

การใช้ประโยชน์เก้าอี้จากโรงไฟฟ้าในการดูดซับสารไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในน้ำ



นาย จักรพงศ์ ศศิธร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZATION OF FLY ASH FROM POWER PLANT FOR ADSORPTION OF  
HYDROCARBON CONTAMINATION IN WATER



Mr. Jakkapong Sasithorn

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

Department of Mining and Petroleum Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การใช้ประโยชน์ได้ออกจากโรงไฟฟ้าในการดูดซับสาร  
ไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในน้ำ

โดย

นายจักรพงศ์ ศศิธร

สาขาวิชา

วิศวกรรมทรัพยากรธรณี


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. ดาวัลย์ วิวรรณะเดช

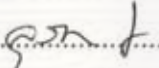
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

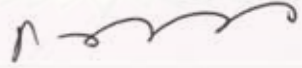
ดร. สุพิน แสงสุข

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

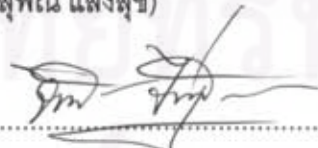
  
.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศhiritวงศ์)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพล ภูวิจิตร)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดาวัลย์ วิวรรณะเดช)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร.สุพิน แสงสุข)

  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวัดน์ ชีวรุ่งโรจน์)

  
.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.สิริน นาสกุล)

จักรพงษ์ ศศิธร : การใช้ประโยชน์เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าในการดูดซับสารไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในน้ำ. (UTILIZATION OF FLY ASH FROM POWER PLANT FOR ADSORPTION OF HYDROCARBON CONTAMINATION IN WATER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.ดาวลย์ วิวรรณะเดช, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร.สุพิน แสงสุข, 115 หน้า.

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) ที่ปนเปื้อนในน้ำ ด้วยเถ้าลอยแกลบเปรียบเทียบกับ เถ้าลอยดำหิน และ ซิลิกาจากเถ้าลอยแกลบ ทั้งชนิดที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิว โดยใช้แนฟธาซีน (Naphthalene) เป็นสารตัวแทนสำหรับสาร PAHs และใช้เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cethyltrimethylammoniumbromide, CTAB) เป็นสารปรับสภาพผิว พบว่าหากใช้สารดูดซับ 0.3 กรัม ผสมในสารละลายแนฟธาซีนในน้ำ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ คือ ทำการเขย่าสารดูดซับแต่ละชนิดในสารละลาย pH 2 ด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที โดยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ คล้ายคลึงกันสำหรับสารดูดซับทุกตัวที่ใช้ในการศึกษานี้ ซึ่งพบว่าซิลิกาจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย CTAB มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารดูดซับกับแนฟธาซีนที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเริ่มคงที่หรือเข้าสู่สมดุลเมื่อใช้สารดูดซับ 0.7 กรัมต่อแนฟธาซีน 1 มิลลิกรัม ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับระบบการดูดซับในการศึกษานี้ คือ การใช้สารดูดซับ 0.7 กรัมต่อ 1 มิลลิกรัมแนฟธาซีนในสารละลาย pH 2 ทำการเขย่าด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที ส่วนผลการศึกษาพฤติกรรมดูดซับพบว่ามีผลสอดคล้องกับทฤษฎีการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich Isotherm)

ภาควิชา.....วิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม..ลายมือชื่อ นิสิต.....จักรพงษ์ ศศิธร.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมทรัพยากรธรณี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา..2552.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....สุพิน

## 5070236721: MAJOR GEORESOURCES ENGINEERING

KEYWORDS : PAHS / CTAB / NAPHTHALENE / FLY ASH / ADSORPTION

JAKKAPONG SASITHORN : UTILIZATION OF FLY ASH FROM POWER PLANT FOR ADSORPTION OF HYDROCARBON CONTAMINATION IN WATER. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. DAWAN WIWATTANADATE, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : SUPIN SANGSUK, Ph.D., 115 pp.

Adsorption efficiency of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated in water with rice husk fly ash from power plant was investigated in comparison with coal fly ash and silica from rice husk fly ash, with and without surface treatment. Naphthalene was used as a representative for PAHs, and Cethyltrimethylammoniumbromide (CTAB) was used as surface treating agent for the present study. Various factors, such as shaking rate, shaking time, pH of naphthalene aqueous solution, and adsorbent-naphthalene weight ratio, were investigated to identify an optimum condition for each adsorbent. Upon using 0.3 g adsorbent in 100 ml of 10 mg/l naphthalene solution, the optimum condition was observed to be shaking the mixture of an adsorbent and naphthalene solution with pH 2 at 250 rpm for 60 min. It was also found that similar optimum conditions were observed for all adsorbents used in the present study, except the highest efficiency of silica from rice husk fly ash treated with CTAB. In addition, upon varying weight ratios of adsorbent and naphthalene, adsorption efficiency was observed to be gradually increasing and reaching equilibrium at the ratio of 0.7 g adsorbent per mg naphthalene. Therefore, the optimum condition for the present study should be using 0.7 g adsorbent per mg naphthalene in solution pH 2 and shaking at 250 rpm for 60 min. Adsorption behavior of the system was also investigated and found to be in line with Freundlich Isotherm.

Department :...Mining and Petroleum Engineering...	Student's signature.....
Field of Study :.Georesources Engineering.....	Advisor's signature .....
Academic Year :...2009.....	Co-Advisor's signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยความอนุเคราะห์จากองค์กรและบุคคลหลายฝ่าย ได้แก่ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ดาวัลย์ วิจารณ์เดช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี ในการให้คำปรึกษา และแนะนำแนวทางในการวิจัยและตรวจแก้ไขข้อผิดพลาด ทำให้การวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ดร. สุพิณ แสงสุข อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ในความอนุเคราะห์ด้านข้อมูลและคำปรึกษา ตลอดจนความช่วยเหลือต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ผศ.ดร.สุรพล ภู่วิจิตร, ผศ.ดร. จิรวัดน์ ชีวรุ่งโรจน์ และ ดร. สิริ นาสกุล สำหรับข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียมทุกท่านในส่วนของการทดลอง รวมถึงการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่าง ได้รับความอนุเคราะห์เป็นอย่างดีจากการช่วยเหลือและให้คำแนะนำเกี่ยวกับการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือของห้องปฏิบัติการในการทำวิจัยครั้งนี้

นอกจากนี้ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ในห้องพักนิตินิตปริญญาโททุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา คุณตา คุณยาย ญาติพี่น้อง ที่ได้ให้การสนับสนุน และคอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาในทุกๆ เรื่อง รวมทั้งให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้มา โดยตลอดจนสำเร็จการศึกษาได้ด้วยดี

ศูนย์วิทยุทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1    บทนำ.....	1
1.1    ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2    วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3    ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4    ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2    เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1    ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน...	3
2.1.1    แหล่งที่มาของสารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนสิ่งแวดล้อม.....	3
2.1.2    การแพร่กระจายของสารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในสิ่งแวดล้อม.....	5
2.1.3    ผลกระทบของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน.....	7
2.2    กระบวนการดูดซับ.....	7
2.2.1    กลไกการดูดซับ.....	8
2.2.2    ลักษณะของการดูดซับ.....	9
2.2.3    ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางเคมีและกายภาพ.....	11
2.2.4    แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ.....	11
2.2.5    ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	13
2.2.6    ไอโซเทอมของการดูดซับ.....	14
2.3    แกลบและเถ้าแกลบ.....	18
2.3.1    การใช้ประโยชน์จากเถ้าแกลบ.....	19

บทที่	หน้า
2.4 ซิลิกา.....	21
2.4.1 โครงสร้างของซิลิกา.....	23
2.4.2 การใช้ประโยชน์ซิลิกาจากถ้ำเกลือ.....	24
2.4.3 การเตรียมซิลิกาจากถ้ำเกลือ.....	24
2.5 ถ้ำลอยถ่านหิน.....	25
2.5.1 สารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหิน.....	25
2.5.2 การจัดรูปของถ้ำลอยขณะทำการเผาไหม้.....	26
2.5.3 อุปกรณ์ที่ใช้ดักเก็บถ้ำลอยถ่านหิน.....	27
2.5.4 ชนิดของถ้ำลอยถ่านหินจำแนกตามส่วนประกอบตามธรรมชาติ.....	27
2.5.5 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหิน.....	27
2.5.6 ประโยชน์ของถ้ำลอยถ่านหิน.....	29
2.5.7 การใช้ประโยชน์ถ้ำลอยถ่านหินในการดูดซับ.....	30
2.6 การปรับสภาพพื้นผิวของสารดูดซับด้วยสารปรับสภาพผิว.....	31
2.6.1 สารปรับสภาพผิว.....	32
2.6.2 เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์.....	32
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนิน.....	38
3.1 ขั้นตอนการวิจัย.....	38
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	39
3.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	39
3.4.1 การวิเคราะห์ปริมาณแนฟธาลีนก่อนและหลังใส่สารดูดซับ.....	39
3.4.2 การปรับสภาพพื้นผิวของสารดูดซับด้วยสารปรับสภาพผิว.....	40
3.4.3 การศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสารดูดซับ.....	40
3.4.4 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับแนฟธาลีนด้วยสารดูดซับ....	40
3.4.4.1 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบที่ใช้ในการเขย่า.....	40
3.4.4.2 ศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัส.....	41
3.4.4.3 ศึกษาอิทธิพลของค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ.....	42
3.4.4.4 ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแนฟธาลีน.....	42
3.4.4.5 ศึกษาอิทธิพลของการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ.....	43



บทที่	หน้า
4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	44
4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสารดูดซับ.....	44
4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับ.....	44
4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของสารดูดซับ.....	47
4.1.3 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างพื้นผิวของสารดูดซับ.....	49
4.1.4 การหาพื้นที่ผิวของสารดูดซับ.....	51
4.1.5 การวิเคราะห์ลักษณะหมู่ฟังก์ชันเฉพาะของสารดูดซับ.....	52
4.1.6 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนของสารดูดซับ.....	57
4.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายแอฟทาลีน.....	58
4.3 การศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับแอฟทาลีน.....	59
4.3.1 อิทธิพลของระดับความเร็วรอบการเขย่า.....	59
4.3.2 อิทธิพลของช่วงเวลาสัมผัส.....	61
4.3.3 อิทธิพลของค่า pH.....	62
4.3.4 ผลการศึกษาสัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแอฟทาลีน.....	65
4.3.5 ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ.....	66
4.3.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ.....	76
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	82
รายการอ้างอิง.....	85
ภาคผนวก.....	89
ภาคผนวก ก.....	90
ภาคผนวก ข.....	92
ภาคผนวก ค.....	99
ภาคผนวก ง.....	102
ภาคผนวก จ.....	109
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	115

คุรุสภาวิทยาลัยพยาบาล  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินแต่ละชนิด.....	29
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำแกลบ.....	44
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของชิลิกาจากถ้ำแกลบ.....	45
4.3	องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหิน.....	46
4.4	ผลการวิเคราะห์การหาพื้นที่ผิวของสารดูดซับ.....	51
4.5	ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน.....	57
4.6	ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารละลายแอฟธาไลน์กับค่าการดูดกลืนแสง	58
4.7	ประสิทธิภาพในการกำจัดแอฟธาไลน์ที่ระดับความเร็วรอบต่างๆ.....	60
4.8	ประสิทธิภาพในการกำจัดแอฟธาไลน์ที่ค่าพีเอชต่างๆ.....	64
4.9	ปริมาณแอฟธาไลน์เมื่อถูกดูดซับด้วยถ้ำแกลบ.....	67
4.10	ปริมาณแอฟธาไลน์เมื่อถูกดูดซับด้วยถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว.....	69
4.11	ปริมาณแอฟธาไลน์เมื่อถูกดูดซับด้วยชิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว.....	71
4.12	ปริมาณแอฟธาไลน์เมื่อถูกดูดซับด้วยถ้ำลอยถ่านหิน.....	72
4.13	ปริมาณแอฟธาไลน์เมื่อถูกดูดซับด้วยถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพผิว....	74
4.14	ค่าคงที่ของสารดูดซับแต่ละชนิดจากสมการฟรุนดลิช.....	76

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	โครงสร้างโมเลกุลของ PAHs ทั้งหมด 16 ชนิดตามรายงานของ U.S.EPA.....	4
2.2	ขั้นตอนการเคลื่อนตัวของตัวถูกดูดซับในกระบวนการดูดซับ.....	9
2.3	การดูดซับของสารดูดซับด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต.....	13
2.4	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir).....	16
2.5	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich).....	18
2.6	แกลบและเถ้าแกลบ.....	20
2.7	การเชื่อมต่อกันของ SiO <sub>4</sub> tetrahedra ในโครงสร้างพื้นฐานของซิลิกา.....	22
2.8	ซิลิกาจากเถ้าแกลบ.....	25
2.9	เถ้าลอยถ่านหิน.....	30
2.10	การดูดซับของสารปรับสภาพผิวชนิดประจุบวกบนผิวของซิลิกา.....	31
2.11	โครงสร้างทางเคมีของ CTAB.....	32
2.12	ลักษณะโครงสร้างของสารปรับสภาพผิว.....	33
4.1	ผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของเถ้าแกลบ.....	47
4.2	ผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซิลิกาจากเถ้าแกลบ.....	48
4.3	ผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของเถ้าลอยถ่านหิน.....	48
4.4	ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของเถ้าแกลบที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	49
4.5	ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของซิลิกาจากเถ้าแกลบที่กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	50
4.6	ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของเถ้าลอยถ่านหินที่กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	50
4.7	ผลการวิเคราะห์ลักษณะหมู่ฟังก์ชันของเถ้าแกลบ.....	53
4.8	ผลการวิเคราะห์ลักษณะของหมู่ฟังก์ชันของเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับสภาพผิว...	53
4.9	ผลการวิเคราะห์ลักษณะของหมู่ฟังก์ชันของซิลิกาจากเถ้าแกลบ.....	54
4.10	ผลการวิเคราะห์ลักษณะหมู่ฟังก์ชันของซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว.....	54
4.11	ผลการวิเคราะห์ลักษณะหมู่ฟังก์ชันของเถ้าลอยถ่านหิน.....	56
4.12	ผลการวิเคราะห์ลักษณะหมู่ฟังก์ชันของเถ้าลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพผิว	56
4.13	กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแอฟลาดีน กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 290 nm.....	58
4.14	แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดแอฟลาดีนที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	59

ภาพที่		หน้า
4.15	แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดแอฟลาทอกซินในช่วงเวลาสัมผัสต่างๆ.....	62
4.16	แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดแอฟลาทอกซินที่ค่า pH ต่างๆ.....	63
4.17	แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดแอฟลาทอกซินที่ปริมาณต่างๆ.....	66
4.18	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถั่วแกลบ.....	68
4.19	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถั่วแกลบ.....	68
4.20	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถั่วแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว.....	70
4.21	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถั่วแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว.....	70
4.22	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของซีลีกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว.....	71
4.23	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของซีลีกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว.....	72
4.24	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถั่วลยถ่านหิน.....	73
4.25	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถั่วลยถ่านหิน.....	73
4.26	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถั่วลยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพผิว..	74
4.27	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถั่วลยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพผิว.	75
4.28	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแอฟลาทอกซิน.....	77
4.29	คราบน้ำมันก่อนการดูดซับและหลังการดูดซับ.....	79
4.30	ซีลีกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวก่อนดูดซับและหลังผ่านการดูดซับคราบน้ำมัน	79
4.31	ลักษณะของหมู่ฟังก์ชันของซีลีกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว.....	80
4.32	ลักษณะของหมู่ฟังก์ชันของซีลีกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวที่ผ่านการดูดซับ คราบน้ำมัน.....	80
4.33	ลักษณะของหมู่ฟังก์ชันของซีลีกาที่ผ่านการปรับพื้นผิวที่มีการคายออกของ น้ำมัน.....	81

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาอุตสาหกรรมและการขยายตัวของเมืองส่งผลให้มีการบริโภคปิโตรเลียม และปิโตรเคมีเพิ่มขึ้น สารเหล่านี้มีโอกาสปนเปื้อนแหล่งน้ำโดยเฉพาะสารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) ซึ่งละลายน้ำได้น้อยและย่อยสลายยาก หากปริมาณการสะสมในแหล่งน้ำมากขึ้น ย่อมส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ จึงจำเป็นต้องหาแนวทางกำจัดอย่างเหมาะสม วิธีการแยกสารไฮโดรคาร์บอนปริมาณน้อยในแหล่งน้ำปริมาณมากที่นิยม คือ การดูดซับด้วยสารดูดซับที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามสารดูดซับสังเคราะห์ส่วนใหญ่มีราคาแพง ขณะที่มีการศึกษาพบว่าถ่านแกลบ และถ่านลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าซึ่งเป็นของเหลือทิ้งมีสมบัติเป็นตัวดูดซับที่ดี หากสามารถนำมาใช้กำจัดสารปนเปื้อนไฮโดรคาร์บอนในน้ำได้จะเป็นการลดต้นทุนการกำจัดมลพิษในน้ำได้ ในขณะเดียวกันก็เป็นการเพิ่มมูลค่าถ่านแกลบ และถ่านลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าอีกด้วย

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนา และศึกษาเปรียบเทียบความสามารถของสารดูดซับ (Adsorbent) ต่างชนิดกัน ได้แก่ ถ่านแกลบ ซิลิกาที่ได้จากถ่านแกลบ และถ่านลอยถ่านหิน โดยใช้แนฟธาลีนเป็นตัวแทนสารประกอบ PAHs

นอกจากนี้การปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของสารดูดซับด้วยสารปรับสภาพผิวทางเคมีเป็นที่นิยม เนื่องจากไม่ต้องใช้กระบวนการทางความร้อน (Thermal Process) จึงลดต้นทุนและประหยัดพลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับสารดูดซับที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันที่ต้องผ่านกระบวนการทางความร้อน เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาลีน ด้วย ถ่านแกลบ ซิลิกาจากถ่านแกลบ และถ่านลอยถ่านหิน

1.2.2 ศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับด้วยการปรับสภาพผิวสารดูดซับด้วยสารแอมฟิฟิลิก (Amphiphilic) หรือสารที่มีองค์ประกอบทางเคมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ และไม่ชอบน้ำในโมเลกุลเดียวกัน

1.2.3 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เพื่อหาสภาวะการดูดซับที่เหมาะสม (Optimum Condition)

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาลีนด้วยสารดูดซับแต่ละชนิดที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว

1.3.2 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาลีน ด้วยสารดูดซับแต่ละชนิดที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารแอมฟิฟิลิกชนิดประจุบวก

1.3.3 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของสารดูดซับ และสารดูดซับที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว เช่น พื้นที่ผิว องค์ประกอบทางเคมี ลักษณะโครงสร้างผลึก หมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิว เป็นต้น

1.3.4 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เช่น ช่วงเวลาสัมผัส ค่า pH สัดส่วนสารดูดซับต่อความเข้มข้นแนฟธาลีน เพื่อหาสภาวะการดูดซับที่เหมาะสม (Optimum Condition)

1.3.5 เลือกชนิดสารดูดซับและสภาวะการดูดซับที่เหมาะสมที่สุด ทดลองกำจัดน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำ

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการกำจัดสารประกอบ PAHs ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย และสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้เปรียบเทียบกับกระบวนการบำบัดโดยวิธีอื่นๆ

1.4.2 สามารถเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้า

1.4.3 สามารถนำผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ สารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

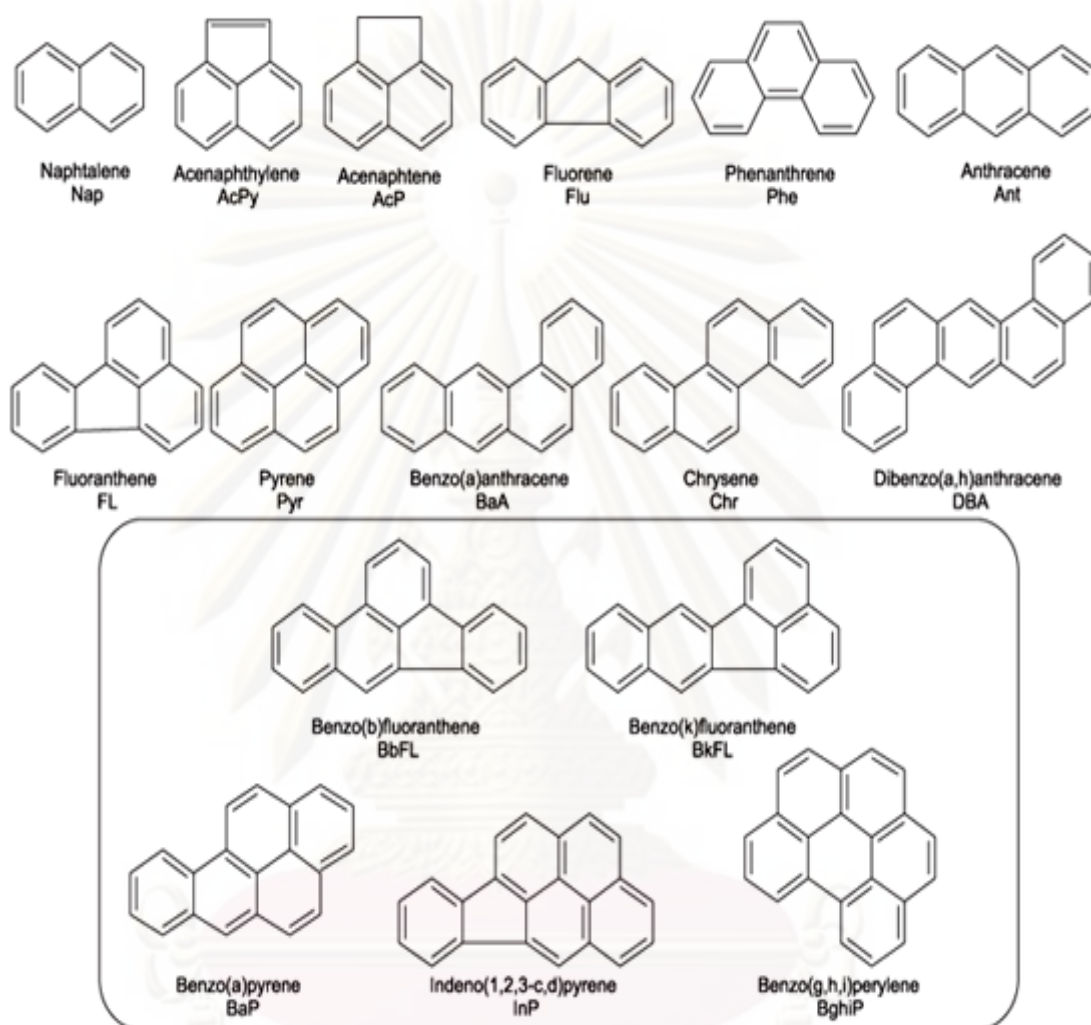
พอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทหนึ่งที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมัน ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนที่รวมกันเป็นอะโรมาติกเบนซีนหลายวงเชื่อมกันเป็นเส้นตรง มุมงอ หรือต่อกันเป็นกลุ่ม การย่อยสลาย PAHs และสมบัติการละลายน้ำของสารเหล่านี้จะยากขึ้นตามค่าความถ่วงจำเพาะที่เพิ่มขึ้น จึงมีโอกาสปนเปื้อนในพื้นดิน และแหล่งน้ำในธรรมชาติ ที่มาของสาร PAHs ที่ปนเปื้อนในธรรมชาติ ได้แก่ การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของถ่านหิน น้ำมันและแก๊สธรรมชาติ รวมทั้งสารปนเปื้อนในขยะ หรือของเสียอันตราย สาร PAHs หลายตัวเป็นสารอันตรายร้ายแรงซึ่งก่อให้เกิดมะเร็ง หน่วยงานคุ้มครองสิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา (The U.S. Environmental Protection Agency, EPA) จึงกำหนดให้แอนทราซีนและสาร PAHs รวมทั้งหมด 16 ชนิด ได้แก่ แนฟทาลีน (naphthalene) อะซีแนฟทีน (acenaphthene) อะซีแนฟทิลีน (acynaphthylene) ฟลูออรีน (fluorene) ฟีนแอนทรีน (phenanthrene) แอนทราซีน (anthracene) ฟลูออแรนทีน (fluoranthene) เบนซ์[เอ]แอนทราซีน (benz[a]anthracene) ไครซีน (chrysene) ไพรีน (pyrene) เบนโซ[บี]ฟลูออแรนทีน (benzo[b]fluoranthene) เบนโซ[เค]ฟลูออแรนทีน (benzo[k]fluoranthene) เบนโซ[เอ]ไพรีน (benzo[a]pyrene) ไดเบนซ์[เอ,เอช]แอนทราซีน (dibenz[ah]anthracene) เบนโซ[จี,เอช,ไอ]เพอริลีน (benzo[g,h,i]perylene) และ อินดีโน-[1,2,3,ซีดี]ไพรีน (indeno[1,2,3,cd]pyrene) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (พจนานุกรม, 2543)

##### 2.1.1 แหล่งที่มาของสารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนสิ่งแวดล้อม (จิราณีชัย ชาญวิจิตร, 2544)

แหล่งที่มาของสาร PAHs สามารถจำแนกได้เป็น 2 แหล่งใหญ่ คือ

1) แหล่งธรรมชาติ (Natural source) เช่น ภูเขาไฟระเบิด ไฟป่า จากการสังเคราะห์ด้วยแบคทีเรียบางชนิด มาจากพืชชั้นสูง หรือเกิดจากการย่อยสลายสาร triterpenoid หรือ steroid ในตะกอนดินที่ทับถมกัน ซึ่ง triterpenoid มีสารตั้งต้นเป็นกลุ่ม aliphatic isoprenoid ตัวที่เรียกว่า

squalene ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นแหล่งกำเนิดของน้ำมันดิบ และมีสาร PAHs เป็นองค์ประกอบ (Eglinton และคณะ, 1969) สาร PAHs ที่พบว่ามีแหล่งกำเนิดมาจาก triterpenoid ได้แก่ perylene ซึ่งพบว่ามีแหล่งกำเนิดหลักมาจาก triterpenoid ถึง 30 – 70 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ในพืชชั้นสูงที่มี triterpenoid สังเคราะห์ PAHs ได้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของ PAHs ทั้งหมด 16 ชนิดตามรายงานของ U.S.EPA  
ที่มา : Coelho, 2008

2) แหล่งที่มาจากกิจกรรมมนุษย์ (anthropogenic source) เช่น การเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น แก๊สโซลีน ถ่านหิน น้ำมันดีเซล การปล่อยควันเสียจากยานพาหนะ การเผาขยะ การปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำ การสูบบุหรี่ การเผาทุ่งหญ้า เป็นต้น สาร PAHs ที่พบมาจากการเผาไหม้ ได้แก่ ฟลูออแรนทีน (fluoranthene) เบนโซ[เอ]ไพรีน (benzo[a]pyrene) เบนโซ[จี,เอช,ไอ]เพอริลีน (benzo[g,h,i]perylene) นอกจากนี้สาร PAHs มีความเกี่ยวข้องกับการปนเปื้อนเนื่องมาจากการรั่วไหลของน้ำมันจากการบรรทุก และถ่ายเทน้ำมันของอุตสาหกรรมปิโตรเลียม จึง



ทำให้มีปริมาณสาร PAHs ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมบริเวณนั้นๆ มากกว่าปกติ ซึ่งอาจทำให้เกิดพิษเฉียบพลันกับสิ่งมีชีวิตบริเวณนั้น หรืออาจทำให้เกิดการก่อตัวเป็นสารก่อมะเร็ง และสารเปลี่ยนแปลงพันธุกรรมได้ น้ำมันดิบที่รั่วไหลออกมาพบว่ามีสาร PAHs เป็นองค์ประกอบอยู่มาก โดยสามารถจำแนกประเภทของสาร PAHs จากกิจกรรมของมนุษย์ตามกระบวนการของการเกิดได้เป็น 2 แหล่งใหญ่ๆ ดังนี้

2.1) สาร PAHs ที่มาจากปิโตรเลียม (Petrogenic PAHs) คือ สาร PAHs ที่เกี่ยวข้องกับน้ำมันปิโตรเลียมหรือผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ที่พบบ่อยคือ ได้แก่ แนฟธาลิน (naphthalene) ฟลูออรีน (fluorene) ฟีนแอนทรีน (phenanthrene) ไดเบนโซไทโอฟิน (dibenzothiophene) และไครซีน (chrysene) ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีจำนวนวงแหวนเบนซีนตั้งแต่ 2 – 4 และมีหมู่อัลคิลมาแทนที่ในโมเลกุล

2.2) สาร PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เช่น ถ่านหินหรือน้ำมัน และจากไฟไหม้ป่า โดยโมเลกุลที่มักพบจะเป็นโมเลกุลประเภท unsubstituted PAHs โดยมีจำนวนวงแหวนเบนซีนตั้งแต่ 3 – 5 วง ที่พบบ่อยได้แก่ ฟลูออแรนทีน (fluoranthene) และ ไพรีน (pyrene)

### 2.1.2 การแพร่กระจายของสารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในสิ่งแวดล้อม (จิราณี ชาญวีรกูล, 2544)

สาร PAHs แพร่กระจายอยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม เช่น

- อนุภาคในบรรยากาศ (Airborne particulate matter) เป็นอนุภาคที่ประกอบขึ้นจากสารประกอบเชิงซ้อนของแข็งและของเหลว และมี PAHs เป็นองค์ประกอบร่วมด้วย ความสามารถในการถูกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยแสงของสาร PAHs ขึ้นกับอนุภาคที่ไปเกาะติดอยู่ โดยที่สารประกอบเหล่านี้มาจากหลายๆแหล่ง และอนุภาคเหล่านี้ก็ถูกปล่อยออกสู่อากาศ และแพร่กระจายไปทั่วสิ่งแวดล้อมนั้น โดยมนุษย์จะสามารถสัมผัสสัมผัสกับ PAHs ได้ง่ายจากการหายใจเอาสาร PAHs ในบรรยากาศเข้าไป ทำให้มีโอกาสที่จะทำให้เกิดมะเร็งได้ง่าย

- ในดิน (Soil Contaminant) สารประกอบ PAHs เป็นสารที่กระจายอยู่ในดินบริเวณกว้าง และแพร่กระจายไปได้ไกลจากบริเวณที่อยู่อาศัย และโรงงานอุตสาหกรรม และเชื่อว่าปริมาณของสารประกอบ PAHs ส่วนใหญ่มาจากการปล่อยควันเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และพบว่าต้นไม้และพืชผักสามารถที่จะดูดซึมสารประกอบ PAHs จากดินที่มีสารประกอบนี้ปนเปื้อนอยู่ได้เช่นกัน

- ในน้ำ (Water Contaminant) สารประกอบ PAHs สามารถแพร่กระจายไปได้ทั่วในแหล่งน้ำเนื่องจากสารประกอบนี้มีแหล่งกำเนิดมาจากการที่อนุภาคที่ถูกขนส่งทางอากาศตกลงสู่ผิวน้ำ หรือจากการดูดซับที่ผิวน้ำที่สัมผัสโดยตรงกับสารประกอบเหล่านี้ในบรรยากาศ และจากน้ำเสีย และมลภาวะเหล่านี้ก็จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ เนื่องจากการใช้น้ำในการอุปโภค และบริโภค

- ในปิโตรเลียมและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม (Petroleum and Petroleum Products) สารประกอบปิโตรเลียมหรือที่เรียกกันว่า น้ำมันดิบ (Crude oil) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติจากการทับถมกันของซากอินทรีย์ภายใต้พื้นผิวโลกเป็นเวลาหลายล้านปี ที่มีสารประกอบ PAHs เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และมักจะเป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญแหล่งหนึ่งของสารประกอบนี้ที่จะสะสมอยู่ในตะกอนดิน ดังนั้นน้ำมันที่เหลือใช้ในกิจกรรมต่างๆ โดยเฉพาะบริเวณที่มีประชากรอาศัยอยู่หนาแน่น และมีโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ มาก เนื่องจากต้องใช้น้ำมัน ในกิจกรรมต่างๆ ปริมาณที่มาก

การปนเปื้อนของน้ำมัน มีสาเหตุมาจากหลายประการดังนี้

- 1) จากการขนส่งโดยเรือบรรทุกน้ำมัน ซึ่งมีโอกาสสูญเสียน้ำมันในขณะขนถ่าย
- 2) จากอุบัติเหตุเรือบรรทุกน้ำมันชนกันหรืออัปปาง รวมทั้งการรั่วของถังน้ำมัน
- 3) การปฏิบัติการนอกชายฝั่ง เช่น การขุดเจาะน้ำมันหรือแก๊สธรรมชาติ การแตกหรือรั่วซ้ำของท่อส่งน้ำมันใต้ทะเล
- 4) จากโรงกลั่นน้ำมัน น้ำทิ้งจากโรงงานซึ่งมีคราบน้ำมันบางส่วนปนอยู่หรือกรณีถังน้ำมันสำรองบนบกบริเวณชายฝั่งเกิดชำรุด หรือเกิดอุบัติเหตุทำให้มีน้ำมันรั่วไหลออกมา
- 5) จากการล้างทำความสะอาดถังน้ำมัน
- 6) น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ตั้งอยู่บริเวณชายฝั่ง
- 7) น้ำทิ้งจากชุมชน รวมทั้งการชะล้างคราบน้ำมันบนถนนหนทางในเขตเมือง
- 8) จากบรรยากาศ
- 9) จากการกระบวนกรซึมผ่านตามธรรมชาติ

### 2.1.3 ผลกระทบของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

- ผลกระทบต่อมนุษย์ (จิราณีย์ ไชยปวิวงศ์, 2544)

PAHs สามารถที่จะเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์ได้โดยทางเดินหายใจ การหายใจเอาอากาศ ที่มี PAHs เจือปนเข้าไป สำหรับคนที่อยู่ใกล้กับแหล่งขยะอันตราย การดื่ม น้ำ หรือ กินอาหารที่มี PAHs เจือปน ก็เป็นอีกทางหนึ่งที่ร่างกายได้รับ PAHs ภายใต้สภาวะปกติ PAHs ก็เข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้โดยถ้าหากผิวหนังไปสัมผัสกับดินที่มี PAHs เจือปนอยู่ในระดับที่สูง PAHs เข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ง่ายและรวดเร็วทุกๆ ทาง อัตราการเข้าสู่ร่างกายจะสูงขึ้นเมื่ออยู่ในรูปของ Oil mixture และจะเข้าสู่เนื้อเยื่อจนถึงชั้นไขมัน และมีการสะสมอยู่ในไต ตับ และไขมันเป็นส่วนมาก บางส่วนก็สะสมอยู่ในร่างกายได้ไม่นานมาก เนื่องจากจะถูกขับถ่ายออกโดยทางปัสสาวะและอุจจาระ PAHs แพร่กระจายอยู่ตามสภาพแวดล้อมมนุษย์อาจได้รับสารเหล่านี้ทั้งภายในบ้าน นอกบ้าน หรือที่ทำงาน และไม่ใช่ว่าจะได้รับ PAHs เพียงตัวเดียวแต่จะได้รับ PAHs ที่เป็นสารผสมรวมกันหลายๆ ตัว ในสภาพแวดล้อมมนุษย์จะได้รับ PAHs มาจากแหล่งต่างๆ เช่น ไอเสียจากยานพาหนะ ถนนลาดยางมะตอย ถ่านหิน ไฟป่า การเผาพืชพันธุ์ทางการเกษตร และขยะอันตราย

- ผลกระทบต่อสัตว์ทะเล

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า นกทะเลที่อยู่บริเวณชายฝั่งที่ได้รับอิทธิพลจากน้ำมันที่รั่วไหลมาจากเรือบรรทุกน้ำมัน ซึ่งพบว่านกทะเลหลายชนิดได้รับผลกระทบต่อไข่และตัวอ่อนของ นกรวมทั้งการพัฒนากายของการฟักไข่ของนก นอกจากนี้ยังมีการศึกษาปริมาณของสาร PAHs แต่ละชนิดที่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแต่ละชนิดจะมีปริมาณที่แตกต่างกันไป ดังแสดง รายละเอียดในตาราง

## 2.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารที่บริเวณ พื้นผิวหรือระหว่างพื้นผิว กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 วัสดุภาคใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลที่เป็นตัวกลางดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent) และสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ซึ่งแต่ละองค์ประกอบในสารละลายจะมีความสามารถในการดูดซับต่างกันขึ้นกับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารนั้นๆ กับสารดูดซับ นอกจากนี้ประสิทธิภาพการดูดซับยังขึ้นกับ ลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับ สมบัติทางเคมีพื้นผิว จำนวนชั้นการดูดซับ พื้นที่ผิวสัมผัส และ ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ จึงสามารถใช้ความแตกต่างเหล่านี้ในการออกแบบคัดเลือกตัวดูดซับ และสารถูกดูดซับที่เหมาะสมได้

### 2.2.1 กลไกการดูดซับ (Adsorption Mechanism)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการกักเก็บโมเลกุลตัวถูกละลายหรืออนุภาคสารแขวนลอยบนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่โมเลกุลตัวถูกละลายหรืออนุภาคสารแขวนลอย ขนาดเล็กนี้ เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนพื้นผิวที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับที่ผิวนี้จะเป็นการดูดซับระหว่างสถานะ (Phase) ซึ่งมีได้ทั้งแบบของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็ง และ ของเหลว-ของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบ ของเหลว-ของแข็ง (Liquid –Solid Interface) โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีบางส่วนที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากสารละลายไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุล ซึ่งกลไกการดูดซับนั้นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเข้าไปในตัวดูดซับ เกิดขึ้นเป็นขั้นตอนย่อย 4 ขั้นตอนติดต่อกัน ดังรูปที่ 2.2

ขั้นตอนที่ 1 (Bulk Transport) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ (mass transfer) จากสารละลาย (bulk solution) ไปยังฟิล์มน้ำหรือโมเลกุลน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ

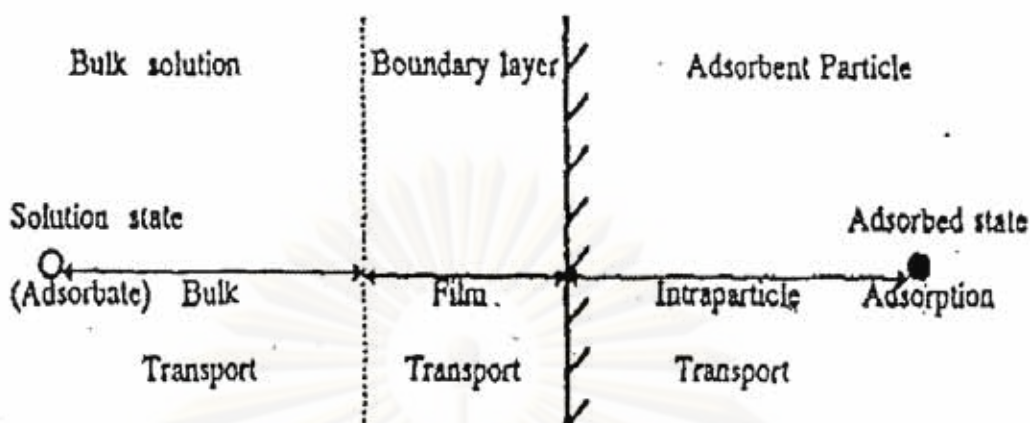
ขั้นตอนที่ 2 (Film Transport) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ (mass transfer) ข้ามฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 (Intraparticle Transport หรือ Pore Transport) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ (mass transfer) เข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 4 (Adsorption) เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับ active sites บนผิวตัวดูดซับ เกิดขึ้นเร็วมากและอาจดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ (Physisorption) และทางเคมี (Chemisorption) หรือทั้ง 2 แรงพร้อมกัน

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการเคลื่อนตัวของตัวถูกดูดซับในกระบวนการดูดซับ  
ที่มา : ชฎาภรณ์ บุญแท้, 2545

## 2.2.2 ลักษณะของการดูดซับ

### 1. การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน หรือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ทำให้เกิดการเกาะหรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ และโมเลกุลที่ผิวหน้าของสารดูดซับด้วยการดึงดูดของแรงระหว่างโมเลกุลของสารทั้งสอง โดยวิธีทางกายภาพ ซึ่งจะทำให้เกิดชั้นหลายๆชั้นซ้อนทับกัน (multilayer) โดยแต่ละชั้นจะซ้อนทับอยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อน จำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร การดูดซับทางกายภาพมักจะเป็นแบบไม่เฉพาะ (nonspecific) กล่าวคือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ จะไม่ติดติดกับเฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่งบนผิวหน้าของของแข็ง แต่จะเป็นอิสระในการเคลื่อนที่อยู่เหนือบริเวณผิวหน้านั้น การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย ซึ่งการดูดซับทางกายภาพนั้นเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ถูกดูดซับ ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย การดูดซับประเภทนี้สามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย การผันกลับของการดูดซับทางกายภาพจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ ถ้าแรงดึงดูดนี้มีค่าน้อยจะสามารถเกิด

การปลดปล่อยหรือคายสารที่ถูกดูดซับออกมา (desorption) ซึ่งอาจเป็นผลจากการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ หรือการเพิ่มอุณหภูมิเข้าไปในปริมาณมาก

## 2. การดูดซับทางเคมี (Chemisorption)

การดูดซับประเภทนี้เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ และสารดูดซับ หรือแรงดึงดูดทางเคมีซึ่งเป็นแรงที่แข็งแกร่งกว่าการดูดซับทางกายภาพ และเป็นแรงที่ทำให้เกิดพันธะ วน บริเวณเฉพาะ (specific) ใดๆ บนพื้นผิวของวัสดุของแข็ง ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น ทำให้ค่าความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงใกล้เคียงกับค่าของพลังงานพันธะเคมี อาจเกิดการดูดซับได้ช้าและผันกลับไม่ได้เป็นบางส่วน โดยทั่วไปสารที่ถูกดูดซับจะเกิดเป็นโมเลกุลชั้นเดียว (monolayer) เหนือผิวหน้าของสารดูดซับโดยโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ จากบริเวณผิวนั้นไปยังบริเวณอื่น เมื่อผิวหน้าของสารดูดซับถูกปกคลุมด้วยโมเลกุล 1 ชั้นแล้ว ความสามารถในการดูดซับของมันจะลดลง จึงเกิดการผันกลับได้ยาก นอกจากจะมีการให้ความร้อนถึงอุณหภูมิสูงๆ แล้วสารดูดซับจึงจะแยกตัวออกมาจากสารดูดซับได้ ทั้งนี้ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญต่างๆ ได้แก่ ส่วนประกอบของพื้นผิวของของแข็ง ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย พีเอช และอุณหภูมิของสารละลาย

นอกจากนี้ยังมีการกล่าวถึงการดูดซับอีกประเภทหนึ่ง คือ การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน (exchange adsorption) ซึ่งใช้ในการอธิบายถึงการดูดซับที่บอกลักษณะด้วยการดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างสารที่ถูกดูดซับกับบริเวณผิวหน้าของสารดูดซับ โดยที่การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) ก็ถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของการดูดซับประเภทนี้เช่นกัน กล่าวคือ ไอออนของสารที่ถูกดูดซับซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากบริเวณผิวหน้า เป็นผลมาจากการดึงดูดทางศักย์ไฟฟ้า (electrostatic attraction) ซึ่งดึงดูดไอออนสู่บริเวณที่มีประจุแบบตรงกันข้ามกับที่อยู่บนผิวหน้าของสารดูดซับ รวมทั้งไอออนของสารที่ถูกดูดซับที่มีอยู่ในสารละลายจะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุแบบเดียวกันซึ่งแนบติดอยู่กับสารดูดซับ โดยทั่วไปนั้นไอออนที่มีประจุมากกว่า จะถูกดึงดูดสู่บริเวณที่มีประจุแบบตรงกันข้ามได้แรงกว่าไอออนที่มีประจุน้อยกว่า เช่น เช่น ไอออนแบบไตรวาเลนต์ (trivalent ions) จะถูกดูดซับหรือแลกเปลี่ยนได้ดีกว่าไอออนแบบโมนิวาเลนต์ (monovalent ions) เป็นต้น การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นปฏิกิริยาเคมีที่ผันกลับได้ นอกจากนี้ไอออนที่มีขนาดเล็กกว่าจะถูกดึงดูดได้แรงกว่าไอออนที่มีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะมีความแตกต่างกันระหว่างการดูดซับ

ทั้ง 3 ประเภทที่กล่าวมา แต่ก็ยังเป็นการยากที่จะระบุได้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นบนสารดูดซับใดๆ จะมีการดูดซับแบบใด

### 2.2.3 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางเคมีและกายภาพ

การดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ มีความแตกต่างกัน ดังนี้

1. การแยกโมเลกุลที่ถูกดูดซับทางเคมีออกจากตัวดูดซับ ไม่สามารถทำได้ หรือทำได้ยาก ในขณะที่โมเลกุลซึ่งถูกดูดซับทางกายภาพสามารถแยกออกได้ ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดัน

2. ในการดูดซับทางเคมี โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะสร้างพันธะเคมีที่ผิวของตัวดูดซับ ด้วยการให้และใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน ส่วนการดูดซับทางกายภาพ จะเกิดจากผลของแรงดึงดูดระหว่างขั้วของโมเลกุล และอิทธิพลของการแพร่

3. การดูดซับทางเคมีนั้น โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะยึดเกาะผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) และการดูดซับจะหยุดลง เมื่อบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาที่ผิวของตัวดูดซับหมดไป ในขณะที่การดูดซับทางกายภาพ ซึ่งเกิดจากแรงแวนเดอวาล์วส์นั้น ตัวถูกดูดซับจะยึดเกาะบนผิวของตัวดูดซับได้ทั้งแบบชั้นเดียว (monolayer) และหลายชั้น (multilayer)

4. ค่าความร้อนของการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าต่ำ โดยมีค่าใกล้เคียงกับความร้อนของการกลายเป็นของเหลว ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางเคมีที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น

### 2.2.4 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ (ยัวร์ตัน ปรมีศนาภรณ์, 2544)

ในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลาย จะเกิดการดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ (physical force) และแรงทางเคมี (chemical force) โดยแรงทางกายภาพ ได้แก่ แรงแวนเดอวาล์วส์ และแรงไฟฟ้าสถิต เกิดที่บริเวณผิวรอบนอกของสารประกอบ เช่น ion exchange ส่วนแรงทางเคมีจะเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดเป็นสารประกอบบนผิวตัวดูดซับด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bonding) และพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding)

1. แรงแวนเดอวาล์วส์ (Van der Waal's force) อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่อยู่ในสภาพไม่มีขั้ว สามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆ ได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละ

บริเวณภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากันมีผลให้เกิดสภาพขั้วขั้วควรวขึ้น และสามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ ดังนั้นการคายการดูดซับจะสามารถกระทำได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพ (Reactivate) ของตัวดูดซับเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย

2. แรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเข้าด้วยกัน หรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่มีขั้ว ซึ่งการเกาะจับของโมเลกุลชนิดต่างๆ เหล่านี้เกิดจากผล 3 อย่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.3

- แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุลที่มีขั้ว 2 โมเลกุล คือ ขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งกับขั้วบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม

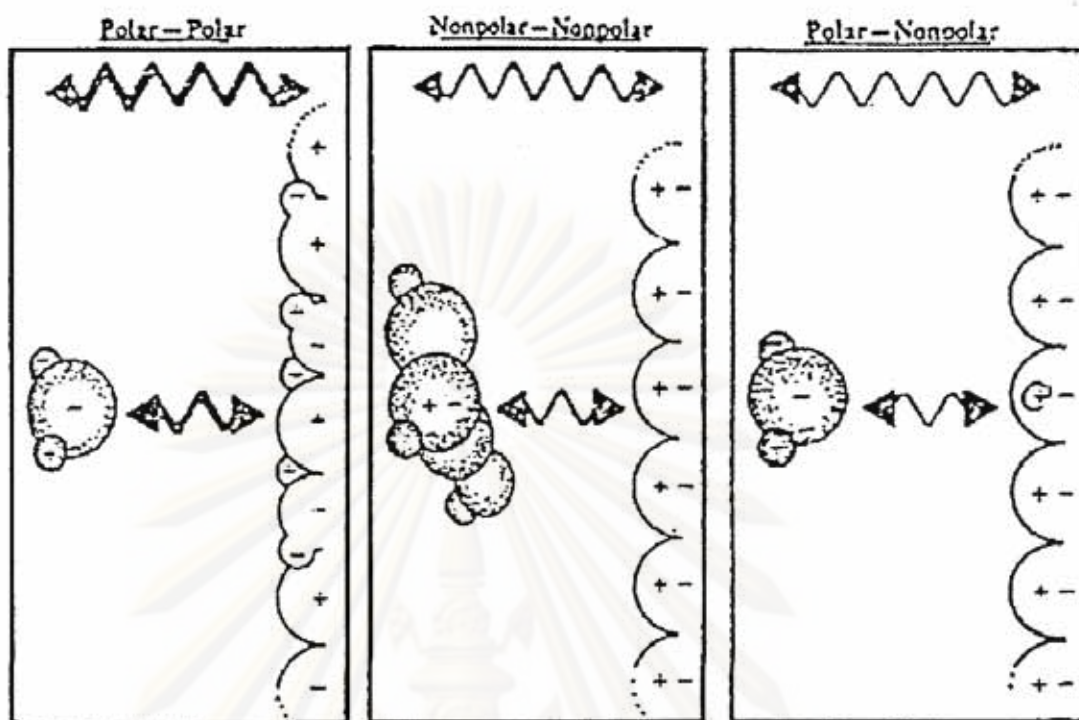
- แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (non-polar molecule) หรือแรงการกระจาย (dispersion force) เกิดจากผลของการกระจายตัว ซึ่งเป็นผลจากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามาก็จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกันและมักเป็นแรงที่อ่อน เช่น อินทรียสารและถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องจากอินทรียสารส่วนใหญ่ จะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว

- แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ โดยโมเลกุลมีขั้วเข้ามาอยู่ใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้าม ซึ่งจะทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 2.3 การดูดซับของสารดูดซับด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต  
ที่มา : ยุวัฒน์ ปรมีสนาภรณ์, 2544

### 2.2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

#### 1. ลักษณะของสารดูดซับ (nature of adsorbate)

ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในการดูดซับ ตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ในกรณีตัวทำละลายคือน้ำ โดยตัวถูกละลายที่ละลายน้ำได้ดี หรือแตกตัวเป็นไอออนได้ดีจะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูง จึงเป็นการยากในการดูดซับ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยจะสามารถดูดซับได้ดี

#### 2. ขนาด พื้นที่ผิว และโครงสร้างรูพรุนของสารดูดซับ (surface area and pore structure)

พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพของการดูดซับ โดยพื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้นประกอบกับมีโครงสร้างรูพรุน ช่วยเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับ จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะกระบวนการดูดซับเกิดขึ้นที่ผิวเป็นส่วนใหญ่ ในกรณีที่สารดูดซับไม่มีรูพรุน เมื่อขนาดของตัวดูดซับลดลง พื้นที่ผิวในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพ

ในการดูดซับสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้าสารดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน เพราะฉะนั้นในกรณีนี้ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุ

### 3. อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราเร็วของการดูดซับ เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเกี่ยวข้องกับชนิดของพันธะที่ยึดเหนี่ยวกัน ซึ่งการดูดซับโดยทั่วไปเป็นชนิดคายความร้อน การดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ถ้าเป็นชนิดดูดความร้อน การดูดซับจะมากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และอัตราเร็วของการดูดซับจะแปรผกผันตามอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราเร็วจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยนั้นไม่มีผลต่อการดูดซับ

### 4. พีเอช (pH)

ค่า pH ของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง และ pH ยังมีผลต่อการแตกตัวของไอออนของสารประกอบที่เป็นกรดหรือเป็นเบสในการดูดซับ

### 5. อัตราการกวน ( Mixing Speed )

อัตราการดูดซับขึ้นอยู่กับความเร็วของการกวน ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของระบบซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ และแพร่เข้าสู่โพรง ( Pore Diffusion ) ในระบบที่ของเหลวมีความเคลื่อนไหวช้าๆ พิล์มของเหลวที่อยู่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก หากความปั่นป่วนของของเหลวในระบบสูงขึ้นความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้ดีขึ้น

### 6. เวลาสัมผัส ( Contact Time )

หากโมเลกุลของตัวถูกละลายมีโอกาสสัมผัสกับสารดูดซับนาน โอกาสที่โมเลกุลของสารจะถูกดูดซับจะสูงขึ้น

## 2.2.6 ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm)

ไอโซเทอมของการดูดซับ เป็นการแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของสารดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลาย ณ อุณหภูมิคงที่

โดยที่ระบบการดูดซับได้ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้ในรูปแบบของสมการอย่างง่ายแล้วนำสมการมาวาดกราฟเพื่อสามารถวิเคราะห์หาค่าต่างๆได้ ซึ่งจะเป็นแนวทาง

นำมาใช้ในการคำนวณออกแบบระบบการดูดซับ โดยมีผู้เขียนสมการเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์และอธิบายลักษณะข้อมูลของการดูดซับไว้หลายประการ แต่ที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm) และ ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

### ก. ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

สมมติฐานหลักของแบบจำลองแลงมัวร์ ที่เรียกว่า Ideal Localized Monolayer Model คือ

1. การดูดซับมีลักษณะเป็น monolayer คือ มีจำนวนตำแหน่งที่เกิดการดูดซับแน่นอน และเมื่อเกิดการดูดซับแล้ว อธิอนหรือโมเลกุลจะไม่ซ้อนทับซึ่งกันและกัน หรือชั้นของตัวถูกดูดซับมีความหนาเท่ากันหมด
  2. เมื่อดูดซับแล้ว ตัวถูกดูดซับจะไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งกันในพื้นที่ผิวสัมผัส และตัวถูกดูดซับจะไม่มีผลกระทบต่อกัน
  3. พื้นที่ผิวในการดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นที่ผิว
  4. พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ
- สำหรับสมการแบบแลงมัวร์ (Langmuir) เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.1)

$$X = \frac{X_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (2.1)$$

โดยที่

$X$  =  $X/m$ , ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารตัวกลาง มีหน่วยเป็น mg/g

$X_m$  = ปริมาณของตัวถูกละลายมากที่สุดที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (monolayer) มีหน่วยเป็น mg/g

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็น mg/l

$b$  = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

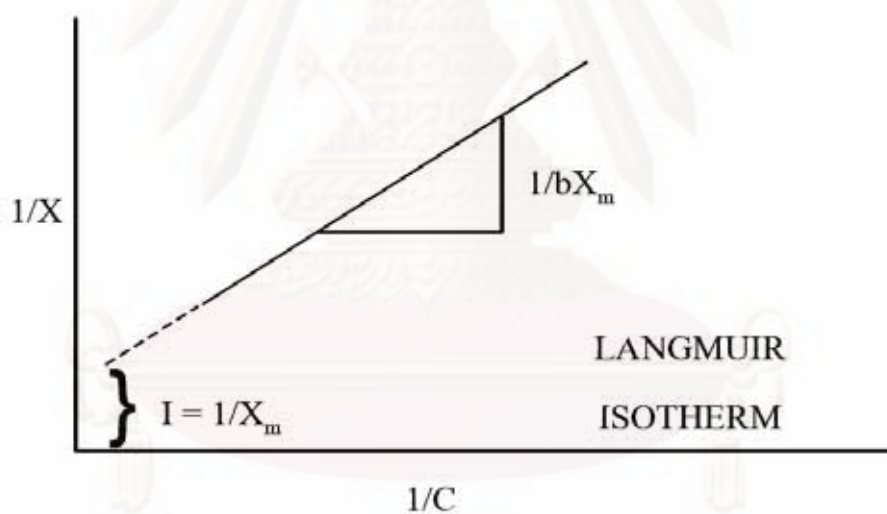
เมื่อ  $X$  เข้าสู่อันดับ  $X_m$  และ  $C_e$  เข้าสู่อันดับ  $\alpha$  จากสมการเขียนได้เป็น

$$\frac{C_e}{X} = \frac{1}{bX_m} + \frac{C_e}{X_m} \quad (2.2)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e/X$  กับ  $C_e$  จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชัน  $1/bX_m$  และจุดตัดแกน Y เท่ากับ  $1/X_m$  และเมื่อหารด้วย  $C_e$  จะได้สมการเส้นตรง

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_m} + \frac{1}{bX_m} \frac{1}{C_e} \quad (2.3)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/X$  กับ  $1/C_e$  จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/X$  และ  $1/C_e$  ได้แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir)  
ที่มา : สุজনีย์ ค่อยเสงี่ยม, 2544

#### ข. ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชจัดว่าเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้กันมาก สมการหนึ่ง ในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว สมการของฟรุนดลิช (Freundlich) เขียนได้แสดงดังสมการ (2.4)

$$\frac{x}{m} = KC_e^{1/n} \quad (2.4)$$

โดยที่

$X = x/m$ , ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนัก มีหน่วยเป็น mg/g

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็น mg/l

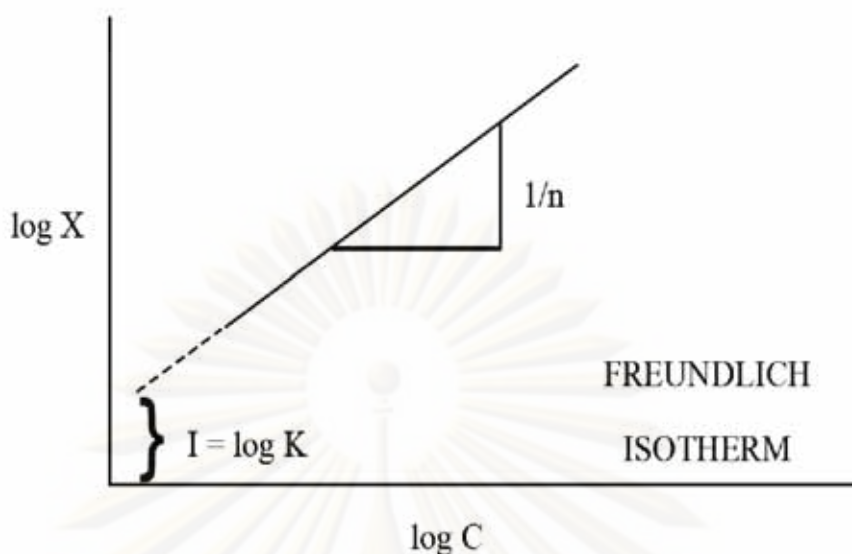
$K$  = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ

$1/n$  = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

จากสมการ (2.4) สามารถเขียนสมการในรูป logarithm ได้ดังนี้ คือ

$$\log \frac{x}{m} = \log K + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.5)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log (x/m)$  กับ  $\log C_e$  โดยให้  $\log C_e$  เป็นแกน x และ  $\log (x/m)$  เป็นแกน y จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ  $1/n$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $\log K$  ดังรูปที่ 2.5 กราฟที่มีค่าความชันสูงคือมีค่า  $1/n$  เข้าใกล้ 1 หรือมีความชันมากจะแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยก็จะมีผลต่ออัตราการดูดซับมาก กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นต่ำ อัตราการดูดซับก็จะต่ำ และจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น แต่เมื่อค่า  $1/n$  ต่ำกว่า 1 หรือความชันต่ำมากนั้นแสดงว่า อัตราการดูดซับเมื่อความเข้มข้นต่ำหรือสูงจะไม่แตกต่างกันมากนัก หรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจะไม่มีผลต่ออัตราการดูดซับ นอกจากนี้ค่า  $n$  ยังใช้บอกความสามารถในการดูดซับ และความจุของตัวดูดซับได้อีกด้วย โดยถ้าค่า  $n$  มากกว่า 1 หมายความว่าตัวดูดซับที่ใช้สามารถดูดซับตัวถูกละลายได้ดี และถ้าค่า  $n$  น้อยกว่า 1 แสดงถึงการดูดซับที่ไม่ดี โดยที่ถ้าค่า  $n$  อยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 หมายความว่า การดูดซับนั้นสามารถดำเนินไปได้ด้วยดี ซึ่งไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชนี้มีประโยชน์อย่างมากในการนำไปใช้เปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับสารของตัวดูดซับทั้งที่เป็นชนิดเดียวกันและต่างชนิดกัน



รูปที่ 2.5 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich)  
ที่มา : สุজনีย์ คู่ยเสงี่ยม, 2544

### 2.3 แกลบและเถ้าแกลบ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีการปลูกและส่งออกมากที่สุดของประเทศไทย โดยในการปลูกข้าวนั้นนอกจากจะได้ข้าวเป็นผลผลิตหลักแล้ว ผลิตผลพลอยได้ เช่น แกลบก็ยังสามารถนำมาผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ รวมทั้งใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มมูลค่าได้อีกด้วย แกลบซึ่งเป็นของเหลือใช้จากการแปรรูปข้าวเปลือกเป็นข้าวสารนั้นมีส่วนประกอบหลัก คือ เซลลูโลส ลิกนิน และธาตุต่างๆโดยจะมีปริมาณที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศของแต่ละท้องถิ่น เช่น ดิน น้ำ และอากาศ เป็นต้น โดยผลิตผลพลอยได้ที่เกิดจากการเผาแกลบคือเถ้าแกลบจำนวนมากซึ่งเป็นปัญหาการจัดการของเหลือทิ้ง แกลบที่เผาในระบบเปิดจะได้เถ้าแกลบ 2 ชนิด คือ เถ้าแกลบข้าวสีข้าว และ เถ้าแกลบข้าวสีดำ โดยเถ้าแกลบข้าวสีดำจะเกิดจากการเผาที่อุณหภูมิต่ำ เถ้าที่ได้จากการเผาแกลบจะประกอบไปด้วยซิลิกา และคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก มีสิ่งเจือปนจำพวกโลหะอยู่บ้าง โดยที่ซิลิกอนอยู่ในรูปซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และคาร์บอนอยู่ในรูปถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง และมีสมบัติเป็นตัวดูดซับที่ดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งการดูดซับโลหะหนักและสารอินทรีย์ในน้ำ

มีรายงานการวิจัยอย่างต่อเนื่องของการใช้แกลบและเถ้าแกลบเป็นวัตถุดิบเช่น ใช้ในการผลิตซิลิกาที่บริสุทธิ์มากขึ้น ใช้เป็นสารดูดซับน้ำมัน ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ถ่านกัมมันต์

ประสิทธิภาพสูงสำหรับเซลล์แบตเตอรี่ ใช้เป็นสารเติมแต่งในพลาสติก เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์ และใช้เป็นวัสดุดูดซับสารพิษจากน้ำเสีย

นอกจากนี้ยังได้มีการนำกลับมาใช้ในทางการเกษตร เช่น ใส่ในดินเพื่อทำปุ๋ย นำไปเผาอิฐและเผาถ่านไม้ สำหรับโรงสีข้าวก็นำไปเผาให้เกิดความร้อน และนำความร้อนที่ได้ไปขับเคลื่อนจักรไอน้ำ เพื่อเป็นต้นกำลังในการผลิตไฟฟ้าและสีข้าว ส่วนซี้เถ้ากลบที่เหลือก็นำมาเป็นส่วนผสมในการทำปุ๋ยหมัก เครื่องกรองน้ำ เป็นต้น

### 2.3.1 การใช้ประโยชน์จากเถ้ากลบ

1. อุตสาหกรรมโลหะ (Steel Industry) การผลิตแผ่นเหล็กกล้าคุณภาพสูงด้วยกระบวนการหล่อโลหะแบบต่อเนื่อง (continuous casting) โรงงานบางแห่งจะนำเถ้ากลบมาโรยลงบนผิวหน้าอ่างรับน้ำโลหะ (tundish) เพื่อป้องกันการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของเหล็ก และเพื่อให้เหล็กแข็งตัวอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากเถ้ากลบมีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดี และมีจุดหลอมเหลวสูง

2. อุตสาหกรรมซีเมนต์และคอนกรีต (Cement and Concrete Industry) การใช้เถ้ากลบในอุตสาหกรรมมีวัตถุประสงค์หลัก 2 อย่างคือ ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (portland) เพื่อลดต้นทุนในการผลิตอิฐก่อสร้างราคาถูกลง และใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตความแข็งแรงสูง (high strength concrete)

3. สารดูดซับน้ำมัน (Oil Adsorbent) มีการทดลองนำเถ้ากลบไปใช้เป็นสารดูดซับน้ำมันซึ่งก็ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งปัจจุบันมีการจำหน่ายสารดูดซับน้ำมันจากเถ้ากลบแล้วในผลิตภัณฑ์ที่ใช้ชื่อทางการค้าว่า กรีสสวีป (greasweep)

4. การป้องกันแมลง (Control of Insect Pests in Stored Food Stuffs) มีข้อมูลระบุว่า เกษตรกรในบางประเทศแถบเอเชีย เช่น ไทย อินโดนีเซีย เป็นต้น รู้จักนำเถ้ากลบมาใช้ป้องกันผลผลิตทางการเกษตรจากแมลงศัตรูพืช โดยเกษตรกรจะคลุกเถ้ากลบกับเมล็ดถั่วเหลืองเพื่อป้องกันด้วงแกรแฮมบี้น (Graham bean beetle) โดยใช้เถ้ากลบประมาณ 0.5% ต่อน้ำหนักถั่วซึ่งปรากฏว่าได้ผลดี

5. วัสดุก่อสร้างน้ำหนักเบา (Lightweight Construction Materials) ด้วยเหตุที่เถ้ากลบมีสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อน และน้ำหนักเบา ประเทศกำลังพัฒนาหลายประเทศจึงนำเถ้ากลบมาใช้ผลิตฝ้ากันความร้อนน้ำหนักเบา

6. ยางวัลคาไนซ์ (Vulcanising Rubber) มีรายงานวิจัยหลายฉบับระบุถึงการใช้เถ้ากลบในยางวัลคาไนซ์ ซึ่งปรากฏผลการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการว่า การใช้เถ้ากลบเป็น

สารช่วยการวัลคาไนซ์ (vulcanising agent) ของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนเทอร์พอลิเมอร์ (ethylene propylene diene terpolymer) หรือยางอีพีดีเอ็ม (EPDM) มีข้อดีมากกว่าการใช้ซิลิกา โดยสามารถใช้เป็นสารตัวเติม (filler) ในยางอีพีดีเอ็มได้ด้วย

7. ซิลิกอนชิป (Silicon Chips) เนื่องจากแผ่นเวเฟอร์ (wafer) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (semi-conductor) ต้องใช้สารซิลิกอนบริสุทธิ์ จึงมีความพยายามที่จะพัฒนา ถ้ำแคลบ ซึ่งมีส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นซิลิกาให้เป็นสารซิลิกาบริสุทธิ์

8. สารดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนทอง-ไทโอยูเรีย (Adsorbent for a Gold-thiourea Complex) ขั้นตอนหนึ่งของกระบวนการสกัดทองคำออกจากก้อนแร่ คือ การใช้ถ้ำถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนทองที่อยู่ในรูปทอง-ไทโอยูเรีย แต่มีการทดลองใช้ ถ้ำแคลบเป็นตัวดูดซับแทนถ้ำถ่านกัมมันต์ พบว่าถ้ำแคลบที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 400-500 องศาเซลเซียสสามารถดูดซับสารประกอบทองได้ดีกว่าถ้ำถ่านกัมมันต์

9. สารปรับปรุงดิน (Soil Ameliorant) ปัจจุบันมีการใช้ถ้ำแคลบในการปรับปรุงดิน โดยมีข้อมูลระบุว่า ถ้ำแคลบสามารถนำมาใช้ปรับปรุงดินได้ เนื่องจากมีความพรุนตัวจึงช่วยการกระจายน้ำในดินได้ นอกจากนี้ยังพบว่า ถ้ำแคลบสามารถปรับสภาพดินให้มีความเป็นกรดลดลง หรือลดความเป็นกรดของน้ำได้



(a)



(b)

รูปที่ 2.6 ถ้ำแคลบ (a) และถ้ำถ่านกัมมันต์ (b)

ที่มา:

[http://www.mtec.or.th/index.php?option=com\\_content&task=view&id=865&Itemid=176](http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=865&Itemid=176)



## 2.4 ซิลิกา (Silica) (สุพิณ แสงสุข และคณะ, 2549)

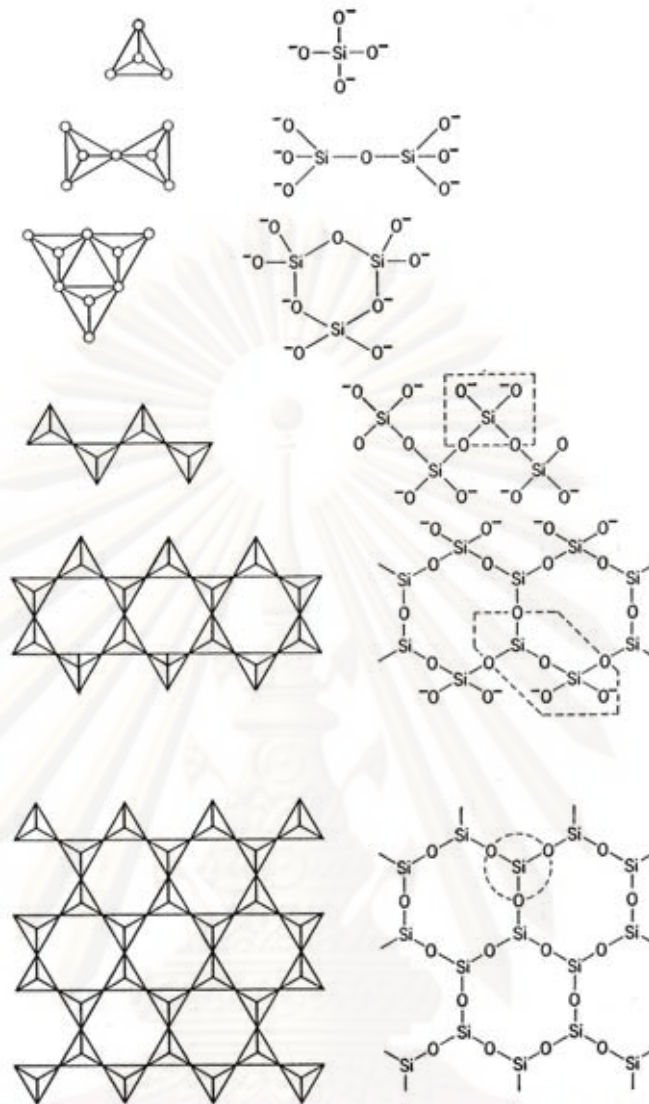
ซิลิกา (Silica) หรือ ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นออกไซด์ของซิลิกอน โดยมีสูตรเคมีคือ  $\text{SiO}_2$  พบในธรรมชาติหลายรูปแบบ เช่น ควอตซ์และโอปอล รวมถึงรูปแบบของซิลิกาในสิ่งมีชีวิต เช่น ไดอะตอม เป็นต้น

โครงสร้างพื้นฐานของซิลิกาและเกลือซิลิเกตส่วนใหญ่เป็นการจัดเรียงตัวของออกซิเจนอะตอมแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) ล้อมรอบซิลิกอนซึ่งเป็นอะตอมกลาง ซิลิกามีโครงสร้างเป็นตาข่าย 3 มิติ แบบไม่รู้จักจบ โดยการใช้ออกซิเจนอะตอมร่วมกันทั้งหมดกับกลุ่มข้างเคียง ดังตัวอย่างโครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 2.7

สมบัติโดยทั่วไปของซิลิกา คือ ที่อุณหภูมิปกติซิลิกาสามารถทนต่อสารเคมีทั่วไปได้หลายชนิด อย่างไรก็ตามซิลิกาเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีได้หลากหลายรูปแบบภายใต้สภาวะที่เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูง หรือเมื่อผลิตภัณฑ์ที่เป็นไอหลุดออกไปจากปฏิกิริยา ความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับรูปแบบ การเตรียม และสภาวะขององค์ประกอบย่อยของตัวอย่าง ตัวอย่างรูปแบบของซิลิกาได้แก่ แบบผลึก (crystalline) แบบผลึกระดับไมโคร (microcrystalline) และแบบไม่มีรูปผลึก (noncrystalline) ซึ่งแต่ละรูปแบบแตกต่างกันในแง่ของโครงสร้างผลึก มีหลายสภาวะที่ซิลิกาอสังฐานว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าซิลิการูปผลึก เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิว และอย่างน้อยครึ่งหนึ่งของหมู่ไฮดรอกซิลยังคงอยู่ในโครงสร้าง แม้จะให้ความร้อนถึง 400 องศาเซลเซียส

ซิลิกาอสังฐานมีลักษณะเฉพาะ คือ อนุภาคพื้นฐานมีขนาดเล็ก พื้นผิวจำเพาะสูง ผิวของซิลิกามีทั้งแบบที่ไม่มีน้ำที่ผิว และแบบที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-SiOH) มีพื้นที่ผิวมากกว่า 3 ตารางเมตร/กรัม ซิลิกาอสังฐานใช้แทนซิลิกาที่โครงสร้างขาดลักษณะทางผลึก ซึ่งตรวจสอบได้โดยใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffraction) ตัวอย่างของซิลิกาอสังฐานได้แก่ ซิลิกาโซล (silica sol) ซิลิกาเจล (silica gel) และซิลิกาจากการตกตะกอน (precipitated silica) เป็นต้น

ซิลิกาโซล คือ คอลลอยด์ของซิลิกาอสังฐานในน้ำ ที่มีการกระจายตัวของอนุภาคอย่างเสถียร ซิลิกาโซลจะไม่เปลี่ยนเป็นเจลหรือตกตะกอนแม้ว่าจะเก็บไว้เป็นเวลาหลายปี โซลอาจมีซิลิกาได้ถึงร้อยละ 50 และอนุภาคมีขนาดถึง 300 นาโนเมตร อย่างไรก็ตามหากอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 70 นาโนเมตร ก็จะมีการตกตะกอนอย่างช้าๆ



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างโครงสร้างของการเชื่อมต่อกันของ  $\text{SiO}_4$  tetrahedra ในโครงสร้างพื้นฐานของซิลิกาเกต ที่มา : สุพิณ แสงสุข, 2549

ซิลิกาเจล คือ ซิลิกาที่อิมมัวด้วยน้ำ (Water Swollen) มีตั้งแต่เป็นก้อนแข็ง จนถึงเป็นผงละเอียดแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ ซิลิกาเจลที่มีความหนาแน่นสูง (Regular-density gel) เป็นการเกิดเจลในสภาวะที่เป็นกรด อนุภาคที่ได้มีขนาดเล็กมากและพื้นที่ผิวสูง (750-800 ตารางเมตรต่อกรัม) ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน เท่ากับ 2.2-2.6 นาโนเมตร และปริมาตรรูพรุนประมาณ 0.37-0.40 มิลลิลิตรต่อกรัม สำหรับซิลิกาที่มีความหนาแน่นระดับกลาง (Intermediate-density silica) มีพื้นที่ผิวดต่ำกว่า (300-500 ตารางเมตรต่อกรัม) แต่ปริมาตรรูพรุนใหญ่กว่า (0.9-1.1 มิลลิลิตรต่อกรัม) ขนาดรูพรุนเฉลี่ยประมาณ 12-16 นาโนเมตร ส่วนซิลิกาชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low-density silica gel) มีพื้นที่ผิวดต่ำกว่า (100-200 ตารางเมตรต่อกรัม) ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลาง

รูปทรงใหญ่กว่า (18-22 นาโนเมตร) และมีปริมาตรรูปทรงใหญ่กว่าชนิดอื่น (1.4-2.0 มิลลิเมตรต่อกรัม)

ซิลิกาจากการตกตะกอน ประกอบด้วยกลุ่มก้อนของอนุภาคพื้นฐานขนาดคอลลอยด์ ซึ่งยังเชื่อมต่อกันเป็นโครงร่างตาข่ายขนาดใหญ่ระหว่างกระบวนการเตรียมซิลิกาชนิดนี้เกิดได้จากทั้งวิถีสynthesis ที่เป็นไอเช่น ฟิวซิลิกา หรือโดยการตกตะกอนจากสารละลาย

#### 2.4.1 โครงสร้างของซิลิกา (Silica polymorphs)

ซิลิกา (ซิลิกอนไดออกไซด์:  $\text{SiO}_2$ ) ที่สภาวะปกติ (ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ 1 atm) ผลึกของซิลิกามีได้สามรูปแบบ คือ

1. ควอตซ์ (quartz) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 870 องศาเซลเซียส
  - แอลฟา-ควอตซ์ ( $\alpha$ -quartz) เกิดขึ้นในรูป  $\text{SiO}_2$  ในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 573 องศาเซลเซียส
  - บีตา-ควอตซ์ ( $\beta$ -quartz) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 573 ถึง 873 องศาเซลเซียส
2. ไตรไดไมท์ (tridymite) จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิระหว่าง 870 ถึง 1,470 องศาเซลเซียส
  - แอลฟา-ไตรไดไมท์ ( $\alpha$ -tridymite) เป็นเฟสที่แฝงอยู่ เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 117 องศาเซลเซียส
  - บีตา-ไตรไดไมท์ ( $\beta$ - tridymite) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิระหว่าง 870 ถึง 1,470 องศาเซลเซียส
3. คริสโตบาไลท์ (cristobalite) จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิระหว่าง 1,470 ถึง 1,710 องศาเซลเซียส
  - แอลฟา-คริสโตบาไลท์ ( $\alpha$ - cristobalite) เป็นเฟสที่แฝงอยู่ในเฟสอื่นที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้อง จนถึงอุณหภูมิ 200 ถึง 275 องศาเซลเซียส แต่ไม่เสถียร
  - บีตา-คริสโตบาไลท์ ( $\beta$ - cristobalite) เป็นเฟสที่แฝงอยู่ในเฟสอื่น เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 200 ถึง 275 และ 275 ถึง 1,470 องศาเซลเซียส และจะเสถียรในรูปซิลิกาที่อุณหภูมิ 1,470 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,713 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิที่สูงกว่าเฟสของคริสโตบาไลท์ ยังมีเฟสของซิลิกาก็สองเฟสที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะความดันและอุณหภูมิสูงๆ
    - โคอีไซต์ (coesite) จะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะความดันสูงประมาณ 2.3 GPa ถึง 7.8 GPa
    - สทิสโฮไวท์ (stishovite) จะเกิดขึ้นที่ความดันสูงกว่า 7.8 GPa

## 2.4.2 การใช้ประโยชน์ซิลิกาจากถ้ำเกลบ

- การเคลือบผิวกระดาษสำหรับการพิมพ์อิงก์เจ็ตด้วยซิลิกาเจลจากขี้ถ้ำเกลบ

จากความนิยมในการใช้กล้องดิจิทัลมีแนวโน้มที่สูงขึ้นในปัจจุบัน ซึ่งสิ่งที่ตามมาจากการถ่ายภาพด้วยระบบดิจิทัล คือ การพิมพ์ภาพจากกล้องระบบดิจิทัล ซึ่งมักเป็นการพิมพ์ด้วยระบบอิงก์เจ็ต การพิมพ์ระบบนี้จำเป็นต้องอาศัยเครื่องพิมพ์ และวัสดุสิ่งพิมพ์ที่ดีจึงจะได้งานพิมพ์ที่ดี สำหรับกระดาษพิมพ์อิงก์เจ็ตนั้นต้องผ่านการเคลือบผิวกระดาษ ซึ่งสารเคลือบผิวมีหน้าที่ในการรับและอุ้มน้ำไว้ ทำให้งานพิมพ์ที่ได้มีความสวยงาม และคมชัดกว่ากระดาษที่ไม่ได้เคลือบผิว โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมกระดาษเคลือบผิวกระดาษมักใช้ซิลิกาเป็นสารที่ใช้ในการรับหมึก ตัวอย่างของซิลิกาที่ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษเคลือบผิวกระดาษ ได้แก่ ฟูมซิลิกา (Fumed silica) ปัจจุบันฟูมซิลิกาเป็นซิลิกาที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศทำให้มีค่าใช้จ่ายที่สูง ซึ่งกระบวนการเตรียมซิลิกาจากขี้ถ้ำเกลบนี้เตรียมได้ง่าย และราคาถูกเมื่อเทียบกับการเตรียมซิลิกาจากวิธีการอื่นๆ แต่ให้ซิลิกาที่มีคุณภาพเทียบเท่ากับซิลิกาที่ใช้กันอยู่ในท้องตลาด

## 2.4.3 การเตรียมซิลิกาจากถ้ำเกลบ

นำขี้ถ้ำเกลบไปบดด้วยเครื่องบด ball mill ผสมขี้ถ้ำเกลบบดละเอียดลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นำของผสมไปรีฟลักซ์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้สารละลายโซเดียมซิลิเกต กรองเพื่อแยกสารละลายโซเดียมซิลิเกต และตะกอนออกจากกัน ล้างตะกอนนำน้ำล้างตะกอนไปรวมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต เติมกรดซัลฟิวริกลงในสารละลายเพื่อให้ได้ pH 2 กรองของเหลวออก นำซิลิกาไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนแห้งกรองเพื่อแยกสารละลายโซเดียมซิลิเกต และตะกอนออกจากกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.8 ซิลิกาจากเถ้าแกลบ

## 2.5 เถ้าลอยถ่านหิน (Fly ash) (จุฑาทิพย์ เพชรอินทร์, 2547)

เถ้าลอยถ่านหินเกิดจากการนำถ่านหินมาบดละเอียด และส่งเข้าไปในเตาเผาที่มีอากาศพอเพียง โดยเถ้าลอยถ่านหินเป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกจากปล่องควัน และถูกจับไว้ โดยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) หรืออาจจะมาจากการดักจับด้วยถุงกรองฝุ่น (Bag Filter)

### 2.5.1 สารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหิน

สารที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินจะประกอบไปด้วยแร่อนินทรีย์ที่อยู่ในถ่านหิน และสารอินทรีย์ที่ถูกเผาไหม้ไม่หมด แร่อนินทรีย์ที่ได้จะอยู่ในรูปของเถ้าลอย ซึ่งจากการเผาถ่านหินจะเกิดเถ้าลอยประมาณร้อยละ 3-30 ของปริมาณถ่านหินที่ใช้ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสารบางส่วนจะเกิดการระเหยและมีการเปลี่ยนแปลงต่างๆระหว่างการเผาไหม้ เช่น ดินเหนียวและดินดานจะสูญเสียน้ำไปจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) เกิดการสูญเสียคาร์บอนเนตจากการสลายตัวซึ่งจะให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ออกมา เหล็กไพไรต์ (iron pyrites) จะเปลี่ยนไปเป็นเหล็กออกไซด์ (iron oxide) และจะให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ออกมาซึ่งจะถูกปล่อยไปในบรรยากาศ หรือนำบำบัดด้วยระบบ FGD นอกจากนี้แคลเซียมออกไซด์อิสระจะเกิดการจับตัวใหม่ เกิดเป็นคาร์บอนเนต ( $\text{CO}_3$ ) ในถ่านหินจะมีสารแคลเซียมคาร์บอนเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ส่วนในเถ้าลอยถ่านหินจะมีซัลเฟอร์ในรูปแคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ) เถ้าลอยเหล่านี้ประกอบไปด้วยซิลิกอน (Si) อะลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) และหินปูนเป็นหลัก นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อีก เช่น

แมกนีเซียม (Mg) ไทเทเนียม (Ti) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) ซัลเฟอร์ (S) และสารประกอบ แอลคาไล นอกจากนี้ยังมีหินปูนกับแมกนีเซียมที่เกิดจากสารพวกคาร์บอเนต และซัลเฟต

ระดับปริมาณเถ้าลอยในถ่านหินจะมีช่วงปริมาณที่กว้างมาก โดยจะแปรเปลี่ยนไปตาม แหล่งกำเนิดหรือระดับชั้นของถ่านหิน

## 2.5.2 การจัดรูปของเถ้าลอยขณะทำการเผาไหม้

การจัดรูปของเถ้าลอยขณะทำการเผาไหม้จำแนกเป็น 3 ประเภทดังนี้

1. เถ้าหนัก (Bottom Ash) เป็นส่วนที่อนุภาคของเถ้าหลอมมารวมกันจนหนักพอที่จะตก ออกนอกหม้อไอน้ำ มีอนุภาคใหญ่กว่าเถ้าลอย และมีผิวหยาบกว่า มีสีอยู่ในช่วงเทาถึงดำ มีลักษณะเป็นเหลี่ยมที่มีหลายมุมเนื่องจากความพรุนของผิวอนุภาค เถ้าหนักเหล่านี้สามารถจับตัว กันก่อให้เกิดสแลก (Slag) สีดำ มีรูปร่างหลายมุม

2. ไอระเหย (Volatile Matter) เป็นส่วนของถ่านหินที่ระเหยออกระหว่างการเผาไหม้ บางส่วนของไอน้ำจะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ และบางส่วนจะควบแน่นแล้วไปเกาะบนผิวของเถ้า ลอยซึ่งจะถูกดักจับที่เครื่องดักจับเถ้าลอย ปริมาณของไอน้ำที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแก๊สเผา ไหม้ ความเข้มข้นและสมบัติของสารต่างๆ ในถ่านหินนั้น

3. เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นอนุภาคของแข็งซึ่งลอยอยู่ในแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้และ ลอยออกมาจากหม้อต้มไอน้ำพร้อมกับแก๊สอื่นๆ เถ้าลอยส่วนใหญ่จะถูกเก็บโดยเครื่องดักทางกล (Mechanical collectors) หรือ เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กของเถ้าลอยจะ ผ่านเครื่องดักจับก่อนปล่อยไอน้ำที่เหลือออกสู่บรรยากาศไป เถ้าลอยจะมีปริมาณร้อยละ 10-85 ของ ปริมาณเถ้าทั้งหมด และมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลม โดยมากจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5- 100 ไมครอน มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีดำซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณระดับคาร์บอนในถ่านหิน

จากการวิเคราะห์พบว่าเถ้าลอยมีส่วนประกอบของซิลิกอนเป็นส่วนใหญ่โดยมีปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก อนุภาคของเถ้าลอยที่มีผิวเรียบจะมีส่วนประกอบของซิลิกอนสูงกว่าเถ้าลอยที่มีผิวหยาบกว่า ส่วนประกอบอื่นๆ นั้นได้แก่ แมกนีไทต์ เฮมาไทต์ คาร์บอน มูลไลต์ และควอตซ์

สิ่งที่น่าสนใจของเถ้าลอย คือความเป็นอนุภาคเบาที่เรียกว่า เซโนสเฟียร์ (cenospheres) ซึ่งมีปริมาณกว่าร้อยละ 20 ของเถ้าลอย อนุภาคเหล่านี้มีลักษณะเป็นทรงกลมมีส่วนประกอบของ ซิลิกเกต ไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 20-200 ไมครอน เถ้าเหล่านี้มีลักษณะลอยตัวทำให้เกิดปัญหาในการขจัด สำหรับส่วนประกอบทางเคมีของ เซโนสเฟียร์จะคล้ายกับเถ้าลอยดังที่กล่าวต่อไป

### 2.5.3 อุปกรณ์ที่ใช้ดักเก็บเถ้าลอยถ่านหิน

1. เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (Electrostatics Precipitators) ใช้ในโรงผลิตกระแสไฟฟ้า ส่วนใหญ่ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วระหว่างแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ผ่านอนุภาคของเถ้าลอย จะได้รับประจุไฟฟ้าลบ และจะถูกดึงดูดให้เกาะบนขั้วบวก ในทางปฏิบัติเครื่องนี้จะต้องทำความสะอาดอย่างต่อเนื่องโดยการเคาะเพื่อไล่อนุภาคที่ดักเก็บได้ สำหรับการเก็บเถ้าลอยนั้น เครื่องมือที่ใช้ดักเก็บควรมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 99

2. ถุงกรอง (Bag Filter House) ถุงนี้จะทำจากผ้าที่สามารถดักจับอนุภาคเถ้าลอยได้ ซึ่งถุงนี้มักจะใช้หลายถุงในโครงสร้างหนึ่งจึงเรียกว่า Baghouse ถุงนี้จะมีประสิทธิภาพดีพอๆกับเครื่องตกตะกอน และถูกนำไปใช้ในโรงผลิตกระแสไฟฟ้าบางแห่ง

3. ไซโคลน (Cyclone collector) เครื่องไซโคลนจะทำงานโดยการหมุนวนอย่างปั่นป่วนของแก๊สจนทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง ซึ่งจะทำให้เกิดการแยกของอนุภาคเถ้าลอยที่หนักออกจากแก๊ส เครื่องไซโคลนควรมีประสิทธิภาพร้อยละ 70-85 เมื่อใช้กับหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิง เครื่องไซโคลนไฟบอยเลอร์ (Cyclone-Fired Boiler) จะทำให้เกิดเถ้าที่มีขนาดเล็กจำนวนมากกว่าหน่วยที่ใช้ถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นเครื่องไซโคลนจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าเครื่องไซโคลนไฟบอยเลอร์

### 2.5.4 ชนิดของเถ้าลอยถ่านหินจำแนกตามส่วนประกอบตามธรรมชาติ

เถ้าลอยแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามส่วนประกอบทางธรรมชาติ คือ เถ้าลอยบิทูมินัส และเถ้าลอยลิกไนต์ ความแตกต่างของเถ้าลอยทั้งสองชนิด คือ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์จะหยาบกว่า คือ มีช่วงกว้างกว่า ค่าดัชนีหักเหของเถ้าลอยลิกไนต์มีค่าสูงกว่า จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) รวมกับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) มากกว่าเฟอริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ในทางตรงกันข้าม สำหรับเถ้าลอยบิทูมินัสนั้นจะมีปริมาณเฟอริกออกไซด์มากกว่าปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) รวมกับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

### 2.5.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับปัจจัยทางด้านธรณีวิทยา และภูมิศาสตร์ที่สัมพันธ์กับการเกิดถ่านหินเป็นหลัก แต่อาจขึ้นอยู่กับภาวะการเผาไหม้ และประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมมลพิษทางอากาศ สารอนินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบในเถ้าลอยจะเป็นไปตามชนิดของหินและดิน คือ มีออกไซด์ของซิลิกอน (Si) อะลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) และแคลเซียม (Ca) คิด

เป็นร้อยละ 95-99 ของส่วนประกอบทั้งหมด และมีส่วนประกอบย่อยอื่นๆ ได้แก่ แมกนีเซียม (Mg) ไทเทเนียม (Ti) โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) ซัลเฟอร์ (S) และฟอสฟอรัส (P) คิดเป็นร้อยละ 0.5-3.5 ของส่วนประกอบทั้งหมด นอกจากนี้เถ้าลอยจะมีส่วนประกอบของธาตุต่างๆ ที่มีปริมาณน้อยๆ (trace element) ประมาณ 20-50 ธาตุ

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยในประเทศต่างๆตามที่รวบรวมและสรุปไว้พบว่า องค์ประกอบของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ จะแตกต่างกันมาก ซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างระหว่าง ถ่านหินที่ใช้และประสิทธิภาพของเตาเผาที่ใช้ในแต่ละแหล่ง โดยเฉพาะแล้วเถ้าลอยจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญดังต่อไปนี้

- Silica ( $\text{SiO}_2$ ) ร้อยละ 41-58 โดยน้ำหนัก
- Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 21-27 โดยน้ำหนัก
- Iron Oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 4-17 โดยน้ำหนัก
- Lime ( $\text{CaO}$ ) ร้อยละ 4-6 โดยน้ำหนัก

ที่เหลือเป็นออกไซด์ของแร่ชนิดต่างๆ ที่ผสมอยู่ในถ่านหิน เช่น  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{K}_2\text{O}$  เป็นต้น จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยนั้นจะคล้ายคลึงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก ทั้งนี้เนื่องจากทั้งเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ต่างก็เป็นสารที่เกิดจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง

นอกจากนี้แล้วเถ้าลอยถ่านหินยังแบ่งชั้นคุณภาพตามมาตรฐาน ASTM ได้เป็น เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F และเถ้าลอยชั้นคุณภาพ C ดังต่อไปนี้

- ชั้นคุณภาพ F คือเถ้าลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินแอนทราไซต์หรือบิทูมินัส ซึ่งเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F มีคุณสมบัติปอซโซลาน (Pozzolanic)
- ชั้นคุณภาพ C คือ เถ้าลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์หรือซับบิทูมินัส เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C นอกจากจะมีคุณสมบัติปอซโซลาน (Pozzolanic) แล้วยังมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน (Cementitious) อีกด้วยและอาจจะมี  $\text{CaO}$  อยู่มากกว่าร้อยละ 10

องค์ประกอบของถ่านหินแต่ละชนิดนั้นมีองค์ประกอบทางเคมี และร้อยละการสูญเสีย น้ำหนักจากการเผาไหม้ (LOI) หรือคาร์บอนที่มีอยู่ในเถ้าลอยแตกต่างกันไปตามชนิดของถ่านหิน ดังแสดงในตารางที่ 2.1



ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินแต่ละชนิด

Component	Bituminous	Subbituminous	Lignite
SiO <sub>2</sub>	20-60	40-60	15-45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5-35	20-30	10-25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO <sub>3</sub>	0-4	0-2	0-10
Na <sub>2</sub> O	0-4	0-2	0-6
K <sub>2</sub> O	0-3	0-4	0-4
LOI	0-15	0-3	0-5

### 2.5.6 ประโยชน์ของเถ้าลอยถ่านหิน

#### 1. การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุถม (Fill Material)

เมื่อผสมน้ำให้เข้ากับเถ้าลอยในอัตราส่วนที่เหมาะสมและทำการบดอัดอย่างดีแล้ว เถ้าลอยเป็นวัสดุถมที่มีความสามารถรับน้ำหนักได้สูง และเกิดการยุบตัวน้อย ค่าสัดส่วนของน้ำหนักสูงสุดที่เถ้าลอยสามารถรับได้ใน การบดอัดเถ้าลอยในห้องปฏิบัติการโดยวิธีบดอัดมาตรฐาน (standard compaction) จะอยู่ในช่วงร้อยละ 18 - 45 และค่าความหนาแน่นสูงสุด (maximum dry unit weight) จะอยู่ในช่วง 9 - 16 (kN/m<sup>3</sup>) แต่ในสนามเป็นการยากที่จะบดอัด เถ้าลอยให้ได้ ความหนาแน่นสูงสุด โดยปกติมักจะกำหนดให้บดอัดได้ที่ความหนาแน่นไม่ต่ำกว่าร้อยละ 90 ของ ความหนาแน่นสูงสุด

กำลังอัด (unconfined compressive strength) ของเถ้าลอยนอกจากจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นจากการบดอัดแล้วยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีด้วย เถ้าลอยที่ได้จากการบดอัดแล้ว จะมีน้ำหนักเบาและมีกำลังอัดสูงเมื่อเทียบกับดินซึ่งมักจะใช้เป็นวัสดุถมโดยทั่วไป ดังนั้นความนิยมในการนำเอาเถ้าลอยไปใช้เป็นวัสดุถมในพื้นที่ที่เป็นชั้นดินอ่อน เนื่องจากข้อได้เปรียบสองประการ คือ น้ำหนักที่เบาจะช่วยลดการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในชั้นดินอ่อน และการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในชั้นเถ้าลอยเองจะน้อยมากเพราะมีกำลังอัดสูง

## 2. การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุในโครงสร้างของถนน

ส่วนของถนนที่นิยมใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุ คือ ชั้นรองพื้นทาง (sub-base) และชั้นพื้นทาง (base) แม้ว่าเถ้าลอยที่บดอัดแล้วจะมีกำลังค่อนข้างสูงแต่ยังคงมีสมบัติบางอย่างที่ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานโครงสร้างของถนนโดยลำพังแต่จะสามารถนำไปใช้ได้เมื่อผสมด้วยปูนซีเมนต์หรือปูนขาว บางครั้งอาจใช้เป็นสารสำหรับปรับปรุงสมบัติของดินให้เหมือนกับปูนซีเมนต์หรือปูนขาวก็ได้

## 3. การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต สามารถทำได้ 3 ลักษณะดังนี้คือ

- ใช้เป็นสารเพิ่ม (Admixture) ในส่วนผสมคอนกรีต
- ใช้เป็นส่วนผสมปูนซีเมนต์ก่อนนำไปใช้งานคอนกรีต
- ใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์

การใช้เถ้าลอยเป็นสารเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีต ในกรณีนี้จุดประสงค์หลักคือ ลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตลง เถ้าลอยจะทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานแทนปูนซีเมนต์ในส่วนที่ลดไปได้



รูปที่ 2.9 เถ้าลอยถ่านหิน

ที่มา: <http://www.caer.uky.edu/kyasheducation/flyash.shtml>

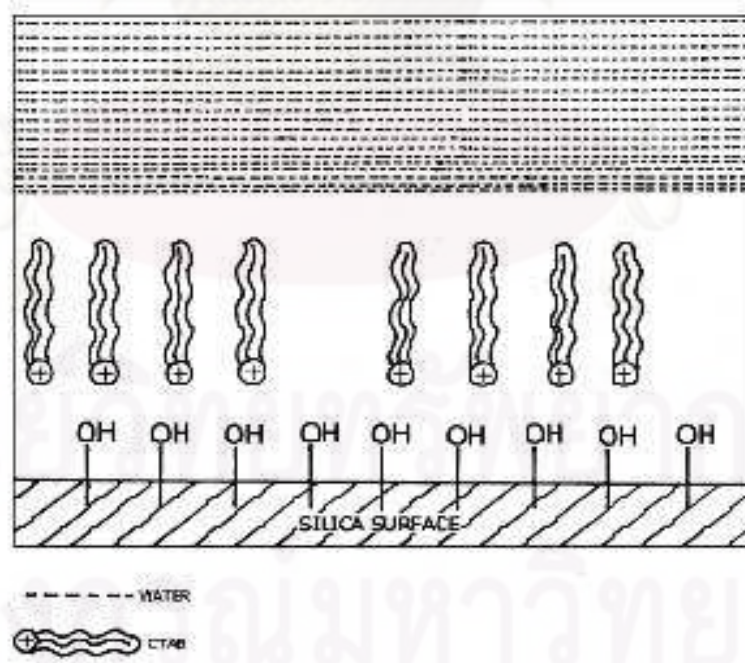
## 2.5.7 การใช้ประโยชน์เถ้าลอยถ่านหินในการดูดซับ

การใช้ประโยชน์เถ้าลอยถ่านหินในการดูดซับมักจะทำให้อยู่ในรูปแบบของซีโอไลต์ เนื่องจากผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง และองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินแล้ว

ประกอบด้วย สารประกอบซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) เมื่อนำเข้าลอยถ่านหินมาทำปฏิกิริยากับสารละลายเบส เช่นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมจะเกิดซีโอไลต์ขึ้นได้ ซึ่งซีโอไลต์นั้นเป็นผลึกของสารอะลูมิโนซิลิเกต ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนสม่ำเสมอ ทำให้สามารถดูดซับมลพิษต่างๆได้

## 2.6 การปรับสภาพพื้นผิวของสารดูดซับด้วยสารปรับสภาพผิว

ลักษณะพื้นผิวของซิลิกาโดยทั่วไปนั้นจะแสดงพื้นผิวเป็นประจุลบ โดยจะมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่ผิว (Si-OH) ซึ่งสารเหล่านี้เป็นสารที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ทำให้ลักษณะพื้นผิวของซิลิกาแสดงลักษณะชอบน้ำ จึงไม่สามารถดูดซับสารอินทรีย์ที่ไม่มีไอออน (Nonionic Organic Compounds) เช่น เบนซีน อัลคิลเบนซีน แนฟทาลีน ฯลฯ เพื่อเป็นการเปลี่ยนแปลงสมบัติของซิลิกาให้สามารถดูดซับสารอินทรีย์ที่ไม่มีไอออน (Nonionic Organic Compounds) ได้ดีขึ้นนิยมปรับสภาพผิวด้วยสารแอมฟิฟิลิกชนิดประจุบวก (Cationic Surfactant) โดยที่สารปรับสภาพผิวชนิดประจุบวกนี้มีประจุบวกที่ส่วนหัว ทำให้สามารถดูดซับบนผิวของซิลิกาที่มีประจุลบได้ และหางส่วนหาง (Carbon Group) ซึ่งไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ออก ทำให้สภาพผิวซิลิกามีความไม่ชอบน้ำมากขึ้นสามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การดูดซับของสารปรับสภาพผิวชนิดประจุบวกบนผิวของซิลิกา

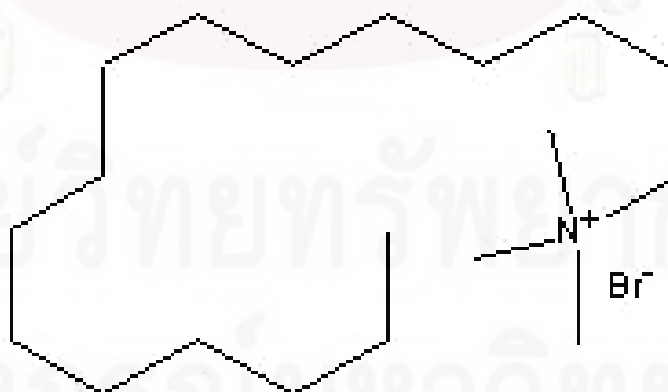
ที่มา: Parida, 2006

### 2.6.1 สารปรับสภาพผิว (Surface Treating Agent)

สารปรับสภาพผิว คือ โมเลกุลแอมฟิฟิลิก ซึ่งมีองค์ประกอบชอบน้ำ (Hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) อยู่ในโมเลกุลเดียวกัน ซึ่งโดยทั่วไปส่วนที่ไม่ชอบน้ำมักเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีจำนวนคาร์บอนอะตอมมากกว่า 8 ขึ้นไป สารปรับสภาพผิวสามารถแบ่งตามลักษณะทางธรรมชาติของส่วนที่มีสภาพความเป็นขั้วได้ดังนี้ คือ สภาพประจุลบ (anionic) สภาพประจุบวก (cationic) และสภาพไร้ประจุ (nonionic) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะสารปรับสภาพผิวชนิดสภาพประจุบวก (Cationic Surfactant)

สารปรับสภาพผิวชนิดสภาพประจุบวก มีประจุบวกที่ส่วนหัว ทำให้สามารถดูดซับบนผิวของซิลิกาที่มีประจุลบได้ และส่วนหาง (Hydrocarbon Group) จะแสดงความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ทำให้สามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้ นอกจากนี้ยังมีผิวสัมผัสที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในสารละลายที่มีต่อโครงสร้างทางโมเลกุล และสมบัติทางกายภาพ จะพบว่าสามารถแบ่งกลุ่มของปรับสภาพผิวชนิดนี้ได้เป็น 2 กลุ่มย่อยๆคือ พวกที่มีสภาพความเป็นกลาง (Neutral) และพวกที่มีสภาพความเป็นกรด (Acidic) สารปรับสภาพผิวชนิดสภาพประจุบวกที่กลุ่มย่อยมีสภาพเป็นกลางที่เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลาย ได้แก่ เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cethyltrimethylammoniumbromide: CTAB)

### 2.6.2 เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cethyltrimethylammoniumbromide: CTAB)

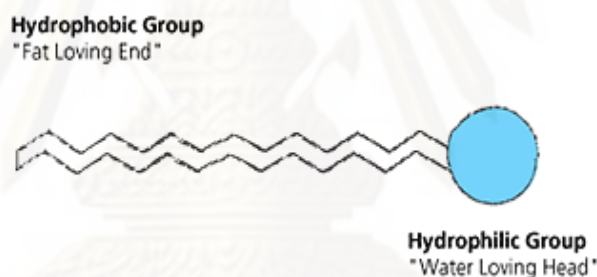


รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของ CTAB

ที่มา: <http://www.made-in-china.com/image/2f0j00GMKQeZDBaYz>

หมู่แอมโมเนียมอออนจะมีอะตอมของคาร์บอน 4 อะตอมเกาะอยู่กับอะตอมของไนโตรเจนที่เป็นประจุบวก หมู่แอมโมเนียมของสารปรับสภาพผิวจะมีหมู่ที่เข้ามาแทนที่อย่างน้อย 1 หมู่หรือมากกว่านั้น ซึ่งหมู่ที่เข้ามาแทนที่นี้จะเป็นพวกที่มีสภาพไร้ขั้ว และไม่ชอบน้ำ โมเลกุลที่เป็นประจุบวกจะอยู่เป็นคู่กับโมเลกุลที่เป็นประจุลบในสารละลายเกลือที่มีสภาพความเป็นไฟฟ้าที่เป็นกลาง อะตอมของไนโตรเจนในหมู่แอมโมเนียมของ CTAB จะจัดเรียงในลักษณะ  $sp^3$  bonding ซึ่งโมเลกุลที่มีประจุบวกจะขาดโปรตอนของสภาพความเป็นกรด และอิเล็กตรอนคู่ที่ไม่มีพันธะ ดังนั้นเมื่อพิจารณาในความเป็นกรด-ด่างแล้วจะพบว่าสารปรับสภาพผิวชนิดนี้จะมีสภาพความเป็นกลางในน้ำ

การดูดซับของประจุในสารปรับสภาพผิวบนพื้นผิวสัมผัสที่มีประจุตรงกันข้ามมีผลเกี่ยวข้องกับหลายกลไก ซึ่งสามารถจำแนกปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การดูดซับได้ เช่น สภาพโครงสร้างตามธรรมชาติบนพื้นผิวที่ใช้สำหรับดูดซับ โครงสร้างทางโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ และสภาวะแวดล้อมของสารละลาย เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง (สลักจิต บัวทอง, 2548)



รูปที่ 2.12 ลักษณะโครงสร้างของสารปรับสภาพผิว

ที่มา: [http://www.scienceinthebox.com/en\\_UK/glossary/pic/surfactant-appearance.gif](http://www.scienceinthebox.com/en_UK/glossary/pic/surfactant-appearance.gif)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lee and Kim (2002) ได้ทำการศึกษาการดูดซับแนฟธาลินโดยใช้ แร่ดิน Kaolinite และ แร่ดิน Halloysite ที่ถูกปรับปรุงสมบัติพื้นผิวด้วยสารปรับสภาพผิวที่มีประจุบวก ชนิด hexadecyltrimethylammonium (HDTMA) เป็นตัวดูดซับ โดยได้ทำการปรับปรุงคุณสมบัติ ดังนี้คือ เติม HDTMA ความเข้มข้นต่างๆกัน ในสัดส่วน Solid : Water = 1 : 20 ลงในแร่ดิน Kaolinite และ แร่ดิน Halloysite ปริมาณ 1 กรัม นำไปกวนเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปทำการทดลองดูดซับแนฟธาลินที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้ปริมาณ แร่ดิน Kaolinite และ แร่ดิน Halloysite 0.5 กรัม ในสารละลายแนฟธาลิน 20 มิลลิลิตร พบว่าเมื่อปริมาณ HDTMA ที่นำมา

ปรับปรุงสมบัติพื้นผิวแร่ดิน Kaolinite เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับแนฟธาซีนมีมากขึ้น แต่สำหรับแร่ดิน Halloysite พบว่าปริมาณของ HDTMA ที่นำมาปรับปรุงคุณสมบัติไม่ค่อยมีผลต่อการดูดซับแนฟธาซีน แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิวของแร่ดินด้วยสาร HDTMA ช่วยเพิ่ม Hydrophobicity ของแร่ดิน Kaolinite ซึ่งมีสภาพผิวเป็นลบ และลักษณะโครงสร้าง และลักษณะพื้นผิวของวัสดุดูดซับมีผลต่อการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสาร HDTMA

ปิยมภรณ์ จารุงศ์ (2545) ได้ทำการศึกษาการดูดซับสารอินทรีย์ 6 ชนิดได้แก่ กรดฮิวมิก เมธิลีนบลู เมธิลลอรเรนจ์ ฟีนอล คลอโรฟีนอล และแนฟธาซีน โดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ และแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารปรับสภาพผิวที่มีประจุบวก 4 ชนิดคือ Tetramethylammonium (TMA), Hexadecyltrimethylammonium (HDTMA), Tetradecyltrimethylammonium (TDMA) และ Benzyltrimethylhexadecylammonium (BDHDTMA) ซึ่งสารเหล่านี้มีความยาวของหมู่อัลคิลและขนาดโมเลกุลต่างกัน โดยทำการปรับปรุงคุณสมบัติดังนี้คือ นำปริมาณสารปรับสภาพผิวที่คำนวณได้เช่น TMA ใช้ 1.75 กรัมไปละลายน้ำกลั่น 1 ลิตร นำสารละลายที่ได้ไปกวนรวมกับแร่ดินที่เตรียมไว้ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปทำการทดลองการดูดซับที่สภาวะต่างๆ โดยใช้ปริมาณสารดูดซับต่อปริมาตรสารละลายแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์เช่น แนฟธาซีนใช้ปริมาณ 0.1 กรัมต่อสารละลาย 200 ml จากการศึกษาพบว่าทั้งแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารปรับสภาพผิว สามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้ และส่วนใหญ่แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารปรับสภาพผิว สามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้มากกว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ ทั้งนี้ความสามารถในการดูดซับยังขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนบนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติ ซึ่งจะสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนในโครงสร้างของสารปรับสภาพผิว โดยจะพบว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารปรับสภาพผิวที่มีแขนของหมู่อัลคิลที่ยาว จะสามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้ดีกว่า นอกจากนี้ความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ยังขึ้นอยู่กับ ชนิดของสารอินทรีย์ อุณหภูมิ และความเป็นกรด ต่าง ของระบบ เช่น การดูดซับเมธิลีนบลูจะเกิดได้ดีเมื่อสภาวะของระบบเป็นด่าง ขณะที่การดูดซับฟีนอลจะเกิดได้ดีเมื่อสภาวะของระบบเป็นกรด นอกจากนี้ยังพบว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติ สามารถดูดซับสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ เช่น แนฟธาซีน ได้ดีกว่าสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง เช่น ฟีนอล

ปริตตรา โรจนวิรุฬห์ (2547) ได้ทำการศึกษากำจัดสารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) จากน้ำโดยใช้เส้นใยธรรมชาติ โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการใช้วัสดุดูดซับที่เป็นเส้นใยธรรมชาติจากพืช 2 ชนิด คือ ฐปฤาษี และนุ่น ซึ่งมีราคาถูกและหาง่ายในธรรมชาติ เปรียบเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์โพลีเอสเตอร์ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า เส้นใยทั้งสามชนิดมีความสามารถกำจัด PAHs จากน้ำเสียได้ดี และเส้นใยของฐปฤาษีมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุด โดยที่การดูดซับนั้นเป็นไปตามสมการของฟรอนด์ลิช

นที วิบูลย์ปัญญากุล และ บัทยา ศาตราบุตร (2548) ได้ทำการศึกษากำจัดสารอินทรีย์และไอออนของโลหะในน้ำด้วยถ้ำแคลบ และถ้ำแคลบที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วย HCl และ NaOH จากนั้นจึงนำไปทำการทดลองดูดซับฟีนอลที่ความเข้มข้น 5 ppm ปริมาตร 10 ml โดยใช้ปริมาณสารดูดซับ 0.1 กรัม แล้วนำไปเขย่าเป็นเวลา 30 นาที ผลการศึกษาพบว่าทั้งถ้ำแคลบ และถ้ำแคลบที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติสามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้ โดยที่ถ้ำแคลบที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติด้วย NaOH จะมีประสิทธิภาพการดูดซับดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับมากถึง 0.50 mg/g

Banerjee, Joshi and Jayaram (2006) ได้ทำการศึกษากำจัดน้ำมันดิบที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ทางทะเลโดยใช้ ถ้ำลอยถ่านหิน และถ้ำลอยถ่านหินที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารปรับสภาพผิวที่มีประจุบวก ชนิด hexadecyltrimethylammonium (HDTMA) เป็นตัวดูดซับ โดยได้ทำการปรับปรุงคุณสมบัติดังนี้คือ เติม HDTMA ความเข้มข้น 5000 mg/l ปริมาตร 1 L ลงในถ้ำลอยถ่านหินปริมาณ 30 g จากนั้นนำไปกวนที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าการดูดซับน้ำมันด้วยการใช้ถ้ำลอยถ่านหิน และถ้ำลอยถ่านหินที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วย HDTMA นั้นสามารถดูดซับน้ำมันได้ แต่เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับด้วยการใช้สมการของฟรอนด์ลิช (Freundlich) พบว่าการดูดซับน้ำมันโดยใช้ถ้ำลอยถ่านหินที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วย HDTMA นั้นมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีกว่า เนื่องจากเป็นการดูดซับระหว่างส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrocarbon Group) ของสาร HDTMA กับโมเลกุลของน้ำมัน

Banerjee, Joshi and Jayaram (2006) ได้ทำการศึกษากำจัดสีย้อม 2 ชนิดคือ disperse dye (สีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ) และ anionic dye ด้วยถ้ำลอยถ่านหิน (FA) และถ้ำลอยถ่านหินที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารปรับสภาพผิวที่มีประจุบวก ชนิด tetraethylammonium (TEA) hexadecyltrimethylammonium (HDTMA) และ benzylidimethyltetradecylammonium (BDTDA) โดยได้ทำการปรับปรุงคุณสมบัติดังนี้คือ เติม TEA, HDTMA, BDTDA ความเข้มข้น

0.03 M ปริมาตร 1 L ลงในแก้วลอยถ่านหินปริมาณ 30 g จากนั้นนำไปกวนที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปทำการทดลองการดูดซับที่สภาวะต่างๆ โดยใช้สารดูดซับ 0.1 กรัมในสารละลาย 100 ml ซึ่งจากการทดลองพบว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีในสภาวะที่ค่า pH ต่ำ และพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการดูดซับ โดยพบว่าแก้วลอยถ่านหินที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารปรับสภาพผิวมันจะมีประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 30-60 องศาเซลเซียส ขณะที่แก้วลอยถ่านหินที่ไม่ได้ปรับปรุงสภาพผิวประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากการดูดซับแบบกายภาพ จึงเกิดการ desorption ได้ง่าย นอกจากนี้แล้วยังพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับยังขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนบนสารดูดซับ ซึ่งพบว่าปริมาณคาร์บอนบนแก้วลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวขึ้นอยู่กับโครงสร้างและปริมาณคาร์บอนบนสารปรับสภาพผิวที่ใช้ในการปรับปรุง โดยในการทดลองนี้พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับโดยใช้สารปรับสภาพผิวต่างชนิดกันเป็นดังนี้ คือ BDTDA-FA > HDTMA-FA > TEA-FA > FA

Parida, Dash, Patel and Mishra (2006) ได้ทำการศึกษาการดูดซับสารอินทรีย์บนพื้นผิวของซิลิกา ซึ่งพบว่า พื้นผิวโดยธรรมชาติของซิลิกานั้นมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งมีลักษณะชอบน้ำ (hydrophilic) เป็นองค์ประกอบ ทำให้ไม่สามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้ จึงต้องทำการปรับปรุงสภาพของพื้นผิวเพื่อให้สามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้ โดยในการทดลองนี้มีการใช้สารแอมฟิฟิลิกที่มีประจุบวก ชนิด Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) มาใช้ปรับปรุงพื้นผิวซิลิกา ซึ่งผลการทดลองพบว่า ซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวนั้นสามารถดูดซับสีย้อมได้ โดยการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นเป็นการดูดซับทางกายภาพระหว่างส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic part) ของ CTAB กับส่วนที่ไม่ชอบน้ำของสีย้อม

สุรชานา ช้างชาวยวงค์ (2549) ได้ศึกษาการดูดซับสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (polycyclic aromatic hydrocarbons; PAHs) 2 ชนิดคือ แนฟทาลีน และพีแนนทรีน โดยใช้แเรดินเบนโทไนด์ ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารอินทรีย์ชนิด dodecylpyridium (DPC) โดยได้ทำการปรับปรุงคุณสมบัติดังนี้คือ เติม DPC ที่ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 100 ml ลงในแเรดินเบนโทไนด์ ปริมาณ 5 g จากนั้นนำไปกวนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปทำการทดลองการดูดซับที่สภาวะต่างๆ โดยใช้สารดูดซับ 0.05 กรัมในสารละลาย 100 ml ซึ่งจากการทดลองพบว่า แเรดินเบนโทไนด์ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วย DPC มีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าแเรดินเบนโทไนด์ธรรมชาติ โดยประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ DPC



บนผิวของแร่ดินเบนโทไนต์มากขึ้น จนถึงจุดที่ปริมาณ DPC เพิ่มขึ้นจาก 1.25 ถึง 2.00 เท่าของค่า CEC พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับจะไม่ต่างกัน

Crisafulli and Nascimento (2007) ได้ศึกษาการลดปริมาณสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (polycyclic aromatic hydrocarbons; PAHs) 4 ชนิดคือ แนฟธาซีน อะซีแนฟธีน แอนทราซีน และไพรีน โดยใช้วัสดุดูดซับราคาถูกที่หาได้จากธรรมชาติ คือ กากขานอ้อย เปลือกมะพร้าว ไคติน และไคโตซาน โดยทำการทดลองดังนี้คือ เติมสารละลาย PAHs ที่ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 10 mL ลงในวัสดุดูดซับแต่ละชนิดปริมาณ 0.2 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ซึ่งผลการศึกษาพบว่าวัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิดสามารถดูดซับสารประกอบ PAHs ได้โดยที่เปลือกมะพร้าวมีประสิทธิภาพในการดูดซับดีที่สุด เนื่องจากมีส่วนประกอบของลิกนินอยู่ รองลงมาคือ กากขานอ้อย ไคติน และไคโตซาน ตามลำดับ โดยที่ประสิทธิภาพในการดูดซับนั้นเป็นไปตามสมการของฟรุนดลิช นั่นคือเป็นการดูดซับแบบกายภาพ

เอกชัย ประภาลิมรังสี (2550) ได้ศึกษาการลดปริมาณกรดฮิวมิกในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเถ้าแกลบ และเถ้าแกลบที่ปรับปรุงสภาพผิวด้วย 3-aminopropyltriethoxysilane โดยได้ทำการปรับปรุงคุณสมบัติดังนี้คือ นำเถ้าแกลบ 25 กรัม มาผสมกับโทลูอีน 200 ml นำไปรีฟลักซ์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นจึงเติม 3-aminopropyltriethoxysilane 10 ml แล้วจึงนำไปรีฟลักซ์อีกครั้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปทดลองทำการดูดซับโดยการใส่สารดูดซับ 50 mg ในสารละลายกรดฮิวมิก 50 mg/l ปริมาตร 10 ml ซึ่งพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณกรดฮิวมิก คือ ใช้ระยะเวลาในการดูดซับนาน 60 นาที และที่ pH เท่ากับ 3.0 สามารถลดปริมาณกรดฮิวมิกได้สูงสุด ส่วนเถ้าแกลบที่ทำการดัดแปรพื้นผิวด้วย 3-aminopropyltriethoxysilane นั้นพบว่าให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณกรดฮิวมิกที่ดีกว่าเถ้าแกลบ โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับคือ ใช้เวลาในการดูดซับนาน 30 นาที ที่ช่วงพีเอช 3.0 – 4.0

## บทที่ 3

### ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 ขั้นตอนการวิจัย

3.1.1 ศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสารดูดซับ และสารดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิว

3.1.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแนฟธาลีนด้วยแก้วแกลบ ซิลิกาจากแก้วแกลบ และถ่านลอยถ่านหิน ตามลำดับ

3.1.3 ศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับด้วยการปรับปรุงสภาพผิวสารดูดซับด้วยสารปรับปรุงสภาพผิวชนิดประจุบวก (Cationic amphiphilic molecules)

3.1.4 เลือกชนิดสารดูดซับและสภาวะการดูดซับที่เหมาะสมไปทำการทดลองดูดซับน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำ

#### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) รุ่น Philips model PW2400

3.2.2 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) รุ่น Bruker AXS Model D8 Discover

3.2.3 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometry รุ่น Perkin Elmer (Spectrum One)

3.2.4 เครื่อง Specific Surface Area Analyzer รุ่น Autosorb 1

3.2.5 เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer รุ่น Shimadzu UV-160A

3.2.6 เครื่อง CHN Elemental Analyzer รุ่น Leco CHN-2000

3.2.7 เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) รุ่น Joel 6400

3.2.8 เครื่องเขย่าแนวราบ รุ่น GFL 3005

3.2.9 เครื่องปั่นเหวี่ยงแยก รุ่น IEC Centra-HN

3.2.10 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (พีเอชมิเตอร์) รุ่น Precisa pH 900

3.2.11 เครื่องชั่งไฟฟ้าอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง

### 3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.3.1 เถ้าแกลบ จาก บริษัทปทุมไรซ์มิล แอน แกรนารี จำกัด (มหาชน)
- 3.3.2 เถ้าลอยถ่านหิน โรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- 3.3.3 ซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าแกลบ สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สุพิณ แสงสุข และคณะ, 2549)
- 3.3.4 แนฟธาลิน ความบริสุทธิ์มากกว่า 98% บริษัท Fluka
- 3.3.5 เมทานอล ความบริสุทธิ์มากกว่า 98 % บริษัท Merck
- 3.3.6 Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) ความบริสุทธิ์มากกว่า 98 %  
บริษัท Ajax Finechem
- 3.3.7 กรดไฮโดรคลอริก บริษัท J.T. Baker
- 3.3.8 โซเดียมไฮดรอกไซด์ บริษัท Ajax Finechem

### 3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.4.1 การวิเคราะห์ปริมาณแนฟธาลินในสารละลายก่อนและหลังใส่สารดูดซับ

เนื่องจากแนฟธาลินเป็นสารประกอบประเภท aromatic hydrocarbon ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันไม่อิ่มตัว (unsaturated functional group) จึงสามารถดูดกลืนแสงในช่วง UV-Visible ฉะนั้นในการศึกษาจึงเลือกเทคนิค UV-Visible Spectroscopy ในการวิเคราะห์ปริมาณแนฟธาลินในสารละลายก่อนและหลังใส่สารดูดซับ โดยดำเนินการวิเคราะห์ดังนี้

- 1) เตรียมสารละลายแนฟธาลินในตัวทำละลายเมทานอล นำไปตรวจวัดด้วยเครื่อง UV-Visible Spectroscopy เพื่อหาค่า  $\lambda_{max}$  (ความยาวคลื่นที่แนฟธาลินดูดกลืนแสงได้ดีที่สุด)
- 2) เตรียมสารละลายมาตรฐานแนฟธาลินในตัวทำละลายเมทานอลความเข้มข้นต่างๆ กัน วัดค่าดูดกลืนแสง (Abs) ที่  $\lambda_{max}$
- 3) เขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นสารละลายกับค่าดูดกลืนแสง (Abs) เพื่อใช้เป็นกราฟมาตรฐาน (Calibration Curve) สำหรับเทียบหาความเข้มข้นสารละลายแนฟธาลิน

### 3.4.2 การปรับสภาพพื้นผิวของสารดูดซับด้วยสารปรับสภาพผิว CTAB

นำเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) 1.4 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมเถ้าแกลบหรือซีลิกาที่ได้จากเถ้าแกลบ หรือเถ้าลอยถ่านหินลงในสารละลาย 8 กรัม กวนของผสมตลอดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารดูดซับไปล้างด้วยน้ำกลั่น และนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ธีรศักดิ์, 2551)

### 3.4.3 การศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสารดูดซับก่อนและหลังการปรับสภาพพื้นผิว

- 1) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับโดยใช้เครื่องเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)
- 2) วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของสารดูดซับโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)
- 3) วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและสภาพความพรุนของสารดูดซับโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)
- 4) ทดสอบหาค่าพื้นที่ผิวโดยใช้เครื่อง Specific Surface Area Analyzer
- 5) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารดูดซับและสารดูดซับที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวโดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometry (FTIR)
- 6) วิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนโดยใช้เครื่อง CHN Analyzers

### 3.4.4 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับแอฟทาลีนด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ

#### 3.4.4.1 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วยกที่ใช้ในการเขย่า (Shaking Rate)

1. เตรียมสารละลายแอฟทาลีนเข้มข้น 10 mg/l ปริมาตร 100 ml 3 ขวดต่อสารดูดซับแต่ละชนิดเพื่อทำการทดลองซ้ำ ตรวจสอบวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscopy เพื่อหาค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (Initial Concentration)
2. เติมสารดูดซับแต่ละชนิด ได้แก่ เถ้าแกลบ เถ้าแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ซีลิกาจากเถ้าแกลบ ซีลิกาจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว เถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ในขวดแต่ละใบ ปริมาณ 0.3 กรัม

3. นำขวดแต่ละชุดไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100, 150, 200 และ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. นำของผสมไปแยกตัวดูดซับออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงแยกโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงแยกที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำ filtrate ไปกรองผ่านกระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 1
5. นำสารละลายที่กรองได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscopy เพื่อหาค่าความเข้มข้นเนฟธาไลน์หลังการดูดซับ (Final Concentration) แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าประสิทธิภาพการกำจัดเนฟธาไลน์ (% Removal)

$$\% \text{ Removal} = \frac{(\text{Initial concentration} - \text{Final concentration}) \times 100}{\text{Initial concentration}}$$

#### 3.4.4.2 ศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัส (Shaking Time)

1. เตรียมสารละลายเนฟธาไลน์เข้มข้น 10 mg/l ปริมาตร 100 ml 3 ขวดต่อสารดูดซับแต่ละชนิดเพื่อทำการทดลองซ้ำ ตรวจสอบวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscopy เพื่อหาค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (Initial Concentration)
2. เติมสารดูดซับแต่ละชนิด ได้แก่ ถ้ำกลบ ถ้ำกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ซิลิกาจากถ้ำกลบ ซิลิกาจากถ้ำกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ถ้ำลอยจากถ่านหิน และถ้ำลอยจากถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ในขวดแต่ละใบ ปริมาณ 0.3 กรัม
3. นำขวดแต่ละชุดไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.4.1 เป็นเวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 นาที
4. นำของผสมไปแยกตัวดูดซับออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงแยกโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงแยกที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำ filtrate ไปกรองผ่านกระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 1
5. นำสารละลายที่กรองได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscopy เพื่อหาค่าความเข้มข้นเนฟธาไลน์หลังการดูดซับ (Final Concentration) แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าประสิทธิภาพการกำจัดเนฟธาไลน์ (% Removal)

$$\% \text{ Removal} = \frac{(\text{Initial concentration} - \text{Final concentration}) \times 100}{\text{Initial concentration}}$$

### 3.4.4.3 ศึกษาอิทธิพลของค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ

1. เตรียมสารละลายแวนฟาซีนเข้มข้น 10 mg/l ปริมาตร 100 ml ที่มีค่า pH เท่ากับ 2, 4, 6, 8 และ 10 ตามลำดับโดยการปรับ pH ด้วยสารละลาย 0.1 M HCl และ 0.1 M NaOH 3 ขวดต่อสารดูดซับแต่ละชนิดเพื่อทำการทดลองซ้ำ ตรวจสอบค่าการดูดกลืนคลื่นแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscopy เพื่อหาค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (Initial Concentration)
2. เติมสารดูดซับแต่ละชนิด ได้แก่ ถ้ำจากแกลบ ถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ซิลิกาจากถ้ำแกลบ ซิลิกาจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ถ้ำลอยจากถ่านหิน และถ้ำลอยจากถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ในขวดแต่ละใบ ปริมาณ 0.3 กรัม
3. นำขวดแต่ละชุดไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.4.1 เป็นเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.4.2

4. นำของผสมที่ได้ไปแยกตัวดูดซับออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงแยกโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงแยกที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำ filtrate ไปกรองผ่านกระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 1
5. นำสารละลายที่กรองได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscopy เพื่อหาค่าความเข้มข้นแวนฟาซีนหลังการดูดซับ (Final Concentration) แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าประสิทธิภาพการกำจัดแวนฟาซีน (% Removal)

$$\% \text{ Removal} = \frac{(\text{Initial concentration} - \text{Final concentration})}{\text{Initial concentration}} \times 100$$

### 3.4.4.4 ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแวนฟาซีน

1. เตรียมสารละลายแวนฟาซีนเข้มข้น 10 mg/l ปริมาตร 100 ml ปรับ pH ตามค่าเหมาะสมจากข้อ 3.4.4.3 จำนวน 3 ขวดต่อสารดูดซับแต่ละชนิดเพื่อทำการทดลองซ้ำ ตรวจสอบค่าการดูดกลืนคลื่นแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscopy เพื่อหาค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (Initial Concentration)
2. เติมสารดูดซับแต่ละชนิด ได้แก่ ถ้ำจากแกลบ ถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ซิลิกาจากถ้ำแกลบ ซิลิกาจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ถ้ำลอยจากถ่านหิน และถ้ำลอยจากถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ในขวดแต่ละใบ ปริมาณ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1 กรัม

3. นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.4.1 เป็นเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.4.2
4. นำของผสมที่ได้ไปแยกตัวดูดซับออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงแยกโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงแยกที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำ filtrate ไปกรองผ่านกระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 1
5. นำสารละลายที่กรองได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscopy เพื่อหาค่าความเข้มข้นแนฟธาลีนหลังการดูดซับ (Final Concentration) แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าประสิทธิภาพการกำจัดแนฟธาลีน (% Removal)

$$\% \text{ Removal} = \frac{(\text{Initial concentration} - \text{Final concentration}) \times 100}{\text{Initial concentration}}$$

#### 3.4.4.5 ศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับหรือชนิดไอโซเทอมของการดูดซับ

1. เตรียมสารละลายแนฟธาลีนเข้มข้น 10 mg/l ปริมาตร 100 ml ที่มีค่า pH ที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.4.3 3 ขวดต่อสารดูดซับแต่ละชนิดเพื่อทำการทดลองซ้ำ ตรวจสอบวัดค่าการดูดกลืนคลีนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscopy เพื่อหาค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (Initial Concentration)
2. เติมสารดูดซับแต่ละชนิด ได้แก่ ถ่านจากแกลบ ถ่านแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ซิลิกาจากถ่านแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ถ่านลอยจากถ่านหิน และถ่านลอยจากถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ในขวดแต่ละใบ ปริมาณ 0.01, 0.02, 0.04, 0.1, 0.2, 0.4 และ 1 กรัม
3. นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.4.1 เป็นเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.4.2
4. นำของผสมที่ได้ไปแยกตัวดูดซับออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงแยกโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงแยกที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำ filtrate ไปกรองผ่านกระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 1
5. นำสารละลายที่กรองได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscopy เพื่อหาค่าความเข้มข้นแนฟธาลีนหลังการดูดซับ (Final Concentration) แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าไอโซเทอมในการดูดซับ

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสารดูดซับ

##### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำแกลบ (% โดยน้ำหนัก)

องค์ประกอบ	% โดยน้ำหนัก
SiO <sub>2</sub>	82.72
K <sub>2</sub> O	3.69
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.12
CaO	1.24
MgO	0.62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.47
SO <sub>3</sub>	0.46
MnO <sub>2</sub>	0.39
Cl	0.24
Na <sub>2</sub> O	0.23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.19
TiO <sub>2</sub>	0.03
ZnO	0.02
LOI	7.81
Total	100.23

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำแกลบดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 พบว่า สารประกอบที่พบในถ้ำแกลบนั้นประกอบด้วย SiO<sub>2</sub> เป็นองค์ประกอบหลัก (82.72%) และมี



Loss on ignition เท่ากับ 7.81% ซึ่งคาดว่าเป็นคาร์บอนที่ยังคงเหลืออยู่ในถ้ำแกลบ ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Chandrasekhar, 2006)

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาจากถ้ำแกลบ (% โดยน้ำหนัก)

องค์ประกอบ	% โดยน้ำหนัก
SiO <sub>2</sub>	92.71
SO <sub>3</sub>	3.62
Na <sub>2</sub> O	2.98
K <sub>2</sub> O	0.27
ZnO	0.14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.11
Cl	0.08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02
Total	100.01

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาที่ได้จากถ้ำแกลบดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 พบว่าสารประกอบที่พบในซิลิกาที่ได้จากถ้ำแกลบนั้นประกอบด้วย SiO<sub>2</sub> เป็นองค์ประกอบหลัก (92.71%) SO<sub>3</sub> 3.62% และ Na<sub>2</sub>O 2.98% ทั้งนี้การที่มีปริมาณ Na<sub>2</sub>O สูงนั้น เนื่องจากในกระบวนการเตรียมซิลิกาจากถ้ำแกลบมีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้โซเดียมไอออน (Na<sup>+</sup>) เข้าไปประกอบอยู่ในโครงสร้างของซิลิกอนออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO<sub>4</sub>) ส่วน SO<sub>3</sub> คาดว่ามาจากกรดซัลฟูริกที่ใช้ในกระบวนการเตรียมซิลิกาจากถ้ำแกลบเช่นกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหิน (% โดยน้ำหนัก)

องค์ประกอบ	% โดยน้ำหนัก
SiO <sub>2</sub>	31.33
CaO	22.09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.75
SO <sub>3</sub>	6.17
Na <sub>2</sub> O	3.11
K <sub>2</sub> O	2.98
MgO	2.79
TiO <sub>2</sub>	0.49
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.35
MnO <sub>2</sub>	0.19
SrO	0.03
ZnO	0.02
CuO	0.02
Total	99.67

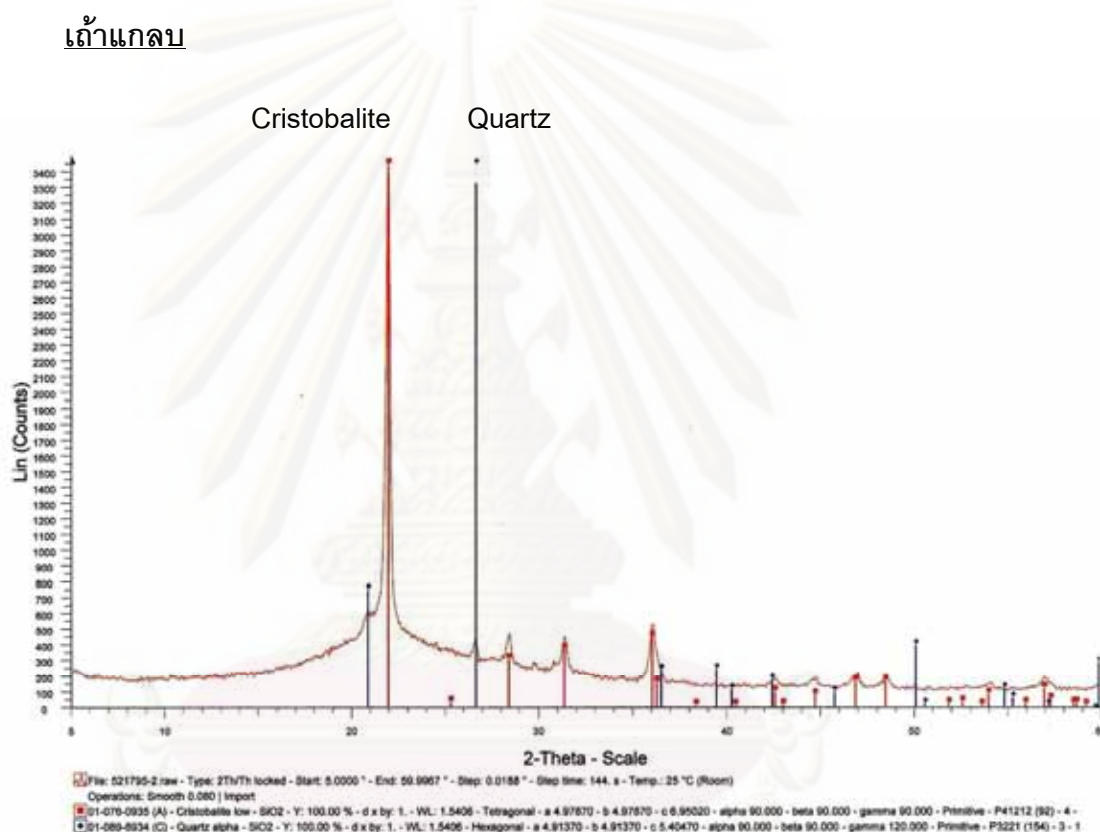
จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหินดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 พบว่า สารประกอบที่พบในถ้ำลอยถ่านหินมีองค์ประกอบหลักดังนี้คือ SiO<sub>2</sub> 31.33%, CaO 22.09%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15.35%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 14.75% ที่เหลือเป็นออกไซด์ของแร่ชนิดต่างๆ ที่ผสมอยู่ในถ่านหิน เช่น SO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, MgO เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของสารดูดซับโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD)

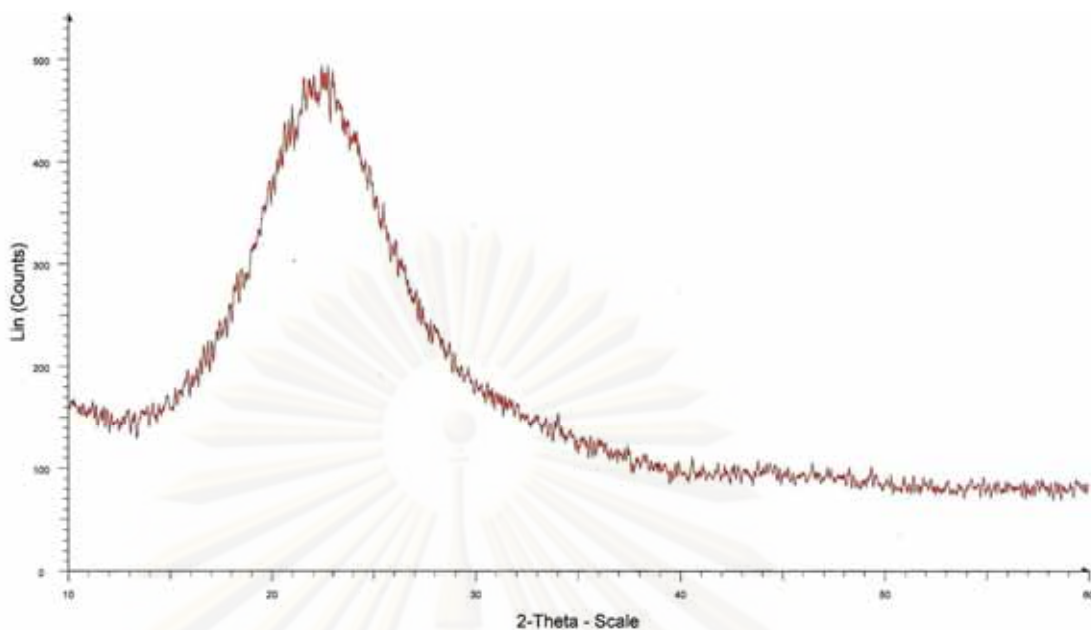
จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเถ้าแกลบด้วยเทคนิค X-ray diffraction พบว่าสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบหลักของเถ้าแกลบประกอบไปด้วยซิลิกอนไดออกไซด์อยู่ในรูปของ Cristobalite Alpha และ Quartz Alpha ส่วนที่เหลือจะเป็นโครงสร้างที่ยังไม่เป็นผลึก (amorphous) ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟร็กชันของเถ้าแกลบ

#### ซิลิกาจากเถ้าแกลบ

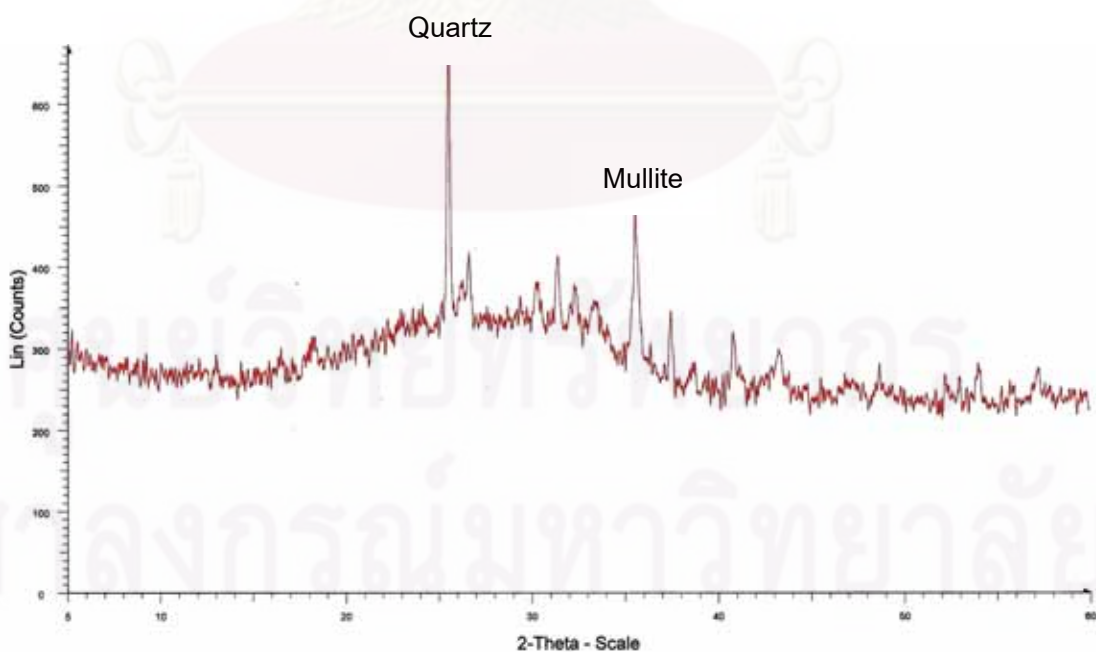
จากการวิเคราะห์ภูมิภาคของซิลิกาจากเถ้าแกลบด้วยเทคนิค X-ray diffraction พบว่าเป็นซิลิกาชนิด ออสตรูเนียนหรือโครงสร้างขาดลักษณะทางผลึก ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งซิลิกาออสตรูเนียนมีลักษณะเฉพาะคืออนุภาคพื้นฐานมีขนาดเล็ก พื้นผิวจำเพาะสูง



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของซิลิกาจากเถ้าแกลบ

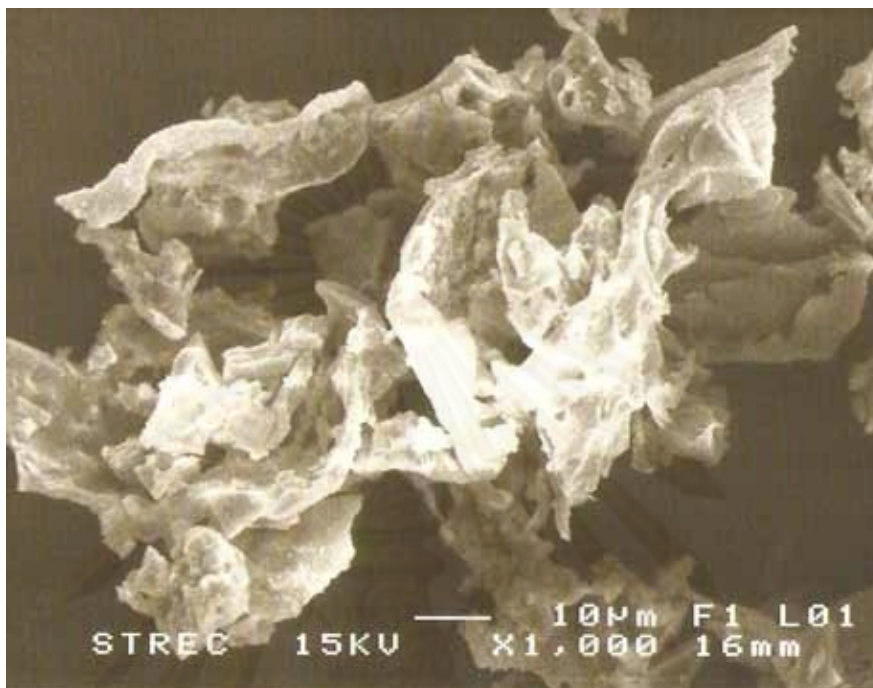
#### เถ้าลอยถ่านหิน

จากการวิเคราะห์โครงสร้างของเถ้าลอยถ่านหินด้วยเทคนิค X-ray diffraction พบว่า สารประกอบที่เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญของเถ้าลอยถ่านหินประกอบไปด้วย Quartz และ Mullite ส่วนที่เหลือจะเป็นโครงสร้างที่ยังไม่เป็นผลึก (amorphous) ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของเถ้าลอยถ่านหิน

#### 4.1.3 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างพื้นผิวของสารดูดซับ โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)

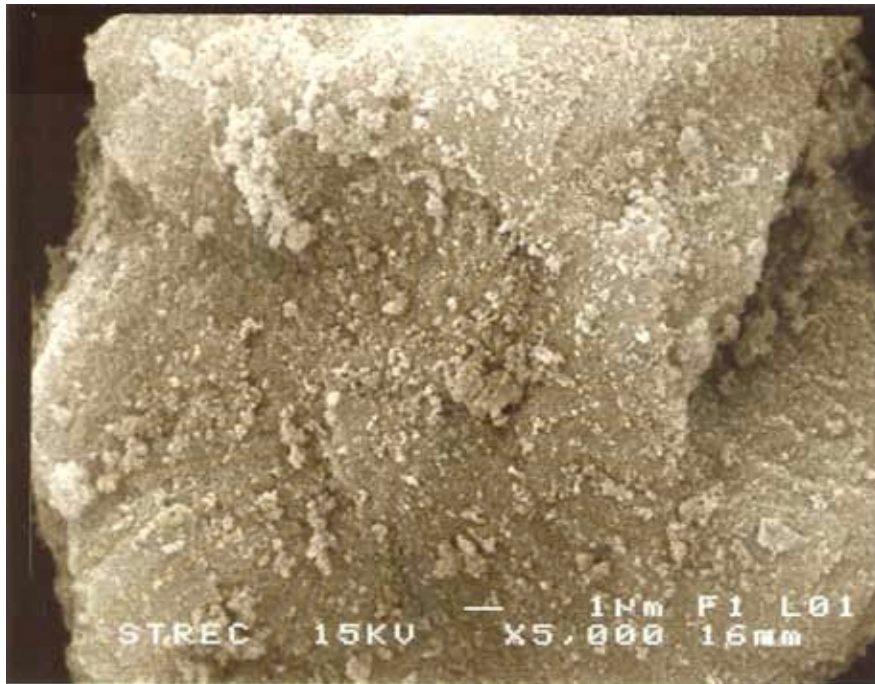


รูปที่ 4.4 ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของถ่านแกลบที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

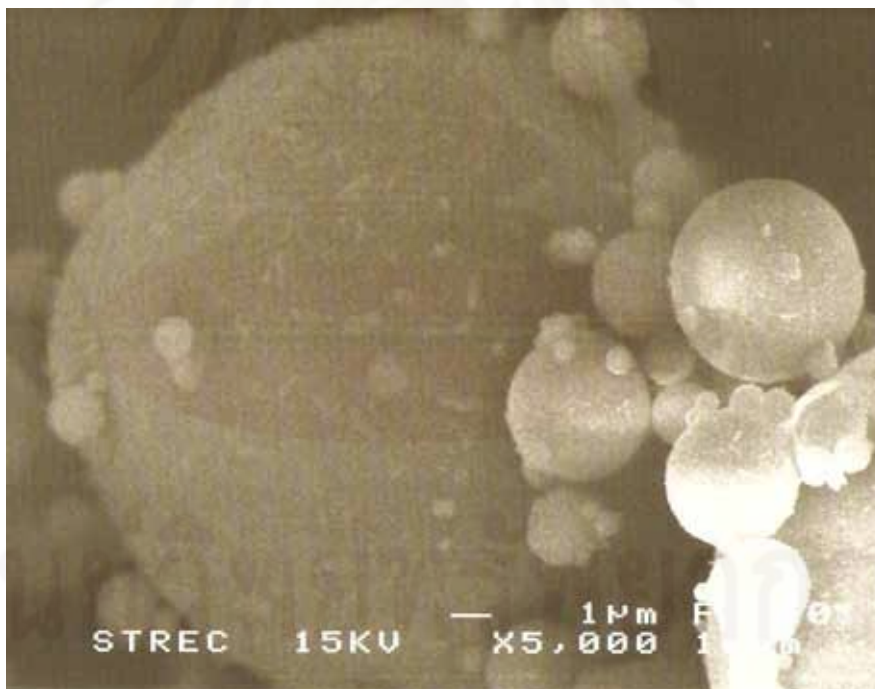
จากผลการศึกษาลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของถ่านแกลบด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy พบว่าจากภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ถ่านแกลบมีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกันออกไป ไม่นั่นอน พื้นผิวมีลักษณะไม่ราบเรียบ ขรุขระ ดังแสดงในรูปที่ 4.4

ผลการศึกษาลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของซีลิกาจากถ่านแกลบด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy พบว่าจากภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ลักษณะพื้นผิวของซีลิกาที่ได้จากถ่านแกลบมีลักษณะไม่ราบเรียบและมีความขรุขระ ดังแสดงในรูปที่ 4.5

ผลการศึกษาลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของถ่านลอยถ่านหิน และถ่านลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy พบว่าจากภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ลักษณะรูปร่างของถ่านลอยถ่านหินมีลักษณะค่อนข้างกลม พื้นผิวราบเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของชิลิกาจากถ้ำเกลบที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 4.6 ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของถ้ำลอยถ่านหินที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

#### 4.1.4 การเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของสารดูดซับ ก่อนและหลังการปรับสภาพ พื้นผิวด้วยสารแอมฟิฟิลิกชนิดประจุบวก

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์การหาพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

สารดูดซับ	พื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม)
เถ้าแกลบ	12.29
เถ้าแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว	10.25
<b>ซีลิกาจากเถ้าแกลบ</b>	<b>190.80</b>
ซีลิกาจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว	106.30
เถ้าลอยถ่านหิน	2.12
เถ้าลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว	5.39

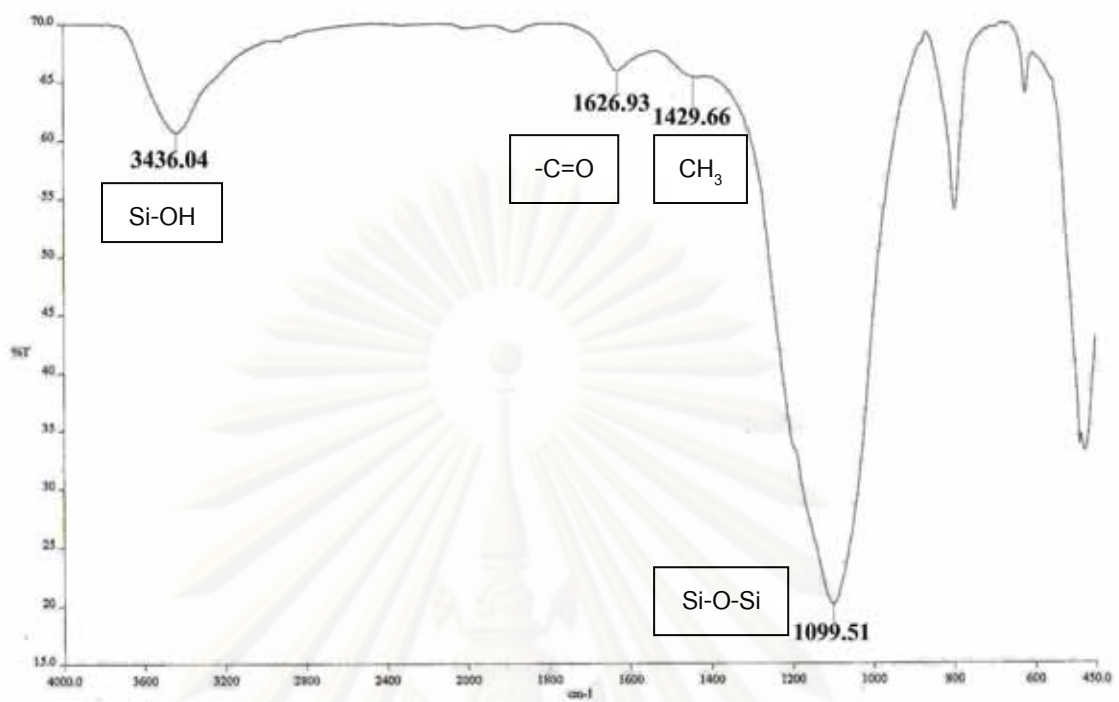
จากผลการวิเคราะห์การหาพื้นที่ผิวของสารดูดซับด้วยเครื่อง Specific Surface Area Analysis (BET) ดังตารางที่ 4.4 พบว่าเถ้าแกลบมีพื้นที่ผิว 12.29 ตารางเมตร/กรัม ซีลิกาจากเถ้าแกลบมีพื้นที่ผิว 190.80 ตารางเมตร/กรัม จึงจัดอยู่ในกลุ่มของซีลิกาอสัณฐานเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงกว่า 3 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนซีลิกาจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวมีพื้นที่ผิว 106.30 ตารางเมตร/กรัม ซึ่งลดต่ำลง เนื่องจากสารปรับสภาพผิวที่ใช้ในการปรับสภาพพื้นผิวเข้าไปอยู่ในรูพรุนของซีลิกา ทำให้พื้นที่ผิวอิสระของซีลิกาตกลง (ปิยมภรณ์ จารุงศ์, 2545) ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าพื้นผิวของซีลิกามีการเปลี่ยนแปลงไป ส่วนเถ้าลอยถ่านหินมีพื้นที่ผิว 2.12 ตารางเมตร/กรัม แต่หลังจากการปรับสภาพพื้นผิวจะมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น 5.39 ตารางเมตร/กรัม ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวของเถ้าลอยถ่านหินซึ่งไม่มีความเป็นรูพรุนเมื่อถูกเคลือบด้วยฟิล์มของสารปรับสภาพผิว ทำให้เถ้าลอยถ่านหินมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น

#### 4.1.5 การวิเคราะห์ลักษณะหมู่ฟังก์ชันเฉพาะของสารดูดซับ และสารดูดซับที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR)

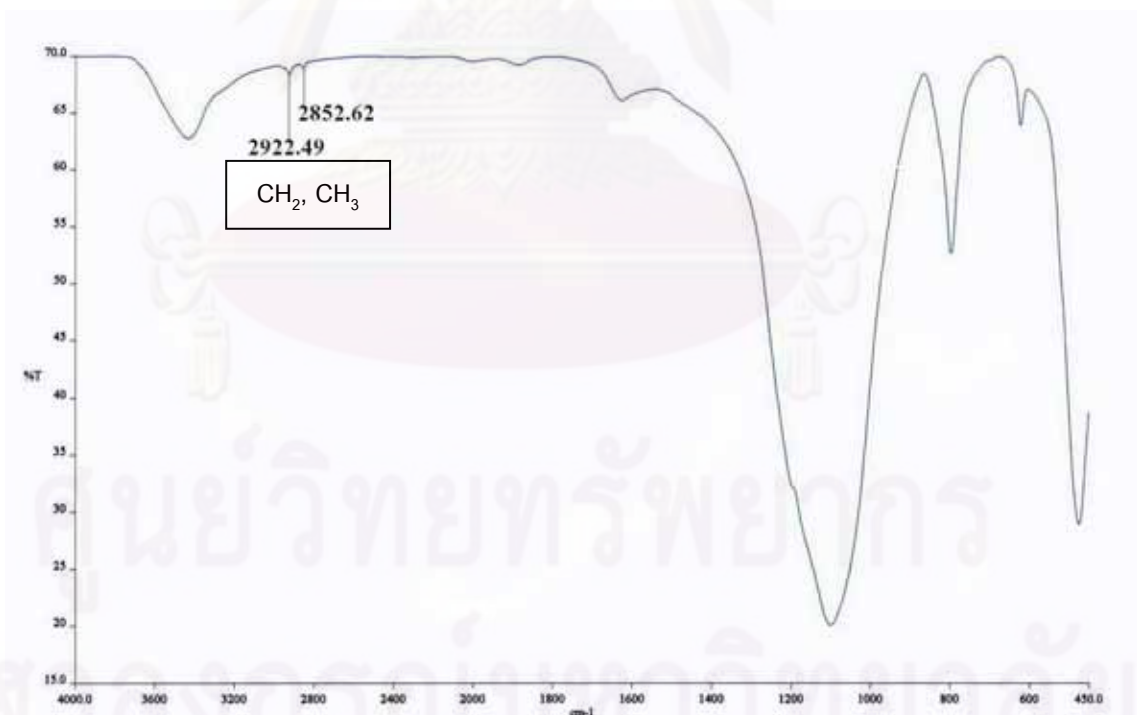
จากผลการวิเคราะห์ด้วย FT-IR ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพในการหาหมู่ฟังก์ชันเพื่อบ่งบอกลักษณะสเปกตรัมเฉพาะของสาร ผลที่ได้พบว่าสเปกตรัมที่แสดงลักษณะเฉพาะของแก้วเคลือบจะปรากฏที่ความยาวคลื่น  $3436\text{ cm}^{-1}$  และ  $1100\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของหมู่ซิลินอล (Si-OH) และหมู่ไฮดรอกเซน (Si-O-Si) นอกจากนี้ยังพบลักษณะเฉพาะที่ความยาวคลื่น  $1430\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงลักษณะเฉพาะของหมู่เมทิลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ( $\text{CH}_3$ ) ซึ่งน่าจะมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของคาร์บอนหลังจากการเผาเคลือบเพื่อนำพลังงานไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า ส่วนสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น  $1627\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงหมู่คาร์บอนิล ( $\text{-C=O}$ ) ขณะที่แก้วเคลือบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวนั้นจะพบสเปกตรัมที่เพิ่มขึ้นมาที่  $2922.49$  และ  $2852.62\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงลักษณะเฉพาะของหมู่ไฮโดรคาร์บอน ( $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}_3$ ) ซึ่งเป็นลักษณะองค์ประกอบของสารปรับสภาพผิวชนิด CTAB [ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{Br}$ ] ที่เคลือบอยู่บนผิวแก้วเคลือบดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเฉพาะเพื่อบ่งบอกลักษณะสเปกตรัมเฉพาะของซิลิกาจากแก้วเคลือบ และซิลิกาจากแก้วเคลือบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ผลที่ได้พบว่าสเปกตรัมที่แสดงลักษณะเฉพาะของซิลิกาที่ความยาวคลื่น  $3430\text{ cm}^{-1}$  และ  $1100\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของหมู่ซิลินอล (Si-OH) และหมู่ไฮดรอกเซน (Si-O-Si) นอกจากนี้ยังพบสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น  $1631\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงหมู่ฟังก์ชัน  $\text{-C=O}$  และ สเปกตรัมที่ความยาวคลื่น  $803$ ,  $471\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงหมู่ฟังก์ชัน Si-H การที่พื้นผิวของซิลิกาส่วนใหญ่มีลักษณะเฉพาะของหมู่ซิลินอล (Si-OH) ที่มีลักษณะชอบน้ำ (hydrophilic) ทำให้ลักษณะพื้นผิวของซิลิกาแสดงลักษณะชอบน้ำซึ่งทำให้ไม่สามารถดูดซับสารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนได้ ส่วนสเปกตรัมที่แสดงลักษณะเฉพาะของซิลิกาจากแก้วเคลือบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว จะพบสเปกตรัมที่เพิ่มขึ้นมาที่  $2925$  และ  $2854\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงลักษณะเฉพาะของหมู่ไฮโดรคาร์บอน ( $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}_3$ ) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสารปรับสภาพผิวชนิด CTAB [ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{Br}$ ] ที่เคลือบอยู่บนผิวซิลิกา สเปกตรัมที่ความยาวคลื่น  $1470\text{ cm}^{-1}$  แสดงให้เห็นถึงหมู่เมทิล ( $\text{CH}_3$ ) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ที่อยู่ติดกับ  $\text{>N}^+<$  ของสารปรับสภาพผิวชนิด CTAB ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ รูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าพื้นผิวของซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวแล้วถูกเคลือบด้วยฟิล์มของสารปรับสภาพผิว กล่าวคือเพิ่มความเป็นไฮโดรโฟบิกของสารดูดซับ

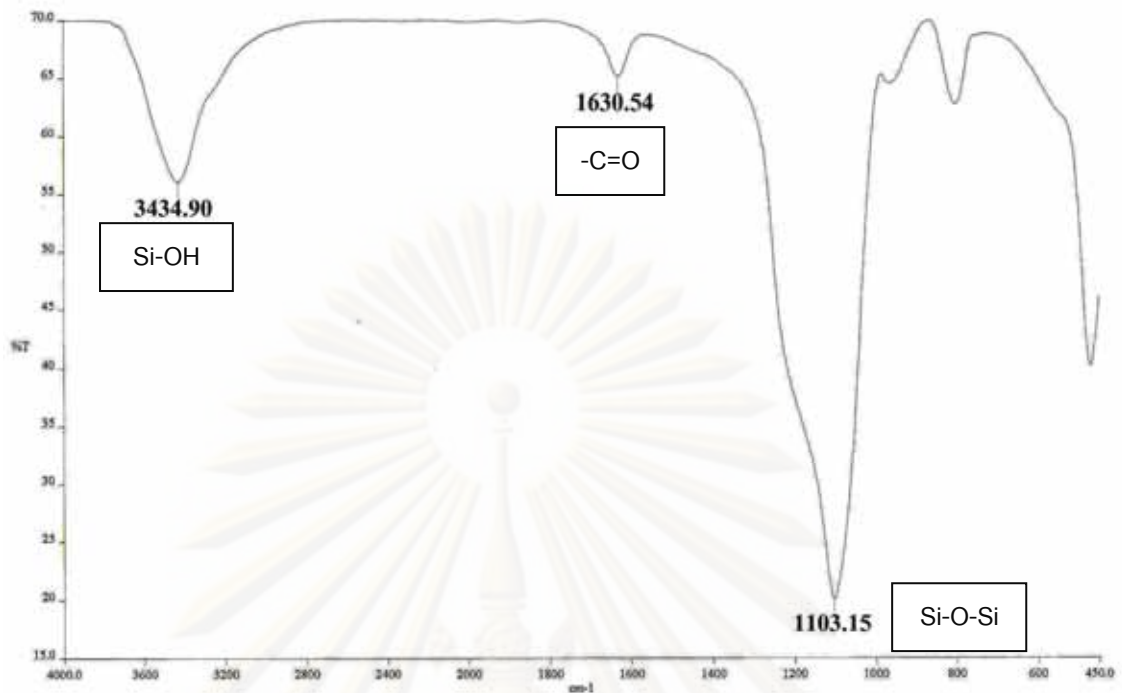




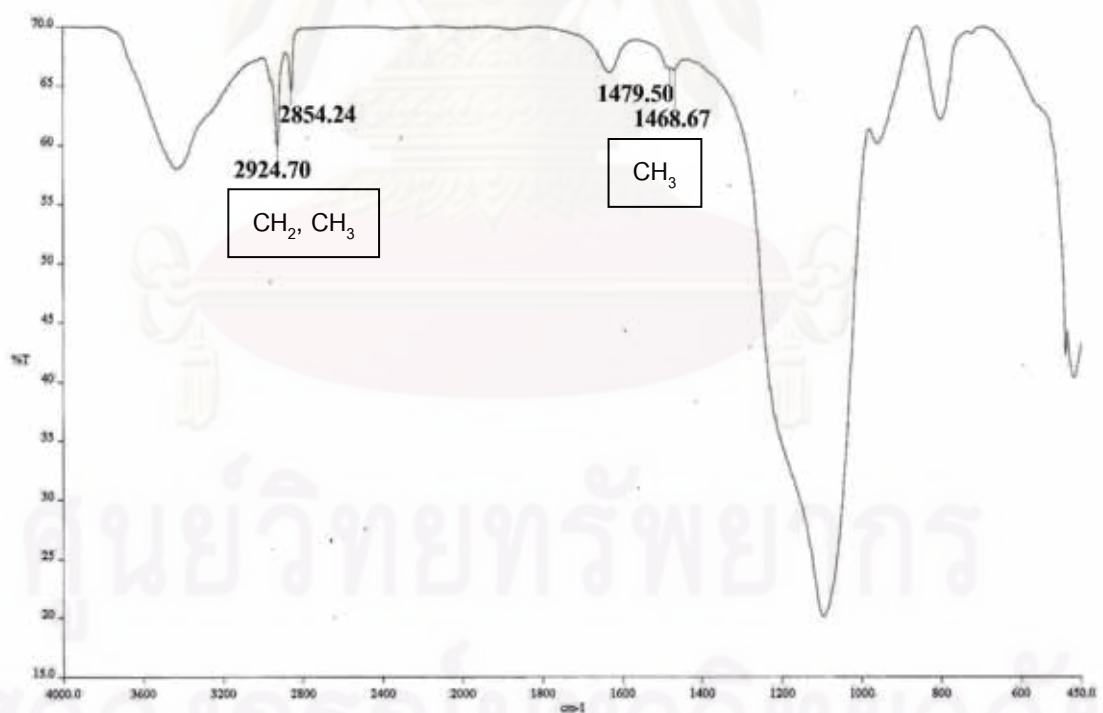
รูปที่ 4.7 สเปกตรัม FTIR ของแก้วเคลือบ



รูปที่ 4.8 สเปกตรัม FTIR ของแก้วเคลือบที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย CTAB



รูปที่ 4.9 สเปกตรัม FTIR ของซิลิกาเถ้าแกลบ

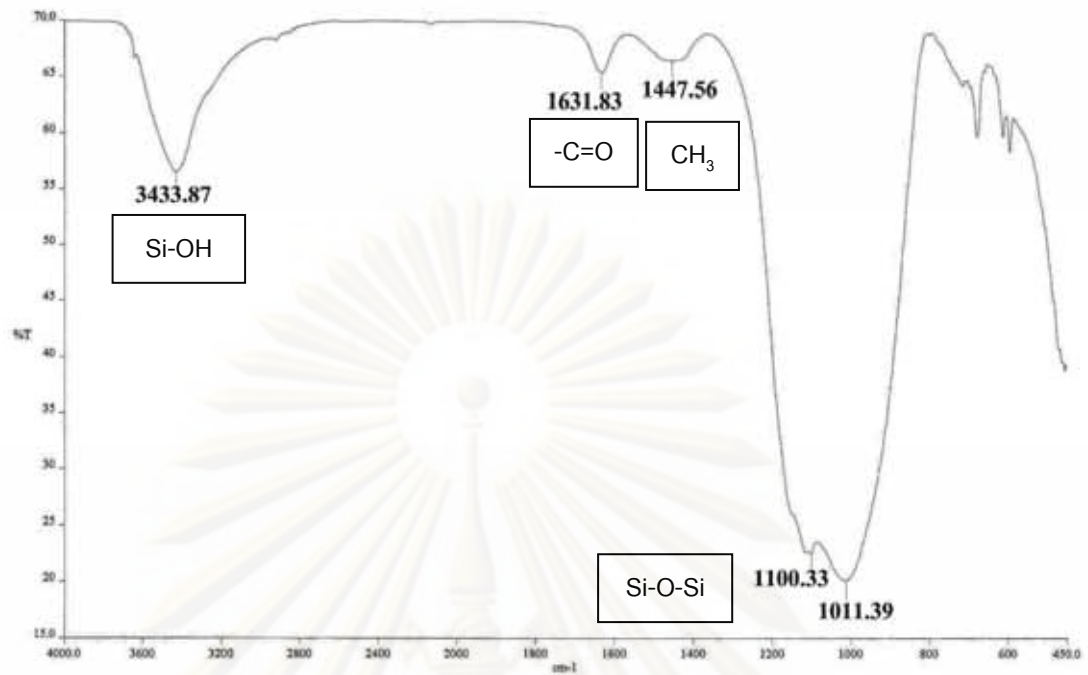


รูปที่ 4.10 สเปกตรัม FTIR ของซิลิกาจากเถ้าแกลบที่ปรับสภาพผิวด้วย CTAB

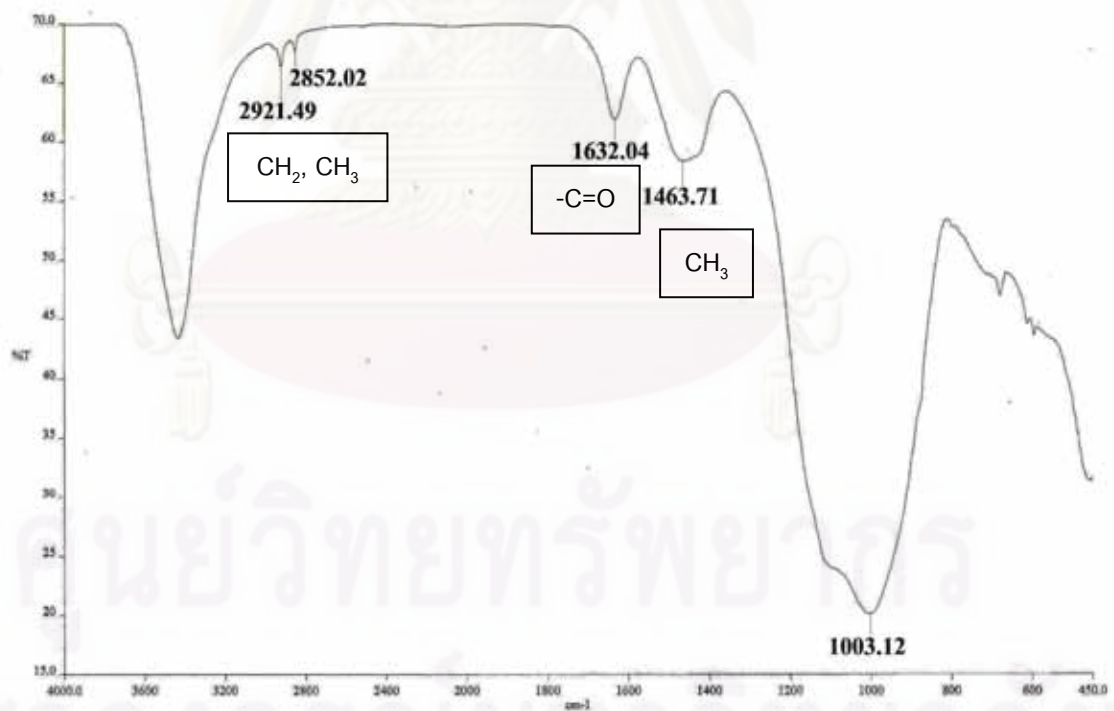
จากผลการวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมเฉพาะของแก้วลอยถ่านหินและแก้วลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพผิว เพื่อเป็นการบ่งบอกการเคลือบของฟิล์มของสารปรับสภาพผิวบนผิวของแก้วลอยถ่านหิน ผลที่ได้พบว่าสเปกตรัมที่แสดงลักษณะเฉพาะของแก้วลอยถ่านหิน จะพบลักษณะเฉพาะที่ความยาวคลื่น  $3434\text{ cm}^{-1}$  และ  $1100\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของหมู่ซิลินอล (Si-OH) และหมู่ไฮดรอกเซน (Si-O-Si) นอกจากนี้ยังพบลักษณะเฉพาะที่ความยาวคลื่น  $1448\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงลักษณะเฉพาะของหมู่เมทิล ( $\text{CH}_3$ ) และสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น  $1632\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงหมู่คาร์บอนิล ( $\text{-C=O}$ ) ส่วนสเปกตรัมที่แสดงลักษณะเฉพาะของแก้วลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว จะพบสเปกตรัมเพิ่มขึ้นมาที่  $2852.02$  และ  $2921.49\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงลักษณะเฉพาะของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ( $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}_3$ ) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสารปรับสภาพผิวชนิด CTAB [ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{Br}$ ] ที่เคลือบอยู่บนผิวของแก้วลอยถ่านหิน นอกจากนั้นยังพบว่ามีการเพิ่มขึ้นของสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น  $1430\text{ - }1470\text{ cm}^{-1}$  และมีการลดลงของสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น  $1100\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าพื้นผิวของแก้วลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ถูกเคลือบด้วยฟิล์มของสารปรับสภาพผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ รูปที่ 4.12

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 สเปกตรัม FTIR ของเถ้าลอยถ่านหิน



รูปที่ 4.12 สเปกตรัม FTIR ของเถ้าลอยถ่านหินที่ปรับสภาพผิวด้วย CTAB

#### 4.1.6 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนของสารดูดซับ และสารดูดซับที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว โดยใช้เครื่อง CHN Elemental Analyzer

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนของสารดูดซับแต่ละชนิด

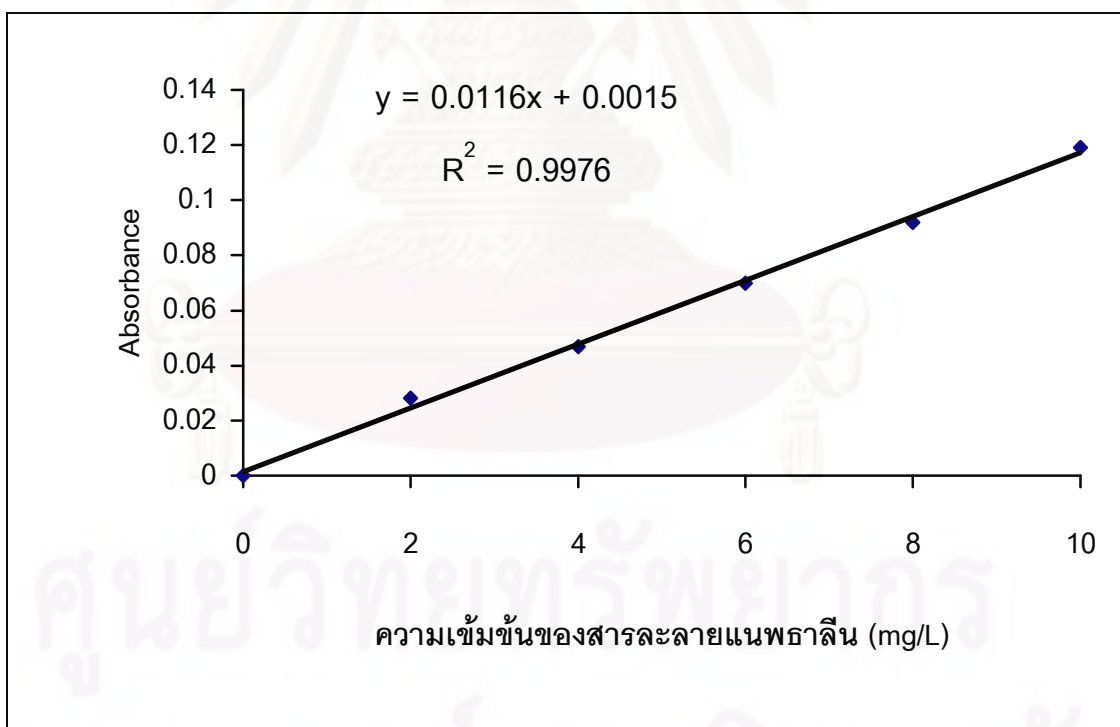
สารดูดซับ	C (%)	พื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม)
ถ้ำแกลบ	4.24	12.29
ถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว	4.68	10.25
ซีลิกาจากถ้ำแกลบ	0.00	190.80
ซีลิกาจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว	9.41	106.30
ถ้ำลอยถ่านหิน	0.06	2.12
ถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว	0.59	5.39

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนบนสารดูดซับแต่ละชนิดก่อนและหลังการปรับสภาพผิวด้วยสาร CTAB พบว่า กรณีถ้ำแกลบและถ้ำลอยถ่านหินมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบตั้งแต่ต้น ซึ่งคาดว่ามาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเมื่อนำไปปรับสภาพผิวด้วยสาร CTAB ปริมาณคาร์บอนเพิ่มเพียงเล็กน้อย จึงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ขณะที่ซีลิกาจากถ้ำแกลบตั้งต้นไม่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ แต่ปริมาณคาร์บอนกลับสูงมากหลังการปรับสภาพผิวด้วย CTAB ทั้งนี้เนื่องจากซีลิกาจากถ้ำแกลบมีพื้นที่ผิวมากกว่าถ้ำแกลบและถ้ำลอยถ่านหิน

#### 4.2 กราฟมาตรฐาน (Calibration Curve) สำหรับการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Visible ของสารละลายแอฟธาไลน์

ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแอฟธาไลน์กับค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ความยาวคลื่น 290 nm

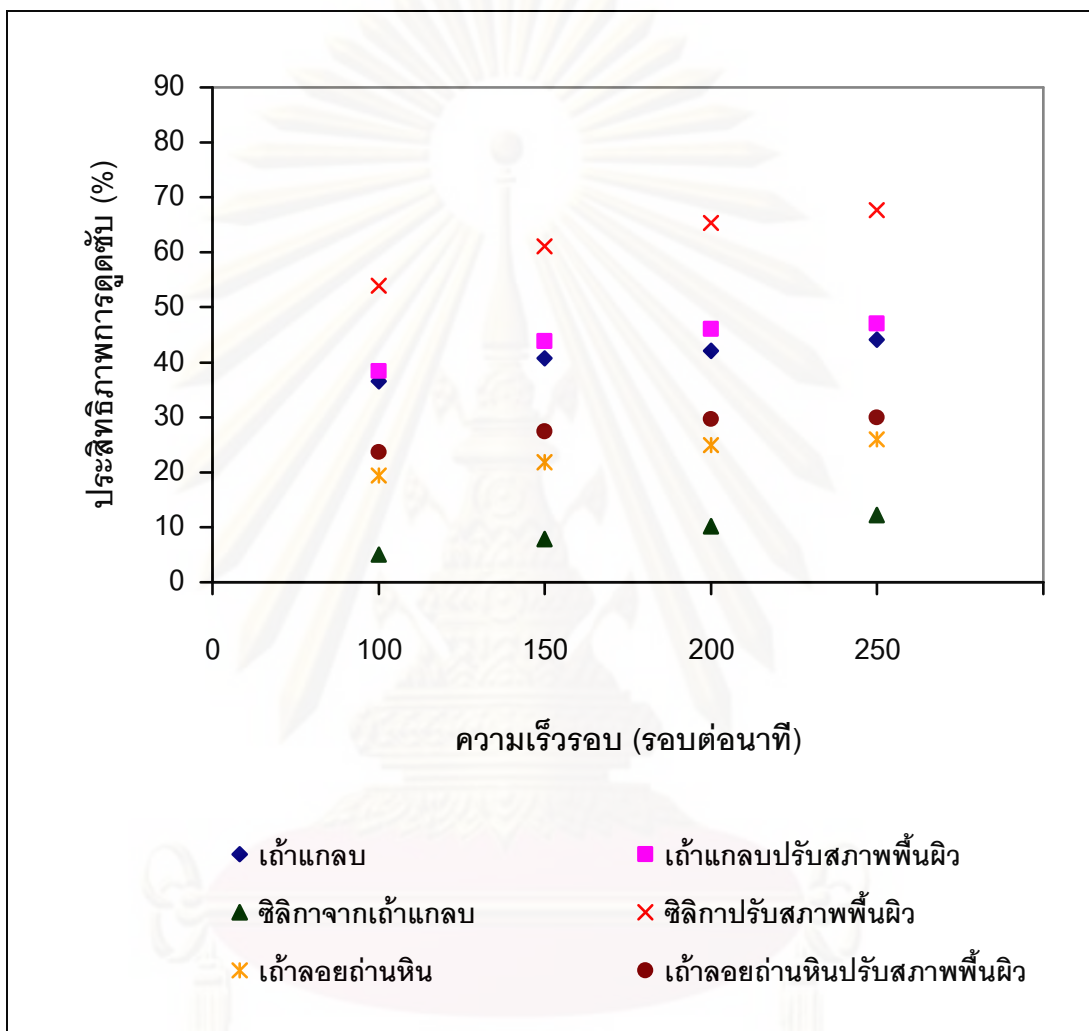
ความเข้มข้นของสารละลายแอฟธาไลน์ (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
0	0.000
2	0.028
4	0.047
6	0.070
8	0.092
10	0.119



รูปที่ 4.13 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแอฟธาไลน์กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 290 nm.

#### 4.3 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับแนฟธาลินด้วยสารดูดซับแต่ละชนิด

##### 4.3.1 อิทธิพลของระดับความเร็วรอบการเขย่าของผสม (Shaking Rate)



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาลินด้วยสารดูดซับแต่ละชนิดก่อนและหลังปรับปรุงสภาพผิวด้วยสาร CTAB

จากการผสมสารดูดซับแต่ละชนิดปริมาณ 0.3 กรัมลงในสารละลายแนฟธาลินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 100, 150, 200 และ 250 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 60 นาที ปรากฏประสิทธิภาพการดูดซับดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบการเขย่าเพิ่มขึ้น โดยที่ประสิทธิภาพการดูดซับ (กรณีไม่ปรับปรุงสภาพผิว) ของถ่านกัมมันต์ > ถ่านลอยถ่านหิน > ซิลิกาจากถ่าน

แกลบ แต่หลังการปรับสภาพผิวด้วยสาร CTAB ประสิทธิภาพการดูดซับของเถ้าแกลบและเถ้าลอย ถ่านหินเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ขณะที่ประสิทธิภาพการดูดซับของซีลิกาที่ผ่านการปรับสภาพผิว ด้วยสาร CTAB เพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดจากประมาณ 5-10% เป็น 50-70% ทั้งนี้เนื่องจากซีลิกาจาก เถ้าแกลบมีพื้นที่ผิวสูงกว่าเถ้าแกลบและเถ้าลอยถ่านหินมาก แต่เนื่องจากซีลิกามีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) ไม่สามารถดูดซับแนฟธาซีนได้ การปรับสภาพผิวให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำด้วยสาร CTAB ซึ่งเป็นสารแอมฟิฟิลิคชนิดประจุบวกจึงเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาซีนได้อย่าง เด่นชัด

#### ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการดูดซับแนฟธาซีนที่ระดับความเร็วรอบต่างๆ กัน

ประเภท สารดูดซับ	ความเร็ว รอบ	ปริมาณแนฟธาซีนหลังการดูดซับ (mg/l)				ประสิทธิภาพการ ดูดซับ (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
เถ้าแกลบ	100	6.42	6.34	6.25	6.34	36.6
	150	5.99	5.73	6.08	5.93	40.7
	200	5.82	5.91	5.65	5.79	42.1
	250	5.47	5.56	5.73	5.59	44.1
เถ้าแกลบที่ผ่านการปรับสภาพ พื้นที่ผิว	100	6.25	6.16	6.08	6.16	38.4
	150	5.73	5.65	5.47	5.62	43.8
	200	5.39	5.47	5.30	5.39	46.1
	250	5.30	5.22	5.39	5.30	47.0
ซีลิกาจากเถ้า แกลบ	100	9.53	9.61	9.35	9.50	5.0
	150	9.18	9.27	9.18	9.21	7.9
	200	8.84	9.01	9.10	8.98	10.2
	250	8.75	8.66	8.92	8.78	12.2
ซีลิกาที่ผ่านการปรับสภาพ พื้นที่ผิว	100	4.61	4.53	4.70	4.61	53.9
	150	4.01	3.75	3.92	3.89	61.1
	200	3.32	3.58	3.49	3.46	65.4
	250	3.41	3.23	3.06	3.23	67.7



ตารางที่ 4.7 (ต่อ) ประสิทธิภาพในการดูดซับแนฟธาลินที่ระดับความเร็วรอบต่างๆ กัน

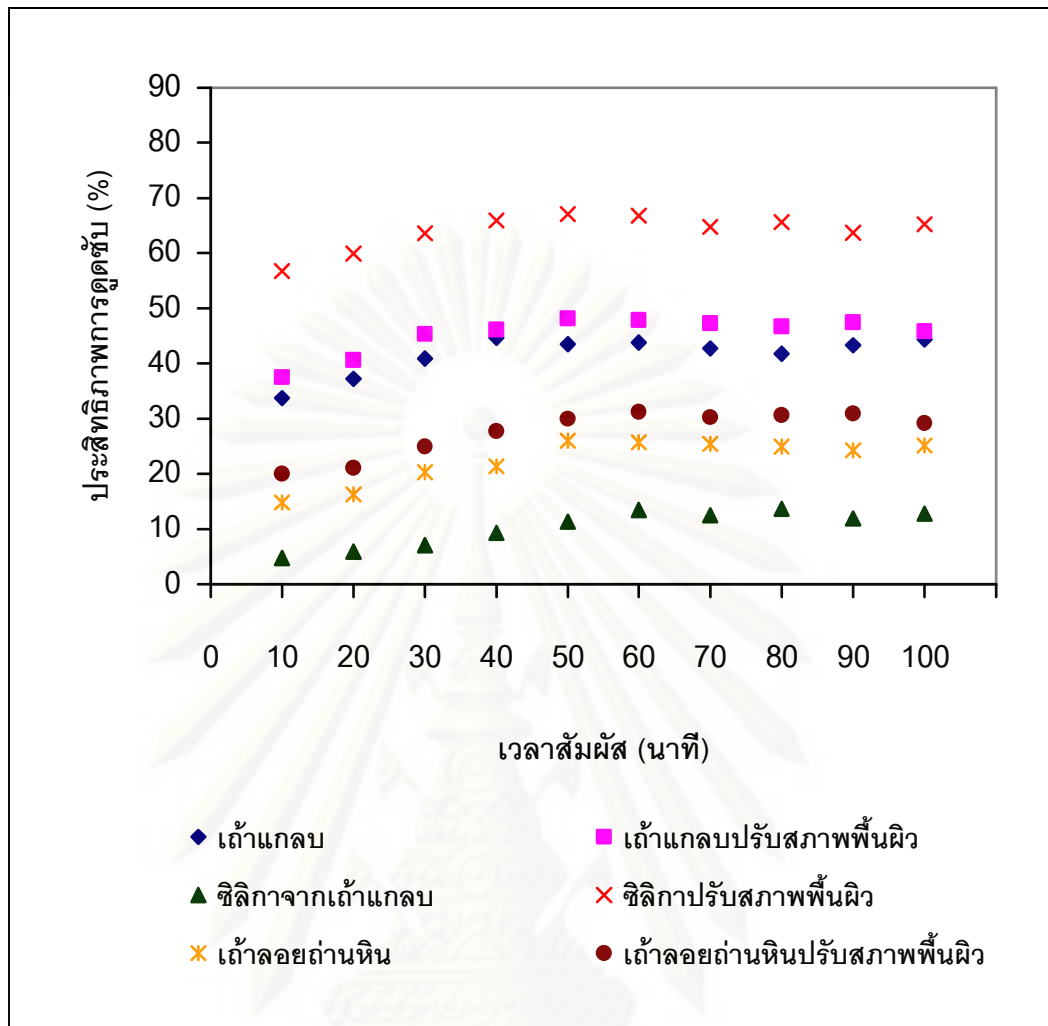
ประเภทสารดูดซับ	ความเร็วรอบ	ปริมาณแนฟธาลินหลังการดูดซับ (mg/l)				ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
ถ้ำลอยถ่านหิน	100	7.97	8.15	8.06	8.06	19.4
	150	7.80	7.86	7.80	7.80	21.8
	200	7.54	7.37	7.63	7.51	24.9
	250	7.46	7.54	7.20	7.40	26.0
ถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว	100	7.54	7.72	7.63	7.63	23.7
	150	7.29	7.20	7.29	7.26	27.4
	200	7.11	7.03	6.94	7.03	29.7
	250	7.20	6.94	6.85	7.00	30.0

#### 4.3.2 อิทธิพลของช่วงเวลาสัมผัส (Shaking time) ที่มีต่อการดูดซับ

จากการผสมสารดูดซับแต่ละชนิดปริมาณ 0.3 กรัมในสารละลายแนฟธาลินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 นาที ตามลำดับ ปรากฏผลดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของสารดูดซับทุกตัวเริ่มคงที่หลังจากเขย่าเป็นเวลา 60 นาที จึงเลือกเวลาการเขย่าหรือช่วงเวลาการสัมผัสระหว่างสารดูดซับกับแนฟธาลินที่ 60 นาที เป็นสถานะที่เหมาะสมสำหรับระบบการดูดซับในการศึกษานี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

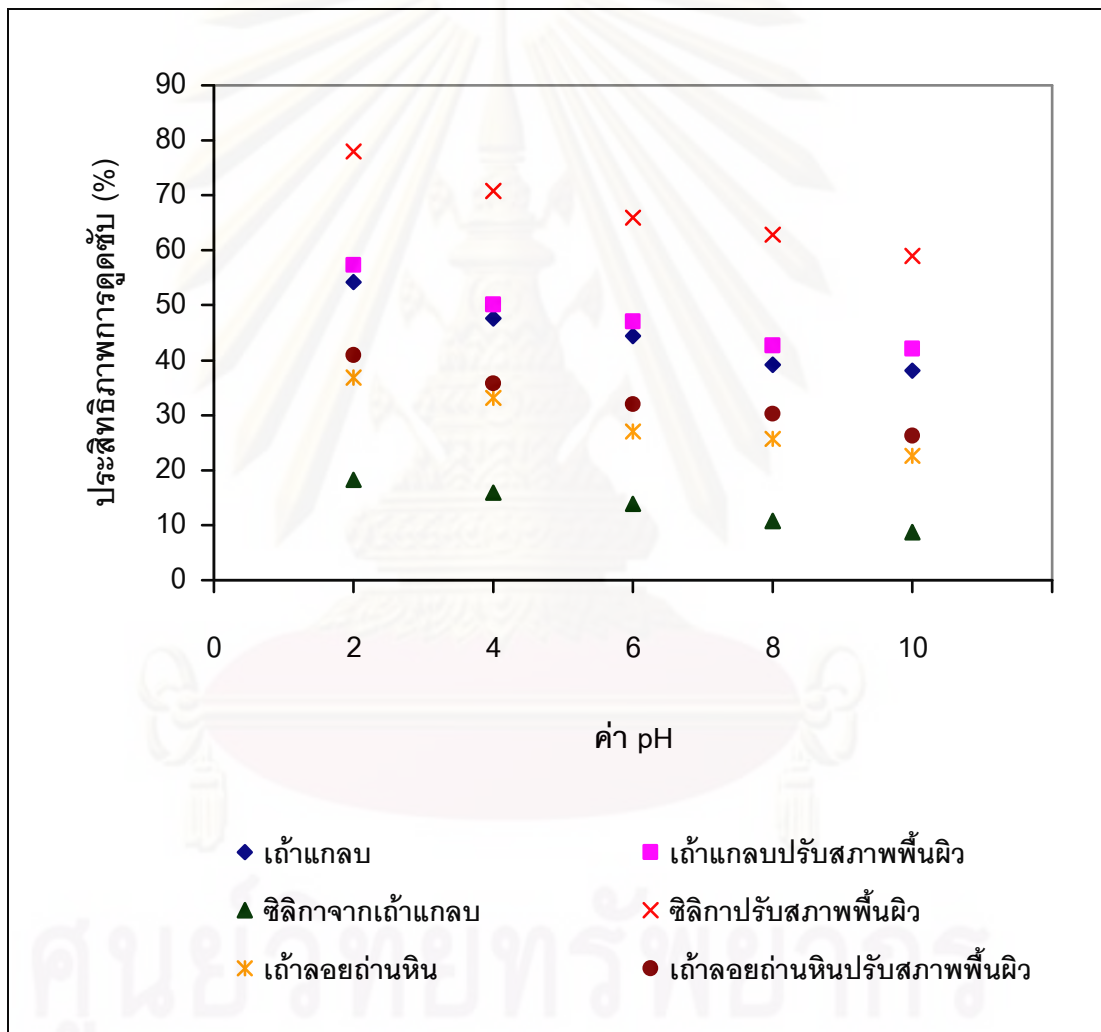


รูปที่ 4.15 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดแวนฟลาซีนที่ช่วงเวลาสัมผัสต่างๆ

#### 4.3.3 อิทธิพลของค่า pH ที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

การศึกษาค่าอิทธิพลของค่า pH ที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับแวนฟลาซีน ด้วยเถ้าแกลบ เถ้าแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ซิลิกาจากเถ้าแกลบ ซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว เถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ปริมาณ 0.3 กรัม ในสารละลายแวนฟลาซีนความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ณ pH 2, 4, 6, 8 และ 10 ตามลำดับ ทำการเขย่าด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที ปรากฏผลดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.16 ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับแวนฟลาซีนด้วยสารดูดซับทั้ง 6 ชนิด มีแนวโน้มลดลงตามลำดับเมื่อ pH มีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารดูดซับที่ใช้ทุกตัวเป็นสารกลุ่มซิลิกา และ/หรืออะลูมิโนซิลิเกต จึงมีสภาพผิวค่อนข้างไปทางลบ ณ สภาวะปกติ จึงดูดซับแวนฟลาซีนซึ่งเป็นไฮโดรโฟบิกได้ไม่ดีและทำให้ดูดซับได้ดีขึ้นที่ pH ต่ำๆเนื่องจากมี  $H^+$  ช่วยลดสภาพผิวที่เป็นลบ

นอกจากนี้ยังพบว่าสารดูดซับที่ปรับสภาพผิวด้วย CTAB มีแนวโน้มดูดซับได้ดีกว่ากรณีไม่ปรับสภาพผิวที่ทุกค่า pH ทั้งนี้เนื่องจากสาร CTAB มีปลายหัวเป็น Tertiary Amine จึงแสดงสมบัติเป็น Amphoteric คือเป็นบวกที่ pH ต่ำและเป็นลบที่ pH สูง ดังนั้นที่ pH ต่ำๆ จึงยึดติดสารดูดซับที่เป็นลบได้ดีขึ้น สภาพไฮโดรโฟบิกจึงเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับจึงสูงขึ้น ณ pH ต่ำๆ ขณะที่ pH สูงๆสารปรับสภาพผิว CTAB มีประจุลบ จึงเคลือบผิวสารดูดซับได้ไม่ดี ประสิทธิภาพการดูดซับแอนพธาลินจึงลดลง ดังนั้นจึงเลือก pH 2 เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับระบบดูดซับในการศึกษา



รูปที่ 4.16 แสดงประสิทธิภาพในการดูดซับแอนพธาลินที่ค่า pH ต่างๆ กัน

ตารางที่ 4.8 แสดงประสิทธิภาพในการดูดซับแอฟธาไลน์ที่ค่า pH ต่างๆ กัน

ประเภทสารดูดซับ	ค่าพีเอช	ปริมาณแอฟธาไลน์หลังการดูดซับ (mg/l)				ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
ถ้ำแกลบ	2	4.44	4.61	4.70	4.58	54.2
	4	5.13	5.30	5.30	5.24	47.6
	6	5.65	5.56	5.47	5.65	44.4
	8	5.91	6.08	6.25	6.08	39.2
	10	6.08	6.16	6.34	6.19	38.1
ถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว	2	4.35	4.18	4.27	4.27	57.3
	4	4.96	5.04	4.96	4.99	50.1
	6	5.30	5.22	5.39	5.30	47.0
	8	5.82	5.73	5.65	5.73	42.7
	10	5.65	5.82	5.91	5.79	42.1
ซีลิกาจากถ้ำแกลบ	2	8.15	8.32	8.06	8.18	18.2
	4	8.41	8.49	8.32	8.41	15.9
	6	8.49	8.58	8.75	8.61	13.9
	8	8.92	8.84	9.01	8.92	10.8
	10	9.01	9.10	9.27	9.13	8.7
ซีลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว	2	2.29	2.20	2.11	2.20	78.0
	4	2.89	2.80	3.06	2.92	70.8
	6	3.49	3.41	3.32	3.41	65.9
	8	3.84	3.75	3.58	3.72	62.8
	10	4.01	4.10	4.18	4.10	59.0
ถ้ำลอยถ่านหิน	2	6.42	6.16	6.34	6.31	36.9
	4	6.77	6.68	6.60	6.68	33.2
	6	7.29	7.20	7.37	7.29	27.1
	8	7.72	7.63	7.46	7.60	24.0
	10	7.80	7.54	7.89	7.74	22.6

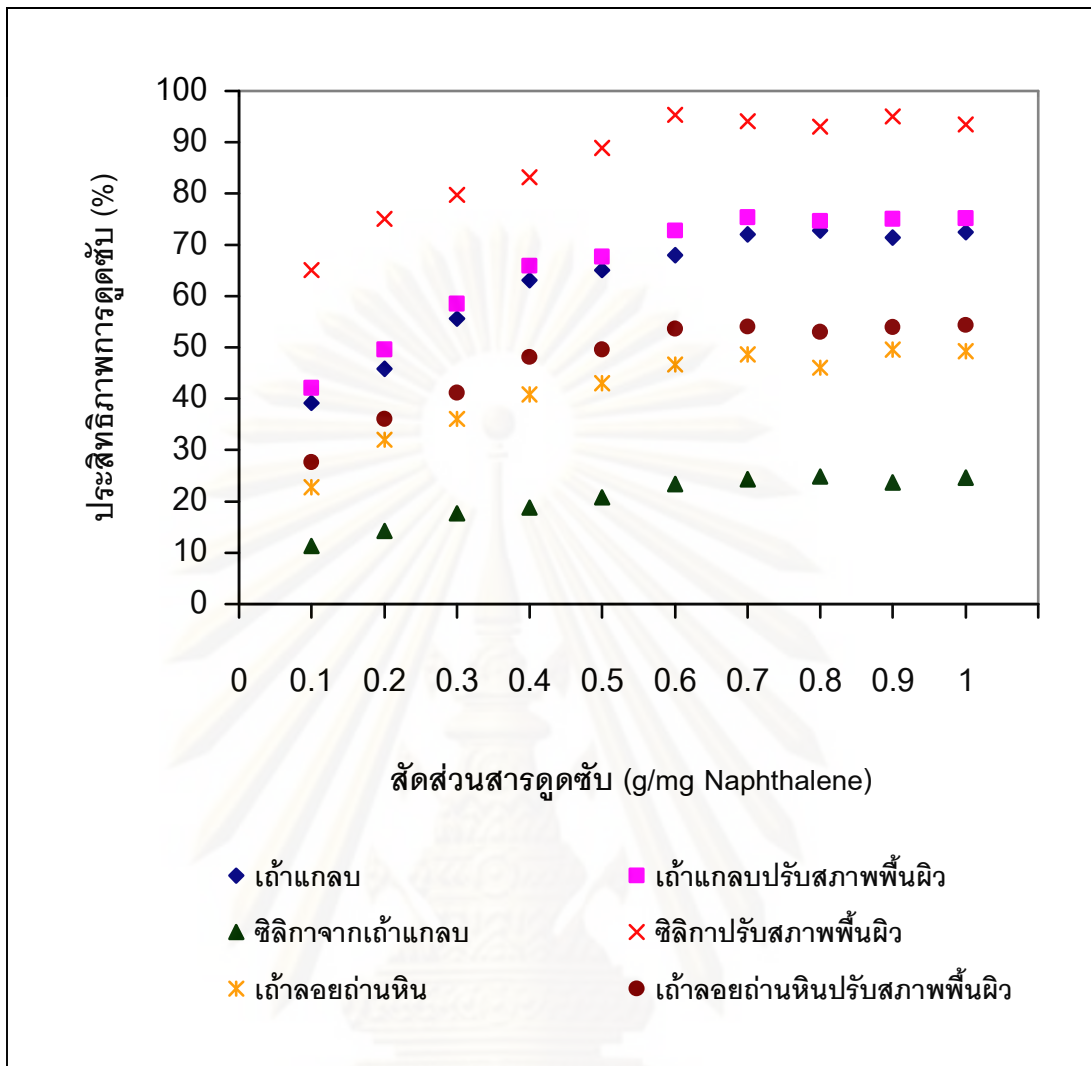
#### ตารางที่ 4.8 (ต่อ) แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดแอมฟิธาไลน์ที่ค่า pH ต่าง ๆ

ประเภทสารดูดซับ	ค่าพีเอช	ปริมาณแอมฟิธาไลน์หลังการดูดซับ (mg/l)				ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
ถ่านลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว	2	5.82	5.91	5.99	5.91	40.9
	4	6.42	6.25	6.60	6.42	35.8
	6	6.77	6.94	6.68	6.80	32.0
	8	7.11	7.20	7.29	7.20	28.0
	10	7.29	7.37	7.46	7.37	26.3

#### 4.3.4 ผลการศึกษาสัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแอมฟิธาไลน์

ในการดูดซับสารแอมฟิธาไลน์ 1 มิลลิกรัม (10mg/L ปริมาตร 100 มิลลิลิตร) ด้วยสารดูดซับปริมาณ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 กรัม ณ pH 2 ทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที ปรากฏผลดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของสารดูดซับทั้ง 6 ชนิด มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อสัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแอมฟิธาไลน์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งเริ่มคงที่เมื่อสัดส่วนประมาณ 0.7-0.8 กรัมสารดูดซับต่อ 1 มิลลิกรัมแอมฟิธาไลน์

จากผลการศึกษารูปได้พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับแอมฟิธาไลน์เพิ่มขึ้น เมื่อสัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแอมฟิธาไลน์ในสารละลายนั้นเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 0.7-0.8 กรัมต่อ 1 มิลลิกรัมแอมฟิธาไลน์ ประสิทธิภาพของการดูดซับจะเริ่มคงที่หรือเข้าสู่สมดุล โดยที่ซีลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด (95.3%) รองลงมาคือ ถ่านกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว (75.4%) ถ่านกลบ (72.8%) ถ่านลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว (54.4%) ถ่านลอยถ่านหิน (49.6%) และซีลิกาจากถ่านกลบ (24.3%) ตามลำดับ ฉะนั้นสัดส่วนสารดูดซับต่อแอมฟิธาไลน์ที่เลือกใช้คือ 0.7 กรัมสารดูดซับต่อ 1 มิลลิกรัมแอมฟิธาไลน์



รูปที่ 4.17 แสดงประสิทธิภาพในการดูดซับแนฟธาไลน์ที่สัดส่วนสารดูดซับต่อแนฟธาไลน์ต่าง ๆ กัน

#### 4.3.5 ผลการศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับ

ผลการศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับแนฟธาไลน์ด้วยถ้าแกลบ ถ้าแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ซีลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ถ้าลอยถ่านหิน และถ้าลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ปริมาณ 0.01, 0.02, 0.04, 0.1, 0.2, 0.4 และ 1 กรัม โดยใช้สารละลายแนฟธาไลน์ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ค่า pH 2 เขย่าด้วยความเร็วรอบ 250 รอบ ต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที ปราบกฏผลดังแสดงในตารางที่ 4.9

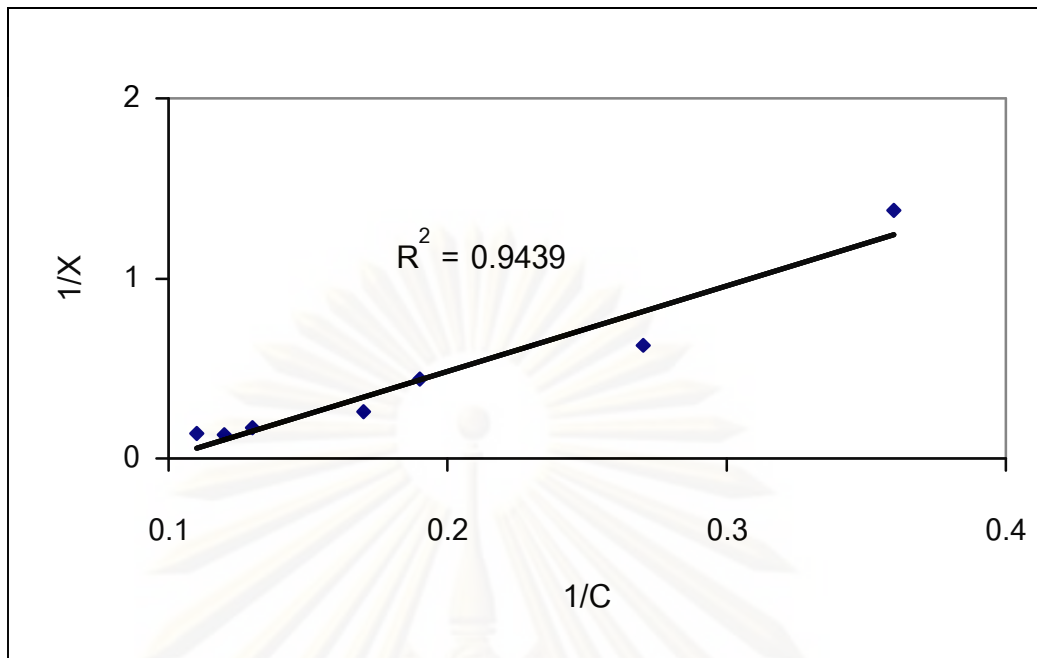
เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/X$  กับ  $1/C$  ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{Log } x/m$  กับ  $\text{Log } C$  ดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าความสัมพันธ์  $\text{Log } x/m$  กับ  $\text{Log } C$  (ฟรอนดลิชไอโซเทอม) ให้ค่า  $R^2$  ใกล้เคียง 1 มากกว่าความสัมพันธ์  $1/X$  กับ  $1/C$  (แลงมัวร์ไอโซเทอม) นั่นคือพฤติกรรมการดูดซับแนฟธาซีนด้วยถ้ำเกลบมีแนวโน้มเป็นไปแบบฟรอนดลิชไอโซเทอม

ผลการศึกษาพฤติกรรมการดูดซับแนฟธาซีน ด้วยถ้ำเกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวดังแสดงในตารางที่ 4.10 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/X$  กับ  $1/C$  ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{Log } x/m$  กับ  $\text{Log } C$  ดังแสดงในรูปที่ 4.21 พบว่าความสัมพันธ์  $\text{Log } x/m$  กับ  $\text{Log } C$  (ฟรอนดลิชไอโซเทอม) ให้ค่า  $R^2$  ใกล้เคียง 1 มากกว่าความสัมพันธ์  $1/X$  กับ  $1/C$  (แลงมัวร์ไอโซเทอม) นั่นคือพฤติกรรมการดูดซับแนฟธาซีนด้วยถ้ำเกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวมีแนวโน้มเป็นไปแบบฟรอนดลิชไอโซเทอม

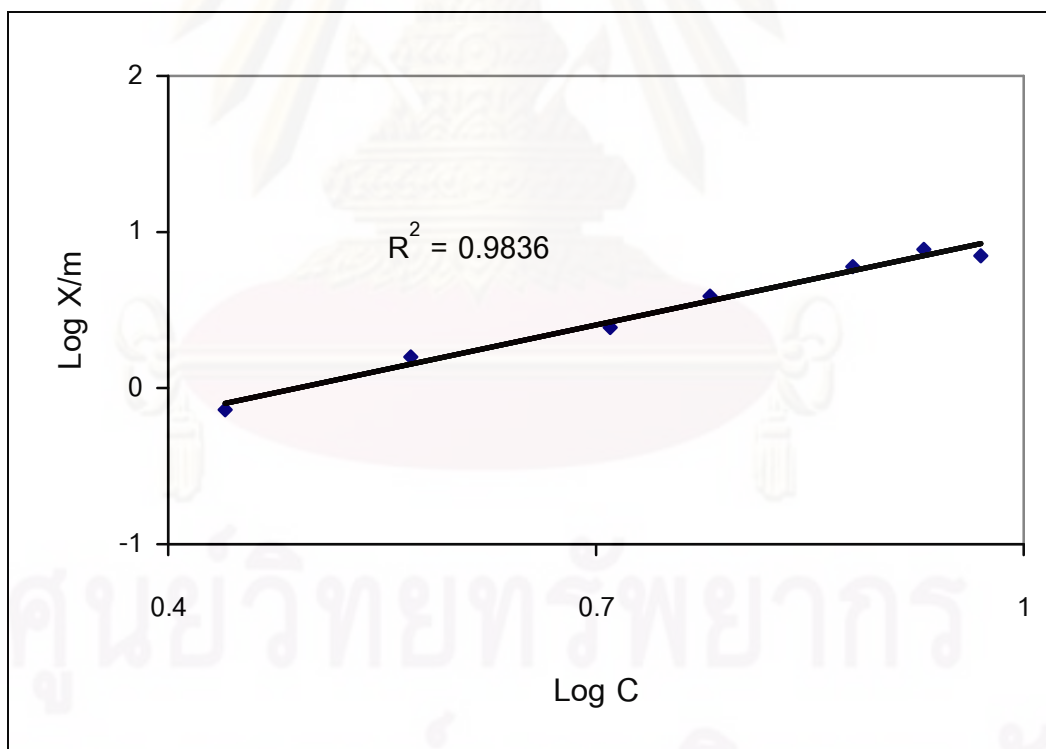
ตารางที่ 4.9 ปริมาณแนฟธาซีนเมื่อถูกดูดซับด้วยถ้ำเกลบที่ปริมาณต่างๆ กัน

น้ำหนักสารดูดซับ (g)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นแนฟธาซีนหลังการดูดซับ (C) (mg/l)	c (mg)	x (mg)	x/m (mg/g)	Log C	Log x/m	1/C	1/X
0	10.00	1	0	-	-	-	-	-
0.01	9.30	0.93	0.07	7.00	0.97	0.85	0.11	0.14
0.02	8.46	0.85	0.15	7.70	0.93	0.89	0.12	0.13
0.04	7.60	0.76	0.24	6.00	0.88	0.78	0.13	0.17
0.1	6.08	0.61	0.39	3.92	0.78	0.59	0.17	0.26
0.2	5.42	0.54	0.46	2.29	0.73	0.36	0.19	0.44
0.4	3.69	0.37	0.63	1.58	0.57	0.20	0.27	0.63
1	2.75	0.28	0.72	0.73	0.44	-0.14	0.36	1.38

Note: c = ปริมาณแนฟธาซีนในสารละลาย x = ปริมาณแนฟธาซีนที่ถูกดูดซับ



รูปที่ 4.18 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ้ำแกลบ



รูปที่ 4.19 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ้ำแกลบ



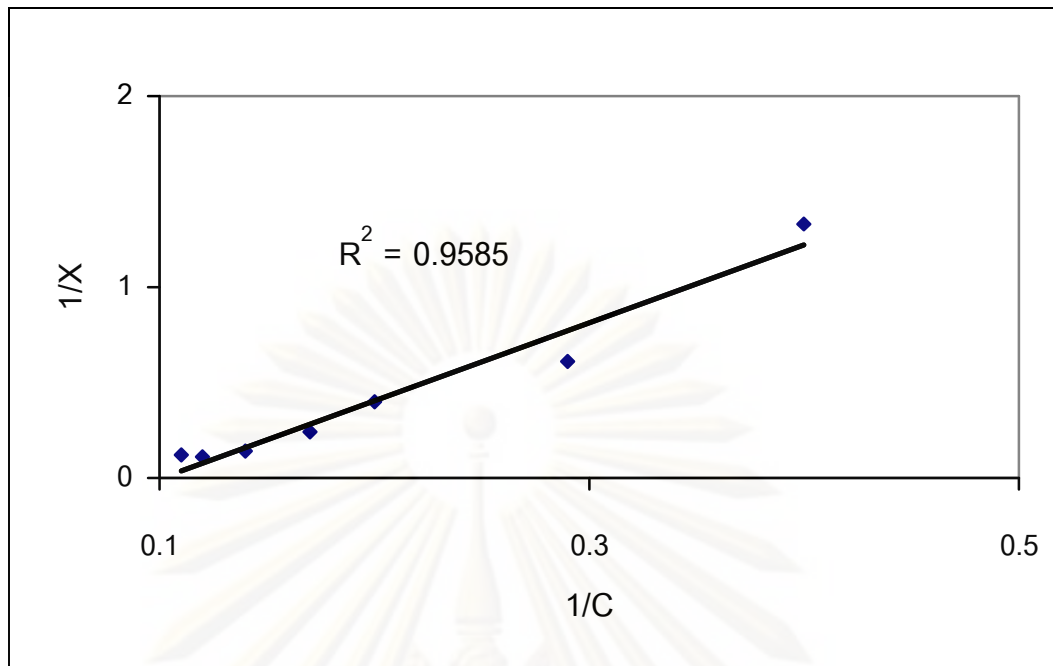
ผลการศึกษาพฤติกรรมการดูดซับแนฟธาลีน ด้วยซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวดังแสดงในตารางที่ 4.11 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/X$  กับ  $1/C$  ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{Log } x/m$  กับ  $\text{Log } C$  ดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าความสัมพันธ์  $\text{Log } x/m$  กับ  $\text{Log } C$  (ฟรอนดลิชไอโซเทอม) ให้ค่า  $R^2$  ใกล้เคียง 1 มากกว่าความสัมพันธ์  $1/X$  กับ  $1/C$  (แลงมัวร์ไอโซเทอม) นั่นคือพฤติกรรมการดูดซับแนฟธาลีนด้วยซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวมีแนวโน้มเป็นไปแบบฟรอนดลิชไอโซเทอม

ผลการศึกษาพฤติกรรมการดูดซับแนฟธาลีน ด้วยแก้วลอยถ่านหินดังแสดงในตารางที่ 4.12 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/X$  กับ  $1/C$  ดังแสดงในรูปที่ 4.24 และความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{Log } x/m$  กับ  $\text{Log } C$  ดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่าความสัมพันธ์  $\text{Log } x/m$  กับ  $\text{Log } C$  (ฟรอนดลิชไอโซเทอม) ให้ค่า  $R^2$  ใกล้เคียง 1 มากกว่าความสัมพันธ์  $1/X$  กับ  $1/C$  (แลงมัวร์ไอโซเทอม) นั่นคือพฤติกรรมการดูดซับแนฟธาลีนด้วยแก้วลอยถ่านหินมีแนวโน้มเป็นไปแบบฟรอนดลิชไอโซเทอม

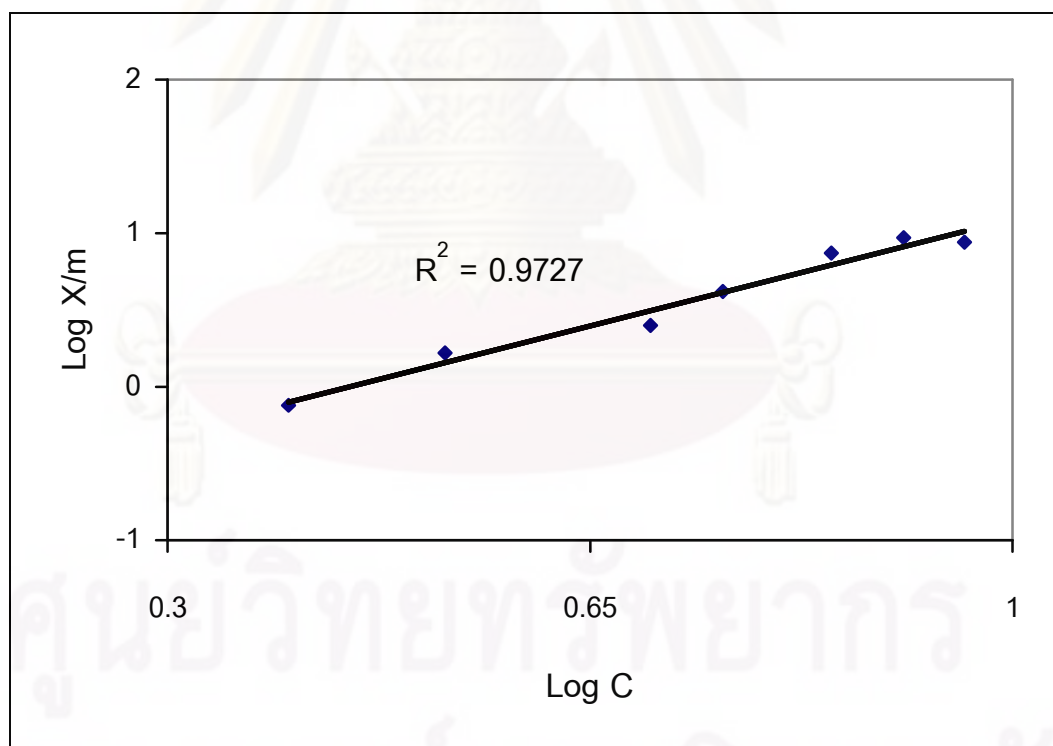
ตารางที่ 4.10 ปริมาณแนฟธาลีนเมื่อถูกดูดซับด้วยแก้วเคลือบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวที่ปริมาณต่างๆ กัน

น้ำหนัก วัสดุดูด ซับ (m) (g)	ความเข้มข้น แนฟธาลีน ที่เหลือเจลีย์ (C) (mg/l)	c (mg)	x (mg)	x/m (mg/g)	Log C	Log x/m	1/C	1/X
0	10.00	1	0	-	-	-	-	-
0.01	9.13	0.91	0.09	8.70	0.96	0.94	0.11	0.12
0.02	8.12	0.81	0.19	9.40	0.91	0.97	0.12	0.11
0.04	7.03	0.70	0.30	7.43	0.85	0.87	0.14	0.14
0.1	5.79	0.58	0.42	4.21	0.76	0.62	0.17	0.24
0.2	5.04	0.50	0.50	2.48	0.70	0.40	0.20	0.40
0.4	3.41	0.34	0.66	1.65	0.53	0.22	0.29	0.61
1	2.48	0.25	0.75	0.75	0.40	-0.12	0.40	1.33

Note: c = ปริมาณแนฟธาลีนในสารละลาย x = ปริมาณแนฟธาลีนที่ถูกดูดซับ



รูปที่ 4.20 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ้ำเกลือผ่านการปรับสภาพพื้นผิว

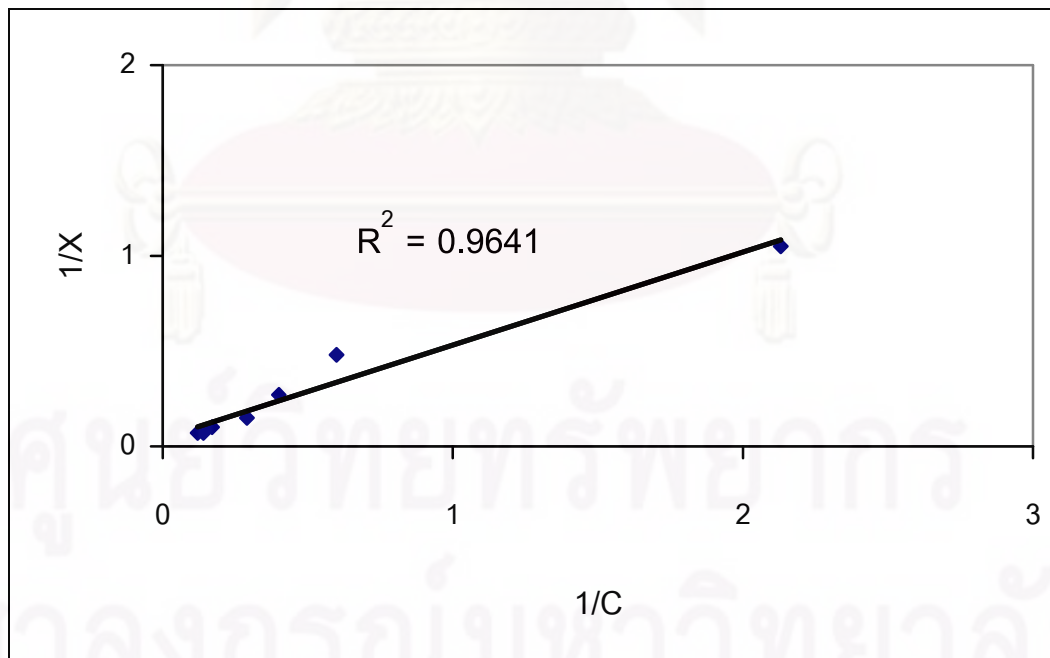


รูปที่ 4.21 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ้ำเกลือผ่านการปรับสภาพพื้นผิว

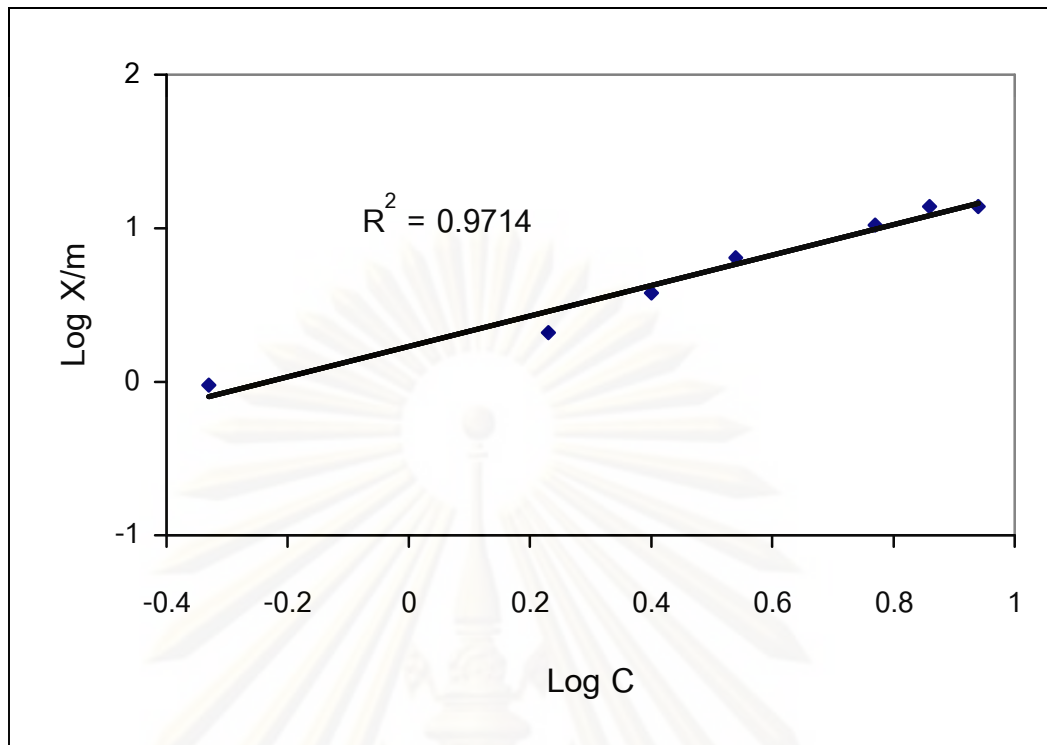
ตารางที่ 4.11 ปริมาณแนฟธาซีนเมื่อถูกดูดซับด้วยซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวที่ ปริมาณต่างๆ กัน

น้ำหนัก วัสดุดูด ซับ (m) (g)	ความเข้มข้น แนฟธาซีน ที่เหลือน้ำ (C) (mg/l)	c (mg)	x (mg)	x/m (mg/g)	Log C	Log x/m	1/C	1/X
0	10.00	1	0	-	-	-	-	-
0.01	8.63	0.86	0.14	13.70	0.94	1.14	0.12	0.07
0.02	7.23	0.72	0.28	13.85	0.86	1.14	0.14	0.07
0.04	5.82	0.58	0.42	10.45	0.77	1.02	0.17	0.10
0.1	3.50	0.35	0.65	6.50	0.54	0.81	0.29	0.15
0.2	2.49	0.25	0.75	3.76	0.40	0.58	0.40	0.27
0.4	1.68	0.17	0.83	2.08	0.23	0.32	0.60	0.4
1	0.47	0.05	0.95	0.95	-0.33	-0.02	2.13	1.05

Note: c = ปริมาณแนฟธาซีนในสารละลาย x = ปริมาณแนฟธาซีนที่ถูกดูดซับ



รูปที่ 4.22 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว

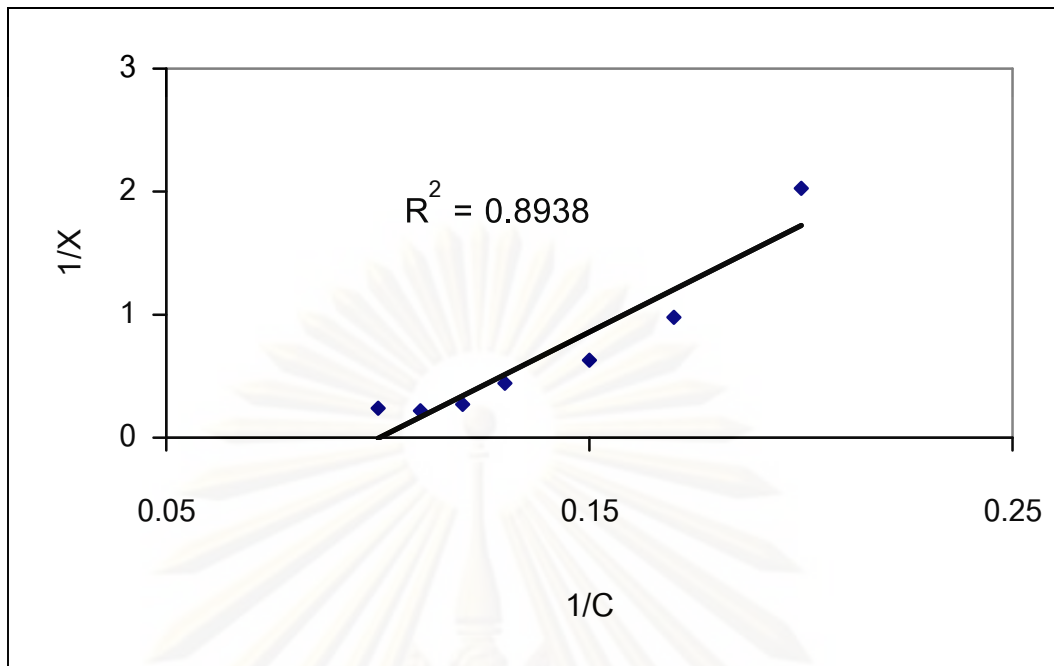


รูปที่ 4.23 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว

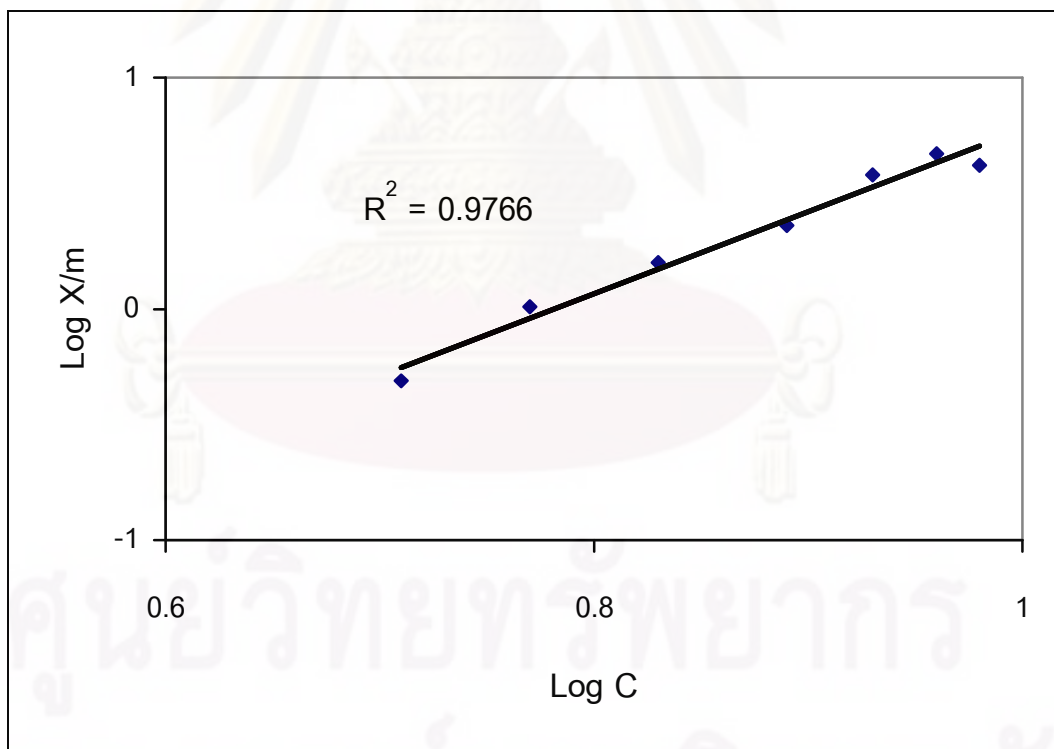
ตารางที่ 4.12 ปริมาณแนฟธาซีนเมื่อถูกดูดซับด้วยถ้ำลอยถ่านหินที่ปริมาณต่างๆ กัน

น้ำหนัก วัสดุดูด ซับ (m) (g)	ความเข้มข้น แนฟธาซีน ที่เหลือเจือ (C) (mg/l)	c (mg)	x (mg)	x/m (mg/g)	Log C	Log x/m	1/C	1/X
0	10.00	1	0	-	-	-	-	-
0.01	9.58	0.96	0.04	4.20	0.98	0.62	0.10	0.24
0.02	9.07	0.91	0.09	4.65	0.96	0.67	0.11	0.22
0.04	8.49	0.85	0.15	3.78	0.93	0.58	0.12	0.27
0.1	7.72	0.77	0.23	2.28	0.89	0.36	0.13	0.44
0.2	6.80	0.68	0.32	1.60	0.83	0.20	0.15	0.63
0.4	5.91	0.59	0.41	1.02	0.77	0.01	0.17	0.98
1	5.07	0.51	0.49	0.49	0.71	-0.31	0.20	2.03

Note: c = ปริมาณแนฟธาซีนในสารละลาย x = ปริมาณแนฟธาซีนที่ถูกดูดซับ



รูปที่ 4.24 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ้ำลอยถ่านหิน

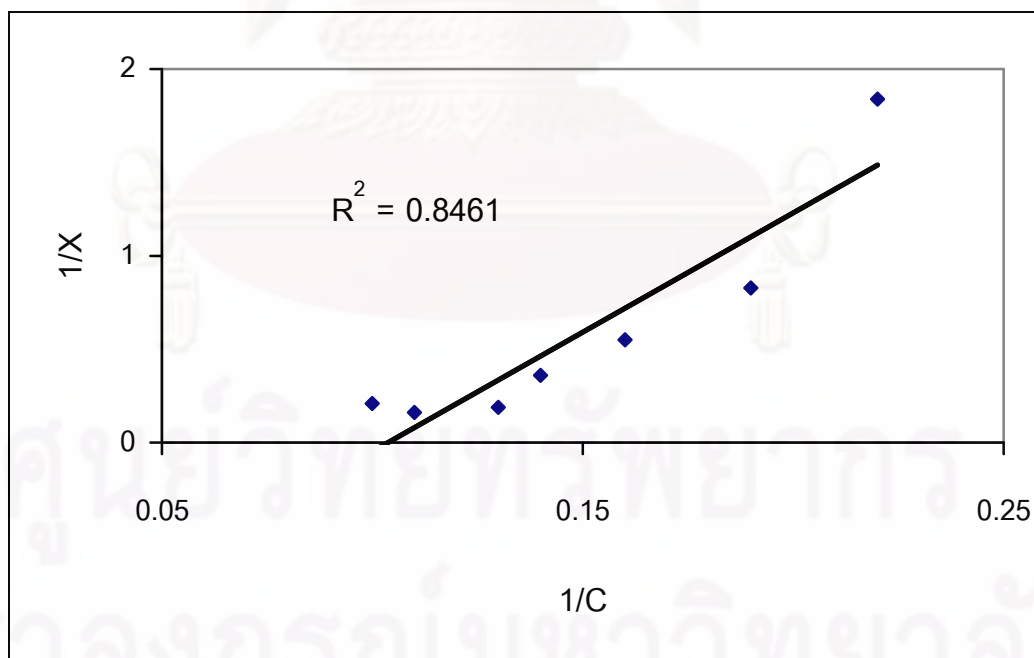


รูปที่ 4.25 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ้ำลอยถ่านหิน

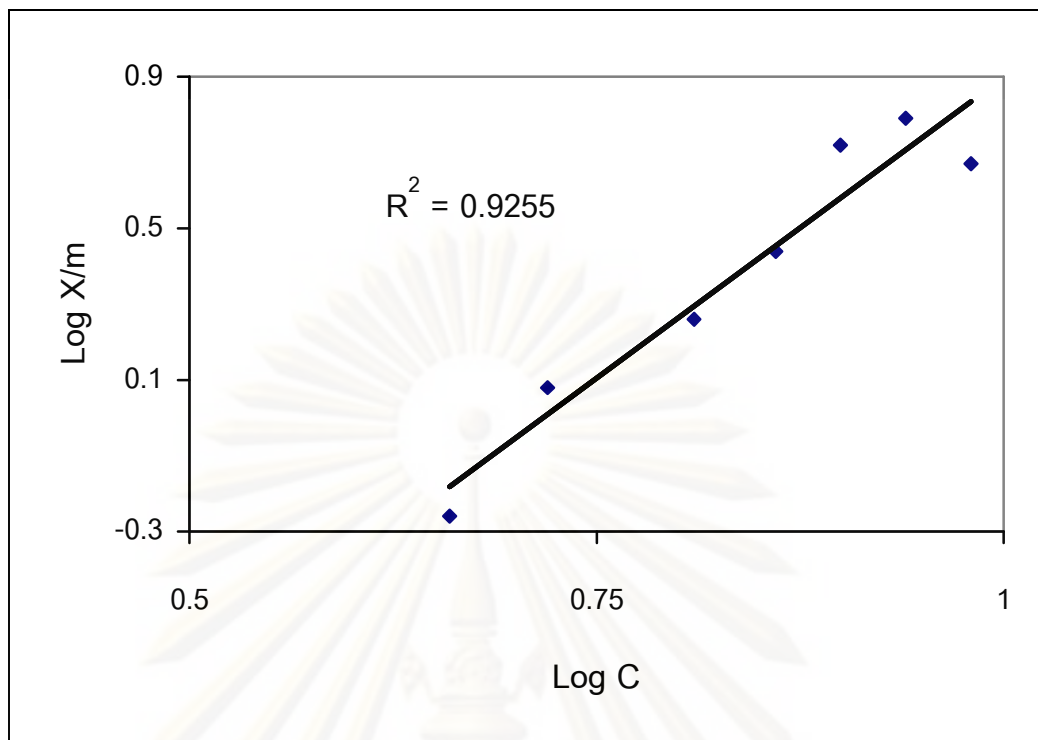
ตารางที่ 4.13 ปริมาณแนฟธาซีนเมื่อถูกดูดซับด้วยถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพ  
พื้นผิวที่ปริมาณต่างๆ กัน

น้ำหนัก วัสดุดูด ซับ (g)	ความเข้มข้น แนฟธาซีน ที่เหลือนเจลี่ย (mg/l)	C (mg)	x (mg)	x/m (mg/g)	Log C	Log x/m	1/C	1/X
0	10.00	1	0	-	-	-	-	-
0.01	9.53	0.95	0.05	4.70	0.98	0.67	0.11	0.21
0.02	8.78	0.88	0.12	6.10	0.94	0.79	0.11	0.16
0.04	7.89	0.79	0.21	5.28	0.90	0.72	0.13	0.19
0.1	7.23	0.72	0.28	2.77	0.86	0.44	0.14	0.36
0.2	6.39	0.64	0.36	1.81	0.81	0.26	0.16	0.55
0.4	5.19	0.52	0.48	1.20	0.72	0.08	0.19	0.83
1	4.56	0.46	0.54	0.54	0.66	-0.26	0.22	1.84

Note: c = ปริมาณแนฟธาซีนในสารละลาย x = ปริมาณแนฟธาซีนที่ถูกดูดซับ



รูปที่ 4.26 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพ  
พื้นผิว



รูปที่ 4.27 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนด์ลิชของถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว

ผลการศึกษากฎการดูดซับแบบฟรอนด์ลิชด้วยถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวดังแสดงในตารางที่ 4.13 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/X$  กับ  $1/C$  ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{Log } x/m$  กับ  $\text{Log } C$  ดังแสดงในรูปที่ 4.27 พบว่าความสัมพันธ์  $\text{Log } x/m$  กับ  $\text{Log } C$  (ฟรอนด์ลิชไอโซเทอม) ให้ค่า  $R^2$  ใกล้เคียง 1 มากกว่าความสัมพันธ์  $1/X$  กับ  $1/C$  (แลงมัวร์ไอโซเทอม) นั่นคือพฤติกรรมดูดซับแบบฟรอนด์ลิชด้วยถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวมีแนวโน้มเป็นไปแบบฟรอนด์ลิชไอโซเทอม

จากผลการศึกษากฎการดูดซับแบบฟรอนด์ลิชดังแสดงในตารางที่ 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 และ 4.13 เมื่อนำไปคำนวณหาค่า Correlation coefficient ( $R^2$ ) ของแต่ละสมการทั้งสมการของแลงมัวร์ (Langmuir) และ ฟรอนด์ลิช (Freundlinch) แล้วพบว่าค่า  $R^2$  ของสมการฟรอนด์ลิช (Freundlinch) มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าแสดงว่าพฤติกรรมดูดซับสอดคล้องกับสมการฟรอนด์ลิช (Freundlinch) มากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.18 – 4.27 เป็นการแสดงให้เห็นว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางกายภาพ โดยที่เส้นไอโซเทอมการดูดซับของสารดูดซับทั้ง 5 ชนิด สามารถอธิบายได้จากสมการฟรอนด์ลิช (Freundlinch) คือ  $x/m = KC^{1/n}$  หรือ  $\text{log } x/m = \text{log } K + (1/n) \text{log } C$  ความสามารถในการดูดซับแบบฟรอนด์ลิชของสารดูดซับสามารถพิจารณาได้จากค่า  $x/m$  ซึ่ง

เป็นปริมาณของแนฟธาลินที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักสารดูดซับที่ใช้ ดังนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับของสารดูดซับแต่ละชนิด สามารถใช้ค่าคงที่  $K$  และ  $1/n$  ที่ได้จากสมการฟรุนดลิช (Freundlich) โดยที่  $\log K$  เป็นจุดตัดแกน  $Y$  และ  $1/n$  เป็นความชันของสมการเส้นตรง ค่าคงที่ดังกล่าว แสดงดังตารางที่ 4.14 ซึ่งแสดงผลยืนยันได้ว่าซิลิกาจากถ้ำเกลบที่ปรับสภาพผิวด้วย CTAB เป็นสารดูดซับที่ดีที่สุดสำหรับการดูดซับแนฟธาลินจากสารละลาย

ตารางที่ 4.14 ค่าคงที่ของสารดูดซับแต่ละชนิดจากสมการฟรุนดลิช (Freundlich)

ชนิดสารดูดซับ	K (mg/g)	n
ถ้ำเกลบ	0.11	0.52
ถ้ำเกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว	0.13	0.50
ซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว	1.70	1.01
ถ้ำลอยถ่านหิน	0.002	0.28
ถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว	0.005	0.32

จากข้อมูลในตารางที่ 4.14 พบว่า สารดูดซับที่มีค่า  $K$  สูงสุดคือ ซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ซึ่งแสดงว่า สารดูดซับที่สามารถดูดซับแนฟธาลินได้ดีที่สุด คือ ซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว รองลงมาคือ ถ้ำเกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ถ้ำเกลบ ถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว และถ้ำลอยถ่านหิน ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังพบว่า ซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวจะมีค่า  $n$  ที่สูง นั่นคือ กราฟมีความชันต่ำมากนั้นแสดงว่า อัตราการดูดซับเมื่อความเข้มข้นต่ำหรือสูงจะไม่แตกต่างกันมากนัก หรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจะไม่มีผลต่ออัตราการดูดซับ นอกจากนี้แล้วค่า  $n$  ที่ได้ยังแสดงถึงความสามารถในการดูดซับ โดยถ้าค่า  $n$  มากกว่า 1 หมายความว่าตัวดูดซับที่ใช้สามารถดูดซับตัวถูกละลายได้ดี ซึ่งซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวจะมีค่า  $n > 1$  ซึ่งแสดงถึงการดูดซับที่ดี

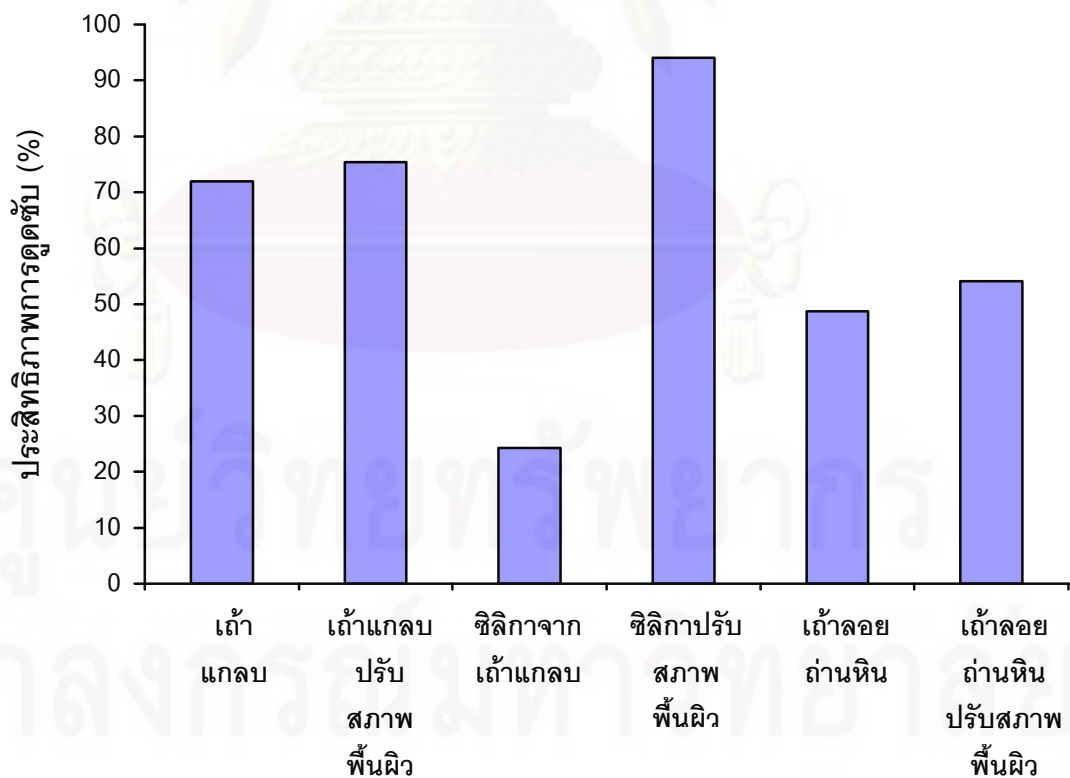
#### 4.3.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาลินของสารดูดซับแต่ละชนิดที่สภาวะเหมาะสมที่คัดเลือกจากการศึกษาเบื้องต้น

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาลินด้วยสารดูดซับแต่ละชนิดที่ความเร็วรอบในการเขย่า ช่วงเวลาสัมผัส และค่าพีเอชที่คัดเลือกจากการศึกษาเบื้องต้น กล่าวคือใช้ปริมาณสารดูดซับ 0.7 กรัม ผสมในสารละลายแนฟธาลินความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร



ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ค่า pH เท่ากับ 2 จากนั้นนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 60 นาที พบว่าซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวมีประสิทธิภาพในการดูดซับแอฟธาไลน์สูงสุด รองลงมาคือ ถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ถ้ำแกลบ ถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ถ้ำลอยถ่านหิน และซิลิกาจากถ้ำแกลบ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่สภาวะการดูดซับเดียวกันพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายแอฟธาไลน์ด้วยสารดูดซับแต่ละชนิดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอนบนสารดูดซับแต่ละชนิดเพิ่มขึ้น แสดงว่าการดูดซับแอฟธาไลน์นั้นเกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำระหว่างแอฟธาไลน์กับหมู่ไฮโดรคาร์บอนบนสารดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ปิยะมาภรณ์ จารุงศ์ (2545) ซึ่งศึกษาการดูดซับสารอินทรีย์จากน้ำโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกรับปรุงด้วยสารปรับสภาพผิว

จากผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแอฟธาไลน์ด้วยสารดูดซับแต่ละชนิดที่สภาวะเดียวกัน และผลจากการศึกษาค่าคงที่ไอโซเทอมในการดูดซับ สรุปได้ว่าซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอฟธาไลน์ดีที่สุด นั่นคือสารดูดซับที่มีความเหมาะสมในการดูดซับสารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนคือ ซิลิกาจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแอฟธาไลน์

จากผลการทดลองนำซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวมาทำการทดลองดูดซับน้ำที่ปนเปื้อนน้ำมันดิบ ที่มีการปรับ pH ในการทดลองเท่ากับ 2 จากนั้นนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที หลังจากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ลักษณะหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR) พบว่าน้ำมันดิบที่ลอยอยู่บนผิวน้ำมีปริมาณลดลงเนื่องจากถูกซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวดูดติดลงไปตกตะกอนอยู่ใต้ผิวน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.29 หลังจากนั้นจึงทำการแยกซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวออกจากน้ำที่ปนเปื้อนน้ำมัน พบว่าซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวจากเดิมที่มีสีขาวเปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาลอ่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.30 และเมื่อนำซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวที่ผ่านการดูดซับน้ำมันไปวิเคราะห์ลักษณะหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR) พบว่าซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวที่ผ่านการดูดซับน้ำมันมีสเปกตรัมที่เกิดขึ้นใหม่ที่  $2954.84\text{ cm}^{-1}$  และมีสเปกตรัมที่เพิ่มขึ้นจากเดิมที่  $2924\text{-}2925\text{ cm}^{-1}$  และ  $2854\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงลักษณะเฉพาะของหมู่ไฮโดรคาร์บอน ( $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}_3$ ) ของน้ำมันดิบ ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวสามารถดูดซับน้ำมันดิบที่ปนเปื้อนในน้ำได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.31 และ รูปที่ 4.32 และเมื่อนำซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวที่ผ่านการดูดซับน้ำมันมาเผาเพื่อไล่น้ำมันที่ถูกดูดซับไว้ที่ผิวออกเพื่อพิจารณาในการนำซิลิกากลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง พบว่าหลังจากที่ทำการเผาซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวที่ผ่านการดูดซับน้ำมันนั้นซิลิกาจะกลับมามีสีขาวดังเดิม เนื่องจากมีการคายออกของน้ำมันออกจากผิวของซิลิกา และเมื่อนำซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวที่ผ่านการเผาไล่น้ำมันมาวิเคราะห์ FTIR พบว่ามีการหายไปของสเปกตรัมของหมู่ไฮโดรคาร์บอน ( $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}_3$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.33 ซึ่งจากการคายออกของน้ำมันจากผิวของซิลิกา ทำให้สามารถนำซิลิกากลับมาปรับสภาพผิวใหม่เพื่อนำกลับไปดูดซับน้ำมันได้อีกครั้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

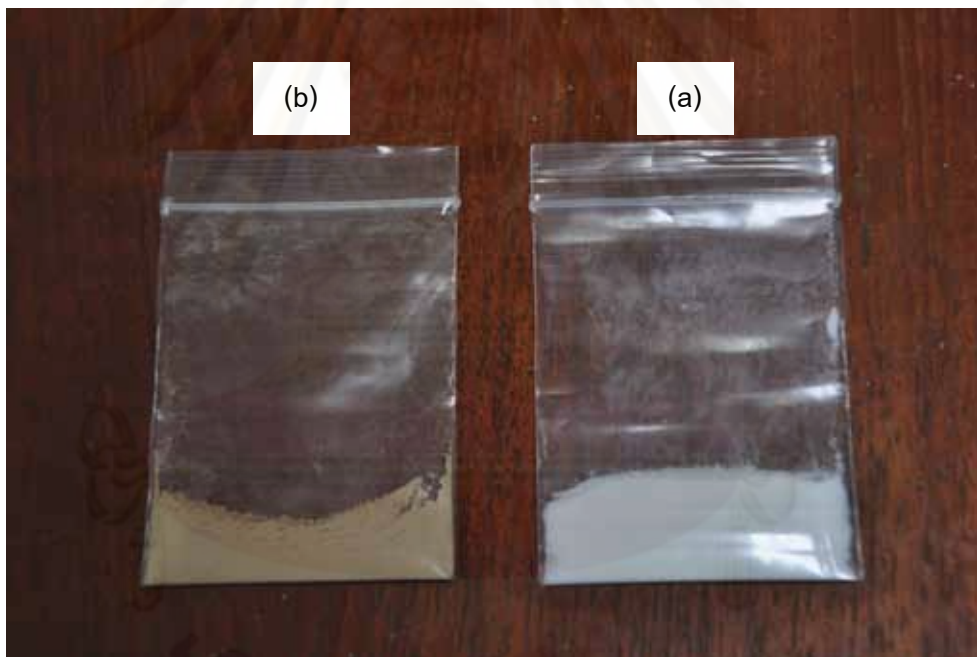


(a)



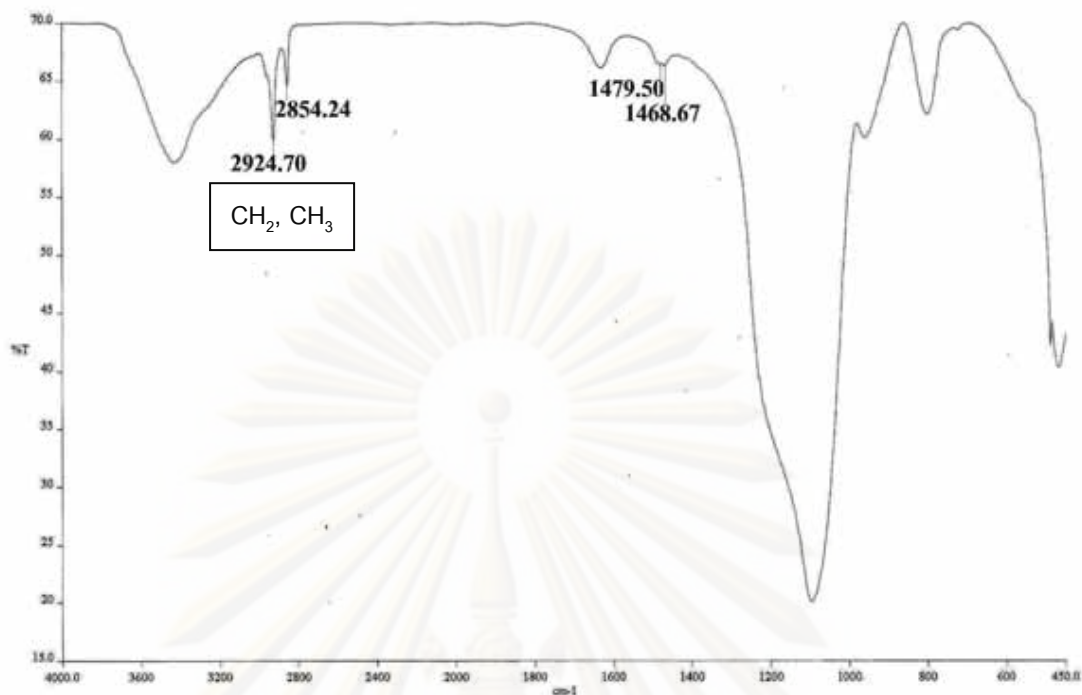
(b)

รูปที่ 4.29 คราบน้ำมันก่อนการดูดซับ (a) และหลังการดูดซับ (b)

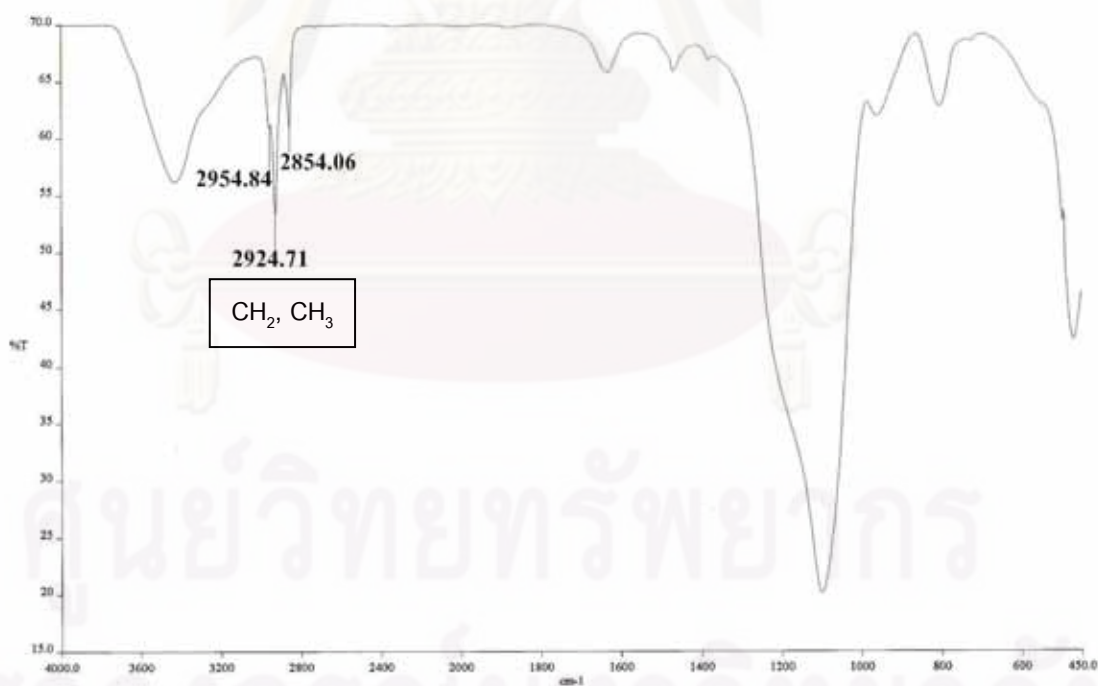


รูปที่ 4.30 ซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวก่อนการดูดซับ (a) และหลังผ่านการดูดซับ  
คราบน้ำมัน (b)

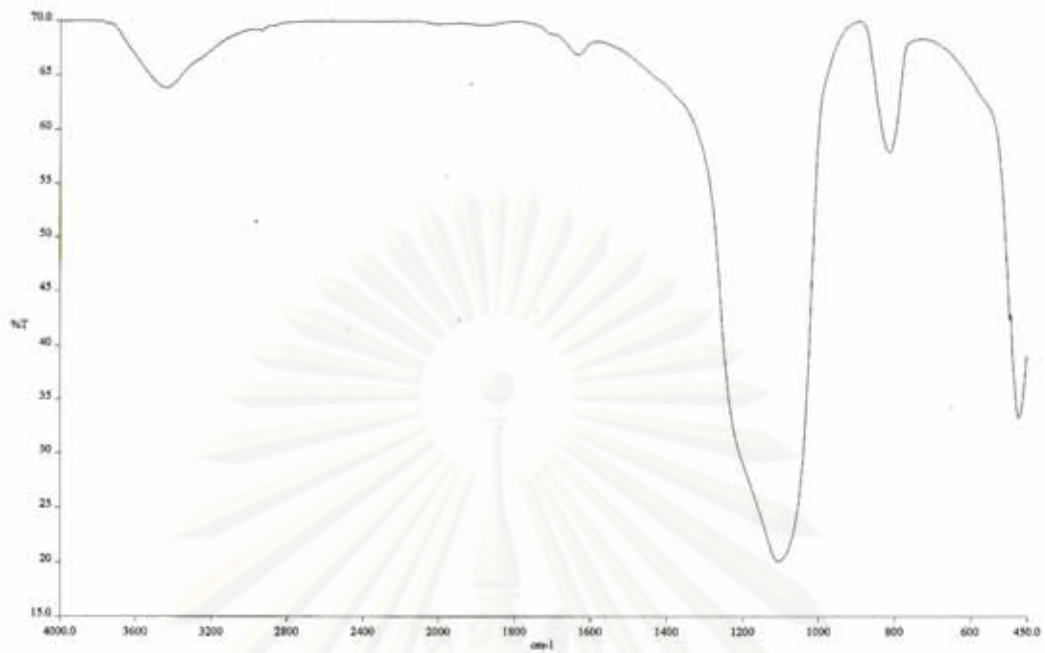
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.31 ลักษณะของหมู่ฟังก์ชันของซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว



รูปที่ 4.32 ลักษณะของหมู่ฟังก์ชันของซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวที่ผ่านการดูดซับคราบน้ำมัน



รูปที่ 4.33 ลักษณะของหมู่ฟังก์ชันของซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวที่มีการคายออกของน้ำมัน

ศูนย์วิจัยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) ในน้ำ โดยใช้แนฟธาลินเป็นตัวแทน ด้วยเถ้าแกลบ ซิลิกาจากเถ้าแกลบ และเถ้าลอยถ่านหิน ทั้งชนิดที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ด้วย Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) สามารถสรุปได้ดังนี้

#### 1) การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับด้วยการปรับสภาพผิวสารดูดซับ

จากการศึกษาลักษณะสมบัติของซิลิกาที่ได้จากเถ้าแกลบ พบว่ามีองค์ประกอบส่วนใหญ่คือ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ลักษณะพื้นผิวของซิลิกาโดยทั่วไปนั้นจะแสดงสภาพมีขั้วประเภทประจุลบ (Negative Polar Group) โดยจะมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่ผิว ( $\text{Si-OH}$ ) จึงมีสมบัติเป็นสารที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ไม่สามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้ การเคลือบพื้นผิวของสารดูดซับด้วย Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) ซึ่งเป็นสารปรับสภาพผิวประเภทประจุบวก โดยใช้ CTAB 1.4 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ต่อสารดูดซับ 8 กรัม กวนหรือเขย่าของผสมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารดูดซับไปล้างด้วยน้ำกลั่น และนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้สมบัติพื้นผิวของสารดูดซับเปลี่ยนจากชอบน้ำ (Hydrophilic) เป็นไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และทำสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนไป เช่น พื้นผิว หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ปริมาณคาร์บอน โดยพบว่าซิลิกาจากเถ้าแกลบซึ่งมีพื้นที่ผิวสูงสุดสามารถดูดซับ CTAB ได้มาก ปริมาณคาร์บอนจึงสูงมากหลังผ่านการปรับสภาพผิว ส่งผลให้ศักยภาพการดูดซับแนฟธาลินสูงที่สุด เมื่อเทียบกับเถ้าแกลบ และเถ้าลอยถ่านหิน แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิว ลักษณะโครงสร้าง และสมบัติเคมีพื้นผิวของสารดูดซับมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับของสารดูดซับ

#### 2) การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแนฟธาลินด้วยเถ้าแกลบ เถ้าแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ซิลิกาจากเถ้าแกลบ ซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว เถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว พบว่าค่าความเร็วรอบในการเขย่า ช่วงเวลาสัมผัส และค่า pH มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับแนฟธาลิน โดยพบว่าประสิทธิภาพในการดูด

ซับแนฟธาซีนมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น ขณะที่ประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาซีนจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่ใช้ในการเขย่า และช่วงเวลาสัมผัส โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายแนฟธาซีนเข้มข้น 10 mg/l ปริมาตร 100 ml โดยใช้ปริมาณสารดูดซับ 0.3 กรัมคือ ใช้ความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 250 รอบต่อนาที ช่วงเวลาสัมผัส 60 นาที ที่ค่า pH ประมาณ 2

### 3) การศึกษาสัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแนฟธาซีนในสารละลายที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ผลการศึกษาสัดส่วนสารดูดซับที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาซีนออกจากสารละลาย พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนสารดูดซับไปเรื่อยๆ ประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และจะเริ่มคงที่ที่สัดส่วนประมาณ 0.7-0.8 กรัมสารดูดซับต่อ 1 มิลลิกรัมแนฟธาซีน โดยพบว่าซิลิกาจากถ้ำเกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดคือ 95.3% รองลงมาได้แก่ ถ้ำเกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว (75.4%) ถ้ำเกลบ (72.8%) ถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว (54.4%) ถ้ำลอยถ่านหิน (49.6%) และซิลิกาจากถ้ำเกลบ (24.3%) ตามลำดับ

### 4) การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

ผลการศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับเปรียบเทียบระหว่างไอโซเทอมแบบแลงมัวร์และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ของสารดูดซับแต่ละชนิด โดยนำค่า Correlation coefficient ( $R^2$ ) มาเปรียบเทียบกัน พบว่าพฤติกรรมของการดูดซับแนฟธาซีนมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิชมากกว่าของแลงมัวร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางกายภาพ โดยที่ซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวมีค่า  $n > 1$  ซึ่งแสดงถึงการดูดซับที่ดี อีกทั้งยังมีความจุของวัสดุดูดซับ (k) สูงที่สุด รองลงมาคือ ถ้ำเกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ถ้ำเกลบ ถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว และถ้ำลอยถ่านหิน ตามลำดับ

### 5) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาซีนด้วยสารดูดซับแต่ละชนิดที่สภาวะคัดเลือก (Selected condition)

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเร็วรอบในการเขย่า 250 รอบต่อนาที ช่วงเวลาสัมผัส 60 นาที ค่า pH ประมาณ 2 โดยใช้สารดูดซับปริมาณ 0.7 กรัมในสารละลายแนฟธาซีน 10 mg/l ปริมาตร 100 ml (สารดูดซับ 0.7 กรัมต่อแนฟธาซีน 1 มิลลิกรัม) พบว่าการดูด

ชั้นเกิดขึ้นเนื่องจากแรงระหว่างโมเลกุลของแนฟธาลีนกับหมู่ไฮโดรคาร์บอนบนสารดูดซับ โดยที่พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของสารดูดซับแต่ละชนิดจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอนบนสารดูดซับแต่ละชนิดเพิ่มขึ้น โดยพบว่าซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวมีประสิทธิภาพในการดูดซับแนฟธาลีนสูงสุด รองลงมาได้แก่ ถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ถ้ำแกลบ ถ้ำลอย ถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ถ้ำลอยถ่านหินและ ซิลิกาจากถ้ำแกลบ ตามลำดับ ดังนั้นซิลิกาจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวน่าจะมีความเหมาะสมในการนำมาเป็นสารดูดซับสารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (แนฟธาลีน) มากที่สุด และจากการนำซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวมาทดลองดูดซับน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำพบว่า ซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวสามารถดูดซับโมเลกุลของน้ำมันได้อย่างชัดเจน

### ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นๆ ด้วยซิลิกาจากถ้ำแกลบที่ปรับสภาพผิวด้วยสาร CTAB
- 2) ควรศึกษาการปรับสภาพผิวสารดูดซับด้วยสารปรับสภาพผิวชนิดอื่นที่มีต้นทุนต่ำกว่า CTAB
- 3) ควรศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ซิลิกาจากแหล่งอื่นเปรียบเทียบ
- 4) ควรมีการนำผลการทดลองไปประยุกต์กับการทดลองในระดับขยายผล เพื่อใช้กับการบำบัดน้ำปนเปื้อนน้ำมันในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

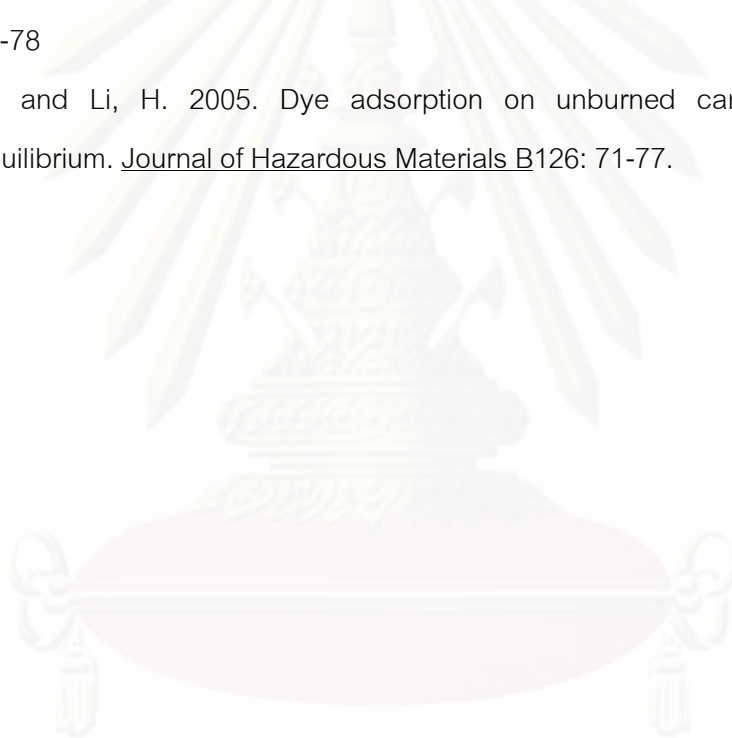
- โกศลย์ คุณสำราญ, พิเชษฐ วิริยะจิตรา, วิชัย รั้วตระกูล, สุรชัย นิมจิรวุฒน์ และ อภิชาติ สุขสำราญ. 2526. การประยุกต์สเปคโตรสโคปีในเคมีอินทรีย์. พิมพ์ครั้งที่ 1: นำอักษรการพิมพ์.
- จุฑาทิพย์ เพชรอินทร์. 2547. การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ไฮโดรไลต์ที่สังเคราะห์จาก เถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขาน้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จิรทีปส์ แสนรัก. 2547. การย่อยสลายไพรีนและสารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นโดยกลุ่มแบคทีเรียที่แยกได้จากใบพืชตระกูลถั่ว. วิทยานิพนธ์ ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาวิชาจุลชีววิทยาทางอุตสาหกรรม ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จิราณีย์ ไชยบุริวงศ์. 2544. การสะสมของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในตะกอน บริเวณเอสทูรีแม่น้ำท่าจีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทาง ทะเล ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชฎาภรณ์ บุญแท้. 2545. การดูดซับโลหะหนักบางชนิดจากน้ำเสียด้วยดินเบา. วิทยานิพนธ์ ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธีรศักดิ์ ใจชื่อตรง และ ธีรารุช พงศ์ประยูร. 2548. การพัฒนาสมบัติของยางธรรมชาติโดยใช้ซิลิกา ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคนิคแอตโมเซลลาร์พอลิเมอไรเซชันกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 18, 2 (พ.ค.- ส.ค. 2551) : 24-32.
- นที วิบูลย์ปัญญากุล และ ปัทมา ศาตราบุตร. 2548. การลดสารมลพิษในน้ำด้วยวัสดุดูดซับที่ ปรับปรุงจากแกลบ. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาเคมี คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปริตตา โรจนวิรุฬห์. 2547. การกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจากน้ำท่า โดยใช้เส้นใยธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการ สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปิยมภรณ์ จารุงศ์. 2545. การดูดซับสารอินทรีย์จากน้ำโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- พจนีย์ จันทมาลี. 2543. ความสามารถของแบคทีเรียที่คัดแยกได้ในการย่อยสลายแอนทราซีนและพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาจุลชีววิทยาทางอุตสาหกรรม ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรเพ็ญ มีทองมูล. 2545. การดูดซับโลหะหนักบางชนิดจากน้ำเสียด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ยุวรัตน์ ประมีศนาภรณ์. 2544. การพัฒนาวัสดุดูดซับจากเปลือกไข่เพื่อกำจัดแคดเมียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุจนิษฐ์ คุ่ยเสงี่ยม. 2544. การกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุพิณ แสงสุข และ พิชญดา เกตุเมฆ. 2549. การเคลือบผิวกระดาษสำหรับการพิมพ์อิงค์เจ็ทด้วยซิลิกาเจลจากซีเถ้าแกลบและคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลสจากชานอ้อย. โครงการวิจัยกองทุน รัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุรัชนา ช้างชายวงศ์. 2549. การดูดซับสารพอลิไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอนจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ออร์กาโนเคลย์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สลักจิต บัวทอง. 2548. การปรับปรุงผิวซิลิกาด้วยพอลิไฮโซพรีนเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของยางธรรมชาติโดยใช้รังสีแกมมาเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาแอตไมเซลล์าร์พอลิเมอไรเซชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- สุเมธ เตชะกุลวิโรจน์. 2546. การใช้ถ่านลอยชานอ้อยมาบำบัดน้ำเสียสีย้อมแล้วนำไปทำคอนกรีตบล็อก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เอกชัย ประภาลิ้มรังสี. 2550. การลดปริมาณกรดฮิวมิกในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านแกลบและวัสดุดูดซับที่ปรับปรุงจากถ่านแกลบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

## ภาษาอังกฤษ

- Akhtar, M., Bhangar, M.I., Iqbal, S. and Hasany, S.M. 2006. Sorption potential of rice husk for the removal of 2,4-dichlorophenol from aqueous solution: Kinetic and thermodynamic investigations. Journal of Hazardous Materials B128: 44-52.
- Bada, S.O., 2007. Adsorption of Phenols onto Fly Ash. Master of Science Thesis Faculty of Engineering and the Built Environment University of the Witwatersrand
- Banerjee, S.S., Joshi, M.V. and Jayaram, V. 2006. Treatment of oil spills using organo-fly ash. Desalination 195: 32-39.
- Banerjee, S.S., Joshi, M.V. and Jayaram, V. 2006. Effect of quaternary ammonium cations on dye sorption to fly ash from aqueous media. Journal of Colloid and Interface Science 303: 477-483.
- Bhatti, I., Qureshi, K., Kazi, R.A., and Ansari, A.K. 2007. Preparation and Characterisation of Chemically Activated Almond Shells by Optimization of Adsorption Parameters for Removal of Chromium VI from Aqueous Solution. World Academy of Science, Engineering and Technology 34: 217-219.
- Chou, K.S., Tsai, J.C. and Lo, C.T. 2001. The adsorption of Congo red and vacuum pump oil by rice hull ash. Bioresource Technology 78: 217-219.
- Chandrasekhar, S., and Pramada, P.N. 2006. Rice husk ash as an adsorbent for methylene blue: effect of ashing temperature. Adsorption 12: 27-43.
- Coelho, E., Ferreira, C., and Almeida C.M. 2008. Analysis of Polynuclear Aromatic Hydrocarbon by SPME-GC-FID in Environmental and Tap Waters. J. Braz. Chem. Soc. Vol. 19 No. 6: 1084-1097.
- Crisafulli, R., Silveira, E.R., Keukeleire, D.D., Milhome, A.L., Cavalcante, R.M. and Nascimento, R.F. 2008. Removal of some polycyclic aromatic hydrocarbons from petrochemical wastewater using low-cost adsorbents of natural origin. Bioresource Technology 99: 4515-4519.
- Lee, S.Y., and Kim, S.J. 2002. Adsorption of naphthalene by HDTMA modified kaolinite and halloysite. Applied Clay Science 22: 55-63.

- Limia, J.M. 1999. Silica Micro-encapsulation: A Technology for the Elimination of the Environmental Impact of Cutting Discharges. Society of Petroleum Engineers 52747.
- Parida, S.K., Dash, S., Patel, S. and Mishra, B.K. 2006. Adsorption of organic molecules on silica surface. Advances in Colloid and Interface Science121: 77-110.
- Quintero, L., Limia, J.M. and Stocks-Fischer, S. 2000. Silica Micro-encapsulation Technology for Treatment of Oil and/or Hydrocarbon Contaminated Drill Cuttings. Society of Petroleum Engineers IADC/SPE 59117
- Sayed, S.A, El Sayed, A.S. and Zayed, A.M. 2004. Removal of oil spills from salt water by magnesium, calcium carbonates and oxides. J. Appl. Sci. Environ. Mgt. 8(1): 71-78
- Wang, S. and Li, H. 2005. Dye adsorption on unburned carbon: Kinetics and equilibrium. Journal of Hazardous Materials B126: 71-77.

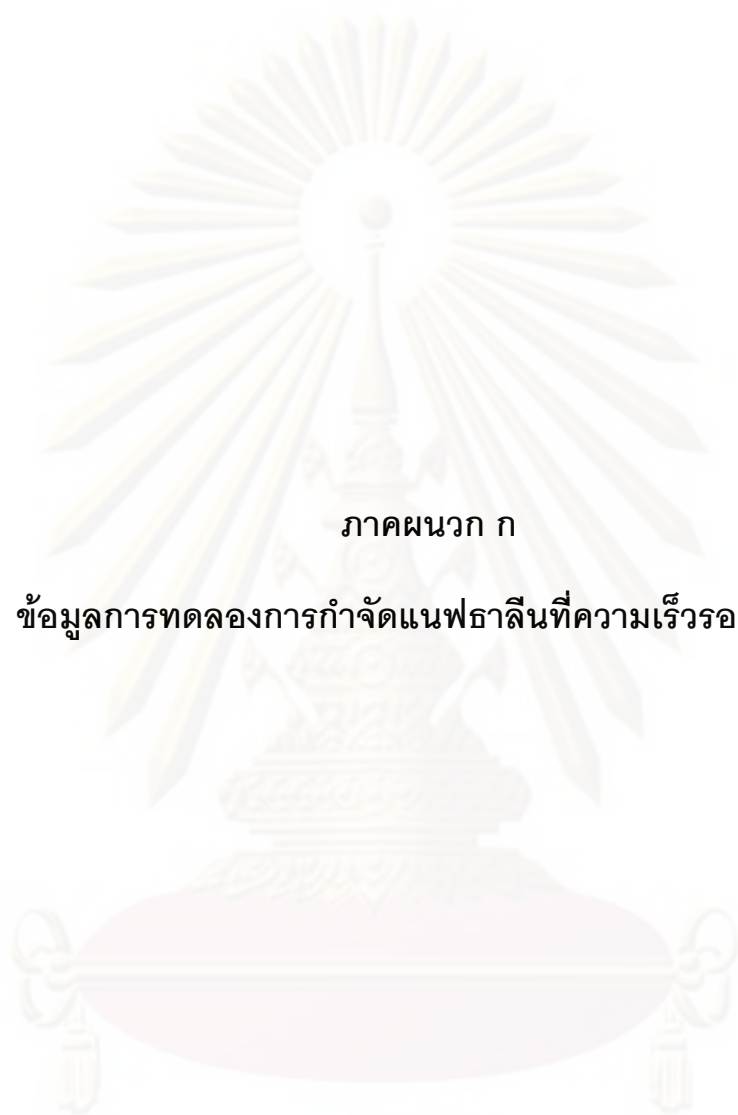


ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลองการกำจัดแอฟธาไลน์ที่ความเร็วรอบต่างๆ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก1 ข้อมูลการทดลองการกำจัดเนฟธาไลน์ที่ระดับความเร็วรอบต่างๆ โดยใช้สารละลายเนฟธาไลน์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และปริมาณสารดูดซับ 0.3 กรัม

สารดูดซับ	ความเร็วรอบ	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)			ปริมาณเนฟธาไลน์หลังการดูดซับ (mg/l)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
ถ้ำกลบ	100	0.076	0.075	0.074	6.42	6.34	6.25	6.34
	150	0.071	0.068	0.072	5.99	5.73	6.08	5.93
	200	0.069	0.070	0.067	5.82	5.91	5.65	5.79
	250	0.065	0.066	0.068	5.47	5.56	5.73	5.59
ถ้ำกลบปรับสภาพผิว	100	0.074	0.073	0.072	6.25	6.16	6.08	6.16
	150	0.068	0.067	0.065	5.73	5.65	5.47	5.62
	200	0.064	0.065	0.063	5.39	5.47	5.30	5.39
	250	0.063	0.062	0.064	5.30	5.22	5.39	5.30
ซีลิกาจากถ้ำกลบ	100	0.112	0.113	0.110	9.53	9.61	9.35	9.50
	150	0.108	0.109	0.108	9.18	9.27	9.18	9.21
	200	0.104	0.106	0.107	8.84	9.01	9.10	8.98
	250	0.103	0.102	0.105	8.75	8.66	8.92	8.78
ซีลิกาปรับสภาพผิว	100	0.055	0.054	0.056	4.61	4.53	4.70	4.61
	150	0.048	0.045	0.047	4.01	3.75	3.92	3.89
	200	0.040	0.043	0.042	3.32	3.58	3.49	3.46
	250	0.041	0.039	0.037	3.41	3.23	3.06	3.23
ถ้ำลอยถ่านหิน	100	0.094	0.096	0.097	7.97	8.15	8.06	8.06
	150	0.092	0.093	0.092	7.80	7.86	7.80	7.80
	200	0.089	0.087	0.090	7.54	7.37	7.63	7.51
	250	0.088	0.089	0.085	7.46	7.54	7.20	7.40
ถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพผิว	100	0.089	0.091	0.090	7.54	7.72	7.63	7.63
	150	0.086	0.085	0.086	7.29	7.20	7.29	7.26
	200	0.084	0.083	0.082	7.11	7.03	6.94	7.03
	250	0.085	0.082	0.081	7.20	6.94	6.85	7.00



ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลองการกำจัดแอฟธาลินที่ช่วงเวลาสัมผัสต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตาราง ข1 ข้อมูลการทดลองการกำจัดแอฟทาลินในช่วงเวลาสัมผัสต่างๆ โดยใช้สารละลายแอฟทาลินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเร็วรอบการเขย่า 250 รอบต่อนาที และปริมาณแก้วแกลบ 0.3 กรัม

เวลาสัมผัส (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)			ปริมาณแอฟทาลินหลังการดูดซับ (mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
10	0.078	0.080	0.077	6.60	6.77	6.51	6.63
20	0.074	0.074	0.075	6.25	6.25	6.34	6.28
30	0.071	0.070	0.069	5.99	5.91	5.82	5.91
40	0.066	0.065	0.066	5.56	5.47	5.56	5.53
50	0.069	0.067	0.065	5.82	5.65	5.47	5.65
60	0.068	0.065	0.067	5.73	5.47	5.65	5.62
70	0.069	0.067	0.068	5.82	5.65	5.73	5.73
80	0.070	0.069	0.068	5.91	5.82	5.73	5.82
90	0.068	0.068	0.066	5.73	5.73	5.56	5.67
100	0.066	0.067	0.065	5.56	5.65	5.47	5.56

ตาราง ข2 ข้อมูลการทดลองการกำจัดแอฟทาลินในช่วงเวลาสัมผัสต่างๆ โดยใช้สารละลายแอฟทาลินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเร็วรอบการเขย่า 250 รอบต่อนาที และปริมาณแก้วเกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว 0.3 กรัม

เวลาสัมผัส (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)			ปริมาณแอฟทาลินหลังการดูดซับ (mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
10	0.073	0.074	0.075	6.16	6.25	6.34	6.25
20	0.072	0.070	0.069	6.08	5.91	5.82	5.94
30	0.066	0.065	0.064	5.56	5.47	5.39	5.47
40	0.064	0.063	0.065	5.39	5.30	5.47	5.53
50	0.062	0.061	0.062	5.22	5.13	5.22	5.19
60	0.060	0.061	0.065	5.04	5.13	5.47	5.21
70	0.063	0.063	0.062	5.30	5.30	5.22	5.27
80	0.064	0.062	0.064	5.39	5.22	5.39	5.33
90	0.064	0.061	0.062	5.39	5.13	5.22	5.25
100	0.065	0.062	0.066	5.47	5.22	5.56	5.42

ตาราง ข3 ข้อมูลการทดลองการกำจัดแอฟลาท็อกซินที่ช่วงเวลาสัมผัสต่างๆ โดยใช้สารละลายแอฟลาท็อกซินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิตร ความเร็วรอบการเขย่า 250 รอบต่อนาที และปริมาณซีลีเนียมจากเถ้าแกลบ 0.3 กรัม

เวลาสัมผัส (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)			ปริมาณแอฟลาท็อกซินหลังการดูดซับ (mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
10	0.112	0.111	0.113	9.53	9.44	9.61	9.53
20	0.113	0.109	0.110	9.61	9.27	9.35	9.41
30	0.110	0.108	0.110	9.35	9.18	9.35	9.29
40	0.105	0.107	0.108	8.92	9.10	9.18	9.07
50	0.104	0.105	0.104	8.84	8.92	8.84	8.87
60	0.103	0.102	0.101	8.75	8.66	8.58	8.66
70	0.103	0.104	0.102	8.75	8.84	8.66	8.75
80	0.101	0.101	0.103	8.58	8.58	8.75	8.64
90	0.104	0.102	0.105	8.84	8.66	8.92	8.81
100	0.101	0.103	0.104	8.58	8.75	8.84	8.72

**ตาราง ข4** ข้อมูลการทดลองการกำจัดแอฟลาท็อกซินที่ช่วงเวลาสัมผัสต่างๆ โดยใช้สารละลายแอฟลาท็อกซินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเร็วรอบการเขย่า 250 รอบต่อนาที และปริมาณซีลีกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว 0.3 กรัม

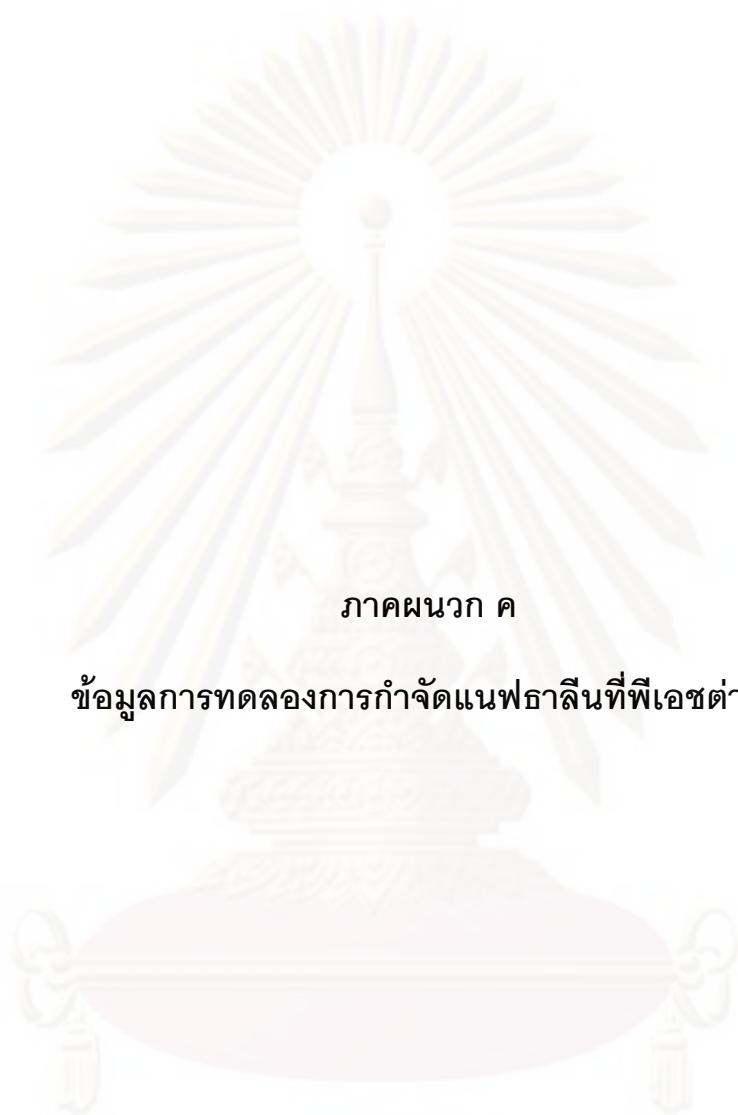
เวลาสัมผัส (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)			ปริมาณแอฟลาท็อกซินหลังการดูดซับ (mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
10	0.050	0.052	0.053	4.18	4.35	4.44	4.32
20	0.048	0.047	0.049	4.01	3.92	4.10	4.01
30	0.043	0.045	0.043	3.58	3.75	3.58	3.64
40	0.041	0.040	0.042	3.41	3.32	3.50	3.41
50	0.038	0.039	0.042	3.15	3.23	3.49	3.29
60	0.041	0.040	0.039	3.41	3.32	3.23	3.32
70	0.040	0.044	0.043	3.32	3.66	3.58	3.52
80	0.043	0.042	0.039	3.58	3.50	3.23	3.44
90	0.045	0.044	0.042	3.75	3.66	3.49	3.63
100	0.041	0.041	0.043	3.41	3.41	3.58	3.47

ตาราง ข5 ข้อมูลการทดลองการกำจัดแอฟลาท็อกซินที่ช่วงเวลาดมผัสต่างๆ โดยใช้สารละลายแอฟลาท็อกซินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเร็วรอบการเขย่า 250 รอบต่อนาที และปริมาณเถ้าลอยถ่านหิน 0.3 กรัม

เวลาดมผัส (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)			ปริมาณแอฟลาท็อกซินหลังการดูดซับ (mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
10	0.100	0.099	0.102	8.49	8.41	8.66	8.52
20	0.098	0.100	0.098	8.32	8.49	8.32	8.38
30	0.095	0.094	0.093	8.06	7.97	7.89	7.97
40	0.091	0.095	0.092	7.72	8.06	7.80	7.86
50	0.089	0.087	0.086	7.54	7.37	7.29	7.40
60	0.088	0.086	0.089	7.46	7.29	7.54	7.43
70	0.090	0.087	0.087	7.63	7.37	7.37	7.46
80	0.089	0.087	0.090	7.54	7.37	7.63	7.51
90	0.088	0.091	0.089	7.46	7.72	7.54	7.57
100	0.089	0.088	0.088	7.54	7.46	7.46	7.49

**ตาราง ข6** ข้อมูลการทดลองการกำจัดแอฟลาท็อกซินในช่วงเวลาสัมผัสต่างๆ โดยใช้สารละลายแอฟลาท็อกซินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิตร ความเร็วรอบการเขย่า 250 รอบต่อนาที และปริมาณเถ้าลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว 0.3 กรัม

เวลาสัมผัส (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)			ปริมาณแอฟลาท็อกซินหลังการดูดซับ (mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
10	0.098	0.097	0.095	8.32	8.23	8.06	8.20
20	0.093	0.092	0.094	7.89	7.80	7.97	7.89
30	0.089	0.090	0.087	7.54	7.63	7.37	7.51
40	0.084	0.085	0.087	7.11	7.20	7.37	7.23
50	0.081	0.083	0.084	6.85	7.03	7.11	7.00
60	0.082	0.081	0.081	6.94	6.85	6.85	6.88
70	0.082	0.083	0.082	6.94	7.03	6.94	6.97
80	0.083	0.082	0.081	7.03	6.94	6.85	6.94
90	0.080	0.083	0.082	6.77	7.03	6.94	6.91
100	0.083	0.083	0.085	7.03	7.03	7.20	7.08



ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดลองการกำจัดแอฟธาลีนที่พีเอชต่างๆ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค1 ข้อมูลการทดลองการกำจัดเนฟธาซีนที่ระดับความเร็วรอบต่างๆ โดยใช้สารละลายเนฟธาซีนเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเร็วรอบการเขย่า 250 รอบต่อนาที เวลา 60 นาที และปริมาณสารดูดซับ 0.3 กรัม

สารดูดซับ	ค่า pH	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)			ปริมาณเนฟธาซีนหลังการดูดซับ (mg/l)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
ถ้ำแกลบ	2	0.053	0.055	0.056	4.44	4.61	4.70	4.58
	4	0.061	0.063	0.063	5.13	5.30	5.30	5.24
	6	0.067	0.066	0.065	5.65	5.56	5.47	5.65
	8	0.070	0.072	0.074	5.91	6.08	6.25	6.08
	10	0.072	0.073	0.075	6.08	6.16	6.34	6.19
ถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว	2	0.052	0.050	0.051	4.35	4.18	4.27	4.27
	4	0.059	0.060	0.059	4.96	5.04	4.96	4.99
	6	0.063	0.062	0.064	5.30	5.22	5.39	5.30
	8	0.069	0.068	0.067	5.82	5.73	5.65	5.73
	10	0.067	0.069	0.070	5.65	5.82	5.91	5.79
ซีลิกาจากถ้ำแกลบ	2	0.098	0.096	0.095	8.32	8.15	8.06	8.18
	4	0.099	0.098	0.100	8.41	8.32	8.49	8.41
	6	0.100	0.101	0.103	8.49	8.58	8.75	8.61
	8	0.105	0.104	0.106	8.92	8.84	9.01	8.92
	10	0.106	0.107	0.109	9.01	9.10	9.27	9.13
ซีลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว	2	0.028	0.027	0.026	2.29	2.20	2.11	2.20
	4	0.035	0.034	0.037	2.89	2.80	3.06	2.92
	6	0.042	0.041	0.040	3.49	3.41	3.32	3.41
	8	0.046	0.045	0.043	3.84	3.75	3.58	3.72
	10	0.048	0.049	0.050	4.01	4.10	4.18	4.10
ถ้ำลอยถ่านหิน	2	0.076	0.073	0.075	6.42	6.16	6.34	6.31
	4	0.080	0.079	0.078	6.77	6.68	6.60	6.68
	6	0.086	0.085	0.087	7.29	7.20	7.37	7.29
	8	0.091	0.090	0.088	7.72	7.63	7.46	7.60
	10	0.092	0.089	0.093	7.80	7.54	7.89	7.74



ตาราง ค1 (ต่อ) ข้อมูลการทดลองการกำจัดเนฟธาซีนที่ระดับความเร็วรอบต่างๆ โดยใช้สารละลายเนฟธาซีนเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเร็วรอบการเขย่า 250 รอบต่อนาที เวลา 60 นาที และปริมาณสารดูดซับ 0.3 กรัม

สารดูดซับ	ค่า pH	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)			ปริมาณเนฟธาซีนหลังการดูดซับ (mg/l)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
ถ่านลอย	2	0.069	0.070	0.071	5.82	5.91	5.99	5.91
ถ่านหินที่	4	0.076	0.074	0.078	6.42	6.25	6.60	6.42
ผ่านการ	6	0.080	0.082	0.079	6.77	6.94	6.68	6.80
ปรับ	8	0.084	0.085	0.086	7.11	7.20	7.29	7.20
สภาพผิว	10	0.088	0.086	0.087	7.46	7.29	7.37	7.37



ภาคผนวก ง

ข้อมูลการศึกษาสัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแวนธาซีนในสารละลายที่มีต่อ  
ประสิทธิภาพการดูดซับ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง1 ข้อมูลการทดลองการกำจัดแอฟธาไลน์โดยใช้เถ้าแกลบปริมาณต่างๆ ที่สารละลายแอฟธาไลน์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร pH 2 ความเร็วรอบการเขย่า 250 รอบต่อนาที และเวลา 60 นาที

ปริมาณ (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)			ปริมาณแอฟธาไลน์หลังการดูดซับ (mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.1	0.072	0.073	0.071	6.08	6.16	5.99	6.08
0.2	0.066	0.063	0.064	5.56	5.30	5.39	5.42
0.3	0.053	0.054	0.052	4.44	4.53	4.35	4.44
0.4	0.044	0.044	0.045	3.66	3.66	3.75	3.69
0.5	0.043	0.042	0.041	3.58	3.49	3.41	3.49
0.6	0.039	0.038	0.039	3.23	3.15	3.23	3.20
0.7	0.036	0.034	0.032	2.97	2.80	2.63	2.80
0.8	0.032	0.033	0.034	2.63	2.72	2.80	2.72
0.9	0.034	0.035	0.035	2.80	2.89	2.89	2.86
1.0	0.035	0.032	0.033	2.89	2.63	2.72	2.75

ตาราง ง2 ข้อมูลการทดลองการกำจัดแอฟลาท็อกซินโดยใช้เถ้าแกลบที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ปริมาณต่างๆ ที่สารละลายแอฟลาท็อกซินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร pH 2 ความเร็วรอบการเขย่า 250 รอบต่อนาที และเวลา 60 นาที

ปริมาณ (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)			ปริมาณแอฟลาท็อกซินหลังการดูดซับ (mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.1	0.069	0.069	0.068	5.82	5.82	5.73	5.79
0.2	0.060	0.059	0.061	5.04	4.96	5.13	5.04
0.3	0.050	0.051	0.048	4.19	4.27	4.01	4.16
0.4	0.040	0.041	0.042	3.32	3.41	3.49	3.41
0.5	0.039	0.040	0.038	3.23	3.32	3.15	3.23
0.6	0.034	0.033	0.032	2.80	2.72	2.63	2.72
0.7	0.030	0.028	0.032	2.46	2.29	2.63	2.46
0.8	0.032	0.030	0.031	2.63	2.46	2.54	2.54
0.9	0.030	0.032	0.029	2.46	2.63	2.37	2.49
1.0	0.031	0.031	0.029	2.54	2.54	2.37	2.48

ตาราง ง3 ข้อมูลการทดลองการกำจัดเนฟธาซีนโดยใช้ซิลิกาจากเถ้าแกลบปริมาณต่างๆ ที่สารละลายเนฟธาซีนเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร pH 2 ความเร็วรอบการเขย่า 250 รอบต่อนาที และเวลา 60 นาที

ปริมาณ (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)			ปริมาณเนฟธาซีนหลังการดูดซับ (mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.1	0.104	0.104	0.105	8.84	8.84	8.92	8.87
0.2	0.101	0.100	0.102	8.58	8.49	8.66	8.58
0.3	0.097	0.098	0.096	8.23	8.32	8.15	8.27
0.4	0.096	0.096	0.095	8.15	8.15	8.06	8.12
0.5	0.093	0.094	0.093	7.89	7.97	7.89	7.92
0.6	0.092	0.090	0.089	7.80	7.63	7.54	7.66
0.7	0.091	0.089	0.088	7.72	7.54	7.46	7.57
0.8	0.088	0.090	0.088	7.46	7.63	7.46	7.52
0.9	0.090	0.091	0.089	7.63	7.72	7.54	7.63
1.0	0.089	0.088	0.090	7.54	7.46	7.63	7.54

ตาราง ง4 ข้อมูลการทดลองการกำจัดแอฟธาลินโดยใช้ซิลิกาที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวปริมาณต่างๆ ที่สารละลายแอฟธาลินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร pH 2 ความเร็วรอบการเขย่า 250 รอบต่อนาที และเวลา 60 นาที

ปริมาณ (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)			ปริมาณแอฟธาลินหลังการดูดซับ (mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.1	0.040	0.042	0.049	3.58	3.49	3.41	3.49
0.2	0.030	0.029	0.032	2.46	2.37	2.63	2.49
0.3	0.026	0.025	0.024	2.11	2.03	1.94	2.03
0.4	0.021	0.020	0.022	1.68	1.60	1.77	1.68
0.5	0.015	0.016	0.012	1.16	1.25	0.91	1.11
0.6	0.008	0.006	0.007	0.56	0.39	0.47	0.47
0.7	0.010	0.008	0.007	0.73	0.56	0.47	0.59
0.8	0.008	0.011	0.010	0.56	0.82	0.73	0.70
0.9	0.007	0.006	0.009	0.47	0.39	0.65	0.50
1.0	0.008	0.009	0.010	0.56	0.65	0.73	0.65

ตาราง ง5 ข้อมูลการทดลองการกำจัดแอฟลาท็อกซินโดยใช้เถ้าลอยถ่านหินปริมาณต่างๆ ที่สารละลายแอฟลาท็อกซินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร pH 2 ความเร็วรอบการเขย่า 250 รอบต่อนาที และเวลา 60 นาที

ปริมาณ (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)			ปริมาณแอฟลาท็อกซินหลังการดูดซับ (mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.1	0.091	0.090	0.092	7.72	7.63	7.80	7.72
0.2	0.079	0.080	0.082	6.68	6.77	6.94	6.80
0.3	0.076	0.077	0.074	6.42	6.51	6.25	6.39
0.4	0.069	0.070	0.071	5.82	5.91	5.99	5.91
0.5	0.068	0.067	0.068	5.73	5.65	5.73	5.70
0.6	0.064	0.065	0.061	5.39	5.47	5.13	5.33
0.7	0.060	0.061	0.062	5.04	5.13	5.22	5.13
0.8	0.063	0.064	0.065	5.30	5.39	5.47	5.39
0.9	0.059	0.061	0.060	4.96	5.13	5.04	5.04
1.0	0.061	0.059	0.061	5.13	4.96	5.13	5.07

ตาราง ง6 ข้อมูลการทดลองการกำจัดแอฟธาไลน์โดยใช้เถ้าลอยถ่านหินที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวปริมาณต่างๆ ที่สารถละลายแอฟธาไลน์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร pH 2 ความเร็วรอบการเขย่า 250 รอบต่อนาที และเวลา 60 นาที

ปริมาณ (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)			ปริมาณแอฟธาไลน์หลังการดูดซับ (mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.1	0.085	0.085	0.086	7.20	7.20	7.29	7.23
0.2	0.076	0.077	0.074	6.42	6.51	6.25	6.39
0.3	0.070	0.071	0.068	5.91	5.99	5.73	5.88
0.4	0.062	0.063	0.060	5.22	5.30	5.04	5.19
0.5	0.068	0.067	0.068	5.73	5.65	5.73	5.70
0.6	0.061	0.060	0.059	5.13	5.04	4.96	5.04
0.7	0.053	0.054	0.057	4.44	4.53	4.79	4.59
0.8	0.056	0.055	0.057	4.70	4.61	4.79	4.70
0.9	0.054	0.055	0.056	4.53	4.61	4.70	4.61
1.0	0.055	0.054	0.054	4.61	4.53	4.53	4.56





ภาคผนวก จ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ๑1 เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) รุ่น Philips model PW2400



รูปที่ ๑2 เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) รุ่น Bruker AXS Model D8 Discover



รูปที่ ๑3 เครื่อง FTIR รุ่น Perkin Elmer (Spectrum one)



รูปที่ ๑4 เครื่อง Specific Surface Area Analyzer รุ่น Autosorb 1



รูปที่ ๑5 เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer รุ่น Shimadzu UV-160A



รูปที่ ๑6 เครื่อง CHN Elemental Analyzer รุ่น Leco CHN-2000



รูปที่ ๑7 เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) รุ่น Joel 6400



รูปที่ ๑8 เครื่องเขย่าแนวราบ รุ่น GFL 3005



รูปที่ ๑9 เครื่องปั่นเหวี่ยงแยก รุ่น IEC Centra-HN



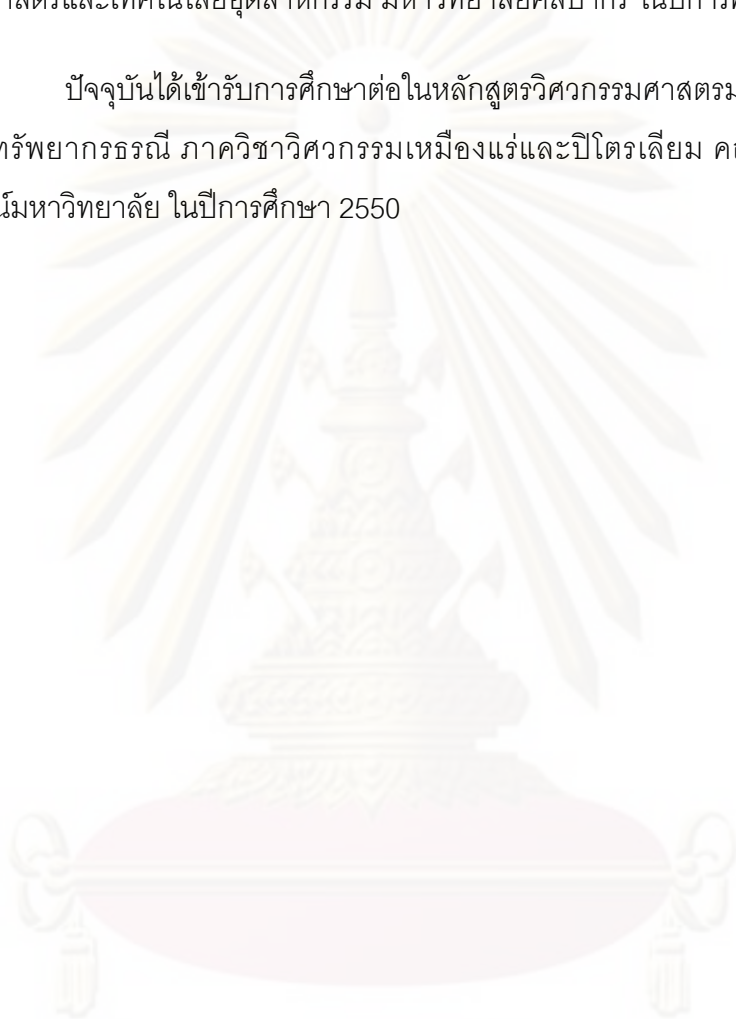
รูปที่ ๑10 เครื่องวัดความเป็น กรด-ด่าง (พีเอชมิเตอร์) รุ่น Precisa pH 900

ศูนย์วิทยาศาสตร์การ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจักรพงษ์ ศศิธร เกิดวันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาและมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเซนต์คาเบรียล และระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2549

ปัจจุบันได้เข้ารับการศึกษต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย