

การใช้ประโยชน์แก๊สออกซิเจนในการดูดซับสารไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในน้ำ

นางสาว อภิญญา นิลยง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZATION OF BAGASSE FLY ASH FOR ADSORPTION OF HYDROCARBONS
CONTAMINATION IN WATER



Miss Apinya Ninyong

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

อภิญา นิลยง : การใช้ประโยชน์เถ้าลอยขานอ้อยในการดูดซับสารไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในน้ำ. (UTILIZATION OF BAGASSE FLY ASH FOR ADSORPTION OF HYDROCARBONS CONTAMINATION IN WATER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.ดาววัลย์ วิวรรณะเดช, 96 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ประโยชน์เถ้าลอยขานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงไฟฟ้าชีวมวล สำหรับดูดซับสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในน้ำ สำหรับเถ้าลอยขานอ้อยที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นวัสดุเหลือใช้ที่ได้จากการผลิตไฟฟ้าในอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลแห่งหนึ่งในประเทศไทย จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขานอ้อย ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) พบว่า มีซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก จึงมีความคาดหวังที่จะใช้เถ้าลอยขานอ้อยมาเป็นสารดูดซับหรือวัสดุเติมสำหรับการสกัดซิลิกาจากการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาซีน (Naphthalene) ซึ่งใช้เป็นตัวแทนสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนด้วยเถ้าลอยขานอ้อย และซิลิกาที่สกัดจากเถ้าลอยขานอ้อย ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyltrimethylammoniumbromide, CTAB) พบว่า สารดูดซับแต่ละชนิดให้ประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาซีนใกล้เคียงกัน เมื่อใช้สารละลายแนฟธาซีนความเข้มข้นตั้งต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 2-10 ทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 100-250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10-100 นาที โดยใช้สัดส่วนโดยน้ำหนักของสารดูดซับต่อปริมาณแนฟธาซีนเท่ากับ 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ และพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับของสารดูดซับที่ทำการศึกษา คือ การใช้สารดูดซับ 0.4 กรัมต่อ 1 มิลลิกรัมแนฟธาซีน (ยกเว้นกรณีเถ้าลอยขานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว จะใช้สัดส่วนสูงถึง 0.7 - 0.8) ในสารละลาย pH 2 ทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที ส่วนผลการศึกษาพฤติกรรมดูดซับแนฟธาซีน พบว่าเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตามด้วย CTAB และซิลิกาจากเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย CTAB สอดคล้องกับทฤษฎีการดูดซับทั้งแบบฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm) และแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) กล่าวคือ เป็นการดูดซับทั้งแบบชั้นเดียวและหลายชั้นผสมกัน

ภาควิชา..วิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม.....ลายมือชื่อนิสิต..อภิญา นิลยง.....ศึกษานิพนธ์.....
 สาขาวิชา..วิศวกรรมทรัพยากรธรณี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา...2553.....

5270567621 : MAJOR GEORESOURCES ENGINEERING

KEYWORDS : PAHs / NAPHTHALENE / BAGASSE FLY ASH / ADSORPTION / CTAB

APINYA NINYONG : UTILIZATION OF BAGASSE FLY ASH FOR ADSORPTION OF
HYDROCARBONS CONTAMINATION IN WATER. ADVISOR :
ASSOC.PROF.DAWAN WIWATTANADATE, Ph.D., 96 pp.

Utilization of bagasse fly ash, a waste from biomass power plant, as an adsorbent for adsorption of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contamination in water was investigated and presented in this paper. The bagasse fly ash (BFA) was collected from a sugar industry of Thailand. Chemical composition of the BFA characterized by X-Ray Fluorescence shows SiO_2 as a major content. Therefore, it is expected to be utilized as an alternative adsorbent and/or silica raw material. BFA as well as silica extracted from the BFA, with and without surface treatment, was comparatively investigated for adsorption of PAHs contamination in water by using naphthalene as a PAHs representative, and cetyltrimethylammoniumbromide (CTAB) as a surface treating agent. Adsorption efficiency affected by various factors, such as effect of shaking rate, shaking time, solution pH, and adsorbent-naphthalene weight ratio were comparatively investigated. Results of the study indicated that all adsorbents exhibited similar adsorption efficiency when using naphthalene initial concentration of 10 mg/l at pH 2-10, shaking with 0.4-1.0 weight ratios of each adsorbent at 100-250 rpm for 10-100 minutes. An optimize condition for all adsorbents were observed to be using 0.4 g adsorbent in 100 ml of 10 mg/l naphthalene solution (except the case of BFA without surface treatment was observed to be 0.7-0.8 weight ratios) at pH 2 and shaking the solution at 250 rpm for 40 minutes. Both Freundlich and Langmuir isotherms was observed to fit with data for the naphthalene adsorption with either BFA treated with hydrogen peroxide or silica from BFA treated with CTAB. Hence, the adsorption behavior is considered as both monolayer and multilayer.

Department : Mining and Petroleum Engineering

Student's Signature Apinya Ninyong

Field of Study : Georesources Engineering

Advisor's Signature Dawan W.

Academic Year : 2010

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ เนื่องด้วยความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ จากหลายๆ ฝ่าย ทางผู้วิจัยต้องขอขอบคุณบุคคลและองค์กรต่างๆ ซึ่งให้ความสนับสนุนและช่วยเหลือในทุกด้าน จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ดังต่อไปนี้

รศ.ดร.ดาววัลย์ วิวรรณเดชะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำ และคอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ทั้งด้านวิชาการ ด้านการติดต่อประสานงาน รวมถึงการตรวจแก้ไขข้อผิดพลาดในการทำวิจัย ตลอดจนคอยให้คำแนะนำและกำลังใจในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นเสมอ

ผศ.ดร.สุรพล ภูวิจิตร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้คำปรึกษาแนะนำด้านวิชาการ และขอเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน อ.ดร.พิพัฒน์ เหล่าวัฒนบัณฑิต และผศ.ดร.สุภางค์ จุฬาลักษณ์านุกูล ที่ให้ข้อเสนอแนะต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์

คุณพงศ์ธร รุ่งเจริญ คุณอุทิศ ทองกลิ้ง และคุณระวิน อยู่ใจ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม ที่คอยให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทำงานวิจัยและวิเคราะห์ตัวอย่างเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ผศ.ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัยจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดีมาโดยตลอด

พี่ๆ เพื่อนๆ ปริญญาโท และน้องๆ ปริญญาตรี ทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือให้คำปรึกษา และกำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อคุณแม่ที่คอยดูแลให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน รวมทั้งคอยเป็นกำลังใจให้โดยตลอดจนสำเร็จการศึกษาได้ด้วยดี

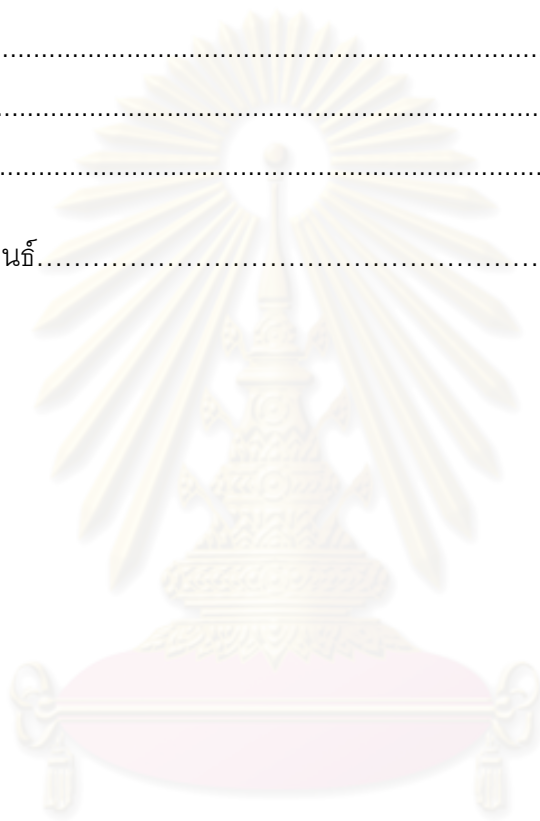
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน.....	3
2.1.1 แหล่งที่มาของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม.....	3
2.1.2 การแพร่กระจายของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม.....	4
2.1.3 ความเป็นพิษของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน....	5
2.1.4 แนนพาทาลีน.....	7
2.2 ชีวมวล(Biomass).....	7
2.2.1 วัตถุดิบชีวมวล.....	7
2.2.2 องค์ประกอบชีวมวล.....	9
2.2.3 ชานอ้อย(Bagasse).....	10
2.2.4 เถ้าลอยชานอ้อย(Bagasse Fly Ash).....	10

บทที่	หน้า
2.2.5 ซิลิกา(Silica).....	11
2.3 การปรับสภาพพื้นผิวของสารดูดซับด้วยสารปรับสภาพผิว.....	12
2.3.1 สารปรับสภาพผิว(Surface Treating Agent).....	12
2.3.2 เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมแอมโมเนียมโบรไมด์.....	13
2.4 การดูดซับ(Adsorption).....	14
2.4.1 สารดูดซับ.....	14
2.4.2 ประเภทของสารดูดซับ.....	15
2.4.3 ผลึกดูดความชื้น.....	16
2.4.4 ประโยชน์การดูดซับ.....	18
2.4.5 กลไกการดูดซับ.....	18
2.4.6 ประเภทของการดูดซับ.....	19
2.4.7 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ.....	20
2.4.8 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	21
2.4.9 ไอโซเทอมของการดูดซับ.....	23
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	34
3.1 ขั้นตอนการวิจัย.....	34
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	34
3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	34
3.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	35
3.4.1 การศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสารดูดซับ.....	35
3.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณแนฟธาลีนในสารละลาย.....	35
3.4.3 การศึกษาแนวทางการปรับสภาพผิวสารดูดซับด้วยสารปรับสภาพผิว....	36
3.4.4 การศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสารดูดซับหลังปรับสภาพผิว.....	37

บทที่	หน้า
3.4.5 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับแอฟธาไลน์.....	37
3.4.5.1 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วยวรอบที่ใช้ในการเขย่า.....	37
3.4.5.2 ศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัส.....	38
3.4.5.3 ศึกษาอิทธิพลของค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ.....	39
3.4.5.4 ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแอฟธาไลน์.....	40
3.4.5.5 ศึกษาอิทธิพลของการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ.....	40
4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	42
4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสารดูดซับ.....	42
4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับ.....	42
4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของสารดูดซับ.....	45
4.1.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและลักษณะรูปร่างพื้นผิวของสารดูดซับ.....	47
4.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะหมู่ฟังก์ชันของสารดูดซับ.....	48
4.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายแอฟธาไลน์.....	52
4.3 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับแอฟธาไลน์.....	53
4.3.1 อิทธิพลของความเร็วยวรอบในการเขย่า.....	53
4.3.2 อิทธิพลของช่วงเวลาสัมผัส.....	53
4.3.3 อิทธิพลของค่า pH.....	55
4.3.4 ผลการศึกษาสัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแอฟธาไลน์.....	55
4.3.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ.....	57
4.3.6 ประสิทธิภาพการดูดซับแอฟธาไลน์ด้วยถ้ำลอยชานอ้อยเปรียบเทียบกับ ถ้ำลอยแกลบ.....	58
4.3.7 ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ.....	59
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	67
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	67
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	70

บทที่	หน้า
รายการอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก.....	76
ภาคผนวก ก.....	77
ภาคผนวก ข.....	79
ภาคผนวก ค.....	86
ภาคผนวก ง.....	89
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	96



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การเปรียบเทียบประเภทการดูดซับ.....	20
2.2	การเปรียบเทียบความแข็งแรงของพันธะ.....	21
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขาน้อย.....	42
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขาน้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิว.....	43
4.3	องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาจากเถ้าลอยขาน้อย.....	44
4.4	ผลการวิเคราะห์การหาพื้นที่ผิวของสารดูดซับ.....	47
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแนฟธาลีนกับค่าการดูดกลืนแสง	53
4.6	ตารางเปรียบเทียบลักษณะของเถ้าลอยขาน้อยและเถ้าลอยกลับ.....	59
4.7	แสดงสมการของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชและแลงเมียร์ของตัวดูดซับ ชนิดต่างๆ	65

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างและชื่อเรียกเฉพาะของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน.....	6
2.2 โครงสร้างโมเลกุลของแนฟทาลีน.....	7
2.3 แหล่งที่มาของชีวมวล.....	8
2.4 ลักษณะโครงสร้างของสารปรับสภาพผิว.....	13
2.5 ลักษณะโครงสร้างของเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์.....	14
2.6 กลไกการดูดซับและคายซับ.....	19
2.7 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์.....	24
2.8 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช.....	26
3.1 ขั้นตอนการสกัดซิลิกาจากเถ้าลอยชานอ้อย.....	37
4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของเถ้าลอยชานอ้อย.....	44
4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิว.....	46
4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซิลิกาจากเถ้าลอยชานอ้อย....	47
4.4 ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของเถ้าลอยชานอ้อยที่กำลังขยาย 1000 และ 5000 เท่า.	48
4.5 ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของซิลิกาจากเถ้าลอยชานอ้อยที่กำลังขยาย 1000 และ 5000 เท่า.....	48
4.6 แสดงสเปกตรัม FTIR ของเถ้าลอยชานอ้อย.....	49
4.7 แสดงสเปกตรัม FTIR ของเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย CTAB.....	50
4.8 แสดงสเปกตรัม FTIR ของเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย H ₂ O ₂	50
4.9 แสดงสเปกตรัม FTIR ของเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย H ₂ O ₂ และ CTAB.....	51
4.10 แสดงสเปกตรัม FTIR ของซิลิกาจากเถ้าลอยชานอ้อย.....	51
4.11 แสดงสเปกตรัม FTIR ของซิลิกาจากเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย CTAB.....	52

ภาพที่	หน้า
4.12 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแอฟธาไลน์กับค่าการดูดกลืนแสง.....	53
4.13 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับแอฟธาไลน์ด้วยสารดูดซับแต่ละชนิดที่ความเร็วรอบต่างๆ กัน.....	54
4.14 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับแอฟธาไลน์ด้วยตัวดูดซับแต่ละชนิดที่ช่วงเวลาสัมผัสต่างๆ กัน.....	54
4.15 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับแอฟธาไลน์ด้วยตัวดูดซับแต่ละชนิดที่ค่า pH ต่างๆ.....	56
4.16 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับแอฟธาไลน์ด้วยตัวดูดซับแต่ละชนิดที่สัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแอฟธาไลน์ต่างๆ กัน.....	56
4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ.....	58
4.18 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ้ำลอยซานอ้อย.....	60
4.19 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของถ้ำลอยซานอ้อย.....	60
4.20 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ้ำลอยซานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์.....	60
4.21 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของถ้ำลอยซานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์.....	61
4.22 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ้ำลอยซานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	61
4.23 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของถ้ำลอยซานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	61
4.24 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ้ำลอยซานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์.....	62
4.25 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของถ้ำลอยซานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์.....	62
4.26 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของซิลิกาจากถ้ำลอยซานอ้อย.....	62
4.27 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของซิลิกาจากถ้ำลอยซานอ้อย.....	63

ภาพที่		หน้า
4.28	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของซิลิกาจากถ้ำลอยซานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์.....	63
4.29	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของซิลิกาจากถ้ำลอยซานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์.....	63
4.30	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของสารดูดซับทุกตัว.....	64
4.31	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของสารดูดซับทุกตัว.....	64



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันหลายประเทศ รวมทั้งประเทศไทย กำลังประสบปัญหาวิกฤติคุณภาพน้ำ ทั้งด้านปริมาณและคุณภาพ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการปล่อยมลพิษทั้งที่เป็นสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอินทรีย์ ลงสู่แหล่งน้ำ สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, PAHs) ก็อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าว สารเหล่านี้เมื่อมีโอกาสปนเปื้อนลงในแหล่งน้ำ มักจะแขวนลอยอยู่ในน้ำ ขณะที่สลายตัวเองตามธรรมชาติได้ยาก จำเป็นต้องหาวิธีการกำจัดที่เหมาะสม ซึ่งการกำจัดสารประกอบ PAHs ออกจากน้ำ มีหลายวิธีการด้วยกัน เช่น การดูดซับ การกลั่นแยก และการตกตะกอน เป็นต้น (Mukherjee, Kumar, Misra and Fan, 2007) แต่ในหลายวิธีการเหล่านั้น วิธีที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการกำจัดมากที่สุด คือการดูดซับ ซึ่งในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำนั้น ส่วนใหญ่นิยมใช้ถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูงเป็นสารดูดซับ แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาค่อนข้างสูง จึงได้มีการศึกษาวิจัยวัสดุที่มีในท้องถิ่นและมีราคาถูกกว่ามาทดแทน และมีการศึกษาพบว่าซิลิกาจากเถ้าลอยแกลบ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง มีคุณสมบัติเป็นสารดูดซับที่ดีสำหรับการกำจัดสารประกอบ PAHs ที่ปนเปื้อนในน้ำ (Sasithorn, Wiwattanadate, and Sangsuk, 2010) ขณะที่เถ้าลอยขานอ้อย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้ขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิง ก็เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีองค์ประกอบซิลิกาค่อนข้างสูงและมีผลการศึกษาพบว่ามีความเหมาะสมเป็นสารดูดซับที่ดีสำหรับสารเคมีอันตราย เช่น กำจัดสารโลหะหนัก ในน้ำเสีย เป็นต้น (พัชรินทร์ วรรณกุล, 2553: 39-43)

งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะนำเถ้าลอยขานอ้อยมาใช้เป็นสารดูดซับสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ โดยเริ่มจากการศึกษาสมบัติกายภาพของเถ้าลอยขานอ้อย ซึ่งได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี ขนาดอนุภาค และพื้นที่ผิว เป็นต้น รวมถึงศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับด้วยการปรับสภาพผิวเถ้าอนุภาค และการสกัดซิลิกาจากเถ้าลอยขานอ้อย ซึ่งจะเป็นการเพิ่มมูลค่าเถ้าลอยขานอ้อยอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำเถ้าลอยขานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้ขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิง มาเป็นสารดูดซับแนฟธาลิน ซึ่งใช้เป็นตัวแทนสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ โดยมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ดังนี้

1.2.1 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาซีนด้วยเถ้าลอยชานอ้อยจากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิง

1.2.2 ศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของเถ้าลอยชานอ้อย

1.2.3 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับแนฟธาซีนด้วยเถ้าลอยชานอ้อย เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสารดูดซับ เช่น การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับโดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer(XRF) การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของสารดูดซับโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer(XRD) การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและสภาพความพรุนของสารดูดซับโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope(SEM) การวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวโดยใช้เครื่อง Specific Surface Area Analyzer และการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารดูดซับโดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer(FTIR)

1.3.2 ศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับด้วยการปรับสภาพผิวเถ้าลอยชานอ้อยและการสกัดซิลิกาจากเถ้าลอยชานอ้อย

1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ เช่น ความเร็วรอบการเขย่าของผสมระหว่างสารละลายแนฟธาซีนกับสารดูดซับ ช่วงเวลาการสัมผัส ค่า pH สัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแนฟธาซีน เป็นต้น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเพิ่มมูลค่าเถ้าลอยชานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงานน้ำตาลได้

1.4.2 เป็นแนวทางลดต้นทุนในการกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในน้ำได้ เนื่องจากสารดูดซับที่ใช้ในการทดลองมีราคาถูกกว่าสารดูดซับที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป

1.4.3 สามารถนำข้อมูลจากงานวิจัยไปประยุกต์ใช้กับวัสดุเหลือใช้อื่นๆ ได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน หรือเรียกอย่างย่อว่าสารพี เอ เอช (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) ประกอบด้วย คาร์บอนและไฮโดรเจน ที่ประกอบกันเป็นอะโรมาติก เบนซีนหลายวงเชื่อมต่อกัน อาจมีชื่อเรียกแตกต่างกันไปได้ เช่น โพลีนิวเคลียร์อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน หรือเรียกอย่างย่อว่าสารพี เอ็น เอ (Polynuclear Aromatic Hydrocarbon, PNA) ส่วนใหญ่เป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Non-polar molecule) จึงละลายน้ำได้น้อย แต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ สามารถดูดกลืนแสงอุลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 200 – 400 นาโนเมตรได้ สารกลุ่มนี้มีความเป็นพิษและเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogenic compound) ซึ่งได้รับการยอมรับว่า ทำให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ได้ หากได้รับการสัมผัสทางผิวหนังก็อาจก่อให้เกิดมะเร็งที่ผิวหนัง หากได้รับการสูดดมเข้าไปก็อาจก่อให้เกิดมะเร็งที่ปอด โดยจากการศึกษาของ US Environmental Protection Agency (US.EPA) ซึ่งติดตามและตรวจสอบการเป็นสารก่อมะเร็งของสารจำพวกโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน พบว่า มีผลเป็นสารก่อมะเร็งสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ในสัตว์ทดลองหลายชนิด เช่น หนูและปลา อาจทำให้หนูที่กำลังตั้งครรรภ์แท้งได้หรือตัวอ่อนที่คลอดออกมาพิการ เป็นต้น (สารก่อมะเร็งจากอาหารปิ้ง ย่าง ทอด, 2010: ออนไลน์)

2.1.1 แหล่งที่มาของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม

สามารถจำแนกได้ 2 แหล่งหลัก ดังนี้

1) แหล่งธรรมชาติ (Natural source)

ตัวอย่างแหล่งธรรมชาติซึ่งเป็นแหล่งที่มาของสาร PAHs ได้แก่ ภูเขาไฟระเบิด ไฟป่า หรือเกิดจากการสังเคราะห์ด้วยแบคทีเรียบางชนิด มาจากพืชชั้นสูง หรือเกิดจากการย่อยสลายสาร Triterpenoid หรือ Steroid ในตะกอนดินที่ทับถมกัน ซึ่ง Triterpenoid มีสารตั้งต้นเป็นกลุ่ม Aliphatic isoprenoid ตัวที่เรียกว่า Squalene ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นแหล่งกำเนิดของน้ำมันดิบ และมีสาร PAHs เป็นองค์ประกอบ สาร PAHs ที่พบว่ามีแหล่งกำเนิดมาจาก Triterpenoid ได้แก่ Perylene ซึ่งพบว่ามีแหล่งกำเนิดหลักมาจาก Triterpenoid ถึง 30-70 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ ในพืชชั้นสูงที่มี Triterpenoid ก็สามารถสังเคราะห์ PAHs ได้

2) แหล่งที่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ (Anthropogenic source)

ตัวอย่างกิจกรรมมนุษย์ที่เป็นแหล่งที่มาของสาร PAHs ได้แก่ การเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น แก๊สโซลีน ถ่านหิน น้ำมันดีเซล การปล่อยควันเสียจากยานพาหนะ การเผาขยะ การปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำ การสูบบุหรี่ การเผาทุ่งหญ้า เป็นต้น นอกจากนี้สาร PAHs ยังมีความเกี่ยวข้องกับการปนเปื้อน เนื่องมาจากการรั่วไหลของน้ำมันจากการบรรทุก และถ่ายเทน้ำมันของอุตสาหกรรมปิโตรเลียม จึงทำให้มีปริมาณสาร PAHs ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมบริเวณนั้นๆ มากกว่าปกติ ซึ่งอาจทำให้เกิดพิษเฉียบพลันกับสิ่งมีชีวิตบริเวณนั้น หรืออาจทำให้เกิดการก่อตัวเป็นสารก่อมะเร็ง และสารเปลี่ยนพันธุกรรมได้ น้ำมันดิบที่รั่วไหลออกมาพบว่ามีสาร PAHs เป็นองค์ประกอบสูงมาก โดยสามารถจำแนกประเภทของสาร PAHs จากกิจกรรมของมนุษย์ตามกระบวนการเกิดได้เป็น 2 แหล่งใหญ่ๆ คือ

1) สาร PAHs ที่มาจากปิโตรเลียม ที่พบบ่อย ได้แก่ แนฟธาซีน (Naphthalene) ฟลูออรีน (Fluorene) ฟีนแอนทรีน (Phenanthrene) ไดเบนโซไทโอฟิน (Dibenzothiophene) และไครซีน (Chrysene) ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีจำนวนวงแหวนเบนซีนตั้งแต่ 2 - 4 วง และมีหมู่อัลคิลมาแทนที่ในโมเลกุล

2) สาร PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เช่น ถ่านหินหรือน้ำมัน โดยโมเลกุลที่มักพบจะเป็นโมเลกุลประเภท Unsubstituted PAHs โดยมีจำนวนวงแหวนเบนซีนตั้งแต่ 3 - 5 วง ที่พบบ่อย ได้แก่ ฟลูออแรนทีน (Fluoranthene) และไพรีน (Pyrene) (จักรพงษ์ ศศิธร, 2552: 3)

2.1.2 การแพร่กระจายของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในสิ่งแวดล้อม

สารพี เอ เอช แพร่กระจายอยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม เช่น

1) **อนุภาคในบรรยากาศ (Airborne particulate matter)** เป็นของผสมระหว่างของแข็ง และของเหลวที่มีความสลับซับซ้อน โดยมีสารพี เอ เอช ปะปนอยู่ด้วย ซึ่งแหล่งกำเนิดของสารนี้มีหลากหลาย เช่น จากการเผาไหม้ของฟอสซิล น้ำมันเชื้อเพลิง ไอเสียรถยนต์ และของเสียที่ปล่อยออกมาจากอุตสาหกรรม สารพี เอ เอช สามารถกระจายไปทั่วทุกแห่งในบรรยากาศ และมีแนวโน้มที่จะเป็นสารก่อให้เกิดโรคมะเร็งด้วย (จินตนา สายวรรณ, 2541: 5)

2) **ในดิน (Soil contaminant)** สารพี เอ เอช เป็นสารที่กระจายอยู่ในดินบริเวณกว้างและแพร่กระจายไปได้ไกลจากบริเวณที่อยู่อาศัย และโรงงานอุตสาหกรรม โดยเชื่อว่าปริมาณของสารพี เอ เอชส่วนใหญ่มาจากการปล่อยควันเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังพบว่าต้นไม้และพืชผักสามารถที่จะดูดซึมสารประกอบพี เอ เอช จากดินที่มีสารประกอบนี้ปนเปื้อนอยู่ได้เช่นกัน

3) **ในน้ำ** (Water contaminant) สารพี เอ เอช สามารถแพร่กระจายได้ทั่วในแหล่งน้ำ เนื่องจากสารประกอบนี้มีแหล่งกำเนิดมาจากการที่อนุภาคที่ถูกขนส่งทางอากาศตกลงสู่ผิวหน้าหรือจากการดูดซับที่ผิวหน้าที่สัมผัสโดยตรงกับสารประกอบเหล่านี้ในบรรยากาศ และจากน้ำเสีย ซึ่งมลพิษเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ เนื่องจากการใช้น้ำในการอุปโภค และบริโภค

4) **ในปีโตรเลียมและผลิตภัณฑ์ปีโตรเลียม** (Petroleum and petroleum products) สารประกอบปีโตรเลียมหรือที่เรียกกันว่า น้ำมันดิบ (Crude oil) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นในธรรมชาติจากการทับถมกันของซากอินทรีย์ภายใต้พื้นผิวโลกเป็นเวลาหลายล้านปี ซึ่งในน้ำมันดิบมีสารพี เอ เอช เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และมักจะเป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญแหล่งหนึ่งของสารประกอบนี้จะสะสมอยู่ในตะกอนดิน ซึ่งเกิดจากน้ำมันที่เหลือใช้ในกิจกรรมต่างๆ โดยเฉพาะบริเวณที่มีประชากรอาศัยอยู่หนาแน่น และมีโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ มาก เนื่องจากต้องใช้น้ำมันในกิจกรรมต่างๆ ปริมาณที่มาก (จักรพงษ์ ศศิธร, 2552)

การปนเปื้อนของน้ำมัน มีสาเหตุมาจากหลายประการ ดังนี้

- 1) จากการขนส่งโดยเรือบรรทุกน้ำมัน ซึ่งมีโอกาสสูญเสียน้ำมันในขณะขนถ่าย
- 2) จากอุบัติเหตุเรือบรรทุกน้ำมันชนกันหรืออับปาง รวมทั้งการรั่วของถังน้ำมัน
- 3) การปฏิบัติการนอกชายฝั่ง เช่น การขุดเจาะน้ำมันหรือแก๊สธรรมชาติ การแตกหรือรั่วชำรุดของท่อส่งน้ำมันใต้ทะเล
- 4) จากโรงกลั่นน้ำมัน น้ำทิ้งจากโรงน้ำมันซึ่งมีคราบน้ำมันบางส่วนปนอยู่หรือกรณีถังน้ำมันสำรองบนบกบริเวณชายฝั่งเกิดชำรุด หรือเกิดอุบัติเหตุทำให้มีน้ำมันรั่วไหลออกมา
- 5) จากการล้างทำความสะอาดถังน้ำมัน
- 6) น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ตั้งอยู่บริเวณชายฝั่ง
- 7) น้ำทิ้งจากชุมชน รวมทั้งการชะล้างคราบน้ำมันบนถนนหนทางในเขตเมือง
- 8) จากบรรยากาศ
- 9) จากกระบวนการซีมผ่านตามธรรมชาติ

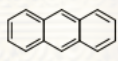
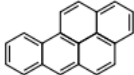
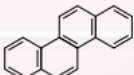
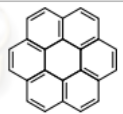

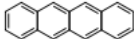

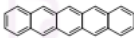
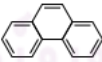

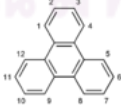
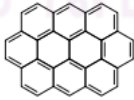
2.1.3 **ความเป็นพิษของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน** (จินตนา สายวรรณ, 2541: 10)

สารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนหลายตัวเป็นสารที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง และ/หรือ มีผลกระทบต่อการทำงานของมนุษย์

สารคาร์ซิโนเจน (Carcinogen) เป็นสารที่ก่อให้เกิดเนื้องอก และเหนี่ยวนำให้เกิดมะเร็งได้ โดยสารคาร์ซิโนเจนต่างชนิดกันจะมีสมบัติแตกต่างกันไป และปฏิกิริยาที่แสดงออกต่อเซลล์หรือเนื้อเยื่อ ก็แตกต่างกันด้วย ดังนั้นจึงมีการแบ่งชนิดของสารคาร์ซิโนเจนออกเป็น 2 จำพวก คือสารคาร์ซิโนเจนที่

เป็นพิษต่อดีเอ็นเอของยีนส์โดยตรง (Genotoxic) และสารคาร์ซิโนเจนที่เป็นพิษต่อส่วนอื่นนอกเหนือจากยีนส์(Epigenetic)

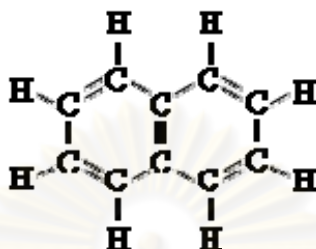
ความเป็นพิษของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสาร เช่น สารคาร์ซิโนเจน ส่วนใหญ่จะมีวงเบนซินตั้งแต่ 3 วงขึ้นไป โดยสารประเภทนี้บางตัวไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อร่างกาย แต่จะมีอันตรายต่อร่างกายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของสารชนิดนี้ บางอย่าง ตัวอย่างเช่น สารแอนทราซีน ซึ่งเป็นสารที่ไม่ทำให้เกิดโรคมะเร็ง แต่เมื่อทำการเติมวงเบนซิน 1 วงเข้าไปในโครงสร้างของสารแอนทราซีน เกิดเป็นสารเบนซ[เอ]แอนทราซีน ซึ่งเป็นสารพื้นฐานที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง เมื่อทำการเพิ่มวงเบนซินที่โครงสร้างของสารเบนซ[เอ]แอนทราซีน จะได้สารใหม่เป็นสารไดเบนซ[เอ, เอช]แอนทราซีน และเบนโซ[เอ]ไพรีน ที่เป็นพิษก่อให้เกิดโรคมะเร็งอย่างร้ายแรง ในทำนองเดียวกัน เมื่อเพิ่มกลุ่มอัลคิล (CH_3) เข้าไปในโครงสร้างของสารเบนซ[เอ]แอนทราซีน จะเพิ่มแนวโน้มในการก่อให้เกิดโรคมะเร็งมากขึ้นเช่น 7,8 - ไดเมทิลเบนซ[เอ]แอนทราซีน นอกจากนั้น สารเหล่านี้อาจถูกออกซิไดซ์โดยเอ็นไซม์ในกระบวนการทางชีวภาพ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างไปเป็นสารที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งตัวอื่นๆ เช่น สารเบนโซ[เอ]ไพรีน เปลี่ยนไปเป็นสารอีปอกไซด์ และไดออล นอกจากนี้ยังมีสารอื่นๆ อีก เช่น เบนโซฟลูออแรนทีรีน, 5- เมทิลโครซีน, 7,12-ไดเมทิลเบนโซ[เอ]แอนทราซีน และ 9, 10-ไดเมทิลแอนทราซีน เป็นต้น

Chemical compound		Chemical compound	
Anthracene		Benzo[a]pyrene	
Chrysene		Coronene	
Corannulene		Naphthalene	
Naphthalene		Pentacene	
Phenanthrene		Pyrene	
Triphenylene		Ovalene	

ภาพที่ 2.1 แสดงตัวอย่างโครงสร้างและชื่อเรียกเฉพาะของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Campbell: online)

2.1.4 แนฟธาลิน (Naphthalene)

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ประโยชน์เถ้าลอยขานอ้อยในการดูดซับสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในน้ำ โดยใช้แนฟธาลินเป็นตัวแทนสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เนื่องจากแนฟธาลินมีความเป็นพิษต่ำและพบได้ง่ายในสิ่งแวดล้อม เมื่อเปรียบเทียบกับสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นๆ (Chang, C.F. et al., 2004)



ภาพที่ 2.2 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของแนฟธาลิน (Naphthalene, 2004: online)

แนฟธาลิน หรือที่รู้จักกันทั่วไปว่า ลูกเหม็น มีสูตรโมเลกุล คือ $C_{10}H_8$ เป็นของแข็งหรือผลึกสีขาว มีกลิ่นแรง ไม่ละลายน้ำ ระเหิดหรือเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิห้อง แนฟธาลินเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ พบในถ่านหิน น้ำมันปิโตรเลียม และการเผาไหม้ของสารประกอบอินทรีย์ เช่น ไม้และบุหรี ปัจจุบันมีการผลิตแนฟธาลินเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ เช่น ใช้ในการผลิตพลาสติก พีวีซี เรซิน สารฟอกหนัง สีย้อม สารฆ่าแมลงคาบาริล หรือนำไปใช้โดยตรง เช่น ลูกเหม็น (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2554: ออนไลน์)

2.2 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ โดยวัตถุดิบชีวมวลที่สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงนั้นมีที่มาจากแหล่งต่างๆ ดังนี้

2.2.1 วัตถุดิบชีวมวล

- วัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติโดยตรง ได้แก่

1) วัตถุดิบจำพวกพืชผลทางการเกษตร เช่น อ้อย ข้าวโพด ฝ้าย เมล็ดทานตะวัน พืชตระกูลถั่ว เป็นต้น วัตถุดิบกลุ่มนี้ส่วนใหญ่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่น ผลิตเอทานอลจากข้าวโพด มันสำปะหลัง และกากน้ำตาล ผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมัน หรือผลิตน้ำมันพืชสำหรับการบริโภคในครัวเรือนจากปาล์มน้ำมัน เมล็ดทานตะวัน หรือพืชตระกูลถั่ว เป็นต้น



ภาพที่ 2.3 แสดงแหล่งที่มาของชีวมวล

(Dairy News Online, 2011: online)

2) วัสดุคูปประเภทไม้ จะใช้ไม้ที่มีความคงทนและโตเร็วที่ปลูกไว้หรือจากป่าหมุนเวียนช่วงสั้น และนำเนื้อไม้ไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงไม้ หรือสามารถนำมาทำเป็นก๊าซไม้ซึ่งสามารถใช้ในเครื่องยนต์ได้

3) วัสดุคูปจากสัตว์ ไวมันส์ตว์ สามารถนำมาสกัดทำไบโอดีเซลได้

● วัสดุคูปจากของเหลือใช้ ได้แก่

1) เศษไม้จากอุตสาหกรรมป่าไม้ รวมถึงขี้เลื่อยและกิ่งก้านใบต่างๆ สามารถนำมาเป็นแหล่งพลังงานความร้อนและการผลิตไฟฟ้า

2) เศษพืชผลการเกษตรจากอุตสาหกรรม ได้แก่

แกลบ ได้จากโรงสีข้าวเปลือกในปริมาณมาก โดยแกลบจะเป็นที่นิยมในการนำมาใช้ผลิตพลังงานที่ต้องการความร้อนสูง ความชื้นต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุคูปชีวมวลชนิดอื่นๆ ปัจจุบันใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก

ชานอ้อย ได้จากโรงงานน้ำตาล โดยชานอ้อยเป็นวัสดุที่เหลือหลังจากรีดเอาน้ำตาลออกจากลำต้นอ้อยแล้ว ซึ่งชานอ้อยจะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานน้ำตาล (Papong et al., 2004 cited in Visvanathan, C. and Chiemchaisri, C.)

กากปาล์ม (เปลือกปาล์ม กะลาปาล์ม และทะลายปาล์ม) จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบจากผลปาล์ม สามารถนำมาเป็นแหล่งพลังงานความร้อนและการผลิตไฟฟ้า

นอกจากนี้ ยังมีเศษพืชผลการเกษตรอื่นๆ เช่น กากมันสำปะหลัง ชังข้าวโพด กาบและกะลามะพร้าว ส่าเหล้า เป็นต้น ที่สามารถนำมาเป็นแหล่งพลังงานความร้อนและการผลิตไฟฟ้า

- 3) สิ่งปลูกจากสัตว์ ซึ่งนอกจากหมักเป็นปุ๋ยแล้ว ยังสามารถนำก๊าซมีเทนที่ได้ไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ผลิตความร้อนหรือไฟฟ้าได้
- 4) ของเหลือใช้หรือขยะจากชุมชน ขณะย่อยสลายจะปล่อยก๊าซมีเทนออกมาสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิง หรือนำไปเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ หรือนำไปผลิตไฟฟ้าได้

ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เนื่องจากพืชสะสมพลังงาน ในขั้นตอนของการเจริญเติบโต

โตนั้นพืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แล้วเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) ได้เป็นแป้งและน้ำตาล กักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงเราก็จะได้พลังงานกลับมา

การใช้ประโยชน์จากพลังงานชีวมวล สามารถใช้ได้ทั้งในรูปแบบของพลังงานความร้อน ไอน้ำ หรือผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า โดยอาจใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดใดชนิดหนึ่งที่กล่าวมาข้างต้น หรือหลายชนิดรวมกันก็ได้ ชีวมวลจึงเป็นแหล่งเชื้อเพลิงราคาถูก หากมีการใช้ประโยชน์ในบริเวณที่ไม่ไกลจากแหล่งเชื้อเพลิงมากนัก เพื่อลดต้นทุนในการขนส่ง ชีวมวลมีอยู่ทั่วไปในประเทศไทย การนำชีวมวลมาใช้จึงช่วยลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าเชื้อเพลิงและสร้างรายได้ให้กับคนท้องถิ่น นอกจากนี้การผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสม จะไม่ก่อให้เกิดมลพิษและไม่ก่อภาวะเรือนกระจก เนื่องจากการปลูกทดแทนทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการหมุนเวียนและไม่มีการปลดปล่อยเพิ่มเติม

2.2.2 องค์ประกอบของชีวมวล

องค์ประกอบของชีวมวลหรือสสารทั่วไป แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ

- 1) **ความชื้น (Moisture)** หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ ชีวมวลส่วนมากจะมีความชื้นค่อนข้างสูง เพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร skd ต้องการนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ ความชื้นไม่ควรเกิน 50 เปอร์เซ็นต์
- 2) **ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance)** จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ Volatiles matters และ Fixed Carbon Volatile matters ชีวมวลใดที่มีค่า Volatile matters สูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย
- 3) **ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ คือ เถ้า (Ash)** ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีเถ้าประมาณ 1-3 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้นแกลบและฟางข้าว จะมีสัดส่วนเถ้าประมาณ 10 -20 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากมีองค์ประกอบซิลิกา-อะลูมินาสูง ซึ่งจะมีปัญหาในการเผาไหม้และกำจัดพอสมควร (ชีวมวล, 2553: ออนไลน์)

2.2.3 ชานอ้อย (Bagasse)

- **คุณลักษณะ**

ชานอ้อยเป็นเศษเหลือทิ้งที่เหลือจากการเกษตร (Agricultural waste) มีปริมาณมากกว่า 20 ล้านตันต่อปี (วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และคณะ, 2546-2547) ชานอ้อยเป็นวัสดุที่เหลือจากการหีบเอาน้ำอ้อยออกจากท่อนอ้อยโดยผ่านลูกหีบชุดที่ 3-4 แล้ว จึงมีน้ำอ้อยตกค้างอยู่น้อยมาก หรือแทบจะไม่เหลืออยู่เลย กล่าวคือ เหลือแต่เส้นใยล้วนๆ

- **การใช้ประโยชน์**

ในอดีต ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงสำหรับต้มน้ำในหม้อน้ำให้เดือด แล้วใช้กำลังไอน้ำสำหรับเดินเครื่องจักรไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า รวมถึงใช้ไอน้ำที่เหลือไปใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาล ซึ่งในอดีตมักใช้ไม่หมด ทำให้เกิดปัญหาในการกำจัดและทำลายให้หมดไปจากบริเวณโรงงาน แม้ว่าบางโรงงานในแถบเวสต์อินดีสจะตัดแปลงไปใช้กลั่นเหล้ารัมหรือแอลกอฮอล์บ้าง ชานอ้อยก็ยังคงเหลือมากมาย

ปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากชานอ้อยไปอัดเป็นแผ่นคล้ายไม้อัดและใช้ทำเยื่อกระดาษ ตลอดจนพลาสติกและสารฟิวรัล (Furfural) โดยคุณสมบัติของกระดาษชานอ้อย คือ เก็บเสียงได้ดี และใช้ทำฝ้าเพดาน ตลอดจนใช้บุผนังห้องในบ้านหรือแม้แต่ในเรือและรถยนต์ อย่างไรก็ตาม คุณลักษณะของเส้นใยหรือไฟเบอร์ที่ได้จากอ้อยก็ยังไม่เป็นที่ถูกใจของผู้ใช้มากนัก หรือแม้แต่โรงงานทำเยื่อกระดาษของก็ยังต้องการให้ชานอ้อยมีเส้นใยยาวกว่านี้

ในแง่พลังงาน ชานอ้อยแม้ว่าจะให้พลังงานน้อยกว่าน้ำมันหรือถ่านหิน แต่ก็ยังเป็นผลพลอยได้ที่โรงงานน้ำตาลไม่ต้องลงทุนซื้อหามาเหมือนน้ำมันปิโตรเลียม มีผู้คำนวณไว้ว่า ชานอ้อยหกตันที่มีความชื้นประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ มีไฟเบอร์ประมาณ 46 เปอร์เซ็นต์ มีน้ำตาลเหลืออยู่ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ จะมีความร้อนเทียบเท่ากับน้ำมันเตาหนึ่งตัน ทั้งนี้หากชานอ้อยมีความชื้นน้อย มีเปอร์เซ็นต์ไฟเบอร์สูง และมีน้ำตาลซูโครสที่เหลืออยู่สูง ก็จะทำให้ความร้อนสูงมากยิ่งขึ้น โดยวัดค่าความร้อนออกมาเป็น L.C.V. (Lower calorific value) ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2,800 ถึง 3,700 B.T.U. ต่อปอนด์ แต่การใช้ชานอ้อยเป็นแหล่งพลังงานก็ก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดแกลลอยชานอ้อยที่มีเป็นจำนวนมาก ซึ่งยากที่จะทำลายให้หมดไปจากบริเวณโรงงาน (ชานอ้อย, (bagasse): ออนไลน์)

2.2.4 แกลลอยชานอ้อย (Bagasse fly ash)

- **คุณลักษณะ**

แกลลอยชานอ้อย (Bagasse fly ash, BFA) จัดเป็นของเสียที่ได้จากโรงงานน้ำตาลในขั้นตอนการเผาไหม้ชานอ้อยเพื่อผลิตไฟฟ้าและ/หรือพลังงานความร้อนมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาล

• การใช้ประโยชน์

เถ้าลอยขานอ้อย ส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้ในการถมพื้นที่และเป็นสารตัวเติมในวัสดุก่อสร้าง อีกทั้งยังนำมาใช้เป็นสารดูดซับที่มีราคาถูกในการกำจัดสารประกอบฟีนอลิก ไพรீดีน สีย้อม และไอออนของโลหะหนัก เป็นต้น (Affandi et al., 2009) นอกจากนี้เมื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขานอ้อย พบว่า เถ้าลอยขานอ้อยมีปริมาณซิลิกาสูงมากกว่า 50 % จึงเหมาะแก่การนำมาใช้เป็นแหล่งซิลิกาในการสังเคราะห์วัสดุที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ เช่น ซิลิกาเจล ซีโอไลต์ ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้แตกต่างกันไปตามแต่คุณสมบัติ (พัชรินทร์ วรรณกุล, 2553: 39)

2.2.5 ซิลิกา(Silica) (พัชรินทร์ วรรณกุล, 2553)

ซิลิกา (Silica) เป็นผลึกของแข็งสีขาวที่ไม่ละลายน้ำ เป็นสารประกอบทางเคมี ระหว่างธาตุซิลิกอนกับธาตุออกซิเจน มีสูตรทางเคมี คือ SiO_2 เกิดขึ้นในหลายลักษณะ เช่น ในลักษณะของหินเหล็กไฟและ ควอร์ตซ์ (Quartz) ซิลิกามีคุณสมบัติเป็นกรด และทำปฏิกิริยากับด่างเข้มข้น นอกจากนี้ยังมีซิลิกาอีกรูปแบบหนึ่ง คือ ซิลิกาในรูปคอลลอยด์ (Colloidal silica) ซิลิกาในรูปแร่กับซิลิกาในรูปคอลลอยด์นั้น มีความเหมือนกันตรงสูตรเคมีเท่านั้น ส่วนลักษณะทางโครงสร้างของวัสดุทั้งสองจะแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง

ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของซิลิกามีการจัดเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอล ยึดเกาะกันด้วยพันธะโควาเลนต์กับออกซิเจนด้านข้าง 4 อะตอมอย่างแข็งแรง ทำให้ซิลิกามีจุดหลอมเหลวสูงประมาณ 1500 – 1700 องศาเซลเซียส ซิลิกามีทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ นอกจากนี้ยังสามารถปรากฏอยู่ใน 2 รูปแบบ แบบแรกเป็นรูปผลึกมีขนาดแตกต่างกันไปตั้งแต่หินเขี้ยวหนุมานไปจนถึงขนาดเล็ก เช่น ททราย ส่วนอีกแบบหนึ่ง คือ ซิลิกาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต ซึ่งเป็นซิลิกาออสซิลูนา เช่น ซิลิกาที่มีในสาหร่ายเปลือกแข็ง หรือไดอะตอม แม้ว่าซิลิกาผลึกและซิลิกาออสซิลูนาจะมีสูตรเคมีเหมือนกัน แต่ก็มีสมบัติหลายประการที่แตกต่างกันไป เช่น ความหนาแน่น ความแข็ง ความพรุน และความไวต่อปฏิกิริยาเคมี ความแตกต่างดังกล่าวมีสาเหตุเนื่องมาจากซิลิกาทั้งสองรูปแบบมีลักษณะโครงสร้างและพื้นที่ผิวจำเพาะที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ซิลิกาออสซิลูนาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าซิลิกาในรูปผลึกมากและมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า จึงนิยมใช้เป็นสารดูดความชื้น สารดูดซับ สารเพิ่มความแข็งแรง สารเติมแต่ง และองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา (พัชรินทร์ วรรณกุล, 2553) ตัวอย่างของซิลิกาออสซิลูนาอื่นๆ ได้แก่ ซิลิกาโซล (Silica sol) ซิลิกาเจล (Silica gel) และซิลิกาจากการตกตะกอน (Precipitated silica) เป็นต้น

ซิลิกาโซล คือ คอลลอยด์ของซิลิกาออสซิลูนาในน้ำ ที่มีการกระจายตัวของอนุภาคอย่างเสถียร ซิลิกาโซลจะไม่เปลี่ยนเป็นเจลหรือตกตะกอนแม้ว่าจะเก็บไว้เป็นเวลาหลายปี โซลอาจมีซิลิกาได้ถึงร้อยละ

50 และอนุภาคมีขนาดถึง 300 นาโนเมตร อย่างไรก็ตามหากอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 70 นาโนเมตร ก็ จะเกิดการตกตะกอนอย่างช้าๆ (สุพิณ แสงสุข และคณะ, 2549 อ้างถึงใน จักรพงษ์ ศศิธร, 2552: 21)

ซิลิกาเจล คือ ซิลิกาที่อิมตัวด้วยน้ำ (Water swollen) มีตั้งแต่เป็นก้อนแข็ง จนถึงเป็นผงละเอียด แบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

- ซิลิกาเจลที่มีความหนาแน่นสูง (Regular-density gel) เป็นการเกิดเจลในสภาวะที่เป็นกรด อนุภาคที่ได้มีขนาดเล็กมากและพื้นที่ผิวสูง (750-800 ตารางเมตรต่อกรัม) ค่าเฉลี่ย เส้นผ่าศูนย์กลางรูพรุน เท่ากับ 2.2-2.6 นาโนเมตร และปริมาตรรูพรุนประมาณ 0.37-0.40 มิลลิเมตรต่อกรัม
- ซิลิกาที่มีความหนาแน่นระดับกลาง (Intermediate-density silica) มีพื้นที่ผิวดต่ำกว่า (300-500 ตารางเมตรต่อกรัม) แต่ปริมาตรรูพรุนใหญ่กว่า (0.9-1.1 มิลลิเมตรต่อกรัม) ขนาดรูพรุนเฉลี่ยประมาณ 12-16 นาโนเมตร
- ซิลิกาชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low-density silica gel) มีพื้นที่ผิวดต่ำกว่า (100-200 ตาราง เมตรต่อกรัม) ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางรูพรุนใหญ่กว่า (18-22 นาโนเมตร) และมีปริมาตร รูพรุนใหญ่กว่าชนิดอื่น (1.4-2.0 มิลลิเมตรต่อกรัม)

ซิลิกาจากการตกตะกอน ประกอบด้วยกลุ่มก้อนของอนุภาคพื้นฐานขนาดคอลลอยด์ ซึ่งยัง เชื่อมต่อกันเป็นโครงร่างตาข่ายขนาดใหญ่ระหว่างกระบวนการเตรียมซิลิกาชนิดนี้เกิดได้จากทั้งวัฏภาค ที่เป็นไอ เช่น ฟุ้งซิลิกา หรือโดยการตกตะกอนจากสารละลาย

2.3 การปรับสภาพพื้นผิวของสารดูดซับด้วยสารปรับสภาพผิว

พื้นผิวของซิลิกา โดยทั่วไปจะแสดงลักษณะพื้นผิวเป็นประจุลบ โดยจะมีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) ซึ่งเป็นสารที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) อยู่ผิว ทำให้ลักษณะพื้นผิวของซิลิกาแสดงลักษณะชอบน้ำ จึงไม่ สามารถดูดซับสารอินทรีย์ที่ไม่มีไอออน (Nonionic organic compounds) เช่น เบนซีน อัลคิลเบนซีน แนฟทาลีน เป็นต้น ดังนั้นเพื่อเป็นการเปลี่ยนแปลงสมบัติพื้นผิวของซิลิกาให้สามารถดูดซับสารอินทรีย์ที่ ไม่มีไอออน (Nonionic organic compounds) ได้ดีขึ้น นิยมปรับสภาพผิวด้วยสารแอมฟิฟิลิกชนิดประจุ บวก (Cationic surfactant) โดยที่สารปรับสภาพผิวชนิดประจุบวกนี้มีประจุบวกที่ส่วนหัว ทำให้ สามารถดูดซับบนผิวของซิลิกาที่มีประจุลบได้ และหันส่วนหาง (Carbon group) ซึ่งไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ออก ทำให้สภาพผิวซิลิกาที่มีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) มากขึ้น สามารถดูดซับ สารอินทรีย์ได้มากขึ้น (จักรพงษ์ ศศิธร, 2552: 32)

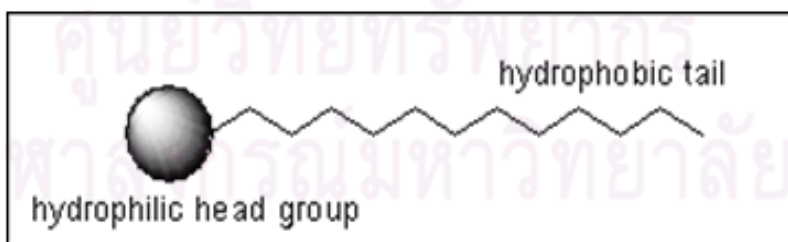
2.3.1 สารปรับสภาพผิว (Surface treating agent)

สารปรับสภาพผิว เป็นสารที่มีโมเลกุลแบบแอมฟิฟิลิก กล่าวคือ มีองค์ประกอบที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) อยู่ในโมเลกุลเดียวกัน ซึ่งโดยทั่วไปส่วนที่ไม่ชอบน้ำมักเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีจำนวนคาร์บอนอะตอมมากกว่า 8 ขึ้นไป

สารปรับสภาพผิวมีบทบาทสำคัญในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ในการกำจัดคราบน้ำมันและสิ่งสกปรก ในการกำจัดสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์ในน้ำ การเลือกประเภท ปริมาณ หรือ ความเข้มข้นของสารปรับสภาพผิวให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ในการใช้งานนั้น มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อให้สารปรับสภาพผิวทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

สารปรับสภาพผิว สามารถจำแนกตามลักษณะทางธรรมชาติของส่วนที่มีสภาพความเป็นขั้วได้ ดังนี้ คือ สภาพประจุลบ (Anionic) สภาพประจุบวก (Cationic) สภาพไร้ประจุ (Nonionic) และสารปรับสภาพผิวที่สามารถให้ได้ทั้งประจุบวกและลบ (Zwitterions) โดยจะแสดงคุณสมบัติประเภทใด ขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรด-ด่างของสภาวะแวดล้อม (จิรสา กรงกรด, 2548: ออนไลน์) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะสารปรับสภาพผิวชนิดสภาพประจุบวก (Cationic surfactant)

สารปรับสภาพผิวชนิดสภาพประจุบวก มีประจุบวกที่ส่วนหัว ทำให้สามารถดูดซับบนผิวของซิลิกาที่มีประจุลบได้ และส่วนหาง (Hydrocarbon group) จะแสดงความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ทำให้สามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้ นอกจากนี้ยังมีผิวสัมผัสที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในสารละลายที่มีต่อโครงสร้างทางโมเลกุล และสมบัติทางกายภาพ จะพบว่าสามารถแบ่งกลุ่มของปรับสภาพผิวชนิดนี้ได้เป็น 2 กลุ่มย่อยๆ คือ พวกที่มีสภาพความเป็นกลาง (Neutral) และพวกที่มีสภาพความเป็นกรด (Acidic) สารปรับสภาพผิวชนิดสภาพประจุบวกที่กลุ่มย่อยมีสภาพเป็นกลางที่เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลาย ได้แก่ เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ หรือ CTAB (Cetyltrimethylammoniumbromide) (วิสาขา ภูจินดา, 2549: ออนไลน์)



ภาพที่ 2.4 แสดงลักษณะโครงสร้างของสารปรับสภาพผิว

ที่มา: <http://oldweb.pharm.su.ac.th/Chemistry-in-Life/d030.htm>

2.3.2 เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyltrimethylammoniumbromide, CTAB)

เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ คือ สารปรับสภาพผิวชนิดประจุบวก มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{16}H_{33}N(CH_3)_3^+ Br^-$ โดยสารปรับสภาพผิวชนิดนี้จะมีส่วนหางที่เป็นไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic tail) สามารถจับกับโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วของสารถูกดูดซับได้ และมีหมู่แอมโมเนียมเป็นส่วนของที่ชอบน้ำ (Hydrophilic head group) ซึ่งมีประจุบวก สามารถจับได้ดีกับโมเลกุลของสารที่มีประจุลบ เช่น ซิลิกา ได้ เมื่อปรับสภาพผิวของสารดูดซับด้วยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์จะทำให้สารดูดซับที่มีสมบัติชอบน้ำสามารถดูดซับสารไฮโดรคาร์บอนได้ดีขึ้น



ภาพที่ 2.5 แสดงลักษณะโครงสร้างของเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์

ที่มา: http://www.bridgat.com/index.php?page=images&id=44651&f=Cetyl_trimethyl_ammonium_bromide.jpg

2.4 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นปรากฏการณ์ของการสะสมสารประกอบชนิดหนึ่งเป็นอย่งน้อย ณ บริเวณผิวร่วม (Interface) ระหว่างวัฏภาค (Phase) เช่น ผิวร่วมระหว่างวัฏภาคก๊าซกับวัฏภาคของเหลว ผิวร่วมระหว่างวัฏภาคของเหลวกับของเหลวที่แยกชั้น ผิวร่วมระหว่างวัฏภาคก๊าซกับวัฏภาคของแข็ง และผิวร่วมระหว่างวัฏภาคของเหลวกับวัฏภาคของแข็ง เป็นต้น ซึ่งการดูดซับที่ใช้กันอย่างแพร่หลายจะหมายถึง ปรากฏการณ์ของการสะสมสารประกอบชนิดหนึ่งหรือสารประกอบหลายชนิดไว้บนผิวของแข็ง โดยไม่เปลี่ยนโครงสร้างของของแข็งนั้น ระบบของแข็งที่เก็บสะสมสารประกอบอื่นๆ ไว้บนผิว เรียกว่า “สารดูดซับ (Adsorbent)” ส่วนสารประกอบต่างๆ ที่สะสมบนผิวของสารดูดซับ เรียกว่า “สารถูกดูดซับ (Adsorbate)” (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552: 2)

สารดูดซับที่นิยมใช้ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซึ่งเป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำโดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้ รูพรุนมีขนาดตั้งแต่ 20-20,000 อังสตรอม (ธีระชัย วัฒนสกุลเอก, 2546)

2.4.1 สารดูดซับ (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552)

การแยกสารประกอบชนิดหนึ่งออกจากของผสมเอกพันธ์ด้วยการดูดซับ สารดูดซับในหน่วยดูดซับต้องมีสมบัติดูดซับสารประกอบชนิดนั้นเป็นสำคัญ สมบัติดูดซับที่สำคัญของระบบดูดซับ ได้แก่

ปริมาณสมดุคดูดซับสารประกอบนั้นจำเพาะ อัตราการดูดซับสารประกอบดังกล่าว และการเลือกดูดซับสารประกอบชนิดนั้น

ส่วนสมบัติกายภาพของสารดูดซับ ได้แก่ พื้นผิวจำเพาะของสารดูดซับ ขนาดโพรงเฉลี่ยของเม็ดสารดูดซับ ความพรุนของเม็ดสารดูดซับ ความหนาแน่นของเม็ดสารดูดซับ และความหนาแน่นของชั้นเม็ดสารดูดซับที่บรรจุในหน่วยดูดซับนั้นเป็นปัจจัยเสริมของระบบดูดซับ การคัดเลือกสารดูดซับที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตกระบวนการหนึ่งจึงต้องพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติสำคัญต่างๆของสารดูดซับพาณิชย์แต่ละชนิด โดยจำแนกออกเป็น สมบัติกายภาพ สมบัติดูดซับ สมบัติเชิงกล สมบัติทางเคมี และสมบัติทางเศรษฐศาสตร์ดังนี้

1) สารดูดซับควรมีโพรงขนาดใหญ่เพียงพอ เพื่อให้สารประกอบที่ต้องการดูดซับไว้ ซึ่งอยู่ในสถานะก๊าซหรือไอ สามารถแพร่ไปยังพื้นผิวภายในโพรงของเม็ดสารดูดซับนั้นได้โดยสะดวก หรือเพื่อให้ของเหลวผสมที่มีสารประกอบที่ต้องการดูดซับไว้ สามารถแทรกเข้าสู่โพรงได้อย่างสะดวก

2) สารดูดซับต้องสามารถเลือกดูดซับสารประกอบที่ต้องการแยกออกจากของผสมนั้นได้มากกว่าหรือได้เร็วกว่าการดูดซับสารประกอบอื่นๆ ในของผสมนั้น

3) สารดูดซับต้องสามารถทนทานต่อการสึกกร่อนทางเคมีและทางกล ณ อุณหภูมิของการดูดซับและอุณหภูมิของการปรับสภาพสารดูดซับ

4) สารดูดซับต้องไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบใดๆ ในของผสม ณ อุณหภูมิของการดูดซับและอุณหภูมิของการปรับสภาพสารดูดซับ

5) สารดูดซับควรมีความหนาแน่นน้อยและมีความพรุนมาก แต่มีลักษณะแข็งไม่แตกเป็นผงโดยง่าย

6) สารดูดซับควรรหาได้ง่ายและมีราคาไม่แพง

2.4.2 ประเภทของสารดูดซับ

สารที่มีอำนาจดูดซับโมเลกุลต่างๆได้ มีหลายชนิด ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1) ประเภทสารอนินทรีย์ธรรมชาติ คือ สารดูดซับอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก แอคติเวเต็ด ซิลิกา (Activated silica) เป็นต้น สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะ ประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม อย่างไรก็ตามสารดูดซับประเภทนี้มีข้อเสีย คือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทนี้มีจำกัดมาก

2) ถ่านกัมมันต์ คือ สารดูดซับที่สังเคราะห์จากวัสดุสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ถ่านดูดซับนี้จำแนกย่อยตามขนาดปากโพรงของเม็ดถ่านดูดซับออกเป็นถ่านดูดซับทั่วไป (Activated carbon) และถ่านคัดโมเลกุล (Molecular sieve carbon หรือ carbon molecular sieves) ถ่านดูดซับทั่วไปมีโพรง

ขนาดต่างๆ มากมาย โพรงดังกล่าวมักมีขนาดใหญ่กว่า 1 นาโนเมตร ส่วนถ่านคัตโมเลกุลจะมีขนาดปากโพรงของเม็ดสารดูดซับเล็กกว่า 1 นาโนเมตร ถ่านดูดซับจึงมีธาตุคาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบสำคัญของสารประกอบอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลัก ถ่านดูดซับพลาสมิกซ์ต่างๆ จึงผลิตจากวัสดุสารประกอบอินทรีย์หรือสารชีวมวลชนิดต่างๆ เช่น ถ่านหิน เศษไม้ และกะลามะพร้าว เป็นต้น

3) ประเภทสารอนินทรีย์สังเคราะห์ คือ สารดูดซับอนินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้นเลียนแบบสารประกอบที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ได้แก่ ผลึกซิลิกาดูดความชื้น (Silica gel) ผลึกอะลูมินาดูดความชื้น (Activated alumina) และผลึกคัตโมเลกุล (Zeolite molecular sieves) สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ แต่อย่างไรก็ตามเรซินมีข้อได้เปรียบกว่า คือ สามารถฟื้นฟูสภาพได้ง่ายกว่ามากและสารเคมีที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพมักเป็นสารราคาถูก ความเหมาะสมในการใช้เรซินดูดซับอาจมีมากกว่าถ่านกัมมันต์เมื่อคำนึงถึงข้อจำกัดในเรื่องการฟื้นฟูสภาพ

ปัจจุบันได้มีการผลิตสารดูดซับสังเคราะห์ขึ้นมาเป็นจำนวนมากหลายชนิด เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ทั้งที่มีความสามารถในการดูดซับและความคล่องตัวในการทำงานน้อยกว่าถ่านกัมมันต์

2.4.3 ผลึกดูดความชื้น

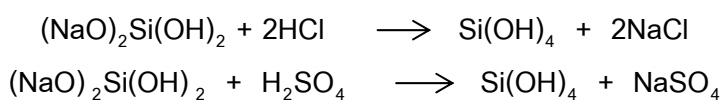
ผลึกดูดความชื้น จำแนกตามชนิดธาตุองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ผลึกซิลิกาดูดความชื้น (Silica gel) และผลึกอะลูมินาดูดความชื้น (Activated alumina)

- ผลึกซิลิกาดูดความชื้น (Silica gel) สังเคราะห์ได้จากเกลือซิลิเกต เช่น เกลือโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เป็นต้น เมื่อเกลือโซเดียมซิลิเกตละลายน้ำ โมเลกุลเกลือซิลิเกตดังกล่าวจะรวมกับโมเลกุลน้ำ เกิดเป็นสารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกไซด์ ดังนี้



การสังเคราะห์ผลึกซิลิกาดูดความชื้นประกอบด้วยปฏิกิริยาลำดับ 3 ขั้นตอน ดังนี้

1) ขั้นตอนแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อผสมสารละลายกรด เช่น สารละลายกรดเกลือ (HCl) หรือสารละลายกรดกำมะถัน (H_2SO_4) เป็นต้น กับสารละลายเกลือโซเดียมซิลิเกตแล้วเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกระหว่างไอออนไฮโดรเจน (H^+) ของสารละลายกรดดังกล่าวกับไอออนโซเดียม (Na^+) ของสารละลายเกลือโซเดียมซิลิเกต และเกิดเป็นกรดซิลิสิก $[\text{Si}(\text{OH})_4]$ กับเกลือแกง (NaCl) หรือเกลือโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่สมนัยกับชนิดของสารละลายกรดเหล่านั้น ตามลำดับ ดังนี้



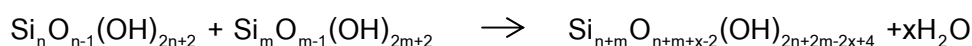
การเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายจะช่วยเร่งอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนให้เร็วขึ้น

2) **ขั้นตอนรวมโมเลกุล** เมื่อระเหยน้ำจากสารละลายกรดซิลิซิกที่สังเคราะห์ขึ้นแล้ว อนุกรมมีไม่เกิน 400 องศาเซลวิน เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซิลิซิกในสารละลายดังกล่าวให้สูงขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลกรดซิลิซิกในสารละลายนั้นจะรวมตัวกันเป็นสายโซ่ของโมเลกุลกรดซิลิซิกที่เชื่อมต่อกันด้วยอะตอมออกซิเจน โดยการสลายหมู่ไฮดรอกไซด์ของโมเลกุลกรดซิลิซิกที่รวมตัวกันให้เป็นโมเลกุลน้ำดังนี้



สายโซ่โมเลกุลกรดซิลิซิกที่สังเคราะห์ขึ้น ประกอบด้วยทั้งสายโซ่ตรงและสายโซ่กิ่งผสมกัน สายโซ่โมเลกุลกรดซิลิซิกที่สังเคราะห์ได้ในขณะเดียวกัน จะมีมวลโมเลกุลแตกต่างกัน สมบัติการละลายน้ำของสายโซ่โมเลกุลกรดซิลิซิกแปรผกผันกับมวลโมเลกุลของสายโซ่โมเลกุลดังกล่าว นั่นคือ สายโซ่โมเลกุลกรดซิลิซิกละลายน้ำได้น้อยลง เมื่อมวลโมเลกุลของสายโซ่ดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้สายโซ่โมเลกุลกรดซิลิซิกเหล่านี้มักพันเข้าด้วยกันเป็นกลุ่มสายโซ่โมเลกุลกรดซิลิซิก และสามารถรอกแยกกลุ่มสายโซ่โมเลกุลกรดซิลิซิกนี้จากสารละลายกรดซิลิซิกได้อย่างสะดวก

3) **ขั้นตอนขจัดน้ำ** เมื่ออบกลุ่มสายโซ่โมเลกุลกรดซิลิซิกมวลโมเลกุลสูงที่รอกแยกจากสารละลายกรดซิลิซิกแล้ว อนุกรมมี 600-650 องศาเซลวิน หมู่ไฮดรอกไซด์ของสายโซ่โมเลกุลกรดซิลิซิกเดียวกัน หรือหมู่ไฮดรอกไซด์ของสายโซ่โมเลกุลอื่นๆ ที่พันเข้าด้วยกัน หรือหมู่ไฮดรอกไซด์ของสายโซ่โมเลกุลกรดซิลิซิกอื่นๆ ที่พันเข้าด้วยกันและอยู่ใกล้เคียงกันจะสลายเป็นโมเลกุลน้ำ และเกิดเป็นพันธะระหว่างอะตอมซิลิคอนกับอะตอมออกซิเจนที่เหลือจากหมู่ไฮดรอกไซด์เหล่านั้นกลายเป็นโครงสร้างผลึกของสารประกอบออกไซด์ของซิลิคอน โดยที่อะตอมซิลิคอนแต่ละอะตอมสามารถสร้างพันธะกับอะตอมออกซิเจน 4 อะตอม ส่วนอะตอมออกซิเจนแต่ละอะตอมสามารถสร้างพันธะกับอะตอมซิลิคอนได้เพียง 1 หรือ 2 อะตอมเท่านั้น ดังนั้น ผลึกสารประกอบออกไซด์ของซิลิคอนที่สังเคราะห์ได้จึงมีพันธะระหว่างอะตอมซิลิคอนกับอะตอมออกซิเจนสลับกัน (-Si-O-Si-O-) อย่างไร้รูปแบบ ในขณะเดียวกันหมู่ไฮดรอกไซด์ของสายโซ่โมเลกุลกรดซิลิซิกบางส่วนอาจสลายเป็นโมเลกุลน้ำได้ยากหรืออาจสลายได้ช้า จึงมีหมู่ไฮดรอกไซด์เหลืออยู่ในกลุ่มสายโซ่โมเลกุลกรดซิลิซิกที่พันอยู่รวมกัน ตัวอย่างของปฏิกิริยาขจัดโมเลกุลน้ำออกจากสายโซ่โมเลกุลกรดซิลิซิก 2 สายโซ่ที่พันกัน สามารถแสดงในลักษณะของสมการเคมีได้ ดังนี้



กลุ่มสายโซ่โมเลกุลกรดซิลิซิกที่พันรวมกันจึงมีลักษณะการจัดเรียงอะตอมซิลิคอนและอะตอมออกซิเจนแบบสุม การขจัดโมเลกุลน้ำออกจากกลุ่มสายโซ่โมเลกุลกรดซิลิซิกดังกล่าวจึงเป็นการเชื่อมส่วนต่างๆ ของสายโซ่โมเลกุลกรดซิลิซิกที่มีหมู่ไฮดรอกไซด์เข้าด้วยกัน จนกระทั่งกลุ่มสายโซ่โมเลกุลกรดซิลิซิกเปลี่ยนเป็นผลึกสารประกอบออกไซด์ของซิลิคอนชนิดโครงสร้างไร้แบบแผน เรียกว่า “ผลึกอสัณฐาน (Amorphous) นอกจากนี้การขจัดโมเลกุลน้ำออกจากกลุ่มสายโซ่โมเลกุลกรดซิลิซิกดังกล่าวข้างต้นช่วยก่อให้เกิดโพรงขนาดต่างๆ ขึ้นในผลึกซิลิกาด้วยความชื้นที่สังเคราะห์ได้

- **ผลึกอะลูมินาความชื้น (Activated alumina)** สังเคราะห์ได้จากสารประกอบอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบสำคัญของแร่บอกไซต์ (Bauxite) ซึ่งเป็นของผสมของสารประกอบออกไซด์ของโลหะชนิดต่างๆ เช่น สารประกอบออกไซด์ของเหล็ก (Fe_2O_3) เป็นต้น และสารประกอบออกไซด์ของสารกึ่งโลหะ เช่น สารประกอบออกไซด์ของซิลิคอนหรือซิลิกา (SiO_2) เป็นต้น

2.4.4 ประโยชน์ของการดูดซับ (ธีระชัย วัฒนสกุลเอก, 2546)

สารดูดซับชนิดต่างๆ ได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำและน้ำเสีย เพื่อประโยชน์ดังต่อไปนี้

- 1) กำจัดสี กลิ่น และรส ซึ่งเกิดจากสารอินทรีย์ เช่น กรดฮิวมิก และกรดฟัลวิก
- 2) กำจัดคลอรีนในน้ำ
- 3) กำจัดโลหะหนักต่างๆ
- 4) กำจัดยาฆ่าแมลง
- 5) กำจัดผงซักฟอก
- 6) กำจัดฟีนอลและสารประกอบฟีนอล
- 7) กำจัดสารไฮโดรคาร์บอน โดยเฉพาะสารไฮโดรคาร์บอนแบบลูกโซ่อิ่มตัว

แม้ว่าถ่านกัมมันต์จะเป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพดี แต่มีราคาค่อนข้างแพง จึงได้มีการศึกษาการใช้สารชนิดอื่นๆ เป็นสารดูดซับแทน

2.4.5 กลไกการดูดซับ (ธีระชัย วัฒนสกุลเอก, 2546)

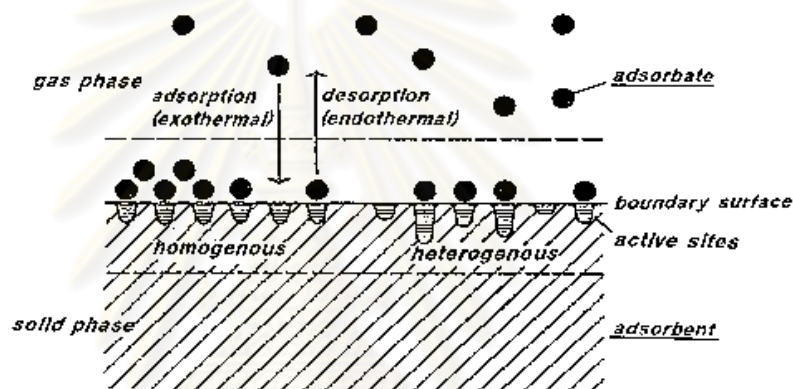
กลไกที่เกิดขึ้นในระหว่างการดูดซับมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารถูกละลายจากสารละลายเข้าหาสารดูดซับ

2) การแพร่ภายนอก (External diffusion หรือ Film diffusion) เมื่อโมเลกุลของตัวถูกละลายเข้ามาถึงสารดูดซับซึ่งตามปกติจะมีฟิล์มของของเหลวหุ้มไว้โดยรอบคล้ายเยื่อบางๆ โมเลกุลต้องแทรกผ่านฟิล์มของของเหลวให้ได้จึงจะเข้าถึงผิวของสารดูดซับ

3) การแพร่ภายใน (Internal diffusion หรือ Pore diffusion) เนื่องจากสารดูดซับมีพื้นที่ผิวส่วนใหญ่อยู่ว่าที่โพรง หรือช่องว่างภายในโมเลกุลของตัวถูกละลายจึงต้องแทรกเข้าไปให้ถึงช่องว่างภายในของสารดูดซับจึงจะมีการดูดซับเกิดขึ้น

4) ปฏิกริยาพื้นผิว (Surface reaction) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ และอาจดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ (Physisorption) และทางเคมี (Chemisorption) หรือทั้ง 2 แรงพร้อมกัน



ภาพที่ 2.6 แสดงกลไกการดูดซับและคายซับ

(Fundamentals of Adsorption and Desorption, 1990: online)

2.4.6 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับเกิดขึ้นด้วยแรงระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ โดยจำแนกแรงดังกล่าวออกเป็น 2 ชนิด คือ แรงกายภาพและแรงเคมี การดูดซับจึงจำแนกออกตามชนิดของแรงที่ดูดจับโมเลกุลของสารถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับ ดังนี้ (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552)

1) การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับ

ชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

2) การดูดซับทางเคมี (Chemisorption)

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม กล่าวคือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือ ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่าง ดังสรุปในตารางที่ 2.1 (ประเภทการดูดซับ, 2553: ออนไลน์)

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบประเภทการดูดซับ

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล	50-400 กิโลจูลต่อโมล
2. อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
4. การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
5. การดูดซับบนแก๊ส-ของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ
6. พลังงานก่อกัมมันต์ ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
7. รูปแบบชั้นของการดูดซับ	Monolayer และ Multilayer	Monolayer

ที่มา: <http://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process/>

2.4.7 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ

ในการดูดซับจำเป็นต้องมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force)

แรงนี้เป็นแรงกระทำอ่อนๆ ระหว่างนิวเคลียสในอะตอมของโมเลกุลหนึ่งกับอิเล็กตรอนของอีกอะตอมหนึ่ง แรงแวนเดอร์วาลส์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดโมเลกุล แรงกระทำนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของสารถูกดูดซับและสารดูดซับเข้ามาใกล้ชิดกันและไม่มีแรงดึงดูดอื่นที่เด่นกว่า

2) พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonds)

ไฮโดรเจนเป็นอะตอมที่เล็กที่สุดในสารประกอบอินทรีย์อะตอมนี้มักเกิดเป็นพันธะโควาเลนต์เดี่ยวๆ เท่านั้น อย่างไรก็ตามอะตอมข้างเคียงมักมีความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอนสูงกว่าอะตอมไฮโดรเจน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ใช้ร่วมกับไฮโดรเจนไปยังอะตอมที่มีขนาดใหญ่กว่า ลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดประจุบวกอ่อนๆ บนอะตอมไฮโดรเจน ซึ่งเป็นผลให้เกิดพันธะระหว่างไฮโดรเจนและอะตอมข้างเคียง เช่น ไนโตรเจน หรือออกซิเจน พันธะดังกล่าวสามารถแตกออกและเกิดขึ้นใหม่ได้ง่าย พันธะนี้เป็นปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องในกรณีที่สารประกอบต่างๆ ละลายในน้ำ

3) พันธะไอออนิก (Ionic bonding)

แรงดึงดูดนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากอะตอมหนึ่งไปยังอีกอะตอมหนึ่ง ไอออนที่เกิดขึ้นจะมีประจุตรงข้าม ลักษณะคล้ายกับการที่อนุมูลกรดทำปฏิกิริยากับอนุมูลต่างแล้วเกิดแรงเชื่อมโยงระหว่างเกลือ

4) พันธะโควาเลนต์ (Covalent bonding)

พันธะชนิดนี้เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน โดยแต่ละอะตอมจะมีอิเล็กตรอนสองตัวอยู่ในชั้นของอิเล็กตรอนวงนอกสุด พันธะโควาเลนต์จะมีความแข็งแรงกว่าพันธะไอออนิก พันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบความแข็งแรงของพันธะต่างๆ (รัตนา รุจิรวนิช, 2543)

Bond type	Relative strength
Van der Waals	1.0
Hydrogen bond	3.0
Ionic bond	7.0
Covalent bond	30.0

2.4.8 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ คือ ธรรมชาติของสารดูดซับและตัวถูกดูดซับ (อุไรวรรณ มณีโชติ, 2550)

● ธรรมชาติของสารดูดซับ

- 1) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน

พื้นที่ผิว (Surface area) เป็นสมบัติอย่างหนึ่ง ที่มีผลต่อความสามารถของสารดูดซับในการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของสารดูดซับมากขึ้น อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของสารดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้เพียงอย่างเดียว โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับก็จะต่ำลง

2) ขนาดของสารดูดซับ

อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ ถ้าสารดูดซับไม่มีรูพรุน พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีขนาดเล็กลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าสารดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน ขนาดของสารดูดซับจะไม่มีผลกับความสามารถในการดูดซับ

● อิทธิพลของธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ ที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ ดังนี้

1) ความสามารถในการละลาย

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปเกาะติดบนพื้นผิวของสารดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ละลายน้ำได้ ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นจึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อย มักสามารถเกาะติดบนผิวของสารดูดซับได้ดี

2) น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล

เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น ถ้าโมเลกุลของสารดูดซับเป็นสารอินทรีย์ เมื่อจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้น การดูดซับจะมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักของโมเลกุลจะเป็นผลให้ความสามารถในการละลายลดลง แต่ในทางกลับกัน ถ้าโมเลกุลมีขนาดใหญ่มากเกินไปจะแพร่เข้าสู่รูพรุนของสารดูดซับได้ ก็จะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง

3) ความมีขั้วของโมเลกุล

ในกรณีที่สารดูดซับเป็นสารที่ไม่มีขั้ว ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อตัวถูกดูดซับมีสภาพมีขั้ว (Polarity) เพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มสภาพมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

4) ผลของค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนสามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง และพีเอชยังมีผลต่อการแตกตัวของไอออนของสารประกอบที่เป็นกรดหรือเป็นเบสในการดูดซับ

5) ผลของอุณหภูมิ (วิจัย พิลาวัลย์ และวิษณุ ศิริการ, 2551)

ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้น ถ้ากระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง เนื่องจากค่าคงที่ของอัตราเร็วของการดูดซับจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของ Arrhenius ดังสมการที่ (1)

$$k = k_0 e^{-Ea/RT} \quad (1)$$

- **อิทธิพลของความปั่นป่วน (Mixing speed) (พิมลพันธ์ อุดทาพันธ์, 2553)**

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัด อัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore diffusion) ในระบบที่ของเหลวมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มของเหลวที่อยู่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ในกรณีนี้การแพร่ผ่านฟิล์มจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าความปั่นป่วนของของเหลวในระบบสูง ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

- **อิทธิพลของระยะเวลาสัมผัส (Contact time)**

เมื่อโมเลกุลของตัวถูกละลายมีโอกาสสัมผัสกับสารดูดซับในระยะเวลาที่เหมาะสม ประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น

2.4.9 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทอมของการดูดซับ คือ ความสัมพันธ์ในสภาวะสมดุลระหว่างปริมาณของสารที่จะถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ และความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ เมื่อนำเอาความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือไปเขียนกราฟกับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักสารดูดซับจะได้ไอโซเทอมของการดูดซับซึ่งสามารถนำไปใช้หาความสามารถของสารดูดซับในการดูดซับสารและสามารถใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของสารดูดซับชนิดต่างๆ ได้ โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับมีหลายชนิด ดังนี้

1) ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมแบบนี้มีสมมติฐานที่ว่า กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุดูดซับเพียงชั้นเดียว ไม่มีการเคลื่อนที่อิสระของสารดูดซับบนผิวของวัสดุดูดซับ พื้นที่ผิวในการดูดซับจะมีจำนวนที่แน่นอนและพลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

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

โดยที่

$X = X/m$ คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารตัวกลางมีหน่วยเป็น mg/g

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายมากที่สุดที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (Monolayer) มีหน่วยเป็น mg/g

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็น mg/l

b = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

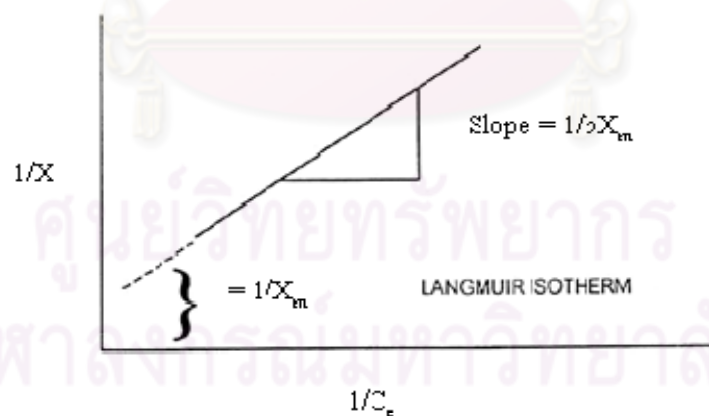
เมื่อ X เข้าสู่ X_m และ C_e เข้าสู่ ∞ จากสมการเขียนได้เป็น

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

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

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

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_e$ จะได้กราฟซึ่งเป็นเส้นตรง ดังรูป



ภาพที่ 2.7 แสดงไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir)

2) ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช จะมีสมมติฐานการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) จัดว่าเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลวซึ่งมีสมการ ดังนี้

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

โดยที่

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

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็น mg/l

K = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ

$1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

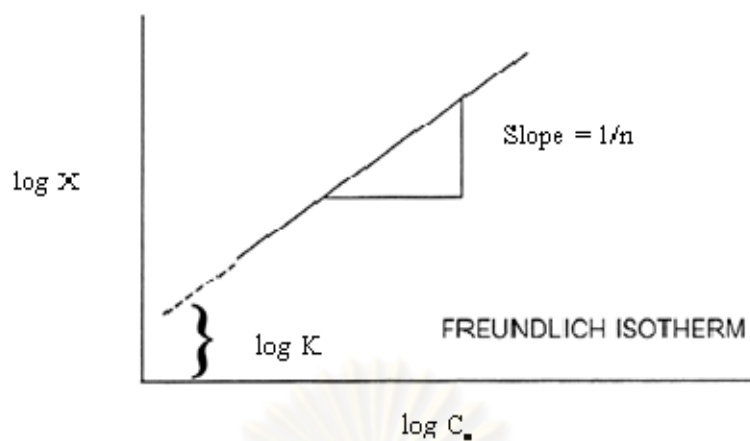
จากสมการ (2.4) สามารถเขียนสมการในรูป logarithm ได้ดังนี้

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

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

ในการดูดซับของตัวดูดซับทั้งที่เป็นชนิดเดียวกันและต่างชนิดกัน

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log X$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ดังรูป



ภาพที่ 2.8 แสดงไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sasithorn, Wiwattanadate, and Sangsuk, (2010) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbon, PAHs) ที่ปนเปื้อนในน้ำ ด้วยถ้ำลอยแกลบ เปรียบเทียบกับถ้ำลอยถ่านหิน และซิลิกาจากถ้ำลอยแกลบ ทั้งชนิดที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิว โดยใช้แนฟธาซีน (Naphthalene) เป็นสารตัวแทนสำหรับสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และใช้เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) เป็นสารปรับสภาพผิว พบว่าหากใช้สารดูดซับ 0.3 g ผสมในสารละลายแนฟธาซีนในน้ำ ความเข้มข้น 10 mg/l ปริมาณ 100 ml สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ คือ ทำการเขย่าสารดูดซับแต่ละชนิดในสารละลาย pH 2 ด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที ทั้งนี้พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับคล้ายคลึงกันสำหรับสารดูดซับทุกตัวที่ใช้ในการศึกษานี้

นอกจากนี้ยังพบว่าซิลิกาจากถ้ำลอยแกลบที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย CTAB มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด โดยที่ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารดูดซับกับแนฟธาซีนที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเริ่มคงที่หรือเข้าสู่สมดุล เมื่อใช้สารดูดซับ 0.7 g ต่อแนฟธาซีน 1 mg ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับระบบการดูดซับในการศึกษานี้ คือ การใช้สารดูดซับ 0.7 g ต่อแนฟธาซีน 1 mg ในสารละลาย pH 2 ทำการเขย่าด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที ส่วนผลการศึกษากฎการดูดซับพบว่า มีความสอดคล้องกับทฤษฎีการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm)

Mukherjee et al., (2007) ได้ทำการศึกษากาการใช้วัสดุคาร์บอนสามชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ถ้ำชานอ้อย และถ่านไม้ เพื่อเป็นสารดูดซับ ฟีนอลจากน้ำ ซึ่งในการทดลองจะใช้ฟีนอลซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้น 2 ความเข้มข้น กล่าวคือ ที่ความเข้มข้น 30 และ 50 mg/l และใช้สารดูดซับในปริมาณที่เท่ากัน คือ 50 g/l จากนั้นศึกษาผลของค่า pH ของสารละลาย ความเข้มข้นของ EDTA แอนไอออน และปริมาณตัวดูดซับที่ใช้กำจัดฟีนอล และทำการศึกษาดesorption test ด้วย ผลการทดลองของฟีนอล-ถ่านกัมมันต์ ฟีนอล-ถ่านไม้ และฟีนอล-ถ้ำชานอ้อย พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับคือ 98%, 90% และ 90% ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าถ้ำชานอ้อยเป็นสารดูดซับที่ดีสำหรับสารอินทรีย์ชนิดมีขั้วเล็กน้อย อย่างเช่น ฟีนอล

การศึกษาด้านจลนศาสตร์แสดงให้เห็นว่า การกำจัดฟีนอลด้วยสารดูดซับที่เลือกนั้นเป็นไปตามการดูดซับลำดับหนึ่ง แบบจำลองไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (Freundlich) ถูกใช้เพื่อปรับข้อมูลสำหรับการดูดซับฟีนอลด้วยสารดูดซับ ประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH ของระบบการดูดซับลดลง ผลของไนเตรตไอออน และ EDTA ในสารละลายที่ใช้ในการดูดซับฟีนอลนั้นไม่มีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม คลอไรด์ไอออนมีผลกระทบอย่างมากต่อการกำจัดด้วยถ้ำชานอ้อย การประมาณการ

สัมประสิทธิ์การแพร่เป็นตัวแสดงว่า การแพร่ของฟิล์มอาจจะควบคุมการดูดซับของฟีนอลด้วยสารดูดซับ

Hall et al., (2009) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจากน้ำโดยการดูดซับด้วยซิลิกาเจล ในการทดลองนี้ใช้อะซีแนฟทีน (Acenaphthene) เป็นตัวแทนของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน โดยใช้อะซีแนฟทีนเข้มข้น 1 mg/l ปริมาตร 1 L และใช้ซิลิกาเจลซึ่งเป็นสารดูดซับปริมาณ 2 g กวนที่ความเร็วรอบ 350 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่าการดูดซับสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลต่ำบนพื้นผิวซิลิกาเจล มีพฤติกรรมดูดซับเป็นไปตามสมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

Affandi et al., (2009) ได้ทำการศึกษาถึงวิธีการอย่างง่ายสำหรับการเตรียมซิลิกา ซีโรเจล (Silica Xerogels) ที่มีความบริสุทธิ์สูงจากเถ้าขานอ้อย โดยในการเตรียมซิลิกา ซีโรเจล จะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

- ขั้นแรก จะสกัดซิลิกาโดยการล้างเถ้าขานอ้อยด้วยกรด ระหว่างนั้นทำการต้มเถ้าขานอ้อยในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเวลา 1 ชั่วโมงโดยกวนสารละลายตลอดเวลา จากนั้นกรองสารละลายเพื่อกำจัดคาร์บอนออกไป จะได้สารละลายโซเดียมซิลิเกต ซึ่งตั้งทิ้งไว้ให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง
- ขั้นที่สอง นำโซเดียมซิลิเกตใส่ลงไปในเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดประจุบวก (Cation Exchange Resin) ในกระบวนการการเกิดเจล จะไตเตรตสารละลายโซเดียมซิลิเกตด้วยกรดไฮโดรคลอริก กวนอย่างสม่ำเสมอ จนได้ซิลิกาเจลออกมา ตั้งทิ้งไว้ จากนั้นเติมน้ำ (de-ionized) ลงไปเพื่อให้เจลมีลักษณะเป็นวุ้น
- ขั้นสุดท้าย ล้างเจลด้วยน้ำบริสุทธิ์ (de-mineralized water) และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

Noonpui et al., (2010) ได้ทำการศึกษา การกำจัดสีจากน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตหมึกพิมพ์ฐานน้ำโดยใช้เถ้าลอยขานอ้อย เถ้าลอยซีลี้อยและถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับ ซึ่งในการเตรียมสารดูดซับนั้นสรุปได้ดังนี้

- กรณีเถ้าลอยซีลี้อย จะนำเถ้าลอยซีลี้อย (pH~ 11) 50 กรัม มาล้างด้วยน้ำประปา 1 ลิตร โดยการกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เปลี่ยนน้ำล้างจนเถ้าลอยซีลี้อยมีค่า pH คงที่ (pH~9.5)
- ส่วนกรณีเถ้าขานอ้อยก็จะเตรียมเช่นเดียวกันโดยการล้างเถ้าขานอ้อย (pH ~9) ด้วยน้ำประปาจนกระทั่งค่า pH คงที่ (pH ~8.8)

จากนั้นนำตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และคัดขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60, 80, 100 และ 200 เมช เก็บตัวดูดซับที่เตรียมได้ไว้ในโถดูดความชื้น เมื่อทำการทดลองการดูดซับที่สภาวะต่างๆ โดยผสมสารดูดซับ 10 mg ลงในสารละลายที่สังเคราะห์ได้ 10 ml เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 1 คืนที่อุณหภูมิต่างๆ และปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4500 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 15 นาที

จากผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของถ่านกัมมันต์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและสามารถอธิบายการดูดซับได้โดยใช้แบบจำลองของแลงเมียร์ ฟรุนดลิชและเรดลิช-ปีเตอร์สัน

พัชรินทร์ วรรณกุล, (2010) ได้ศึกษาเทคโนโลยีการสังเคราะห์ซิลิกาจากถ่านกัมมันต์ โดยพบว่าในถ่านกัมมันต์มีปริมาณซิลิกาสูงมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ เหมาะแก่การนำมาใช้เป็นแหล่งซิลิกาในการสังเคราะห์วัสดุที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ เช่น ซิลิกาเจล ซีโอไลต์ ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น ซึ่งวัสดุซิลิกาที่สังเคราะห์ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับสารเคมีอันตรายได้ด้วย

สำหรับสมบัติทางเคมีของสารละลายซิลิกาที่สำคัญ คือ ปฏิกริยาระหว่างซิลิกากับน้ำ ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้เกิดการตกตะกอนเป็นซิลิกาในขานอ้อย แกลบ และพืชชนิดต่างๆ ได้แก่ การละลาย (Solubility) การตกตะกอน (Precipitation) การรวมตัว (Agglomerate) และการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) ซึ่งการเกิดพอลิเมอร์ เกิดได้แต่ลักษณะตามสภาวะ ดังนี้ สภาวะพีเอชต่ำ การละลายของซิลิกาจะต่ำ ทำให้เกิดการรีโพร่งของอนุภาคขนาดต่ำกว่า 1 ไมโครเมตร เท่านั้น ดังนั้นการเกิดพอลิเมอร์จึงเกิดได้มากกว่า สภาวะพีเอชปานกลางแต่ต่ำกว่า 10 อนุภาคซิลิกาที่มีขนาดเล็กจะรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคซิลิกาที่มีขนาดใหญ่ สภาวะพีเอชมากกว่า 10 สภาพการละลายจะสูงพอที่จะเกิดรีโพร่ง และเกิดเป็นคอลลอยด์ขนาดใหญ่ขึ้น

Gupta et al., (1998) ได้ศึกษาการใช้ประโยชน์ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการอุตสาหกรรมน้ำตาล ในการกำจัดและเก็บกลับคืน Phenol and *p*-Nitrophenol จากน้ำเสีย โดยจะต้องเตรียมถ่านกัมมันต์ ด้วยการนำไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เพื่อไปออกซิไดส์สารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในถ่านกัมมันต์ (100 volumes) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เก็บไว้ในโถดูดความชื้น และก่อนนำไปทดสอบการดูดซับจะต้องทำการคัดขนาดอนุภาคก่อน โดยในการทดลองจะทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ดังนี้ ผลของค่าพีเอช (pH) ปริมาณสารดูดซับ และความเข้มข้นของฟีนอล และเมื่อทดสอบการดูดซับ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ คือ ค่าพีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 4 ปริมาณสารดูดซับที่

เพียงพอคือ 10 g/l และมีค่าการดูดซับลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นแบบคายความร้อน

Gupta et al., (2002) ได้ศึกษาการกำจัด Lindane และ Malathion จากน้ำเสียโดยการใช้ถ้ำลอยชานอ้อยซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมน้ำตาล โดยถ้ำลอยชานอ้อยที่ได้มาจะต้องนำมาทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ (de-ionized water) อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส บดและคัดขนาดของถ้ำลอยชานอ้อย ทำการทดลองการดูดซับที่สภาวะต่างๆ พบว่า เวลาที่เหมาะสมที่สุด คือ 60 นาที การกำจัดจะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ค่า pH 6 และจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และขนาดอนุภาคของตัวดูดซับที่ลดลง ซึ่งประสิทธิภาพการดูดซับจะมีค่า 97-98 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ตัวดูดซับ 5 g/l ที่มีขนาดอนุภาค 200-250 μm โดยประสิทธิภาพการดูดซับจะไปเป็นตามแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

Sener and Ozyilmaz, (2010) ได้ทำการศึกษาการนำ Sonicated Talc มาเป็นตัวดูดซับแนฟธาลินในน้ำ โดยจะละลายแนฟธาลิน 0.15 g ใน 1-butanol 45 ml และเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 4500 ml เตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้น 30 mg/l เก็บสารละลายไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการทดลองการดูดซับด้วย Sonicated Talc พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามพื้นที่ผิวของ Talc ซึ่งในการทดลองนี้ การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารละลายไม่มีผลต่อการดูดซับ และการดูดซับเป็นไปตามไอโซเทอมของฟรุนดลิช

Gupta and Sharma, (2003) ได้ศึกษาการกำจัดสังกะสีออกจากสารละลายโดยใช้ถ้ำลอยชานอ้อยเป็นสารดูดซับ ผลการทดลองพบว่าการดูดซับด้วยถ้ำลอยชานอ้อยที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมมีประสิทธิภาพการดูดซับต่ำ จึงได้นำถ้ำลอยชานอ้อยไปปรับสภาพ (treat) ด้วยการทำปฏิกิริยากับ H_2O_2

30 %w/v (100 volume) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนกระทั่งหยุดเกิดฟอง จากนั้น ล้างด้วยน้ำกลั่น และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จะกำจัดสารอินทรีย์ (organic matter) ที่ปนเปื้อนออกจากถ้ำลอยชานอ้อย เมื่อทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับพบว่า สามารถกำจัดสังกะสีได้ 100 % เมื่อความเข้มข้นของโลหะต่ำ และสามารถกำจัดสังกะสีได้ 60-65% เมื่อความเข้มข้นของโลหะสูงขึ้น ภายใต้สภาวะดังนี้ pH 4.0 ปริมาณตัวดูดซับ 10 g/l และเวลาในการทำปฏิกิริยา 6-8 ชั่วโมง

Rachakornkij, Ruangchuay and Teachakulwiroj, (2004) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากสารละลายโดยใช้เถ้าลอยขาน้อย โดยดูดซับสีย้อม 3 ชนิด คือ Remazol Black B(RBB), Remazol Brilliant Blue(RBBR) และ Remazol Brilliant Red F3B(RBRF3B) ซึ่งมีวิธีการเตรียมเถ้าลอยขาน้อยสำหรับใช้เป็นตัวดูดซับ ดังนี้ นำเถ้าลอยขาน้อยไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ประมาณ 24 ชั่วโมง ร้อนผ่านตะแกรงให้ได้ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 μm เมื่อนำไปทดสอบการดูดซับพบว่า ค่าการดูดซับสีย้อมจะลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเพิ่มขึ้น และค่าการดูดซับสีย้อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น โดยสภาวะที่ให้ค่าการดูดซับสีย้อมสูงสุด ซึ่งมีค่ามากกว่า 50% คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม เท่ากับ 50 mg/l ค่า pH ประมาณ 5 ระยะเวลาสัมผัส เท่ากับ 240, 300 และ 240 นาที สำหรับ RBB, RBBR และ RBRF3B ตามลำดับ

Mall, Srivastava and Agarwal, (2006) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมชนิด Orange-G(OG) และ Methyl Violet(MV) โดยการดูดซับด้วยเถ้าลอยขาน้อย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาปัจจัยต่างๆ เช่น pH ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณสารดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้น พบว่า ค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับ OG และ MV คือ 4 และ 9 ตามลำดับ และความสามารถในการกำจัดสีย้อมจะลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเพิ่มขึ้น และความสามารถในการกำจัดสีย้อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารดูดซับเพิ่มมากขึ้น การศึกษาทางจลนศาสตร์แสดงให้เห็นว่า การดูดซับของสีย้อมด้วยเถ้าลอยขาน้อยจะเกิดแบบช้าๆ และจะเข้าสู่สมดุลในระยะเวลา 4 ชั่วโมง และจากการศึกษาพฤติกรรมดูดซับ พบว่า การดูดซับของสีย้อม OG และ MV ด้วยเถ้าลอยขาน้อยสามารถอธิบายได้ด้วยสมการการดูดซับของฟรุนดลิช และเรดลิตซ์ปีเตอร์สัน ตามลำดับ โดยเถ้าลอยขาน้อยที่ใช้นั้นมีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนสูงซึ่งทำให้สามารถใช้เป็นสารดูดซับสำหรับกำจัดสีย้อมชนิด OG และ MV ได้

Kalapathy, Proctor and Shultz, (2000) ได้ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ซิลิกาบริสุทธิ์จากเถ้าแกลบ โดยการสกัดด้วยต่างจากนั้นตกตะกอนด้วยกรด ซิลิกาเจลที่ผลิตได้จะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้ได้เป็นซีโรเจล (xerogel) และจากการวิเคราะห์ด้วย energy dispersive X-ray (EDX) พบว่า ซีโรเจลที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณซิลิกา 93 % และเมื่อทำการล้างเถ้าแกลบด้วยกรดก่อนการสกัดซิลิกา พบว่าปริมาณ Ca ที่ปนเปื้อนจะลดลง อย่างไรก็ตาม การล้างซีโรเจลด้วยน้ำจะมีผลในการลดปริมาณแร่ที่ปนเปื้อนได้มากกว่า และจากการวิเคราะห์ X-ray diffraction พบว่า ซิลิกาซีโรเจลมีโครงสร้างอสัณฐาน และข้อมูลจากการวิเคราะห์ Fourier transform infrared แสดงให้เห็นว่าซิลิกาซีโรเจลที่สังเคราะห์ได้มีหมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกซิลและไฮดรอกซิล ซึ่งมีวิธีการสกัดซิลิกาจากเถ้าแกลบดังนี้

นำเถ้าแกลบ (10 กรัม) ในน้ำ (60 มิลลิลิตร) จากนั้นทำการปรับ pH กวนสารละลายเป็นเวลา 2 ชั่วโมง กวนสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 41 ล้างตะกอนที่เหลือด้วยน้ำ (100 มิลลิลิตร) จากนั้นนำเถ้าแกลบที่ได้ไปทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1N ปริมาตร 60 มิลลิลิตร ต้มและกวนสารละลายเป็นเวลา 1 ชั่วโมง กวนสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 41 เพื่อแยกสารละลายออกมา จากนั้นล้างตะกอนที่เหลือด้วยน้ำต้ม (100 มิลลิลิตร) นำสารละลาย (filtrate) มาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นทำการไทเทรตด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1N จนกระทั่งสารละลายมี pH เท่ากับ 7 ตั้งทิ้งไว้ให้เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นเติมน้ำ 100 มิลลิลิตร เพื่อให้เจลแตกตัว นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะได้ซีโรเจล และเมื่อนำไปล้างด้วยน้ำและอบให้แห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะได้ซิลิกาบริสุทธิ์

Kushwaha, Srivastava and Mall, (2010) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ถ่านกัมมันต์และเถ้าลอยขานอ้อย พบว่า สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียคือ ค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 4.8 ปริมาณสารดูดซับ 20 กรัมต่อลิตรสำหรับถ่านกัมมันต์ และ 10 กรัมต่อลิตรสำหรับเถ้าลอยขานอ้อย และระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 8 ชั่วโมง สมดุลการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองไอโซเทอมของเรดลิช- ปีเตอร์สัน

Lataye, Mishra and Mall, (2008) ได้ศึกษาการดูดซับ 2- picoline จากสารละลาย โดยใช้เถ้าลอยขานอ้อย ซึ่งเถ้าลอยขานอ้อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะล้างด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จากนั้นทำให้แห้งและคัดขนาดด้วยตะแกรงคัดขนาด (Sieve) พบว่า การดูดซับมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และเรดดิช ปีเตอร์สันและประสิทธิภาพการดูดซับ เมื่อใช้เถ้าลอยขานอ้อย 5 kg/m^3 ในสารละลายที่มีค่า pH 6.5 สรุปได้ดังนี้

- ประสิทธิภาพการกำจัด 2-picoline สูงสุด คือ 98 % เมื่อใช้ความเข้มข้นต่ำๆ (<50 มิลลิกรัมต่อลิตร)
- ประสิทธิภาพการกำจัด 2-picoline คือ 49% เมื่อใช้ความเข้มข้นสูง (600 มิลลิกรัมต่อลิตร)

Mane, Mall and Srivastava, (2007) ได้ศึกษาการดูดซับสี Brilliant green ด้วยเถ้าลอยขานอ้อย โดยทำการทดลองแบบกะ และศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ค่า pH ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณสารดูดซับและความเข้มข้นเริ่มต้น ซึ่งพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสี Brilliant green คือ ค่า pH ของสารละลายเท่ากับ 3 ใช้ปริมาณสารดูดซับ 3 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ซึ่งการดูดซับเป็นไปตามไอโซเทอมการดูดซับของเรดดิช ปีเตอร์สันและแลงเมียร์ นอกจากนี้ยังพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

อรวรรณ สิงห์จันทร์ และภัทรา เฟงธรรมกิริติ, (2549) ได้ศึกษาการกำจัดสีในน้ำเสียด้วย ถ้ำลอยที่กระตุ้นผ่านกระบวนการทางเคมี พบว่า ถ้ำลอยจากถ่านหิน ถ้ำลอยจากแกลบ และถ้ำลอย จากชีวมวลมีองค์ประกอบหลักเป็นควอร์ต โดยถ้ำลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกระบวนการทางเคมีมี องค์ประกอบและโครงสร้างที่เปลี่ยนไป ส่งผลให้ถ้ำลอยมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น โดยบางส่วนของถ้ำลอยที่ ผ่านการกระตุ้นด้วยเบสมีคุณสมบัติเป็นซีโอไลต์ ในขณะที่ถ้ำลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดมี องค์ประกอบหลักๆ คงเดิม

และจากการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำถ้ำลอยไปใช้ในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสีย พบว่า ปัจจัยที่มี ผลต่อการกำจัดสี ได้แก่ ชนิดของสี ชนิดถ้ำลอย และสภาวะในการกำจัด โดยถ้ำลอยจากชีวมวลมี ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมากที่สุด

Gupta et al., (1999) ได้ศึกษาการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วย ไฟฟ้า (Electroplating) โดยใช้ถ้ำลอยขานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมน้ำตาล โดยมี วิธีการเตรียมสารดูดซับ ดังนี้

ปรับสภาพผิวถ้ำลอยขานอ้อยด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อน จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เก็บถ้ำลอยขานอ้อยไว้ในโถดูดความชื้น จากนั้นบดและคัดขนาดถ้ำลอยขานอ้อยด้วย ตะแกรงคัดขนาด ก่อนการนำไปดูดซับ

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมด้วยถ้ำลอยขานอ้อย พบว่า ประสิทธิภาพการดูด ซับจะลดลงเมื่อค่า pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น และพฤติกรรมการดูดซับโครเมียมด้วยถ้ำลอยขานอ้อย สอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิชและแลงเมียร์

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

3.3.1 ศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ของสารดูดซับ (ถ้ำลอยชานอ้อย) สารดูดซับที่ผ่านการปรับสภาพผิวและซิลิกาที่สกัดได้จากถ้ำลอยชานอ้อย

3.3.2 ศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ ด้วยการปรับสภาพผิวถ้ำลอยชานอ้อย และซิลิกาที่สกัดได้จากถ้ำลอยชานอ้อย ด้วยสารปรับสภาพผิวชนิดประจุบวก (Cationic amphiphilic molecules)

3.3.3 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เช่น ความเร็วรอบ ช่วงเวลาสัมผัส ค่า pH และสัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแนฟธาลิน เป็นต้น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer(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 Spectrometer รุ่น PerkinElmer (Spectrum One)

3.2.4 เครื่อง Specific Surface Area Analyzer รุ่น Autosorb-1

3.2.5 เครื่อง UV-Vis Spectroscopy รุ่น Shimadzu UV-160A

3.2.6 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น Joel 5800

3.2.7 เครื่องเขย่าแนวราบ รุ่น GFL 3005

3.2.8 เครื่องปั่นเหวี่ยงแยก รุ่น IEC Central-HN

3.2.9 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (พีเอชมิเตอร์) รุ่น PH-200

3.2.10 เครื่องชั่งไฟฟ้าอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง

3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 ถ้ำลอยชานอ้อย

3.3.2 ซิลิกาที่สกัดได้จากถ้ำลอยชานอ้อย

3.3.3 แนฟธาลิน ความบริสุทธิ์มากกว่า 98% บริษัท Fluka

3.3.4 เมทานอล ความบริสุทธิ์มากกว่า 98% บริษัท Merck

3.3.5 Cetyltrimethylammoniumbromide (CTAB) ความบริสุทธิ์มากกว่า 98% บริษัท Ajax Finechem

3.3.6 กรดไฮโดรคลอริก บริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย)

3.3.7 โซเดียมไฮดรอกไซด์ บริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย)

3.3.8 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% บริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย)

3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

3.4.1 การศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสารดูดซับ

- 1) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับโดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)
- 2) วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของสารดูดซับ โดยใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)
- 3) วิเคราะห์ลักษณะรูปร่างพื้นผิวของสารดูดซับ โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)
- 4) วิเคราะห์พื้นที่ผิวของสารดูดซับด้วยเครื่อง Specific Surface Area Analyzer (BET)
- 5) วิเคราะห์ลักษณะหมู่ฟังก์ชันเฉพาะของสารดูดซับและสารดูดซับที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)

3.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณแนฟทาลีนในสารละลาย (ก่อนและหลังใส่สารดูดซับ) ด้วยเทคนิค UV -Visible Spectroscopy โดยมีวิธีการวิเคราะห์ ดังนี้

- 1) เตรียมสารละลายแนฟทาลีนในตัวทำละลายเมทานอล นำไปตรวจวัดด้วยเครื่อง UV-Visible Spectroscope เพื่อหาค่า λ_{\max} (ความยาวคลื่นที่แนฟทาลีนดูดกลืนแสงได้ดีที่สุด)
- 2) เตรียมสารละลายแนฟทาลีนในตัวทำละลายเมทานอลความเข้มข้นต่างๆ กัน วัดค่าการดูดกลืนแสง (ABS) ที่ λ_{\max}
- 3) เขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นสารละลายกับค่าการดูดกลืนแสง (ABS) เพื่อใช้เป็นกราฟมาตรฐาน (Calibration Curve) สำหรับหาความเข้มข้นของสารละลายแนฟทาลีน

3.4.3 ศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับด้วยการปรับสภาพผิวถ่านอนุภาค

1) การปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

นำถ่านลอยขานอ้อยมาทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 30 %w/v (100 volume) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนกระทั่งหยุดเกิดฟอง จากนั้น นำถ่านลอยขานอ้อย ไปล้างด้วยน้ำกลั่น อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Gupta et al., 2003)

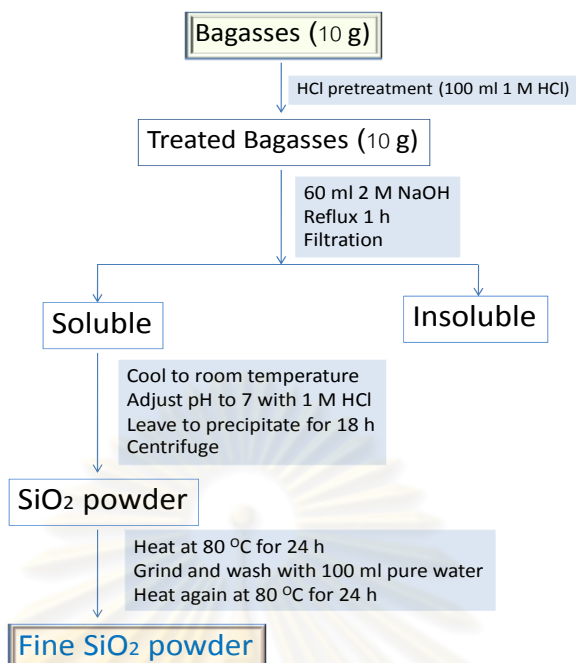
2) การสกัดซิลิกาจากถ่านลอยขานอ้อย (ศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย)

การปรับสภาพผิวถ่านลอยด้วยกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid pretreatment) โดยนำถ่านลอยขานอ้อย 10 กรัม ละลายในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร กวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 41 และล้างด้วยน้ำกลั่นจนค่า pH เป็นกลาง

นำถ่านลอยขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรด (10 กรัม) ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 60 มิลลิลิตร แล้วนำไปรีฟลักซ์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 41 เพื่อแยกเอาสารละลาย (Filtrate) ออกมา ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ จนกระทั่งมี pH เท่ากับ 7 ทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 18 ชั่วโมง เกิดเป็นซิลิกาเจล เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร เพื่อให้เจลแตกตัว จากนั้นเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยง เทส่วนที่เป็นของเหลวทิ้ง จากนั้นนำส่วนที่เหลือไปเข้าเครื่องอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ซิลิกา จากนั้นนำของแข็งที่ได้ไปบดให้ละเอียด นำไปล้างด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.1

3) การปรับสภาพผิวถ่านอนุภาคด้วยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ดังนี้

นำเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) 1.4 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมถ่านลอยขานอ้อยลงในสารละลาย 8 กรัม กวนของผสมตลอดเวลา เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้น นำสารดูดซับไปล้างด้วยน้ำกลั่น และนำไปอบด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ธีรศักดิ์, 2551 อ้างถึงใน จักรพงษ์ ศศิธร, 2552: 40)



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการสกัดซิลิกาจากเถ้าลอยชานอ้อย

3.4.4 การศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสารดูดซับหลังการปรับสภาพพื้นผิว

- 1) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับโดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)
- 2) วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของสารดูดซับโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)
- 3) วิเคราะห์ลักษณะรูปร่างพื้นผิวของสารดูดซับ โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)
- 4) วิเคราะห์พื้นที่ผิวของสารดูดซับด้วยเครื่อง Specific Surface Area Analyzer (BET)
- 5) วิเคราะห์ลักษณะหมู่ฟังก์ชันเฉพาะของสารดูดซับและสารดูดซับที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)

3.4.5 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับแนฟธาลีนด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ

3.4.5.1 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบที่ใช้ในการเขย่า (Shaking Rate)

1) เตรียมสารละลายแอฟธาไลน์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร 3 ขวดสำหรับสารดูดซับแต่ละชนิด (เพื่อทำการทดลองซ้ำ) ตรวจวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscope เพื่อหาค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (Initial concentration)

2) เติมสารดูดซับแต่ละชนิด ได้แก่ ถ้ำลอยซานอ้อย ถ้ำลอยซานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ถ้ำลอยซานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ถ้ำลอยซานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ซิลิกาจากถ้ำลอยซานอ้อย และซิลิกาจากถ้ำลอยซานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ในขวดแต่ละใบ ปริมาณ 0.3 กรัม

3) นำขวดแต่ละชุดไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100, 150, 200 และ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที

4) นำของผสมไปแยกตัวดูดซับออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงแยกที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำ Filtrate ไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1

5) นำสารละลายที่กรองได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscope เพื่อหาค่าความเข้มข้นแอฟธาไลน์หลังการดูดซับ (Final concentration) แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าประสิทธิภาพการกำจัดแอฟธาไลน์ (% Removal)

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

3.4.5.2 ศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัส (Shaking Time)

1) เตรียมสารละลายแอฟธาไลน์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร 3 ขวดต่อสารดูดซับแต่ละชนิด เพื่อทำการทดลองซ้ำ ตรวจวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscope เพื่อหาค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (Initial concentration)

2) เติมสารดูดซับแต่ละชนิด ได้แก่ ถ้ำลอยซานอ้อย ถ้ำลอยซานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ถ้ำลอยซานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ถ้ำลอยซานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ซิลิกาจากถ้ำลอยซานอ้อย และซิลิกาจากถ้ำลอยซานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ในขวดแต่ละใบ ปริมาณ 0.3 กรัม

- 3) นำขวดแต่ละชุดไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.5.1 เป็นเวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 นาที
- 4) นำของผสมไปแยกตัวดูดซับออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงแยกโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงแยกที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำ Filtrate ไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1
- 5) นำสารละลายที่กรองได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscope เพื่อหาค่าความเข้มข้นแนฟทาลีนหลังการดูดซับ (Final concentration) แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าประสิทธิภาพการกำจัดแนฟทาลีน (% Removal)

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

3.4.5.3 ศึกษาอิทธิพลของค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ

- 1) เตรียมสารละลายแนฟทาลีนเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่มีค่า pH เท่ากับ 2, 4, 6, 8 และ 10 ตามลำดับ โดยการปรับ pH ด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ 3 ขวดต่อสารดูดซับแต่ละชนิดเพื่อทำการทดลองซ้ำ ตรวจสอบวัดค่าการดูดกลืนคลีนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscope เพื่อหาค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (Initial concentration)
- 2) เติมสารดูดซับแต่ละชนิด ได้แก่ ถ้ำลอยชานอ้อย ถ้ำลอยชานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ถ้ำลอยชานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ถ้ำลอยชานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ซิลิกาจากถ้ำลอยชานอ้อย และซิลิกาจากถ้ำลอยชานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ในขวดแต่ละใบ ปริมาณ 0.3 กรัม
- 3) นำขวดแต่ละชุดไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบและเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.5.1 และ 3.4.5.2 ตามลำดับ
- 4) นำของผสมไปแยกตัวดูดซับออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงแยกโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงแยกที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำ Filtrate ไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1
- 5) นำสารละลายที่กรองได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscope เพื่อหาค่าความเข้มข้นแนฟทาลีนหลังการดูดซับ (Final concentration) แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าประสิทธิภาพการกำจัดแนฟทาลีน (% Removal)

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

3.4.5.4 ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแอฟธาลิน

1) เตรียมสารละลายแอฟธาลินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับค่า pH ตามค่าที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.5.3 จำนวน 3 ขวดต่อสารดูดซับแต่ละชนิดเพื่อทำการทดลองซ้ำ ตรวจสอบวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscope เพื่อหาค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (Initial concentration)

2) เติมสารดูดซับแต่ละชนิด ได้แก่ ถ้ำลอยชานอ้อย ถ้ำลอยชานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ถ้ำลอยชานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ถ้ำลอยชานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ซิลิกาจากถ้ำลอยชานอ้อย และซิลิกาจากถ้ำลอยชานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ในขวดแต่ละใบ ปริมาณ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 กรัม (จักรพงษ์ ศศิธร, 2552: 43)

3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบและเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.5.1 และ 3.4.5.2 ตามลำดับ

4) นำของผสมไปแยกตัวดูดซับออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงแยกโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงแยกที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำ Filtrate ไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1

5) นำสารละลายที่กรองได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscope เพื่อหาค่าความเข้มข้นแอฟธาลินหลังการดูดซับ (Final concentration) แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าประสิทธิภาพการกำจัดแอฟธาลิน (% Removal)

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

3.4.5.5 ศึกษาพฤติกรรมการดูดซับหรือชนิดไอโซเทอมของการดูดซับ

1) เตรียมสารละลายแอฟธาลินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับค่า pH ตามค่าที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.5.3 จำนวน 3 ขวดต่อสารดูดซับแต่ละชนิดเพื่อทำการ

ทดลองซ้ำ ตรวจสอบวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscope เพื่อหาค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (Initial concentration)

2) เตรียมสารดูดซับแต่ละชนิด ได้แก่ ถ้ำลอยชานอ้อย ถ้ำลอยชานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ถ้ำลอยชานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ถ้ำลอยชานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ซิลิกาจากถ้ำลอยชานอ้อย และซิลิกาจากถ้ำลอยชานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ในขวดแต่ละใบ ปริมาณ 0.01, 0.02, 0.04, 0.1, 0.2, 0.4 และ 1.0 กรัม (จักรพงษ์ ศศิธร, 2552: 43)

3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบและเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.5.1 และ 3.4.5.2 ตามลำดับ

4) นำของผสมไปแยกตัวดูดซับออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงแยกโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงแยกที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำ Filtrate ไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1

5) นำสารละลายที่กรองได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscope เพื่อหาค่าความเข้มข้นแนฟทาลีนหลังการดูดซับ (Final concentration) แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าไอโซเทอมในการดูดซับ

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสารดูดซับ

4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับ ด้วยเทคนิค XRF

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยซานอ้อยที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry, XRF) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ถ้ำลอยซานอ้อยมีองค์ประกอบหลัก คือ SiO_2 (66.18 %โดยน้ำหนัก) ที่เหลือเป็นธาตุอื่นๆ ในปริมาณน้อยมาก (แต่ละชนิดมีปริมาณน้อยกว่า 5 %โดยน้ำหนัก) ขณะที่พบค่า LOI (Loss on Ignition) สูงถึง 17.10 % โดยน้ำหนัก ซึ่งคาดว่าเป็นปริมาณคาร์บอนหรือสารอินทรีย์ที่หลงเหลืออยู่ เนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Unburned carbon or organic matters)

ตาราง 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยซานอ้อย (% โดยน้ำหนัก)

องค์ประกอบ	% โดยน้ำหนัก
SiO ₂	66.18
Na ₂ O	0.33
MgO	1.38
Al ₂ O ₃	2.87
P ₂ O ₅	1.55
SO ₃	0.85
Cl	0.04
K ₂ O	3.85
CaO	3.56
TiO ₂	0.28
MnO ₂	0.21
Fe ₂ O ₃	1.68
Br	<0.01
ZrO ₂	0.01
BaO	0.06
%LOI	17.10
Total	99.95

สืบเนื่องจากถ้ำลอยซานอ้อยที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีคาร์บอนที่ยังไม่ถูกเผาไหม้ ปริมาณค่อนข้างสูง ซึ่งน่าจะเป็นอุปสรรคขัดขวางการดูดซับที่ผิวของถ้ำลอยซานอ้อย จึงทดลองนำไปปรับสภาพผิวด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อกำจัดคาร์บอนหรือสารอินทรีย์ที่หลงเหลืออยู่บนพื้นผิวถ้ำลอยซานอ้อย ก่อนนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบองค์ประกอบ SiO_2 เพิ่มขึ้นจาก 66.18 เป็น 70.07 % โดยน้ำหนัก ขณะที่ ปริมาณ LOI ลดลงเพียงเล็กน้อย จาก 17.10 เป็น 15.40 % โดยน้ำหนัก แสดงว่าคาร์บอนหรือสารอินทรีย์ ที่ปนเปื้อนถ้ำลอยซานอ้อยถูกออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปบางส่วน (Gupta et al., 1997)

ตาราง 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยซานอ้อย ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

องค์ประกอบ	% โดยน้ำหนัก
SiO ₂	70.07
Na ₂ O	0.27
MgO	1.21
Al ₂ O ₃	2.86
P ₂ O ₅	1.41
SO ₃	0.20
Cl	<0.01
K ₂ O	3.20
CaO	3.14
TiO ₂	0.29
MnO ₂	0.17
Fe ₂ O ₃	1.67
Br	<0.01
ZrO ₂	0.01
BaO	0.05
%LOI	15.40
Total	99.95

สืบเนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถออกซิไดซ์คาร์บอนหรือสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในถ้ำลอยชานอ้อยได้เพียงบางส่วน อาจไม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของถ้ำลอย จึงทดลองสกัดซิลิกาจาก ถ้ำลอยชานอ้อย โดยคาดหวังว่าการไม่มีสารปนเปื้อนคาร์บอนหรือสารอินทรีย์บนพื้นผิว จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาที่สกัดได้ด้วยเทคนิค XRF ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่ามีความบริสุทธิ์ของ SiO_2 สูงถึง 91.92 % โดยน้ำหนัก และไม่ตรวจพบ LOI กล่าวคือ ไม่มีสารปนเปื้อนคาร์บอนหรือสารอินทรีย์บนพื้นผิวของซิลิกาที่สกัดได้ นอกจากนี้ยังตรวจพบองค์ประกอบธาตุอื่นๆ ทุกชนิดลดลงจนเหลือปริมาณน้อยมาก ยกเว้น Na_2O ซึ่งพบว่ามีปริมาณสูงขึ้น ซึ่งคาดว่ามาจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการแยกสกัดซิลิกาจากถ้ำลอยชานอ้อย

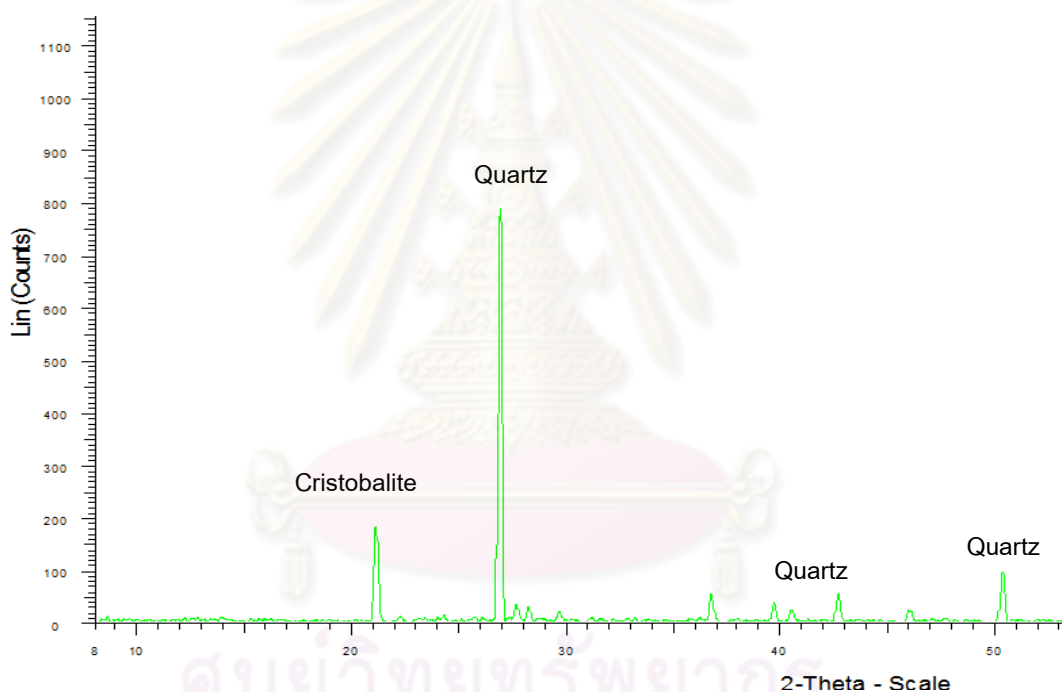
ตาราง 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาจากถ้ำลอยชานอ้อย

องค์ประกอบ	% โดยน้ำหนัก
SiO_2	91.92
Na_2O	5.69
MgO	<0.01
Al_2O_3	1.44
P_2O_5	<0.01
SO_3	<0.01
Cl	0.44
K_2O	0.38
CaO	0.02
TiO_2	<0.01
MnO_2	<0.01
Fe_2O_3	0.10
Br	<0.01
ZrO_2	<0.01
BaO	<0.01
%LOI	-
Total	99.99

4.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของสารดูดซับด้วยเทคนิค XRD

4.1.2.1 ถ้ำลอยซานอ้อยก่อนปรับสภาพพื้นผิว

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของถ้ำลอยซานอ้อย ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction, XRD) พบว่าสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบหลักของถ้ำลอยซานอ้อย คือ Cristobalite และ Quartz ดังแสดงในภาพที่ 4.1 ซึ่งคาดว่าโครงสร้างจุลภาคที่เป็น Cristobalite จะเหมาะแก่การใช้เป็นสารดูดซับมากกว่า Quartz เนื่องจาก Cristobalite เป็นเฟสที่แฝงอยู่ในเฟสอื่นที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้อง แต่ไม่เสถียรจึงสามารถเปลี่ยนเฟสได้ง่าย อีกทั้ง Cristobalite ยังมีโครงสร้างอสัณฐานมากกว่า Quartz

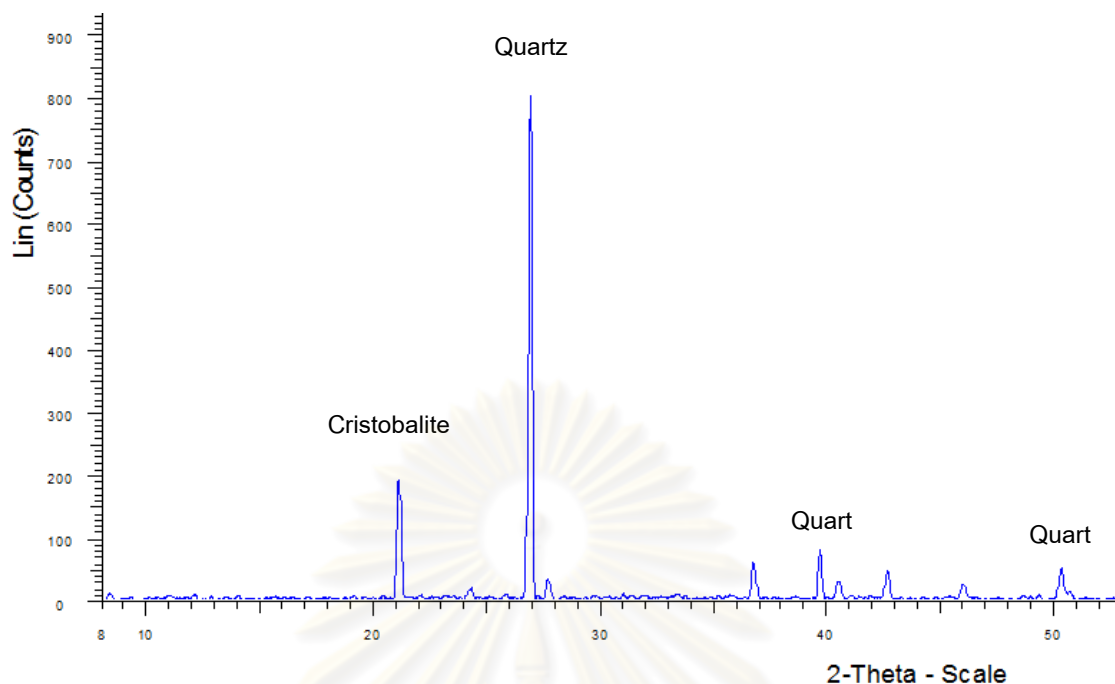


ภาพที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของถ้ำลอยซานอ้อย

4.1.2.2 ถ้ำลอยซานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์

ออกไซด์

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของถ้ำลอยซานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ด้วยเทคนิค XRD ดังแสดงในภาพที่ 4.2 พบว่าการปรับสภาพผิวถ้ำลอยซานอ้อยด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไม่ได้ทำให้โครงสร้างจุลภาคของถ้ำลอยเปลี่ยนไป กล่าวคือ ยังคงประกอบด้วย Cristobalite และ Quartz เช่นเดิม

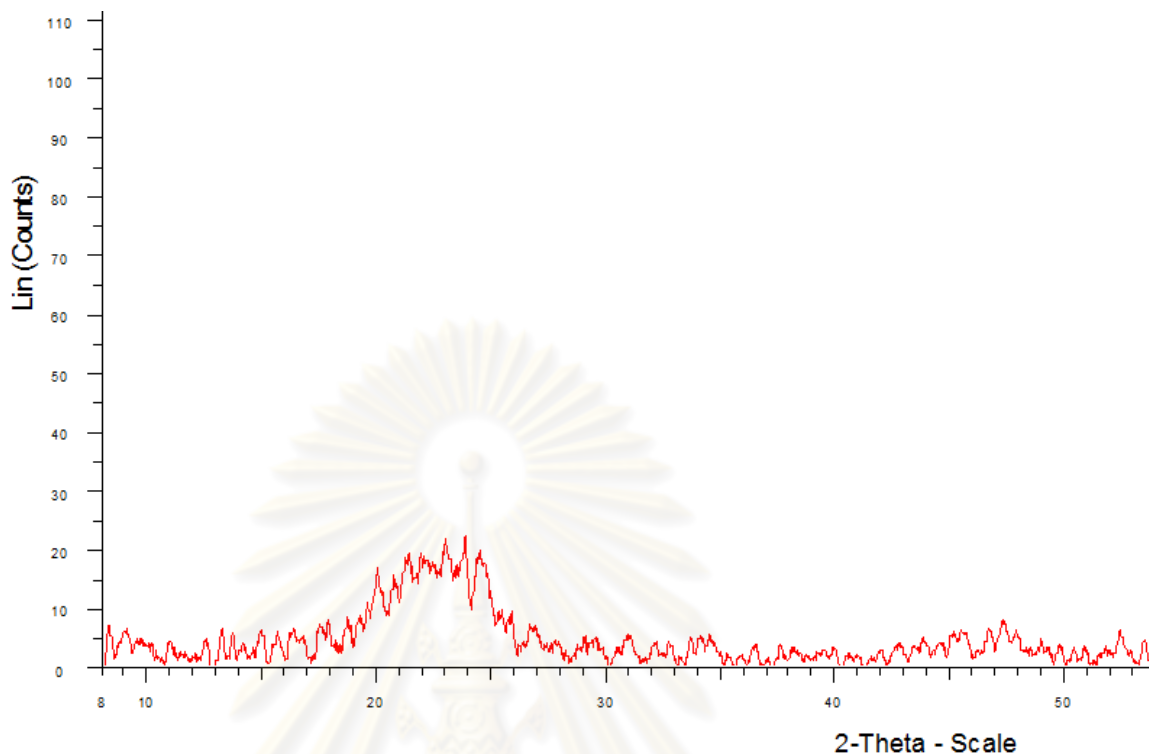


ภาพที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของแก้วลอยซานอ้อย ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

4.1.2.3 ซิลิกาที่สกัดจากแก้วลอยซานอ้อย

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของซิลิกาจากแก้วลอยซานอ้อย ด้วยเทคนิค XRD ดังแสดงในภาพที่ 4.3 พบว่าสารประกอบที่เป็นโครงสร้างผลึกของ Cristobalite และ Quartz ถูกเปลี่ยนสภาพเป็นซิลิกาที่มีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (Amorphous silica) เนื่องจากไม่ปรากฏพีค ที่เด่นชัด โดยเป็นที่คาดว่าซิลิกาที่มีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน จะมีลักษณะเฉพาะ คืออนุภาคขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง (Sasithorn et al., 2010)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซิลิกาจากเถ้าลอยชานอ้อย

4.1.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและลักษณะรูปร่างพื้นผิวของสารดูดซับ

จากการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างพื้นผิวของเถ้าลอยชานอ้อยและซิลิกาที่สกัดได้จากเถ้าลอยชานอ้อย โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่า เถ้าลอยชานอ้อยมีรูปร่างแตกต่างกันไม่แน่นอน มีพื้นผิวเป็นลักษณะรูพรุนจำนวนมาก ดังแสดงในภาพที่ 4.4 ขณะที่ซิลิกาที่สกัดจากเถ้าลอยชานอ้อยแสดงลักษณะผิวขรุขระ (Granule) และเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ดังแสดงในภาพที่ 4.5 ซึ่งอาจส่งผลให้พื้นที่ผิวไม่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเถ้าลอยชานอ้อย ดังแสดงในตารางที่ 4.4

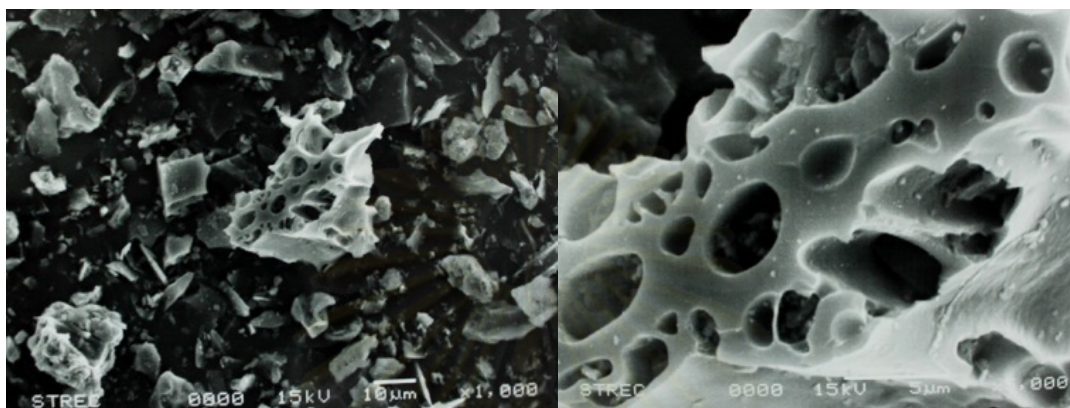
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์การหาพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

สารดูดซับ	พื้นที่ผิว (m^2/g)
เถ้าลอยชานอ้อย	77.07
ซิลิกาจากเถ้าลอยชานอ้อย	70.85
ถ่านกัมมันต์*	950 - 1050

* ที่มา: Mukherjee, Kumar, Misra and Fan, 2007

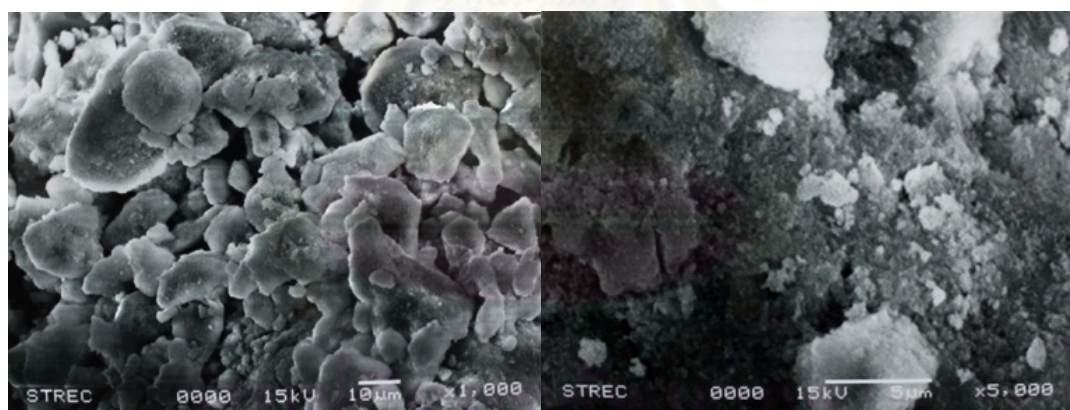
จากผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวด้วยเครื่อง BET Surface Area Analyzer ปรากฏผลดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งพบว่าพื้นที่ผิวของเถ้าลอยชานอ้อยและซีลิกาจากเถ้าลอยชานอ้อยมีค่าใกล้เคียงกัน และน้อยกว่าถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์มาก

4.1.3.1 เถ้าลอยชานอ้อย



ภาพที่ 4.4 ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของเถ้าลอยชานอ้อยที่กำลังขยาย 1000 และ 5000 เท่า

4.1.3.2 ซีลิกาจากเถ้าลอยชานอ้อย



ภาพที่ 4.5 ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของซีลิกาจากเถ้าลอยชานอ้อย
ที่กำลังขยาย 1000 และ 5000 เท่า

4.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะหมู่ฟังก์ชันเฉพาะของสารดูดซับด้วยเทคนิค FTIR

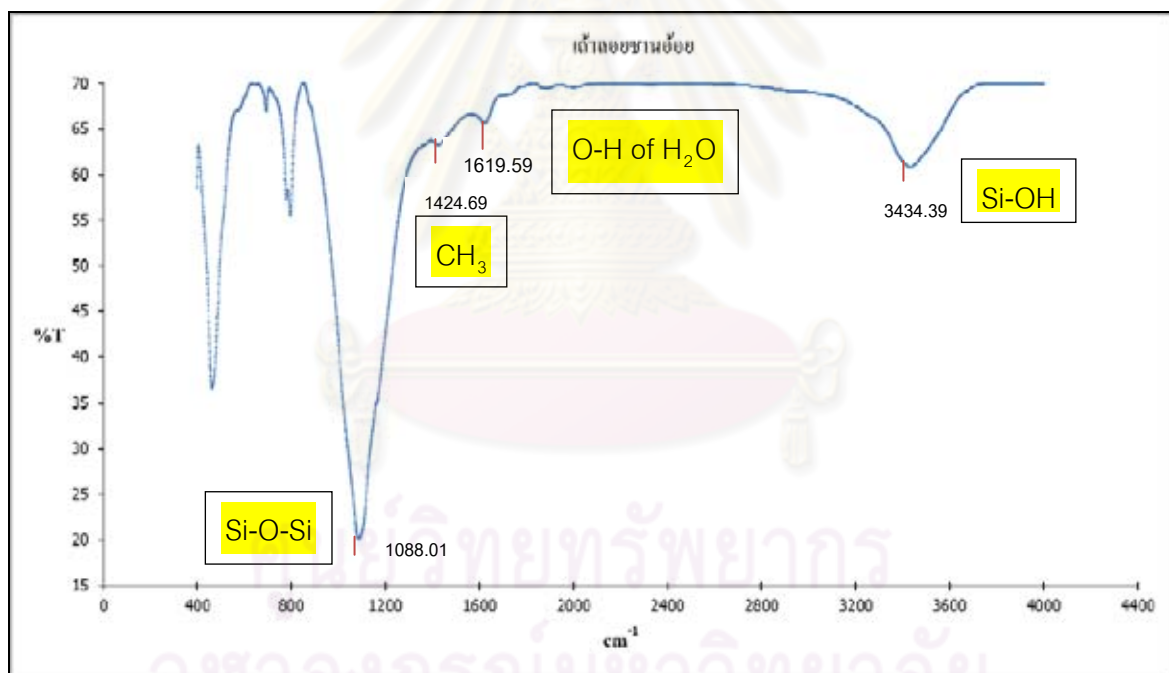
ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเฉพาะ (Functional groups) ของเถ้าลอยชานอ้อย เถ้าลอยชานอ้อย ที่ผ่านการปรับสภาพผิว และซีลิกาจากเถ้าลอยชานอ้อย ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR) แสดงดังภาพที่ 4.6 - 4.11

กรณีเถ้าลอยชานอ้อยก่อนปรับสภาพพื้นผิว พบสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่น 3434.39 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของหมู่ซิลินอล (Si-OH) สเปกตรัมที่ 477 cm^{-1} , 802 cm^{-1} , และ 1088.01 cm^{-1} ซึ่ง

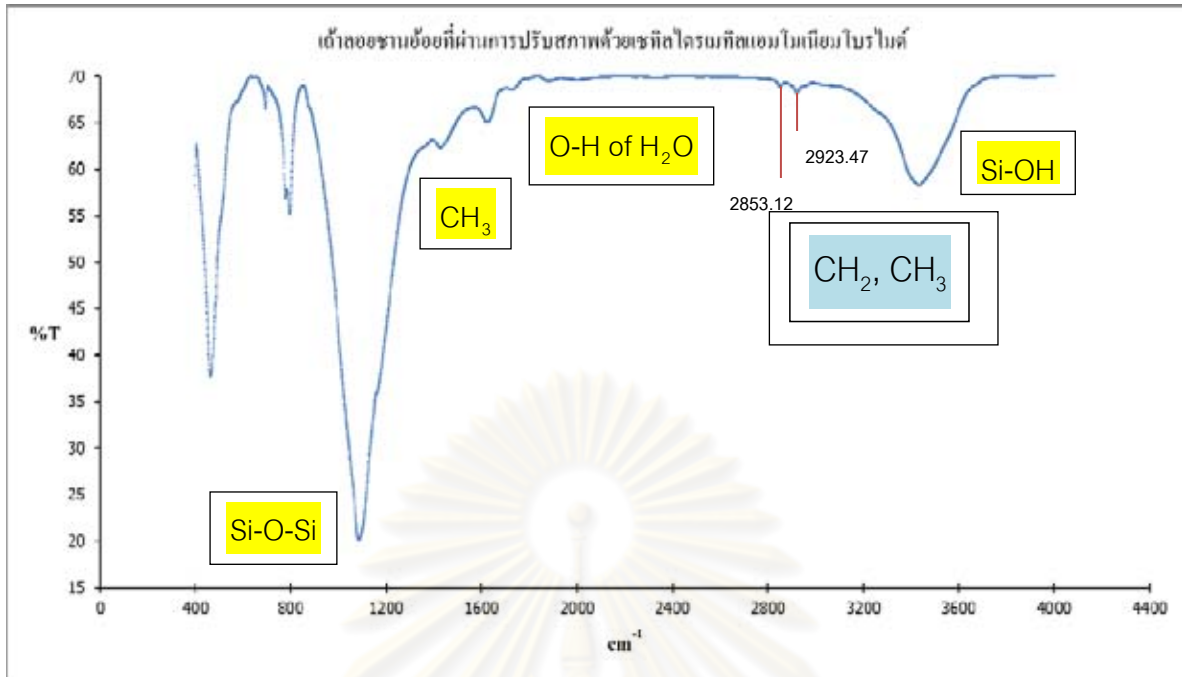
เป็นลักษณะเฉพาะของหมู่ซิลอกเซน (Si-O-Si) และสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น 1619.59 cm^{-1} ซึ่งแสดงลักษณะเฉพาะของน้ำที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวเถ้าลอย (O-H of physically adsorbed water) (Ying-MEI, X., et al., 2010) นอกจากนี้ยังพบสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น 1424.69 cm^{-1} ซึ่งแสดงลักษณะเฉพาะของหมู่เมทิล (CH_3) ซึ่งน่าจะเป็นคาร์บอนที่มาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

หากเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) จะพบสเปกตรัมเพิ่มขึ้นมาที่ความยาวคลื่น 2853.12 และ 2923.47 cm^{-1} ซึ่งแสดงลักษณะเฉพาะของหมู่ไฮโดรคาร์บอน (CH_2 , CH_3) ที่มาจากการปรับสภาพผิวเถ้าลอยชานอ้อยด้วยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ [$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{Br}$]

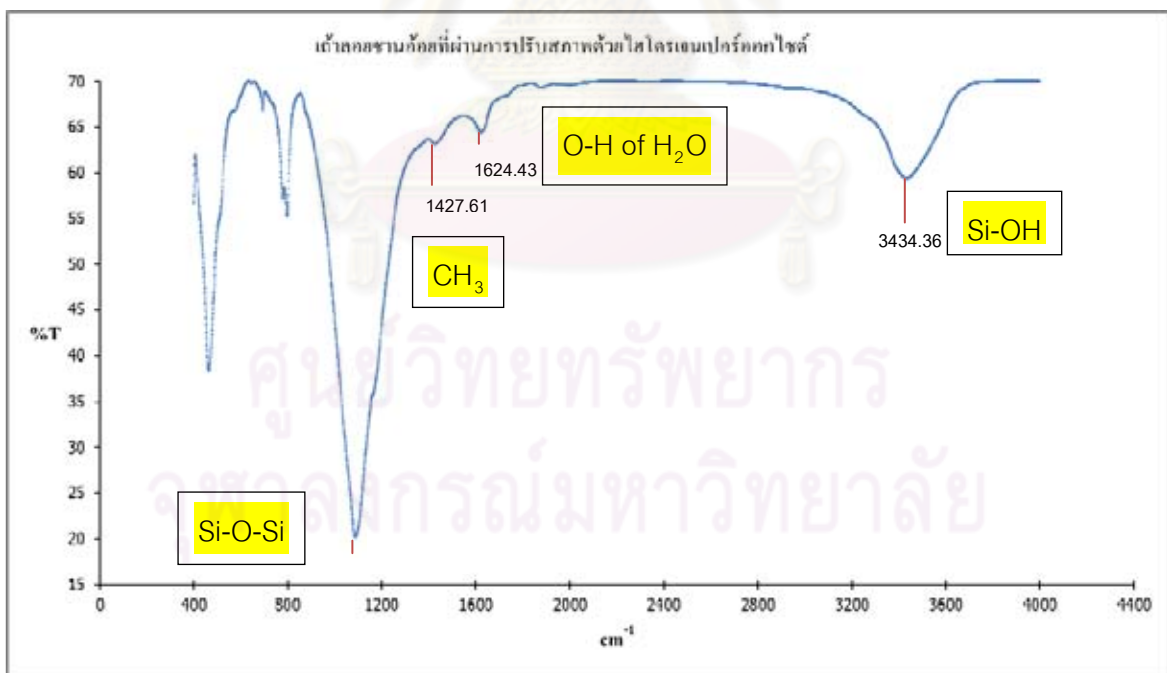
ขณะที่สเปกตรัมของเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และสเปกตรัมของซิลิกาจากเถ้าลอย ไม่ปรากฏความแตกต่างเมื่อเทียบกับสเปกตรัมของเถ้าลอยก่อนการปรับสภาพผิว



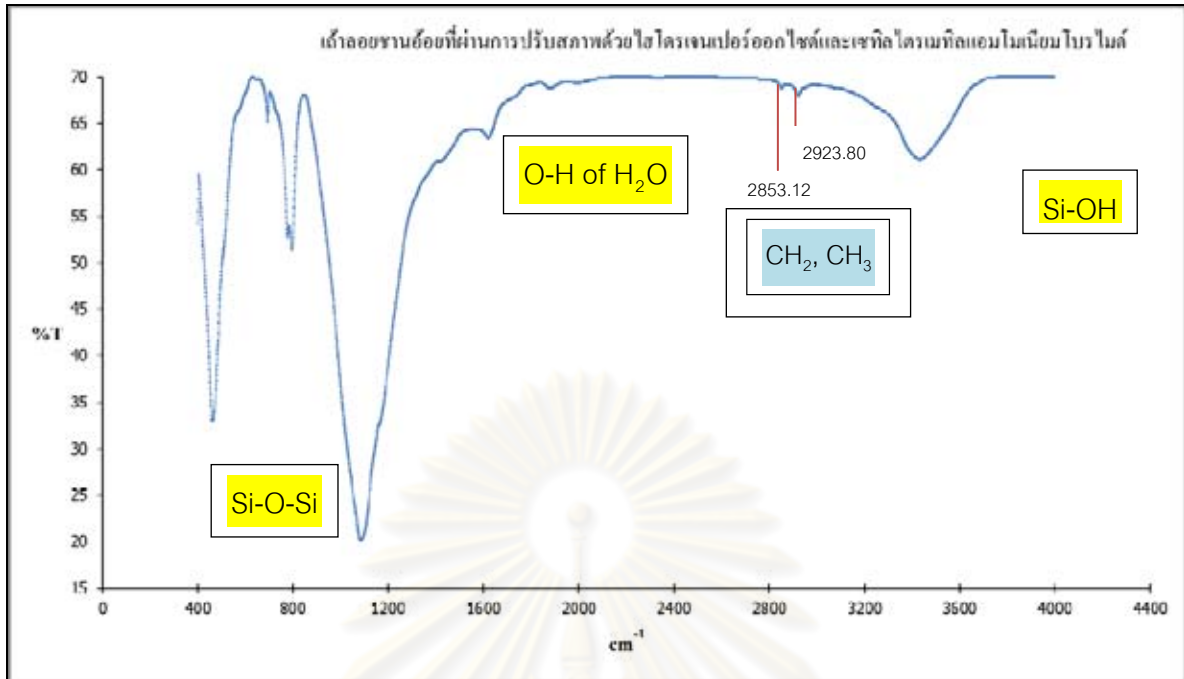
ภาพที่ 4.6 แสดงสเปกตรัม FTIR ของเถ้าลอยชานอ้อย



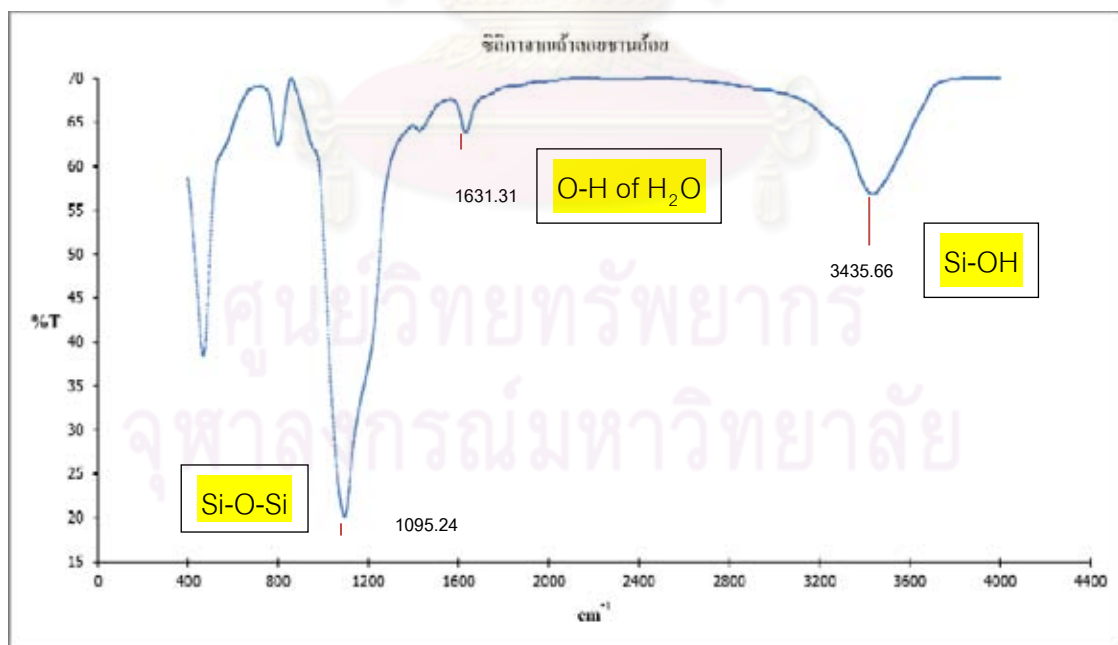
ภาพที่ 4.7 แสดงสเปกตรัม FTIR ของเถาลอยซ่านอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย CTAB



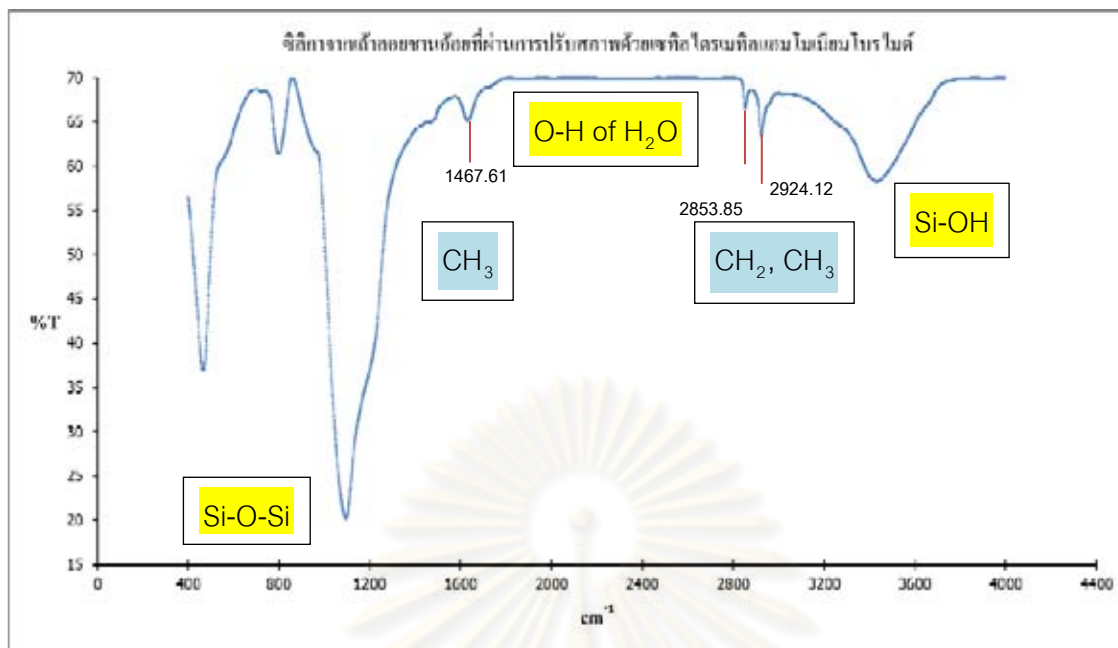
ภาพที่ 4.8 แสดงสเปกตรัม FTIR ของเถาลอยซ่านอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย H₂O₂



ภาพที่ 4.9 แสดงสเปกตรัม FTIR ของแก้วลอยขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย H₂O₂ และ CTAB



ภาพที่ 4.10 แสดงสเปกตรัม FTIR ของซิลิกาจากแก้วลอยขานอ้อย



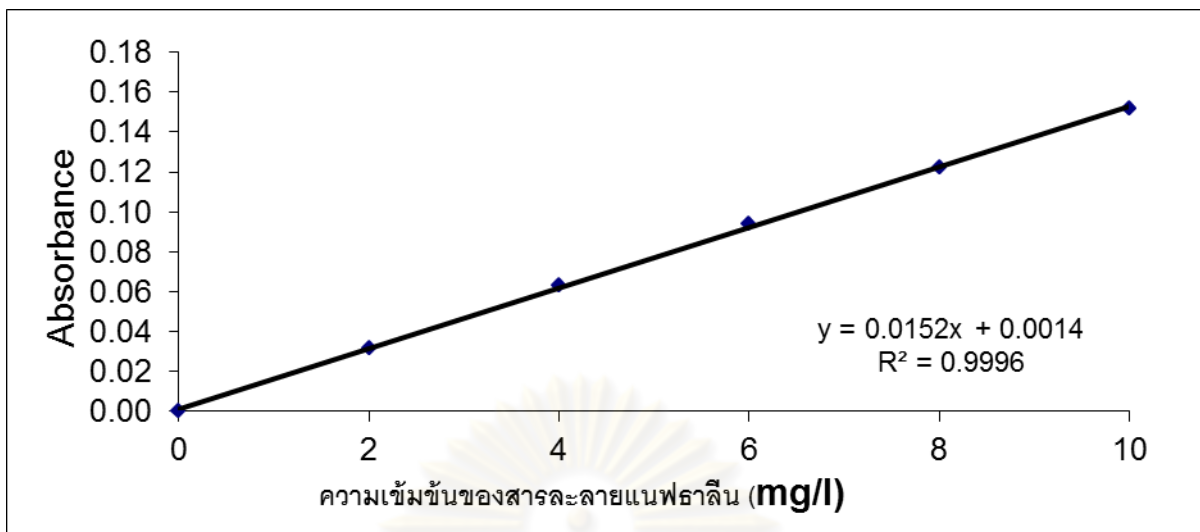
ภาพที่ 4.11 แสดงสเปกตรัม FTIR ของซิลิกาจากถ้ำลอยชนอ้อย
ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย CTAB

4.2 กราฟมาตรฐาน (Calibration Curve) สำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายแอฟธาไลน์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Visible

ในการศึกษาี้เลือกการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 290 นาโนเมตร สำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นสารละลายแอฟธาไลน์ ก่อนและหลังการเติมสารดูดซับลงในสารละลาย โดยใช้กราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ที่ตรวจวัดได้จากการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.12

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแอฟธาไลน์กับค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ความยาวคลื่น 290 นาโนเมตร

ความเข้มข้นของสารละลายแอฟธาไลน์(mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง(Absorbance)
0	0
2	0.032
4	0.063
6	0.094
8	0.122
10	0.152



ภาพที่ 4.12 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแอมฟธาซีนกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 290 นาโนเมตร

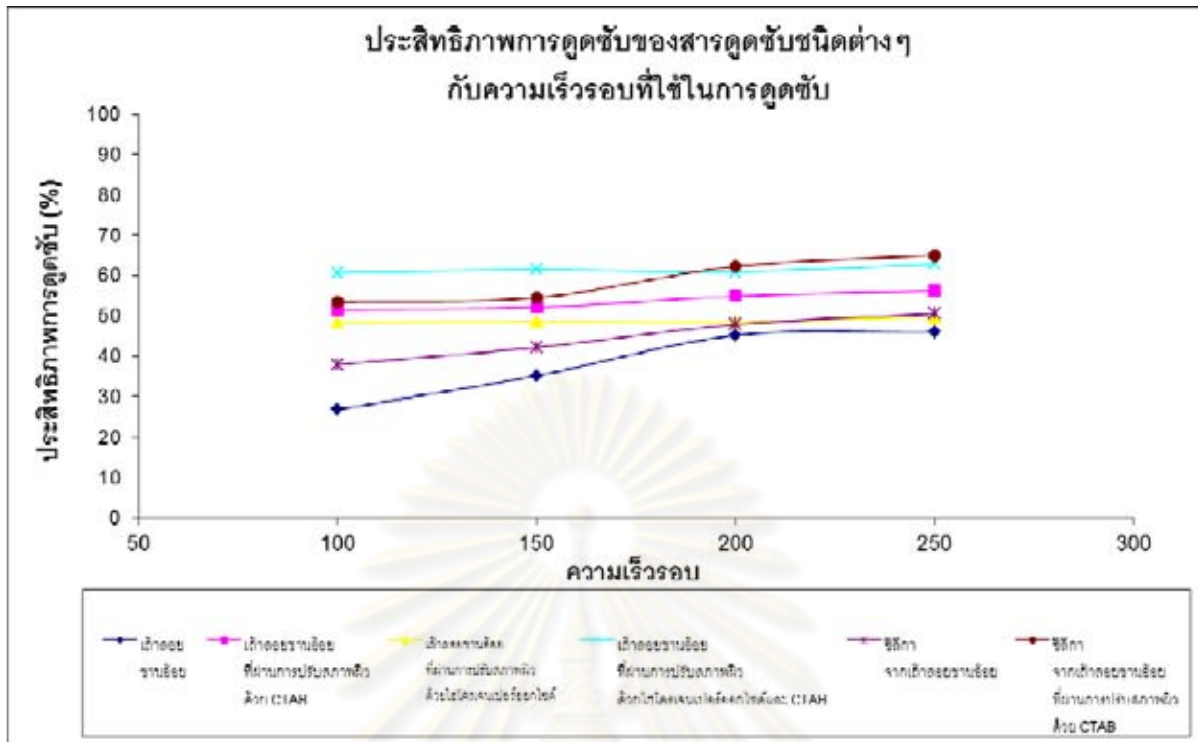
4.3 การศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับแอมฟธาซีนด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ

4.3.1 อิทธิพลของความเร็รรอบที่ใช้ในการเขย่า (Shaking Rate)

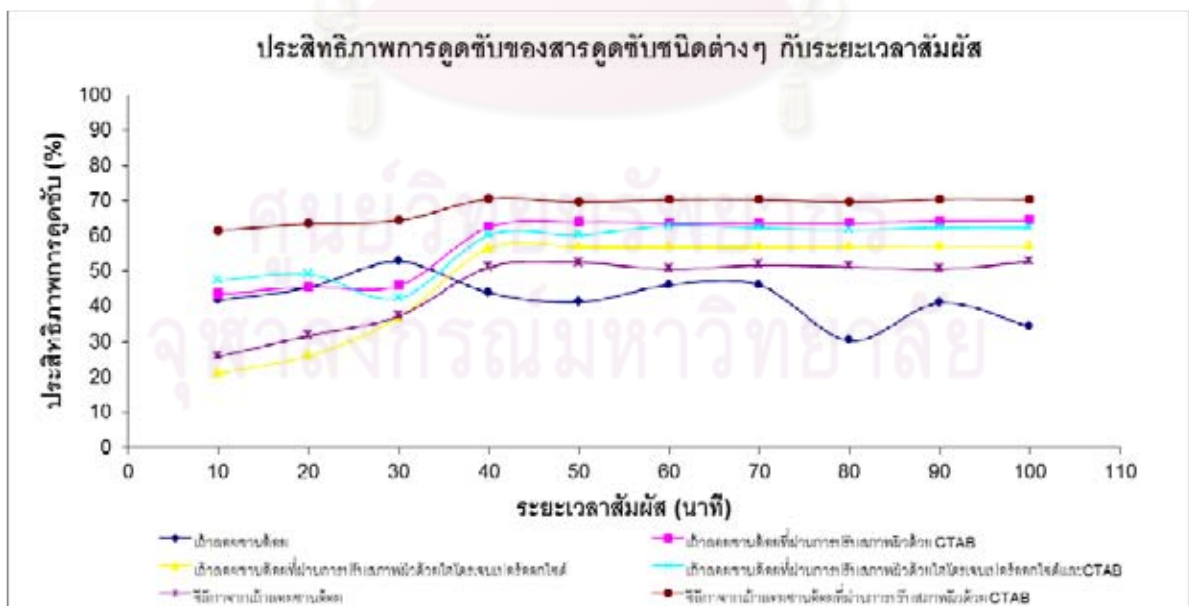
ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแอมฟธาซีน ด้วยแก้วลอยขานอ้อยก่อนและหลังปรับสภาพผิว รวมถึงซีลิกาจากแก้วลอยขานอ้อย โดยทำการเขย่าสารดูดซับแต่ละชนิดในสารละลายแอมฟธาซีนที่มีความเข้มข้น และ pH เท่ากัน เป็นเวลาเท่ากัน ด้วยความเร็รรอบต่างๆกัน และใช้สัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแอมฟธาซีน 0.3 คงที่ ปรากฏผลดังแสดงในภาพที่ 4.13 ซึ่งพบว่าความเร็รรอบที่เหมาะสมคือ 200-250 รอบต่อนาที

4.3.2 อิทธิพลของเวลาสัมผัส (Shaking Time)

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแอมฟธาซีน ด้วยแก้วลอยขานอ้อยก่อนและหลังปรับสภาพผิว รวมถึงซีลิกาจากแก้วลอยขานอ้อย โดยทำการเขย่าสารดูดซับแต่ละชนิดในสารละลายแอมฟธาซีนที่มีความเข้มข้น และ pH เท่ากัน ด้วยความเร็รรอบเท่ากัน เป็นเวลาต่างๆกัน และใช้สัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแอมฟธาซีน 0.3 คงที่ ปรากฏผลดังแสดงในภาพที่ 4.14 ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับเริ่มคงที่ เมื่อเขย่าสารดูดซับในสารละลายแอมฟธาซีน อย่างน้อย 40 นาที



ภาพที่ 4.13 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาลีนด้วยสารดูดซับแต่ละชนิด
ที่ความเร็วรอบต่างๆ กัน



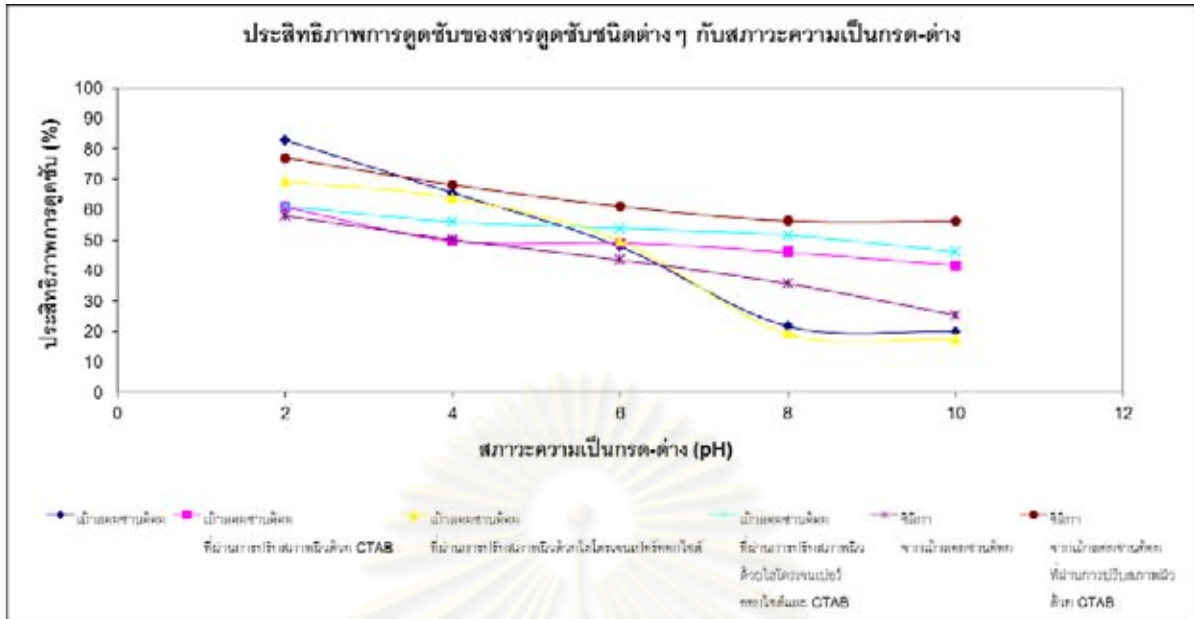
ภาพที่ 4.14 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาลีนด้วยตัวดูดซับแต่ละชนิด
ที่ช่วงเวลาสัมผัสต่างๆ กัน

4.3.3 อิทธิพลของค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ

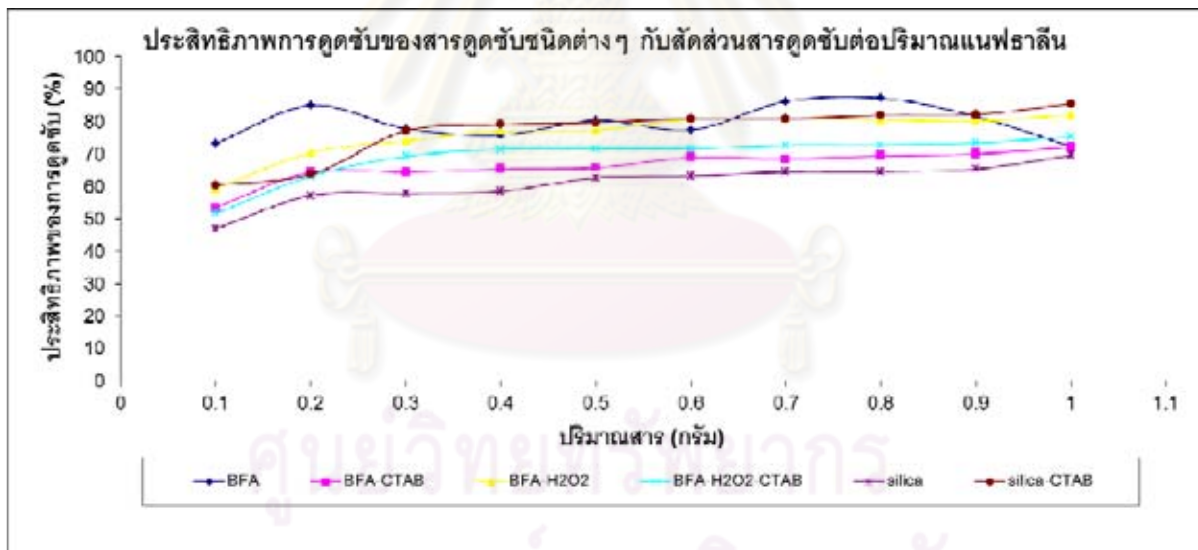
ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแอฟธาไลน์ ด้วยเถ้าลอยขาน้อยก่อนและหลังปรับสภาพผิว รวมถึงซิติกาจากเถ้าลอยขาน้อย โดยทำการเขย่าสารดูดซับแต่ละชนิดในสารละลายแอฟธาไลน์ที่มีความเข้มข้นเท่ากัน แต่ pH ต่างๆกัน ด้วยความเร็วรอบ 250 rpm เท่ากัน เป็นเวลา 40 นาที เท่ากัน และใช้สัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแอฟธาไลน์ 0.3 คงที่ ปรากฏผลดังแสดงในภาพที่ 4.15 ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับลดลงเมื่อ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น จึงเลือกใช้ pH ต่ำสุด คือ 2 สำหรับการทดลอง ทั้งนี้ผลการศึกษาสอดคล้องกับการดูดซับแอฟธาไลน์ด้วยเถ้าลอยแกลบ ซึ่งเป็นการศึกษาของจักรพงษ์ ศศิธร (2552) และการดูดซับฟีนอลด้วยเถ้าขาน้อย ซึ่งเป็นการศึกษาของ Mukherjee et al. ซึ่งพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลงเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น และค่า pH ที่เหมาะสม คือ 2-3 ขณะที่การศึกษาของ Rachakornkij et al.(2004) พบค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสี้อมด้วยเถ้าลอยขาน้อย คือ 5 ซึ่งยังคงเป็นช่วง pH เป็นกรดเช่นเดียวกัน

4.3.4 อิทธิพลของสัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแอฟธาไลน์

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแอฟธาไลน์ ด้วยเถ้าลอยขาน้อยก่อนและหลังปรับสภาพผิว รวมถึงซิติกาจากเถ้าลอยขาน้อย โดยทำการเขย่าสารดูดซับแต่ละชนิดในสารละลายแอฟธาไลน์ที่มีความเข้มข้น และ pH เท่ากัน ด้วยความเร็วรอบ 250 rpm เท่ากัน เป็นเวลา 40 นาทีเท่ากัน แต่ใช้สัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแอฟธาไลน์ที่แตกต่างกัน ปรากฏผลดังแสดงในภาพที่ 4.16 ซึ่งพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับเริ่มคงที่เมื่อใช้สารดูดซับต่อปริมาณแอฟธาไลน์ที่สัดส่วน 0.3-0.4 โดยน้ำหนัก ยกเว้นกรณีเถ้าลอยขาน้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว (BFA) จะต้องใช้สัดส่วนสูงถึง 0.7-0.8 โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของจักรพงษ์ ศศิธร (2552) ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับแอฟธาไลน์ด้วยเถ้าลอยแกลบเริ่มคงที่เมื่อใช้สัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแอฟธาไลน์เท่ากับ 0.7



ภาพที่ 4.15 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับแวนิลาด้วยตัวดูดซับแต่ละชนิดที่ค่า pH ต่างๆ



ภาพที่ 4.16 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับแวนิลาด้วยตัวดูดซับแต่ละชนิด ที่สัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแวนิลาต่างๆ กัน

จากผลการเปรียบเทียบข้างต้น อาจสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมหรือสภาวะคัดเลือกสำหรับการดูดซับแอฟธาไลน์ในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายหลัก ด้วยเถ้าลอยขานอ้อยและซิลิกาจากเถ้าลอยขานอ้อย ซึ่งเป็นสารดูดซับที่มีองค์ประกอบซิลิกาสูง (Silica rich adsorbent) คือ การใช้สารดูดซับต่อปริมาณแอฟธาไลน์ที่สัดส่วน 0.4 โดยน้ำหนัก (กล่าวคือ ใช้สารดูดซับ 0.4 กรัม สำหรับสารละลายแอฟธาไลน์เข้มข้น 10 mg/l ปริมาตร 100 ml) ปรับ pH ของสารละลายให้ต่ำสุด หรือ ใกล้เคียง 2 ทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 rpm เป็นเวลา 40 นาที

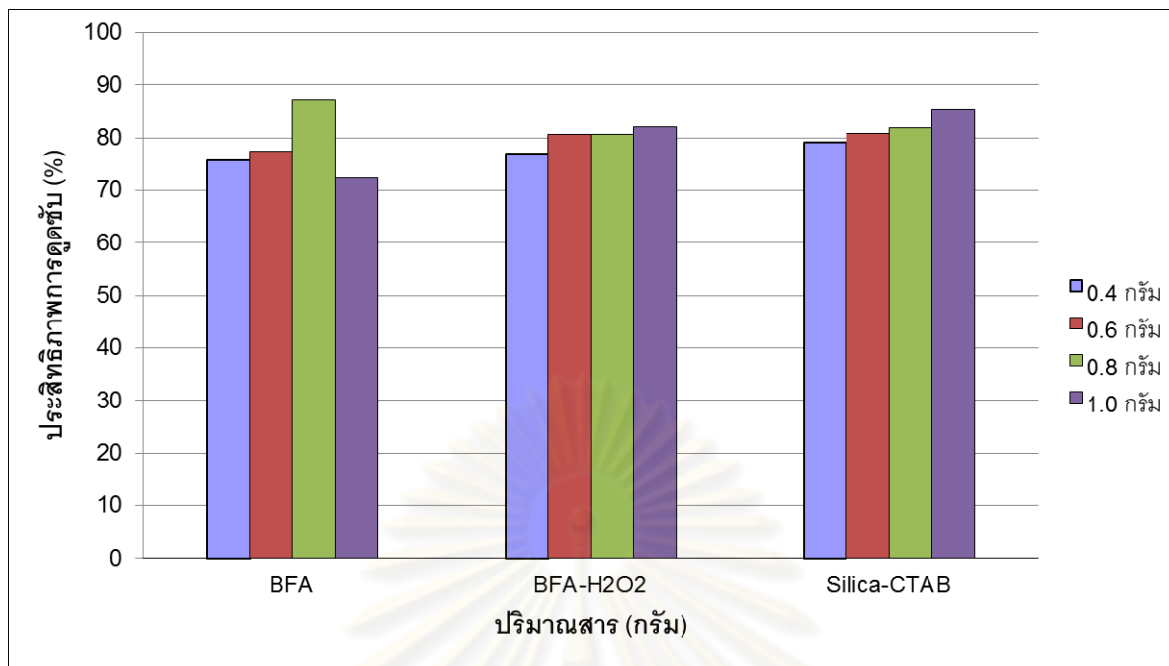
4.3.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของสารดูดซับแต่ละชนิด

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของสารดูดซับแต่ละชนิดที่สภาวะคัดเลือกดังกล่าวข้างต้น กล่าวคือ ทำการดูดซับแอฟธาไลน์จากสารละลายเข้มข้น 10 mg/l ที่ pH ใกล้เคียง 2 ทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 rpm เป็นเวลา 40 นาที โดยใช้สัดส่วนโดยน้ำหนักของสารดูดซับต่อแอฟธาไลน์เท่ากับ 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ ปรากฏผลดังแสดงในภาพที่ 4.17 ซึ่งพบว่าการปรับสภาพผิวเถ้าลอยขานอ้อยด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (BFA-H₂O₂) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับได้เล็กน้อยเมื่อเทียบกับการดูดซับด้วยเถ้าลอยขานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว (BFA) โดยที่สัดส่วนระหว่างสารดูดซับกับแอฟธาไลน์ไม่ปรากฏความแตกต่างอย่างเด่นชัด

นอกจากนี้ยังพบว่าซิลิกาที่สกัดจากเถ้าลอยขานอ้อย แม้จะผ่านการปรับสภาพผิวด้วย CTAB ก็ยังแสดงประสิทธิภาพการดูดซับแอฟธาไลน์ได้ใกล้เคียงกับเถ้าลอยขานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ (BFA-H₂O₂)

ดังนั้นการใช้ประโยชน์เถ้าลอยขานอ้อยสำหรับการดูดซับสาร PAHs จึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายในการสกัดซิลิกา สามารถใช้ได้ทันทีโดยอาจกำจัดคาร์บอนที่หลงเหลืออยู่ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทั้งนี้ซิลิกาจากเถ้าลอยขานอ้อยอาจเหมาะสำหรับการดูดซับสารประเภทอื่น เช่น โลหะอินทรีย์หรือสารไฮโดรฟิลิกอื่นๆ ซึ่งจะต้องศึกษารายละเอียดในโอกาสต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ

4.3.6 การดูดซับแนฟธาลีนด้วยเถ้าลอยชานอ้อยเปรียบเทียบกับเถ้าลอยแกลบ

จากการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีและพื้นที่ผิวของเถ้าลอยชานอ้อยกับเถ้าลอยแกลบ (ดังแสดงสรุปในตารางที่ 4.6) พบว่าเถ้าลอยแกลบมีองค์ประกอบซิลิกาสูงกว่าเถ้าลอยชานอ้อยค่อนข้างมาก แต่มีพื้นที่ผิวต่ำกว่า ประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาลีนจึงต่ำกว่าเถ้าลอยชานอ้อยมากแม้ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยสาร CTAB ประสิทธิภาพการดูดซับก็เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ในทางตรงกันข้ามซิลิกาจากเถ้าลอยแกลบมีพื้นที่ผิวสูงมาก หลังปรับสภาพผิว (เพื่อเพิ่มความไม่ชอบน้ำ) ด้วยสาร CTAB ประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาลีนจึงสูงขึ้นอย่างเด่นชัด ขณะที่ซิลิกาจากเถ้าลอยชานอ้อยมีพื้นที่ผิวใกล้เคียงกับเถ้าลอยชานอ้อยตั้งต้น (ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสภาวะการแยกสกัดซิลิกาจากเถ้าลอยชานอ้อยอาจยังไม่เหมาะสม) ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ดังนี้

- หากต้องการใช้ประโยชน์เถ้าลอยแกลบ (Rice Husk Fly Ash) เป็นสารดูดซับสาร PAHs ควรทำการแยกสกัดซิลิกาแล้วปรับสภาพผิวด้วยสาร CTAB เพื่อเพิ่มความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวซิลิกา
- หากต้องการใช้ประโยชน์เถ้าลอยชานอ้อย (Bagasse Fly Ash) เป็นสารดูดซับสาร PAHs ไม่จำเป็นต้องแยกสกัดซิลิกา เพียงแค่กำจัดคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Unburned carbon) หรือสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนพื้นผิวเถ้าลอยชานอ้อยด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ก็สามารถใช้เป็นสารดูดซับได้เลย โดยไม่จำเป็นต้องปรับสภาพผิวด้วยสาร CTAB จึงเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการดูดซับสารที่ต้องการต้นทุนต่ำ

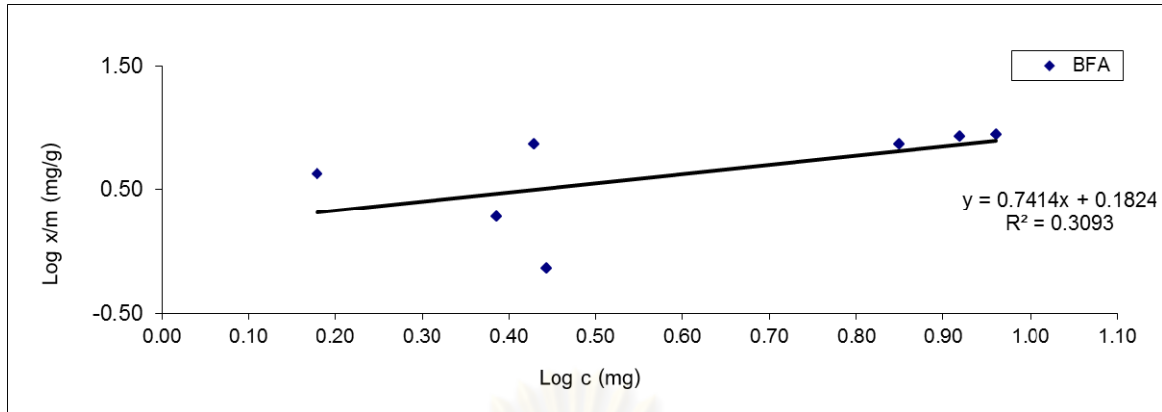
ตารางที่ 4.6 ตารางเปรียบเทียบลักษณะของถ้ำลอยซานอ้อยและถ้ำลอยเกลบ

ลักษณะ	ถ้ำลอยซานอ้อย	ซิลิกาจากถ้ำลอยซานอ้อย	ถ้ำลอยเกลบ*	ซิลิกาจากถ้ำลอยเกลบ*
องค์ประกอบซิลิกา (% โดยน้ำหนัก)	66.18	91.92	82.72	92.00
พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	77.07	70.85	12.29	190.80
ประสิทธิภาพการดูดซับ (กรณีไม่ปรับสภาพผิว)	46.0	50.5	41.0	12.2
ประสิทธิภาพการดูดซับ (ปรับสภาพผิวด้วย CTAB)	56.2	65.0	47.0	67.7
ประสิทธิภาพการดูดซับ (ปรับสภาพผิวด้วย H ₂ O ₂)	49.6	N/A	N/A	N/A
ประสิทธิภาพการดูดซับ (ปรับสภาพผิวด้วย H ₂ O ₂ ตามด้วย CTAB)	62.8	N/A	N/A	N/A

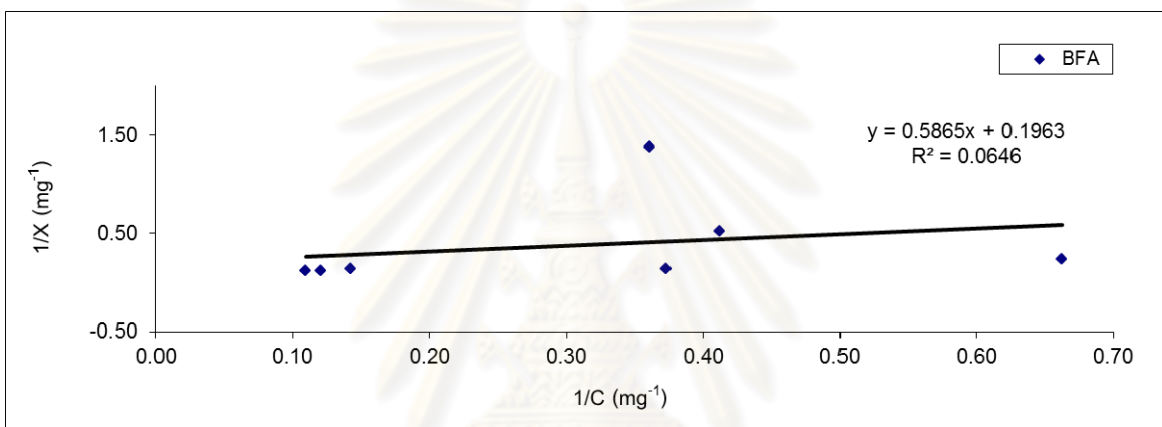
* ที่มา: Sasithorn, 2010

4.3.7 ผลการศึกษาพฤติกรรมดูดซับ

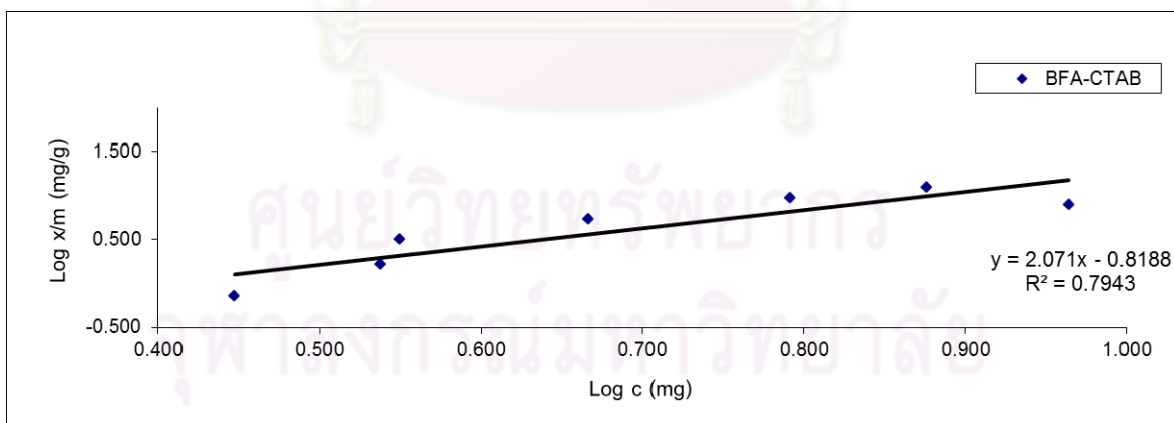
การศึกษาพฤติกรรมดูดซับ เพื่อตรวจสอบว่าการดูดซับแนฟธาลีนบนพื้นผิวถ้ำลอยซานอ้อยเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (หากสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์) หรือ ดูดซับแบบหลายชั้น (หากสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช) จะเป็นแนวทางหนึ่ง ที่ช่วยให้สามารถวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาลีนด้วยสารดูดซับหลากหลายสภาวะดังกล่าวข้างต้นได้ถูกต้องและชัดเจนยิ่งขึ้น จึงได้ทำการทดลองดูดซับแนฟธาลีนด้วยสารดูดซับแต่ละสภาวะ แล้วทดลองเขียนกราฟไอโซเทอม พร้อมกับเปรียบเทียบค่า R² ปราบกฎผลดังแสดงในภาพที่ 4.18 ถึง ภาพที่ 4.31 และในตารางที่ 4.7



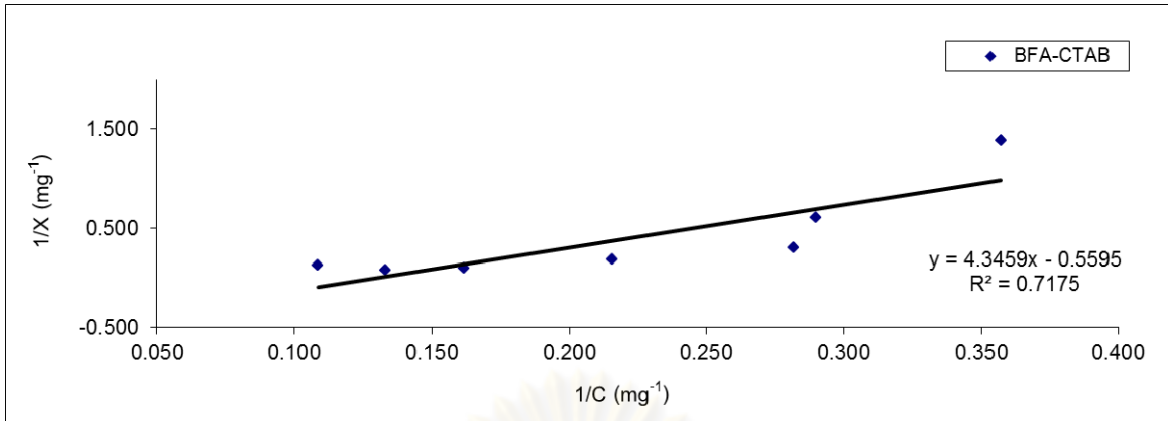
ภาพที่ 4.18 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ้ำลอยซานอ้อย (BFA)



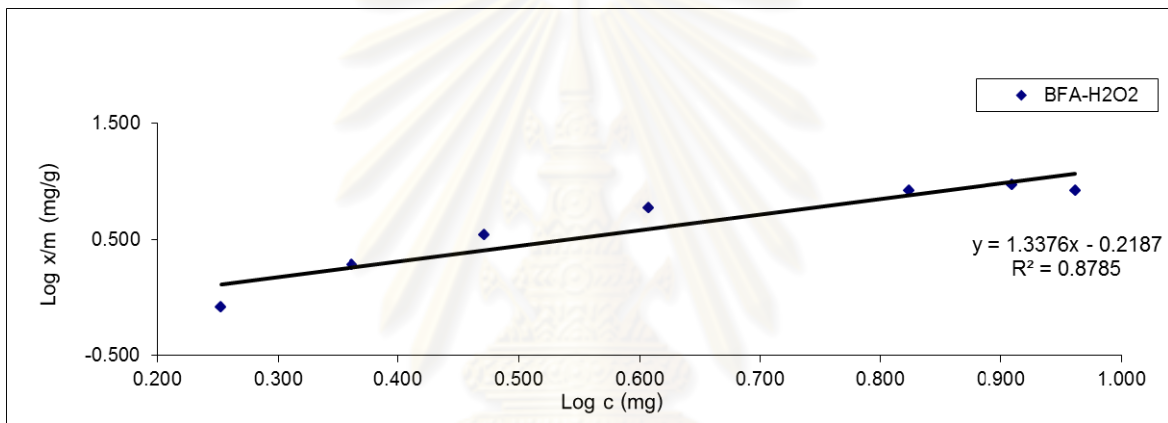
ภาพที่ 4.19 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของถ้ำลอยซานอ้อย (BFA)



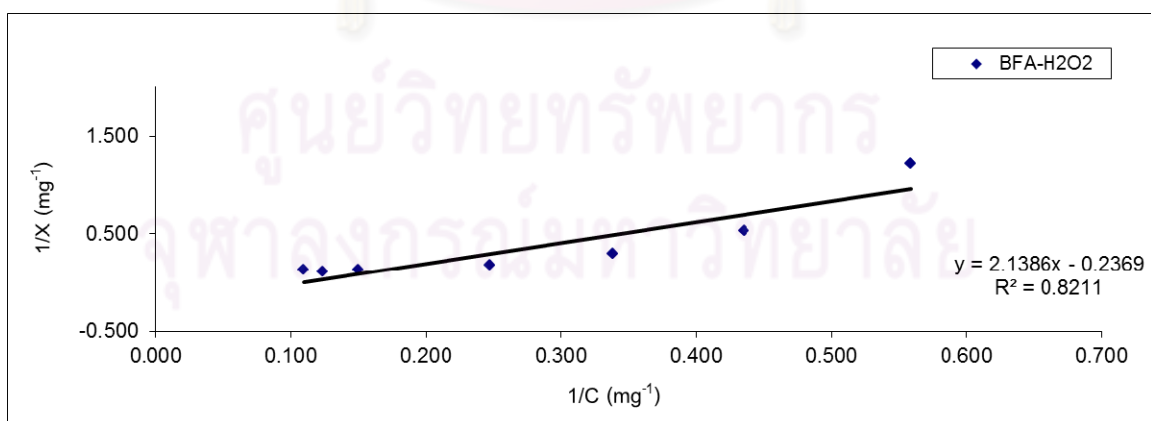
ภาพที่ 4.20 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ้ำลอยซานอ้อย
ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย CTAB (BFA-CTAB)



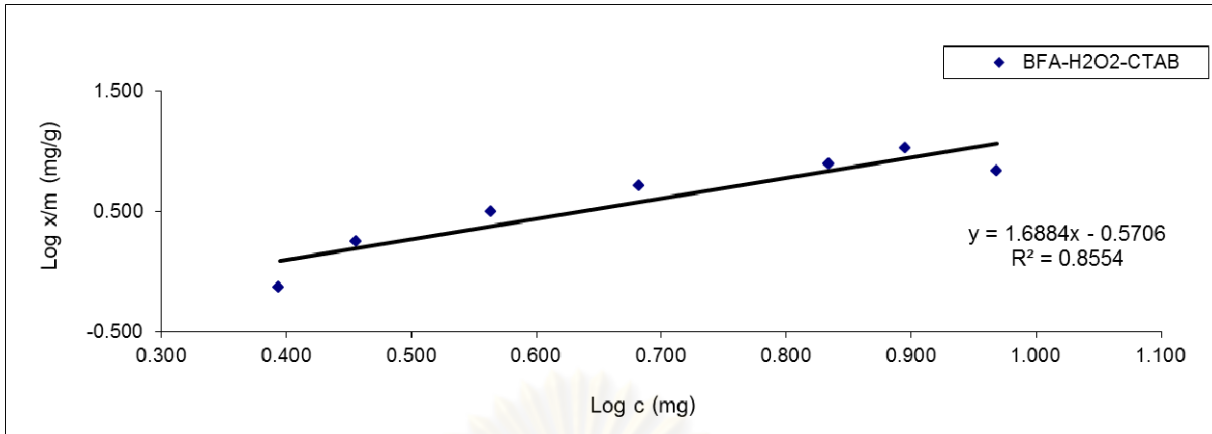
ภาพที่ 4.21 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของถ้ำลอยซานอ้อย
ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย CTAB (BFA-CTAB)



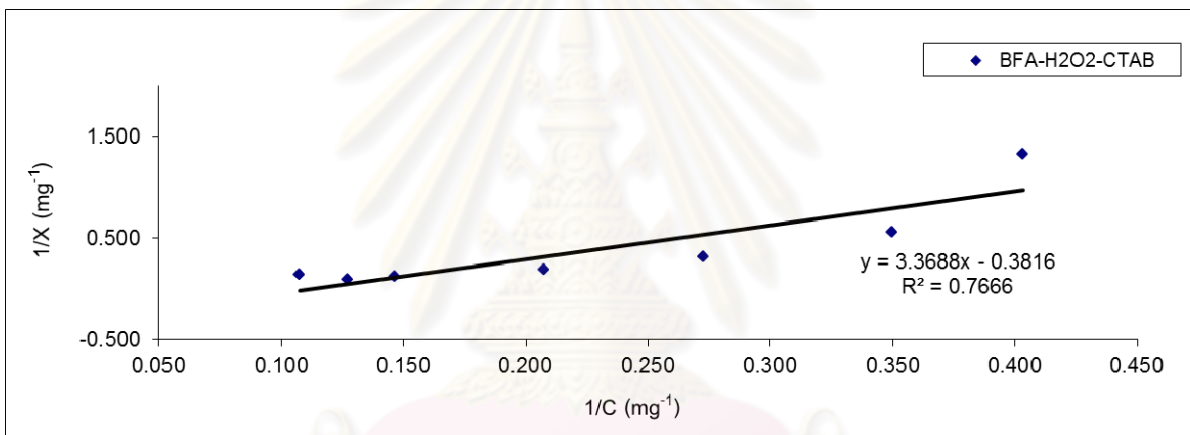
ภาพที่ 4.22 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ้ำลอยซานอ้อย
ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย H₂O₂ (BFA-H₂O₂)



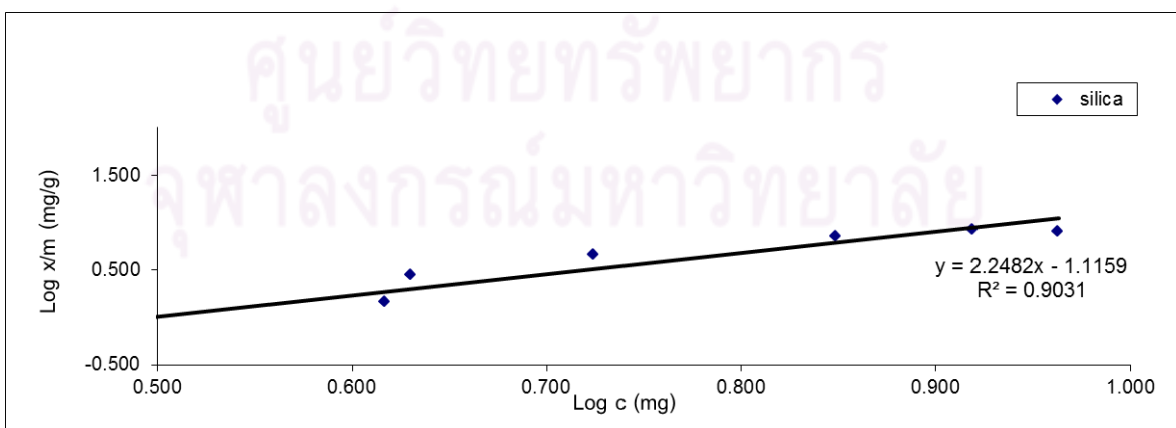
ภาพที่ 4.23 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของถ้ำลอยซานอ้อย
ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย H₂O₂ (BFA-H₂O₂)



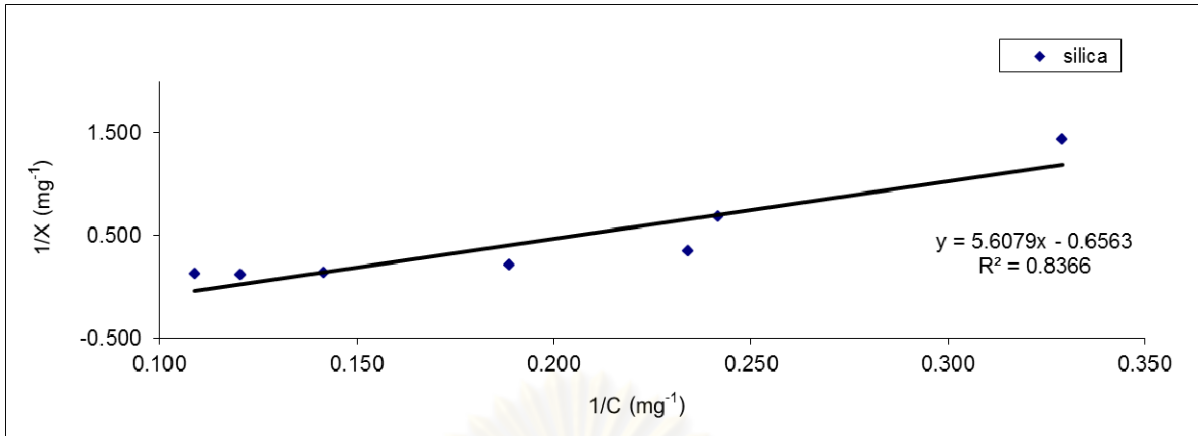
ภาพที่ 4.24 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ้ำลอยชานอ้อย ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย H₂O₂ และ CTAB (BFA-H₂O₂-CTAB)



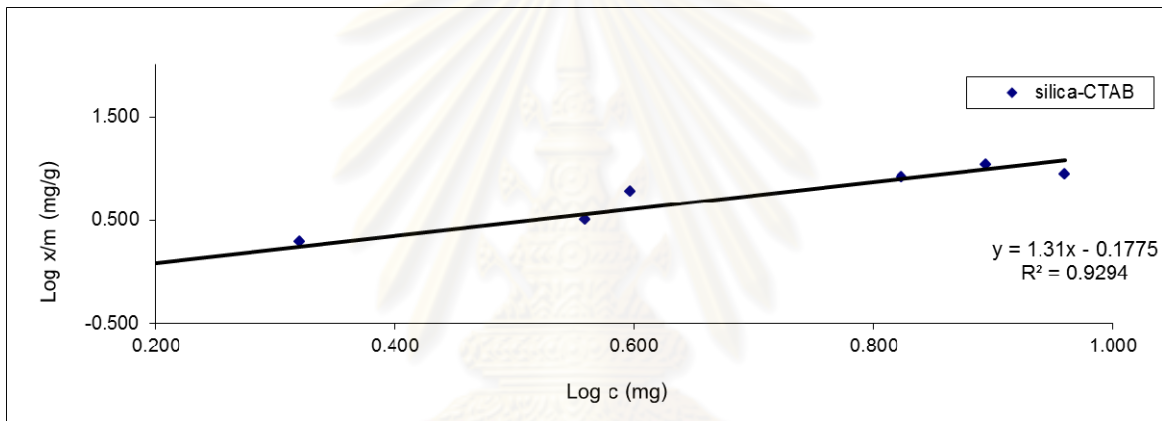
ภาพที่ 4.25 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของถ้ำลอยชานอ้อย ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย H₂O₂ และ CTAB (BFA-H₂O₂-CTAB)



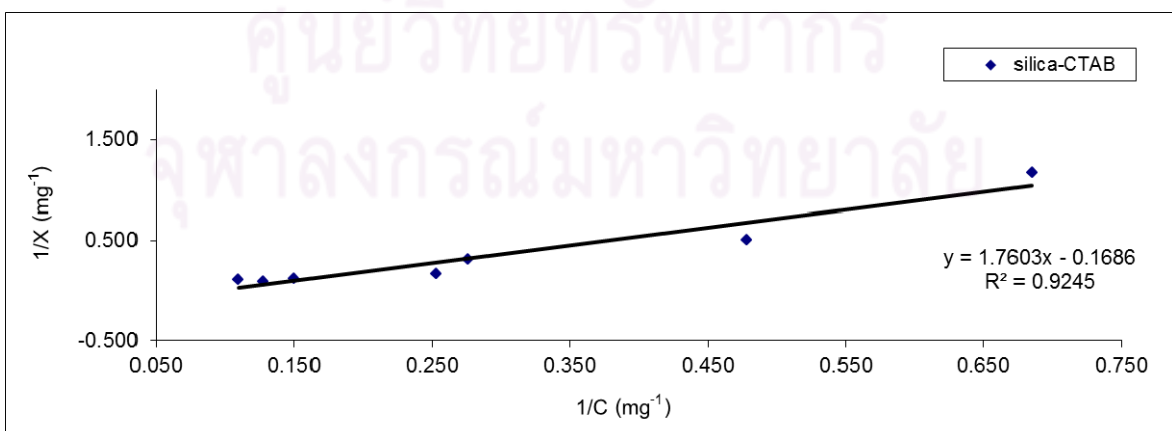
ภาพที่ 4.26 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของซิลิกาจากถ้ำลอยชานอ้อย



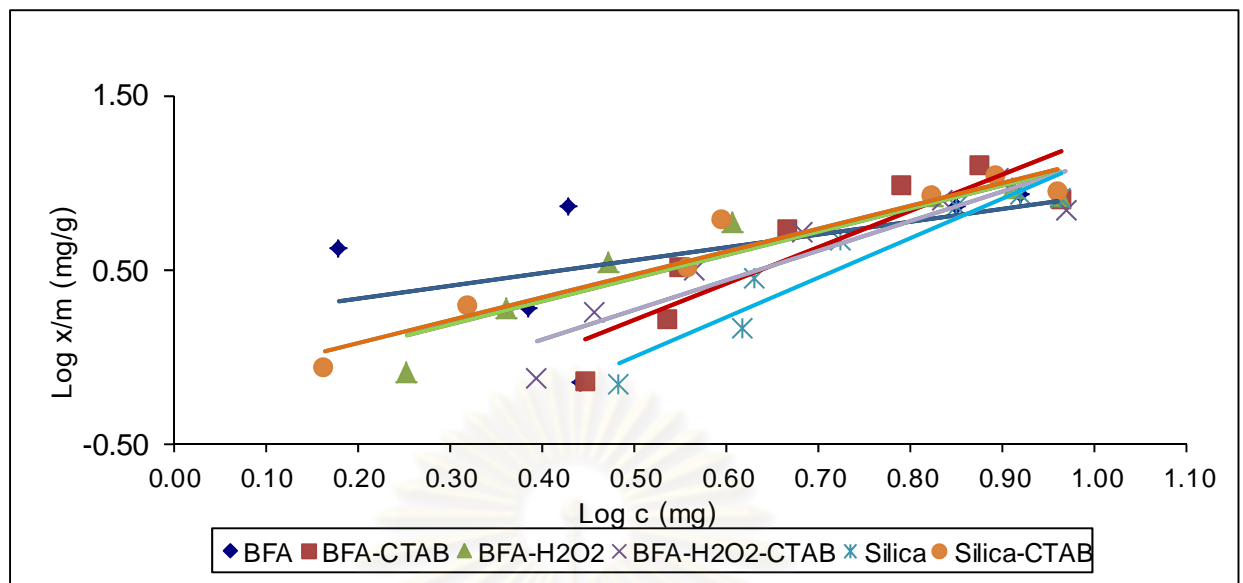
ภาพที่ 4.27 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของซิลิกาจากถ้ำลอยชันน้อย



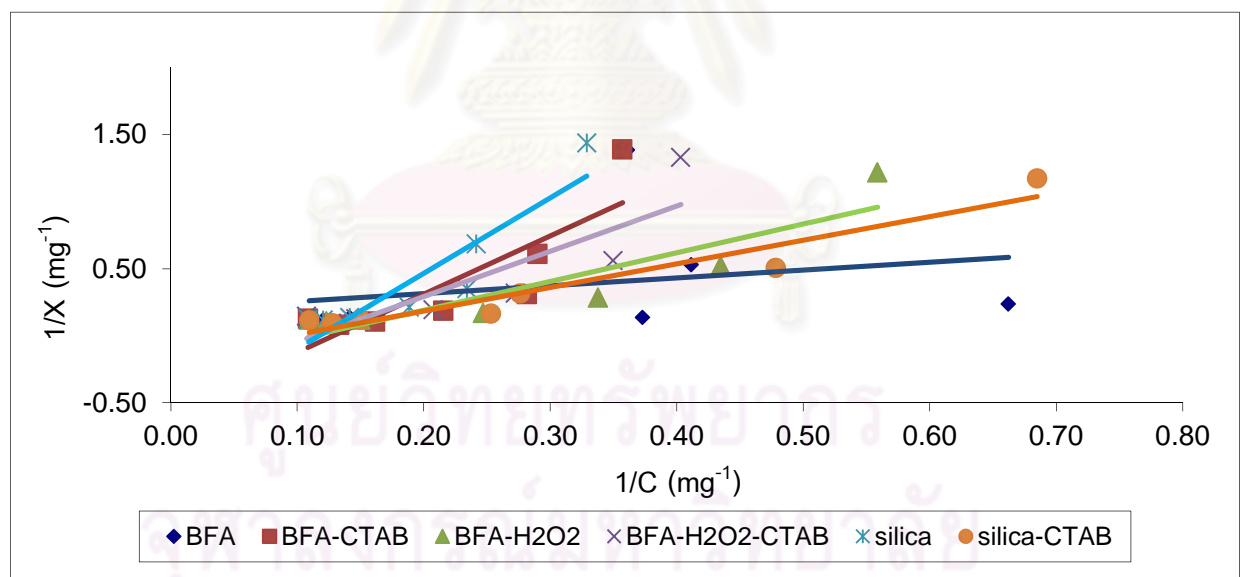
ภาพที่ 4.28 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของซิลิกาจากถ้ำลอยชันน้อย
ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย CTAB (silica-CTAB)



ภาพที่ 4.29 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของซิลิกาจากถ้ำลอยชันน้อย
ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยด้วย CTAB (silica-CTAB)



ภาพที่ 4.30 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนดลิชของสารดูดซับทุกตัว



ภาพที่ 4.31 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของสารดูดซับทุกตัว

ตารางที่ 4.7 แสดงสมการของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชและแลงเมียร์ของตัวดูดซับชนิดต่างๆ

ชนิด ตัวดูดซับ	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช		ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์	
	$\ln\left(\frac{X}{m}\right) = \left(\frac{1}{n}\right)(\log Cs) + (\ln K)$	R^2	$\frac{1}{X} = \frac{1}{Cs} \left(\frac{1}{bXm}\right) + \left(\frac{1}{Xm}\right)$	R^2
ถ้ำลอย ชานอ้อย (BFA)	$y = 0.7414x + 0.1824$	0.3093	$y = 0.5865x + 0.1963$	0.0646
BFA- CTAB	$y = 2.071x - 0.8188$	0.7943	$y = 4.3459x - 0.5595$	0.7175
BFA- H2O2	$y = 1.3376x - 0.2187$	0.8785	$y = 2.1386x - 0.2369$	0.8211
BFA- H2O2- CTAB	$y = 1.6884x - 0.5706$	0.8554	$y = 3.3688x - 0.3816$	0.7666
BFA_SiO ₂	$y = 2.2482x - 1.1159$	0.9031	$y = 5.6079x - 0.6563$	0.8366
BFA_SiO ₂ - CTAB	$y = 1.31x - 0.1775$	0.9294	$y = 1.7603x - 0.1686$	0.9245

แบบจำลองการดูดซับแบบฟรุนดลิชและแลงเมียร์ ถูกนำมาใช้อธิบายไอโซเทอมการดูดซับของการดูดซับแนฟทาลีนบนพื้นผิวสารดูดซับแต่ละชนิด เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log x/m$ กับ $\log c$ (ฟรุนดลิชไอโซเทอม) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/X$ กับ $1/C$ (แลงเมียร์ไอโซเทอม) จะได้กราฟเส้นตรงมีค่า R^2 แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งอาจสรุปเบื้องต้นได้ดังนี้

- กรณีแก้าลอยซานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว (BFA) พบค่า R^2 ต่ำมาก ไม่สอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับทั้งสองแบบ ทั้งนี้อาจเนื่องจากการมีสารอินทรีย์หรือคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ปนเปื้อนบนพื้นผิว
- กรณีแก้าลอยซานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย CTAB (BFA-CTAB) พบค่า R^2 สูงขึ้นมาก แต่อย่างน้อยกว่า 0.8 ยังไม่สามารถอธิบายกลไกการดูดซับด้วยไอโซเทอมทั้งสองแบบ
- กรณีแก้าลอยซานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย H_2O_2 (BFA- H_2O_2) พบค่า R^2 สูงขึ้นมาก แต่อย่างน้อยกว่า 0.9 โดยกรณีฟรอนดลิชไอโซเทอมให้ค่า R^2 ใกล้เคียง 0.9 มากกว่าแลงเมียร์ไอโซเทอมเล็กน้อย แสดงว่ามีการดูดซับทั้งแบบชั้นเดียวแล้วตามด้วยการดูดซับแบบหลายชั้น
- กรณีซิลิกาจากแก้าลอยซานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย CTAB (BFA- SiO_2 -CTAB) พบค่า R^2 สูงขึ้นมากกว่า 0.9 โดยกรณีฟรอนดลิชไอโซเทอมให้ค่า R^2 มากกว่าแลงเมียร์ไอโซเทอมเล็กน้อย แสดงว่ามีการดูดซับทั้งแบบชั้นเดียวแล้วตามด้วยการดูดซับแบบหลายชั้นเช่นกัน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) ที่ปนเปื้อนในน้ำ โดยใช้แนฟธาลินเป็นสารตัวแทน ด้วยถ้ำลอยขานอ้อยและซิลิกาจากถ้ำลอยขานอ้อย ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิว ณ สภาวะต่างๆ กัน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

1) การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับด้วยการปรับสภาพผิวสารดูดซับ

ถ้ำลอยขานอ้อย เป็นของเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้าที่ใช้ขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิง จากการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาค พบพื้นผิวขรุขระมีรูพรุน และมีซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักมากกว่า 50 % โดยน้ำหนัก จึงน่าจะใช้เป็นสารดูดซับทางเลือกได้

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยขานอ้อยพบว่ามี LOI ค่อนข้างสูง ซึ่งคาดว่า เป็นคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะขัดขวางการดูดซับสารบนพื้นผิวถ้ำลอยขานอ้อย จึงทำการกำจัดคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ด้วยการต้มถ้ำลอยขานอ้อยในไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งพบว่า ปริมาณ ซิลิกาเพิ่มขึ้นจากเดิม 66.18 % โดยน้ำหนัก เป็น 70.07% โดยน้ำหนัก (เนื่องจาก LOI ลดลง) และผลการศึกษาพบประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาลินสูงขึ้นเล็กน้อย

อีกแนวทางหนึ่งที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ คือ การสกัดซิลิกาจากถ้ำลอยขานอ้อย โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายกรดและเบส ซึ่งพบว่าปริมาณซิลิกาเพิ่มสูงถึง 91.92% โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามผลการศึกษาพบประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาลินใกล้เคียงกับกรณีปรับสภาพผิวถ้ำลอยด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

สืบเนื่องจากซิลิกาและถ้ำลอยขานอ้อยที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก มีสภาพผิวแบบชอบน้ำ (Hydrophilic) การปรับสภาพผิวด้วยสารปรับสภาพผิวแอมฟิฟิลิกโมเลกุลชนิดประจุบวก (ในที่นี้เลือกใช้ CTAB หรือ Cetyltrimethylammoniumbromide) น่าจะเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาลินซึ่งเป็นสารไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และผลการศึกษาพบประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาลินสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสารดูดซับที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวด้วยสาร CTAB

จากผลการศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับแนฟธาลินด้วยการปรับสภาพผิวดังกล่าว อาจสรุปได้ว่าถ้ำลอยขานอ้อยเป็นสารดูดซับทางเลือกสำหรับการดูดซับสาร PAHs ทั้งนี้ควร

กำจัดคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้และ/หรือสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนพื้นผิวถ้ำลอยด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนใช้งาน

ขณะที่การสกัดซิลิกาจากถ้ำลอยชานอ้อยไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับแอฟธาไลน์ แต่อาจเหมาะกับการดูดซับสารประเภทอื่น เช่น โลหะอินออน หรือสารที่ชอบน้ำประเภทอื่น ซึ่งจะต้องศึกษาโดยละเอียดต่อไป

2) การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

งานวิจัยนี้ ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับแอฟธาไลน์ด้วยถ้ำลอยชานอ้อยและซิลิกาจากถ้ำลอยชานอ้อย ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิว คือ ความเร็วรอบในการเขย่า ช่วงเวลาสัมผัส และค่า pH ของสารละลาย โดยสมภาวะที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด คือ การใช้ปริมาณสารดูดซับ 0.4 กรัม สำหรับการดูดซับสารละลายแอฟธาไลน์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร กล่าวคือ สัดส่วนสารดูดซับต่อแอฟธาไลน์เท่ากับ 0.4 (ยกเว้นกรณีถ้ำลอยชานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว จะต้องใช้สัดส่วนมากถึง 0.7 – 0.8) ทำการเขย่าด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที โดยปรับ pH ของสารละลายใกล้เคียง 2

3) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแอฟธาไลน์ด้วยสารดูดซับแต่ละชนิดที่สมภาวะคัดเลือก

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแอฟธาไลน์ที่สมภาวะเหมาะสม (คัดเลือกจากผลการศึกษา) กล่าวคือ ทำการดูดซับแอฟธาไลน์จากสารละลายเข้มข้น 10 mg/l ปริมาตร 100 ml ที่ pH ใกล้เคียง 2 ทำการเขย่าด้วยความเร็วรอบ 250 rpm เป็นเวลา 40 นาที โดยใช้สัดส่วนโดยน้ำหนักของสารดูดซับต่อแอฟธาไลน์ เท่ากับ 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ พบว่าสารดูดซับแต่ละชนิดให้ประสิทธิภาพการดูดซับแอฟธาไลน์ใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ซิลิกาจากถ้ำลอยชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย CTAB มีประสิทธิภาพการดูดซับใกล้เคียงถ้ำลอยชานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าถ้ำลอยชานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิวเล็กน้อย

4) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแอฟธาไลน์ด้วยถ้ำลอยชานอ้อยกับถ้ำลอยแกลบ

จากการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีและพื้นที่ผิวของเถ้าลอยขานอ้อยกับเถ้าลอยแกลบ พบว่าเถ้าลอยแกลบมีองค์ประกอบซิลิกาสูงกว่าเถ้าลอยขานอ้อยค่อนข้างมาก แต่เถ้าลอยแกลบมีพื้นที่ผิวน้อยกว่า ประสิทธิภาพการดูดซับแนฟทาลีนจึงต่ำกว่าเถ้าลอยขานอ้อยมาก แม้ปรับสภาพผิวด้วยสาร CTAB ประสิทธิภาพการดูดซับก็เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ขณะที่ซิลิกาจากเถ้าลอยแกลบมีพื้นที่ผิวสูงมาก หลังปรับสภาพผิวด้วยสาร CTAB ประสิทธิภาพการดูดซับแนฟทาลีนจึงสูงขึ้นอย่างเด่นชัด ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ดังนี้

- หากต้องการใช้ประโยชน์เถ้าลอยแกลบ (Rice Husk Fly Ash) เป็นสารดูดซับสาร PAHs ควรทำการแยกสกัดซิลิกาแล้วปรับสภาพผิวด้วยสาร CTAB เพื่อเพิ่มความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวซิลิกา
- หากต้องการใช้ประโยชน์เถ้าลอยขานอ้อย (Bagasse Fly Ash) เป็นสารดูดซับสาร PAHs ไม่จำเป็นต้องแยกสกัดซิลิกา เพียงแค่กำจัดคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Unburned carbon) หรือสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนบนพื้นผิวเถ้าลอยขานอ้อย ก็สามารถใช้เป็นสารดูดซับได้เลย โดยไม่จำเป็นต้องปรับสภาพผิวด้วยสาร CTAB

5) การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ โดยเปรียบเทียบแบบฟรุนดลิชกับแบบแลงเมียร์ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, R^2) พบว่า

- กรณีเถ้าลอยขานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว (BFA) พบค่า R^2 ต่ำมาก ไม่สอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับทั้งสองแบบ
- กรณีเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย CTAB (BFA-CTAB) พบค่า R^2 สูงขึ้นมาก แต่อย่างน้อยกว่า 0.8 ยังไม่สามารถอธิบายกลไกการดูดซับด้วยไอโซเทอมทั้งสองแบบ
- กรณีเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย H_2O_2 (BFA- H_2O_2) พบค่า R^2 สูงขึ้นมาก แต่อย่างน้อยกว่า 0.9 โดยกรณีฟรุนดลิชไอโซเทอมให้ค่า R^2 ใกล้เคียง 0.9 มากกว่าแลงเมียร์ไอโซเทอมเล็กน้อย แสดงว่ามีการดูดซับทั้งแบบชั้นเดียวแล้วตามด้วยการดูดซับแบบหลายชั้น
- กรณีซิลิกาจากเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย CTAB (BFA- SiO_2 -CTAB) พบค่า R^2 สูงขึ้นมากกว่า 0.9 โดยกรณีฟรุนดลิชไอโซเทอมให้ค่า R^2 มากกว่าแลงเมียร์ไอโซเทอมเล็กน้อย แสดงว่ามีการดูดซับทั้งแบบชั้นเดียวแล้วตามด้วยการดูดซับแบบหลายชั้นเช่นเดียวกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะอินทรีย์หรือสีย้อม (ประเภทขอบน้ำ) ที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยใช้ถ้ำลอยชานอ้อย และ/หรือ ซิลิกาจากถ้ำลอยชานอ้อยเป็นสารดูดซับ
- 2) ควรศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นๆ ด้วยถ้ำลอยชานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
- 3) ควรศึกษาความสามารถในการดูดซับสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน โดยใช้สารดูดซับที่เป็นเจ้าของโรงไฟฟ้าชีวมวลชนิดอื่นๆที่มีซิลิกา และ/หรือ อะลูมินา เป็นองค์ประกอบหลัก
- 4) ควรศึกษาเปรียบเทียบคุณลักษณะและประสิทธิภาพการแยกสกัดซิลิกาจากถ้ำลอยชีวมวลหลากหลายชนิด เพื่อการเพิ่มมูลค่าถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล
- 5) ควรศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเผาถ้ำลอยชานอ้อยที่จะได้โครงสร้างจุลภาคที่มีองค์ประกอบหลักเป็น Cristobalite ซึ่งคาดว่าจะดูดซับได้ดีกว่า
- 6) ควรศึกษาความสามารถในการดูดซับสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆ
- 7) ควรศึกษาความสามารถในการดูดซับสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนด้วยถ้ำลอยชานอ้อยเปรียบเทียบกับ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

โกศลชัย คุณสำราญ, พิเศษฐ์ วิริยะจิตรา, วิชัย รุ่งตระกูล, สุรัชชัย นิมจิรวัดมน และอภิชาติ สุขสำราญ. การประยุกต์สเปคโตรสโคปีในเคมีอินทรีย์. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ห้องเรียน, 2526.

จักรพงษ์ ศศิธร. การใช้ประโยชน์เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าในการดูดซับสารไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในน้ำ.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

จินตนา สายวรรณ. การศึกษาโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจากอนุภาคไอเสียรถยนต์ที่อยู่ในอากาศในกทม. วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

จิรสา กรงกรด. สารลดแรงตึงผิว. [ออนไลน์]. 2548. แหล่งที่มา: http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/cp_7_2548_surfactant.pdf [2553, กุมภาพันธ์ 10]

จุฑาทิพย์ เพชรอินทร์. การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขาน้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

ขาน้อย (Bagasse). [ออนไลน์], แหล่งที่มา:

http://www.thaisugarmill.com/index.php?lang=th&ds=product_detail-view&id=s9ncDvkbjaHm8PLY [2553, สิงหาคม 30]

ชีวมวล. [ออนไลน์], แหล่งที่มา:

<http://www.efo.or.th/home.php?ds=preview&back=content&mid=hGtTu8zx7jWvD4by&doc=7GYbFe08AzkPsUIX> [2553, สิงหาคม 30]

เดชา ฉัตรศิริเวช. กระบวนการดูดซับ. พิมพ์ครั้งที่ 1: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

ธีระชัย วัฒนสกุลเอก. การนำเถ้าลอยขาน้อยไปใช้ดูดซับกำจัดโครเมียมแล้วนำไปทำเป็นก้อนแข็ง.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546

แนฟทาลีน (Naphthalene). [ออนไลน์], แหล่งที่มา:

http://www.fda.moph.go.th/prac/document/factsheet/danger_naphthalene.pdf [2554, มีนาคม 2]

ประเภทของการดูดซับ. [ออนไลน์], แหล่งที่มา:

<http://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process/> [2553, กันยายน 7]

พัชรินทร์ วรรณกุล. เทคโนโลยี สังเคราะห์ซิลิกาจากขาน้อย. วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี .พิมพ์ครั้งที่ 36(2553): 39-43.

พิมลพันธ์ อุดทาพันธ์ เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ และดาวัลย์ วิวรรณเดชะ. การกำจัดโลหะหนัก โดย ใช้กากโซดาไลต์. ใน เอกสารประกอบการประชุมวิชาการด้านเหมืองแร่โลหการและปิโตรเลียม, 13-14 มกราคม 2554 ณ โรงแรมมณเฑียร ริเวอร์ไซด์ กรุงเทพ, 2554.

รัตนา รุจิรวนิช. การดูดซับของเสียอมประเภทย่อยน้ำได้บนไคตินและไคโตแซน. รายงานผลการวิจัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

วิจัย พิลาวลัย และวิชณู ศิริการ. การกำจัด HPNA ด้วยสารดูดซับคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.

วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล และคณะ. การผลิตเซลลูโลสที่มีลักษณะคล้ายฟองน้ำจากวัสดุเหลือใช้เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับและ/หรือตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

วิชาภา ภูจินดา. สารเคมีภัณฑ์. [ออนไลน์]. 2549, แหล่งที่มา: <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4&ID=3> [2553, กุมภาพันธ์ 10]

ศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย. การผลิตสารดูดซับโมเลกุลจากขี้เถ้าขาน้อย. โครงการส่งเสริมและสนับสนุนการผลิตผลิตภัณฑ์ชีวเคมีที่ใช้ข้อยเป็นวัตถุดิบต้นน้ำ. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สารก่อมะเร็งจากอาหารปิ้งย่างทอด. [ออนไลน์], แหล่งที่มา:

http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_1_001c.asp?info_id=77 [2553, กันยายน 9]

สุเมธ เตชะกุลวิโรจน์. การใช้เถ้าลอยขาน้อยมาบำบัดน้ำเสียเสียแล้วนำไปทำคอนกรีตบล็อก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

สุรชานา ช้างชายวงศ์. การดูดซับสารพอลิไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ไฮดรอกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

อรวรรณ สิงห์จันทร์ และภัทรา เฟงธรรมเกียรติ. การกำจัดสีในน้ำเสียด้วยเถ้าลอยที่กระตุ้นผ่านกระบวนการทางเคมี. การวิจัยสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (2549): 217-225.

อุไรวรรณ มณีโชติ. การใช้สาหร่ายฝักกาดเป็นตัวดูดซับสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานไม่ยางพารา. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2551.

ภาษาอังกฤษ

- Affandi, S., Setyawan, H., Winardi, S., Purwanto, A., and Balgis, R. A Facile Method for Production of High-Purity Silica Xerogels from bagasse Ash. Advance Powder Technology 20 (2009): 468-472.
- Batra, V. S., Urbonaite, S., and Svensson, G. Characterization of Unburned Carbon in Bagasse Fly Ash. Fuel 87(2008): 2972-2976.
- Besbes, M., Fakhfakh, N., and Benzina, M. Characterization of Silica Gel Prepared by Using Sol-Gel Process. Physics Procedia 2 (2009): 1087-1095.
- Bousher, A., Shen, X., and Edyvean, R. G. J. Removal of coloured Organic Matter by Adsorption onto Low – Cost Waste Materials. Water Research 31(1997): 2084-2092.
- Campbell, A. Polycyclic aromatic hydrocarbons. [Online]. Available from: <http://thevkq308bm.wikispaces.com/Polycyclic+Aromatic+Hydrocarbons-Copper> [2011, April 28]
- Chang, C.F., et al. Adsorption of Naphthalene on Zeolite from Aqueous Solution. Journal of Colloid and Interface Science 277 (2004): 29-34.
- Daily News Online, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. [Online]. 2011. Available from: <http://61.19.246.165/~energy/newss.php?id=95> [2011, April 28]
- Fundamentals of Adsorption and Desorption [Online]. 1990. Available from: <http://www.activated-carbon.com/solrec3.html> [2011, April 28]
- Gupta, V. K., and Sharma, S. Removal of Zinc from Solutions Using Bagasse Fly Ash-A low Cost Adsorbent. Industrial&Engineering Chemistry Research (2003): 6619-6624.
- Gupta, V. K., Jain, C.K., Ali, I., Chandra, S., and Agarwal, S. Removal of Lindane and Malathion from Wastewater Using Bagasse Fly Ash- A Sugar Industry Waste. Water Research 36 (2002) 2483-2490.
- Gupta, V. K., Mohan, D., Sharma, S., and Park, T. K. Removal of Chromium(VI) from Electroplating Industry Wastewater Using Bagasse Fly Ash- A Sugar Industry Waste Material. The Environmentalist 19 (1999): 129-136.
- Gupta, V. K., Sharma, S., Yadav, I. S., and Mohan, D. Utilization of Bagasse Fly Ash Generated in the Sugar Industry for the Removal of Phenol and p- nitrophenol

- from Waste Water. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 71(1998): 180-186.
- Hall, S., Tang, R., Baeyens, J., and Dewil, R. Removal Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Water by Adsorption on Silica Gel. Polycyclic Aromatic compounds 29 (2009): 160-183.
- Kalapathy, U., Proctor, A., and Shultz, J. A Simple Method for Production of Pure Silica from Rice Hull Ash. Bioresource Technology 73 (2000): 257-262.
- Kushwaha, J. P., Srivastava, V. C., and Mall, I. D. Treatment of Dairy Wastewater by Commercial Activated Carbon and Bagasse Fly Ash: Parametric, Kinetic and Equilibrium Modelling, Disposal Studies. Bioresource Technology 101 (2010): 3473-3483.
- Lataye, D. H., Mishra, I. M., and Mall, I. D. Adsorption of 2-Picoline onto Bagasse Fly Ash from Aqueous Solution. Chemical Engineering Journal 138 (2008): 35-46.
- Mall, I.D., Srivastava, V. C., and Agarwal, N. K. Removal of Orange-G and Methyl Violet Dyes by Adsorption onto Bagasse Fly Ash - Kinetic Study and Equilibrium Isotherm Analyses. Dyes and Pigments 69 (2006): 210-223.
- Mane, V. S., Mall, I. D., and Srivastava, V. C. Use of Bagasse Fly Ash as an Adsorbent for the Removal of Brilliant Green Dye from Aqueous Solution. Dyes and Pigments 73 (2007): 269-278.
- Mukherjee, S., Kumar, S., Misra, A.K., and Fan, M. Removal of phenols from water environment by activated carbon, bagasse ash and wood charcoal. Chemical Engineering Journal 129 (2007): 133-142.
- Naphthalene [Online]. 2004. Available from:
<http://www.hpwt.de/Chemie/Organike.htm>[2011, April 28]
- Noonpui, S., Thiravetyan, P., Nakbanpote, W., and Netpradit, S. Color Removal from Water-Based Ink Wastewater by Bagasse Fly Ash, Sawdust Fly Ash and Activated Carbon. Chemical Engineering Journal 162 (2010): 503-508.
- Papong et al., 2004 cited in Visvanathan, C. and Chiemchaisri, C. Management of Agricultural Wastes and Residues in Thailand: Wastes to Energy Approach.

- Rachakornkij, M., Ruangchuay, S., and Teachakulwiroj, S. Removal of Reactive Dyes from Aqueous Solution Using Bagasse Fly Ash. Songklanakarin Journal of Science and Technology 26 (2004): 13-24.
- Sasithorn, J., Wiwattanadate, D., and Sangsuk, S. Utilization of Fly Ash from Power Plant for Adsorption of Hydrocarbon Contamination in Water. Journal of Metals, Materials and Minerals 20 (2010): 5-10.
- Sener, S., and Ozyilmas, A. Adsorption of Naphthalene onto Sonicated Talc from Aqueous Solution. Ultrasonics Sonochemistry 17 (2010): 932-938.
- Umamaheswaran, K., and Batra, V. S. Physico-Chemical Characterisation of Indian Biomass Ashes. Fuel 87 (2008): 628-638.
- Worathanakul, P., Payubnop, W., and Muangpet, A. Characterization for Post – treatment Effect of Bagasse Ash for Silica Extraction. World Academy of Science, Engineering and Technology 56 (2009): 360-362.
- Ying-Mei, X., et. al. Preparation of Amorphous Silicas from Oil Shale Residue and Surface Modification by Silane Coupling Agent. Oil Shale 27 (2010): 37-46.




ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

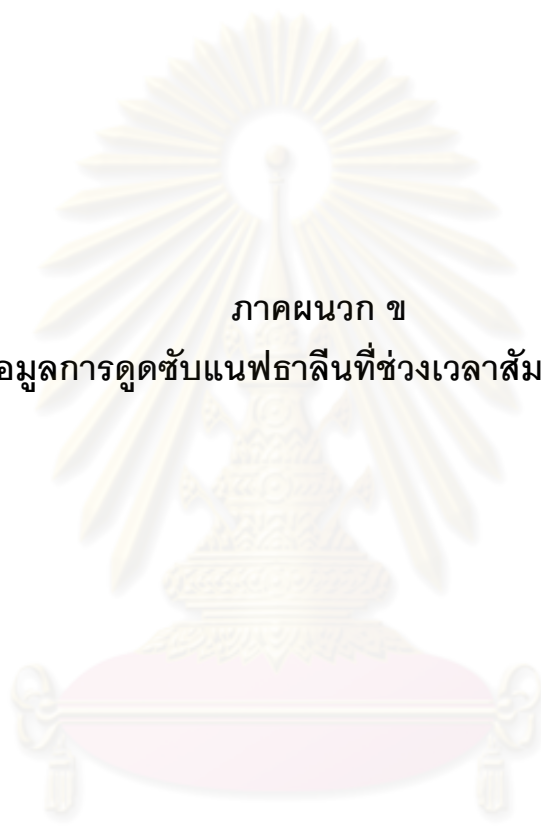


ภาคผนวก ก
ข้อมูลการดูดซับแนฟธาซีนที่ความเร็วรอบต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก1 ข้อมูลการดูดซับแอฟทาลีนแอฟทาลีนที่ความเร็วรอบต่างๆ โดยใช้สารละลายแอฟทาลีนเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และปริมาณสารดูดซับ 0.3 กรัม

สารดูดซับ	ความเร็วรอบ	ปริมาณแอฟทาลีนหลังการดูดซับ(mg/l)				% การดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
ถ้ำลอย ชานอ้อย	100	7.3135	7.3316	7.2920	7.3124	26.88
	150	6.4775	6.4775	6.4957	6.4836	35.16
	200	5.4815	5.4665	5.4990	5.4823	45.18
	250	5.4074	5.4074	5.4026	5.4058	45.94
ถ้ำลอยชานอ้อย ที่ผ่านการปรับ สภาพผิว ด้วย CTAB	100	4.8218	4.8614	4.8459	4.8430	51.57
	150	4.7805	4.7961	4.7857	4.7874	52.13
	200	4.5115	4.4973	4.5321	4.5136	54.86
	250	4.3821	4.3659	4.3910	4.3797	56.20
ถ้ำลอยชานอ้อย ที่ผ่านการปรับ สภาพผิว ด้วย H ₂ O ₂	100	5.1677	5.1677	5.1677	5.1677	48.32
	150	5.1438	5.1226	5.1226	5.1297	48.70
	200	5.1412	5.1654	5.1412	5.1493	48.51
	250	5.0309	5.0527	5.0213	5.0350	49.65
ถ้ำลอยชานอ้อย ที่ผ่านการปรับ สภาพผิว ด้วย H ₂ O ₂ และ CTAB	100	3.9331	3.9118	3.9521	3.9323	60.68
	150	3.8642	3.8820	3.8429	3.8630	61.37
	200	3.9271	3.9045	3.8954	3.9090	60.91
	250	3.7134	3.7359	3.6958	3.7150	62.85
ซีลีกา จากถ้ำลอยชาน อ้อย	100	6.2030	6.1973	6.2238	6.2080	37.92
	150	5.7863	5.7931	5.7684	5.7826	42.17
	200	5.2218	5.2218	5.2030	5.2155	47.84
	250	4.9435	4.9617	4.9435	4.9496	50.50
ซีลีกา จากถ้ำลอยชาน อ้อย ที่ผ่านการปรับ สภาพผิว ด้วย CTAB	100	4.6526	4.6490	4.6652	4.6556	53.44
	150	4.5614	4.5492	4.5416	4.5507	54.49
	200	3.7894	3.7559	3.7732	3.7728	62.27
	250	3.5859	3.4632	3.4519	3.5003	65.00



ภาคผนวก ข
ข้อมูลการดูฉบับแนฟธาลินที่ช่วงเวลาสัมผัสต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข1 ข้อมูลการดูดซับแอฟธาลินแอฟธาลินในช่วงเวลาสัมผัสต่างๆ โดยใช้สารละลายแอฟธาลินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และปริมาณเถ้าลอยชานอ้อย 0.3 กรัม เขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที

เวลาสัมผัส (นาท)	ปริมาณแอฟธาลินหลังการดูดซับ(mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
10	5.8355	5.8197	5.8355	5.8303
20	5.4507	5.4771	5.4929	5.4736
30	4.7496	4.7285	4.7391	4.7391
40	5.6036	5.6300	5.6352	5.6229
50	5.8725	5.8936	5.8883	5.8848
60	5.4074	5.4074	5.4026	5.4058
70	5.4244	5.3980	5.4085	5.4103
80	6.9688	6.9583	6.9956	6.9743
90	5.9166	5.9318	5.8955	5.9146
100	6.5923	6.5637	6.5923	6.5828

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข2 ข้อมูลการดูดซับแอฟธาลินแอฟธาลินในช่วงเวลาสัมผัสต่างๆ โดยใช้สารละลายแอฟธาลินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และปริมาณเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยCTAB 0.3 กรัม เหย้าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที

เวลาสัมผัส (นาท)	ปริมาณแอฟธาลินหลังการดูดซับ(mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
10	5.0414	5.9867	5.9710	5.6664
20	5.4652	5.4808	5.4262	5.4574
30	5.4817	5.4816	5.3078	5.4237
40	3.7608	3.7451	3.7685	3.7581
50	4.1360	4.2064	4.2064	4.1829
60	4.3821	4.3659	4.3910	4.3797
70	4.4723	4.4096	4.4175	4.4331
80	4.1767	4.1220	4.1689	4.1559
90	3.5887	3.5887	3.5887	3.5887
100	4.0115	4.0354	4.0354	4.0274

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข3 ข้อมูลการดูดซับแอฟทาลินแอฟทาลินในช่วงเวลาสัมผัสต่างๆ โดยใช้สารละลายแอฟทาลินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และปริมาณเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย H_2O_2 0.3 กรัม เหย้าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที

เวลาสัมผัส (นาท)	ปริมาณแอฟทาลินหลังการดูดซับ(mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
10	7.3896	7.3804	7.4081	7.3927
20	7.8800	7.8892	7.9123	7.8938
30	6.3089	6.3135	6.3367	6.3197
40	4.3613	4.3381	4.3613	4.3536
50	4.3179	4.2990	4.3358	4.3176
60	5.0309	5.0527	5.0213	5.0350
70	5.0986	5.1026	5.0657	5.0890
80	5.0209	5.0534	5.0348	5.0364
90	4.4862	4.4614	4.4881	4.4786
100	4.8970	4.8970	4.9292	4.9077

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข4 ข้อมูลการดูดซับแอฟธาลินแอฟธาลินในช่วงเวลาสัมผัสต่างๆ โดยใช้สารละลายแอฟธาลินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และปริมาณเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย H_2O_2 และCTAB 0.3 กรัม เหย้าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที

เวลาสัมผัส (นาท)	ปริมาณแอฟธาลินหลังการดูดซับ(mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
10	5.2502	5.2928	5.2786	5.2739
20	5.1505	5.2097	4.9325	5.0976
30	5.7505	5.8003	5.7719	5.7742
40	3.9872	4.0085	3.9658	3.9872
50	4.3781	4.3568	4.3923	4.3757
60	3.7134	3.7359	3.6958	3.7150
70	3.7242	3.8167	3.7953	3.7787
80	3.6290	3.6432	3.6432	3.6385
90	3.9544	3.9312	3.9515	3.9457
100	3.7762	3.7547	3.7714	3.7674

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข5 ข้อมูลการดูดซับแอฟธาลินแอฟธาลินในช่วงเวลาสัมผัสต่างๆ โดยใช้สารละลายแอฟธาลินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และปริมาณซีลีกาจากเถ้าลอยชานอ้อย 0.3 กรัม เขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที


เวลาสัมผัส (นาท)	ปริมาณแอฟธาลินหลังการดูดซับ(mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
10	7.3913	7.4316	7.4155	7.4128
20	6.8190	6.8553	6.8262	6.8335
30	6.2883	6.2883	6.2883	6.2883
40	4.8763	4.9055	4.8982	4.8933
50	4.7564	4.7564	4.7928	4.7685
60	4.9435	4.9617	4.9435	4.9496
70	4.8190	4.8553	4.8262	4.8335
80	4.2822	4.3040	4.0582	4.2148
90	4.9501	4.9581	4.9420	4.9501
100	4.7407	4.7649	4.7246	4.7434

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข6 ข้อมูลการดูดซับแนฟธาลีนในช่วงเวลาสัมผัสต่างๆ โดยใช้สารละลายแนฟธาลีนเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และปริมาณซีดิกาจากถ้ำลอยซาน้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิว 0.3 กรัม เขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที

เวลาสัมผัส (นาท)	ปริมาณแนฟธาลีนหลังการดูดซับ(mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
10	3.8406	3.8728	3.8567	3.8567
20	3.6509	3.6662	3.6662	3.6611
30	3.5507	3.5829	3.5507	3.5614
40	2.9710	2.9549	2.9549	2.9603
50	3.0660	3.0580	3.0177	3.0472
60	3.4859	3.4632	3.4519	3.4670
70	3.3849	3.4251	3.3688	3.3929
80	3.4910	3.4910	3.4748	3.4856
90	3.3926	3.3687	3.3614	3.3742
100	3.4851	3.4851	3.4918	3.4873

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค
ข้อมูลการดูฉบับแนฟธาสินที่พีเอชต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค1 ข้อมูลการดูดซับแนฟธาลินที่พีเอชต่างๆ โดยใช้สารละลายแนฟธาลินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และปริมาณเถ้าลอยชานอ้อยและซีลีกาจากเถ้าลอยชานอ้อยทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิว 0.3 กรัม เขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที

สารดูดซับ	ค่า pH	ปริมาณแนฟธาลินหลังการดูดซับ(mg/l)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
เถ้าลอยชานอ้อย	2	1.7065	1.6945	1.7245	1.7085
	4	3.4252	3.4551	3.4551	3.4451
	6	5.2216	5.2096	5.2096	5.2136
	8	7.8625	7.8142	7.8082	7.8283
	10	8.0239	8.0060	8.0001	8.0100
เถ้าลอยชานอ้อย ที่ผ่านการปรับสภาพผิว ด้วย CTAB	2	3.8973	3.9259	3.9163	3.9132
	4	5.0380	5.0190	5.0380	5.0317
	6	5.1140	5.0380	5.1140	5.0887
	8	5.3993	5.3803	5.4183	5.3993
	10	5.8175	5.8365	5.8270	5.8270
เถ้าลอยชานอ้อย ที่ผ่านการปรับสภาพผิว ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์	2	2.2741	2.2897	2.2741	2.2793
	4	3.6345	3.6241	3.5981	3.6189
	6	5.0208	5.0363	5.0052	5.0207
	8	8.0787	8.0581	8.1000	8.0789
	10	8.2503	8.2296	8.2451	8.2417
เถ้าลอยชานอ้อย ที่ผ่านการปรับสภาพผิว ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์และ CTAB	2	3.6525	3.6440	4.3729	3.8898
	4	4.4068	4.3898	4.3729	4.3898
	6	4.6187	4.6271	4.6017	4.6158
	8	4.8390	4.8559	4.8136	4.8362
	10	5.3644	5.4238	5.3560	5.3814

ตาราง ค1 (ต่อ) ข้อมูลการดูดซับแนฟธาลินที่พีเอชต่างๆ โดยใช้สารละลายแนฟธาลินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และปริมาณเถ้าลอยขาน้อยและซีลิกาจากเถ้าลอยขาน้อยทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิว 0.3 กรัม เขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที

สารดูดซับ	ค่า pH	ปริมาณแนฟธาลินหลังการดูดซับ(mg/l)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
ซีลิกา จากเถ้าลอยขาน้อย	2	4.1864	4.1949	4.2203	4.2005
	4	4.9917	5.0000	4.9576	4.9831
	6	5.6526	5.6610	5.6356	5.6497
	8	6.4491	6.4152	6.4152	6.4265
	10	7.4577	7.4661	7.4577	7.4605
ซีลิกา จากเถ้าลอยขาน้อย ที่ผ่านการปรับสภาพผิว ด้วย CTAB	2	3.1186	3.0763	3.0847	3.0932
	4	3.1864	3.1694	3.1864	3.1807
	6	3.8983	3.8728	3.8983	3.8898
	8	4.1385	4.3644	4.5937	4.3655
	10	4.5848	4.2627	4.3051	4.3842

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง

ข้อมูลการศึกษาสัดส่วนสารดูดซับต่อปริมาณแวนธาลินในสารละลายที่มีต่อ
ประสิทธิภาพการดูดซับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง1 ข้อมูลการกำจัดแผลาดีนโดยใช้ถ้ำลอยชานอ้อยปริมาณต่างๆ ในสารละลายแผลาดีนเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ค่าพีเอชใกล้เคียง 2 เขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที

ปริมาณ (กรัม)	ปริมาณแผลาดีนหลังการดูดซับ(mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.1	2.66	2.69	2.70	2.68
0.2	1.50	1.51	1.51	1.51
0.3	2.22	2.22	2.22	2.22
0.4	2.43	2.42	2.44	2.43
0.5	1.97	1.97	1.94	1.96
0.6	2.28	2.25	2.26	2.26
0.7	1.36	1.39	1.39	1.38
0.8	1.26	1.29	1.28	1.28
0.9	1.85	1.86	1.82	1.84
1	2.76	2.77	2.80	2.77

ตาราง ง2 ข้อมูลการกำจัดแอฟธาตินโดยใช้เถ้าลอยขาน้อยที่ปรับสภาพผิวด้วย CTAB ปริมาณต่างๆ ในสารละลายแอฟธาตินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ค่าพีเอชใกล้เคียง 2 เขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที

ปริมาณ (กรัม)	ปริมาณแอฟธาตินหลังการดูดซับ(mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.1	3.39	3.37	3.40	3.38
0.2	4.10	4.15	4.15	4.14
0.3	3.53	3.57	3.56	3.55
0.4	3.77	3.79	3.77	3.78
0.5	3.33	3.33	3.33	3.33
0.6	3.09	3.10	3.11	3.10
0.7	3.14	3.15	3.13	3.14
0.8	3.56	3.51	3.52	3.53
0.9	2.98	3.00	3.00	2.99
1	3.80	3.80	3.80	3.80

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง3 ข้อมูลการกำจัดแอฟธาไลน์โดยใช้เถ้าลอยขาน้อยที่ปรับสภาพผิวด้วย H_2O_2 ปริมาณต่างๆ ในสารละลายแอฟธาไลน์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ค่าพีเอชใกล้เคียง 2 เขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที

ปริมาณ (กรัม)	ปริมาณแอฟธาไลน์หลังการดูดซับ(mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.1	3.07	3.06	3.02	3.05
0.2	2.53	2.50	2.52	2.52
0.3	2.58	2.61	2.60	2.60
0.4	2.30	2.29	2.30	2.30
0.5	2.87	2.84	2.86	2.86
0.6	1.92	1.95	1.92	1.93
0.7	1.92	1.93	1.92	1.92
0.8	2.57	2.54	2.54	2.55
0.9	1.99	1.99	1.99	1.99
1	1.89	1.92	1.90	1.90

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง4 ข้อมูลการกำจัดแอฟธาลินโดยใช้เถ้าลอยชานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วย H_2O_2 และ CTAB ปริมาณต่างๆ ในสารละลายแอฟธาลินเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ค่าพีเอชใกล้เคียง 2 เซลล์ที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที

ปริมาณ (กรัม)	ปริมาณแอฟธาลินหลังการดูดซับ(mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.1	3.84	3.83	3.79	3.82
0.2	4.51	4.51	4.49	4.50
0.3	4.26	4.21	4.23	4.23
0.4	4.43	4.41	4.41	4.42
0.5	4.27	4.29	4.29	4.28
0.6	3.71	3.70	3.68	3.70
0.7	4.43	4.48	4.48	4.46
0.8	4.04	4.00	4.04	4.02
0.9	4.22	4.26	4.20	4.23
1	4.13	4.15	4.15	4.15

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง5 ข้อมูลการกำจัดแอฟธาไลน์โดยใช้ซิงค์จากถ้ำลอยซาน้อย ปริมาณต่างๆ ในสารละลายแอฟธาไลน์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ค่าพีเอชใกล้เคียง 2 เขย่าด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที

ปริมาณ (กรัม)	ปริมาณแอฟธาไลน์หลังการดูดซับ(mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.1	4.30	4.30	4.30	4.30
0.2	4.30	4.27	4.24	4.27
0.3	4.19	4.19	4.22	4.20
0.4	4.13	4.14	4.16	4.14
0.5	3.71	3.74	3.73	3.73
0.6	3.98	3.94	3.97	3.96
0.7	3.53	3.55	3.57	3.55
0.8	3.57	3.53	3.53	3.54
0.9	3.75	3.74	3.75	3.74
1	3.74	3.70	3.74	3.73

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง6 ข้อมูลการกำจัดเนฟธาซีนโดยใช้ซิลิกาจากเถ้าลอยชานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วย CTAB ปริมาณต่างๆ ในสารละลายเนฟธาซีนเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ค่าพีเอชใกล้เคียง 2 เขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที

ปริมาณ (กรัม)	ปริมาณเนฟธาซีนหลังการดูดซับ(mg/l)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.1	3.99	3.96	3.91	3.95
0.2	3.61	3.65	3.59	3.62
0.3	3.03	3.03	3.00	3.02
0.4	3.12	3.08	3.08	3.09
0.5	3.20	3.18	3.20	3.19
0.6	3.20	3.18	3.14	3.17
0.7	3.26	3.27	3.28	3.27
0.8	3.07	3.01	3.09	3.06
0.9	3.19	3.15	3.19	3.18
1	3.02	3.05	3.05	3.04

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอภิญา นิลยง เกิดวันที่ 11 ธันวาคม พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดจันทบุรี สำเร็จการศึกษา ระดับประถมศึกษาและมัธยมต้นที่โรงเรียนสตรีมารดาพิทักษ์ จังหวัดจันทบุรี ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนเบญจมราชูทิศ จังหวัดจันทบุรี และระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย ศิลปากร ในปีการศึกษา 2551

ปัจจุบันได้เข้ารับการศึกษาคือต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม ทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย