซับ	1 กรัม
ภาวะทดลอง	อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
ความดันแก๊จ	1 บาร์

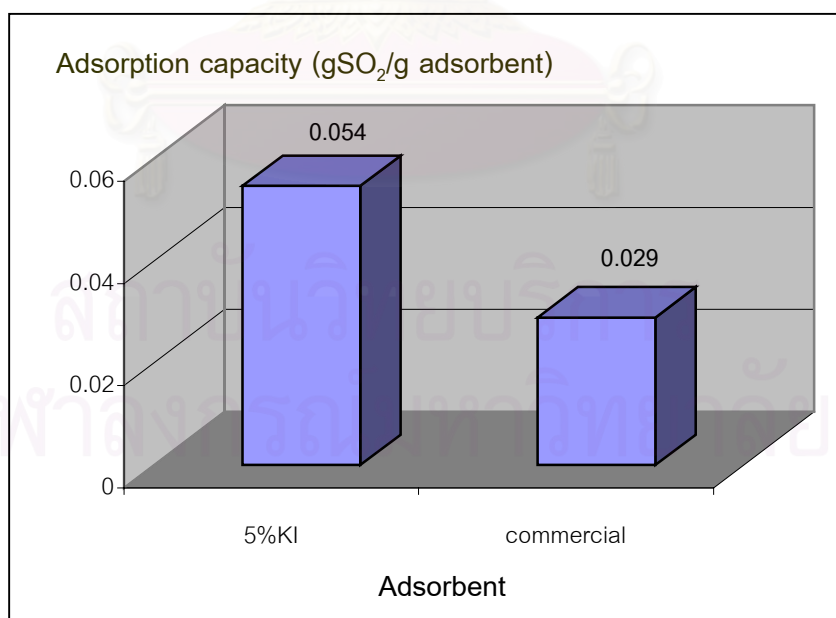
ตารางที่ 4.7 แสดงพื้นที่ผิวที่ชนิดของตัวดูดซับที่ใช้ทางการค้าต่างกันโดยเทคนิคการวิเคราะห์การดูดซับแก๊ส (BET method)

ตัวดูดซับ	พื้นที่ผิว (m ² /g)
5 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไอโอไดด์ (เตรียมในห้องทดลอง)	719.24
5 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไอโอไดด์ (ใช้ในทางการค้า)	509.51



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบแสดงเส้นโค้งทะลุผ่านของการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีชนิดของตัวดูดซับที่ใช้ทางการค้าต่างกัน

เมื่อนำค่าที่ได้จากกราฟเส้นโค้งทะลุผ่าน มาคำนวณหาปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่มีชนิดของตัวดูดซับที่ใช้ทางการค้าต่างกัน เปรียบเทียบกันได้ ดังรูป 4.16



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่มีชนิดของตัวดูดซับต่างกัน

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 พบว่า 5 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไอโอไดด์ที่ได้จากการเตรียมในห้องทดลอง จะใช้เวลาทะลุผ่านนานกว่า และมีปริมาณการดูดซับมากกว่า เมื่อเทียบกับ ตัวดูดซับที่ใช้ในทางการค้า ทั้งนี้เนื่องมาจาก 5 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไอโอไดด์ที่ได้จากการเตรียมในห้องทดลองมีพื้นที่ผิวในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่สูงกว่า ตัวดูดซับที่ใช้ในทางการค้าและเมื่อเปรียบเทียบปริมาณไอโอดีนบนถ่านกัมมันต์ที่วิเคราะห์โดยวิธี X-ray Fluorescence (XRF) พบว่า ตัวดูดซับที่ใช้ในทางการค้า มีปริมาณไอโอดีนบนถ่านกัมมันต์มากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไอโอไดด์ที่ได้จากการเตรียมในห้องทดลอง โดยปริมาณไอโอดีนบนถ่านกัมมันต์อาจทำให้เกิดการบดบังพื้นที่ในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

4.4 การวิเคราะห์ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในตัวดูดซับก่อนและหลังการทดลอง

4.4.1 การวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟอร์บนถ่านกัมมันต์โดยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF)

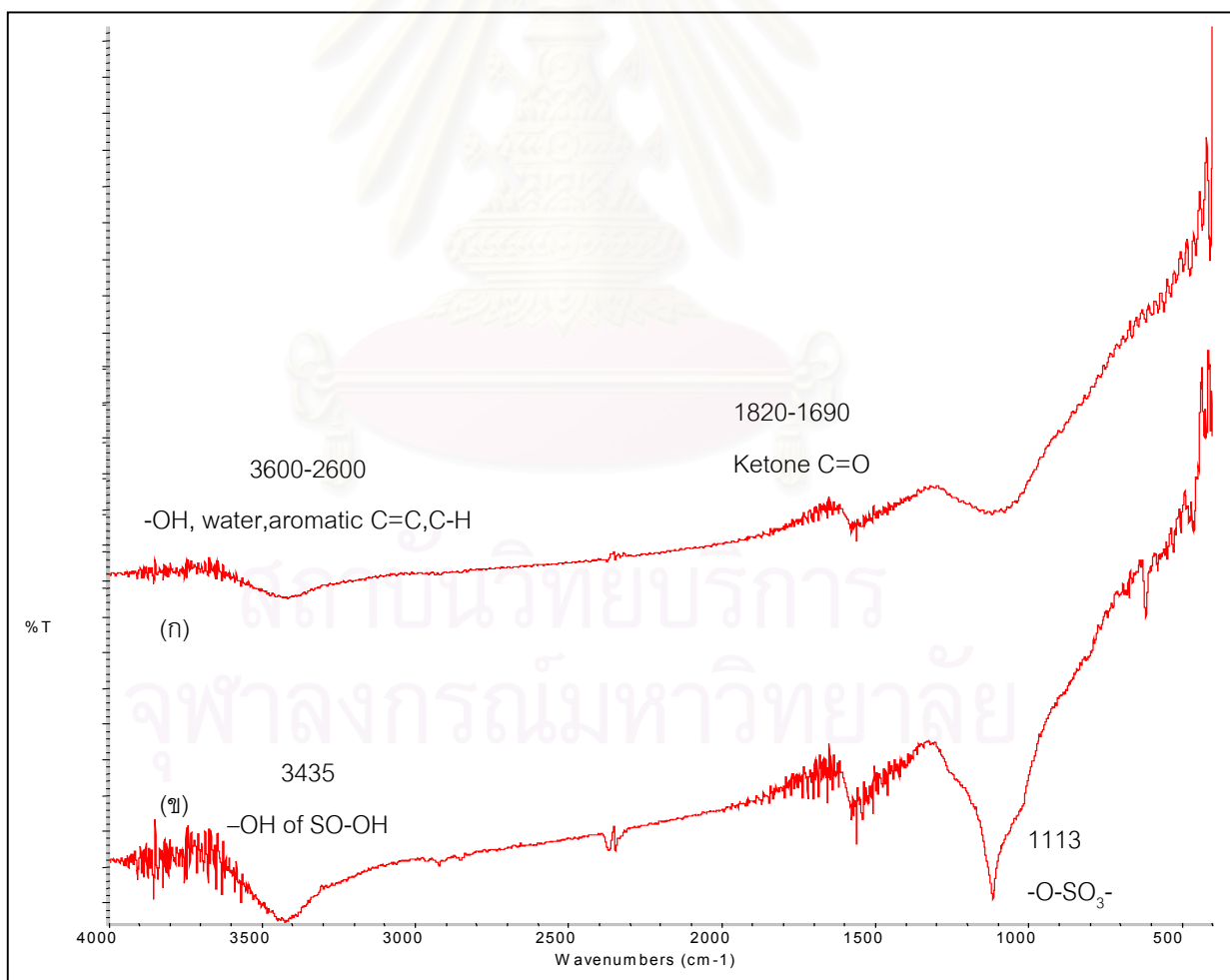
ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟอร์ก่อนและหลังการดูดซับโดยวิธี XRF

Adsorbent	Sulfur Concentration, %	
	Before adsorb	After adsorb
	SO ₂	SO ₂
AC	0.024	4.956
10%KI/AC	0.097	5.693
3%KOH/AC	0.087	8.779
5%NaOH/AC	0.080	7.644

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟอร์ พบว่าถ่านกัมมันต์หลังดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีปริมาณซัลเฟอร์บนพื้นผิวมากขึ้นทั้งถ่านกัมมันต์ที่ผ่านและไม่ผ่านการอิมเพรกเนตด้วย คออสติก ซึ่งแสดงว่ามีการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์บนพื้นผิวดูดซับ

4.4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ที่อิมเพรกเนตด้วยคอสติก

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ที่อิมเพรกเนตด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ก่อน และหลังจากทำการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ โดยใช้เทคนิค KBr pellet จากรูป 4.17 แสดงแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า FT-IR ของถ่านกัมมันต์ที่อิมเพรกเนตโพแทสเซียมก่อนทำการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พบว่า ที่ 3600-2600 cm^{-1} แสดงถึง หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และที่ 1820-1690 แสดงถึง หมู่คีโตน และหลังจากทำการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พบว่า พีคที่เด่นชัด ของ หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) มีการเกิดขึ้นที่ 3435 cm^{-1} โดยเป็นพีคของหมู่ -SO-OH และที่ 1113 cm^{-1} มี พีคที่เด่นชัดของหมู่ -O-SO₃ ซึ่งแสดงถึงสารประกอบที่เกิดขึ้น คือ สารประกอบซัลเฟต โดยงานวิจัยของ Andrey B. และ คณะ⁽¹⁴⁾ พบว่า มีหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกับผลการทดลอง และจากงานวิจัยของ Andrey B. และ คณะ ได้สันนิษฐานว่าสารประกอบที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่อิมเพรกเนตด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ คือ โพแทสเซียมซัลเฟต



รูปที่ 4.17 แสดง FT-IR spectrum ของถ่านกัมมันต์อิมเพรกเนตด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ก) ไม่ดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ข) ทำการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

4.5 เปรียบเทียบงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

ตาราง 4.9 เปรียบเทียบงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

การทดลอง	Jia และคณะ ⁽¹¹⁾	Carabineiro และคณะ ⁽¹⁵⁾	งานวิจัยนี้
ตัวดูดซับ	10% KOH/AC	4%Cu+4%V/AC	3%KOH/AC
แก๊สเริ่มต้น	SO ₂	SO ₂	SO ₂
ความเข้มข้นของแก๊ส (ppm)	2000	2000	2000
ความดัน (bar)	1	1	1
อัตราการไหลของแก๊ส (ml/min)	60	100	300
ปริมาณการดูดซับ (g.SO ₂ /g.adsorbent)	0.013	0.209	0.106

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยมีถ่านกัมมันต์อิมเพรกเนตด้วยคอสติกเป็นตัวดูดซับ เพื่อหาชนิด ความเข้มข้น และภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

5.1 สรุปผลการทดลอง

1 การวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับ

1.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวโดยเทคนิคการดูดซับแก๊ส (BET method)

ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวทั้งหมด 772.13 ตารางเมตรต่อกรัม สมบัติความมีพื้นที่ผิวสูงนี้ จึงมีความเหมาะสมที่ใช้เป็นวัสดุที่สามารถดูดซับแก๊สได้

1.2 ปริมาณของโพแทสเซียม โซเดียมและไอโอดีนในตัวดูดซับ

ถ่านกัมมันต์หลังจากนำไปอิมเพรกเนตด้วยคอสติกแล้วมีปริมาณโพแทสเซียม โซเดียมและไอโอดีนบนพื้นผิวเพิ่มมากขึ้น และปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีค่าสอดคล้องกับความเข้มข้นที่นำมาอิมเพรกเนต

2 อิทธิพลของปริมาณคอสติกที่มีผลต่อตัวดูดซับ

2.1 ปริมาณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

ปริมาณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคอสติกเข้าไปที่พื้นผิวของถ่านกัมมันต์

2.2 ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของตัวดูดซับ

ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของตัวดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคอสติกเข้าไปที่พื้นผิวของถ่านกัมมันต์

3. การศึกษาการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

3.1 การศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง

เครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร มีความเหมาะสมในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้มากที่สุด พบว่า ใช้เวลาทะลุผ่าน 120 นาที และปริมาณการดูดซับ 0.093 กรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อ 1 กรัมตัวดูดซับ

3.2 การศึกษาขนาดอนุภาคถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์อนุภาคขนาด 750 ไมโครเมตร – 1.18 มิลลิเมตร มีความเหมาะสมในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้มากที่สุด พบว่า ใช้เวลาทะลุผ่าน 20 นาที และมีปริมาณการดูดซับ 0.0628 กรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อ 1 กรัมตัวดูดซับ

3.3 การศึกษาชนิดของคอสติกและความเข้มข้นของคอสติกที่อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

การศึกษาถึงการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับ คือ คอสติก (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไอโอไดด์) พบว่า เวลาทะลุผ่านและปริมาณการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ได้ผลดังนี้

3.3.1 การศึกษาความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์

ความเข้มข้นที่เหมาะสมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้มากที่สุด คือ 3 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่า เวลาสูงสุดในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คือ 30 นาที และปริมาณการดูดซับ 0.106 กรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อ 1 กรัมตัวดูดซับ และ 10 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มีปริมาณการดูดซับน้อยที่สุด โดยมีแนวโน้มดังนี้

$$1\%KOH < 3\%KOH > 5\%KOH > 7\%KOH > 10\%KOH$$

3.3.2 การศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์

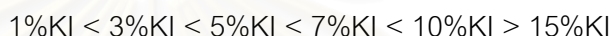
ความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้มากที่สุด คือ 5 เปอร์เซ็นต์โซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า เวลาสูงสุดในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คือ 20 นาที และปริมาณการดูดซับ 0.09 กรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ต่อ 1 กรัม ตัวดูดซับ และ 10% โซเดียมไฮดรอกไซด์ มีปริมาณการดูดซับน้อยที่สุด โดยมีแนวโน้มดังนี้



3.3.3 ผลการศึกษาความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอโอไดด์อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์

ความเข้มข้นที่เหมาะสมของโพแทสเซียมไอโอไดด์ในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้มากที่สุด คือ 10 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไอโอไดด์ พบว่า เวลาสูงสุดในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คือ 10 นาที และปริมาณการดูดซับ คือ 0.068 กรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ต่อ 1 กรัมตัวดูดซับ และ 1 เปอร์เซ็นต์ โพแทสเซียมไอโอไดด์ มีปริมาณการดูดซับน้อยที่สุด โดยมีแนวโน้มดังนี้



3.3.4 การเปรียบเทียบชนิดของคอสติกที่อิมเพรกเนตบนถ่านกัมมันต์

เมื่อเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ที่ไม่อิมเพรกเนตและถ่านกัมมันต์ที่อิมเพรกเนตด้วยคอสติก พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่อิมเพรกเนตด้วยคอสติกมีปริมาณการดูดซับมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีการอิมเพรกเนต

เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของคอสติก (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไอโอไดด์) พบว่า 3 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณการดูดซับมากที่สุด

3.4 ผลการศึกษาอัตราการไหลของแก๊สผสม

จากผลการทดลองข้างต้น พบว่า ตัวดูดซับที่ดีที่สุดในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คือ 3 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จึงนำมาทดสอบหาอัตราการไหลของแก๊สผสมที่ดีที่สุด

อัตราการไหลของแก๊สผสมที่ 150 มิลลิลิตรต่อนาที ให้เวลาการดูดซับนานที่สุด คือ 50 นาที และอัตราการไหล 300 มิลลิลิตรต่อนาทีให้ปริมาณการดูดซับมากที่สุด คือ 0.106 กรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ

3.5 การเปรียบเทียบ 5% โพแทสเซียมไอโอไดด์ (เตรียมในห้องทดลอง) กับ 5 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไอโอไดด์ (ใช้ทางการค้า)

เมื่อเปรียบเทียบ 5 เปอร์เซนต์โพแทสเซียมไอโอไดด์ (เตรียมในห้องทดลอง) กับ 5 เปอร์เซนต์โพแทสเซียมไอโอไดด์ (ใช้ทางการค้า) พบว่า 5 เปอร์เซนต์โพแทสเซียมไอโอไดด์ (เตรียมในห้องทดลอง) ให้เวลาดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และปริมาณการดูดซับมากกว่า 5 เปอร์เซนต์โพแทสเซียมไอโอไดด์ (ใช้ทางการค้า)

4. การวิเคราะห์หุ้ผึ้งกัชั้นของถ่านกัมันต์ที่อิมเพรกเนตด้วยคอสติก

4.1 ปริมาณของซัลเฟอร์ในตัวดูดซับ

ถ่านกัมันต์หลังดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีปริมาณซัลเฟอร์บนพื้นผิวมากขึ้นทั้งถ่านกัมันต์ที่ผ่านและไม่ผ่านการอิมเพรกเนตด้วยคอสติก แสดงถึง มีการดูดซับซัลเฟอร์บนพื้นผิว

4.2 การวิเคราะห์หุ้ผึ้งกัชั้นของถ่านกัมันต์ที่อิมเพรกเนตด้วยคอสติก

เมื่อทำการวิเคราะห์หาหุ้ผึ้งกัชั้นของถ่านกัมันต์ที่อิมเพรกเนตด้วยคอสติกก่อน และหลังการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พบว่า หลังการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ มีสารประกอบเกิดขึ้น โดยสารประกอบที่เกิดขึ้น คือ สารประกอบซัลเฟต

5. ภาวะที่เหมาะสมที่นำไปใช้ในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง	1.5	เซนติเมตร
เปอร์เซนต์และชนิดของคอสติก	3%	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
อัตราการไหลของแก๊สผสม	300	มิลลิลิตรต่ออนาที
ขนาดอนุภาคของถ่านกัมันต์	1.18 – 2.00	มิลลิเมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการนำตัวดูดซับนี้ (ถ่านกัมันต์ที่อิมเพรกเนตด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) ไปใช้ดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินโดยตรง
2. ควรเปรียบเทียบผลกับตัวดูดซับชนิดอื่น ๆ ในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์
3. ควรมีการนำตัวดูดซับนี้ (ถ่านกัมันต์ที่อิมเพรกเนตด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) ไปใช้ในการดูดซับสารชนิดอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์
4. ควรศึกษาความสูงของเบดนิ่งเพื่อศึกษาว่าความสูงของเบดมีผลต่อความสามารถในการดูดซับอย่างไร

รายการอ้างอิง

1. กองพิสิทธ์ ,ปรมานูเพื่อสันติ. การวิเคราะห์โดยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์. กรุงเทพมหานคร : 2545
2. กันตสุดา เวชรักษ์ , เฉลิมพล ใจหนัก , “การเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี” , โครงการ การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ประจำปีการศึกษา 2544 , คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. รัฐไท วีระชาติเทวัญ. การศึกษาการเตรียมและคุณสมบัติเฉพาะตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา Ru/MgO ในกระบวนการไฮโดรจิเนชันของคาร์บอนไดออกไซด์ ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
4. พูนศักดิ์ เทียนสว่าง การดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยสารดูดซับที่มีถ่านลิกไนต์เป็นองค์ประกอบ. วิทยานิพนธ์ ปริญญา มหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
5. Adib F., Bagreev A. , “Adsorption/oxidation of hydrogen sulfide on nitrogen containing activated carbon ” , Langmuir , volume 16 issue 4 , 2000 , Pages 1980-1986
6. Andrey B., Teresa J.“ A Role of sodium hydroxide in the process of hydrogen sulfide adsorption/oxidation on caustic-impregnated activated carbons “ J. Ind Eng.Chem. Res. 41 (2002), pp.672-679.
7. Andrey B. , Svetlana B. , “Adsorption of SO₂ on activated carbon : The effect on nitrogen functionality and pore sizes” , Langmuir , volume 18 issue 4 , (2002) , pages 1257-1264
8. GuO J., Lua A. C. “Textural and chemical characterisations of activated carbon prepared from oil-palm stone with H₂SO₄ and KOH impregnation“ J. Microporous and Mesoporous Material. 32, (1999), pp. 111-117.
9. GuO J., Lua A.C. “Adsorption of sulphur dioxide onto activated carbon prepared from oil-palm shells with and without pre-impregnation” J. Separation and Purification Technology. 30, (2003), pp. 265-273.
10. [http:// www. Activated carbon.com/enviro.html](http://www.Activatedcarbon.com/enviro.html).

11. Lua A. C., GuO J. "Preparation and characterization of activated carbon from oil-palm stones for gas-phase adsorption" J. Colloids and surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects. 179, (2001), pp. 151-162.
12. Lee Y.W., Park J.W. "Adsorption characteristic of SO₂ on activated carbon prepared from coconut shell with potassium hydrosulfide activation" J. Environ. Sci. Technol. 36, (2003) pp. 1086-1092.
13. Lee Y.W., Kim H.J. "Adsorption and reaction behavior for the simultaneous adsorption of NO-NO₂ and SO₂ on activated carbon impregnated with KOH" J. Carbon 41, (2003), pp. 1881-1888.
14. Rodrigues A.E., LeVan M.D. and Tondeur D. "Adsorption: Science and Technology" vol158. The Netherlands: Kluwer Academic. 1988.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

วิธีวิเคราะห์ความหนาแน่นเชิงปริมาตร

วิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Bulk density, BD)

วิเคราะห์ความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM Method D 2854 รายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

1. อบอุ่นอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 องศาเซลเซียส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในเดสิเคเตอร์
2. ชั่งน้ำหนักกระบอกตวงที่มีความจุ 10 มิลลิลิตร ให้มีความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 2 (คือ มีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.01 กรัม) บันทึกผล (X_0)
3. ใส่ตัวอย่างลงในกระบอกตวงจนเกือบเต็ม กระแทกกันกระบอกตวงบนแผ่นยาง จนกระทั่งระดับของตัวอย่างในกระบอกตวงคงที่
4. ถ้าระดับที่คงที่นั้นเท่ากับ 10 มิลลิลิตร ให้ตักตัวอย่างเข้าและออกจากกระบอกตวง แล้วกระแทกกันกระบอกตวงใหม่ จนกว่าจะได้ระดับที่คงที่เป็น 10 มิลลิลิตร
5. ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างของกระบอกตวง บันทึกผล (X_1)
6. คำนวณค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรได้จาก

$$BD (g/cm^3) = (X_1 - X_0) / 10$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

การคำนวณ

1. การหาปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยวิธี Emeryville

1. เครื่องมือ

1.1 ชุดเครื่องมือชักตัวอย่างแก๊ส

1.2 ขวดแก้วรูปชมพู่

1.3 บิวเรต

1.4 ปีเปต

2. สารเคมี

2.1 น้ำกลั่น

2.2 80% ไฮโซไพรพานอล โดยเติมไฮโซไพรพานอล 800 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่น เป็น 1000 มิลลิลิตร

2.3 6% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยเจือจางสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% ด้วยน้ำกลั่นด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 4

2.4 0.01 นอร์มอลแบเรียมคลอไรด์ โดยละลาย 1.2216 กรัม แบเรียมคลอไรด์ในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร และเจือจางเป็น 1000 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายไฮโซไพรพานอล

2.5 Thorin indicator โดยละลาย 0.2 กรัม Thorin indicator ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

3. วิธีการทดลอง

3.1 แบ่งสารละลาย 6% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ทำปฏิกิริยากับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แล้วมา 5 มิลลิลิตร

3.2 เติมสารละลาย 80% ไฮโซไพรพานอล 20 มิลลิลิตร

3.3 หยด Thorin indicator 6 หยด

3.4 ไตเตรตด้วยสารละลาย 0.01 นอร์มอลแบเรียมคลอไรด์

3.5 สารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีชมพู

3.6 นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

4. สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$(\text{SO}_2)_{\text{gmmin/lit}} = \frac{0.032 \times (\text{ml BaCl}_2) \times (\text{N BaCl}_2) \times (\text{Sample Volume})}{(\text{Aliquot Volume}) \times (\text{Flow Rate})}$$

เมื่อ

ml BaCl ₂	=	ปริมาตรสารละลาย BaCl ₂ ที่ไตเตรตได้ (มิลลิลิตร)
N BaCl ₂	=	ความเข้มข้นสารละลาย แบเรียมคลอไรด์ที่ใช้
0.032	=	ค่าคงที่ (กรัม ลิตร / โมล มิลลิลิตร)
Sample Volume	=	ปริมาตรของสารละลาย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (มิลลิลิตร)
Aliquot Volume	=	ปริมาตรของสารละลาย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่แบ่งมาไตเตรต (มิลลิลิตร)
Flow Rate	=	อัตราการไหลของแก๊สผสมผ่านหอดูดซับ (ลิตร / นาที)

5. สูตรที่ใช้ในการเปลี่ยนหน่วยในการคำนวณ

$$\left(\text{SO}_2\right)_{\text{ppm}} = \frac{0.0245 \times 10^9 \times (\text{SO}_2)_{\text{gm min/ lit}}}{(\text{MW SO}_2) \times (\text{Time})}$$

เมื่อ

MW SO ₂	=	มวลโมเลกุลของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์
Time	=	เวลาที่ใช้ในการจับแก๊ส (นาที)

2. การคำนวณปริมาณการดูดซับ (adsorption capacity) และอัตราการดูดซับ (adsorption rate constant)

สำหรับคอลัมน์ที่กำหนดให้ความยาวคอลัมน์, ความเร็วของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เข้าคองที่ ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่เปลี่ยนไปกับความเข้มข้นขาออกของแก๊สสามารถหาได้ตามสมการนี้

$$\tau_x = \frac{\rho_b W L}{C_0 u} - \frac{\rho_b W}{C_0 K} \ln \left(\frac{C_0 - C_x}{C_x} \right) \quad \text{----- (1)}$$

จัดเรียงใหม่ได้เป็น

$$-\text{Ln} \left(\frac{C_0 - C_y}{C_y} \right) = \frac{C_0 K}{\rho_b W} \tau_x - \frac{L K}{u} \quad \text{----- (2)}$$

เมื่อ		
C_0	=	ความเข้มข้นขาเข้า (กรัม/)
C_x	=	ความเข้มข้นขาออก ณ เวลา τ_{min}
K	=	ค่าคงที่อัตราการดูดซับ (นาที)
L	=	ความสูงของเบตนิ่ง (เซนติเมตร)
μ	=	ความเร็วของแก๊สผสม (เซนติเมตรต่อนาที)
τ	=	ระยะเวลาในการดูดซับ (นาที)

3. ตัวอย่างการคำนวณ

ใช้ข้อมูลการทดลองจากตาราง ค1 ที่เวลา 10 นาที

1. คำนวณปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (กรัม นาทีต่อลิตร)

ปริมาณเบรียมที่ไตเตรต 0.05 cm^3 ที่เวลา 10 นาที

จากสูตร

$$(\text{SO}_2)_{\text{gm min/lit}} = \frac{0.032 \times (\text{ml BaCl}_2) \times (N \text{ BaCl}_2) \times (\text{Sample Volume})}{(\text{Aliquot Volume}) \times (\text{Flow Rate})}$$

เมื่อ

$$\text{ml BaCl}_2 = 0.05 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$N \text{ BaCl}_2 = 0.01334$$

$$\text{Sample Volume} = 50 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{Aliquot Volume} = 5 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{Flow Rate} = 0.3 \text{ ลิตร / นาที}$$

แทนค่าในสมการ

$$\text{SO}_2 (\text{gm.min/l}) = \frac{(0.05 \times 0.01334 \times 0.032 \times 50)}{5 \times 0.3}$$

$$= 0.000694 \text{ gm.min/l}$$

2. คำนวณปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (พีพีเอ็ม)

จากสูตร

$$(\text{SO}_2)_{\text{ppm}} = \frac{0.0245 \times 10^9 \times (\text{SO}_2)_{\text{gm min/ lit}}}{(\text{MW SO}_2) \times (\text{Time})}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \text{MW SO}_2 &= 64.0628 \\ \text{Time} &= 10 \text{ นาที} \\ \text{SO}_2(\text{gm.min/l}) &= 0.000694 \text{ gm.min/l} \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการ

$$\begin{aligned} \text{SO}_2 &= \frac{0.000694 \times 0.0245 \times 10^9}{(64.0628 \times 10)} \\ &= 26.51 \text{ ppm} \end{aligned}$$

3. การคำนวณ ปริมาณ การดูดซับ (adsorption capacity) และ อัตราการดูดซับ (adsorption rate constant)

ใช้ข้อมูล 1% KI/AC ที่เวลา 10-50 นาที ดังตาราง

ตาราง ข1 ตารางแสดงข้อมูลของถ่านกัมมันต์อิมเพรกเนตด้วยโพแทสเซียมไอโอไดด์เข้มข้น 10 % โดยน้ำหนัก

เวลา (min)	ปริมาณ BaCl ₂ ที่ไตเตรตได้ (cm ³)	ปริมาณ SO ₂ (g min/lit)
0	0.00	0.0000
10	0.15	0.0021
20	0.55	0.0076
30	1.30	0.0180
40	2.40	0.0333
50	3.30	0.0458

จากข้อมูลปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์(g. min /lit) แปลงเป็นหน่วย (g/cm³) โดยเวลาที่ใช้ในการทดลอง คือ 10 นาที มีปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เท่ากับ 0.0021 g.min/lit

ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (g/min) เท่ากับ 0.0021 g.min

$$\begin{array}{lcl} \text{SO}_2 \text{ (ppm)} & = & \frac{0.0021 \text{ g.min}}{\text{lit}} \left| \frac{1 \text{ lit}}{1000 \text{ cm}^3} \right| \frac{1}{10 \text{ min}} \\ & = & 2.1 \times 10^{-7} \text{ g/cm}^3 \end{array}$$

แปลงหน่วยความเข้มข้นและหาค่า $\text{Ln} \left(\frac{C_0 - C_y}{C_y} \right)$

โดย C_0 เป็นค่าความเข้มข้นเริ่มต้น g/cm^3

C_y เป็นความเข้มข้น ณ เวลาที่สนใจในหน่วย g/cm^3

จากความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เริ่มต้นของการทดลองนี้

$$C_0 = 0.05000 \text{ g/cm}^3 = 5.0 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$$

และจากการคำนวณข้อมูลเป็นเวลา 10 นาที ความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (C_y)

$$\begin{aligned} -\text{Ln} \left(\frac{C_0 - C_y}{C_y} \right) &= -\text{Ln} \left(\frac{(5.0 \times 10^{-6}) - (2.1 \times 10^{-7})}{(2.1 \times 10^{-7})} \right) \\ &= -3.14 \end{aligned}$$

$$\text{จากสูตร} \quad -\text{Ln} \left(\frac{C_0 - C_y}{C_y} \right) = \frac{C_0 K}{\rho_b W} \tau_x - \frac{LK}{u}$$

ค่า L และ u

$$L = \text{ความสูงของเบตนิ่ง} = 1.2 \text{ เซนติเมตร}$$

$$u = \text{ความเร็วของแก๊ส (เซนติเมตรต่อวินาที)}$$

$$= \frac{\text{flow rate (cm}^3/\text{min)}}{\text{Adsorber cross sectional area (cm}^2\text{)}}$$

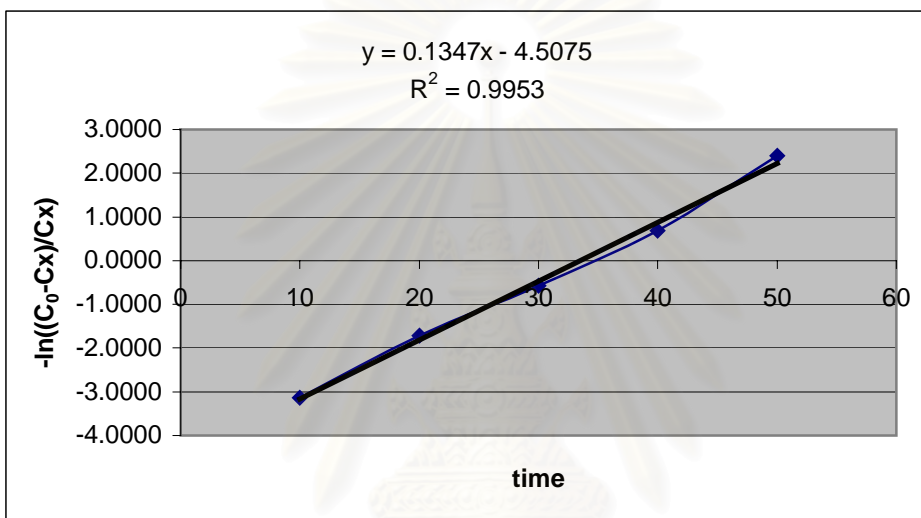
$$= \frac{300}{\pi(1.5/2)^2} = 169.77 \text{ cm/min}$$

ดังนั้น เมื่อสร้างกราฟระหว่าง τ_x (แกน X) กับ $-\text{Ln} \left(\frac{C_0 - C_y}{C_y} \right)$ (แกน Y)

$$\text{จะได้จุดตัด} = -\frac{LK}{u} \quad \text{และความชัน} = \frac{C_0 K}{\rho_b W}$$

จากข้อมูลการทดลองสามารถแปลงหน่วยความเข้มข้นคำนวณค่าต่างๆได้ดังนี้

เวลา (min)	ปริมาณ SO ₂ (g /cm ³)	-ln((C ₀ -C _x)/C _x)
0	0.000000000	
10	0.000000208	-3.1355
20	0.000000764	-1.7130
30	0.000001805	-0.5705
40	0.000003332	0.6931
50	0.000004581	2.3979



จากกราฟ จุดตัด = -4.5075 และ ความชัน = 0.1347

จากจุดตัด สามารถคำนวณค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ

$$K = \frac{169.77 \times (-4.5075)}{0.4812} = 637.68 \text{ min}^{-1}$$

จากค่าความชัน ค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ และค่าหนาแน่นเชิงปริมาตรของตัวดูดซับสามารถคำนวณค่า ปริมาณการดูดซับ

$$W = \frac{C_0 K}{\rho_b \times \text{slope}} = \frac{[(5.0 \times 10^{-6}) \times 637.68]}{0.4812 \times 0.1346} = 0.0492 \text{ g SO}_2/\text{g adsorbent}$$

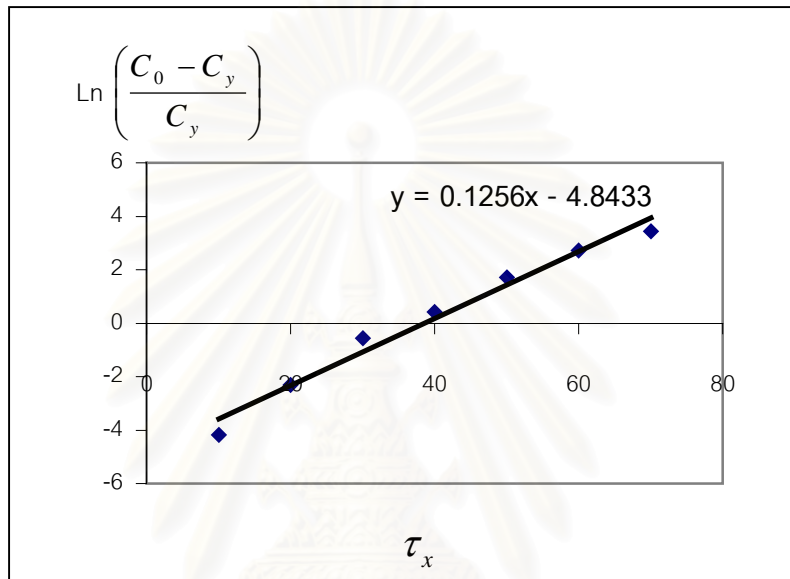
ดังนั้น ค่าคงที่การดูดซับ (K) เท่ากับ 637.68 ต่อนาที และค่าปริมาณการดูดซับ เท่ากับ 0.0492 กรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ

ภาคผนวก ค.

ข้อมูลผลการทดลอง

1. ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับ และอัตราการดูดซับ

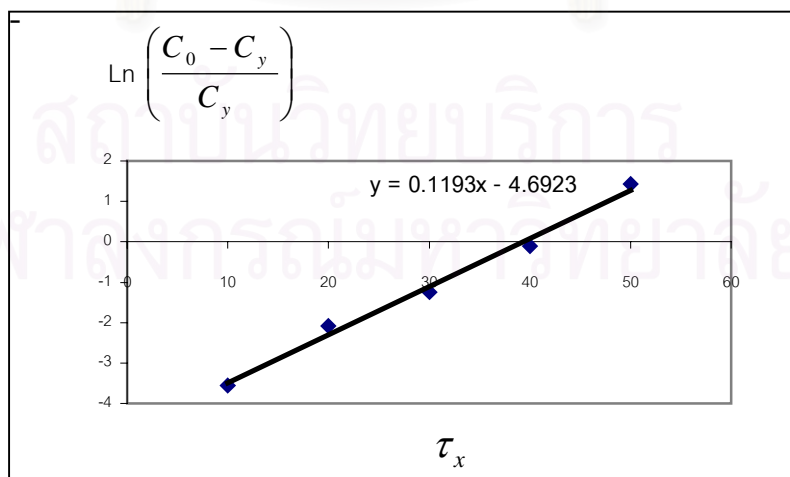
1.1 ถ่านกัมมันต์



รูปที่ ค1 จำนวนปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของถ่านกัมมันต์

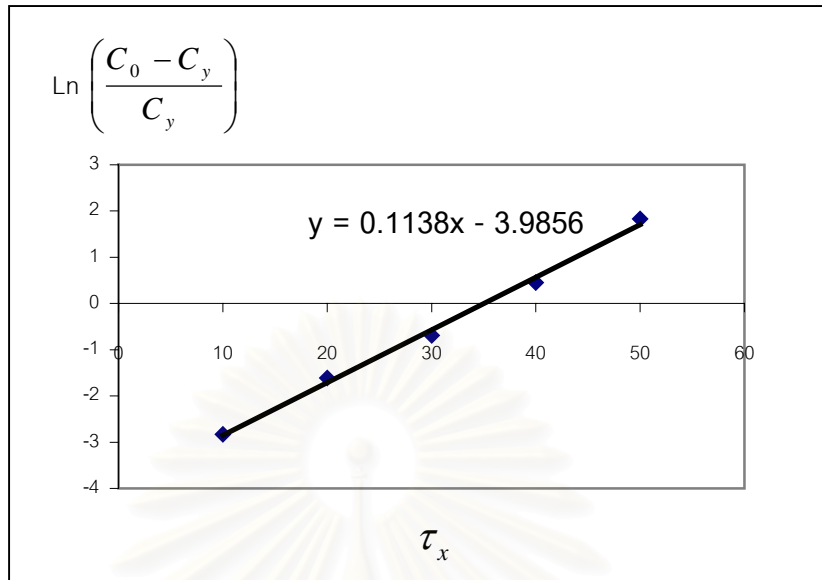
1.2 ถ่านกัมมันต์อิมเพรกเนตโพแทสเซียมไอโอไดด์

- 1% KI



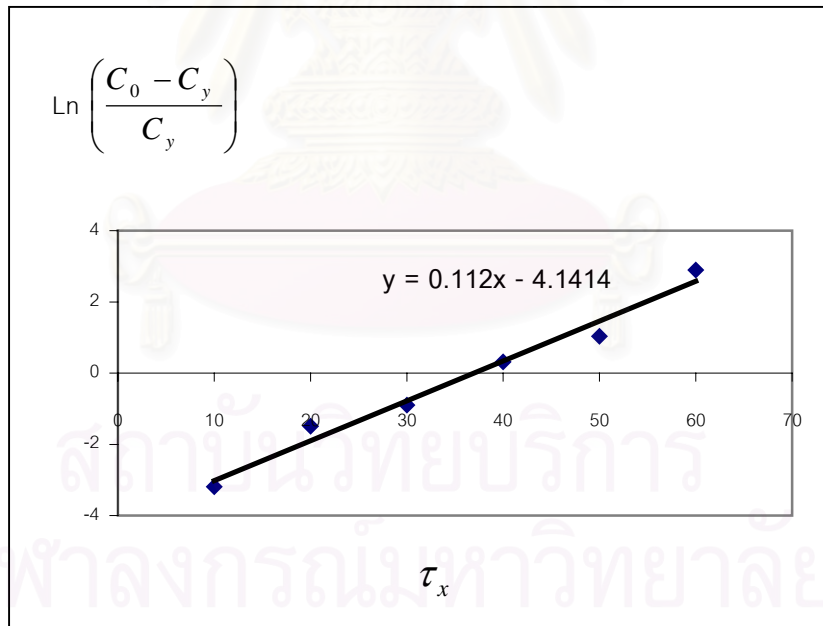
รูปที่ ค2 จำนวนปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 1% KI/AC

- 3% KI/AC



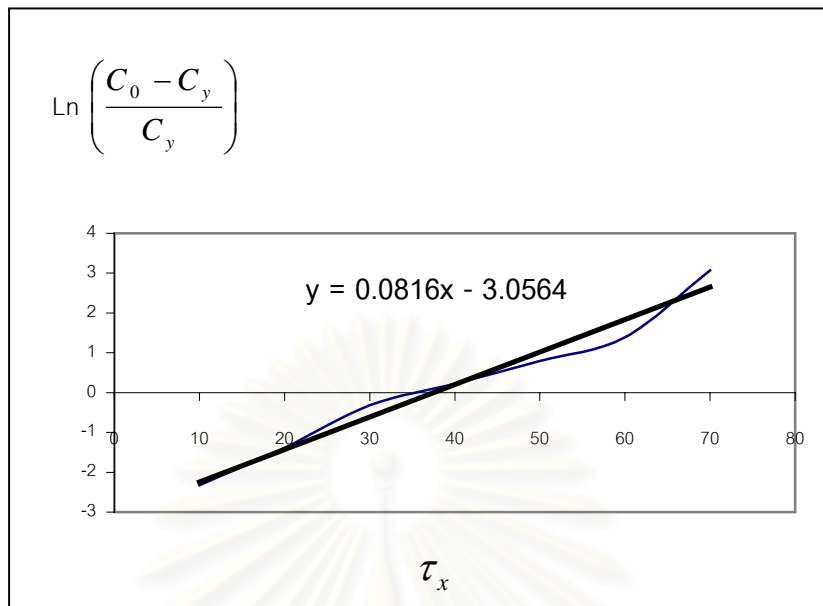
รูปที่ ค3 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 3% KI/AC

- 5% KI/AC



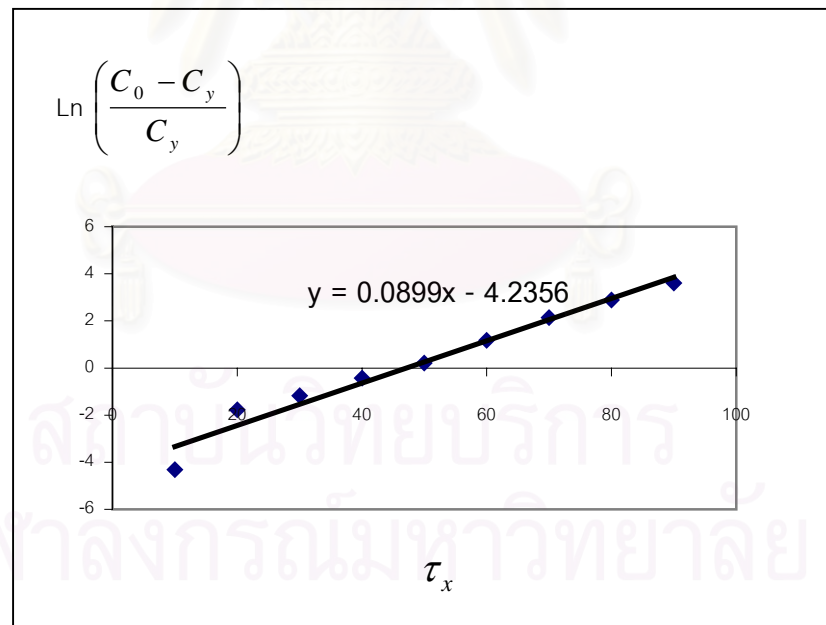
รูปที่ ค4 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 5% KI/AC

- 7% KI/AC



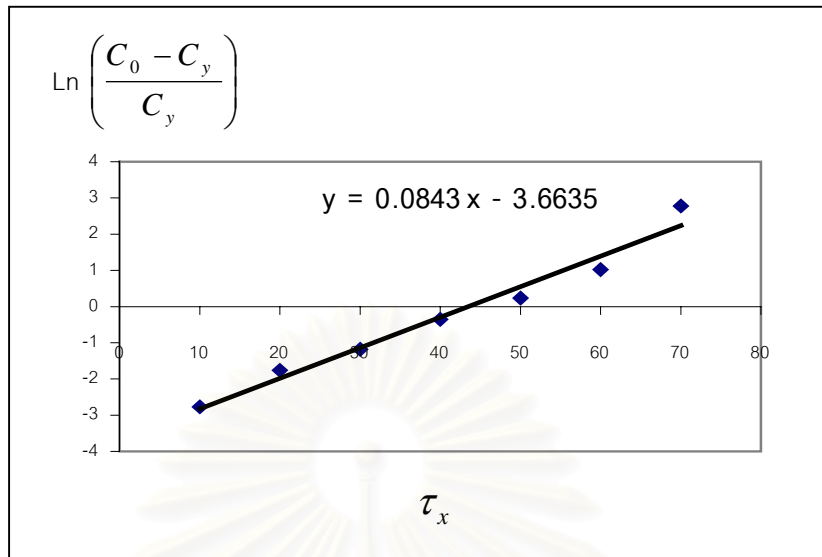
รูปที่ ค5 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 7% KI/AC

- 10% KI/AC



รูปที่ ค6 คำนวณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 10% KI/AC

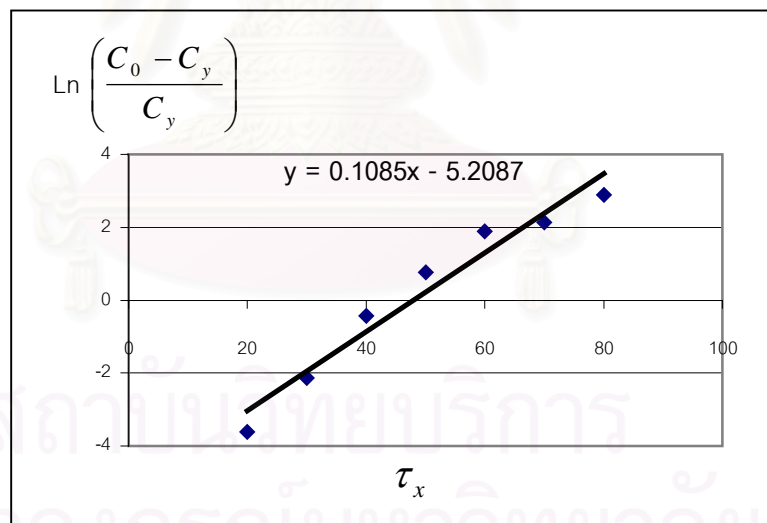
- 15% KI/AC



รูปที่ ค7 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 15% KI/AC

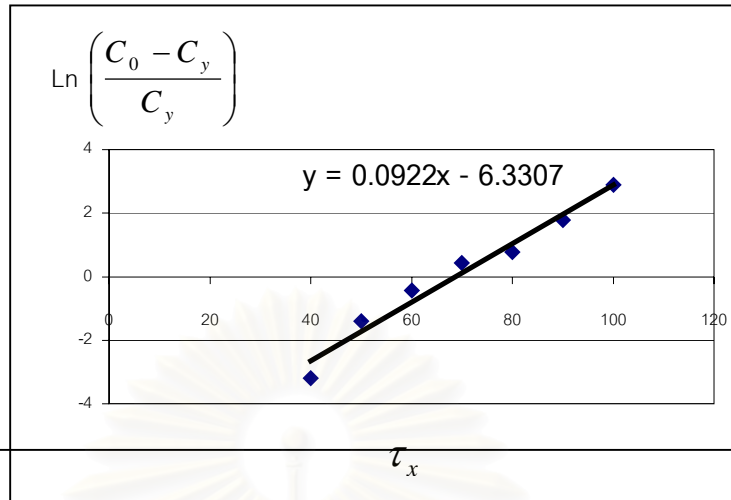
2.3 ถ่านกัมมันต์อิมเพรกเนตโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

- 1% KOH



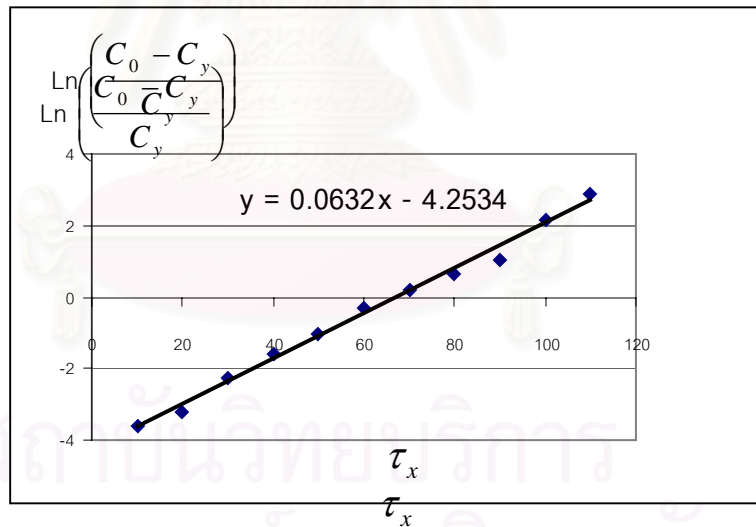
รูปที่ ค8 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 1% KOH

- 3 % KOH



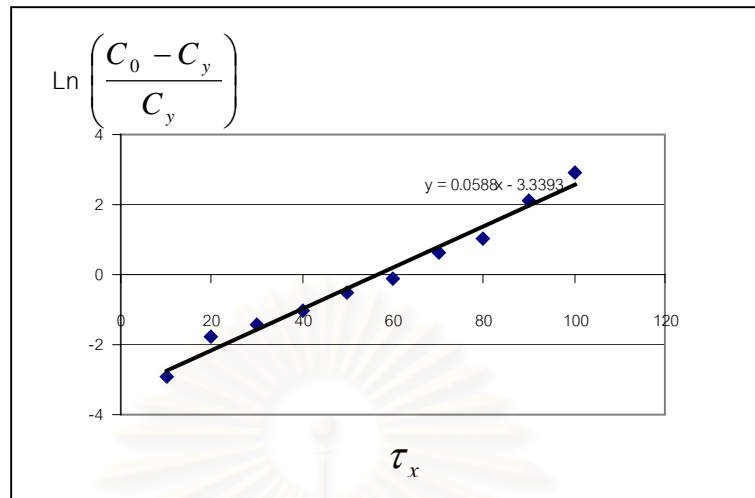
รูปที่ ค9 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 3% KOH

- 5% KOH



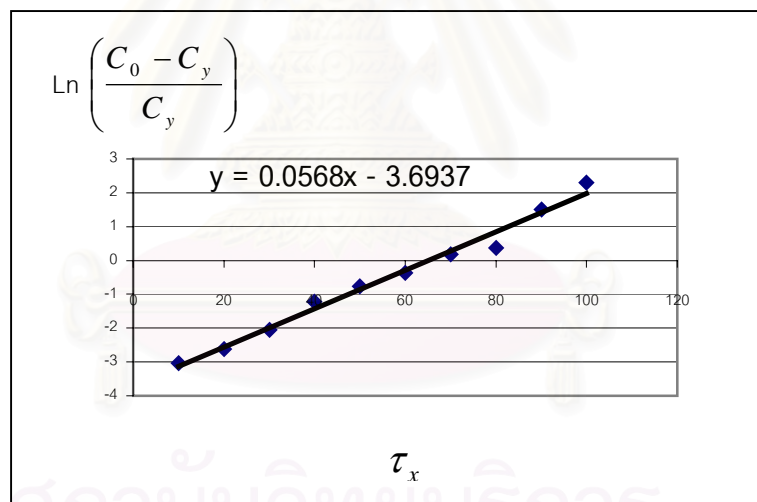
รูปที่ ค10 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 5% KOH

- 7% KOH



รูปที่ ค11 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 7% KOH

- 10% KOH

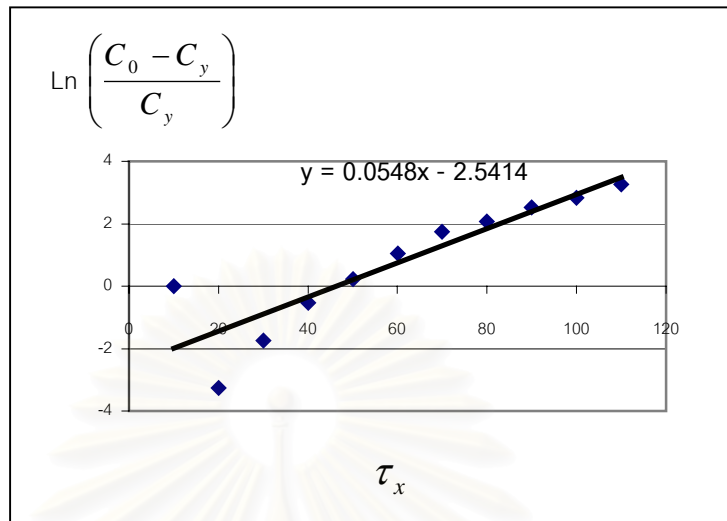


รูปที่ ค12 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 10% KOH

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

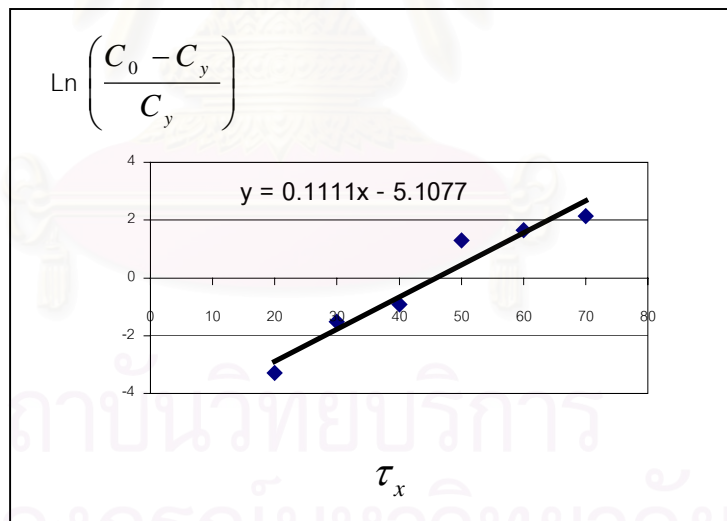
2.4 ถ่านกัมมันต์อิมเพรกเนตโซเดียมไฮดรอกไซด์

- 1% NaOH



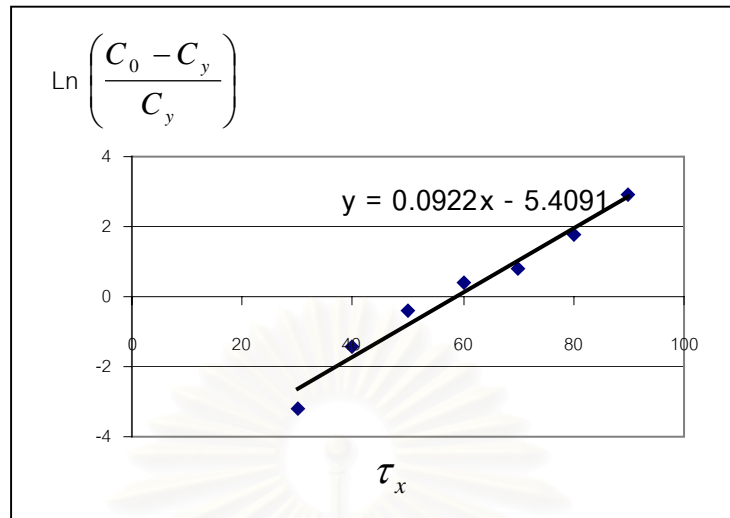
รูปที่ ค13 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 1% NaOH

- 3 % NaOH



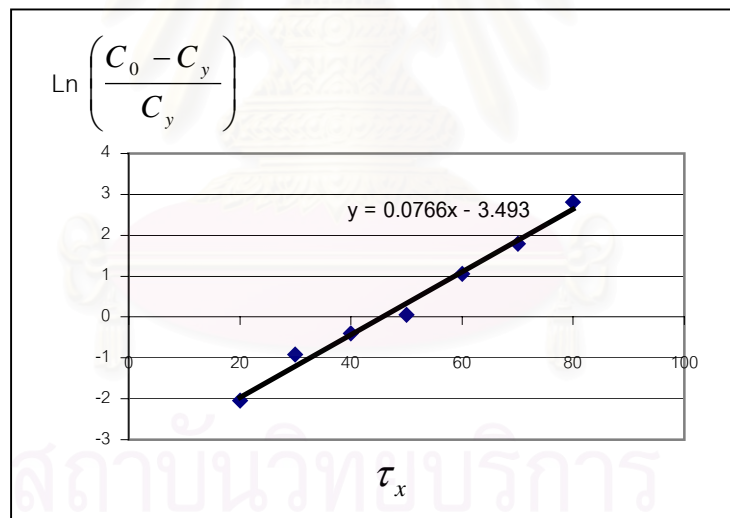
รูปที่ ค14 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 3% NaOH

- 5% NaOH



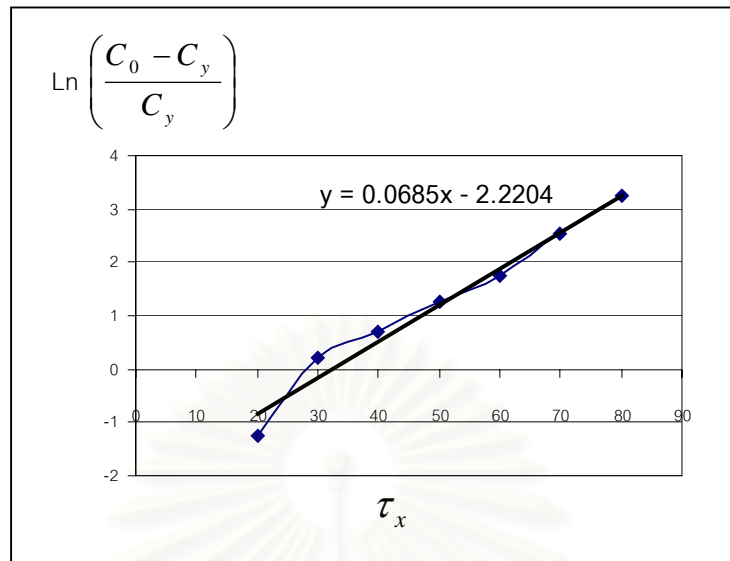
รูปที่ ค15 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 5% NaOH

- 7% NaOH



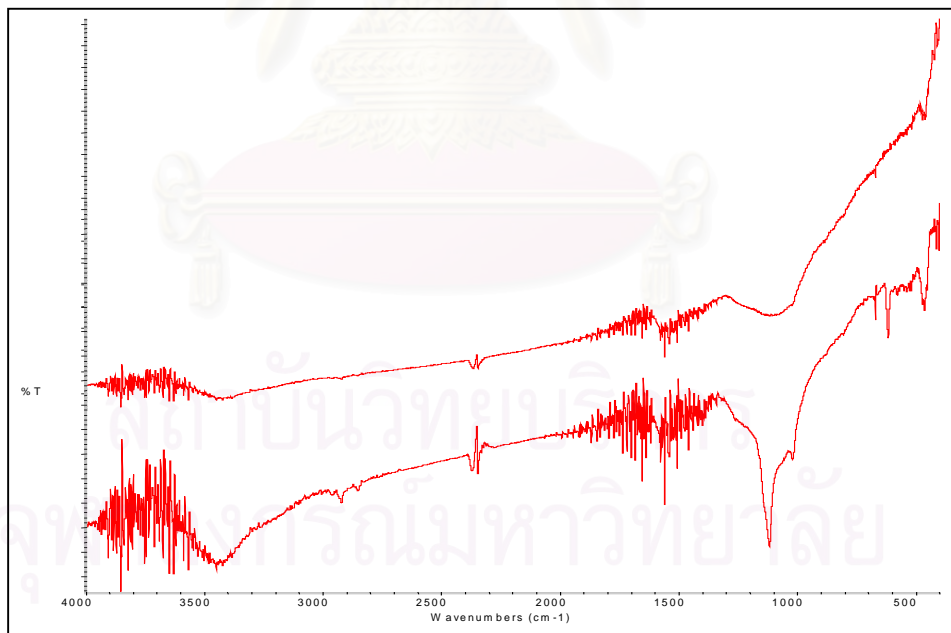
รูปที่ ค16 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ 7% NaOH

- 10% NaOH



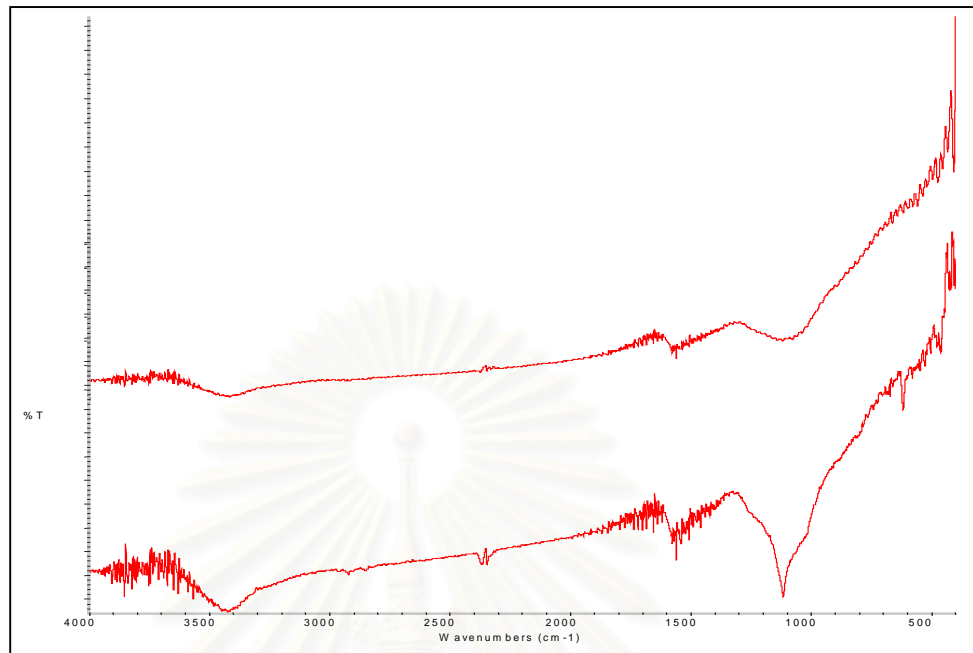
รูปที่ ค17 คำนวณปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับของ10% NaOH

2. ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ที่อิมเพรกเนตด้วยคอสติก
- ถ่านกัมมันต์



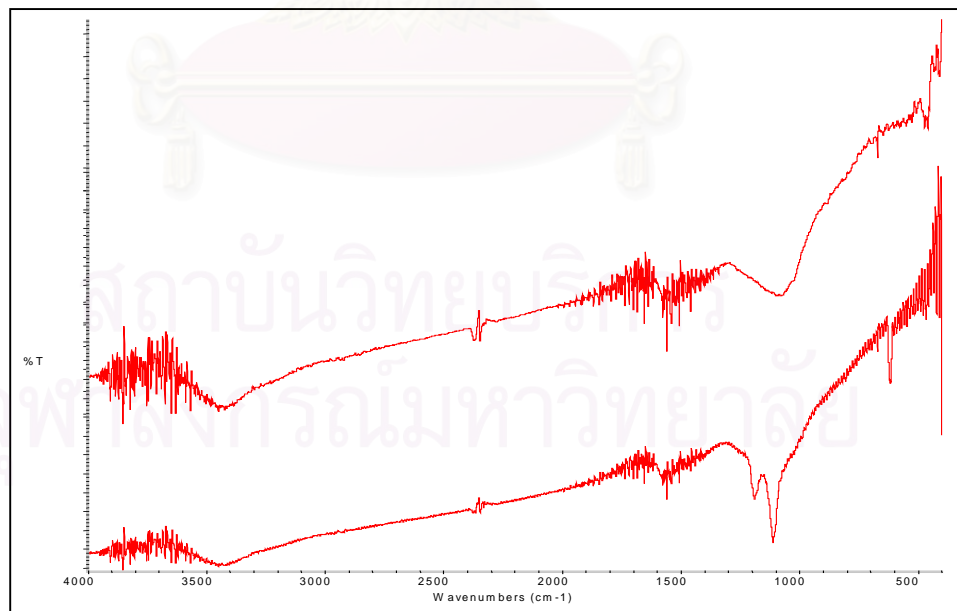
รูปที่ 4.18 แสดงFT-IR spectrum ของถ่านกัมมันต์ (ก) ไม่ดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ข) ทำการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

- ถ่านกัมมันต์อิมเพรกเนตโพแทสเซียมไอโอไดด์



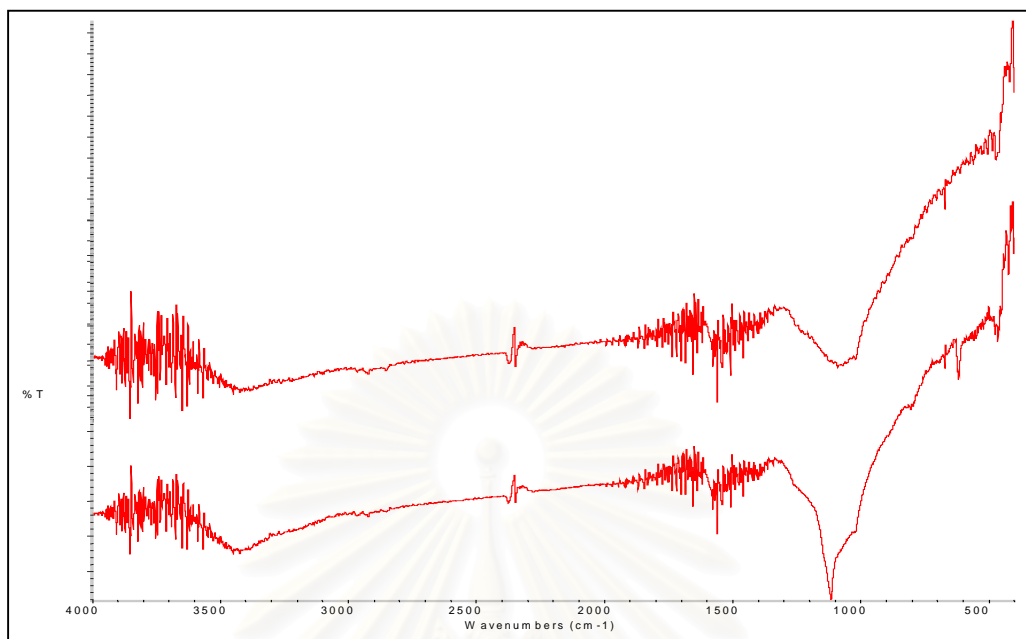
รูปที่ 4.19 แสดงFT-IR spectrum ของถ่านกัมมันต์อิมเพรกเนตโพแทสเซียมไอโอไดด์ (ก) ไม่ดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ข) ทำการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

- ถ่านกัมมันต์อิมเพรกเนตโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.20 แสดงFT-IR spectrum ของถ่านกัมมันต์โซเดียมไฮดรอกไซด์ (ก) ไม่ดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ข) ทำการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

- ถ่านกัมมันต์ทางการค้า (5% KI)



รูปที่ 4.21 แสดง FT-IR spectrum ของถ่านกัมมันต์ทางการค้า (5% KI) (ก) ไม่ดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ข) ทำการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. ผลการทดลองเส้นโค้งผ่านทะเล (Breakthrough time)

ตาราง ค1 ผลการทดลองเส้นโค้งผ่านทะเลที่ขนาดอนุภาคต่างกัน

ขนาดตัวดูดซับ	2.36-2	2-1.18	1.18-750
เวลา	C/C_0	C/C_0	C/C_0
0	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000
20	0.167	0.111	0.000
30	0.417	0.222	0.135
40	0.583	0.417	0.486
50	0.861	0.694	0.757
60	0.944	0.861	1.000
70	0.972	1.000	1.000
80	1.000	1.000	1.000
90	1.000	1.000	1.000
100	1.000	1.000	1.000

ตาราง ค 2 ผลการทดลองเส้นโค้งผ่านทะเลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน

ตัวดูดซับ	1% NaOH	3%NaOH	5%NaOH	7%NaOH	10%NaOH
เวลา	C/C_0	C/C_0	C/C_0	C/C_0	C/C_0
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20	0.037	0.179	0.000	0.222	0.114
30	0.148	0.464	0.039	0.556	0.286
40	0.370	0.679	0.197	0.667	0.400
50	0.556	0.786	0.395	0.778	0.514
60	0.741	0.839	0.605	0.852	0.743
70	0.852	0.893	0.684	0.926	0.857
80	0.889	1.000	0.855	0.963	0.943
90	0.926	1.000	0.947	1.000	1.000
100	0.944	1.000	1.000	1.000	1.000
110	0.963	1.000	1.000	1.000	1.000
120	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
130	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
140	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
150	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค 3 ผลการทดลองเส้นโค้งผ่านทะเลของโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน

ตัวคูณ	1% KI	3% KI	5% KI	7% KI	10% KI
เวลา	C/C_0	C/C_0	C/C_0	C/C_0	C/C_0
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.028	0.056	0.039	0.089	0.013
20	0.111	0.167	0.184	0.200	0.145
30	0.222	0.333	0.289	0.422	0.237
40	0.472	0.611	0.579	0.556	0.395
50	0.806	0.861	0.737	0.689	0.553
60	1.000	1.000	0.947	0.800	0.763
70	1.000	1.000	1.000	0.956	0.895
80	1.000	1.000	1.000	1.000	0.947
90	1.000	1.000	1.000	1.000	0.974
100	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
110	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
120	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
130	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
140	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
150	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค 4 ผลการทดลองเส้นโค้งผ่านทะเลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน

ตัวคูณซ้ำ	1% KOH	3% KOH	5% KOH	7% KOH	10% KOH
เวลา	C/C_0	C/C_0	C/C_0	C/C_0	C/C_0
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.053	0.026	0.045
20	0.026	0.000	0.145	0.039	0.068
30	0.105	0.000	0.197	0.092	0.114
40	0.395	0.237	0.263	0.171	0.227
50	0.684	0.461	0.368	0.263	0.318
60	0.868	0.724	0.474	0.421	0.409
70	0.895	0.842	0.658	0.553	0.545
80	0.947	0.974	0.737	0.658	0.591
90	0.947	1.000	0.895	0.737	0.818
100	1.000	1.000	0.947	0.895	0.909
110	1.000	1.000	1.000	0.947	1.000
120	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
130	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
140	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
150	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

ตาราง ค 5 ผลการทดลองเส้นโค้งผ่านทะเลที่อัตราการไหลต่างกัน

อัตราการไหล (ml/min)	150	300	450	600
เวลา	C/C_0	C/C_0	C/C_0	C/C_0
0	0.000	0.000	0.000	0.293
10	0.000	0.000	0.085	0.507
20	0.000	0.000	0.305	0.840
30	0.000	0.039	0.508	0.907
40	0.025	0.197	0.678	0.960
50	0.125	0.395	0.847	1.000
60	0.250	0.605	1.000	1.000
70	0.475	0.684	1.000	1.000
80	0.600	0.855	1.000	1.000
90	0.750	0.947	1.000	1.000
100	0.900	1.000	1.000	1.000
110	1.000	1.000	1.000	1.000
120	1.000	1.000	1.000	1.000
130	1.000	1.000	1.000	1.000
140	1.000	1.000	1.000	1.000
150	0.000	0.000	0.000	0.000

ตาราง ค 6 ผลการทดลองเส้นโค้งผ่านทะเลที่ตัวดูดซับต่างชนิด

ตัวดูดซับ	5%KI	commercial
เวลา	C/C_0	C/C_0
0	0.000	0.000
10	0.039	0.421
20	0.184	0.684
30	0.289	0.737
40	0.579	0.947
50	0.737	1.000
60	0.947	1.000
70	1.000	1.000
80	1.000	1.000
90	1.000	1.000
100	1.000	1.000
110	1.000	1.000
120	1.000	1.000
130	1.000	1.000
140	1.000	1.000
150	1.000	1.000

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุธีรา สมนิยมไชย เกิดวันที่ 7 พฤศจิกายน 2523 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี
วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์
ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อใน
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา
2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย