

การจัดพิมพ์และตัดจากน้ำเสียโดยใช้ออร์กาโนเคลย์



นางสาว ฐิติรัตน์ ดิษฐ์แก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PHENOL AND LEAD REMOVAL FROM WASTEWATER BY ORGANOCCLAY



Miss Thitirat Ditkaew

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

Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกำจัดฟีนอลและตะกั่วจากน้ำเสียโดยใช้ออร์กาโนเคลย์

โดย

นางสาว ชูติรัตน์ คิชูแก้ว

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศทวีวิวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวงกตเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.พรณวดี สุวัณณะ)

ศูนย์วิทยานิพนธ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จิตรีรัตน์ คิษฐ์แก้ว : การกำจัดฟีนอลและตะกั่วจากน้ำเสียโดยใช้ออร์กาโนเคลย์

(Phenol and Lead Removal from wastewater by Organoclay)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.สุธา ขาวเขียว, 121 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาศักยภาพและความเป็นไปได้ในการใช้ออร์กาโนเคลย์บำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟีนอลที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 5 ถึง 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และ/หรือ ตะกั่วความเข้มข้นในช่วง 6 ถึง 14 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยออร์กาโนเคลย์ถูกเตรียมจากการแลกเปลี่ยนหรือแทนที่สารลดแรงตึงผิวประจุบวก หรือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน (QAC) ที่มีความยาวสายโซ่อัลคิลเท่ากันแต่มีโครงสร้างโมเลกุลต่างกัน ได้แก่ โดเดซิลไตริเนียม คลอไรด์ (DPC) และ โดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียม โบรไมด์ (DTAB) ในแร่ดินเหนียวโซเดียมเบนโทไนต์ โดยผันแปรปริมาณ QACs ตั้งแต่ 0.5 ถึง 2.0 เท่าของค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (CEC) นอกจากนี้ยังศึกษาคุณสมบัติของตัวดูดซับทั้ง 9 ชนิด ศึกษาการดูดซับ QACs บนตัวกลางโซเดียมเบนโทไนต์ ศึกษาผลกระทบของฟีนอลต่อการบำบัดตะกั่ว และการคายออกของ QACs ฟีนอล และ/หรือ ตะกั่ว ผลการศึกษาพบว่า การดูดซับด้วย DPC-ออร์กาโนเคลย์มีไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ เป็นการดูดซับทางเคมี ในขณะที่การดูดซับด้วย DTAB-ออร์กาโนเคลย์เป็นแบบเส้นตรง และฟุนด์ลิช DPC-ออร์กาโนเคลย์สามารถดูดซับฟีนอลได้มากกว่า DTAB-ออร์กาโนเคลย์ ผลการศึกษาการดูดซับตะกั่วพบว่าไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์ การดูดซับด้วย DTAB-ออร์กาโนเคลย์ไม่แตกต่างกัน แสดงว่าปริมาณ DTAB ที่ใช้เตรียมออร์กาโนเคลย์ไม่มีผลต่อการดูดซับ ในขณะที่ปริมาณ DPC สูงขึ้นความสามารถในการดูดซับตะกั่วลดลง เนื่องจาก QACs ได้แลกเปลี่ยนประจุโซเดียมบนโซเดียมเบนโทไนต์ทำให้ไม่สามารถแลกเปลี่ยนประจุตะกั่วได้ และฟีนอลมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับหรือการกำจัดตะกั่วลดลง และไม่มีการแข่งขันกันดูดซับระหว่างฟีนอลและตะกั่ว เนื่องจากการดูดซับฟีนอลและตะกั่วเป็นกลไกที่ต่างชนิดกัน จากผลการศึกษาข้างต้นสรุปได้ว่าออร์กาโนเคลย์เป็นตัวดูดซับที่สามารถบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนอินทรีย์และโลหะหนักได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิติศ จิตรีรัตน์ คิษฐ์แก้ว
 สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก O
 ปีการศึกษา 2552

5070552021: MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : Adsorption / Organoclay / Cationic surfactant / Phenol / Lead

THITIRAT DITKAEW: PHENOL AND LEAD REMOVAL FROM WASTEWATER BY
ORGANOCLAY. ADVISOR : ASSOC.PROF. SUTHA KHAODHIAR, Ph.D., 117 pp.

This project aims at exploring the efficiency and possibility of the use of organoclay in the treatment of phenol-contaminated water and lead-contaminated water with the concentration during 5-25 mg/l and 6-14 mg/l respectively. The organoclay was prepared by placing two cationic surfactants or quaternary ammonium cations (QACs), namely Dodecylpyridinium chloride (DPC) and Dodecyltrimethylammonium bromide (DTAB), into sodium bentonites at 0.5-2.0 time the cation exchange capacity (CEC). Furthermore, the nine sorbents were also characterized. In the mean time, Adsorption QACs onto sodium bentonite, effect of phenol on lead, effect of lead on phenol and desorption of QACs, phenol and lead were investigated. The results indicated that DPC-organoclay could sorb phenol more effectively than DTAB-organoclay. The relatively high affinity between phenol and DPC-organoclay was probably the result of the phenol molecules favorably interact with the pyridinium ring in DPC. The study of the adsorption of lead also found that the adsorption isotherm was the Langmuir type with the similar result to the adsorption isotherm of DTAB-organoclay. This indicated that the amount of DTAB in the preparing of organoclay contributed insignificantly to the adsorption. While the amount of DPC was increasing, the adsorption capacity of lead was decreasing since lead was rarely sorbed on the interlayer of organoclay when sites were already occupied by QACs. Moreover, Phenol and lead were not significantly effect sorption efficiency together. The competition in adsorption between phenol and lead was not expected since the adsorption of phenol and lead were different mechanism. In conclusion, organoclay is considered an efficient sorbents for the treatment of water contaminated with both organic substances and heavy metals.

Department : Environmental Engineering

Student's Signature

ฐิติรัตน์ ติงแก้ว

Field of Study : Environmental Engineering

Advisor's Signature

๐ ๖

Academic Year : 2009

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเชียร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัยซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน และ อาจารย์ ดร.พรรณวดี สุวัฒน์กะ ที่ได้ให้คำชี้แนะ ปรึกษา และแก้ไขจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ช่วยให้คำชี้แนะ ให้ความช่วยเหลืองานด้านเอกสาร และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือเสมอมา

กรมโรงงานอุตสาหกรรม ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับอุตสาหกรรมที่ใช้ฟินอลและสารประกอบฟินอล

บริษัท Thai Nippon Chemical Industrial Co. Ltd ที่กรุณาอนุเคราะห์โซเดียมเบนโทไนด์ และให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ เพื่อใช้สำหรับงานวิจัยนี้

อาจารย์สุรัชนา ช้างชาวยวงค์ วิทยาลัยการสาธารณสุขสิรินธร จังหวัดสุพรรณบุรี ที่กรุณาสละเวลาให้คำชี้แนะวิธีการเตรียมออร์กาโนเคลย์ และให้ความช่วยเหลือด้านอื่นๆ

ขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกันและกันในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

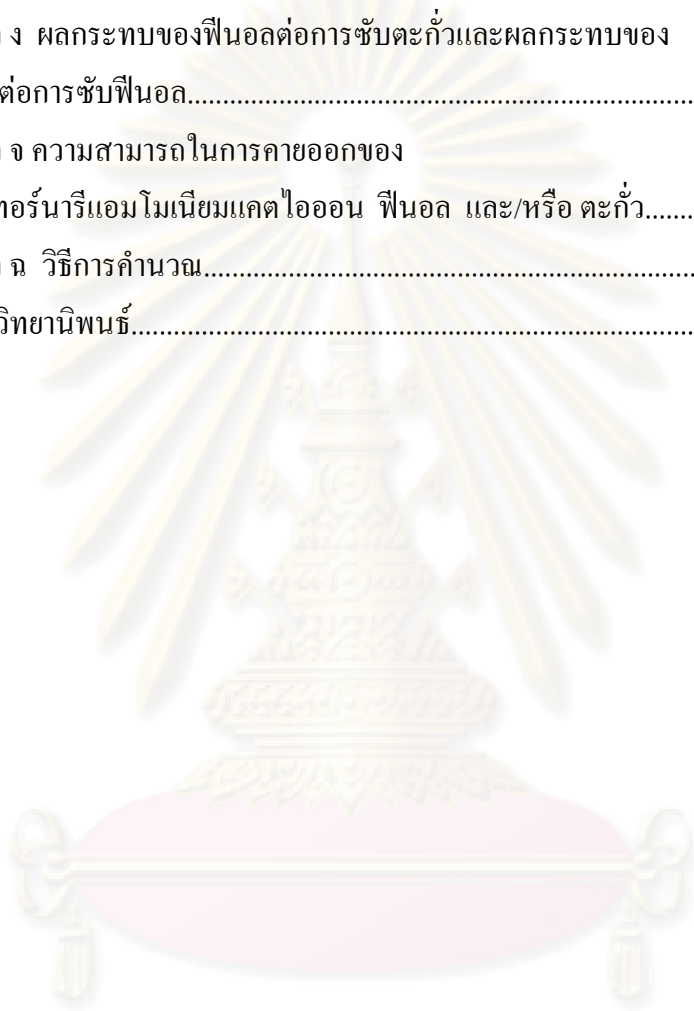
ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณนางสุนิศา คิชู้แก้ว (มารดา) ซึ่งสนับสนุน ส่งเสริม และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 น้ำเสียที่ปนเปื้อนฟีนอลและตะกั่ว.....	4
2.1.1 ฟีนอล.....	4
2.1.2 โลหะหนัก.....	8
2.2 กระบวนการบำบัด.....	12
2.2.1 การดูดซับ.....	13
2.2.2 การแบ่งแยก.....	17
2.3 ออร์กาโนเคลย์.....	19
2.3.1 ดินเหนียวและแร่ดินเหนียว.....	19
2.3.2 การแลกเปลี่ยนไอออนของดิน.....	23
2.3.3 สารลดแรงตึงผิว.....	25
2.3.4 ออร์กาโนเคลย์.....	27
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารประกอบอินทรีย์จากน้ำเสีย โดยออร์กาโนเคลย์.....	28
2.4.2 การศึกษาการดูดซับฟีนอล.....	31

	หน้า
2.4.3 การศึกษาการจับโลหะหนัก.....	33
3. ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	36
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	36
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์.....	36
3.1.2 สารเคมี.....	37
3.2 วิธีการวิจัย.....	38
3.2.1 การเตรียมออร์กาโนเคลย์.....	39
3.2.2 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับควอเตอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน.....	41
3.2.3 ศึกษาคุณสมบัติของตัวดูดซับ.....	42
3.2.4 ศึกษาไอโซเทอมการการจับฟีนอล.....	42
3.2.5 ศึกษาไอโซเทอมการจับตะกั่ว.....	42
3.2.6 ศึกษาผลกระทบของฟีนอลต่อการจับตะกั่วและผลกระทบของ ตะกั่วต่อการจับฟีนอล.....	43
3.2.7 ศึกษาความสามารถในการคายออกของ ควอเตอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน ฟีนอล และ/หรือ ตะกั่ว.....	44
3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง.....	45
4. ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล.....	50
4.1 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับควอเตอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน.....	50
4.2 ศึกษาคุณสมบัติของตัวดูดซับ.....	52
4.3 ศึกษาไอโซเทอมการการจับฟีนอล.....	56
4.4 ศึกษาไอโซเทอมการจับตะกั่ว.....	60
4.5 ศึกษาผลกระทบของฟีนอลต่อการจับตะกั่วและผลกระทบของ ตะกั่วต่อการจับฟีนอล.....	62
4.6 ศึกษาความสามารถในการคายออกของ ควอเตอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน ฟีนอล และ/หรือ ตะกั่ว.....	65
4.7 ประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น.....	66
5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	67
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	67
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	69
รายการอ้างอิง.....	70

	หน้า
ภาคผนวก.....	76
ภาคผนวก ก ไอโซโทมการดูดซับควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน.....	77
ภาคผนวก ข ไอโซโทมการจับฟีนอล.....	82
ภาคผนวก ค ไอโซโทมการจับตะกั่ว.....	94
ภาคผนวก ง ผลกระทบของฟีนอลต่อการจับตะกั่วและผลกระทบของ ตะกั่วต่อการจับฟีนอล.....	106
ภาคผนวก จ ความสามารถในการคายออกของ ควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน ฟีนอล และ/หรือ ตะกั่ว.....	115
ภาคผนวก ฉ วิธีการคำนวณ.....	117
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	121



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 2.1	คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของฟีนอล.....	5
ตารางที่ 2.2	อุตสาหกรรมที่มีการใช้ฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในกระบวนการผลิต.....	6
ตารางที่ 2.3	สมบัติกายภาพของฟีนอลชนิดต่างๆ.....	7
ตารางที่ 2.4	อุตสาหกรรมที่ใช้ฟีนอลและโลหะหนักในกระบวนการผลิตในประเทศไทย....	8
ตารางที่ 2.5	สมบัติทางกายภาพและเคมีของตะกั่วและสารประกอบตะกั่ว.....	10
ตารางที่ 2.6	อาการพิษของตะกั่วตามระดับความเข้มข้นของตะกั่วในเลือด.....	12
ตารางที่ 2.7	คุณสมบัติเลือกของตัวดูดซับ โลหะต่าง.....	19
ตารางที่ 3.1	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก) ของโซเดียม-เบนโทไนด์.....	37
ตารางที่ 3.2	ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของฟีนอล ตะกั่ว และควอเทอร์นารี แอมโมเนียมแคลตอออน.....	38
ตารางที่ 3.3	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองของแต่ละขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	45
ตารางที่ 4.1	หมู่ฟังก์ชันของโซเดียมเบนโทไนด์ QACs และออร์กาโนเคลย์.....	54
ตารางที่ 4.2	แสดงระยะห่างระหว่างชั้นของตัวดูดซับ.....	55
ตารางที่ 4.3	ตัวแปรไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และฟรุนด์ลิช.....	57
ตารางที่ 4.4	ตัวแปรไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ฟรุนด์ลิช และเส้นตรง.....	58
ตารางที่ 4.5	ตัวแปรไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และฟรุนด์ลิช.....	61
ตารางที่ 4.6	ความสามารถในการคายออกของ QACs ฟีนอล และ/หรือ ตะกั่ว หลังจากทำ การทดลองซับน้ำเสียฟีนอล และ/หรือตะกั่ว.....	65
ตารางที่ 4.7	ค่ามาตรฐานดัชนีคุณภาพน้ำสกัดที่ไม่ใช้แล้วที่จัดเป็นของเสียอันตรายตาม ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ.2548).....	66
ตารางที่ ก-1	ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับ DPC.....	78
ตารางที่ ก-2	ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับ DTAB.....	80
ตารางที่ ข-1	ข้อมูลไอโซเทอมการซับฟีนอลด้วยโซเดียมเบนโทไนด์.....	83
ตารางที่ ข-2	ข้อมูลไอโซเทอมการซับฟีนอลด้วยออร์กาโนเคลย์ 0.5DPC.....	84
ตารางที่ ข-3	ข้อมูลไอโซเทอมการซับฟีนอลด้วยออร์กาโนเคลย์ 1.0DPC.....	85
ตารางที่ ข-4	ข้อมูลไอโซเทอมการซับฟีนอลด้วยออร์กาโนเคลย์ 1.5DPC.....	86
ตารางที่ ข-5	ข้อมูลไอโซเทอมการซับฟีนอลด้วยออร์กาโนเคลย์ 2.0DPC.....	87

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ ข-6	ข้อมูลไอโซเทอมการซัฟฟินอลด้วยออร์กาโนเคลย์ 0.5DTAB..... 88
ตารางที่ ข-7	ข้อมูลไอโซเทอมการซัฟฟินอลด้วยออร์กาโนเคลย์ 1.0DTAB..... 89
ตารางที่ ข-8	ข้อมูลไอโซเทอมการซัฟฟินอลด้วยออร์กาโนเคลย์ 1.5DTAB..... 90
ตารางที่ ข-9	ข้อมูลไอโซเทอมการซัฟฟินอลด้วยออร์กาโนเคลย์ 2.0DTAB..... 91
ตารางที่ ค-1	ข้อมูลไอโซเทอมการซัฟตะกั่วด้วยโซเดียมเบนโทไนต์..... 95
ตารางที่ ค-2	ข้อมูลไอโซเทอมการซัฟตะกั่วด้วยออร์กาโนเคลย์ 0.5DPC..... 96
ตารางที่ ค-3	ข้อมูลไอโซเทอมการซัฟตะกั่วด้วยออร์กาโนเคลย์ 1.0DPC..... 97
ตารางที่ ค-4	ข้อมูลไอโซเทอมการซัฟตะกั่วด้วยออร์กาโนเคลย์ 1.5DPC..... 98
ตารางที่ ค-5	ข้อมูลไอโซเทอมการซัฟตะกั่วด้วยออร์กาโนเคลย์ 2.0DPC..... 99
ตารางที่ ค-6	ข้อมูลไอโซเทอมการซัฟตะกั่วด้วยออร์กาโนเคลย์ 0.5DTAB..... 100
ตารางที่ ค-7	ข้อมูลไอโซเทอมการซัฟตะกั่วด้วยออร์กาโนเคลย์ 1.0DTAB..... 101
ตารางที่ ค-8	ข้อมูลไอโซเทอมการซัฟตะกั่วด้วยออร์กาโนเคลย์ 1.5DTAB..... 102
ตารางที่ ค-9	ข้อมูลไอโซเทอมการซัฟตะกั่วด้วยออร์กาโนเคลย์ 2.0DTAB..... 103
ตารางที่ ง-1	ข้อมูลการซัฟน้ำเสียนผสมความเข้มข้นตะกั่วต่อฟีนอลเท่ากับ 10:5 มก./ลิตร..... 107
ตารางที่ ง-2	ข้อมูลการซัฟน้ำเสียนผสมความเข้มข้นตะกั่วต่อฟีนอลเท่ากับ 10:10มก./ลิตร..... 108
ตารางที่ ง-3	ข้อมูลการซัฟน้ำเสียนผสมความเข้มข้นตะกั่วต่อฟีนอลเท่ากับ 10:20 มก./ลิตร..... 109
ตารางที่ ง-4	ข้อมูลการดูดซัฟน้ำเสียนผสมความเข้มข้นฟีนอลต่อตะกั่วเท่ากับ 10:5 มก./ลิตร.. 111
ตารางที่ ง-5	ข้อมูลการดูดซัฟน้ำเสียนผสมความเข้มข้นฟีนอลต่อตะกั่วเท่ากับ 10:10มก./ลิตร. 112
ตารางที่ ง-6	ข้อมูลการดูดซัฟน้ำเสียนผสมความเข้มข้นฟีนอลต่อตะกั่วเท่ากับ 10:20 มก./ลิตร 113
ตารางที่ จ-1	ข้อมูลความสามารถในการคายออกของ QACs ฟีนอล และ/หรือ ตะกั่ว..... 116

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 2.1	ลักษณะการจับชนิดดูดซับและแบ่งแยก..... 12
ภาพที่ 2.2	ก) หน่วยแผ่นซิลิการูปสี่เหลี่ยม ข) สัญลักษณ์เทียบเท่า 20
ภาพที่ 2.3	ก) อะลูมินารูปแปดเหลี่ยม ข) สัญลักษณ์เทียบเท่า..... 21
ภาพที่ 2.4	โครงสร้างของแรมอนต์มอร์ริสไลต์..... 22
ภาพที่ 2.5	ลักษณะรูปร่างของสารลดแรงตึงผิว..... 26
ภาพที่ 2.6	ควอเทอร์นารีแอม โมเนียมแคตไอออน..... 27
ภาพที่ 2.7	การปรับเปลี่ยนพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอร์ริสไลต์ธรรมชาติด้วย QACs..... 28
ภาพที่ 3.3	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย..... 39
ภาพที่ 4.1	ไอโซเทอมของการดูดซับ DPC และ DTAB 50
ภาพที่ 4.2	ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของโซเดียมเบนโทไนด์ DPC และ DPC-ออร์กาโนเคลย์..... 53
ภาพที่ 4.3	ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของโซเดียมเบนโทไนด์ DTAB และ DTAB-ออร์กาโนเคลย์..... 53
ภาพที่ 4.4	ผลวิเคราะห์ XRD ของโซเดียมเบนโทไนด์ และออร์กาโนเคลย์..... 54
4.5	ไอโซเทอมการซับฟีนอลบนตัวกลาง DPC-ออร์กาโนเคลย์..... 56
4.6	ไอโซเทอมการซับฟีนอลบนตัวกลาง DTAB-ออร์กาโนเคลย์..... 57
4.7	ไอโซเทอมการซับตะกั่วบนตัวกลาง DPC-ออร์กาโนเคลย์ และ DTAB-ออร์กาโนเคลย์..... 60
4.8	ผลกระทบของฟีนอลต่อการซับตะกั่วบนตัวกลางโซเดียมเบนโทไนด์และ DPC-ออร์กาโนเคลย์..... 62
4.9	ผลกระทบของฟีนอลต่อการซับตะกั่วบนตัวกลางโซเดียมเบนโทไนด์และ DTAB-ออร์กาโนเคลย์..... 63
4.10	ผลกระทบของตะกั่วต่อการซับฟีนอลบนตัวกลางโซเดียมเบนโทไนด์และ DPC-ออร์กาโนเคลย์..... 64

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 4.11 ผลกระทบของตะกั่วต่อการจับฟีนอลบนตัวกลางโซเดียมเบนโทไนด์และ DTAB-ออร์กาโนเคลย์.....	64
ภาพที่ ข1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของฟีนอลด้วย DPC-ออร์กาโนเคลย์.....	92
ภาพที่ ข2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของฟีนอลด้วย DTAB-ออร์กาโนเคลย์.....	93
ภาพที่ ค1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของตะกั่วด้วย DPC-ออร์กาโนเคลย์.....	104
ภาพที่ ค2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของตะกั่วด้วย DTAB-ออร์กาโนเคลย์.....	105



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สารอินทรีย์ ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเป็นปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งในปัจจุบัน เนื่องจาก สารอินทรีย์เหล่านี้ย่อยสลายได้ยากและมีความเป็นพิษสูง เมื่อผ่านการใช้งานแล้ว จะปะปนมากับน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม ปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ปนเปื้อนในดิน และน้ำใต้ดิน ซึ่งส่งผลกระทบต่อมาในอนาคต ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่มีพิษสูงได้แก่ กลุ่มคลอโรเบนซีน (Chlorobenzene) กลุ่มของสารทำละลายชนิดฮาโลจีเนต (Halogenated solvent) กลุ่มฟีนอล (Phenol) และสารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds) อุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเลียม อุตสาหกรรมโรงกลั่น อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมรักษาเนื้อไม้ อุตสาหกรรมสิ่งทอ สารเคมีในการเกษตรและยาฆ่าแมลง มักใช้ฟีนอลและสารประกอบฟีนอลในกระบวนการผลิต การจัดการที่ไม่เหมาะสมอาจปล่อยฟีนอลให้ปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม ฟีนอลเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนแอโรแมติก เป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก เป็นพิษต่อคนและสัตว์ ซึ่งน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาจพบโลหะหนักปนเปื้อนมาด้วย วิธีการกำจัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟีนอลและโลหะหนักมีหลายวิธีทั้งวิธีทางเคมี ชีวภาพ และวิธีทางกายภาพ เช่น การออกซิเดชันทางเคมี (Chemical oxidation) การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) และการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นวิธีการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสียกันอย่างกว้างขวาง แต่มีข้อจำกัด เช่น ถ่านกัมมันต์ไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมัน (Oil and grease) สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural organic matter) และสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่อื่นๆ

ออร์กาโนเคลย์ หรือ โมดิไฟด์เคลย์ (Organoclay or Modified Clay) เป็นคำที่เรียกกลุ่มแร่ดินเหนียวที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว โดยการเติมสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เพื่อเพิ่มประโยชน์การใช้งานของแร่ดินให้หลากหลายและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น สารลดแรงตึงผิวเป็นสารอินทรีย์ประจุบวก (Organic cation) จำพวกควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน (Quaternary Ammonium Cations, QACs) ที่มีคุณสมบัติทำให้แร่ดินเหนียวซึ่งมีความเป็นขั้วหรือชอบน้ำ (Hydrophilic) ถูกเปลี่ยนให้มีความชอบน้ำหรือชอบสารอินทรีย์แทน (Hydrophobic หรือ Organophilic) ปัจจุบันออร์กาโนเคลย์ได้รับความสนใจและนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เช่น ในงานบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ ใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อปรับความหนืดในอุตสาหกรรมสี หมึกพิมพ์ กระจกเงา บำบัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในดิน น้ำใต้ดิน และเป็นชั้นกันซึมในหลุมฝังกลบขยะ เป็นต้น

งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะศึกษาการใช้ออร์กาโนเคลย์ ที่เตรียมจากควอเทอร์นารี แอมโมเนียมแคตไอออน 2 ชนิด ได้แก่ โดเดซิลไพริดีเนียม คลอไรด์ (Dodecylpyridinium chloride, DPC) และ โดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียม โบรไมด์ (Dodecyltrimethylammonium bromide, DTAB) บำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟีนอลและตะกั่ว และศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพของออร์กาโนเคลย์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาศักยภาพ และความเป็นไปได้ในการใช้ออร์กาโนเคลย์ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยฟีนอล และ/หรือ ตะกั่ว
2. ศึกษาผลของปริมาณควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน และผลของลักษณะโครงสร้างของควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟีนอล และ/หรือ ตะกั่ว
3. ศึกษาผลของฟีนอลต่อการบำบัดตะกั่ว และผลของตะกั่วต่อการบำบัดฟีนอลในการบำบัดน้ำเสียด้วยออร์กาโนเคลย์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการของเสี่ยอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นการดำเนินงานในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ พีเอชเริ่มต้น 7.0 ± 0.5 ที่มีความเข้มข้นฟีนอลอยู่ในช่วง 5-25 มิลลิกรัมต่อลิตร และ/หรือ ความเข้มข้นตะกั่ว 6-14 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมตัวดูดซับหรือออร์กาโนเคลย์ โดยนำโซเดียมเบนโทไนต์มาแลกเปลี่ยนประจุด้วยควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน 2 ชนิด ได้แก่ โดเดซิลไพริดีเนียม คลอไรด์ (Dodecylpyridinium chloride, DPC) และ โดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียม คลอไรด์ (Dodecyltrimethylammonium bromide, DTAB) ที่สัดส่วน 0.50 1.00 1.50 และ 2.00 เท่าของค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity, CEC) ของโซเดียมเบนโทไนต์ และทำการทดลองแบบทีละเท (Batch Experiment) ที่อุณหภูมิห้อง ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบข้อมูลพื้นฐานและประสิทธิภาพในการใช้ออร์กาโนเคลย์เป็นตัวดูดซับและกำจัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟีนอลและตะกั่ว ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมในการเลือกวัสดุที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย

2. เพื่อเป็นแนวทางกำจัดการปนเปื้อนอื่นๆที่มีโครงสร้างพื้นฐานกลุ่มแอมโรแมติกและโลหะหนักชนิดอื่นๆ



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสียที่ปนเปื้อนฟีนอลและตะกั่ว

สารประกอบอินทรีย์ (Organic compound) คือสารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เกิดจากสิ่งมีชีวิตผลิตขึ้นหรือมาจากสิ่งมีชีวิต ยกเว้น

1. สารประกอบคาร์บอเนต (Carbonate) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) หรือหินปูน

2. สารประกอบไซยาไนด์ (Cyanide) เช่น โปแตสเซียมไซยาไนด์ (HCN)

3. สารประกอบออกไซด์ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษสูง ย่อยสลายได้ยาก และใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ได้แก่ กลุ่มคลอโรเบนซีน กลุ่มของสารละลายฮาโลจีเนต (Halogenated solvent) กลุ่มฟีนอล (Phenol) และสารประกอบฟีนอล (Phenolic compound)

2.1.1 ฟีนอล (Phenol)

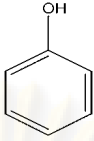
ฟีนอล คือ สารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกซี (OH) ต่อโดยตรงกับหมู่แอริล (Aryl Group, Ar) ซึ่งเขียนแทนได้ด้วยสูตรทั่วไปเป็น ArOH ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$) เมื่อ Ar คือหมู่แอริล การที่หมู่ -OH ต่ออยู่กับหมู่แอริลทำให้สมบัติส่วนใหญ่ของฟีนอลต่างจากแอลกอฮอล์ทั่วไป

ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของฟีนอล

ฟีนอลมีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวขุ่น น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 94.12 กรัมต่อโมล ฟีนอลละลายได้ดีในแอลกอฮอล์ คาร์บอนเตตระคลอไรด์ อะซิติกเอซิด เป็นต้น ตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของฟีนอล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของฟีนอล (LaGrega และคณะ, 2001)

Properties	Values
Molecular	C_6H_5OH 
Molecular	94.12 กรัมต่อโมล
สี (Color)	ไม่มีสี ถึง ชมพูอ่อน
ความหนาแน่น (Density)	1.058 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ 20 องศาเซลเซียส
จุดเดือด (Boiling point)	181.8 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว (Melting point)	40.90 องศาเซลเซียส
ความดันไอ (Vapor pressure)	2.00×10^{-1} ที่ 20 องศาเซลเซียส
ความสามารถในการละลาย (Solubility)	8.20×10^4 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 20 องศาเซลเซียส ละลายได้ดีมากในแอลกอฮอล์ คาร์บอนเตตระคลอไรด์ กรดอะซิติก และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ละลายได้ใน คลอโรฟอร์ม เอทิล อีเทอร์ คาร์บอนไดซัลไฟด์ และละลายได้น้อยในเบนซีน
ค่าคงที่ตามกฎของเฮนรี (Henry's Law Constant) (25 องศาเซลเซียส)	3.97×10^{-7} บรรยากาศ-ลูกบาศก์เมตรต่อโมล
$\text{Log } K_{ow}$	1.460
K_{oc}	1.42×10 มิลลิกรัมต่อกรัม

อุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟีนอล

ฟีนอลและสารประกอบฟีนอลได้รับความสนใจเป็นพิเศษจาก U.S.EPA (United States Environmental Protection Agency) จัดอยู่ในรายชื่อสารมลพิษอันดับต้นของ U.S.EPA ที่มีผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม และมักพบบ่อยในแหล่งกำเนิดของเสียเสี่ยงอันตรายโดยที่ฟีนอลจัดอยู่ในลำดับที่ 65 จาก 129 รายการสารเคมีทั้งหมด (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2546) และประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ได้กำหนดลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ให้มีสารประกอบฟีนอล (Phenol compounds) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2540) ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมหลายประเภทมีการใช้ฟีนอลอย่างแพร่หลาย ได้แก่ อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมโรงกลั่น อุตสาหกรรมรักษาเนื้อไม้ อุตสาหกรรมสิ่งทอ สารเคมีในการเกษตร

อุตสาหกรรมพลาสติก ผลิตยาฆ่าเชื้อโรค ยาฆ่าแมลง สีข้อม สบู่ น้ำยาทำความสะอาด และ กระดาษ เป็นต้น (Kotresha และ Vidyasagar, 2007) ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างการใช้ฟินอลใน อุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ที่มีการใช้ฟินอลในกระบวนการผลิต

ตารางที่ 2.2 อุตสาหกรรมที่มีการใช้ฟินอลและอนุพันธ์ของฟินอลในกระบวนการผลิต
(กิตติยศ ตั้งสัจจวงศ์, 2548)

ชื่อ	การใช้ประโยชน์
Phenol	- วัตถุดิบสำหรับทำพลาสติก - ทำยา สีข้อม - เป็นสารผสมในกระบวนการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ Nylon 66 และ nylon 6 - เป็นสารผสมเพื่อการผลิตเป็นยาปราบวัชพืช - ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อโรคในพืชเนื่องจากฟินอลมีฤทธิ์ทำลายเชื้อโรค Gram บวก Gram ลบ และไวรัสได้
O-Cresol	- เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมสารอื่น สบู่
m- Cresol	- เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมสารอื่น สบู่
p- Cresol	- เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมสารอื่น สบู่
Hydroquinone	- ใช้ในการล้างฟิล์มถ่ายรูป
Pyrogallol	- ใช้ในการล้างฟิล์มถ่ายรูป

อนุพันธ์ของฟินอลอื่น ๆ นั้นส่วนใหญ่ไม่ละลายน้ำยกเว้นสารประกอบนั้นจะมี หมู่ฟังก์ชันอื่นซึ่งทำให้ละลายน้ำได้ดีขึ้น เช่น Salicylic acid หรือ Picric acid อนุพันธ์ของฟินอล ส่วนมากมีสี ขณะที่ตัวสารฟินอลไม่มีสี แต่ฟินอลเมื่อถูกออกซิไดซ์จะทำให้มีสีไปทางแดงจนถึง แดงเข้มตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติทางกายภาพของฟินอลชนิดต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 สมบัติกายภาพของฟีนอลชนิดต่าง ๆ (สมพงษ์ จันทรโพธิ์ศรี, 2541)

ชื่อสารประกอบ	M.P.°C	B.P.°C	การละลาย	
			g/100g H ₂ O At 25°C	H _a
Phenol	41	182	9.3	1.1*10 ⁻¹⁰
o-cresol	31	191	2.5	0.63
m-cresol	11	201	2.6	0.98
p-cresol	35	202	2.3	0.67
o-fluorophenol	16	152		15
m-fluorophenol	14	178		5.2
p-fluorophenol	48	185		1.1
o-chlorophenol	9	173	2.8	77
m-chlorophenol	33	214	2.6	16
p-chlorophenol	43	220	2.7	6.3
o-bromophenol	5	194		41
m-bromophenol	33	236		14
p- bromophenol	64	236	1.4	5.6
o-iodophenol	43			34
m-iodophenol	40			13
p-iodophenol	94			6.3
o-aminophenol	174		1.7°	2.0
m-aminophenol	123		2.6	69
p-aminophenol	186		1.1°	
o-nitrophenol	45	217	0.2	600
m-nitrophenol	96		1.4	50
p-nitrophenol	114		1.7	690
2,4-dinitrophenol	113		0.6	1000000
2,4,6-trinitrophenol	122		1.4	very large
Catechol	104	246	45	1
Resorcinol	110	281	123	3
Hydroquinone	173	286	8	2

ผลกระทบของฟินอลต่อคนและสัตว์

อุตสาหกรรมบางประเภทที่มีการนำฟินอลไปใช้ในกระบวนการผลิตอาจปล่อยฟินอลให้ปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม ฟินอลเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก เป็นพิษต่อคนและสัตว์ การสูดดมฟินอลจะทำให้เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ ทำให้เวียนศีรษะหรือเกิดการระคายเคืองผิวหนัง ท้องร่วง เบื่ออาหาร เป็นอันตรายต่อดับ อาจทำให้เกิดมะเร็งและเมื่อได้รับในปริมาณมากอาจทำให้ตายได้ นอกจากนี้ในน้ำดื่มที่ปนเปื้อนฟินอลจะมีกลิ่นและรสชาติที่ไม่พึงประสงค์ จากตารางที่ 2.2 น้ำเสียที่ปล่อยมาจากอุตสาหกรรมนอกจากจะปนเปื้อนฟินอลในบางอุตสาหกรรมพบโลหะปนเปื้อนด้วย ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 อุตสาหกรรมที่ใช้ฟินอลและโลหะหนักในกระบวนการผลิตในประเทศไทย

อุตสาหกรรม	สารอินทรีย์	โลหะหนัก	รายการอ้างอิง
อุตสาหกรรมโรงกลั่นน้ำมัน	ฟินอล , ดีดีที	ตะกั่ว ทองแดง เหล็ก ปรอท นิกเกิล และแคดเมียม	กระทรวงอุตสาหกรรม (2540)
อุตสาหกรรมการรักษาเนื้อไม้	เพนตาคลอโรฟินอล (Pentachloro phenol)	อาร์ซีนิก และ โครเมียม	สุปราณี แก้วภิรมย์ (2550)
อุตสาหกรรมสิ่งทอ	ฟินอล	โลหะหนัก	ห้องสมุดกรมส่งเสริม อุตสาหกรรม (2551)

จากตารางที่ 2.4 พบว่ามีอุตสาหกรรมหลายชนิดที่มีฟินอลและโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำทิ้ง นอกจากนี้ยังพบในน้ำชะขยะตามหลุมฝังกลบขยะ ซึ่งมีผลกระทบต่อคน สัตว์ และสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก และในงานวิจัยนี้ได้เลือกตะกั่วเป็นตัวแทนของโลหะหนักในการศึกษาวิจัยร่วมกับฟินอล

2.1.2 โลหะหนัก (Heavy metal)

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไปที่มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 ถึง 92 ภายในคาบที่ 4 ถึง 7 ของตารางธาตุ โดยทั่วไปโลหะมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้น ปรอท ที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ โลหะหนักส่วนใหญ่มีลักษณะทางกายภาพคล้ายคลึงกันคือ นำไฟฟ้า และความร้อนได้ดี มีความมันวาวสะท้อนแสงได้ดี และมีความเหนียวสามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆได้ ส่วนคุณสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญคือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ทำให้สามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูป ที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ

และเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ จะทำให้โลหะหนักเหล่านี้แพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อม โดยปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ และผลผลิตทางการเกษตร จากนั้นจะเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ ซึ่งโลหะหลายชนิดมีคุณสมบัติที่เป็นอันตราย เมื่อเข้าไปสะสมอยู่ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต (ณัฐ คิลกเกียรติ, 2546)

ตะกั่ว (Lead)

สมบัติทางกายภาพและเคมีของตะกั่ว

ตะกั่วเป็นธาตุชนิดหนึ่งที่ตั้งอยู่ในจำพวกโลหะหนัก มีปริมาณมากที่สุดในบรรดาโลหะหนักที่มีเลขอะตอมมากกว่า 60 มีน้ำหนักอะตอม 207.14 เลขอะตอม 82 ในตารางธาตุ (Periodic Table) ตะกั่วจัดเป็นธาตุทรานสิชัน (Transition) ซึ่งเป็นโลหะหนักอยู่ในธาตุหมู่ IVA ความถ่วงจำเพาะ 11.34 จุดหลอมเหลว 327.5 องศาเซลเซียส และจุดเดือด 1740 องศาเซลเซียส ที่ความดันปกติ มีวาเลนซ์ได้หลายค่า เช่น 1 2 และ 4 แต่ส่วนมากอยู่ในสภาวะวาเลนซ์ 2 ตะกั่วในธรรมชาติที่พบมากมีอยู่ 4 ไอโซโทป ได้แก่ 208 206 207 และ 204 มีสมบัติโดยทั่วไปคือ อ่อน หลอมเหลวได้ ทำให้อ่อนและดัดแปลงให้มีรูปร่างลักษณะต่างๆ โดยการรีดคัตหรือตีได้ตามต้องการและสามารถกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิสูงๆ ตะกั่วมีสีเทาหรือสีดำเมื่ออยู่ในรูปไดออกไซด์ และมีสีเหลืองหรือสีส้มเมื่ออยู่ในรูปออกไซด์ แต่โดยทั่วไปจะมีสีขาวหรือไม่มีสี พบกระจายอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ แร่ตะกั่วที่สำคัญคือ ตะกั่วซัลไฟด์ (Galena) สูตรเคมี PbS รองลงมาคือ ตะกั่วคาร์บอเนต (Cerussite) สูตรเคมี $PbCO_3$ และตะกั่วซัลเฟต (Anglesite) สูตรเคมี $PbSO_4$ สำหรับแร่ตะกั่วซัลไฟด์ มีปริมาณตะกั่วถึงร้อยละ 86.6 กำมะถัน (S) ร้อยละ 13.4 ถ้าเป็นผลึกมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกเต๋า และแตกออกเป็นรูปลูกเต๋าเล็กๆ ถ้าผลึกเล็กละเอียดมากจะมีลักษณะระยิบระยับ มีสีผงละเอียด สีเทาตะกั่วเนื้ออ่อนข้างอ่อน

ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติทางกายภาพและเคมีของตะกั่วและสารประกอบตะกั่ว จากตารางและสารประกอบของอนินทรีย์ของตะกั่ว (Pb^{+2}) พบว่า ตะกั่วซัลไฟด์ และตะกั่วออกไซด์ มักไม่ละลายน้ำ ยกเว้นจะอยู่ในรูปของไนเตรต คลอไรด์ และคลอไรด์ นอกจากนี้เกลือของตะกั่วบางชนิดจะอยู่ในรูปกรดอินทรีย์ เช่น Lead Oxalate ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ ในเปลือกโลก ตะกั่วในพื้นดินอาจเกิดตามธรรมชาติหรืออาจเกิดจากภาวะมลพิษดินมีสภาพเป็นกรด ซึ่งจะมีสารตะกั่วที่น้อยกว่าดินที่เป็นด่าง เนื่องจากอินทรีย์สารในดินอาจทำปฏิกิริยากับสารตะกั่วที่มีอยู่ (ปริญญา บุญส่งแท้, 2544 ; เอมมา อาสนจินดา, 2545)

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางกายภาพและเคมีของตะกั่วและสารประกอบตะกั่ว

(World Health Organization, 1981)

Name	Synonym & Formula	MoleCular Weight	Melting Point (°C)	Boiling Point (°C)	Solubility In cold Water (g/litre)	Soluble in
Lead	Pb	207.19	327.502	1740	Insoluble	HNO ₃ ; hot Conc. H ₂ SO ₄
Lead acetate	Pb (C ₂ H ₃ O ₂) ₂	325.28	280	443	-	hot water; glycerin; alcohol
Lead aside	Pb(N ₃) ₂	291.23	-	Explodes at 350	Slightly (0.23)	acetic acid; hot water
Lead carbonate	Cerrusite PbCO ₃	267.20	315 (decomposes)	-	0.0011	acid; alkali; decomposes
Lead chlorate	Pb(ClO ₃) ₂	374.09	230 (decomposes)	-	very soluble	alcohol
Lead chloride	Cotunite PbCl ₂	278.10	501	950	9.9	NH ₄ salts; dilute HCl NH ₃ ; hot water
Lead chromate	crocoite, yellow PbCrO ₄	328.18	844 (decomposes)	-	0.000058	alcohol; alkali
Lead nitrate	Pb(NO ₃) ₂	331.20	470 (decomposes)	-	370.5	alcohol; alkali; NH ₃ ; hot water
Lead ortophosphate	Pb ₃ (PO ₄) ₂	811.51	1014	-	0.00014	alkali; HNO ₃
Lead oxalete	PbC ₂ O ₄	295.21	300	-	0.0016	HNO ₃
Lead-dioxide	Plattnerite PbO ₂	239.19	290 (decomposes)	-	insoluble	dilute HCl; acetic acid (slightly)
Lead-mono oxide	Litharge PbO	223.19	888	-	0.017	HNO ₃ ; alkali; NH ₄ Cl
Lead	Pb	774.15	115.7	-	0.5	hot water; ETHER

stearate	$(C_{18}H_{35}O_2)_2$					
Lead sulfate	Anglesite $PbSO_4$	303.25	1170	-	0.0425	NH_4 Salts; conc. H_2SO_4
Lead sulfide	Galena, PbS	239.25	1114	-	0.00086	acid
Tetraethyl lead	$Pb(C_2H_5)_4$	323.44	-136.80	200	insoluble	benzene; ether petroleum; alcohol;
Tetraethyl lead	$Pb(CH_3)_4$	267.3	-27.5	110	insoluble	benzene; ether petroleum; alcohol;

^a Adapted from West, R.C., ed. Handbook of Chemistry and Physics, 55th edition, Cleveland, Ohio, Chemical Rubber Company, 1974.

พิษของตะกั่ว

ตะกั่วเป็นสารพิษที่ทำให้เกิดโรคเรื้อรัง เพราะการดูดซึมตะกั่วเข้าสู่ร่างกายเป็นไปอย่างช้ามากและการขับถ่ายออกจากร่างกายก็ช้าด้วย โดยตะกั่วจะถูกสะสมตามเนื้อเยื่อต่างๆ พิษของตะกั่วแบบเรื้อรัง ที่สำคัญได้แก่ โรคโลหิตจาง ซึ่งเกิดจากการเจือปนของตะกั่วในร่างกาย ทั้งนี้ ตะกั่วจะไปยับยั้งการสังเคราะห์ฮีโม (heme) ในเม็ดเลือดแดง โดยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ฮีโม เช่น ALA dehydratase และตะกั่วจะรบกวนการสังเคราะห์โปรตีนโกลบิน โดยจะเข้าไปจับกับหมู่ไทโอดลในโมเลกุลของเอนไซม์ การวัดเอนไซม์ ALA dehydratase ในเลือดเพื่อตรวจหาปริมาณตะกั่ว พบว่าเมื่อมีระดับตะกั่วในร่างกายเพิ่มขึ้นจะทำให้เอนไซม์นี้ลดลง เมื่อเกิดภาวะโลหิตจางรุนแรงขึ้น จะทำให้เกิดความผิดปกติที่ระบบประสาทส่วนกลาง ความสามารถในการเรียนรู้ช้าลง ไอคิวต่ำ ความจำเสื่อม ควบคุมการทรงตัวไม่ได้ ปวดศีรษะ วิดกกังวล หากเกิดความเป็นพิษรุนแรงมากอาจจะวาย ชัก โคม่าและเสียชีวิตได้ ส่วนอาการเป็นพิษเนื่องจากตะกั่วแบบเฉียบพลันมีอยู่หลายแบบด้วยกัน เช่น อ่อนเพลีย คลื่นไส้ วิงเวียน การกระตุกของกล้ามเนื้อและอาการอื่นๆ ตารางที่ 2.6 แสดงอาการพิษของตะกั่วซึ่งผันแปรตามระดับของตะกั่วในเลือด

ตารางที่ 2.6 อาการพิษของตะกั่วตามระดับความเข้มข้นของตะกั่วในเลือด
(นิธิยา รัตนাপนนท์ และ วิบูลย์ รัตนูปนนท์, 2543)

ระดับของตะกั่วในเลือด (มิลลิกรัม/100 มิลลิลิตร)	อาการพิษ
25-30	โปรโตพอร์ไฟรินเพิ่มขึ้นในเลือดและ ALA เพิ่มขึ้นในปัสสาวะ
40-50	เฮมาโตคริตและเฮโมโกลบินลดลงและ ALA เพิ่มขึ้น
50-60	เกิดภาวะโลหิตจาง
> 60	ตื่นเต้น ไม่อยู่นิ่ง ควบคุมตัวเองไม่ได้ ก้าวร้าว
> 120	ปัญญาอ่อน ตาบอดและเสียชีวิต

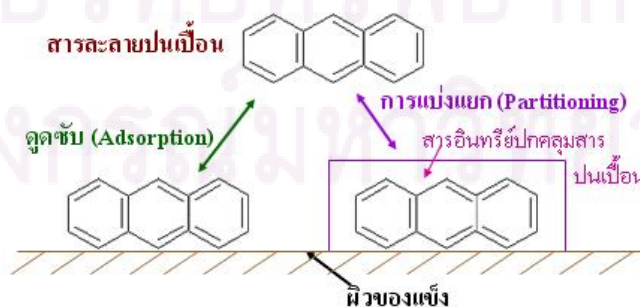
ตะกั่วเป็นสารมลภาวะที่ไม่สลายตัวเองตามธรรมชาติ มีความสามารถละลายน้ำได้น้อยมาก และมีความสามารถถูกดูดซับได้ด้วยดิน ขนาดความเป็นพิษของตะกั่วจะขึ้นอยู่กับพีเอชความกระด้าง สารอินทรีย์ โลหะหนักอื่นๆ เป็นต้น

วิธีการกำจัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟีนอลและโลหะหนักมีหลายวิธีทั้งวิธีทางเคมีชีวภาพ และวิธีทางกายภาพ เช่น การออกซิเดชันทางเคมี (Chemical oxidation) การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) และการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Masqué และคณะ, 1987)

2.2 กระบวนการซับ (Sorption process)

การซับ (Sorption) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากสารประกอบไม่ชอบน้ำอยู่ระหว่างกลางระหว่างน้ำกับดิน หรือตัวดูดซับอื่นๆ เช่น ถ่านกัมมันต์ ซึ่งสารประกอบไม่ชอบน้ำถูกดูดซับไว้กับดิน การซับจะเกี่ยวข้องกับ ตัวดูดซับ (Sorbent) เช่น ถ่านกัมมันต์, ตัวถูกดูดซับ (Sorbate) หรือสารปนเปื้อนถูกดูดซับ เช่น สารปนเปื้อนอินทรีย์ และ ตัวทำละลาย (Solvent) เช่น น้ำ

โดยทั่วไปการซับจะมีทั้ง การดูดซับ (Adsorption) และการแบ่งแยก (Partitioning) (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2546)



ภาพที่ 2.1 ลักษณะการซับชนิดดูดซับและแบ่งแยก (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2546)

2.2.1 การดูดซับ (Adsorption)

เป็นกระบวนการหนึ่ง ที่ใช้แยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซ โดยอาศัยหลักการการเคลื่อนย้ายมวลสารของตัวถูกดูดซับจากเฟสที่เป็นของเหลวหรือก๊าซไปยังเฟสที่เป็นของแข็ง ซึ่งก็คือตัวดูดซับ ทำให้เกิดการสะสมของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับนั้น กระบวนการดูดซับนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แรงด้วยกันคือ

1. แรงทางกายภาพ (Physical force) ประกอบด้วย

1.1 แรงวานเดอร์วาลส์ (Van der waal's force) อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่ไม่มีสภาพขั้ว สามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆ ได้เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณที่อยู่ภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากันมีผลทำให้เกิดสภาพขั้วขึ้น และสามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ ดังนั้นการคายการดูดซับ (Desorption) จะเกิดได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

1.2 แรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้วด้วยกัน หรือระหว่างที่มีขั้วกับสารไม่มีขั้ว โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (Orientation effect) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงข้ามกัน

ข. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากผลของการกระจาย (Dispersion effect) ซึ่งเห็นผลจากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมากและเมื่อโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามา ก็จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ซึ่งแรงนี้มักจะเป็นแรงอ่อนๆ เช่น แรงดึงดูดระหว่างสารอินทรีย์และถ่านกัมมันต์

ค. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว กับ โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผล เนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (Induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้าม ทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

2. แรงทางเคมี (Chemical force)

เกิดจากการยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนของสารกับตัวดูดซับ แล้วเกิดสารประกอบเชิงซ้อนใหม่ขึ้น เช่น การดูดซับระหว่างหมู่โลหะทรานซิชันกับหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งพันธะเคมีหรือแรงเคมีที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน หรือเกิดจากการใช้อิเล็กตรอน หรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งกันและกัน จึงมีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนของสารกับหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ ซึ่งจะมีค่ามากกว่าแรงทางกายภาพ และจากแรงทางเคมีนี้ จะมีผลทำให้ปฏิกิริยาไม่สามารถย้อนกลับไปได้ (Irreversible)

ลักษณะการดูดซับ

แบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)
2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption or Chemisorption)

ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพกับการดูดซับทางเคมี

1. การดูดซับทางกายภาพไม่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนหรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน
2. การดูดซับทางกายภาพจะไม่จำกัดเกี่ยวกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปเกาะยังพื้นผิวส่วนใดก็ได้ แต่การดูดซับทางเคมีจะเลือกเฉพาะบริเวณที่สามารถเกิดพันธะเคมีได้เท่านั้น
3. ค่าความร้อนของการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าต่ำ มีค่าเท่ากับความร้อนของการกลายเป็นของเหลว เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางเคมี ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น แต่ค่าความร้อนของการดูดซับก็ไม่ใช่ว่าที่สำคัญในการพิจารณา
4. การดูดซับทางกายภาพจะเกี่ยวข้องกับการเกิดของชั้นหลายโมเลกุล (Multimolecule layer) กล่าวคือ แต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่บนชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ หรือจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นสมบูรณ์เมื่อมีการเกิดชั้นที่ 1 ซึ่งบางครั้ง การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวชั้นบนของการดูดซับทางเคมีก็ได้
5. การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นอย่างทันที (เป็นการแพร่เข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับซึ่งต้องใช้เวลาพอสมควร) ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างทันทีเช่นกันแต่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ด้วย

สารที่มีอำนาจดูด โมเลกุลต่างๆมาติดผิวได้มีหลายชนิด อาจแบ่งเป็น 3 ประเภท

1. ประเภทสารอินทรีย์ เช่น ดินเหนียวต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และ แอคติเวดเต็ดซิลิกา สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมากอย่างไรก็ตามก็มีข้อเสียคือ สารดูดซับประเภทอินทรีย์มีจำกัดมาก

2. ถ่านกัมมันต์ เป็นสารดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม

3. ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม (ชฎาภรณ์ บุญแท้, 2545)

การศึกษาความสามารถในการดูดซับ

การศึกษาความสามารถในการดูดซับ เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ไปกับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ ณ จุดสมดุล เพื่อคัดเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุด โดยอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์

1. ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

การดูดซับแบบแลงเมียร์เป็นพื้นฐานของการดูดซับแบบอื่นๆ ซึ่งมีการสมมติฐานว่าการดูดซับสูงสุดสัมพันธ์กับ โมเลกุลตัวถูกละลายที่จัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ มีพลังงานของการดูดซับคงที่ ไม่มีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับในแนวระนาบพื้นผิวตัวดูดซับ

$$Q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad [1]$$

เมื่อ Q_e = จำนวน โมเลกุลตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักที่มีความเข้มข้น C
 q_m = จำนวน โมเลกุลของตัวถูกดูดซับต่อหน่วย น้ำหนักตัวดูดซับที่จัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียว (monolayer) บนพื้นผิวตัวดูดซับ
 C_e = ความเข้มข้นที่จุดสมดุล (มก./ล.)
 b = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงาน

จากสมการที่ [1] เมื่อ X เข้าใกล้ q_m และ C_e เข้าใกล้อนันต์ (Infinity) สมการที่ [1] สามารถเขียนได้เป็น

$$\text{จัดเป็นสมการเส้นตรงได้ดังนี้} \quad \frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{bQ_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad [2]$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/Q_e กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/q_m$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $1/b q_m$

2. ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Isotherm)

การดูดซับแบบฟรอนด์ลิชนี้ เป็นการดูดซับที่ตัวถูกดูดซับเรียงซ้อนกันหลายชั้น ด้วยพันธะอ่อนๆ

$$q_c = \frac{X}{M} = K_F C^{1/n}$$

เมื่อ q_c = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (มก./ล.)

X = ปริมาณของสารที่ดูดซับ (มก.)

M = ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (ก.)

C = ความเข้มข้นสมดุลของตัวดูดซับ (มก./ล.)

K_F = ค่าคงที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ (มก./ล.)

$1/n$ = ค่าคงที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย

(concentration dependence)

สมการฟรอนด์ลิช เมื่อเขียนกราฟค่า X/M และ C จากการทดลองลงบนกราฟ Log-Log จะได้ดังสมการ

$$\log\left(\frac{X}{M}\right) = \log K_F + \frac{1}{n} \log C$$

สามารถหาค่า K และ $1/n$ ได้โดยที่

$1/n$ = ความชันของกราฟ

K_F = ค่า X/M ที่ค่า $C = 1$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log(x/m)$ หรือ $\log q_c$ กับ $\log C_c$ จะได้เส้นตรงซึ่งมีความชันเท่ากับ $1/n$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $\log K_F$ เมื่อ $\log C_c = 0$ ($C_c = 1$) หากค่า K_F และ $1/n$ มีค่าต่ำ ความสามารถในการดูดซับจะต่ำในทุกค่าความเข้มข้น แต่ถ้า $1/n$ แสดงว่า ความสามารถในการดูดซับนี้จะขึ้นกับความเข้มข้น เช่น หากความเข้มข้นต่ำ ความสามารถในการดูดซับจะลดลงอย่างรวดเร็ว และในทางตรงกันข้าม เมื่อความเข้มข้นสูงความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นอย่างมาก

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

1. ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ
2. ลักษณะของสารถูกดูดซับ (Nature of Adsorbate)
3. ความปั่นป่วน (Mixing Speed)
4. เวลาสัมผัส (Contact Time)
5. ค่าพีเอช (pH)
6. อุณหภูมิ (Temperature) (ชฎาภรณ์ บุญแท้, 2545)

2.2.2 การแบ่งแยก (Partitioning)

เป็นการจับบนผิวของสารอินทรีย์คาร์บอนที่ปกคลุมสารปนเปื้อนบนพื้นผิวของแข็ง

ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก (Partition Coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกเป็นค่าคงที่ที่ต้องการอธิบายถึงสารเคมีที่ปนเปื้อนกระจายไประหว่างสองตัวกลาง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ที่สำคัญดังนี้

1. ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกน้ำกับออกทานอล (Octanol - Water Partition Coefficient, K_{ow})

$$K_{ow} = \frac{C_0}{C}$$

เมื่อ K_{ow} = ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกน้ำกับออกทานอล, ไม่มีหน่วย

C_0 = ค่าความเข้มข้นในออกทานอล, มก./ล หรือ $\mu\text{ก.}/\text{ล.}$

C = ค่าความเข้มข้นในน้ำ, มก./ล หรือ $\mu\text{ก.}/\text{ล.}$

ค่า K_{ow} ชี้บ่งว่าสารประกอบอินทรีย์จะแบ่งแยกระหว่างน้ำกับ อินทรีย์มากน้อยขนาดไหน ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า K_{ow} เมื่อค่า K_{ow} มีค่ามากแสดงว่าสารนั้นไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จะอยู่ในออกทานอลมากกว่า ซึ่งแสดงว่ามีแนวโน้มดูดซับกับอนุภาคต่างๆ ได้มากกว่าอยู่ในน้ำ ในขณะที่ K_{ow} มีค่าน้อยแสดงว่าสารนั้นชอบน้ำ (Hydrophilic) ละลายในน้ำได้มาก

2. ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายดิน (Soil Distribution Coefficient, K_d)

เมื่อสารปนเปื้อนถูกกระจายลงไปในพื้นดิน จะเกิดการแบ่งแยกดินกับน้ำที่ไหลในใต้ชั้นดิน มีการจับสารปนเปื้อนด้วยดิน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกน้ำกับดิน (Soil Water Partition Coefficient, K_p) ในตำราหลายๆเล่มได้พิจารณาเปรียบเทียบค่า K_p และค่า K_d พบว่าทั้งสองค่านี้ไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงขอใช้ค่า K_d ในการวิเคราะห์การดูดซับสารปนเปื้อนด้วยดินดังกล่าว

$$K_d = \frac{C_s}{C_e}$$

- เมื่อ K_d = ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายดิน, มก./ก.
 C_s = มวลของสารปนเปื้อนที่ถูกจับต่อมวลของตัวจับ, มก./ก.
 C_e = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่อยู่ในสารละลาย, มก./มล.

3. ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับดิน หรือค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกสารอินทรีย์คาร์บอน (Soil Adsorption Coefficient หรือ Organic Carbon Partition Coefficient, K_{oc})

จากค่า K_d จะพบว่าสารอินทรีย์คาร์บอนที่อยู่ในดินจะเป็นสารหลักในการดูดซับสารปนเปื้อน จึงนำค่า K_{oc} มาใช้ในการคำนวณแทนค่า K_d ได้ (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2546)

$$K_{oc} = \frac{C_c}{C_e}$$

- เมื่อ K_{oc} = ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับดิน, มล./ก.
 C_c = มวลของสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับในอินทรีย์คาร์บอนของดิน, มก./ก.
 C_e = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่อยู่ในสารละลาย, มก./มล.

การซึบด้วยดิน

การซึบสารปนเปื้อนในชั้นดินด้วยผิวดินจะเกิดขึ้นด้วยการเคลื่อนที่ลงใต้ชั้นดิน จะเกิดปฏิกิริยาเคมีและกายภาพ และจะเกิดปฏิกิริยาชีวภาพ จากค่า K_d นี้จะสามารถบ่งชี้ถึงความสามารถซึบสารปนเปื้อนด้วยดิน (Soil Sorptivity) ดินจะซึบสารปนเปื้อนได้มากน้อยเพียงใด ขึ้นกับปัจจัยดังนี้

1. การกระจายขนาดอนุภาคของดิน
2. ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในดิน
3. พื้นที่ผิวของดิน
4. ดินจะดูดซับสารปนเปื้อนที่ไม่ชอบน้ำได้ดี
5. พีเอช
6. ปริมาณเหล็กออกไซด์ในดิน
7. ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติเลือกของตัวดูดซับโลหะต่างๆ (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2546)

ตัวดูดซับ	ลำดับคุณสมบัติเลือก
1. Ferrihydrite	Pb > Cu > Zn > Ni > Cd > Co > Sr > Mg
2. Goethite	Cu > Pb > Zn > Co > Cd
3. Hematite	Pb > Cu > Zn > Co > Ni
4. Illite (Na)	Pb > Cu > Zn > Ca > Cd > Mg
5. Kaolinite (Na)	Pb > Ca > Cu > Mg > Zn > Cd > Ni
6. Montmorillonite (Na)	Ca > Pb > Cu > Mg > Cd > Zn > Ni

จากตารางที่ 2.7 ทำให้ทราบว่าดินเหนียวทั้ง Illite, Kaolinite และ Montmorillonite มีคุณสมบัติเลือกในการดูดซับตะกั่วได้ดี

จากงานวิจัยที่ผ่านมา การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับเป็นวิธีการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสียอย่างกว้างขวาง แต่มีข้อจำกัด เช่น ถ่านกัมมันต์ไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมัน (Oil and grease) สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural organic matter) และสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่อื่นๆ เนื่องมาจากโมเลกุลขนาดใหญ่ไปทำให้รูพรุนของถ่านกัมมันต์อุดตัน ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง (Beall, 2003) การใช้ออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) สามารถกำจัดน้ำมันและไขมันได้มากกว่า (Alther, 1995) และเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์และออร์กาโนเคลย์ ออร์กาโนเคลย์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนในช่วงที่กว้างกว่า นั่นคือออร์กาโนเคลย์มีความเหมาะสมในการบำบัดน้ำและสารปนเปื้อนอินทรีย์ต่างๆ ที่มีความเข้มข้นสูงได้ (Zhu และคณะ, 2007)

2.3 ออร์กาโนเคลย์ (Organoclay)

2.3.1 ดินเหนียวและแร่ดินเหนียว (Clay and Clay mineral)

ดินเหนียว (Clay)

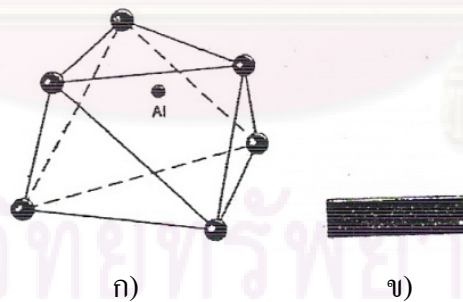
ดินเหนียวหรือดินโคลนมีขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอน และมีคุณสมบัติทางด้านประจุไฟฟ้าเคมี (Electrochemically Very Active) ซึ่งจะมีปฏิกิริยามากขึ้นเมื่อมีขนาดเล็กลง (สถาพร คูวิจิตรจารุ, 2542) ดินเหนียวประกอบด้วยแร่ธาตุหลายชนิดขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดองค์ประกอบที่สำคัญในดินได้แก่ สารอินทรีย์ (Organic matters) สารอนินทรีย์ (Inorganic matters) และความชื้น (น้ำ) (รัตนวรรณ มกรพันธุ์, 2551)

แร่ดินเหนียว (Clay minerals)

แร่ธาตุหรือแร่ดินเหนียว (Clay minerals) นั้นเป็นแร่ทุติยภูมิซึ่งเกิดจากการผุพังของหิน โดยทั่วไปอนุภาคมีขนาดเล็กมากระดับไมครอน แร่ดินเหนียวหลักประกอบด้วยไฮดรอลูมินัมซิลิเกต (Hydrous Aluminum Silicate) และหรือเหล็ก (Iron) และแมกนีเซียม (Magnesium) กับรูปแบบแร่ธาตุต่าง (Alkaline Minerals) เป็นส่วนประกอบหลัก แร่ธาตุเหล่านี้จะไม่ละลายในกรด (Acid) มีลักษณะซึมน้ำได้ดี ยืดหยุ่น (Elastic) เมื่อเปียก และยึดนํ้าได้ดี (Water Retentive) มีความเชื่อแน่น (Coherent) เมื่อแห้งรูปลักษณะแร่ธาตุส่วนใหญ่เป็นผลึก (Crystalline) เป็นแผ่น (Sheetlike) หรือเป็นโครงสร้างเรียงชั้น (Layer) ของแร่ 2 ชนิด: แผ่นซิลิกา (Silica Sheet) และแผ่นอะลูมินา (Alumina Sheet) ในระหว่างชั้นจะมีไอออนบวกของธาตุโลหะ เช่น โซเดียม แคลเซียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และเหล็กแทรกอยู่ ทำให้ดินแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน

แผ่นซิลิกา (Silica Sheet) เป็นรูปสี่เหลี่ยม (Tetrahedron) ประกอบด้วยจากระนาบสามเหลี่ยม 4 ด้าน มีอะตอมออกซิเจน (Oxygen Atom) อยู่ที่จุดระยะห่างเท่ากัน และอะตอมซิลิกา (Silica Atom) อยู่ภายในมีระยะห่างจากอะตอม ออกซิเจนเท่ากันหน่วยแผ่นซิลิกาแสดงดังภาพที่ 3.5 แผ่นซิลิกาแต่ละหน่วยจะรวมซ้อนกันเป็นรูปหกเหลี่ยม (Hexagonal Unit) และเป็นโครงผลึกของแร่ (Lattice of Mineral)

แผ่นอะลูมินา (Alumina) เป็นแถวเรียงสอง แสดงดังภาพที่ 3.6 โดยมีอะตอมของอลูมินาอยู่ตรงกลางรูปแปดเหลี่ยม (Octahedron) ซึ่งมีอะตอมของออกซิเจนไฮดรอกซิล (Oxygen Atom Hydroxyl, OH) ในแนวตั้งในแถวสลับกันตามลำดับ



ภาพที่ 2.2 ก) หน่วยแผ่นซิลิการูปสี่เหลี่ยม (Silica Tetrahedron)

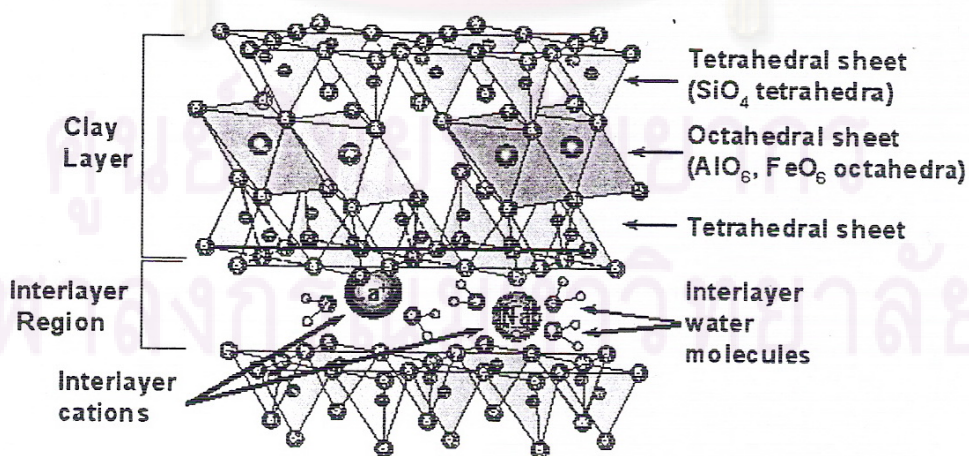
ข) สัญลักษณ์เทียบเท่า (สถาพร คุวิจิตรตารุ, 2542)

ดินเบนโทไนต์ (Bentonite)

ดินเบนโทไนต์เป็นดินชนิดหนึ่งที่มีการนำมาใช้ในงานหลายๆด้าน เช่น การใช้เป็นสารหล่อเย็นในการขุดเจาะสำหรับงานโยธา การใช้เป็นสารฟอกสี หรือใช้เป็นสารตัวเติมในการเพิ่มปริมาณเนื้อสาร ดินชนิดนี้ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวชนิดมอนต์มอริลโลไนต์เป็นองค์ประกอบหลักและรองลงมาได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ เหล็กออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ มอนต์มอริลโลไนต์ ทำให้ดินเบนโทไนต์มีสมบัติในการดูดซับที่ดี และสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ อย่างไรก็ตามสมบัติของดินก็ยังแตกต่างกันไปในเรื่องของความสามารถในการดูดซับ และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์ (อัญชลี สุทธิประการ, 2534)

แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินในกลุ่มสมεκไทต์ (Smectite) และมีโครงสร้างซ้อนทับกัน ประกอบด้วยแผ่นซิลิกาสองแผ่นและอลูมินาหนึ่งแผ่นสอดอยู่ระหว่างแผ่นซิลิกา โครงสร้างซ้อนกันเป็นชั้นๆ ชนิด 2:1 เหมือนกลุ่มอิลไลท์ (Illite) และเกาะยึดออกซิเจนร่วมกันผลึกจะเชื่อมต่อกันในแนวระดับเป็นชั้นๆ และมักมีไอออนของโซเดียม แคลเซียมอยู่ด้วยในระหว่างชั้นโครงสร้างโดยจะทำหน้าที่ยึดชั้นของดินที่มีประจุลบเอาไว้ด้วยกันจึงทำให้ชั้นของดินยึดติดแน่น คุณสมบัติคือสามารถขยายตัวได้เนื่องจากไม่มีพันธะไฮโดรเจนทำให้ประจุบวกต่างๆ สามารถเข้าแทรกในระหว่างชั้นโครงสร้างได้ง่าย อนุภาคชนิดนี้จึงมีความสามารถในการดูดซับสูง และเกิดการแตกสลายของผลึกได้ง่ายทำให้อนุภาคที่พบมีขนาดเล็ก ช่องว่างระหว่างแผ่นที่ซ้อนทับกันมีความหนาแน่นน้อยที่สุดประมาณ 9.5 อังสตรอม ช่องว่างอาจจะขยายเพิ่มขึ้นได้ ดังภาพที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (วัลย์กร นิตยพัฒน์, 2547)

ชั้นโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จะมีประจุลบและสามารถดึงดูดไอออนที่มีประจุบวกได้ ซึ่งประจุลบของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เกิดจากการแทนที่ของประจุโดย Al^{+3} ถูกแทนที่ด้วยประจุ Mg^{+2} ในแผ่นออลูมินาทำให้ดินเหนียวชนิดนี้แสดงประจุเป็นลบเนื่องจาก Mg^{+2} มีวาเลนซ์ต่ำกว่า Al^{+3} ประจุลบจึงตกค้าง เมื่อการถูกแทนที่เกิดขึ้นมากๆ ประจุลบจะมีอำนาจสูงพอที่จะยึดไอออนบวกได้ และ Al^{+3} สามารถเข้าไปแทนที่ Si^{+4} ได้จึงทำให้ประจุโดยรวมเป็นลบเช่นกันการจัดเรียงตัวของแผ่นซิลิกาจะขึ้นอยู่กับประจุบวกที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโล ในธรรมชาติพบว่าประจุบวกส่วนใหญ่ที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์คือ โซเดียม และแคลเซียม

จากโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง มีความสามารถในการพองตัวในน้ำได้ดีทำให้ขยายตัวได้มาก จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ แต่โดยธรรมชาติแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มีสมบัติชอบน้ำ (Chirandom, 2547 และ Homnium, 2549)

2.3.2 การแลกเปลี่ยนไอออนของดิน (Cation exchange)

ดินเหนียวเมื่ออยู่ในดินตามธรรมชาติจะดูดยึดไอออนที่มีประจุบวกไว้เต็มไปหมด ส่วนชนิดของแคตไอออนที่ดูดยึดอยู่นั้นสำหรับดินในแถบร้อนและชุ่มชื้น จะมีมากน้อยลดหลั่นกันลงไปดังนี้ คือ $H^+ (Al^{3+}) > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$ แคตไอออนต่าง ๆ เหล่านี้จะไม่ดูดยึดติดแน่นอยู่กับพื้นผิวของดินเหนียวแต่จะโคจรอยู่ในระยะใกล้ชิดกับผิวภายใต้อำนาจการดึงดูดซึ่งกันและกัน ดังนั้นการชะล้างด้วยน้ำจึงไม่อาจที่จะชะเอาแคตไอออนพวกนี้ออกไปได้ เราเรียกแคตไอออนพวกนี้ว่าเป็น แคตไอออนดูดซับ (Adsorbed cation) แต่อย่างไรก็ตามแคตไอออนพวกนี้สามารถที่จะถูกไล่ออกไปโดยแคตไอออนอื่น ๆ ได้โดยง่าย

การดูดซับแคตไอออนดูดซับ (Adsorbed cations) สามารถถูกไล่ที่หรือแทนที่โดยแคตไอออนอื่น ๆ ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุบวก บางครั้งเราสามารถเรียกแคตไอออนดูดซับนี้อีกอย่างหนึ่งว่า แคตไอออนแลกเปลี่ยน (Exchangeable cation) ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในการแลกเปลี่ยนประจุ คือ



X^+ : ประจุของดิน

Y^+ : ประจุที่ทำการเติมลงในสารละลาย

ปฏิกริยาจะเกิดขึ้นจากซ้ายไปขวา ซึ่งจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของประจุของ X^+ และ Y^+ ปฏิกริยาจะเคลื่อนที่ไปด้านขวาโดยการเติมประจุ Y

2.3.2.1 ปัจจัยที่ควบคุมการแลกเปลี่ยนไอออนบวกในดิน

การแลกเปลี่ยนระหว่างแคตไอออนที่ดูดซับอยู่ที่ผิวอนุภาคดินเหนียวและแคตไอออนที่อยู่ภายนอกนั้น เกิดขึ้นได้ง่ายและยากแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ หลายอย่าง ปัจจัยที่สำคัญที่จะกล่าวไว้ที่นี้คือ

1. ชนิดของแคตไอออนดูดซับและแคตไอออนเข้าแทนที่ (Adsorbed cation and Replacing cation) แคตไอออนต่างชนิดกันจะดูดซับอยู่ที่ผิวอนุภาคดินเหนียวและถูกไล่ที่ออกจากดินเหนียวและถูกไล่ที่ออกจากดินเหนียวโดยแคตไอออนอื่น ๆ ได้ยากและง่ายแตกต่างกันออกไป บางชนิดดูดซับอยู่ที่ผิวดินเหนียวได้เพียงหลวม ๆ และถูกแทนที่ได้ง่าย บางชนิดดูดซับอยู่ที่ผิวดินเหนียวค่อนข้างเหนียวแน่นและถูกแทนที่ได้ยาก ได้มีผู้ศึกษาเกี่ยวกับอำนาจในการไล่ที่และความเกี่ยวแน่นในการดูดซับของแคตไอออนที่ผิวเหนียวนั้น ปรากฏว่าแคตไอออนต่าง ๆ มีอำนาจการเข้าแทนที่ (Replacing power) แตกต่างลดหลั่นกันลงไปดังนี้ คือ $Li^+ < Na^+ < K^+ < Ca^{+2} < NH^+ < Al^{+3} < (H^+)$ นั่นคือ Na^+ สามารถไล่ที่ Li^+ ได้ง่ายกว่าที่ Li^+ จะไล่ที่ Na^+ หรืออาจจะกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งก็คือ Na^+ จะดูดซับอยู่ที่ผิวดินเหนียวได้แน่นกว่า Li^+ แต่จะเหนียวแน่นน้อยกว่า K^+, Ca^{+2} ฯลฯ ตามลำดับ

2. ความเข้มข้นของแคตไอออนเข้าแทนที่ (Replacing cation) โดยปกติถ้าปริมาณของประจุที่เข้าแทนที่ (Replacing cation) มีมากก็ทำให้การไล่ที่แคตไอออนที่อยู่ที่ผิวดินเหนียวง่ายขึ้น ซึ่งเป็นหลักของ Mass action ถึงแม้ว่า Na^+ จะมีอำนาจการไล่ที่ Ca^{+2} น้อยกว่าที่ Ca^{+2} จะไล่ที่ Na^+ แต่ถ้ามี Na^+ เป็นจำนวนมาก ๆ ก็สามารรถที่จะไล่ที่ Ca^{+2} ออกไปให้หมดจากผิวของดินได้

3. ปริมาณการอิ่มตัว (Degree of saturation) ปริมาณของการอิ่มตัวของแคตไอออนบางชนิดที่ดูดซับอยู่ที่ผิวดินเหนียวจะมีอิทธิพลต่อความยากง่ายที่แคตไอออนนั้นจะถูกไล่ที่ออกมาเป็นอย่างมาก ยกตัวอย่างเช่นแคลเซียมแลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable calcium) ที่ผิวดินเหนียวยิ่งเหลือน้อยเท่าใดความยากที่จะไล่ที่ Ca^{+2} ออกไปจากผิวดินเหนียวให้หมดก็ยิ่งยากขึ้นเท่านั้น แต่ในทางตรงกันข้ามโซเดียมแลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable sodium) ยิ่งเหลือน้อยอยู่บนผิวดินเหนียวเท่าใดก็ยิ่งง่ายต่อการที่จะถูกไล่ที่ออกไปมากขึ้นเท่านั้น ส่วนแคตไอออนบางชนิด เช่น K^+ และ Mg^{+2} นั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับ Degree of saturation เป็นต้น

4. แคตไอออนอื่นที่อยู่ร่วมด้วยบนผิวของดินเหนียว (Complementary exchangeable cations) บางครั้งแคตไอออนอื่น ๆ ที่ดูดซับอยู่บนผิวดินเหนียวร่วมกับแคตไอออนที่ต้องการไล่ที่นั้นก็มีบทบาทสำคัญเหมือนกัน เช่น โพแทสเซียมแลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable K^+) จะถูกไล่ที่ออกมาได้ง่ายขึ้น เมื่ออยู่ร่วมกับอะลูมิเนียมแลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable Al^{+3}) หรือ H^+ แต่จะถูกไล่ที่ได้ยากขึ้นเมื่ออยู่ร่วมกับแคลเซียมแลกเปลี่ยนได้

2.3.2.2 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (Cation exchange capacity, CEC)

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ หรือความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดินหรือคอลลอยด์นั้นหมายถึง “ปริมาณประจุบวกทั้งหมดที่ดินหรือคอลลอยด์นั้นสามารถจะดูดซับไว้ได้” โดยการบอกเป็นจำนวน มิลลิอิกวาเลนต์ต่อดินเหนียว 100 กรัม (Meq/100กรัม) ดังนั้นค่า CEC ของดินเหนียวหรือดินจึงบอกกันเป็นค่าของ Meq/100 กรัมของดินเหนียวนั้น ๆ CEC จะมากหรือน้อยและจะแตกต่างกันไปจาก CEC ของดินอื่น ๆ นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

1. ชนิดของคอลลอยด์ (Soil colloid) ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของคอลลอยด์ดินที่ต่างชนิดกันจะแตกต่างกันเป็นอย่างมาก ยกตัวอย่างเช่น ฮิวมัส มอนต์มอริลโลไนต์, อิลไลต์, เกาลินไนท์ และ ไฮดร็อกซีออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม โดยเฉลี่ยแล้วจะมีค่าแตกต่างกันตามลำดับดังนี้ 200 100 30 8 และ 4 Meq/100g ดังนั้นที่มีฮิวมัสมากหรือมีพวกมอนต์มอริลโลไนต์เป็นองค์ประกอบอยู่มากก็จะทำให้ CEC ของดินนั้นสูงชันกว่าดินอีกชนิดหนึ่งซึ่งมีปริมาณดินเหนียวทั้งหมดเท่ากัน แต่ส่วนใหญ่ประกอบด้วยเกาลินไนท์และไฮดร็อกซีออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม

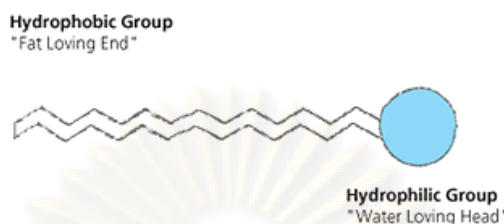
2. ปริมาณของดินเหนียวที่มีอยู่ในดิน ดินที่มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวสูงย่อมจะมี CEC สูงกว่าดินที่มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวที่น้อยกว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้ความสังเกตจากเนื้อดินเป็นหลักเกณฑ์บอกได้อย่างคร่าว ๆ ว่าดินไหนมี CEC มากน้อยกว่ากัน ถ้าดินนั้นมีเนื้อละเอียดโอกาสที่จะมี CEC สูงกว่าดินที่มีเนื้อหยาบกว่าก็จะมีมาก ดังนั้นจึงสามารถที่จะประเมิน CEC ของดินโดยคร่าว ๆ ได้จากปริมาณดินเหนียว นั่นคือ ทุก ๆ หนึ่งเปอร์เซ็นต์ของดินเหนียวจะให้ CEC แก่ดินประมาณ 0.5 Meq/100g เช่นถ้าดินมีดินเหนียว 30% CEC ของดินนั้นจะประมาณเท่ากับ 15 Meq/100g

3. ปริมาณของอินทรีย์วัตถุในดิน เนื่องจากฮิวมัสมี CEC สูงมาก ดังนั้นที่มีเปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุสูงก็จะมี CEC สูงไปด้วย โดยทั่วไปก็อาจประเมิน CEC ที่เนื่องมาจากอินทรีย์วัตถุได้โดยทุก ๆ หนึ่งเปอร์เซ็นต์ของอินทรีย์วัตถุที่มีอยู่ในดิน (Well humified organic matter) จะทำให้ CEC แก่ดินเป็นจำนวน 2 Meq/100 กรัม

2.3.3 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant)

สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เป็นสารที่เมื่อละลายน้ำแล้วจะช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำ คำว่า Surfactant มาจากคำว่า Surface active agent มีลักษณะที่สำคัญ 2 ส่วนได้แก่ ส่วนหัว (Polar head) มีขั้วเป็นส่วนที่ชอบน้ำหรือไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) คือสามารถละลายในสารที่มีขั้ว (เช่น น้ำ) ได้ และส่วนหาง (Tail) เป็นส่วนที่ไม่มีขั้วละลายในน้ำไม่ได้ ไม่ชอบน้ำแต่ชอบน้ำมัน (Hydrophobic) แสดงดังภาพที่ 2.7 โดยหลักการทำงานของสารลดแรงตึงผิวคือ ส่วนที่ชอบน้ำ และ

ส่วนที่ชอบน้ำมันจะทำการจับสิ่งสกปรกพวกไขมันที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ ทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกไปแล้วแวนลอยอยู่ในน้ำ



ภาพที่ 2.5 ลักษณะรูปร่างของสารลดแรงตึงผิว (Gamble และ Proter, 2005)

สารลดแรงตึงผิวแบ่งออกเป็นหลายกลุ่ม ขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าบนส่วนประกอบที่ละลายน้ำโดยสามารถแยกออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

1. สารลดแรงตึงผิวประจุลบ (Anionic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุไฟฟ้าบนไฮโดรฟิลิกให้ประจุลบ ส่วนมากแสดงอยู่ในรูปคาร์บอกซิเลต (Carboxylate), ซัลเฟต (Sulfate), ซัลโฟเนต (Sulfonate) หรือฟอสเฟต (Phosphate) เช่น Sodium dodecyl sulfate (SDS)

2. สารลดแรงตึงผิวประจุบวก (Cationic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุไฟฟ้าบนไฮโดรฟิลิกให้ประจุบวกส่วนมากมักจะเป็นพวก ควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (Quaternary ammonium) เช่น Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้ จะไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นด่างสูง (pH10-11) เนื่องจากเกลือแอมโมเนียมจะมีการสูญเสียประจุบวกทำให้เกิดเป็นตะกอนแอมโมเนีย

3. สารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ (Nonionic surfactant)

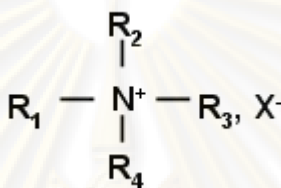
สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้จะต่างจากสารลดแรงตึงผิวประเภทประจุลบ และประจุบวกตรงที่เป็นโมเลกุลที่ไม่มีประจุ โดยมีพวกพอลิเอเทอร์ (Polyether) หรือพอลิไฮดรอกซิล (Polyhydroxyl) เป็นกลุ่มที่แสดงควมมีขั้วของโมเลกุลที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลน้ำ เช่น TritonX100

4. สารลดแรงตึงผิวประจุบวกและลบ (Amphoteric surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบนไฮโดรฟิลิก สามารถให้ได้ทั้งประจุบวกและลบ โดยจะแสดงคุณสมบัติประเภทใดขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรด-ด่างของสภาวะแวดล้อม ถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นด่างประจุไฟฟ้าบนไฮโดรฟิลิกจะให้ประจุลบ ถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นกรดประจุไฟฟ้าบนไฮโดรฟิลิกจะให้ประจุบวก ถ้าสภาวะที่เป็นกลางจะไม่เกิดการให้ประจุไฟฟ้าบนไฮโดรฟิลิก (Suratchana, 2006; ชนัญญ์ อยู่ชัย, 2550; ทรรศพร พิศรูป, 2548)

ควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน (Quaternary Ammonium Cations, QACs)

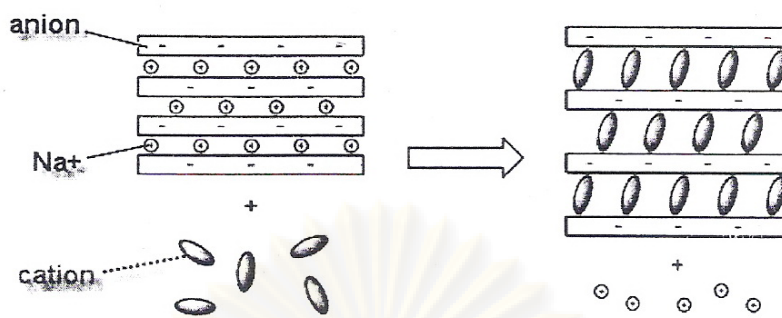
ควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน หรือ เกลือควอเทอร์นารีของอัลคิลแอมโมเนียมแคต (Quaternary Ammonium Cations หรือ Quaternary Ammonium Salt, QACs) เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant) หรือสารอินทรีย์ที่มีประจุบวก (Organic cation) ประกอบด้วย Quats (NR_4^+) คือไอออนบวก และไอออนลบ ลักษณะทั่วไปของ QACs คือ $([\text{CH}_3]_3\text{NR})^+$ หรือ $([\text{CH}_3]_2\text{NR}_2)^+$ เมื่อ R คือ แอโรแมติก (Aromatic) หรือ สายโซ่อัลคิล (Alkyl Hydrocarbon) ดังภาพที่ 2.8 นอกจากนี้ QACs มีประจุที่ไม่เปลี่ยนแปลงและไม่ขึ้นกับพีเอชของสารละลาย และสังเคราะห์โดยวิธีการอัลคิเลชัน (Alkylation) แอมโมเนียหรือเอมีน



ภาพที่ 2.6 ควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน (FeF Chemicals, 2008)

2.3.4 ออร์กาโนเคลย์ (Organoclay)

ออร์กาโนเคลย์ ออร์กาโนฟิลลิกเคลย์ หรือ โมดิไฟด์เคลย์ (Organoclay, Organophilic clays or Modified clay) เป็นคำที่เรียกกลุ่มแร่ดินเหนียวที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว โดยการนำกลุ่มแร่ดินเหนียวกลุ่มสมคไคต์ (กลุ่มแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์) ซึ่งในธรรมชาติจะแสดงพื้นผิวเป็นประจุลบและมีประจุบวกของสารอนินทรีย์ เช่น Na^+ Mg^{+2} และ Ca^{+2} เกาะที่พื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ซึ่งสารเหล่านี้เป็นสารที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ทำให้ลักษณะพื้นผิวแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ แสดงลักษณะชอบน้ำ และแร่ดินเหนียวกลุ่มสมคไคต์นี้มีสมบัติพิเศษคือสามารถแสดงการขยายตัว (Expandability) ได้สูงเมื่อน้ำหรือโมเลกุลของสารอินทรีย์เข้าไปในโครงสร้าง และมีสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออน (Cations exchange) ได้ดี เพื่อเพิ่มประโยชน์การใช้งานของแร่ดิน ให้หลากหลายและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น จึงนำมาปรับสภาพโดยการเติมสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์จำพวก ควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน ลงไปในแร่ดินเหนียว ทำให้จากแร่ดินเหนียวซึ่งมีความเป็นขี้หรือชอบน้ำ (Hydrophilic) ถูกเปลี่ยนให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำหรือเป็นดินที่ชอบสารอินทรีย์แทน (Organophilic)



ภาพที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติด้วย QACs
(ทรรศพร พิศรูป, 2548)

ปัจจุบันออร์กาโนเคลย์ได้รับความสนใจและนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เช่น ในงานบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ ใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อปรับความหนืดในอุตสาหกรรมสี หมึกพิมพ์ จาระบี บำบัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในดิน น้ำใต้ดิน และใช้เป็นชั้นกันซึมในหลุมฝังกลบขยะ เป็นต้น (Bartelt-Hunt และคณะ 2003; Upson และ Burns, 2006; Yildiz และคณะ, 2005)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1. ปัจจัยที่มีผลต่อการจับ (Sorption) สารประกอบอินทรีย์จากน้ำเสียโดยออร์กาโนเคลย์

จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการศึกษากลไกการจับของสารประกอบอินทรีย์ออกจากน้ำเสียหลายฉบับ ซึ่งพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการจับ ได้แก่ โครงสร้างโมเลกุลของควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออนและสารปนเปื้อนอินทรีย์ที่เป็นตัวถูกดูดซับ ปริมาณของควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน ลักษณะทางเคมีของสารปนเปื้อนอินทรีย์ที่เป็นตัวถูกดูดซับ ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ของดินเหนียว พิเศษของน้ำเสีย

Zhu และคณะ (1997) ได้ศึกษาเตรียมออร์กาโนเคลย์ โดยใช้ QACs 3 ชนิด คือ Octadecyltrimethylammonium bromide (OTMAB), Cetyltrimethylammonium bromide (CTMAB) และ Dodecyltrimethylammonium bromide (DTMAB หรือ DTAB) ซึ่งแต่ละชนิดมีคาร์บอนอะตอมที่สายโซ่อัลคิลต่างๆ กัน คือ 18 16 12 คาร์บอนตามลำดับ โดยทำการดูดซับ แนฟทิลแอมีน (Naphthylamine) แนฟทอล (Naphthol) ไนโตรเบนซีน (Nitrobenzene) และ

แอนนิลีน (Aniline) จากการศึกษาพบว่า เปอร์เซ็นในการกำจัดสารปนเปื้อนอินทรีย์ของ OTMAB-bentonite มากที่สุด รองมาคือ CTMAB-bentonite และ DTMAB-bentonite ตามลำดับ OTMAB ที่มีสายโซ่อัลคิลยาวที่สุดมีความสามารถในการจับสูงที่สุด ดังนั้นความยาวของสายโซ่อัลคิลของ QACs ที่แลกเปลี่ยนประจุบนเบนโทไนต์มีผลต่อการจับ

Pal และ Vanjara (2001) ได้ศึกษาการจับยาฆ่าแมลง ได้แก่ มาลาไธออน (Malathion) และ บิวทาคลอร์ (Butachlor) โดยเตรียมออร์กาโนเคลย์จากแร่ดินเหนียวต่างชนิดกัน ได้แก่ เลโอลิน (Kaoline) มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) และเบนโทไนต์ ด้วย QACs 3 ชนิด ได้แก่ Tetradecyltrimethylammonium bromide (TTAB) Dodecyltrimethylammonium bromide (DTAB) และ Cetylpyridinium Chloride (CPC) จากการศึกษาพบว่า ความสามารถในการจับของ TTA-bentonite มากที่สุด รองมาคือ TTA-montmorillonite และ TTA-Kaolin ตามลำดับ จากนั้นศึกษาความสามารถในการจับด้วยออร์กาโนมอนมอริลโลไนต์ ชนิดต่างๆ ผลการศึกษาพบว่า CP(C₁₆)-montmorillonite มีความสามารถในการจับมากที่สุด รองมาคือ TTA(C₁₄)-montmorillonite และ DTA(C₁₂)-montmorillonite ตามลำดับ และการจับ บิวทาคลอร์มากกว่าแมลาไธออน เนื่องจากบิวทาคลอร์มีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) มากกว่า มาลาไธออน สายโซ่อัลคิลที่มีความยาวจะจับกันอย่างหนาแน่น ทำให้ความสามารถในการจับของ ออร์กาโนเคลย์เพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยข้างต้นของ Zhu และคณะ ในปี 1997 และ Pal และ Vanjara ในปี 2001 สรุปได้ว่า โครงสร้างโมเลกุลของ QACs ที่ใช้เตรียมออร์กาโนเคลย์มีผลต่อการจับ

Zhu และคณะ (1998) ได้ศึกษาการดูดซับสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนจากน้ำ ได้แก่ เบนซีน โทลูอีน เอทิลเบนซีน ไนโตรเบนซีน อะนิลีน ฟีนอล ไนโตรฟีนอล ด้วย Cetyltrimethylammonium bromide (CTMAB)-เบนโทไนต์ ผลการทดลองพบว่า การจับของสารปนเปื้อนอินทรีย์จากน้ำ ขึ้นกับลักษณะทางเคมีของสารปนเปื้อนอินทรีย์ เช่น ความมีขั้วและค่าสัมประสิทธิ์ การแบ่งแยกน้ำกับออกทานอล (K_{ow}) โดยที่สารอินทรีย์ที่มีความมีขั้วต่ำ หรือ K_{ow} สูง เกิดกลไกการแบ่งแยกในการจับ

Groisman และคณะ (2004) ศึกษาการดูดซับของยาฆ่าแมลง 6 ชนิด และสารพอลิไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAH) ที่มีค่า log K_{ow} อยู่ในช่วง 2.5-6.0 โดย Tetramethylammonium-bentonite (TMA-bentonite) และ Octadecyltrimethylammonium-bentonite (ODTMA-bentonite) ซึ่งเป็นออร์กาโนเคลย์ที่เตรียมจาก QACs ที่มีสายโซ่อัลคิลที่ยาวและสั้นตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า TMA-bentonite ดูดซับ

สารประกอบที่มีความชอบน้ำน้อยหรือมีค่า $\log K_{ow}$ อยู่ในช่วง 2.5-3.8 ได้มากกว่า ODTMA-bentonite ในขณะที่ ODTMA-bentonite สามารถดูดซับสารที่ชอบน้ำหรือมีค่า $\log K_{ow}$ ในช่วง 5.2-6.1 ได้มาก

จากงานวิจัย Zhu และคณะ (1998) และงานวิจัยของ Groisman และคณะ (2004) ข้างต้นสรุปได้ว่า ลักษณะทางเคมีของสารปนเปื้อนอินทรีย์ (ตัวถูกดูดซับ) มีผลต่อการจับ

Koh และ Dixon (2001) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับของออร์กาโนเคลย์ ที่ดูดซับสารปนเปื้อนอินทรีย์ที่ไม่แตกตัวเป็นประจุ (Nonionic organic contaminants, NOCs) เช่น เบนซีน ฟีนอล และโทลูอีน จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการดูดซับของ QACs บนผิวแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์สูงที่สุด รองมาคือ ซีโอไลต์ ซิลิไซด์ ตามลำดับ และผลการดูดซับ NOCs ด้วยออร์กาโนเคลย์ พบว่า ออร์กาโน – มอนต์มอริลโลไนต์ สามารถดูดซับ NOCs มากที่สุด รองมาคือ ออร์กาโน – ซีโอไลต์ และ ออร์กาโน – ซิลิไซด์ ตามลำดับ

Shen (2004) ได้ศึกษาผลต่อลักษณะประจุบนดินเหนียวในการจับฟีนอล โดยเตรียมออร์กาโนเคลย์จากควอเตอร์นารีแอม โมนีียมแคตไอออน 2 ชนิด คือ BTMA และ HDTMA กับดินสเมคไทต์ 2 ชนิด ที่มีค่า CEC ต่างกัน คือสเมคไทต์ที่มีประจุต่ำ (Low - charge smectite, LCS) มีค่า CEC 71 Meq/100 g และสเมคไทต์ที่มีประจุสูง (High - charge smectite, HCS) มีค่า CEC 107 Meq/100 g จากผลการศึกษาพบว่า ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของสารอินทรีย์ (Exchanged organic cations) ในแร่ดินเหนียวแต่ละชนิดมีผลต่อการจับซึ่งขึ้นอยู่กับขนาด และการจัดเรียงโมเลกุลของสารอินทรีย์ประจุบวกด้วย และสรุปได้ว่าในแร่ดินเหนียวที่มีประจุสูง (High-charge smectite) เหมาะสำหรับการเตรียมออร์กาโนเคลย์ด้วย QACs ที่มีสายโซ่อัลคิลยาว ในขณะที่แร่ดินเหนียวที่มีประจุต่ำ (Low-charge smectite) เหมาะสำหรับการเตรียมออร์กาโนเคลย์ด้วย QACs ที่มีสายโซ่อัลคิลขนาดเล็ก

จากงานวิจัยข้างต้นของ Koh และ Dixon (2001) และ Shen (2004) สรุปได้ว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของแร่ดินเหนียว หรือ CEC มีผลต่อการจับ

2.4.2. การศึกษาการจับฟีนอล

Lawrence และคณะ (1998) ได้ศึกษาการจับฟีนอล 2-คลอโรฟีนอล 3-คลอโรฟีนอล และ 4-คลอโรฟีนอล จากน้ำโดยใช้ควอเตอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน ได้แก่ Tetramethylammonium (TMA) และ Tetramethylphosphonium (TMP) และแร่ดินเหนียวประเภท สเมคไทต์เตรียมเป็นออร์กาโนเคลย์ ผลการศึกษาพบว่าออร์กาโนเคลย์ที่เตรียมจาก QAC ประเภท TMA (TMA-smectite) ไม่จับสารประกอบฟีนอลเลย TMP-smectite มีชั้นรูพรุนเล็กกว่า TMA-smectite อีกทั้งขนาด และรูปร่างของ TMP ไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกน้ำกับ ออกทานอลทำให้ TMP เป็นตัวจับที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด

Lo และ Mak (1998) ศึกษาการเคลื่อนย้ายสารประกอบฟีนอลผ่านชั้นกันซึม (Liner) ที่ผลิตโดยออร์กาโนเบนโทไนต์ (BB40) ของบริษัท Biomin International, Inc. ผลการทดสอบ พบว่ามีการเคลื่อนย้ายของสารประกอบฟีนอลผ่านชั้นกันซึมที่ทำจากออร์กาโนเคลย์ช้ากว่าวัสดุชั้นกันซึมที่ทำจากดิน (Conventional soil liner) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหมาะสำหรับกันสารอินทรีย์ ที่มีความไม่ชอบน้ำสูง

Yang และคณะ (2003) ได้ศึกษาการคืนสภาพ (Regeneration) ของ HDTMA-โมดิไฟด์มอนต์มอริลโลไนต์ (หรือออร์กาโนเคลย์ที่เตรียมจาก HDTMA) หลังจากที่ทำการศึกษาการดูดซับฟีนอล การทดลองการดูดซับฟีนอลพบว่า เมื่อความเข้มข้นที่สัดส่วนของค่า CEC เพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับฟีนอลเพิ่มขึ้นด้วย จากนั้นนำมาทำการคืนสภาพ ด้วยวิธีทางเคมี และทางชีววิทยาโดยใช้ ยีสต์ (*pityrosporum* sp.) ผลการทดลองพบว่า ที่ 0.3-0.7 เท่าของค่า CEC ของมอนต์มอริลโลไนต์ สามารถใช้วิธีการคืนสภาพโดยวิธีทางชีววิทยา (Bioregeneration) ด้วยยีสต์ได้ ซึ่งสามารถนำมาใช้กับการบำบัดสารปนเปื้อนใต้ดิน หรือปนเปื้อนในน้ำใต้ดินในพื้นที่ (In-situ bioremediation) ที่ปนเปื้อนฟีนอล หรือใช้บำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟีนอลได้

Shen (2002) ได้ศึกษาการดูดซับ-การกวนซ้ำ (Adsorption-Flocculation) สารประกอบอินทรีย์ในน้ำ (Nonionic Organic Compound, NOC) โดยใช้ออร์กาโนเคลย์ที่เตรียมจาก QACs ที่มีขนาดเล็ก หรือมีความยาวส่วนหางสั้น โดยเลือกฟีนอลเป็นตัวแทนสารอินทรีย์ปนเปื้อนในน้ำ ทำการทดลองแบบทีละเท และแบบการดูดซับ-การกวนซ้ำ ผลการศึกษาแบบทีละเทพบว่า ออร์กาโนเคลย์ที่เตรียมจาก QACs ประเภท Benzyltrimethylammonium bromide (BTMA) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นวงแหวน มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลดีที่สุด จากนั้นเลือกออร์กาโนเคลย์ที่มีสัดส่วน 75 % ของค่า CEC โดยเลือกจากความเหมาะสมด้านราคา และ

ประสิทธิภาพในการบำบัด ผลการทดลองการดูดซับ-การกวนช้า พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลเพิ่มขึ้นเมื่อค่าสัดส่วนจำนวนเท่าของค่า CEC ของดินเหนียวเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองแบบทีละเท

Rawajfih และ Nsour (2006) ศึกษาการจับฟีนอล *p*-chlorophenol และ 2,4-dichlorophenol โดยใช้โมดิไฟด์เบนโทไนด์ที่เตรียมจาก HDTMA ผลจากการศึกษาพบว่า การจับนั้นเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณคลอรีนเพิ่มขึ้น คือมีการจับฟีนอล $< p\text{-chlorophenol} < 2,4\text{-dichlorophenol}$ และเกิดกลไกการจับที่ความเข้มข้นสารปนเปื้อนต่างๆ ในขณะที่ความเข้มข้นสูงเกิดกลไกการแบ่งแยกผู้วิจัยได้กล่าวเสริมว่า ออร์กาโนเบนโทไนด์เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ ในการบำบัดสารปนเปื้อนอินทรีย์ที่มีช่วงความเข้มข้นกว้าง

Xu และ Zhu (2007) ศึกษาการจับฟีนอล และเตียมออร์กาโนเคลย์โดยใช้ QACs 2 ชนิด คือ Hexamethonium bromide (HM) และ Tetramethyl ammonium bromide (TMA) ที่มีสายโซ่ขนาดเล็ก (short alkyl chain) ผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการจับโดย HM-เบนโทไนด์ (ออร์กาโนเคลย์ที่เตรียมจาก HM) เพิ่มขึ้นที่ต่ำกว่า 0.4 ของค่า CEC แต่ความสามารถในการจับลดลงที่สัดส่วนที่สูงกว่า 0.4 เท่าของค่า CEC ผลการวิจัยสรุปว่า HM-เบนโทไนด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล และสารอินทรีย์ประจุบวกเพิ่มความชอบสารอินทรีย์ (Hydrophobic) มีผลในการกำจัดสารปนเปื้อนอินทรีย์ได้มากขึ้น

Ma และ Zhu (2007) ได้ทำการศึกษาการกำจัดฟีนอล *p*-nitrophenol และ β - naphthol กระบวนการแบบขั้นตอนเดียว (One-step process) โดยใช้เบนโทไนด์ QAC คือ Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTMAB) โดยปริมาณที่ใส่คิดเป็นสัดส่วน 100% ของค่า CEC ของเบนโทไนด์ และใส่/ไม่ใส่สารปนเปื้อนอินทรีย์ ในการทดลองแบบทีละเท จากนั้นทดลองการจับ-การกวนช้า (Sorption-flocculation experiment) และการตกตะกอน (Sedimentation) สรุปได้ว่า กระบวนการแบบขั้นตอนเดียวมีประสิทธิภาพดี ง่าย และประหยัด เหมาะในการบำบัดสารอินทรีย์ปนเปื้อนในอุตสาหกรรม

Zhu และคณะ (2007) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง โครงสร้างของผิวดินเหนียวและลักษณะการจับของเซตทริไลไตรเมทิลแอมโมเนียม แคตไอออน (CTMA⁺) เบนโทไนด์ โดยผันแปรค่า CTMA⁺ ตั้งแต่ 0.21-1.98 มิลลิโมลต่อกรัม ผลการทดลองพบว่า พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และ Surface fractal dimension ของออร์กาโนเบนโทไนด์ลดลงเมื่อปริมาณ CTMA⁺ เพิ่มขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์ การแบ่งแยกสารอินทรีย์คาร์บอน (K_{oc}) ของสารปนเปื้อนอินทรีย์เพิ่มขึ้น

จนกระทั่งมากที่สุดและลดลงในขณะที่เพิ่มปริมาณ CTMA⁺ ผู้วิจัยได้สรุปว่า โมเลกุลตัวถูกละลาย (Solute molecules) แทรกเข้าไปใน CTMA⁺ และเกิดกลไกการแบ่งแยกมากกว่าการดูดซับ

Froehner และคณะ (2009) ได้ศึกษาการดูดซับฟีนอลด้วยออร์กาโนเคลย์ที่เตรียมจาก QAC คือ hexadecyl trimethylammonium บนตัวกลางแร่ดินเหนียว 2 ชนิด คือ เบนโทไนต์ และ เวอร์มิคูไลต์ (Vermiculite) ผลการศึกษาพบว่า เปอเซนต์ในการกำจัด โมดิไฟด์เวอร์มิคูไลต์ เท่ากับ 35% ซึ่งมากกว่า โมดิไฟด์เบนโทไนต์ที่กำจัดได้ 30% จากผลการศึกษาสรุปได้ว่า การดูดซับบนตัวกลางออร์กาโนเคลย์ทั้ง 2 ชนิด มีกลไกที่เหมือนกัน และ เวอร์มิคูไลต์ เป็นตัวกลางที่นำมาใช้เตรียมออร์กาโนเคลย์ ได้มีประสิทธิภาพดีกว่าเบนโทไนต์

2.4.3. การศึกษาการซับโลหะหนัก

Lee และคณะ (2002) ได้ศึกษาการดูดซับสารปนเปื้อนอินทรีย์ (คลอโรเบนซีน) และ โลหะหนัก (ตะกั่ว) โดยใช้ HDTMA ที่ค่าต่างๆกันเตรียมเป็นออร์กาโนเคลย์ จากผลการทดลองพบว่า คลอโรเบนซีน มีการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ HDTMA เนื่องจากองค์ประกอบสารอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon content) เพิ่มขึ้น และช่องว่างของออร์กาโนเบนโทไนต์ ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับตะกั่วลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ HDTMA เนื่องจากเกิดการดูดซับของ HDTMA เต็มพื้นที่บนดินเหนียว ทำให้เกิดการดูดซับตะกั่วได้เพียงเล็กน้อย และไม่มีการแข่งขันกันโดยตรงระหว่างสารปนเปื้อนอินทรีย์และโลหะหนัก นั่นคือ การดูดซับตะกั่วไม่มีผลต่อการดูดซับคลอโรเบนซีน เพราะคลอโรเบนซีนและตะกั่วมีกลไกการดูดซับที่ต่างกันคือ คลอโรเบนซีนเกิดกลไกการแบ่งแยก ในขณะที่ตะกั่วเกิดกลไกการแลกเปลี่ยนประจุบนพื้นผิว และช่องว่างระหว่างชั้นของเบนโทไนต์ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้แนะนำเพิ่มเติมในกรณีนำออร์กาโนเคลย์มาใช้เป็นชั้นกันซึมว่าควรหาความเข้มข้นของโลหะหนักและควรรีไซ้ 100% ออร์กาโนเบนโทไนต์ซึ่งจะมีประสิทธิภาพสูงสุด

Yoo และคณะ (2004) ศึกษาการดูดซับฟีนอลและโลหะหนัก (ตะกั่วและแคดเมียม) ด้วยออร์กาโนเคลย์ที่เตรียมจาก HDTMA และศึกษาผลของฟีนอลต่อการบำบัดตะกั่ว และผลของตะกั่วต่อการบำบัดฟีนอล จากการศึกษาพบว่า การดูดซับแคดเมียมด้วยเบนโทไนต์ และออร์กาโนเบนโทไนต์ มีค่าความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกัน ความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยเบนโทไนต์มากกว่าออร์กาโนเบนโทไนต์ เหตุผลที่ตะกั่วถูกดูดซับบนออร์กาโนเบนโทไนต์ได้ยาก เนื่องจากช่องว่างระหว่างชั้นดินถูกแทนที่ด้วย HDTMA แล้ว ความสามารถในการดูดซับฟีนอลด้วยออร์กาโนเบนโทไนต์มากกว่าเบนโทไนต์ และไม่มีการแข่งขันกันดูดซับระหว่างฟีนอลกับ

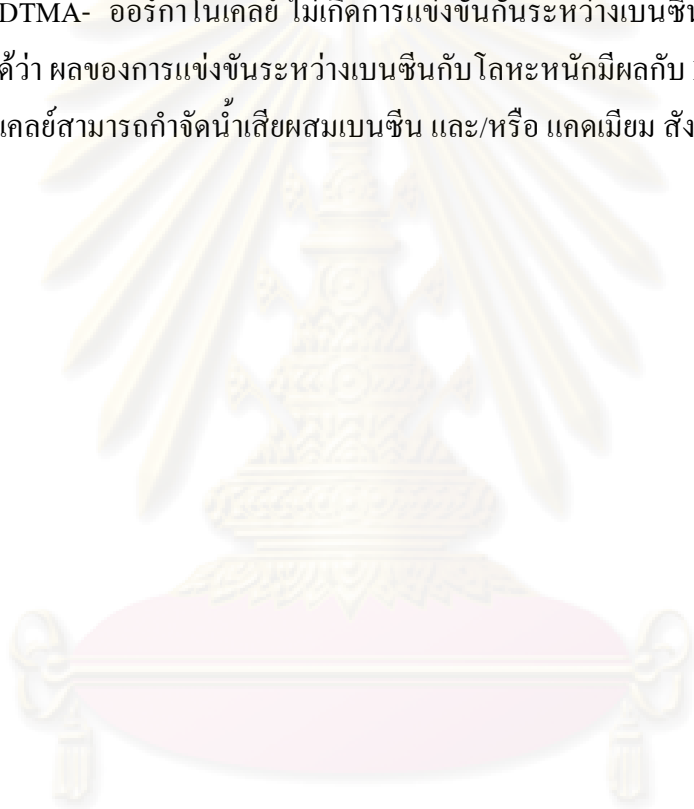
ตะกั่ว เนื่องจากเป็นการดูดซับต่างกลไกกัน โดยที่ฟีนอลเกิดกลไกการแบ่งแยกที่ส่วนสารอินทรีย์ (Organic phase) แต่ตะกั่วเกิดกลไกการดูดซับที่ช่องว่างระหว่างชั้น และผิวของเบนโทไนด์ ผลการศึกษาสรุปได้ว่าออร์กาโนเบนโทไนด์ สามารถใช้เป็นตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียผสมได้

Oyanedel-Craver และ Smith (2006) ได้ศึกษาผลของปริมาณ QACs คือ 2 ชนิด คือ HDTMA และ BTEA และผลของพีเอชในการดูดซับโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียมสังกะสี และปรอท ผลการศึกษาพบว่า การดูดซับแคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสี ลดลงเมื่อปริมาณ QACs ที่ใช้เตรียมออร์กาโนเคลย์เพิ่มขึ้น ในขณะที่การดูดซับปรอทอธิบายด้วยไอโซเทอมแบบเส้นตรง ปริมาณ BTEA ที่ใส่ลงไปเพื่อเตรียมออร์กาโนเคลย์ไม่มีผลในการดูดซับปรอท ในขณะที่ปริมาณ HDTMA มีผลต่อการดูดซับปรอท พีเอชมีผลต่อการดูดซับแคดเมียม ตะกั่ว ปรอท ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าออร์กาโนเคลย์มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้

Andini และคณะ (2006) ศึกษาการดูดซับ 2-chlorophenol กับโลหะหนัก (ตะกั่วและแคดเมียม) โดยเตรียมออร์กาโนเคลย์จาก Benzyltrimethyl octadecylammonium chloride (BDMOA) ผลการศึกษาพบว่า ออร์กาโนเคลย์สามารถดูดซับ 2-chlorophenol ได้สูง ในขณะที่โลหะหนักถูกดูดซับได้น้อยเมื่อเทียบกับ 2-chlorophenol ความสามารถในการดูดซับ 2-chlorophenol กับตะกั่วในน้ำเสียผสม (ระหว่าง 2-chlorophenol กับตะกั่ว)ต่ำ ในขณะที่ไม่มีการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียผสมระหว่าง 2-chlorophenol กับ แคดเมียมเลย

Zhao-Fu และคณะ (2007) ศึกษาการดูดซับฟีนอล และแคดเมียมโดยเตรียมออร์กาโนเคลย์ 2 ชนิด ที่มีประจุต่างกัน ได้แก่ Cetyltrimethylammonium bromide (CTMAB) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ประจุบวก และ Dodecyltrimethylbetaine (BS-12) สารชนิด amphoteric คือมีส่วนที่ชอบน้ำ 2 ส่วน ซึ่งมีประจุลบ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ 1 ส่วน (ประจุบวก) เมื่อทำการแลกเปลี่ยนประจุกับดิน ประจุลบของดินจะแลกเปลี่ยนประจุกับส่วนประจุบวก และประจุลบที่เหลือของ BS-12 จะเกิดแรงทางไฟฟ้าสถิตย์กับไอออนของโลหะหนัก จากการศึกษาพบว่าดินที่เตรียมจาก BS-12 มีความสามารถในการกำจัดทั้งฟีนอลและแคดเมียมเพิ่มขึ้น โดยที่ดินที่เตรียมจาก BS-12 (BS-soil) มีความสามารถในการกำจัดแคดเมียมดีที่สุด รองมาคือ ดินที่ไม่ได้ผ่านการแลกเปลี่ยนประจุ (soil) และดินที่เตรียมจากสารอินทรีย์ประจุบวก (CTMAB-soil) ตามลำดับ ในขณะที่ CTMAB-soil สามารถดูดซับฟีนอลได้มากที่สุด รองมาคือ BS-soil และ soil ตามลำดับ

Oyanedel- Craver และคณะ (2007) ศึกษาการดูดซับน้ำเสียผสมระหว่างเบนซีน และ/หรือ โลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี และปรอท บนตัวกลาง HDTMA- ออร์กาโนเคลย์ และ BTEA-ออร์กาโนเคลย์ จากการศึกษาพบว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียผสมระหว่างเบนซีนกับโลหะหนักบนตัวกลางออร์กาโนเคลย์ทั้ง 2 ชนิด ลดลง เมื่อเทียบกับน้ำเสียที่ไม่ผสมเบนซีน จากผลการวิจัยพบว่า เกิดการแข่งขันกันดูดซับระหว่างโลหะหนักกับเบนซีนบนตัวกลางออร์กาโนเคลย์ทั้ง 2 ชนิด เนื่องจากโลหะหนักและเบนซีนมีกลไกการดูดซับที่ผิวเหมือนกัน ความสามารถในการดูดซับเบนซีนในน้ำเสียผสมเบนซีนกับโลหะหนักบนตัวกลาง BTEA-ออร์กาโนเคลย์ลดลงเมื่อเทียบกับความสามารถในการดูดซับน้ำเสียเบนซีนอย่างเดียว ในขณะที่การดูดซับบนตัวกลาง HDTMA- ออร์กาโนเคลย์ ไม่เกิดการแข่งกันระหว่างเบนซีนกับโลหะหนัก ดังนั้นผู้วิจัยจึงสรุปได้ว่า ผลของการแข่งขันระหว่างเบนซีนกับโลหะหนักมีผลกับ BTEA-ออร์กาโนเคลย์ และออร์กาโนเคลย์สามารถกำจัดน้ำเสียผสมเบนซีน และ/หรือ แคดเมียม สังกะสี ปรอท และตะกั่วได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองศึกษาการนำโซเดียมเบนโทไนด์มาปรับสภาพเป็นออร์กาโนเคลย์โดยเติมสารลดแรงตึงผิวประจุบวก หรือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน 2 ชนิด เพื่อดูดซับน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟีนอล และ/หรือ ตะกั่วและศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพของออร์กาโนเคลย์

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) , ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum One
2. เครื่องวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffraction, XRD), Bruker AXS Model D8 Discover
3. เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์โดยใช้เทคนิคโครโมโตกราฟี (High Pressure Liquid Chromatography, HPLC) รุ่น LC 1100, Agilent
4. เครื่องยูวีวิสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV Visible spectrophotometer), ยี่ห้อ ALPHA
5. เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก (Flame Atomic Absorption Spectrometer, FASS), ยี่ห้อ Varian รุ่น AA 280 FS
6. เครื่องมือวัดพีเอช (pH meter) , Denver instrument
7. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง และ 2 ตำแหน่ง, GR 200 และ ARC120 ตามลำดับ
8. เครื่องเขย่าแบบวง (orbital shaker)
9. ตะแกรงร่อนเบอร์ 40 (Sieve no.40)
10. กระดาษกรองเบอร์ 1 เส้นผ่านศูนย์กลาง 90 มิลลิเมตร ยี่ห้อ Whatman
11. กระดาษกรองไนลอน เมมเบรน ไซลิ่งค์ ฟิลเตอร์ (Nylon membrane syringe filter) ขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร ยี่ห้อ Whatman
12. กระดาษกรองที่กรองเซลลูโลสอะซิเตด (Cellulose acetate membrane filters) ขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ยี่ห้อ Whatman
13. โถดูดความชื้น (desiccators)
14. เครื่องแก้ว
15. เครื่องเหวี่ยง (Centrifugation)

3.1.2 สารเคมี

1. โซเดียมเบนโทไนต์ (Na-bentonite) โดยได้รับจากบริษัท Thai Nippon Chemical Industrial Co. Ltd มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุเท่ากับ 90 มิลลิอิควิวาเลนต์/100 กรัม และมีองค์ประกอบทางเคมีดังนี้

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมี (%โดยน้ำหนัก)ของโซเดียม-เบนโทไนต์

องค์ประกอบ	น้ำหนัก (%)
SiO ₂	46.0-52.0
Al ₂ O ₃	15.0-17.0
Fe ₂ O ₃	6.0-8.0
Na ₂ O	2.2-2.8
MgO	2.0-3.0
CaO	1.9-2.2
K ₂ O	0.4-0.6
TiO ₂	1.4-1.6

2. สารเคมี

2.1 สารลดแรงตึงผิวประจุบวก หรือ ของควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน ได้แก่ โดเดซิลไพริดีเนียม คลอไรด์ (Dodecylpyridinium chloride, DPC) และ โดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียม โบรไมด์ (Dodecyltrimethylammonium bromide, DTAB)

2.2 ฟีนอล (Phenol, C₆H₅OH)

2.3 ตะกั่วไนเตรด (Pb(NO₃)₂)

2.4 ซิลเวอร์ไนเตรด (AgNO₃)

2.5 ไฮโดรคลอริก (HCl)

2.6 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)




2.7 กรดอะซิติก (CH₃COOH)

2.8 อะซิโตไนไตรล์ (Acetonitrile)

2.9 โซเดียมไนเตรด (NaNO₃)

3.0 กรดซิทริก (C₆H₈O₇)

ตารางที่ 3.2 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของฟีนอล ตะกั่ว และควอเทอร์นารีแอมโมเนียม
แคตไอออน (Sigma-Aldrich Chemical Company, Inc.)

	สูตร	โครงสร้าง	โมลโมเลกุล (กรัมต่อโมล)	Log K _{ow}	ค่าสัมประสิทธิ์การ แบ่งแยกน้ำกับ ออกทานอล (มก.ต่อลิตร)
สารถูกดูดซับ					
ฟีนอล	C ₆ H ₅ OH		94.12	1.46	8.20 × 10 ⁴
ตะกั่ว	Pb	-	207.19	-	-
สารลดแรงตึงผิว					
DPC	C ₁₇ H ₃₀ N ⁺ Cl ⁻		283.90	-	-
DTAB	C ₁₅ H ₃₄ N ⁺ Br ⁻		308.35	-	-

3.2 วิธีการศึกษาวิจัย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ แบ่งการทดลองออกเป็น 7 ส่วน คือ

- 3.2.1 การเตรียมออร์กาโนเคลย์ทั้ง 8 ชนิด
- 3.2.2 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน
- 3.2.3 ศึกษาคุณสมบัติของตัวดูดซับ
- 3.2.4 ศึกษาไอโซเทอมการซับฟีนอล
- 3.2.5 ศึกษาไอโซเทอมการซับตะกั่ว
- 3.2.6 ศึกษาผลกระทบของฟีนอลต่อการซับตะกั่ว และผลกระทบของตะกั่วต่อการซับฟีนอล
- 3.2.7 ศึกษาความสามารถในการคายออกของควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน ฟีนอล และ/หรือ ตะกั่ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.2.1 การเตรียมออร์กาโนเคลย์ (ประยุกต์ตามวิธีของ Chanchaivong และ Khaodhiar, 2009)

3.2.1.1 การเตรียมโซเดียมเบนโทไนด์

- 1) นำโซเดียมเบนโทไนด์ที่ได้รับจากบริษัท Thai Nippon Chemical Industrial Co. Ltd ใส่ขวดพลาสติกก้นแหลม 40 มิลลิลิตร ขวดละ 1 กรัม
- 2) ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water, DI) เพื่อกำจัดเกลืออนินทรีย์ (Inorganic salts) และสิ่งเจือปนอื่นๆออก
- 3) นำเข้าเครื่องเหวี่ยงที่อัตราเร็ว 6000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นทิ้งน้ำที่มีสิ่งเจือปนออก
- 4) ทำข้อ 2) และข้อ 3) ซ้ำเป็นจำนวน 4 ครั้งจนน้ำหลังจากการเหวี่ยงใสไม่มีสีหรือสิ่งเจือปน

5) นำโซเดียมเบนโทไนด์ออกจากแต่ละขวด และเข้าอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ บดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 เก็บใส่ตู้ป้องกันความชื้นเพื่อนำมาใช้ต่อไป

3.2.1.2 การเตรียมออร์กาโนเคลย์

1) เตรียมออร์กาโนเคลย์ 8 ชนิด ผันแปรค่าสัดส่วนค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เท่าของค่า CEC โดยใช้โซเดียมเบนโทไนด์จากข้อ 3.2.1.1 ปริมาณ 10 กรัมต่อ 1 ชนิดออร์กาโนเคลย์ โดยจะเรียกชื่อออร์กาโนเคลย์ทั้ง 8 ชนิดที่เตรียมได้ดังนี้ 0.5DPC 1.0DPC 1.5DPC 2.0DPC 0.5DTAB 1.0DTAB 1.5DTAB และ 2.0DTAB และเรียกออร์กาโนเคลย์ที่เตรียมจาก DPC และ DTAB ว่า DPC-ออร์กาโนเคลย์, DTAB-ออร์กาโนเคลย์ ตามลำดับ

2) เตรียมสารละลายควอเตอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออนทั้ง 2 ชนิด โดยใช้น้ำปราศจากไอออนปริมาตร 200 มิลลิลิตร และปริมาณของ DPC และ DTAB ที่เตรียมสามารถคำนวณจากสมการที่ 3.1

$$f = \frac{M_{cation}}{CEC \times M_{clay} \times GMW_{cation} \times Z} \quad (3.1)$$

เมื่อ

f	=	สัดส่วนค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)
M_{cation}	=	มวลควอเตอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออนตามสัดส่วนค่า CEC (กรัม)
CEC	=	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ
M_{clay}	=	มวลของโซเดียมเบนโทไนด์ (กรัม)
GMW_{cation}	=	น้ำหนักโมเลกุลของควอเตอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน (กรัมต่อโมล)
Z	=	โมลของประจุต่ออิกวิวาเลนต์ (โมลต่ออิกวิวาเลนต์)

3) เขย่าที่อัตราเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$)

4) กรองแยกออร์กาโนเคลย์ออกด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 และล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนกระทั่งแน่ใจว่าคลอไรด์ (จากออร์กาโนเคลย์ที่เตรียมจาก DPC) และ โบรไมด์ (จากออร์กาโนเคลย์ที่เตรียมจาก DTAB) หหมดไป โดยทำการทดสอบน้ำล้างดินด้วยซิลเวอร์ไนเตรด จนไม่พบตะกอนสีขาวของซิลเวอร์คลอไรด์ และตะกอนสีเหลืองของซิลเวอร์โบรไมด์

5) นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงนำออกจากตู้อบบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 เก็บใส่ตู้ป้องกันความชื้นเพื่อนำมาใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไป

3.2.2 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับควอเตอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน

1) ทำการทดลองแบบทีละเทโดยนำโซเดียมเบนโทไนด์ที่เตรียมจากข้อ 3.2.1.1 อย่างละ 0.25 กรัม ใส่ในหลอดทดลอง ผสมกับสารละลาย DPC และ DTAB ปริมาณ 25 มิลลิลิตร โดยค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเป็นไปตามสัดส่วนต่างๆ ได้แก่ 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25 1.50 1.75 2.00 เท่าของค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ของโซเดียมเบนโทไนด์ ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณ DPC และ DTAB ที่จะเตรียมเป็นความเข้มข้นเริ่มต้นได้จากสมการที่ 3.1

2) เขย่าที่อัตราเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$)

3) นำเข้าเครื่องเหวี่ยงที่อัตราเร็ว 6000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที

4) นำส่วนที่เป็นน้ำไปทำการวิเคราะห์ปริมาณ DPC และ DTAB ที่สภาวะสมดุลโดยวิเคราะห์ DPC ด้วยเครื่องยูวีสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 260 นาโนเมตร (Brownawell และคณะ, 1990) และวิเคราะห์ DTAB ด้วยเครื่อง HPLC ด้วยอะซิโตนไนไตรล์ และกรดอะซิติก 20:80, ELSD detector

5) คำนวณหาปริมาณ DPC และ DTAB ที่ถูกดูดซับ และประสิทธิภาพในการดูดซับ ดังสมการที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ และนำข้อมูลมาวาดกราฟระหว่างความเข้มข้นของ DPC หรือ DTAB ที่สภาวะสมดุล และความสามารถในการดูดซับ DPC หรือ DTAB

$$q_e = \frac{(C_b - C_e)V}{M} \quad (3.2)$$

$$\% \text{ Removal} = \frac{(C_b - C_e)}{C_b} \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ q_e = ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

C_b = ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_e = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

V = ปริมาณสารละลาย (ลิตร)

M = มวลของตัวดูดซับ (กรัม)

3.2.3 ศึกษาคุณสมบัติของตัวดูดซับ

นำออร์กาโนเคลย์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.2 DPC และ DTAB มาทดสอบสมบัติดังนี้

1) การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) ระยะห่างระหว่างชั้นของตัวดูดซับ โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffraction, XRD) ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.4 ศึกษาไอโซเทอร์มการซับฟีนอล

ทำการทดสอบเบื้องต้น (Preliminary) หาเวลาและปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม โดยเลือก 1.0DPC 1.0DTAB และน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟีนอลความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

1) ชั่งออร์กาโนเคลย์ (ทั้ง 8 ตัวอย่าง) และโซเดียมเบนโทไนด์ปริมาณที่เหมาะสมจากการทดสอบเบื้องต้นใส่ในหลอดแก้วขนาด 40 มิลลิลิตร

2) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนฟีนอลความเข้มข้น 5 10 15 20 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 25 มิลลิลิตร และปรับพีเอชด้วยกรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เท่ากับ 7 ± 0.5

3) ปิดด้วยพาราฟิล์ม และเขย่าที่อัตราเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลาที่เหมาะสมจากการทดสอบเบื้องต้น ที่อุณหภูมิห้อง ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$)

4) นำตัวอย่างเข้าเครื่องเหวี่ยงที่อัตราเร็ว 6000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรองไนลอน เมมเบรน ไซลิงค์ ฟิลเตอร์ และวัดหาความเข้มข้นฟีนอลที่สภาวะสมดุลด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 270 นาโนเมตร (Xu และ Zhu, 2007)

5) นำข้อมูลที่สามารถได้ (จากสมการที่ 3.2 และ 3.3) ไปวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่สภาวะสมดุล และความสามารถในการซับฟีนอล เพื่อหาประสิทธิภาพในการซับสูงสุด

3.2.5 ศึกษาไอโซเทอร์มการซับตะกั่ว

ทำการทดสอบเบื้องต้นหาเวลาและปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม โดยเลือก 1.0DPC 1.0DTAB และน้ำเสียที่ปนเปื้อนตะกั่วความเข้มข้น 12 มิลลิกรัมต่อลิตร

1) ชั่งออร์กาโนเคลย์ (ทั้ง 8 ตัวอย่าง) และโซเดียมเบนโทไนด์ปริมาณที่เหมาะสมในการทดสอบเบื้องต้น ใส่ในขวดพลาสติกขนาด 60 มิลลิลิตร

2) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนตะกั่วความเข้มข้น 6 8 10 12 14 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 25 มิลลิตร ปรับพีเอชด้วยกรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เท่ากับ 7 ± 0.5 และปรับค่าความแรงไอออน (Ionic strength) เท่ากับ 0.01 โมลาร์ โดยใช้โซเดียมไนเตรด (NaNO_3) ปริมาณ 25 มิลลิตร

3) เขย่าที่อัตราเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลาที่เหมาะสมจากการทดสอบเบื้องต้นที่อุณหภูมิห้อง ($23 \pm 2^\circ\text{C}$)

4) นำตัวอย่างเข้าเครื่องเหวี่ยงที่อัตราเร็ว 6000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรองเซลลูโลส อะซิเตด วัดพีเอชที่สภาวะสมดุล และวัดด้วยเครื่องวัดโลหะหนักเพื่อหาปริมาณตะกั่วที่สภาวะสมดุล

5) นำข้อมูลที่คำนวณได้ (จากสมการที่ 3.2 และ 3.3) ไปวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วที่สภาวะสมดุล และความสามารถในการจับตะกั่ว เพื่อหาประสิทธิภาพในการจับสูงสุด

3.2.6 ศึกษาผลกระทบของฟินอลต่อการจับตะกั่ว และผลกระทบของตะกั่วต่อการจับฟินอล

3.2.6.1 ศึกษาผลกระทบของฟินอลต่อการจับตะกั่ว

ทำการทดสอบเบื้องต้นหาเวลาและปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม โดยเลือก 1.0DPC 1.0DTAB และน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟินอลความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อความเข้มข้นตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

1) ชั่งออร์กาโนเคลย์ (ทั้ง 8 ตัวอย่าง) และโซเดียมเบนโทไนด์ปริมาณที่เหมาะสมในการทดสอบเบื้องต้น ใส่ในขวดแก้วขนาด 40 มิลลิตร

2) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนฟินอลและตะกั่ว โดยความเข้มข้นฟินอลต่อตะกั่วในอัตราส่วนเท่ากับ 5:10 10:10 20:10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 25 มิลลิตรและปรับพีเอชด้วยกรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เท่ากับ 7 ± 0.5

3) เขย่าที่อัตราเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลาที่เหมาะสมจากการทดสอบเบื้องต้นที่อุณหภูมิห้อง ($23 \pm 2^\circ\text{C}$)

4) นำตัวอย่างเข้าเครื่องเหวี่ยงที่อัตราเร็ว 6000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรองเซลลูโลส อะซิเตด และวัดด้วยเครื่องวัดโลหะหนักเพื่อหาปริมาณตะกั่ว ที่สภาวะสมดุล

5) นำข้อมูลที่คำนวณได้ (จากสมการที่ 3.2 และ 3.3) ไปวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วที่สภาวะสมดุล และความสามารถในการจับตะกั่ว เพื่อหาผลกระทบของฟินอลต่อการจับตะกั่ว

3.2.6.2 ศึกษาผลกระทบของตะกั่วต่อการขับฟีนอล

- 1) ชั่งออร์กาโนเคลย์ (ทั้ง 8 ตัวอย่าง) และโซเดียมเบนโทไนต์ปริมาณที่เหมาะสมในการทดสอบเบื้องต้น ใส่ในขวดแก้วขนาด 40 มิลลิลิตร
- 2) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนฟีนอลและตะกั่ว โดยความเข้มข้นตะกั่วต่อฟีนอลในอัตราส่วนเท่ากับ 5:10 10:10 20:10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 25 มิลลิลิตรและปรับพีเอชด้วยกรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เท่ากับ 7 ± 0.5
- 3) 3) เขย่าที่อัตราเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลาที่เหมาะสมจากการทดสอบเบื้องต้นที่อุณหภูมิห้อง ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$)
- 4) นำตัวอย่างเข้าเครื่องเหวี่ยงที่อัตราเร็ว 6000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรองไนลอน เมมเบรน ไซลิ่งค์ ฟิลเตอร์ และวัดหาความเข้มข้นฟีนอลที่สถานะสมดุลด้วยเครื่องยูวีสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 270 นาโนเมตร
- 5) นำข้อมูลที่คำนวณได้ (จากสมการที่ 3.2 และ 3.3) ไปวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่สถานะสมดุล และความสามารถในการขับฟีนอล เพื่อหาผลกระทบของตะกั่วต่อการขับฟีนอล

3.2.7 ศึกษาความสามารถในการคายออกของควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน ฟีนอล และ/หรือ ตะกั่ว

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ในเรื่องการเตรียมตัวอย่างสิ่งปฏิกูลที่ไม่ใช้แล้วที่ต้องการทดสอบหาค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Total concentration) หรือปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัดในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร (Extractable concentration) ให้ใช้วิธีดังต่อไปนี้

สำหรับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีลักษณะเป็นกากตะกอน (Sludge) เกลน (Slurry) หรือเป็นน้ำมัน (Oily) น้ำมันดิน (Tarry) ที่ไม่สามารถกรองหรือบดได้ หลังจากแยกสิ่งแปลกปลอมออกแล้ว ตัวอย่างที่เหลือทั้งหมดจะถูกนำไปวิเคราะห์ต่อไปโดยใช้สารละลาย 0.2 โมลาร์ โซเดียม ซิเตรด (Sodium citrate) ที่พีเอช 5.0 ± 0.1 เป็นน้ำสกัดที่ใช้ในวิธี Waste Extraction Solution (WET) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) เตรียมสารละลายกรดซิตริก โดยนำกรดซิตริกไปละลายในน้ำปราศจากไอออน
- 2) จากนั้นนำสารละลายกรดซิตริกในปริมาณที่เหมาะสม มาปรับพีเอชให้เป็น 5.0 ± 0.1 ด้วยสารละลาย 4.0 นอร์มอล โซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อใช้เป็นน้ำสกัด

3) นำตัวอย่าง 50 กรัม ใสลงในภาชนะที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกประเภท โพลีเอทิลีน (ควรใช้ภาชนะที่ทำจากแก้วเมื่อต้องการวิเคราะห์หาสารอินทรีย์อันตราย) ภาชนะที่ใช้ ในการสกัดควรผ่านการล้าง (Rinsed) อย่างต่อเนื่องด้วยสารละลายกรดไนตริก ซึ่งสามารถเตรียมได้ จากการนำเอาสารละลายกรดไนตริกมาผสมกับน้ำปราศจากไอออนในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดย ปริมาตร)

4) เติม 500 มิลลิลิตรของน้ำสกัดลงในตัวอย่าง และนำไปเขย่าอัตราเร็ว 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

5) จากนั้นนำเอาของผสมไปกรองผ่านกระดาษกรอง ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของ รูกรอง 0.45 ไมครอน

6) นำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นสารอันตราย (ตะกั่วและฟีนอล) ในน้ำสกัดใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร (Extractable concentration; EC)

3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองทั้ง 7 ขั้นตอนมีตัวแปรซึ่งแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.3 ดังนี้

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองของแต่ละขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<p>ขั้นตอนที่ 1 และ 3: เตรียมออร์แกนอเคลย์ทั้ง 8 ชนิด และ ศึกษาคุณสมบัติของตัวดูดซับ</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ตัวแปรอิสระ <ol style="list-style-type: none"> 1. ปริมาณ โซเดียมเบนโทไนด์ 2. ปริมาณ DPC และ DTAB ● ตัวแปรตาม <p>ผล FTIR และ XRD</p> ● ตัวแปรควบคุม <p>อุณหภูมิ เวลาในการเขย่า จำนวนรอบในการปั่นกวาน อุณหภูมิและเวลาในการอบแห้ง</p> 	<p>10 กรัม</p> <p>แปรผันค่าสัดส่วน 0.5 1.0 1.5 2.0 เท่า ของค่า CEC ของโซเดียมเบนโทไนด์ และ น้ำปราศจากไอออน 200 มิลลิลิตร</p> <p>-</p> <p>23 ±2 องศาเซลเซียส</p> <p>18 ชั่วโมง</p> <p>150 รอบต่อนาที</p> <p>75 องศาเซลเซียส, 24 ชั่วโมง</p>

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<p>ขั้นตอนที่ 2: ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับควอเทอร์นารี แอมโมเนียมแคตไอออน</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ตัวแปรอิสระ <ol style="list-style-type: none"> 1. ปริมาณโซเดียมเบนโทไนด์ 2. ปริมาณ DPC และ DTAB ● ตัวแปรตาม <p style="text-align: center;">ผล FTIR และ XRD</p> <p style="text-align: center;">ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง</p> 	<p>0.25 กรัม</p> <p>แปรผันค่าสัดส่วน 0.25 0.50 1.00 1.25 1.50 1.75 และ 2.0 เท่าของค่า CEC ของโซเดียมเบนโทไนด์ และ น้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร</p> <p>ค่าที่ใช้ในการทดลอง</p>
<ul style="list-style-type: none"> ● ตัวแปรควบคุม <p style="text-align: center;">อุณหภูมิ</p> <p style="text-align: center;">เวลาในการเขย่า</p> <p style="text-align: center;">จำนวนรอบในการปั่นกวน</p> <p style="text-align: center;">อัตราเร็วและเวลาในการเหวี่ยง</p> 	<p>23 ±2 องศาเซลเซียส</p> <p>18 ชั่วโมง</p> <p>150 รอบต่อนาที</p> <p>6000 รอบต่อนาที, 20 นาที ตามลำดับ</p>
<p>ขั้นตอนที่ 4: ศึกษาไอโซเทอมการซับฟีนอล</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ตัวแปรอิสระ <ol style="list-style-type: none"> 1. ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล 2. ชนิดของตัวดูดซับ ● ตัวแปรตาม <p style="text-align: center;">ค่าความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลืออยู่</p> ● ตัวแปรควบคุม <p style="text-align: center;">ปริมาณตัวดูดซับ</p> <p style="text-align: center;">อุณหภูมิ</p> 	<p>5 10 15 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร</p> <p>โซเดียมเบนโทไนด์ 0.5DPC 1.0DPC 1.5DPC 2.0DPC 0.5DTAB 1.0DTAB 1.5DTAB และ 2.0DTAB</p> <p style="text-align: center;">-</p> <p>จากการทดสอบเบื้องต้น (Preliminary)</p> <p>23 ±2 องศาเซลเซียส</p>

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<p>อัตราเร็วและเวลาในการปั่นกววน</p> <p>อัตราเร็วและเวลาในการเหวี่ยง</p> <p>พีเอช</p>	<p>150 รอบต่อนาที และ ได้จากการทดสอบเบื้องต้น</p> <p>6000 รอบต่อนาที, 20 นาที ตามลำดับ</p> <p>7 ± 0.5</p>
<p>ขั้นตอนที่ 5: ศึกษาไอโซเทอมการจับตะกั่ว</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ตัวแปรอิสระ <ol style="list-style-type: none"> 1. ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว 2. ชนิดของตัวดูดซับ ● ตัวแปรตาม <p>ค่าความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลืออยู่</p> ● ตัวแปรควบคุม <p>ปริมาณตัวดูดซับ</p> <p>อุณหภูมิ</p> <p>อัตราเร็วและเวลาในการปั่นกววน</p> <p>อัตราเร็วและเวลาในการเหวี่ยง</p> <p>พีเอช</p> 	<p>6 8 10 12 14 มิลลิกรัมต่อลิตร</p> <p>โซเดียมเบนโทไนด์ 0.5DPC 1.0DPC 1.5DPC 2.0DPC 0.5DTAB 1.0DTAB 1.5DTAB และ 2.0DTAB</p> <p>จากการทดสอบเบื้องต้น</p> <p>23 ± 2 องศาเซลเซียส</p> <p>150 รอบต่อนาที</p> <p>และได้จากการทดสอบเบื้องต้น</p> <p>6000 รอบต่อนาที, 20 นาที ตามลำดับ</p> <p>7 ± 0.5</p>

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<p>ขั้นตอนที่ 6: ศึกษาผลกระทบของฟีนอลต่อการจับตะกั่ว และผลกระทบของตะกั่วต่อการจับฟีนอล</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ตัวแปรอิสระ <ol style="list-style-type: none"> 1. ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลผสมตะกั่ว [ฟีนอลต่อตะกั่ว] 2. ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลผสมตะกั่ว [ตะกั่วต่อฟีนอล] 3. ชนิดของตัวดูดซับ ● ตัวแปรตาม <p>ค่าความเข้มข้นของตะกั่วหรือที่เหลืออยู่</p> ● ตัวแปรควบคุม <p>ปริมาณตัวดูดซับ อุณหภูมิ อัตราเร็วและเวลาในการเขย่า อัตราเร็วและเวลาในการเหวี่ยง พีเอช</p> 	<p>5:10 10:10 20:10 มิลลิกรัมต่อลิตร</p> <p>5:10 10:10 20:10 มิลลิกรัมต่อลิตร</p> <p>5:10 10:10 20:10 มิลลิกรัมต่อลิตร โซเดียมเบนโทไนด์ 0.5DPC 1.0DPC 1.5DPC 2.0DPC 0.5DTAB 1.0DTAB 1.5DTAB และ 2.0DTAB</p> <p>-</p> <p>จากการทดสอบเบื้องต้น 23 ±2 องศาเซลเซียส 150 รอบต่อนาที และได้จากการทดสอบเบื้องต้น 6000 รอบต่อนาที, 20 นาที ตามลำดับ 7 ±0.5</p>
<p>ขั้นตอนที่ 7: ศึกษาความสามารถในการคายออกของ QACs ฟีนอล และ/หรือ ตะกั่ว</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ตัวแปรอิสระ <p>ชนิดของตัวดูดซับ</p> ● ตัวแปรตาม <p>ความเข้มข้นก่อนและหลังของ QACs ฟีนอล และ/หรือตะกั่วที่อยู่ในตัวดูดซับ</p> 	<p>โซเดียมเบนโทไนด์ 0.5DPC 1.0DPC 1.5DPC 2.0DPC 0.5DTAB 1.0DTAB 1.5DTAB และ 2.0DTAB</p> <p>-</p>

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> • ตัวแปรควบคุม <ul style="list-style-type: none"> ปริมาณตัวคูดซับ อุณหภูมิ อัตราเร็วและเวลาในการปั่นกวน 	5 กรัม 23 ±2 องศาเซลเซียส 150 รอบต่อนาที, 48 ชั่วโมง
<ul style="list-style-type: none"> อัตราเร็วและเวลาในการเหวี่ยง พีเอช 	6000 รอบต่อนาที, 20 นาที ตามลำดับ 7 ±0.5



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

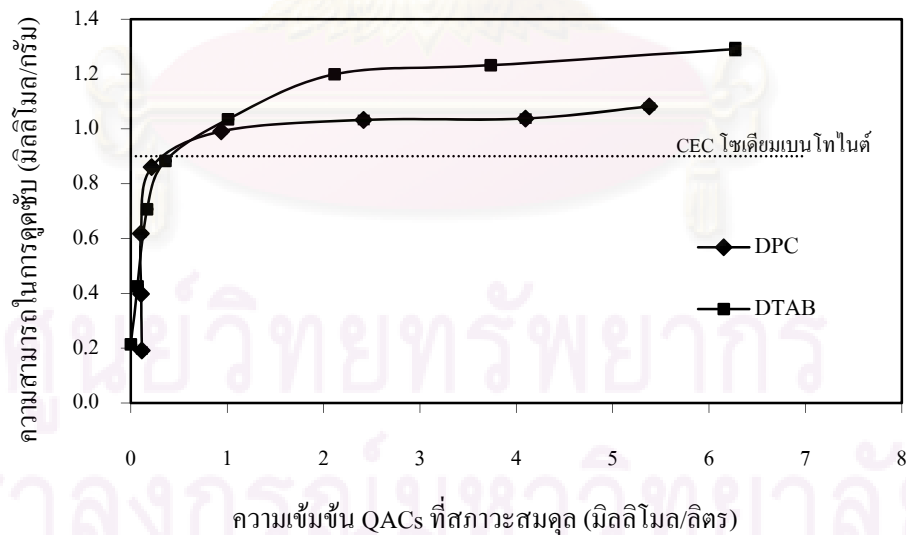
ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

ผลการศึกษาแบ่งออกเป็น 6 ส่วนดังนี้

- 4.1 ไอโซเทอมการดูดซับควอเตอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน
- 4.2 คุณสมบัติของสารดูดซับ
- 4.3 ไอโซเทอมการซับฟีนอล
- 4.4 ไอโซเทอมการซับตะกั่ว
- 4.5 ผลกระทบของฟีนอลต่อการซับตะกั่ว และผลกระทบของตะกั่วต่อการซับฟีนอล
- 4.6 ศึกษาความสามารถในการคายออกของควอเตอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน ฟีนอล และ/หรือ ตะกั่ว

4.1 ไอโซเทอมการดูดซับควอเตอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน

การทดลองส่วนนี้เป็นการศึกษาการดูดซับของ DPC และ DTAB บนตัวกลางคือ โขเดียมเบนโทไนด์ โดยค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ DPC และ DTAB แปรผันที่สัดส่วน 0.25 ถึง 2.00 เท่าของค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ของโขเดียมเบนโทไนด์ จากการศึกษาได้ผลการทดลองดังนี้

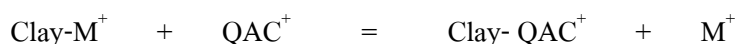


ภาพที่ 4.1 ไอโซเทอมของการดูดซับ DPC และ DTAB ที่อุณหภูมิห้อง ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$)

จากภาพที่ 4.1 ที่สัดส่วน 1.0 เท่าของค่า CEC ของโซเดียมเบนโทไนด์มีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.86 มิลลิโมลต่อกรัม และ 0.88 มิลลิโมลต่อกรัม ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลค่า CEC ของโซเดียมเบนโทไนด์ที่ได้รับจากบริษัทเท่ากับ 90 มิลลิอิกวิวาเลนต่อ 100 กรัม หรือ 0.90 มิลลิโมลต่อกรัม

จากกราฟไอโซเทอมการดูดซับ DPC และ DTAB พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ DPC และ DTAB หรือเพิ่มค่าสัดส่วน CEC แล้วความสามารถในการดูดซับ QACs จะเพิ่มขึ้นด้วย และจะสังเกตได้ว่าช่วงการเพิ่มขึ้นแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกเส้นความชันของกราฟไอโซเทอม DPC และ DTAB เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยที่ไอโซเทอมของการดูดซับ DPC มีค่าความสามารถในการดูดซับจาก 0.19 มิลลิโมลต่อกรัม ถึง 0.86 มิลลิโมลต่อกรัม และไอโซเทอมการดูดซับของ DTAB มีค่าความสามารถในการดูดซับจาก 0.21 มิลลิโมลต่อกรัม ถึง 0.88 มิลลิโมลต่อลิตร ซึ่งอยู่ในช่วงค่าสัดส่วน 0.25 ถึง 1.00 เท่าของค่า CEC ของโซเดียมเบนโทไนด์ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้น DPC และ DTAB (ค่าสัดส่วนมากกว่า 1.00 เท่าของค่า CEC ของโซเดียมเบนโทไนด์) เส้นกราฟไอโซเทอมในช่วงนี้มีค่าความชันค่อยๆ ลดลง แต่ยังสามารถดูดซับ DPC และ DTAB ได้อีกเกินกว่าที่ 2.00 เท่าของค่า CEC ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาการดูดซับ Dodecyldimethylbenzylammonium bromide บนตัวกลางแร่ดินเหนียวกลุ่มมอนต์มอริลโลไนต์ (Kwlek และคณะ, 2003) การศึกษาการดูดซับ Cetylpyridinium (CP) หรือ hexadecylpyridinium บนตัวกลางแร่ดินเหนียวสมคไตต์ โดยมีค่า CEC เท่ากับ 115 มิลลิอิกวิวาเลนต่อ 100 กรัม และจากการศึกษาพบว่าสมคไตต์สามารถดูดซับ CP ได้มากจนถึงค่าสัดส่วน 2.0 เท่าของค่า CEC ของสมคไตต์ จากนั้นค่าความสามารถในการดูดซับค่อยๆ เพิ่มขึ้นแต่ไม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเท่ากับในช่วงแรก (ความชันของกราฟค่อยๆ ลดลงตั้งแต่ 2.00 ถึง 4.20 เท่าของค่า CEC) (Koh และคณะ, 2005) และงานวิจัยที่ทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ DPC บนตัวกลางโซเดียมเบนโทไนด์ โดยมีค่า CEC เท่ากับ 83 มิลลิอิกวิวาเลนต่อ 100 กรัม ที่สัดส่วน 0.25 ถึง 3.00 เท่าของค่า CEC ของโซเดียมเบนโทไนด์ ผลการศึกษาพบว่าค่าความสามารถในการดูดซับ DPC สูงในช่วง 0.25 ถึง 1.00 เท่าของค่า CEC และค่าความชันของเส้นกราฟไอโซเทอมค่อยๆ ลดลงในช่วง 1.00 ถึง 3.00 เท่าของค่า CEC และยังคงสามารถดูดซับได้อีกหากเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ DPC ที่สัดส่วนมากกว่า 3.00 เท่าของค่า CEC (Chanчайvong และ Khaodhiar, 2009)

จากผลการศึกษาข้างต้นนี้เกิดกลไกสำคัญโดยในช่วงแรกของกราฟไอโซเทอม (0.25 ถึง 1.00 เท่าของค่า CEC) เกิดกลไกการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange mechanism) บวก (Chen และคณะ, 2005) ซึ่งอธิบายกลไกได้ดังนี้



โดยที่ M^+ คือสารอนินทรีย์ประจุลบที่ผิวของแร่ดินเหนียว และ QAC^+ คือสารอินทรีย์ประจุบวก หรือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน (Kowalska และคณะ, 1994)

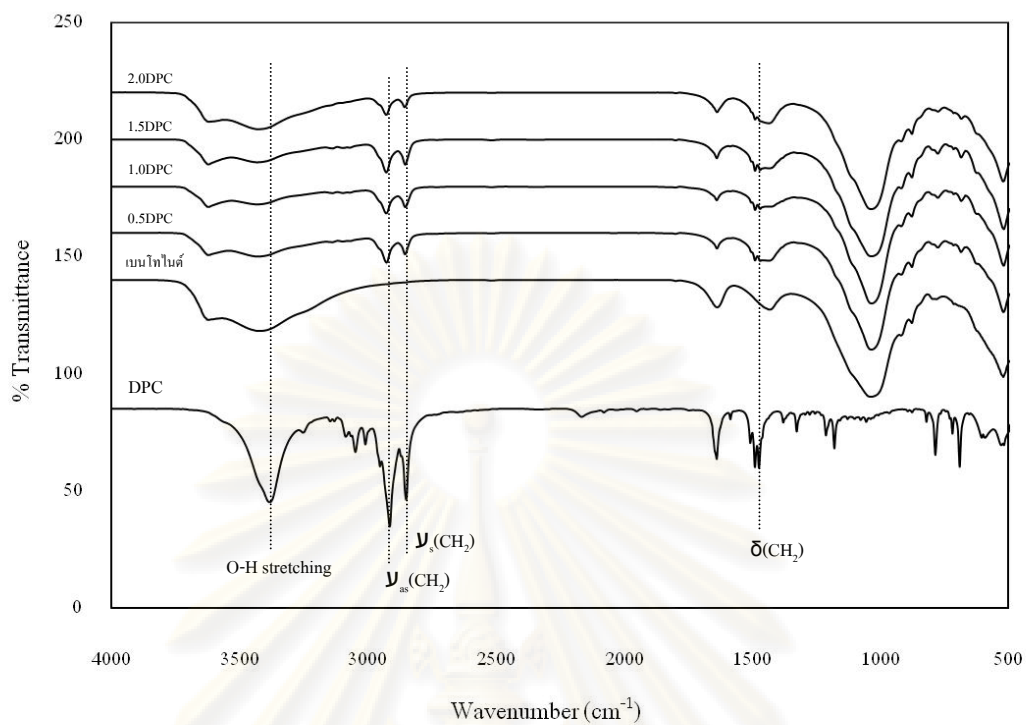
และกลไกการดึงดูดกันของคู่ไอออนบวกกับไอออนลบด้วยแรงไฟฟ้าสถิต (Ion pairing mechanism) (Gürses และคณะ, 2003) ในขณะที่ในช่วงหลังของเส้นกราฟไอโซเทอม ที่ปริมาณ QACs มากกว่า CEC ของโซเดียมเบนโทไนด์ QACs ที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงวานเดอร์วาลส์ (van der waals interaction) จากโครงสร้างคาร์บอนในส่วนของทางระหว่าง QACs ด้วยกันเป็นหลัก (Lee และ Kim, 2002a; Zhang และคณะ, 1993; Koh และคณะ, 2005) จากกราฟไอโซเทอมการดูดซับ DPC และ DTAB จะเห็นได้ว่าในช่วงแรก DPC และ DTAB มีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกันและ DTAB มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่า DPC แต่ในช่วงหลังตั้งแต่ที่สัดส่วน 1.25 เท่าของค่า CEC ขึ้นไป เช่นที่ค่าสัดส่วน 1.50 เท่าของค่า CEC ของเบนโทไนด์ DPC และ DTAB มีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 1.03 มิลลิโมลต่อลิตร และ 1.19 มิลลิโมลต่อลิตร ตามลำดับ ที่ค่าสัดส่วน 2.00 เท่าของค่า CEC ของเบนโทไนด์ DPC และ DTAB มีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 1.08 และ 1.26 มิลลิโมลต่อลิตรตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า DTAB มีความสามารถในการดูดซับบนตัวกลางโซเดียมเบนโทไนด์มากกว่า DPC โดยทั้ง DPC และ DTAB สามารถดูดซับเข้าไปในชั้นดินได้มากกว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของโซเดียมเบนโทไนด์ เนื่องจาก DPC และ DTAB เป็น QACs ที่มีสายโซ่อัลคิลยาว (คาร์บอน 12 อะตอม)

4.2 คุณสมบัติของสารดูดซับ

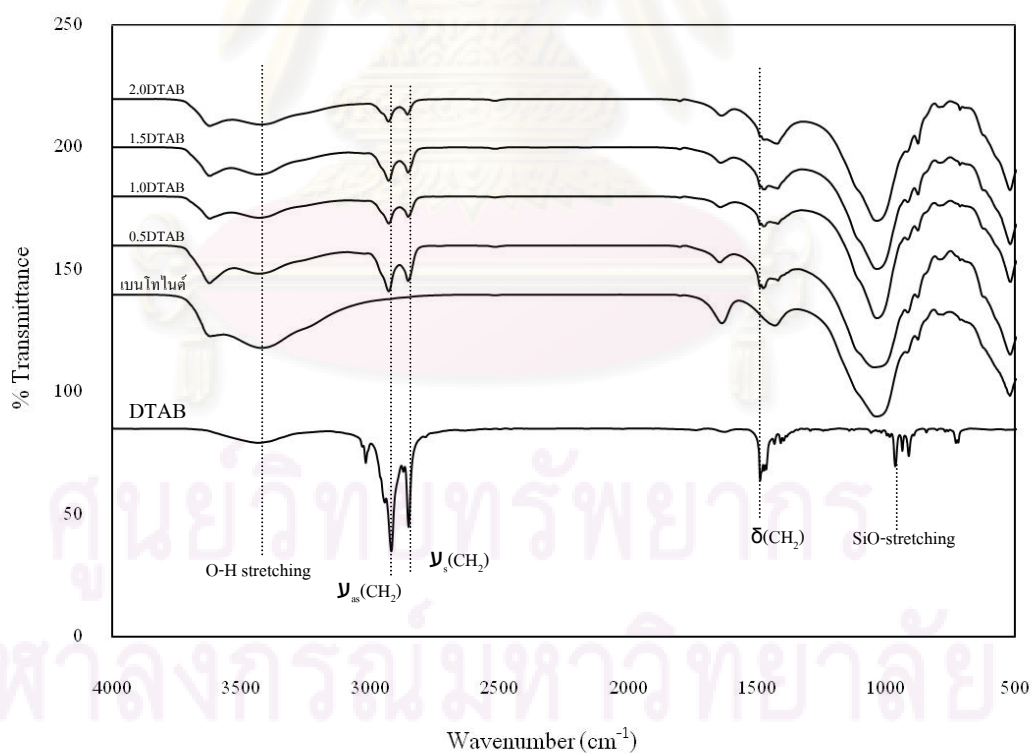
การทดลองส่วนนี้เป็นการนำโซเดียมเบนโทไนด์ QACs และออร์กาโนเคลย์ไปทดสอบสมบัติโดยศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว และระยะห่างระหว่างชั้นของตัวดูดซับ

4.2.1 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

จากการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของโซเดียมเบนโทไนด์ QACs และออร์กาโนเคลย์ ด้วยเครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) ดังภาพที่ 4.2 และ 4.3 และตารางที่ 4.1



ภาพที่ 4.2 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของโซเดียมเบนโทไนด์ DPC และ DPC-ออร์กาโนเคลย์



ภาพที่ 4.3 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของโซเดียมเบนโทไนด์ DTAB และ DTAB-ออร์กาโนเคลย์

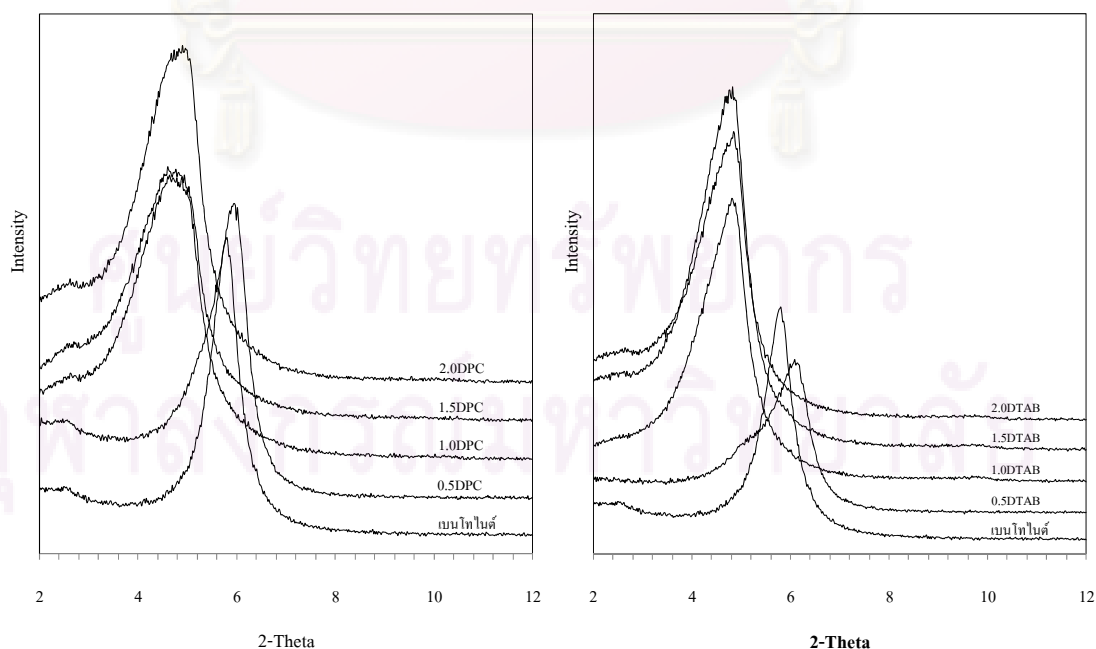
ตารางที่ 4.1 หมู่ฟังก์ชันของโซเดียมเบนโทไนด์ QACs และออร์กาโนเคลย์

แถบดูดกลืน (Wavenumber, cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน	รายการอ้างอิง
~990 - ~1200	SiO-stretching	Xi และคณะ, 2005
1440-1520	$\delta(\text{CH}_2)$	Vaia และคณะ, 1994
~2850	$\nu_s(\text{CH}_2)$	Vaia และคณะ, 1994
~2920	$\nu_{as}(\text{CH}_2)$	Vaia และคณะ, 1994
3000-3550	O-H stretching	Xi และคณะ, 2005

จากภาพที่ 4.2 และ 4.3 จะเห็นได้ว่า DPC-ออร์กาโนเคลย์ และ DTAB-ออร์กาโนเคลย์ มีหมู่ฟังก์ชันบางช่วงการดูดกลืนเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นมาเมื่อเทียบกับโซเดียมเบนโทไนด์ แต่ไม่เด่นชัดนัก ได้แก่ ช่วงการดูดกลืน 1440-1520 cm^{-1} และ 2920-3000 cm^{-1} แสดงว่า QACs เข้าไปแลกเปลี่ยน หรือแทนที่ประจุบวกในโซเดียมเบนโทไนด์ ทำให้โซเดียมเบนโทไนด์เปลี่ยนแปลงสมบัติจากชอบน้ำ (Hydrophilic) เป็นไม่ชอบน้ำหรือชอบสารอินทรีย์แทน (Hydrophobic หรือ Organophilic)

4.2.2 ระยะห่างระหว่างชั้นของตัวดูดซับ

ผลการวิเคราะห์หาระยะห่างระหว่างชั้น (Interlayer) ของโซเดียมเบนโทไนด์ และออร์กาโนเคลย์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffraction, XRD) แสดงดังภาพที่ 4.4 และ ตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.4 ผลวิเคราะห์ XRD ของโซเดียมเบนโทไนด์ และออร์กาโนเคลย์

ตารางที่ 4.2 แสดงระยะห่างระหว่างชั้นของตัวดูดซับ

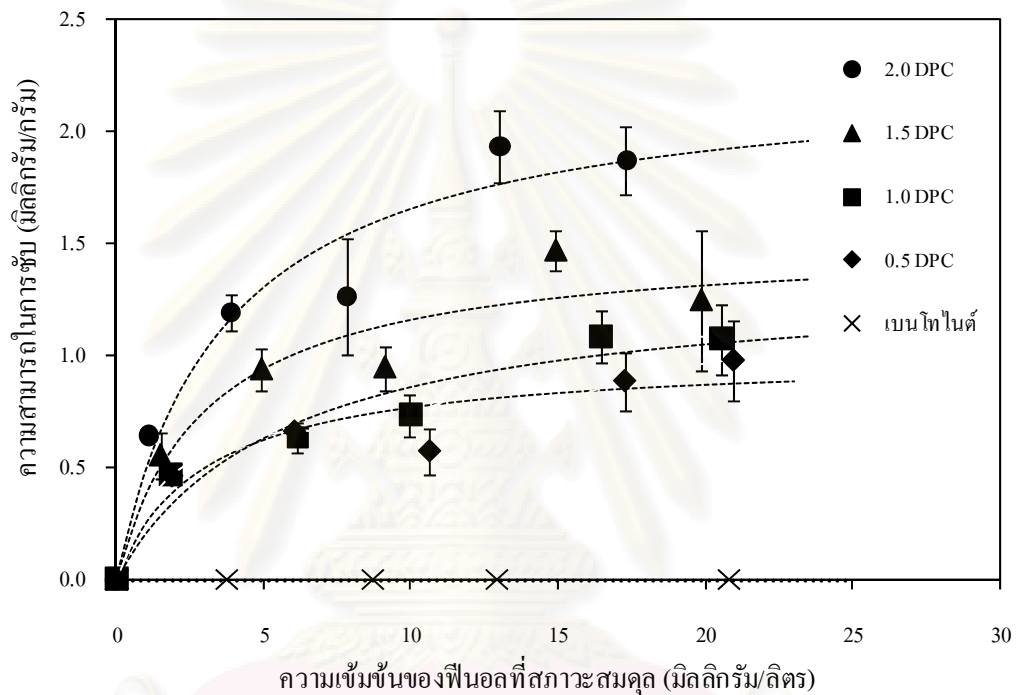
f	ระยะห่างระหว่างชั้น ($^{\circ}A$)	
	DPC-ออร์กาโนเคลย์	DTAB-ออร์กาโนเคลย์
0.5	14.92	14.43
1.0	17.73	18.32
1.5	18.52	18.24
2.0	17.87	18.27
โซเดียมเบนโทไนต์	15.28	

จากภาพที่ 4.4 ระยะห่างระหว่างชั้น (Interlayer) ของโซเดียมเบนโทไนต์ และออร์กาโนเคลย์ระหว่าง 2 ถึง 12 $^{\circ}$ (2θ) จะเห็นได้ว่าค่าสูงสุดของ DPC- และ DTAB-ออร์กาโนเคลย์เคลื่อนไปทางซ้าย (ที่ 2θ ต่ำ) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Suratchana (2006) ที่ทำการวิเคราะห์ระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ที่เตรียมจาก DPC ด้วยเครื่อง XRD ที่ค่าสัดส่วน 0.25 ถึง 2.00 เท่าของค่า CEC สรุปได้ว่าระยะห่างระหว่างชั้นดิน (Interlayer spacing) ขยายเนื่องจากโมเลกุลของ QACs เข้าไปแทรกในชั้นดิน

จากตารางที่ 4.2 แสดงระยะห่างระหว่างชั้นของตัวดูดซับ (อังสตรอม, $^{\circ}A$) ซึ่งระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ทั้ง 2 ชนิด มีค่าไม่ชัดเจนและไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงว่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

4.3 ไอโซเทอมการซัฟฟินอล

การทดลองส่วนนี้เป็นการทดลองแบบทีละเท เพื่อหาการซัฟฟินอลบนตัวกลางทั้ง 9 ชนิด ที่ความเข้มข้นฟินอลเริ่มต้น 5 10 15 20 25 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 7 ± 0.5 ที่อุณหภูมิห้อง ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$) จากการทำการทดสอบเบื้องต้น ได้ค่าเวลาที่เหมาะสมในการซัฟเท่ากับ 2 ชั่วโมงและปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่เหมาะสมเท่ากับ 0.10 กรัม (4 กรัมต่อลิตร) จากการทดสอบได้ ไอโซเทอมของการซัฟฟินอลดังนี้



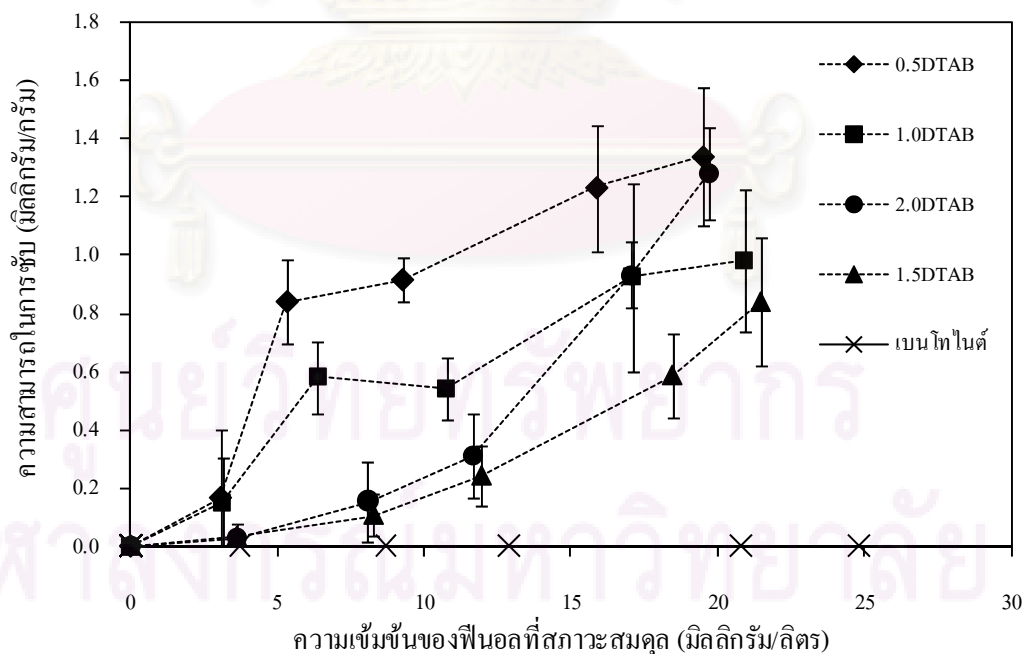
ภาพที่ 4.5 ไอโซเทอมการซัฟฟินอลบนตัวกลาง DPC-ออร์กาโนเคลย์
ที่พีเอชเท่ากับ 7 ± 0.5 อุณหภูมิห้อง ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$)

จากภาพที่ 4.5 แสดงไอโซเทอมการซัฟฟินอลบนตัวกลาง DPC-ออร์กาโนเคลย์ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ 0.5DPC 1.0DPC 1.5DPC และ 2.0DPC พบว่าความสามารถในการซัฟฟินอลสูงสุดคือออร์กาโนเคลย์ 2.0DPC และรองมาคือ 1.5DPC 1.0DPC และ 1.0DPC ตามลำดับ และจะสังเกตได้ว่า เมื่อปริมาณ DPC เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการซัฟเพิ่มขึ้นด้วย จากการศึกษาโดยใช้ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และฟรอนด์ลิช เพื่อหาไอโซเทอมที่เหมาะสมในการอธิบายกระบวนการซัฟที่เกิดขึ้น โดยค่าคงที่และตัวแปรต่างๆ ของไอโซเทอมการซัฟด้วย DPC-ออร์กาโนเคลย์แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตัวแปรไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และฟรุนด์ลิช

ตัวดูดซับ	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์			ไอโซเทอมแบบฟรุนด์ลิช		
	R^2	b (ลิตร./มก.)	q_m (มก./ก.)	R^2	K_f (ลิตร./ก.)	1/n
โซเดียมเบนโทไนด์	0.5022	0.0469	-5.5157	-	-	-
0.5 DPC	0.8687	0.2146	1.0819	0.7899	-0.427	0.2812
1.0 DPC	0.932	0.1803	1.3236	0.9367	-0.4512	0.3604
1.5 DCP	0.9368	0.2357	1.7077	0.8885	-0.3008	0.3337
2.0 DPC	0.9303	0.2539	2.2784	0.9491	-0.1982	0.3946

จากผลการทดลองพบว่า ไอโซเทอมการซับฟีนอลด้วย DPC-ออร์กาโนเคลย์ มีความสัมพันธ์ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่าฟรุนด์ลิช เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R -square, R^2) สูงกว่า ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี นอกจากนี้ค่าความสามารถการดูดซับมากที่สุด (q_m) ของไอโซเทอมแลงเมียร์อยู่ในช่วง 1.08 - 2.28 มิลลิกรัมต่อกรัม (ที่ออร์กาโนเคลย์ 0.5DPC - 2.0DPC) ซึ่งค่า q_m มากแสดงว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสูง (จรรยาพร พุ่มงาม, 2545)



ภาพที่ 4.6 ไอโซเทอมการซับฟีนอลบนตัวกลาง DTAB-ออร์กาโนเคลย์
ที่พีเอชเท่ากับ 7 ± 0.5 อุณหภูมิห้อง ($23 \pm 2^\circ\text{C}$)

ไอโซเทอมการซับฟีนอลบนตัวกลาง DTAB-ออร์กาโนเคลย์ แสดงดังภาพที่ 4.6 จากผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการซับฟีนอลสูงสุดคือ ออร์กาโนเคลย์ 0.5DTAB นั่นคือเมื่อปริมาณ DTAB เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการซับฟีนอลลดลง ออร์กาโนเคลย์ชนิด 1.5DTAB สามารถซับฟีนอลได้ต่ำที่สุด ในขณะที่ออร์กาโนเคลย์ 1.0DTAB และ 2.0DTAB มีความสามารถในการซับเท่าๆกัน และเมื่อหาไอโซเทอมที่เหมาะสมมาอธิบายกระบวนการซับที่เกิดขึ้นโดยใช้ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ฟรุנדลิช และเส้นตรง ได้ค่าคงที่และตัวแปรต่างๆของแต่ละไอโซเทอมดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ตัวแปรไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ฟรุנדลิช และเส้นตรง

ตัวดูดซับ	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์			ไอโซเทอมแบบฟรุנדลิช			แบบเส้นตรง	
	R^2	b (ลิตร./มก.)	q_m (มก./ก.)	R^2	K_f (l/กรัม)	1/n	K_d (l/กรัม)	R^2
0.5 DTAB	0.6523	-0.1797	0.7723	0.5067	0.7094	0.1780	0.0780	0.8312
1.0 DTAB	0.1271	-0.0183	-1.8258	0.8498	0.0453	1.0569	0.0515	0.9045
1.5 DTAB	0.7231	-0.0500	-0.0577	0.9984	0.0008	2.2383	0.0319	0.8691
2.0 DTAB	0.8538	-0.0545	-0.0631	0.9921	0.0006	2.5280	0.0514	0.8208

จากตารางที่ 4.4 พบว่า ไอโซเทอมการซับฟีนอลด้วย DTAB-ออร์กาโนเคลย์ มีความสัมพันธ์ที่ไม่ชัดเจน โดยที่ 0.5DTAB 1.0DTAB มีไอโซเทอมการซับแบบเส้นตรง เนื่องจากมีค่า R^2 สูงกว่าแบบอื่นๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เกิดกลไกการแบ่งแยกระหว่างสารละลายฟีนอล กับ ชั้นของสารอินทรีย์โดยส่วนหางหรือสายโซ่อัลคิลของ DTAB ซึ่งกลไกการแบ่งแยกนี้สามารถอธิบายเป็นสมการดังนี้

$$q_c = K_d C_c$$

โดยที่ q_c คือมวลของฟีนอลที่ถูกซับต่อมวลของออร์กาโนเคลย์ C_c คือ ความเข้มข้นของฟีนอล ณ สภาวะสมดุล และ K_d คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก ซึ่งหาได้จากความชันของกราฟไอโซเทอม และจากตารางที่ 4.2 ค่า K_d ของ 0.5DTAB - ออร์กาโนเคลย์ มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.08 กรัม^{-1} ที่ออร์กาโนเคลย์ 1.0DTAB มีค่า K_d เท่ากับ 0.05 กรัม^{-1} ตามลำดับ ในขณะที่ไอโซเทอมที่เหมาะสมของออร์กาโนเคลย์ชนิด 1.5DTAB และ 2.0DTAB คือแบบฟรุנדลิช เนื่องจากมีค่า R^2 สูงกว่าแบบเส้นตรงและแลงเมียร์ แสดงว่าเป็นการดูดซับที่ตัวดูดซับเรียงซ้อนกันหลายชั้น จากภาพที่ 4.6 เนื่องจากความสัมพันธ์ของไอโซเทอมมีค่าความสามารถในการดูดซับไม่แตกต่างกันมากนัก

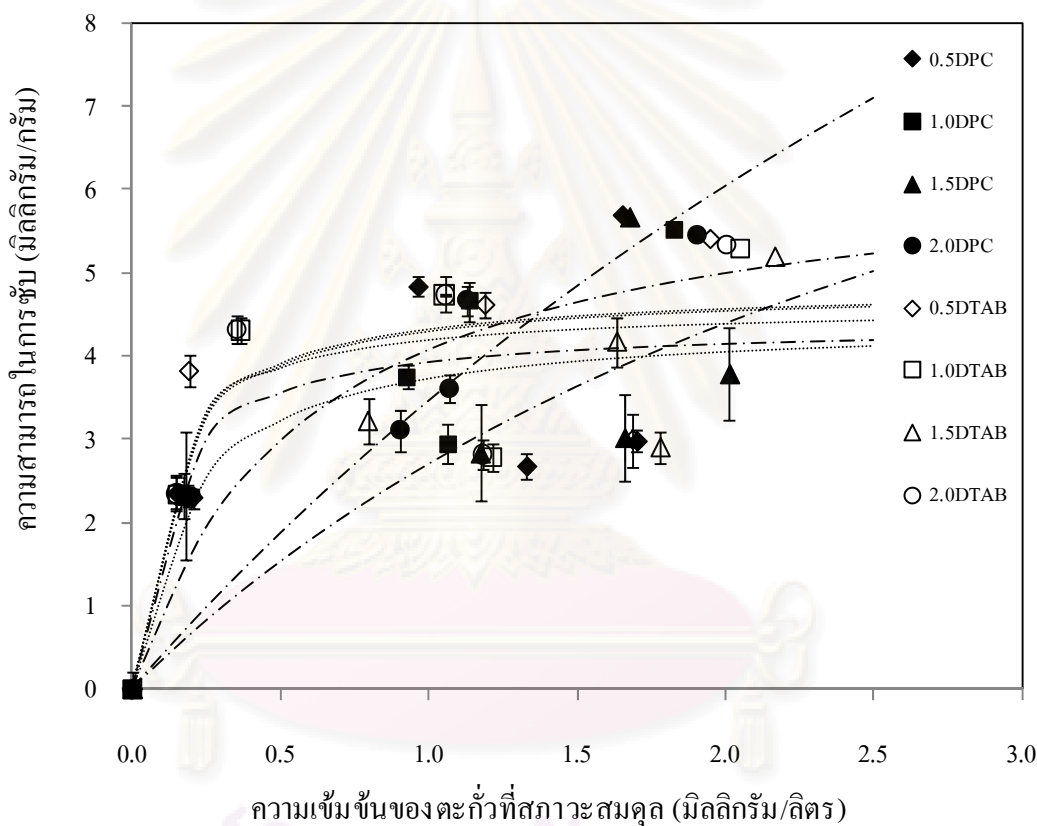
ดังนั้นปริมาณ DTAB ที่เติมลงไปเพื่อเตรียมเป็นออร์กาโนเคลย์ที่สัดส่วนต่างๆ (0.5-2.0 เท่าของค่า CEC) ไม่มีผลต่อการจับฟีนอล

จากไอโซเทอมการจับฟีนอลด้วย DPC-ออร์กาโนเคลย์ (ภาพที่ 4.5) อธิบายไอโซเทอมที่เหมาะสมคือแลงเมียร์ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Shen (2002) ได้ศึกษาการดูดซับฟีนอลด้วยการเตรียมออร์กาโนเคลย์จาก QACs ที่มีหมู่อัลคิลขนาดเล็กลง 5 ชนิด ที่มีโครงสร้างต่างกันไป ผลการวิจัยพบว่า BTMA-เบนโทไนด์ และ BTEA-เบนโทไนด์ (ออร์กาโนเคลย์ที่เตรียมจาก Benzyltrimethylammonium bromide (BTMA) และ Benzyltriethylammonium bromide (BTEA) อธิบายการดูดซับด้วยไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ได้เหมาะสม สอดคล้องกับการดูดซับฟีนอลด้วย DPC-ออร์กาโนเคลย์ เพราะ BTMA และ BTEA มีโครงสร้างส่วนหัวเป็นวงแหวนเบนซีน (Benzene ring) หรือ วงไพริดีเนียม (Pyridinium ring) เหมือนกับ DPC เพียงแต่แตกต่างกันที่ขนาดของหมู่อัลคิลเท่านั้น และงานวิจัยของ Shen (2004) ทำการศึกษาการจับฟีนอลด้วยแรงแคตไอออนที่มีประจุต่างกัน และใช้ QACs ได้แก่ Hexadecyltrimethylammonium (HDTMA) และ BTMA เตรียมเป็นออร์กาโนเคลย์ ซึ่ง HDTMA โครงสร้างคล้ายกับ DTAB แต่ HDTMA (คาร์บอน 16 อะตอม) ในขณะที่ BTMA มีโครงสร้างคล้ายกับ DPC ผลการศึกษาพบว่า HDTMA-ออร์กาโนเคลย์ อธิบายการจับด้วยไอโซเทอมแบบเส้นตรง ซึ่งสอดคล้องกับ 1.5DTAB- และ 1.0DTAB-ออร์กาโนเคลย์ ในขณะที่ BTMA-ออร์กาโนเคลย์ ใช้ไอโซเทอมแลงเมียร์ในการอธิบายกลไกการดูดซับที่เหมาะสม จากภาพที่ 4.5 และ 4.6 พบว่า DPC-ออร์กาโนเคลย์ มีความสามารถในการจับมากกว่า DTAB-ออร์กาโนเคลย์ เนื่องจากโครงสร้างของฟีนอลมีความชอบที่จะทำปฏิกิริยากับ QACs ที่มีส่วนหัวเป็นวงแหวนเบนซีน หรือ วงไพริดีเนียมมากกว่า และมีแรงดึงดูด ไฟ- อิเล็กตรอน (π - π interactions) ต่อกัน ดังนั้น DPC-ออร์กาโนเคลย์จึงมีความสามารถในการจับมากกว่า DTAB-ออร์กาโนเคลย์ (Gauthier และคณะ, 1987; Uhle และคณะ, 1999; Shen, 2004; Huang และคณะ, 2005) และ จากการทดสอบการจับฟีนอลด้วยโซเดียมเบนโทไนด์ พบว่าโซเดียมเบนโทไนด์ไม่สามารถกำจัดหรือดูดซับน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟีนอลได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 ไอโซเทอมการจับตะกั่ว

การทดลองเพื่อหาความสามารถในการจับตะกั่วบนตัวกลาง 9 ชนิด ที่ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 6 8 10 12 และ 14 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ± 0.5 ที่อุณหภูมิห้อง ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$) จากการทดสอบเบื้องต้น ได้ค่าเวลาที่เหมาะสมในการจับเท่ากับ 3 ชั่วโมงและปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่เหมาะสมเท่ากับ 0.05 กรัม (1 กรัมต่อลิตร) และพีเอชที่สภาวะสมดุลที่ความเข้มข้นตะกั่วต่างๆมีค่าลดลงไม่ถึง 1 หน่วย (ประมาณ 6.50-6.98) ซึ่งค่าพีเอชเริ่มต้นกับพีเอชที่สภาวะสมดุลมีค่าเปลี่ยนแปลงไปไม่มากนัก และผลการศึกษาได้ไอโซเทอมการจับตะกั่วดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 ไอโซเทอมการจับตะกั่วบนตัวกลางโซเดียมเบนโทไนด์ DPC- และ DTAB-ออร์กาโนเคลย์ ที่พีเอชเท่ากับ 7 ± 0.5 อุณหภูมิห้อง ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$)

เมื่อหาไอโซเทอมที่เหมาะสมมาอธิบายกระบวนการจับโดยใช้ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และฟรูนด์ลิช ได้ค่าคงที่และตัวแปรต่างๆของไอโซเทอมการจับดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตัวแปรไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และฟรุนด์ลิช

ตัวดูดซับ	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์			ไอโซเทอมแบบฟรุนด์ลิช		
	R^2	b (l/mg.)	q_m (mg./g.)	R^2	K_f (l/g.)	1/n
เบนโทไนด์	0.7568	-2.2193	1.7705	0.7398	-0.5388	0.9008
0.5 DPC	0.6614	18.8310	3.7397	0.2739	0.1986	0.5533
1.0 DPC	0.6814	1.6404	6.4851	0.7264	0.3398	0.5924
1.5 DPC	0.7255	11.6453	1.3784	0.4433	0.2259	0.5232
2.0 DPC	0.7985	8.1646	1.2523	0.8258	0.3570	0.5920
0.5 DTAB	0.7861	28.4819	1.2721	0.3018	0.1624	0.5896
1.0 DTAB	0.0751	14.8909	1.3324	0.3889	0.2120	0.6057
1.5 DTAB	0.7430	10.9426	1.3459	0.6107	0.2360	0.5371
2.0 DTAB	0.7549	15.1891	1.3247	0.4061	0.2141	0.6103

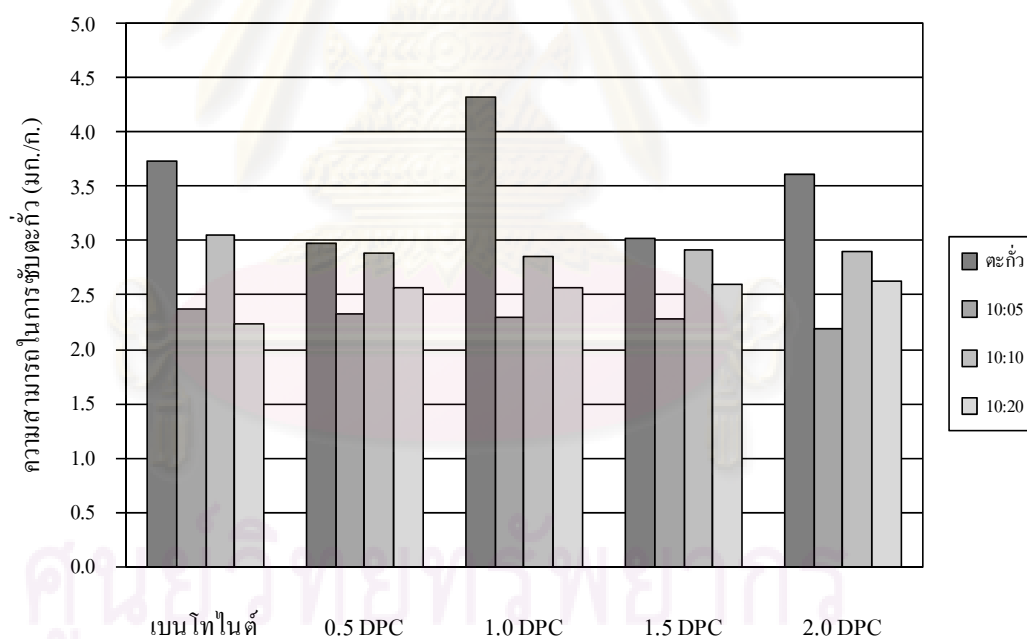
ตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าค่า R^2 ของทั้งไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และแบบฟรุนด์ลิชมีค่าประมาณ 0.7 ซึ่งมีค่าไม่สูงนัก แต่ R^2 ของไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มีค่าสูงกว่าแบบฟรุนด์ลิช ดังนั้นจึงเลือกไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มาอธิบายการจับตะกั่วด้วย DPC- และ DTAB-ออร์กาโนเคลย์ คือเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว และเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี และจากค่า q_m ในตารางที่ 4.5 พบว่าออร์กาโนเคลย์ 1.0DPC มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด รองมาคือ 0.5DPC โขเดียมเบนโทไนด์ 1.5DPC 1.5DTAB 1.0DTAB 2.0DTAB 0.5DTAB และ 2.0DPC ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่า โขเดียมเบนโทไนด์มีความสามารถในการกำจัดตะกั่วสูงกว่า DTAB-ออร์กาโนเคลย์ และ DPC-ออร์กาโนเคลย์บางชนิด ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างโซเดียม (Na^+) ในโซเดียมเบนโทไนด์กับตะกั่ว (Pb^{2+}) (Sheng และคณะ, 1999 และ Lee และคณะ, 2002) เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับด้วยโซเดียมเบนโทไนด์ กับ DPC-ออร์กาโนเคลย์ พบว่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดคือ 1.0DPC (มีค่า q_m เท่ากับ 6.49 มิลลิกรัมต่อกรัม) และรองมาคือ 0.5DPC โขเดียมเบนโทไนด์ 1.5DPC และ 2.0DPC ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณ DPC เพิ่มขึ้นการดูดซับตะกั่วลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Oyanedel-Craver (2006) ที่ศึกษาการดูดซับแคดเมียม และตะกั่วบนตัวกลางที่เตรียมจาก HDTMA และ BTEA พบว่าความสามารถในการดูดซับน้อยลง เมื่อปริมาณ QACs สูงขึ้น เนื่องจากที่สัดส่วน CEC สูง มีปริมาณ QACs เข้าไปแลกเปลี่ยนประจุกับประจุ Na^+ ของโซเดียมเบนโทไนด์สูงอีกทั้ง QACs มีสายโซ่อัลคิลยาว ดังนั้น จึงมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้น้อย และเมื่อเปรียบเทียบการดูดซับตะกั่วด้วยโซเดียมเบนโทไนด์ และDTAB-ออร์กาโนเคลย์ พบว่าโซเดียมเบนโทไนด์

มีค่า q_m (เท่ากับ 1.77 มิลลิกรัมต่อกรัม) มากที่สุด หรือมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่า 1.5DTAB 1.0DTAB 2.0DTAB และ 0.5DTAB ตามลำดับ ในขณะที่ DTAB-ออร์กาโนเคลย์ มีค่า q_m .ใกล้เคียงกันประมาณ 1.20-1.40 มิลลิกรัมต่อกรัม จึงสรุปได้ว่าปริมาณ DTAB ที่ใช้เตรียม ออร์กาโนเคลย์ไม่มีผล หรือมีผลน้อยมากต่อการดูดซับตะกั่ว

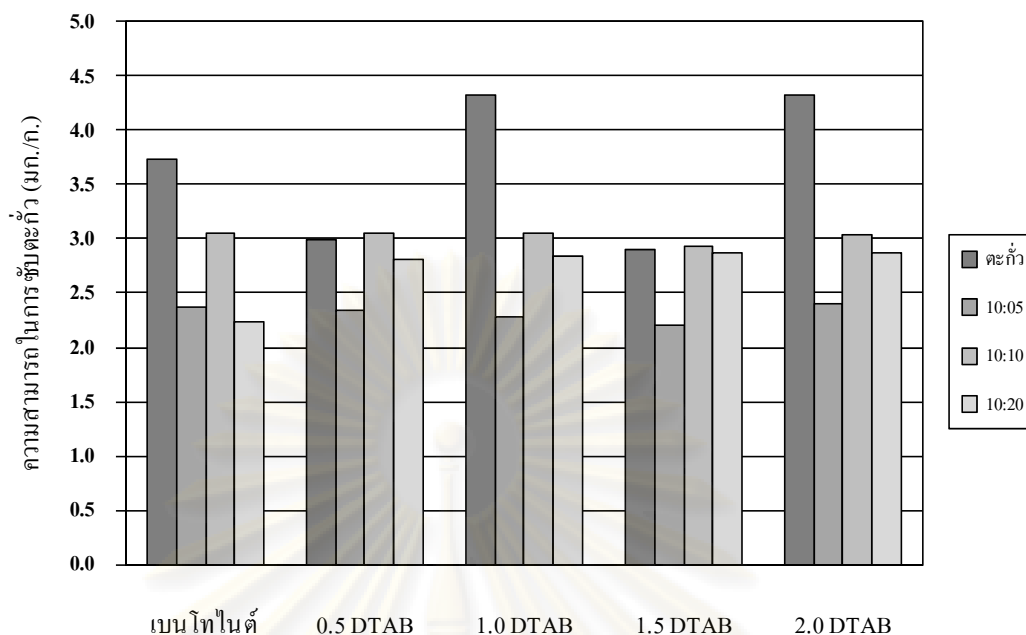
4.5 ผลกระทบของฟีนอลต่อการจับตะกั่ว และผลกระทบของตะกั่วต่อการจับฟีนอล

ผลกระทบของฟีนอลต่อการจับตะกั่ว

ผลการศึกษาผลกระทบของฟีนอลต่อการจับตะกั่วโดยควบคุมความเข้มข้นของ ตะกั่วและแปรผันค่าความเข้มข้นฟีนอลด้วยอัตราส่วนความเข้มข้นตะกั่วต่อฟีนอลเท่ากับ 10:5 10:10 และ 10:20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 7 ± 0.5 อุณหภูมิห้อง ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$) ปริมาณ ตัวจับเท่ากับ 0.05 กรัม และปริมาณน้ำเสียผสมเท่ากับ 25 มิลลิกรัม ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4.8 และ 4.9



ภาพที่ 4.8 ผลกระทบของฟีนอลต่อการจับตะกั่วบนตัวกลางโซเดียมเบนโทไนต์ และ DPC-ออร์กาโนเคลย์

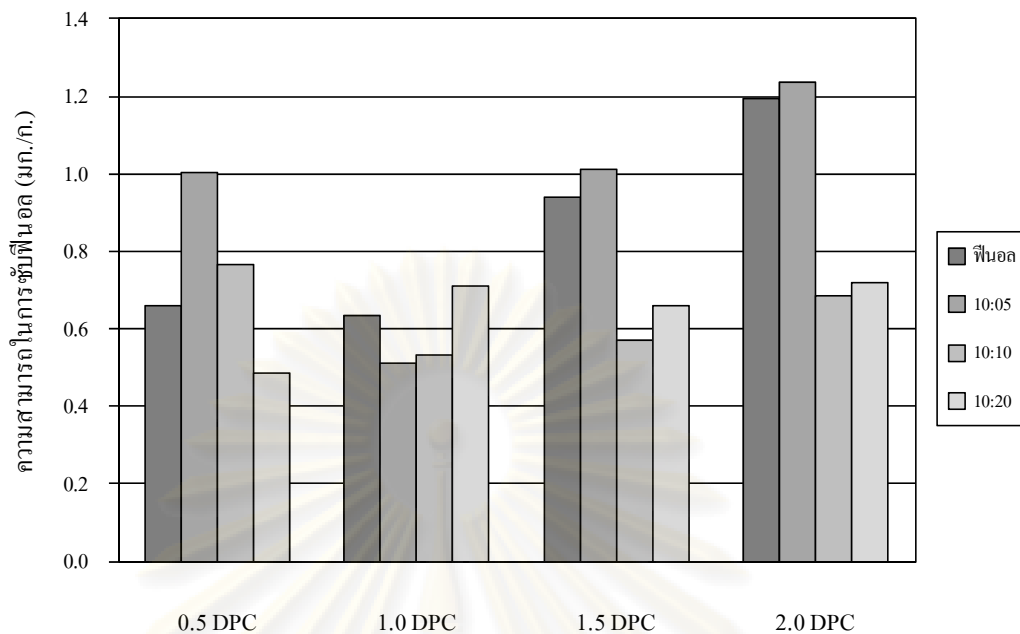


ภาพที่ 4.9 ผลกระทบของฟีนอลต่อการจับตะกั่วบนตัวกลางโซเดียมเบนโทไนด์ และ DTAB-ออร์กาโนเคลย์

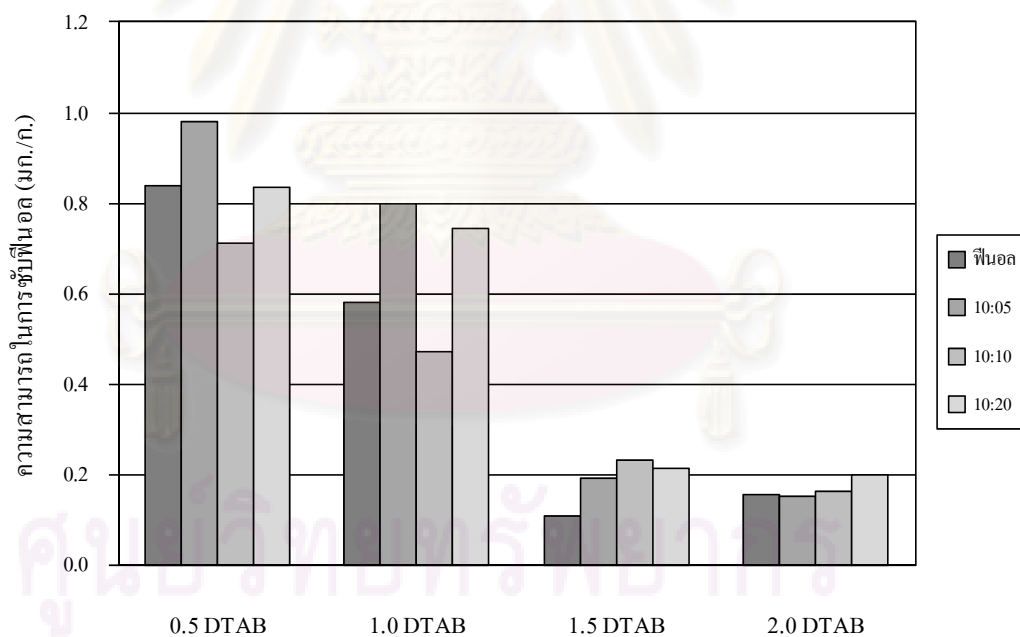
ภาพที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าในน้ำเสียตะกั่ว โซเดียมเบนโทไนด์ และออร์กาโนเคลย์ มีค่าความสามารถในการจับตะกั่วสูงที่สุด ในขณะที่ในน้ำเสียผสมระหว่างตะกั่วกับฟีนอลในทุกความเข้มข้นมีค่าความสามารถในการจับใกล้เคียงกันและลดลงจากน้ำเสียฟีนอลเพียงเล็กน้อย

ผลกระทบของตะกั่วต่อการดูดซับฟีนอล

ผลการศึกษาผลกระทบของตะกั่วต่อการจับฟีนอลโดยควบคุมความเข้มข้นของฟีนอลและแปรผันค่าความเข้มข้นตะกั่วด้วยอัตราส่วนความเข้มข้นฟีนอลต่อตะกั่วเท่ากับ 10:5 10:10 และ 10:20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 7 ± 0.5 อุณหภูมิห้อง ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$) ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.05 กรัม และปริมาณน้ำเสียผสมเท่ากับ 25 มิลลิกรัม ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4.10 และ 4.11



ภาพที่ 4.10 ผลกระทบของตะกั่วต่อการจับฟีนอลบนตัวกลางและ DPC-ออร์กาโนเคลย์



ภาพที่ 4.11 ผลกระทบของตะกั่วต่อการจับฟีนอลบนตัวกลาง และ DTAB-ออร์กาโนเคลย์

ภาพที่ 4.10 และ 4.11 พบว่าโซเดียมเบนโทไนด์ไม่สามารถจับฟีนอลในน้ำเสียฟีนอลและน้ำเสียผสมระหว่างฟีนอลและตะกั่วได้ ค่าความสามารถในการจับฟีนอลในน้ำเสียฟีนอลและน้ำเสียผสมนั้นมีค่าใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมากนัก

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าฟีนอลและตะกั่วไม่มีผลต่อการจับซึ่งกันและกัน ดังนั้นจึงไม่เกิดการแข่งขันกันจับระหว่างฟีนอลและตะกั่วบนตัวกลางทั้ง 9 ชนิด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yoo และคณะ (2004) ทั้งนี้เนื่องจากการจับฟีนอลและตะกั่วเป็นกลไกที่ต่างชนิดกันโดยที่ฟีนอลเกิดกลไกทางเคมีและการแบ่งแยก ในขณะที่กลไกการจับตะกั่วเกิดการแลกเปลี่ยนประจุที่ช่องว่างระหว่างชั้นและผิวของโซเดียมเบนโทไนด์

4.6 ศึกษาความสามารถในการคายออกของควอเตอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน ฟีนอล และ/หรือ ตะกั่ว

การทดลองหาความสามารถในการคายออกของ QACs ฟีนอล และ/หรือ ตะกั่ว หลังจากทำการทดลองดูดซับน้ำเสียฟีนอล และ/หรือตะกั่วเรียบร้อยแล้ว โดยใช้วิธี Waste Extraction Test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ.2548 ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ความสามารถในการคายออกของ QACs ฟีนอล และ/หรือ ตะกั่ว หลังจากทำการทดลองดูดซับน้ำเสียฟีนอล และ/หรือตะกั่ว

ตัวดูดซับ	ความเข้มข้นก่อนการคายออก (มก./ลิตร)			ความเข้มข้นในการคายออก (มก./ลิตร)		
	QACs	ฟีนอล	ตะกั่ว	QACs	ฟีนอล	ตะกั่ว
2.0DPC	2.5552	-	-	2.4845	-	-
2.0DTAB	2.7755	-	-	2.5120	-	-
ออร์กาโนเคลย์ ที่ดูดซับฟีนอล	-	-	-	0.0959	3.2548	-
ออร์กาโนเคลย์ ที่ดูดซับตะกั่ว	-	-	-	-	-	5.0826
ออร์กาโนเคลย์ ที่ดูดซับฟีนอล และตะกั่ว	-	-	-	-	5.2902	3.4770

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นในน้ำสกัดของ QACs ฟีนอล และตะกั่ว ด้วยวิธี WET นั้นออร์กาโนเคลย์ทั้ง 2 ชนิดมีค่าความเข้มข้นของ QACs เท่ากับปริมาณ QACs ที่ใส่ไปเพื่อเตรียมออร์กาโนเคลย์ แสดงว่าออร์กาโนเคลย์มีการคายออก (Desorption) ของ QACs ทั้ง 2 ชนิด และค่าความเข้มข้นในการคายออกของฟีนอลและตะกั่วนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ.2548) ลงวันที่ 25 มกราคม 2549 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว, ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 123 ตอนพิเศษ 11ง ซึ่งกำหนดให้ลักษณะวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่จัดเป็นของเสียอันตรายคือวัสดุที่มีค่าพีเอชต่ำกว่า 2 หรือสูงกว่า 12.5 ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่ามาตรฐานดัชนีคุณภาพน้ำสกัดที่ไม่ใช้แล้วที่จัดเป็นของเสียอันตราย (กระทรวงอุตสาหกรรม, พ.ศ. 2548)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
1. ตะกั่ว และ/หรือ สารประกอบตะกั่ว (Lead and/or lead compounds)	ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. เพนตาคลอโรฟีนอล (Pentachlorophenol)	ไม่มากกว่า 1.7 มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นในการคายออกของฟีนอลและตะกั่วกับค่ามาตรฐานพบว่าค่าความเข้มข้นของตะกั่วและฟีนอลในน้ำสกัดเกินค่ามาตรฐาน ดังนั้นจึงจัดเป็นวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ.2548) ซึ่งต้องมีการกำจัดที่ได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม เช่น การฝังกลบที่ปลอดภัย

4.7 ประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น

ประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการเตรียม DPC- และ DTAB-ออร์กาโนเคลย์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ควอเทอร์นารีแอมโมเนียม แคตไอออน

1. Dodecylpyridinium chloride (DPC) 94% ขนาด 250 กรัม ราคา 5,061 บาท
2. Dodecyltrimethylammonium bromide (DTAB) 98% ขนาด 25 กรัม ราคา 4,783 บาท

เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่มีการผลิต DPC และ DTAB แบบ Commercial grade เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมออกมาขายทำให้ QACs ทั้ง 2 ชนิดมีราคาแพง จึงไม่เหมาะในการนำมาใช้เตรียมออร์กาโนเคลย์เพื่อบำบัดน้ำเสียในระดับอุตสาหกรรม

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองศึกษาการนำออร์กาโนเคลย์ที่เตรียมจากการปรับสภาพโซเดียมเบนโทไนด์ด้วยควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน (Quaternary Ammonium Cations, QACs) ได้แก่ โดเดซิลไพริดีเนียม คลอไรด์ (Dodecylpyridinium chloride, DPC) และ โดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียม โบรไมด์ (Dodecyltrimethylammonium bromide, DTAB) ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการกำจัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟีนอล และ/หรือ ตะกั่ว จากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ความสามารถในการดูดซับทั้ง DPC และ DTAB บนตัวกลางโซเดียมเบนโทไนด์สามารถดูดซับได้เกินค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (CEC) ของโซเดียมเบนโทไนด์ โดยในช่วงแรก 0.25 – 1.00 เท่าของค่า CEC DPC และ DTAB มีความสามารถในการดูดซับสูงและดูดซับด้วยกลไกการแลกเปลี่ยนประจุบวก ในขณะที่ช่วงหลังคือช่วงที่ปริมาณ QACs มากกว่าค่า CEC ของโซเดียมเบนโทไนด์ QACs ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นด้วยแรงวานเดอร์วาลส์จากโครงสร้างในส่วนของ QACs

5.1.2 จากผลการศึกษาคุณสมบัติของตัวดูดซับพบว่า ผลวิเคราะห์ระยะห่างระหว่างชั้นของตัวดูดซับ (XRD) พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ทั้ง 8 ชนิด ไม่แตกต่างกันกับโซเดียมเบนโทไนด์มากนัก และ ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว (FTIR) ไม่เด่นชัด แต่มีหมู่ฟังก์ชันบางหมู่ของออร์กาโนเคลย์เพิ่มขึ้นจากโซเดียมเบนโทไนด์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าโซเดียมเบนโทไนด์มี QACs เข้าไปแลกเปลี่ยนประจุ และทำให้ออร์กาโนเคลย์มีสมบัติเปลี่ยนแปลงจากชอบน้ำ (Hydrophilic) เป็นไม่ชอบน้ำหรือชอบสารอินทรีย์แทน (Hydrophobic หรือ Organophilic)

5.1.3 การดูดซับฟีนอลด้วย DPC-ออร์กาโนเคลย์เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ DPC เพิ่มขึ้น (ที่ค่าสัดส่วนเท่าของ CEC สูงๆ) และมีไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ คือมีการดูดซับแบบชั้นเดียวและเป็นการดูดซับทางเคมี ขณะที่ DTAB- ออร์กาโนเคลย์อธิบายด้วยไอโซเทอมหลายรูปแบบ โดยที่ปริมาณ DTAB น้อยที่สุดมีความสามารถในการดูดซับสูงที่สุด และ DTAB-ออร์กาโนเคลย์ทั้ง 4 ชนิด มีความสามารถในการจับฟีนอลไม่แตกต่างกัน แสดงว่าปริมาณ DTAB ที่เตรียมเป็นออร์กาโนเคลย์ไม่มีผลต่อการจับฟีนอล และเนื่องจาก DPC มีโครงสร้างส่วนหัวเป็นวงไพริดีเนียม

(วงเบนซิน) เหมือนกับฟีนอล และเกิดแรงไอ-อิเล็กตรอน (π - π interaction) ต่อกัน ทำให้ DPC-ออร์กาโนเคลย์มีความสามารถในการกำจัดฟีนอลมากกว่า DTAB-ออร์กาโนเคลย์

5.1.4 การจับตะกั่วด้วยโซเดียมเบนโทไนด์ DPC-และ DTAB-ออร์กาโนเคลย์ ในทุกรูปแบบไอโซเทอมมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ หรือ R^2 ประมาณ 0.7 แต่ได้เลือกอธิบายไอโซเทอมที่เหมาะสมด้วยไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ โดยที่โซเดียมเบนโทไนด์สามารถดูดซับตะกั่วได้ดี เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างโซเดียม (Na^+) ในโซเดียมเบนโทไนด์กับตะกั่ว (Pb^{2+}) สำหรับความสามารถในการดูดซับ DPC-ออร์กาโนเคลย์พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ DPC ความสามารถในการดูดซับตะกั่วลดลง เนื่องจากที่สัดส่วน CEC สูง มีปริมาณ QACs เข้าไปแลกเปลี่ยนประจุกับประจุ Na^+ ของโซเดียมเบนโทไนด์สูงอีกทั้ง QACs มีสายโซ่อัลคิลยาว ดังนั้นจึงมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้น้อย ในขณะที่ DTAB-ออร์กาโนเคลย์มีความสามารถในการดูดซับไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า DPC-ออร์กาโนเคลย์ และ โซเดียมเบนโทไนด์มีความสามารถในการกำจัดตะกั่วได้ดีกว่า DTAB-ออร์กาโนเคลย์

5.1.5 จากการศึกษาผลกระทบของฟีนอลต่อการจับตะกั่วพบว่า ตัวดูดซับทุกชนิด (9 ชนิด) มีความสามารถในการจับน้ำเสียตะกั่วได้สูงที่สุด ในขณะที่ในน้ำเสียผสมระหว่างตะกั่วกับฟีนอลมีค่าใกล้เคียงกันแต่มีค่าความสามารถในการจับไม่แตกต่างจากน้ำเสียตะกั่วมากนัก และผลการศึกษาผลกระทบของตะกั่วต่อการจับฟีนอลพบว่า ค่าความสามารถในการจับฟีนอลในน้ำเสียฟีนอล และน้ำเสียผสมระหว่างฟีนอลกับตะกั่ว มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ฟีนอลและตะกั่วไม่มีผลต่อการจับซึ่งกันและกัน ดังนั้นจึงไม่เกิดการแข่งขันกันดูดซับระหว่างฟีนอลและตะกั่วบนตัวกลางทั้ง 9 ชนิด ซึ่งเนื่องจากการจับฟีนอลและตะกั่วเป็นกลไกที่ต่างชนิดกัน โดยที่ฟีนอลเกิดกลไกทางเคมีและการแบ่งแยก ในขณะที่กลไกการจับตะกั่วเกิดการแลกเปลี่ยนประจุที่ช่องว่างระหว่างชั้นและผิวของโซเดียมเบนโทไนด์

ดังนั้นงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวนเบนซิน และน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะที่มีประจุบวก 2 เนื่องจากตัวดูดซับมีประสิทธิภาพสามารถบำบัดสารปนเปื้อนได้ทั้ง 2 ชนิด

5.1.6 การศึกษาการคายออกด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) พบว่า ออร์กาโนเคลย์ที่ผ่านขั้นตอนการจับฟีนอล และ/หรือ ตะกั่ว มีค่าเกินกว่ามาตรฐาน ดังนั้นจึงจัดเป็นวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2548) ซึ่งต้องมีการกำจัดที่ได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม เช่น การฝังกลบอย่างปลอดภัย เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ออร์กาโนเคลย์สามารถกำจัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์และโลหะหนักได้ ใช้ประโยชน์ในการบำบัดเบื้องต้นในดินที่มีความปนเปื้อนสารอินทรีย์และโลหะหนัก หรือใช้ควบคู่กับถ่านกัมมันต์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์และโลหะหนักได้ อีกทั้งมีงานวิจัยที่ผ่านมา ออร์กาโนเคลย์สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) ได้แต่ทั้งนี้ต้องดูปัจจัยอื่นๆประกอบ

5.2.1 ควรทำการศึกษาการกำจัดสารที่ปนเปื้อนฟีนอลและตะกั่วหรือโลหะหนักชนิดอื่นๆกับสารปนเปื้อนหรือน้ำเสียจริงทั้งวิธีการทดลองแบบที่ละเท และแบบคอลัมน์

5.2.2 ออร์กาโนเคลย์ที่เตรียมจาก DPC และ DTAB ไม่คุ้มทุนสำหรับระบบใหญ่ๆ เนื่องจาก QACs ทั้งสองชนิดนี้มีราคาแพง ควรทำการศึกษาการเตรียมออร์กาโนเคลย์จาก QACs ที่ราคาถูก หรือหากต้องการนำไปใช้งานจริงควรรหาข้อมูลออร์กาโนเคลย์ที่มีจำหน่ายประกอบการตัดสินใจ

5.2.3 ควรทำการศึกษาผลกระทบและความปลอดภัยทางสิ่งแวดล้อม และความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ในการใช้ออร์กาโนเคลย์บำบัดสารปนเปื้อนเปรียบเทียบกับตัวดูดซับอื่นๆ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กิตติยศ ตั้งสัจจวงศ์. 2548. การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดฟีนอลโดยใช้หลอดผลิตรังสี UV-A และ UV-C ในกระบวนการ UV/H₂O. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2546. ของเสียอันตราย (Hazardous Waste). นนทบุรี.
- จรรยาพร พุ่มงาม. 2545. การกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยใช้เปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชนัญญา อยู่ชู. 2550. สมบัติในการดูดซับโลหะของซลิคาที่มีสารต้นแบบเป็นสารลดแรงตึงผิวแคตไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชฎาภรณ์ บุญแท้. 2545. การดูดซับโลหะหนักบางชนิดจากน้ำเสียด้วยดินเบา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณัฐ ดิลกเกียรติ. 2546. ตัวดูดซับที่ผลิตจากดินค้ำผสมกะลามะพร้าวหรือกะลาปาล์มเพื่อการดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทรรศพร พิศรูป. 2548. การดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์สำหรับสารเคลือบผิวอะคริลิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิธิยา รัตนานนท์ และ วิบูลย์ รัตนานนท์. 2543. สารพิษในอาหาร. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- ปริญญา บุญส่งแท้. 2544. การกำจัดตะกั่ว(+2) และซีเลเนียม(+4) ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกากตะกั่วจากการหลอมเหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัตนวรรณ มกรพันธุ์. 2551. นาโนเคลย์/นาโนคอมโพสิต (NANOCLAY/ NANOCOMPOSITES). วารสาร LAB.TODAY [ออนไลน์] แหล่งที่มา: http://www.thaiscience.com/lab_vol/p18/NANOCLAY.asp [11 กันยายน 2551]

- วัลย์กร นิตยพัฒน์. 2547. การเตรียมฟิล์มนาโนคอมโพสิตออร์กาโนเคลย์/พอลิพรอพิลีนที่ย้อมสีได้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สถาพร คูวิจิตรจากร. 2542. ปฏิพิภคศาสตร์. โลบรารี นาย พับลลขซง.
- สุปรานล แก้วภรรมย์. 2550. ภาวะมลพิษจากโรงกลั่นน้ำมัน. สำนักบรการวชการ มหาลยบูรพา. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: http://www.uniserv.buu.ac.th/forum2/post.asp?method=TopicQuote&TOPIC_ID=1789&FORUM_ID=7 [8 กันยายน 2551]
- สมพงศ จันทรโพธิศร. 2541. เคมีอินทรีย์. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ หองสมุดกรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. 2551. การวิเคราะห์ปัญหาอุปสงค์ และ SWOTของอุตสาหกรรมสิ่งทอไทย. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://library.dip.go.th/multim4/eb/EB%20141.9.doc> [3 กุมภาพันธ์ 2551]
- อัญชลล สุธชประการ. 2534. แร่ในดิน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร. อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2540. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2540). กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2540. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540). กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2548. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องการจัดตั้งปฏิภคหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว (พ.ศ. 2548). กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.
- เอมมา อาสนจินดา. 2545. ผลของสารคีเลตต่อการดูดซับตะกั่วจากสารละลายด้วยไคโตซานแบบโครงสร้างตาข่าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดลอม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Alther, G.R. 1995. Organically modified clay removes oil from water. Waste Management 15(8): 623-628
- Andini, S., Cioffi, R., Montagnaro, F., Pisciotta, F. and Santoro, L. 2006. Simultaneous adsorption of chlorophenol and heavy metal ions on organophilic bentonite. Applied Clay Science 31: 126-133.
- Bartelt-Hunt, S. L., Burn, S. E. and Smith, J. A. 2003. Nonionic organic solute sorption onto two organobentonites as a function of organic-carbon content. Journal of Colloid and Interface Science 266: 251-258.

- Beall, G.W. 2003. The use of organo-clays in water treatment. Applied Clay Science 24: 11-20.
- Brownawell, B. J., Chen, H., Collier, J. M. and Westall, J. C. 1990. Adsorption of organic cations to natural materials. Environmental Science & Technology 24: 1234-1241.
- Chanchaivong, S. and Khaodhiar, S. 2009. Adsorption of naphthalene and phenanthrene on dodecylpyridinium-modified bentonite. Applied Clay Science 43: 317-321.
- Changchaivong, S. 2006. Adsorption of Polycyclic aromatic hydrocarbons from Synthetic Wastewater by Organoclays. Master's Thesis of Science Program in Environmental Science. Graduate School. Chulalongkorn University.
- Chen, B., Zhu, J. and Zhu, B. 2005. Configurations of the bentonite-sorbed myristylpyridinium cation and their influences on the uptake of organic compounds. Environmental Science & Technology 39(16): 6093-6100.
- Chirandorn, N. 2004. Adsorption of mercury using bentonite, china clay and ball clay. Master's Thesis of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science. Environmental Science. Faculty of Science. Chulalongkorn University.
- FeF Chemicals. 2008. Quaternary Ammonium Compounds [Online]. Available from: http://www.fefchemicals.com/quaternary_ammonium_compounds.htm [2008, August 3]
- Froehner, S., Martins, F. R., Furukawa, W. and Errera, R. M. 2009. Water Remediation by Adsorption of phenol onto Hydrophobic Modified Clay. Water, Air, & Soil Pollution 199: 107-113.
- P&G financial figures. 2005. Surfactants [Online]. Available from: http://www.scienceinthebox.com/en_UK/glossary/surfactants_en.html [2008, August 3]
- Gauthier T. D., Seitz W. R. and Grant C. L. 1987. Effect of structural and compositional variations of dissolved humic materials on pyrene Koc values. Environmental Science & Technology 21: 243-248.
- Groisman, L., Rav-Acha, C., Gerstl, Z. and Mingelgrin, U. 2004. Sorption of organic compounds of varying hydrophobicities from water and industrial wastewater by long- and short-chain organoclays. Applied Clay Science 18: 309-326.
- Gürses, A., Yalçın, M., Sözbilir, M. and Dogar, C. 2003. The investigation of adsorption thermodynamics and mechanism of a cationic surfactant, CTAB, onto powdered active carbon. Fuel Processing Technology 81: 55-66.

- Homnium, B. 2006. Mechanical and thermal properties of liquid crystal polymer/organoclay composite. Master's Thesis of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science Environmental Science. Faculty of Science. Chulalongkorn University.
- Huang H. C., Lee J. F., Chao H. P., Yeh P. W., Yang Y. F. and Liao W. L. 2005. The influences of solid-phase organic constituents on the partition of aliphatic and aromatic organic contaminants. Journal of Colloid and Interface Science 286: 127-133.
- Koh, S. M. and Dixon, J. B. 2001. Preparation and application of organo-minerals as sorbents of phenol, benzene and toluene. Applied Clay Science 18: 111-122.
- Koh, S. M., Song, M. S. and Takagi, T. 2005. Mineralogy, chemical characteristics and stabilities of Cetylpyridinium-exchanged smectite. Clay Minerals 40: 213-222.
- Kotresha, D. and Vidyasagar, G. M. 2007. Isolation and characterisation of phenol -degrading *Pseudomonas aeruginosa* MTCC 4996. World Journal of Microbiology and Biotechnology 24: 541-547.
- Kowalska, M., Guler, H. and Cocke, D. L. 1994. Interactions of clay minerals with organic pollutants. The Science of the Total Environment 141: 223-240.
- Kwolek, T., Hodorowicz, M., Stadnicka, K. and Czapkiewicz, J. 2003. Adsorption isotherms of homologous alkyltrimethylbenzylammonium bromides on sodium montmorillonite. Journal of Colloid and Interface Science 264: 14-19.
- LaGrega, M.D., Buckingham, P. L. and Evans. J.C. 2001. Hazardous waste management. 2 nd ed. New York: McGraw-Hill.
- Lawrence, M. A. M., Kukkadapu, R. K. and Boyd, S. A. 1998. Adsorption of phenol and chlorinated phenols from aqueous solution by tetramethylammonium- and tetramethylphosphonium-exchanged montmorillonite. Applied Clay Science 13: 13-20.
- Lee, J. J., Choi, J. and Park, J. W. 2002. Simultaneous sorption of lead and chlorobenzene by organobentonite. Chemosphere 49(10): 1309-1315.
- Lee, S. Y. and Kim, S. J. 2002a. Expansion of smectite by hexadecyltrimethylammonium. Clays and Clay minerals 50(4): 435-445.
- Lo, M. C. and Mak, K. M. 1998. Transport of phenolic compounds through a compacted organoclay liner. Water Science and Technology 38(2): 143-150.
- Ma, J. and Zhu, L. 2007. Removal of phenols from water accompanied with synthesis of organobentonite in one-step process. Chemosphere 68: 1883-1888.

- Masqué, C., Nolla, M. and Bordons, A. 1987. Selection and adaptation of a phenol-degrading strain of *Pseudomonas*. Biotechnology Letters 9(9): 655-660.
- Oyanedel-Craver, V. A., Fuller, M. and Smith, J. A. 2007. Simultaneous sorption of benzene and heavy metals onto two organoclays. Journal of Colloid and Interface Science 309: 485-492.
- Oyanedel-Craver, V. A. and Smith, J. A. 2006. Effect of quaternary ammonium cation loading and pH on heavy metal sorption to Ca bentonite and two organobentonites. Journal of Hazardous Materials 137(2): 1102-1114.
- Pal, O. R. and Vanjara, A. K. 2001. Removal of malathion and butachlor from aqueous solution by clays and organoclays. Separation and Purification Technology 24: 167-172.
- Rawajfih, Z. and Nsour, N. 2006. Characteristics of phenol and chlorinated phenol sorption onto surfactant-modified bentonite. Journal of colloid and interface science 298: 39-49.
- Shen, Y. H. 2002. Removal of phenol from water by adsorption-flocculation using organobentonite. Water Research 36: 1107-1114.
- Shen, Y. H. 2004. Phenol sorption by organoclays having different charge characteristics. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 232: 143-149.
- Sheng, G., Xu, S. and Boyd, S. A. 1999. A dual function organoclay sorbent for lead and chlorobenzene. Soil Science Society of America Journal 63: 73-78.
- Sigma-Aldrich Co. 2007. Material Science [Online]. Available from: <http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/material-science-products.html?TablePage=16378837> [2008 9th July]
- Uhle M. E., Chin Y. P., Aiken G. R. and Mcknight D. M. 1999. Binding of polychlorinated biphenyls to aquatic humic substances: the role of substrate and sorbate properties on partitioning. Environmental Science & Technology 33: 2715-2718.
- Upson, R. T. and Burns, S. E. 2006. Sorption of nitroaromatic compounds to synthesized organoclays. Journal of Colloid and Interface Science 297:70-76.
- World Health Organization. 1981. Environmental Health Criteria 3: Lead. Geneva
- Xu, L. and Zhu, L. 2007. Structures of hexamethonium exchanged bentonite and the sorption characteristics for phenol. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 307:1-6.

- Xi, Y., Ding, Z., He, H. and Frost, R. L. 2005. Infrared spectroscopy of organoclays synthesized with the surfactant octadecyltrimethylammonium bromide. Spectrochimica Acta Part A 61: 515-525.
- Yang, L., Zhou, Z., Xiao, L. and Wang, X. 2003. Chemical and Biological Regeneration of HDTMA-Modified Montmorillonite after Sorption with Phenol. Environmental Science & Technology 37(21): 5057-5061.
- Yildiz, N., Gonulsen, R., Koyuncu, H. and Calimli, A. 2005. Adsorption of benzene acid and hydroquinone by organically modified bentonites. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 260: 87-94.
- Yoo, J., Choi, J., Lee, T. and Park, J. 2004. Organobentonite for sorption and degradation of phenol in the presence of heavy metals. Water, Air, & Soil Pollution 154: 225-237.
- Zhang, Z. Z., Sparks, D. L. and Scrivner, N.C. 1993. Sorption and desorption of quaternary amine cations on clays. Environmental Science & Technology 27(8): 1625-1631.
- Zhao-Fu, M., Yi-Ping, Z. and Guo-Dong, W. 2007. Sorption of heavy metal and organic pollutants on modified soils. Pedosphere 17(2): 235-245.
- Zhu, L., Li, Y. and Zhang, J. 1997. Sorption of organobentonites to some organic pollutants in water. Environmental Science & Technology 31(5): 1407-1410.
- Zhu, L., Ren, X. and Yu, S. 1998. Use of cetyltrimethylammonium bromide-bentonite to remove organic contaminants of varying polar character from water. Environmental Science & Technology 34(3): 468-475.
- Zhu, R., Zhu, L. and Xu, L. 2007. Sorption characteristics of CTMA-bentonite complexes as controlled by surfactant packing density. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 32(21): 3374-3378.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ไอโซโทมการดูดซับควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับ DPC

f^1	C_i^2 (มล. โมล/ล.)	M^3 กรัม	C_e^4 (มล. โมล/ล.)	q_e^5 (มล. โมล/ก.)	ค่าเฉลี่ย \pm SD C_e (มล. โมล/ล.)	ค่าเฉลี่ย \pm SD q_e (มล. โมล/ก.)
0.25	2.0295	0.2502	0.1406	0.1887	0.1138 \pm 0.1020	0.1910 \pm 0.0100
		0.2509	0.1998	0.1823		
		0.2511	0.0011	0.2020		
0.50	4.0917	0.2510	0.07006	0.4006	0.1059 \pm 0.663	0.3974 \pm 0.00726
		0.2512	0.1824	0.3891		
		0.2501	0.0652	0.4025		
0.75	6.2990	0.2510	0.0105	0.6263	0.1041 \pm 0.0945	0.6175 \pm 0.0086
		0.2503	0.1995	0.6092		
		0.2511	0.1023	0.6170		
1.00	8.8208	0.2501	0.1756	0.8642	0.2154 \pm 0.04921	0.8601 \pm 0.0051
		0.2502	0.2704	0.8544		
		0.2501	0.2001	0.8617		
1.25	10.8709	0.2507	0.9746	0.9869	0.9380 \pm 0.0837	0.9906 \pm 0.0064
		0.2501	0.9971	0.9870		
		0.2512	0.8422	0.9981		
1.50	12.7500	0.2504	2.3161	1.0417	2.4154 \pm 0.1525	1.0322 \pm 0.0145
		0.2504	2.3392	1.0394		
		0.2501	2.5910	1.0155		

f^1	C_i^2 (มล. โมล/ล.)	M^3 (กรัม)	C_e^4 (มล. โมล/ก.)	q_e^5 (มล. โมล/ก.)	ค่าเฉลี่ย±SD C_e (มล. โมล/ล.)	ค่าเฉลี่ย±SD q_e (มล. โมล/ก.)
1.75	14.4578	0.2501	4.0145	1.0439	4.0957±0.1172	1.0342±0.0145
		0.2513	4.2301	1.0175		
		0.2501	4.0426	1.0411		
2.00	16.2124	0.2501	5.4463	1.0762	5.3802±0.1268	1.0815±0.0104
		0.2510	5.234	1.0935		
		0.2501	5.4603	1.0748		

¹ สัดส่วนค่าความจุแลกเปลี่ยนประจุบวก

² ความเข้มข้นเริ่มต้นของDPC

³ มวลของโซเดียมเบนโทไนด์

⁴ ความเข้มข้น DPC ที่สภาวะสมดุล

⁵ ความสามารถในการดูดซับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-2 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับ DTAB

f^1	C_i^2 (มล. โมล/ล.)	M^3 (กรัม)	C_c^4 (มล. โมล/ล.)	q_c^5 (มล. โมล/ก.)	ค่าเฉลี่ย \pm SD C_c (มล. โมล/ล.)	ค่าเฉลี่ย \pm SD q_c (มล. โมล/ก.)
0.25	2.1407	0.2502	0	0.2139	0	0.2136 \pm 0.0005
		0.2512	0	0.2130		
		0.2503	0	0.2138		
0.50	4.3282	0.2503	0.0687	0.4254	0.0695 \pm 0.0258	0.4251 \pm 0.0034
		0.2510	0.0956	0.4216		
		0.2501	0.04406	0.4282		
0.75	7.2548	0.2513	0.1701	0.7048	0.1681 \pm 0.0024	0.7066 \pm 0.0018
		0.2502	0.1654	0.7084		
		0.2507	0.1689	0.7066		
1.00	9.207	0.2507	0.3584	0.8824	0.3584 \pm 0.0004	0.8829 \pm 0.0014
		0.2501	0.3588	0.8845		
		0.2509	0.3580	0.8817		
1.25	11.3745	0.2510	1.0094	1.0324	1.0081 \pm 0.0070	1.0347 \pm 0.0023
		0.2501	1.0005	1.0370		
		0.2503	1.0144	1.0348		
1.50	14.0567	0.2513	2.0145	1.1980	2.1139 \pm 0.0874	1.1900 \pm 0.0077
		0.2503	2.1489	1.1894		
		0.2511	2.17843	1.1826		
1.75	16.0891	0.2512	3.7004	1.2330	3.7345 \pm 0.0550	1.2320 \pm 0.0030
		0.2501	3.7980	1.2286		
		0.2508	3.7051	1.2344		
2.00	19.2044	0.2502	6.5810	1.2613	6.5397 \pm 0.0777	1.2641 \pm 0.0097
		0.2501	6.4501	1.2749		
		0.2511	6.5880	1.2561		

¹ สัดส่วนค่าความจุแลกเปลี่ยนประจุบวก

² ความเข้มข้นเริ่มต้นของDTAB

³ มวลของโซเดียมเบนโทไนด์

⁴ ความเข้มข้น DTAB ที่สภาวะสมดุล

⁵ ความสามารถในการดูดซับ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข
ไอโซเทอมการขับฟีนอล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 ข้อมูล ไอโซโทมการจับฟีนอลด้วยโซเดียมเบนโทไนด์

C _i ¹ (มก./ลิตร)	C _b ² (มก./ลิตร)	C _c ³ (มก./ลิตร)	q _c ⁴ (มก./ก.)	%R ⁵
3.8783	3.7267	21.6585	N/D ⁷	N/D
		13.5839	N/D	N/D
		19.7740	N/D	N/D
Average ± SD ⁶		18.3388 ± 4.2243	N/D	N/D
9.3168	8.6957	15.6957	N/D	N/D
		28.8013	N/D	N/D
		20.1352	N/D	N/D
Average ± SD		21.5441 ± 6.6654	N/D	N/D
13.0435	12.9193	25.0125	N/D	N/D
		25.0125	N/D	N/D
		20.7890	N/D	N/D
Average ± SD		23.6047 ± 2.4384	N/D	N/D
20.8696	20.8075	30.7889	N/D	N/D
		31.5342	N/D	N/D
		29.8702	N/D	N/D
Average ± SD		30.7311 ± 0.8335	N/D	N/D
25.7143	24.8447	33.2919	N/D	N/D
		66.7081	N/D	N/D
		40.5104	N/D	N/D
Average ± SD		46.8368 ± 17.5834	N/D	N/D

¹ ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น

² ความเข้มข้นแบลคส์ฟีนอล

³ ความเข้มข้นฟีนอลที่สภาวะสมดุล

⁴ ความสามารถในการจับฟีนอล

⁵ ประสิทธิภาพในการจับฟีนอล

⁶ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

⁷ ไม่สามารถหาค่าได้

ตารางที่ ข-2 ข้อมูล ไอโซโทมการจับฟีนอลด้วยออร์กาโนเคลย์ 0.5DPC

C _i ¹ (มก./ลิตร)	C _b ² (มก./ลิตร)	C _c ³ (มก./ลิตร)	q _c ⁴ (มก./ก.)	%R ⁵
3.8783	3.7267	1.8634	0.4649	50.0000
		1.8634	0.4640	50.0000
		1.9002	0.4548	49.0113
Average ± SD ⁶		1.8756 ± 0.0213	0.4612 ± 0.0056	49.6704 ± 0.5708
9.3168	8.6957	5.9270	0.6860	31.8395
		6.1254	0.6413	29.5579
		6.0541	0.6571	30.3779
Average ± SD		6.0355 ± 0.1005	0.6615 ± 0.0227	30.5918 ± 1.1557
13.0435	12.9193	10.5590	0.5848	18.2692
		11.0487	0.4667	14.4788
		10.2350	0.6684	20.7772
Average ± SD		10.6142 ± 0.4097	0.5733 ± 0.1013	17.8417 ± 3.1709
20.8696	20.8075	17.2050	0.8926	17.3134
		16.7048	1.0145	19.7172
		17.776	0.7541	14.5691
Average ± SD		17.2286 ± 0.5360	0.8871 ± 0.1303	17.1999 ± 2.5760
25.7143	24.8447	21.5874	0.8127	13.1107
		21.0058	0.9559	15.4517
		20.1456	1.1689	18.9140
Average ± SD		20.9129 ± 0.7254	0.9792 ± 0.1793	15.8254 ± 2.9196

¹ ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น

² ความเข้มข้นแบลคส์ฟีนอล

³ ความเข้มข้นฟีนอลที่สภาวะสมดุล

⁴ ความสามารถในการจับฟีนอล

⁵ ประสิทธิภาพในการจับฟีนอล

⁶ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ข-3 ข้อมูล ไอโซโทมการจับฟีนอลด้วยออร์กาโนเคลย์ 1.0DPC

C _i ¹ (มก./ลิตร)	C _b ² (มก./ลิตร)	C _c ³ (มก./ลิตร)	q _c ⁴ (มก./ก.)	%R ⁵
3.8783	3.7267	1.9255	0.4476	48.3333
		1.8012	0.4790	51.6667
		1.7905	0.4788	51.9549
Average ± SD ⁶		1.8391 ± 0.0750	0.4685 ± 0.0180	50.6516 ± 2.0129
9.3168	8.6957	6.0078	0.6693	30.9103
		6.4596	0.5557	25.7143
		5.9846	0.6724	31.1771
Average ± SD		6.1507 ± 0.2678	0.6324 ± 0.0665	29.2672 ± 3.0798
13.0435	12.9193	10.2398	0.6659	20.7400
		9.5408	0.8379	26.1505
		10.1254	0.6957	21.6255
Average ± SD		9.9687 ± 0.3749	0.7332 ± 0.0919	22.8387 ± 2.9021
20.8696	20.8075	16.9565	0.9608	18.5075
		16.3975	1.0948	21.1940
		16.0047	1.1959	23.0819
Average ± SD		16.4529 ± 0.4783	1.0838 ± 0.1179	20.9278 ± 2.2988
25.7143	24.8447	21.0003	0.9573	15.4738
		20.7453	1.0167	16.5000
		19.8047	1.2537	20.2861
Average ± SD		20.5168 ± 0.6297	1.0759 ± 0.1568	17.4200 ± 2.5346

¹ ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น

² ความเข้มข้นเบลงค์ฟีนอล

³ ความเข้มข้นฟีนอลที่สภาวะสมดุล

⁴ ความสามารถในการจับฟีนอล

⁵ ประสิทธิภาพในการจับฟีนอล

⁶ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ข-4 ข้อมูล ไอโซโทมการจับฟีนอลด้วยออร์กาโนเคลย์ 1.5DPC

C _i ¹ (มก./ลิตร)	C _b ² (มก./ลิตร)	C _c ³ (มก./ลิตร)	q _c ⁴ (มก./ก.)	%R ⁵
3.8783	3.7267	1.0045	0.6752	73.0459
		1.6770	0.5068	55.0000
		1.8007	0.4805	51.6812
Average ± SD ⁶		1.4941 ± 0.4285	0.5542 ± 0.1056	59.9090 ± 11.4972
9.3168	8.6957	5.2369	0.8604	39.7757
		4.5078	1.0387	48.1603
		5.0218	0.9175	42.2493
Average ± SD		4.922 ± 0.3746	0.9389 ± 0.0910	43.3951 ± 4.3082
13.0435	12.9193	8.7046	1.0474	32.6230
		9.1126	0.9441	29.4650
		9.5007	0.8512	26.4609
Average ± SD		9.1060 ± 0.3981	0.9476 ± 0.0981	29.5163 ± 3.0814
20.8696	20.8075	14.5007	1.5642	30.3101
		15.0078	1.4470	27.8730
		15.2047	1.3979	26.9267
Average ± SD		14.9044 ± 0.3632	1.4697 ± 0.0854	28.3699 ± 1.7456
25.7143	24.8447	18.5040	1.5820	25.5214
		21.0070	0.9556	15.4468
		20.0006	1.2050	19.4976
Average ± SD		19.8372 ± 1.2595	1.2475 ± 0.3154	20.1553 ± 5.0694

¹ ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น

² ความเข้มข้นแบลคส์ฟีนอล

³ ความเข้มข้นฟีนอลที่สภาวะสมดุล

⁴ ความสามารถในการจับฟีนอล

⁵ ประสิทธิภาพในการจับฟีนอล

⁶ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ข-5 ข้อมูลไอโซโทมการจับฟีนอลด้วยออร์กาโนเคลย์ 2.0DPC

C _i ¹ (มก./ลิตร)	C _b ² (มก./ลิตร)	C _c ³ (มก./ลิตร)	q _c ⁴ (มก./ก.)	%R ⁵
3.8783	3.7267	1.0204	0.6739	72.6193
		1.1488	0.6400	69.1739
		1.2099	0.6279	67.5344
Average ± SD ⁶		1.1264 ± 0.0967	0.6473 ± 0.0238	69.7758 ± 2.5954
9.3168	8.6957	3.5400	1.2863	59.2900
		4.1250	1.1381	52.5625
		4.0156	1.1596	53.8206
Average ± SD		3.8935 ± 0.3110	1.1947 ± 0.0801	55.2244 ± 3.5767
13.0435	12.9193	7.0048	1.4713	45.7802
		9.0054	0.9775	30.2947
		7.5007	1.3492	41.9417
Average ± SD		7.8370 ± 1.0418	1.2660 ± 0.2572	39.3389 ± 8.0642
20.8696	20.8075	13.0000	1.9364	37.5224
		12.4056	2.0942	40.3791
		13.6542	1.7776	34.3783
Average ± SD		13.0199 ± 0.6245	1.9361 ± 0.1583	37.4266 ± 3.0015
25.7143	24.8447	17.0046	1.9406	31.5565
		18.0005	1.7025	27.5480
		16.8804	1.9831	32.0564
Average ± SD		17.2952 ± 0.6140	1.8754 ± 0.1512	30.3870 ± 2.4713

¹ ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น

² ความเข้มข้นแบลคส์ฟีนอล

³ ความเข้มข้นฟีนอลที่สภาวะสมดุล

⁴ ความสามารถในการจับฟีนอล

⁵ ประสิทธิภาพในการจับฟีนอล

⁶ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ข-6 ข้อมูล ไอโซโทมการจับฟีนอลด้วยออร์กาโนเคลย์ 0.5DTAB

C _i ¹ (มก./ลิตร)	C _b ² (มก./ลิตร)	C _c ³ (มก./ลิตร)	q _c ⁴ (มก./ก.)	%R ⁵
3.8783	3.7267	3.9807	-0.0634	-6.8155
		2.1004	0.4034	43.6393
		3.1005	0.1561	16.8033
Average ± SD ⁶		3.0605 ± 0.9408	0.1653 ± 0.2335	17.8757 ± 25.2444
9.3168	8.6957	5.0010	0.9191	42.4885
		6.0012	0.6729	30.9862
		5.0001	0.9202	42.4989
Average ± SD		5.3341 ± 0.5777	0.8374 ± 0.1424	38.6579 ± 6.6436
13.0435	12.9193	9.2547	0.9134	28.3651
		9.5652	0.8368	25.9615
		8.9543	0.9873	30.6903
Average ± SD		9.2581 ± 0.3055	0.9125 ± 0.0752	28.3390 ± 2.3645
20.8696	20.8075	16.7702	1.0073	19.4030
		15.8385	1.2336	23.8806
		14.9980	1.4423	27.9201
Average ± SD		15.8689 ± 0.8865	1.2277 ± 0.2175	23.7345 ± 4.2604
25.7143	24.8447	19.0683	1.4398	23.2500
		18.8199	1.4987	24.2500
		20.5877	1.0621	17.1345
Average ± SD		19.4920 ± 0.9570	1.3335 ± 0.2369	21.5448 ± 3.8520

¹ ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น

² ความเข้มข้นเบลงค์ฟีนอล

³ ความเข้มข้นฟีนอลที่สภาวะสมดุล

⁴ ความสามารถในการจับฟีนอล

⁵ ประสิทธิภาพในการจับฟีนอล

⁶ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ข-7 ข้อมูล ไอโซโทมการจับฟีนอลด้วยออร์กาโนเคลย์ 1.0DTAB

C _i ¹ (มก./ลิตร)	C _b ² (มก./ลิตร)	C _c ³ (มก./ลิตร)	q _c ⁴ (มก./ก.)	%R ⁵
3.8783	3.7267	3.5404	0.0462	5.0000
		2.4224	0.3225	35.0000
		3.4055	0.0799	8.6191
Average ± SD ⁶		3.1227 ± 0.6103	0.1496 ± 0.1508	16.2064 ± 16.3761
9.3168	8.6957	6.8944	0.4494	20.7143
		6.3354	0.5883	27.1429
		5.8804	0.6968	32.3754
Average ± SD		6.3701 ± 0.5079	0.5782 ± 0.1240	26.7442 ± 5.8408
13.0435	12.9193	10.5409	0.5922	18.4094
		11.2422	0.4168	12.9808
		10.4870	0.6056	18.8266
Average ± SD		10.7567 ± 0.4213	0.5382 ± 0.1054	16.7389 ± 3.2613
20.8696	20.8075	18.4472	0.5889	11.3433
		15.8385	1.2312	23.8806
		16.9901	0.9496	18.3461
Average ± SD		17.0919 ± 1.3073	0.9232 ± 0.3219	17.8567 ± 6.2830
25.7143	24.8447	21.8634	0.7446	12.0000
		20.9938	0.9579	15.5000
		19.8870	1.2296	19.9548
Average ± SD		20.9147 ± 0.9905	0.9774 ± 0.2431	15.8183 ± 3.9870

¹ ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น

² ความเข้มข้นแบลคส์ฟีนอล

³ ความเข้มข้นฟีนอลที่สภาวะสมดุล

⁴ ความสามารถในการจับฟีนอล

⁵ ประสิทธิภาพในการจับฟีนอล

⁶ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ข-8 ข้อมูล ไอโซโทมการจับฟีนอลด้วยออร์กาโนเคลย์ 1.5DTAB

C _i ¹ (มก./ลิตร)	C _b ² (มก./ลิตร)	C _c ³ (มก./ลิตร)	q _c ⁴ (มก./ก.)	%R ⁵
3.8783	3.7267	3.7001	0.0066	0.7140
		3.4007	0.0809	8.7479
		3.6995	0.0068	0.7295
Average ± SD ⁶		3.6001 ± 0.1727	0.0315 ± 0.0429	3.3971 ± 4.6339
9.3168	8.6957	8.5695	0.0315	1.4508
		8.0001	0.1730	7.9989
		8.2399	0.1127	5.2412
Average ± SD		8.2698 ± 0.2859	0.1057 ± 0.0710	4.8969 ± 3.2876
13.0435	12.9193	11.5047	0.3522	10.9492
		12.0497	0.2159	6.7308
		12.3008	0.1535	4.7871
Average ± SD		11.9517 ± 0.4070	0.2405 ± 0.1016	7.4890 ± 3.1503
20.8696	20.8075	18.3851	0.6032	11.6418
		19.0683	0.4335	8.3582
		17.9054	0.7212	13.9472
Average ± SD		18.4529 ± 0.5844	0.5859 ± 0.1446	11.3157 ± 2.8087
25.7143	24.8447	21.0800	0.9319	15.1530
		22.4845	0.5871	9.5000
		20.8456	0.9958	16.0965
Average ± SD		21.4700 ± 0.8863	0.8383 ± 0.2198	13.5832 ± 3.5674

¹ ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น

² ความเข้มข้นแบลคส์ฟีนอล

³ ความเข้มข้นฟีนอลที่สภาวะสมดุล

⁴ ความสามารถในการจับฟีนอล

⁵ ประสิทธิภาพในการจับฟีนอล

⁶ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ข-9 ข้อมูล ไอโซโทมการจับฟีนอลด้วยออร์กาโนเคลย์ 2.0DTAB

C _i ¹ (มก./ลิตร)	C _b ² (มก./ลิตร)	C _c ³ (มก./ลิตร)	q _c ⁴ (มก./ก.)	%R ⁵
3.8783	3.7267	3.7004	0.0066	0.7059
		3.6542	0.0181	1.9456
		3.5007	0.0562	6.0645
Average ± SD ⁶		3.6184 ± 0.1045	0.0269 ± 0.0260	2.9054 ± 2.8053
9.3168	8.6957	8.5990	0.0240	1.1115
		7.5048	0.2968	13.6948
		8.1401	0.1383	6.3893
Average ± SD		8.0813 ± 0.5495	0.1531 ± 0.1370	7.0652 ± 6.3188
13.0435	12.9193	12.0047	0.2277	7.0790
		12.0149	0.2236	7.0001
		11.0036	0.4770	14.8279
Average ± SD		11.6744 ± 0.5810	0.3095 ± 0.1451	9.6357 ± 4.4968
20.8696	20.8075	17.5642	0.8092	15.5870
		16.6504	1.0320	8.358219.9787
		16.9852	0.9470	13.947218.3696
Average ± SD		17.0666 ± 0.4623	0.9294 ± 0.1125	17.9784 ± 2.2218
25.7143	24.8447	18.9563	1.4561	23.7008
		20.1245	1.1742	18.9989
		20.0004	1.2027	19.4984
Average ± SD		19.6937 ± 0.6416	1.2776 ± 0.1552	20.7327 ± 2.5826

¹ ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น

² ความเข้มข้นแบลคส์ฟีนอล

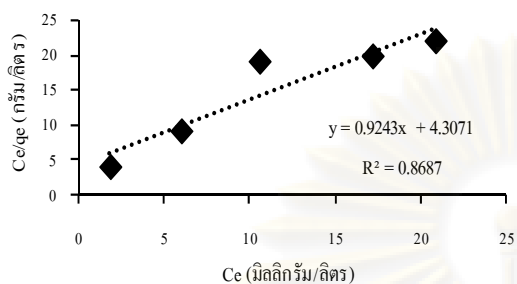
³ ความเข้มข้นฟีนอลที่สภาวะสมดุล

⁴ ความสามารถในการจับฟีนอล

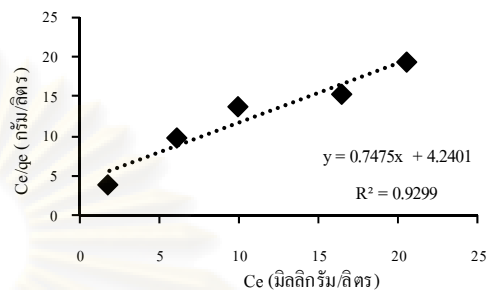
⁵ ประสิทธิภาพในการจับฟีนอล

⁶ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

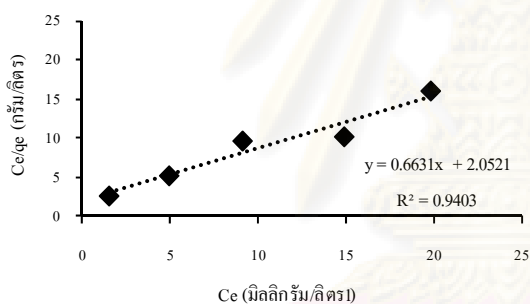
(ก) 0.5DPC-ออร์กาโนเคลย์



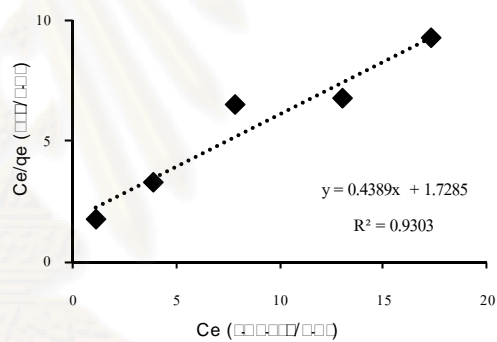
(ข) 1.0DPC-ออร์กาโนเคลย์



(ค) 1.5DPC-ออร์กาโนเคลย์



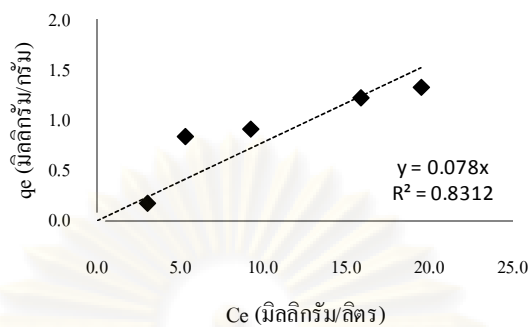
(ง) 2.0DPC-ออร์กาโนเคลย์



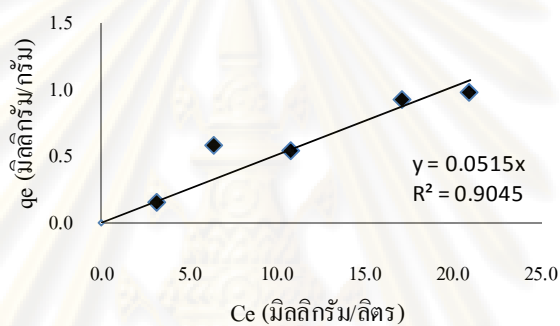
ภาพที่ ข1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของฟีนอลด้วย DPC-ออร์กาโนเคลย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

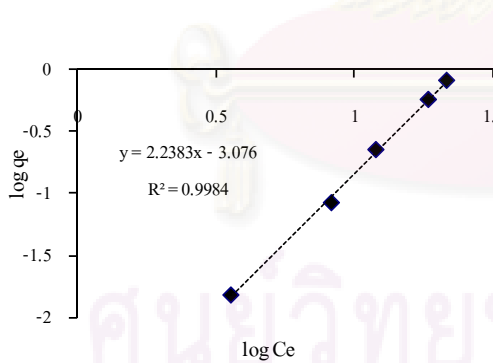
(ก) 0.5DTAB-ออร์กาโนเคลย์



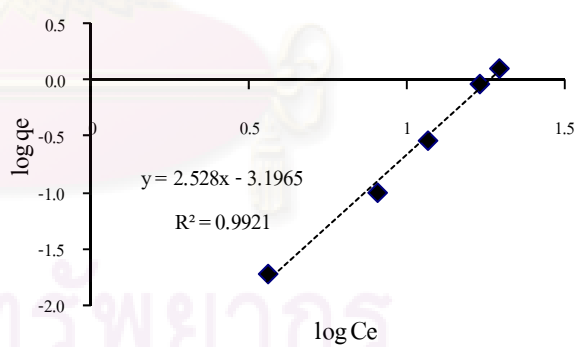
(ข) 1.0DTAB-ออร์กาโนเคลย์



(ค) 1.5DTAB-ออร์กาโนเคลย์



(ง) 2.0DTAB-ออร์กาโนเคลย์



ภาพที่ ข2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของฟินอลด้วย DTAB-ออร์กาโนเคลย์



ภาคผนวก ค
ไอโซเทอมการซั้บตะกั่ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-1 ข้อมูล ไอโซเทอมการซับตะกั่วด้วยโซเดียมเบนโทไนต์

C_i ¹ (มก./ลิตร)	C_b ² (มก./ลิตร)	C_e ³ (มก./ลิตร)	q_e ⁴ (มก./ก.)	%R ⁵	pH _{eq}
4.320	2.500	0.206	2.294	91.760	$C_i = 7.32$
		0.160	2.340	93.600	$C_b = 7.20$
		0.180	2.320	92.800	$C_e = 9.36$
Average \pm SD ⁶		0.182 \pm 0.023	2.318 \pm 0.023	92.720 \pm 0.923	
6.840	4.007	2.480	1.527	38.108	$C_i = 7.07$
		1.870	2.137	53.332	$C_b = 6.79$
		2.340	1.667	41.602	$C_e = 9.14$
Average \pm SD		2.230 \pm 0.320	1.777 \pm 0.320	44.3474 \pm 7.974	
6.851	4.680	0.875	3.805	81.303	$C_i = 7.21$
		0.900	3.780	80.769	$C_b = 6.98$
		1.050	3.630	77.564	$C_e = 9.28$
Average \pm SD		0.942 \pm 0.095	3.738 \pm 0.095	79.879 \pm 2.022	
7.880	5.800	0.780	5.020	86.552	$C_i = 7.17$
		0.638	5.162	89.000	$C_b = 6.90$
		0.820	4.980	85.862	$C_e = 9.20$
Average \pm SD		1.200 \pm 0.096	5.054 \pm 0.096	87.138 \pm 1.649	
10.982	7.350	0.870	6.480	88.163	$C_i = 7.10$
		1.500	5.850	79.592	$C_b = 6.85$
		1.560	5.790	78.776	$C_e = 9.30$
Average \pm SD		1.310 \pm 0.382	6.040 \pm 0.382	82.177 \pm 5.200	

¹ ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น

² ความเข้มข้นแบล็กส์ตะกั่ว

³ ความเข้มข้นตะกั่วที่สภาวะสมดุล

⁴ ความสามารถในการซับตะกั่ว

⁵ ประสิทธิภาพในการซับตะกั่ว

⁶ ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ค-2 ข้อมูล ไอโซเทอมการซับตะกั่วด้วยออร์กาโนเคลย์ 0.5DPC

C_i ¹ (มก./ลิตร)	C_b ² (มก./ลิตร)	C_e ³ (มก./ลิตร)	q_e ⁴ (มก./ก.)	%R ⁵	pH _{eq}
4.320	2.500	0.120	2.380	95.200	$C_i = 7.32$
		0.094	2.406	96.240	$C_b = 7.20$
		0.234	2.266	90.640	$C_e = 9.14$
Average \pm SD ⁶		0.1493 \pm 0.213	2.351 \pm 0.075	94.027 \pm 2.979	
6.840	4.007	1.520	2.487	62.066	$C_i = 7.07$
		1.369	2.638	65.835	$C_b = 6.79$
		1.100	2.907	72.548	$C_e = 9.09$
Average \pm SD		1.330 \pm 0.213	2.677 \pm 0.213	66.816 \pm 5.309	
6.851	4.680	1.550	3.130	66.880	$C_i = 7.21$
		1.875	2.805	59.936	$C_b = 6.98$
		1.680	3.000	64.103	$C_e = 9.02$
Average \pm SD		1.702 \pm 0.164	2.978 \pm 0.164	63.640 \pm 3.500	
7.880	5.800	0.846	4.954	85.414	$C_i = 7.17$
		1.103	4.697	80.983	$C_b = 6.90$
		0.941	4.859	83.776	$C_e = 9.05$
Average \pm SD		0.963 \pm 0.130	4.837 \pm 0.130	83.391 \pm 2.240	
10.982	7.350	1.650	5.700	77.551	$C_i = 7.10$
		1.778	5.572	75.810	$C_b = 6.85$
		1.528	5.822	79.211	$C_e = 9.09$
Average \pm SD		1.652 \pm 0.125	5.698 \pm 0.125	77.524 \pm 1.701	

¹ ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น

² ความเข้มข้นแบลด์ตะกั่ว

³ ความเข้มข้นตะกั่วที่สถานะสมดุล

⁴ ความสามารถในการซับตะกั่ว

⁵ ประสิทธิภาพในการซับตะกั่ว

⁶ ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ค-3 ข้อมูล ไอโซเทอมการซับตะกั่วด้วยออร์กาโนเคลย์ 1.0DPC

C_i ¹ (มก./ลิตร)	C_b ² (มก./ลิตร)	C_e ³ (มก./ลิตร)	q_e ⁴ (มก./ก.)	%R ⁵	pH _{eq}
4.320	2.500	0.208	2.292	91.680	$C_i = 7.32$
		0.145	2.355	94.200	$C_b = 7.20$
		0.201	2.299	91.972	$C_e = 9.06$
Average \pm SD ⁶		0.815 \pm 0.035	2.315 \pm 0.035	92.617 \pm 1.378	
6.840	4.007	1.201	2.807	70.040	$C_i = 7.07$
		1.045	2.962	73.921	$C_b = 6.79$
		0.945	3.062	76.416	$C_e = 9.03$
Average \pm SD		1.064 \pm 0.129	2.944 \pm 0.129	73.459 \pm 3.213	
6.851	4.680	0.780	3.900	83.333	$C_i = 7.21$
		0.800	3.880	82.906	$C_b = 6.98$
		1.200	3.480	74.359	$C_e = 8.98$
Average \pm SD		0.927 \pm 0.237	3.753 \pm 0.237	80.199 \pm 5.062	
7.880	5.800	1.125	4.675	80.603	$C_i = 7.17$
		1.000	4.800	82.759	$C_b = 6.90$
		1.290	4.510	77.759	$C_e =$
Average \pm SD		1.138 \pm 0.145	4.662 \pm 0.145	88.374 \pm 2.508	
10.982	7.350	1.580	5.770	78.503	$C_i = 7.10$
		2.050	5.300	72.109	$C_b = 6.85$
		1.850	5.500	74.830	$C_e = 9.01$
Average \pm SD		1.827 \pm 0.236	5.523 \pm 0.236	75.147 \pm 3.21	

¹ ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น

² ความเข้มข้นแบล็กคั้ง

³ ความเข้มข้นตะกั่วที่สภาวะสมดุล

⁴ ความสามารถในการซับตะกั่ว

⁵ ประสิทธิภาพในการซับตะกั่ว

⁶ ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ค-4 ข้อมูล ไอโซเทอมการซับตะกั่วด้วยออร์กาโนเคลย์ 1.5DPC

C_i ¹ (มก./ลิตร)	C_b ² (มก./ลิตร)	C_e ³ (มก./ลิตร)	q_e ⁴ (มก./ก.)	%R ⁵	pH _{eq}
4.320	2.500	0.180	2.32	92.800	$C_i = 7.32$
		0.250	2.25	90.000	$C_b = 7.20$
		0.100	2.4	96.000	$C_e = 9.05$
Average \pm SD ⁶		0.177 \pm 0.075	0.232 \pm 0.075	92.933 \pm 3.002	
6.840	4.007	1.020	2.987	74.545	$C_i = 7.07$
		2.000	2.007	50.087	$C_b = 6.79$
		0.500	3.507	87.522	$C_e = 9.11$
Average \pm SD		1.173 \pm 0.762	2.834 \pm 0.762	70.718 \pm 19.008	
6.851	4.680	1.900	2.780	59.402	$C_i = 7.21$
		2.080	2.600	55.556	$C_b = 6.98$
		1.000	3.680	78.632	$C_e = 8.98$
Average \pm SD		1.660 \pm 0.579	3.020 \pm 0.579	64.530 \pm 12.364	
7.880	5.800	1.500	4.300	74.138	$C_i = 7.17$
		2.540	3.260	56.207	$C_b = 6.90$
		2.000	3.800	65.517	$C_e = 9.86$
Average \pm SD		2.013 \pm 0.520	3.787 \pm 0.520	65.287 \pm 8.968	
10.982	7.350	2.080	5.270	71.701	$C_i = 7.10$
		1.050	6.300	85.714	$C_b = 6.85$
		1.900	5.450	74.150	$C_e = 9.87$
Average \pm SD		1.677 \pm 0.550	5.673 \pm 0.550	77.188 \pm 7.485	

¹ ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น

² ความเข้มข้นแบลด์ตะกั่ว

³ ความเข้มข้นตะกั่วที่สถานะสมดุล

⁴ ความสามารถในการซับตะกั่ว

⁵ ประสิทธิภาพในการซับตะกั่ว

⁶ ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ค-5 ข้อมูล ไอโซเทอมการซับตะกั่วด้วยออร์กาโนเคลย์ 2.0DPC

C_i ¹ (มก./ลิตร)	C_b ² (มก./ลิตร)	C_e ³ (มก./ลิตร)	q_e ⁴ (มก./ก.)	%R ⁵	pH _{eq}
4.320	2.500	0.187	2.313	92.520	$C_i = 7.32$
		0.200	2.300	92.000	$C_b = 7.20$
		0.195	2.305	92.200	$C_e = 9.03$
Average \pm SD ⁶		0.194 \pm 0.007	2.306 \pm 0.007	92.240 \pm 0.262	
6.840	4.007	0.985	3.022	75.418	$C_i = 7.07$
		0.920	3.087	77.040	$C_b = 6.79$
		0.800	3.207	80.035	$C_e = 9.07$
Average \pm SD		0.902 \pm 0.094	3.105 \pm 0.094	77.498 \pm 0.094	
6.851	4.680	0.964	3.716	79.402	$C_i = 7.21$
		1.350	3.33	71.154	$C_b = 6.98$
		0.890	3.79	80.983	$C_e = 9.04$
Average \pm SD		1.068 \pm 0.247	3.612 \pm 0.247	77.179 \pm 5.278	
7.880	5.800	1.100	4.700	81.034	$C_i = 7.17$
		0.983	4.817	83.052	$C_b = 6.90$
		1.300	4.500	77.586	$C_e = 8.87$
Average \pm SD		1.128 \pm 0.160	4.672 \pm 0.160	80.557 \pm 2.764	
10.982	7.350	1.850	5.500	74.830	$C_i = 7.10$
		2.100	5.250	71.429	$C_b = 6.85$
		1.765	5.585	75.986	$C_e = 8.90$
Average \pm SD		1.905 \pm 0.174	5.445 \pm 0.174	74.082 \pm 2.369	

¹ ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น

² ความเข้มข้นแบลนจ์ตะกั่ว

³ ความเข้มข้นตะกั่วที่สภาวะสมดุล

⁴ ความสามารถในการซับตะกั่ว

⁵ ประสิทธิภาพในการซับตะกั่ว

⁶ ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ค-6 ข้อมูล ไอโซเทอมการซับตะกั่วด้วยออร์กาโนเคลย์ 0.5DTAB

C_i ¹ (มก./ลิตร)	C_b ² (มก./ลิตร)	C_e ³ (มก./ลิตร)	q_e ⁴ (มก./ก.)	%R ⁵	pH _{eq}
4.320	2.500	0.098	2.402	96.080	$C_i = 7.32$
		0.065	2.435	97.400	$C_b = 7.20$
		0.450	2.050	82.000	$C_e = 9.05$
Average \pm SD ⁶		0.204 \pm 0.213	2.296 \pm 0.213	91.827 \pm 8.536	
6.840	4.007	0.320	3.687	92.014	$C_i = 7.07$
		0.150	3.857	96.257	$C_b = 6.79$
		0.100	3.907	97.504	$C_e = 9.01$
Average \pm SD		0.190 \pm 0.115	3.817 \pm 0.115	95.258 \pm 2.878	
6.851	4.680	1.520	3.16	67.521	$C_i = 7.21$
		1.650	3.03	64.744	$C_b = 6.98$
		1.890	2.79	59.615	$C_e = 8.73$
Average \pm SD		1.687 \pm 0.188	2.993 \pm 0.188	63.960 \pm 4.011	
7.880	5.800	1.007	4.793	82.638	$C_i = 7.17$
		1.560	4.240	73.103	$C_b = 6.90$
		1.000	4.800	82.759	$C_e = 8.56$
Average \pm SD		1.189 \pm 0.321	4.611 \pm 0.321	79.500 \pm 5.540	
10.982	7.350	2.080	5.270	71.701	$C_i = 7.10$
		1.980	5.370	73.061	$C_b = 6.85$
		1.785	5.565	75.714	$C_e = 8.63$
Average \pm SD		1.948 \pm 0.150	5.402 \pm 0.150	73.492 \pm 2.041	

¹ ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น

² ความเข้มข้นแบลด์ตะกั่ว

³ ความเข้มข้นตะกั่วที่สภาวะสมดุล

⁴ ความสามารถในการซับตะกั่ว

⁵ ประสิทธิภาพในการซับตะกั่ว

⁶ ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ค-7 ข้อมูล ไอโซเทอมการซับตะกั่วด้วยออร์กาโนเคลย์ 1.0DTAB

C_i ¹ (มก./ลิตร)	C_b ² (มก./ลิตร)	C_e ³ (มก./ลิตร)	q_e ⁴ (มก./ก.)	%R ⁵	pH _{eq}
4.320	2.500	0.150	2.350	94.000	$C_i = 7.32$
		0.185	2.315	92.600	$C_b = 7.20$
		0.128	2.372	94.880	$C_e = 9.14$
Average \pm SD ⁶		0.154 \pm 0.029	2.350 \pm 0.029	93.827 \pm 1.150	
6.840	4.007	1.250	2.757	68.805	$C_i = 7.07$
		1.107	2.900	72.373	$C_b = 6.79$
		1.290	2.717	67.806	$C_e = 9.19$
Average \pm SD		1.216 \pm 0.096	2.790 \pm 0.096	69.661 \pm 2.401	
6.851	4.680	0.550	4.130	88.248	$C_i = 7.21$
		0.308	4.372	93.419	$C_b = 6.98$
		0.230	4.450	95.085	$C_e = 9.01$
Average \pm SD		0.363 \pm 0.167	4.320 \pm 0.167	92.251 \pm 3.565	
7.880	5.800	0.890	4.910	84.655	$C_i = 7.17$
		1.200	4.600	79.310	$C_b = 6.90$
		1.070	4.730	81.552	$C_e = 9.08$
Average \pm SD		1.053 \pm 0.156	4.750 \pm 0.156	81.839 \pm 2.684	
10.982	7.350	1.980	5.370	73.061	$C_i = 7.10$
		1.875	5.475	74.490	$C_b = 6.85$
		2.300	5.050	68.707	$C_e = 8.94$
Average \pm SD		2.052 \pm 0.221	5.300 \pm 0.221	72.086 \pm 3.012	

¹ ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น

² ความเข้มข้นแบล็กคัทตะกั่ว

³ ความเข้มข้นตะกั่วที่สภาวะสมดุล

⁴ ความสามารถในการซับตะกั่ว

⁵ ประสิทธิภาพในการซับตะกั่ว

⁶ ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ค-8 ข้อมูล ไอโซเทอมการซับตะกั่วด้วยออร์กาโนเคลย์ 1.5DTAB

C_i ¹ (มก./ลิตร)	C_b ² (มก./ลิตร)	C_e ³ (มก./ลิตร)	q_e ⁴ (มก./ก.)	%R ⁵	pH _{eq}
4.320	2.500	0.090	2.410	96.400	$C_i = 7.32$
		0.230	2.270	90.800	$C_b = 7.20$
		0.200	2.300	92.000	$C_e = 9.30$
Average \pm SD ⁶		0.173 \pm 0.074	2.327 \pm 0.074	93.067 \pm 2.948	
6.840	4.007	0.750	3.257	81.283	$C_i = 7.07$
		0.550	3.457	86.274	$C_b = 6.79$
		1.080	2.927	73.047	$C_e = 9.15$
Average \pm SD		0.793 \pm 0.268	3.214 \pm 0.268	80.201 \pm 6.679	
6.851	4.680	1.500	3.180	67.949	$C_i = 7.21$
		2.040	2.640	56.410	$C_b = 6.98$
		1.800	2.880	61.538	$C_e = 9.20$
Average \pm SD		1.780 \pm 0.271	2.900 \pm 0.271	61.966 \pm 5.781	
7.880	5.800	1.550	4.250	73.276	$C_i = 7.17$
		1.850	3.950	68.103	$C_b = 6.90$
		1.500	4.300	74.138	$C_e = 9.04$
Average \pm SD		1.633 \pm 0.189	4.167 \pm 0.189	71.839 \pm 3.264	
10.982	7.350	2.000	5.350	72.789	$C_i = 7.10$
		2.500	4.850	65.986	$C_b = 6.85$
		2.000	5.350	72.789	$C_e = 8.90$
Average \pm SD		2.167 \pm 0.288	5.183 \pm 0.288	70.522 \pm 3.928	

¹ ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น

² ความเข้มข้นแบลจค์ตะกั่ว

³ ความเข้มข้นตะกั่วที่สภาวะสมดุล

⁴ ความสามารถในการซับตะกั่ว

⁵ ประสิทธิภาพในการซับตะกั่ว

⁶ ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ค-9 ข้อมูล ไอโซเทอมการซับตะกั่วด้วยออร์กาโนเคลย์ 2.0DTAB

C_i ¹ (มก./ลิตร)	C_b ² (มก./ลิตร)	C_e ³ (มก./ลิตร)	q_e ⁴ (มก./ก.)	%R ⁵	pH _{eq}
4.320	2.500	0.084	2.416	96.640	$C_i = 7.32$
		0.130	2.370	94.800	$C_b = 7.20$
		0.230	2.270	90.800	$C_e = 9.26$
Average \pm SD ⁶		0.148 \pm 0.075	2.352 \pm 0.275	94.080 \pm 2.986	
6.840	4.007	1.330	2.677	66.808	$C_i = 7.07$
		0.970	3.037	75.792	$C_b = 6.79$
		1.250	2.757	68.805	$C_e = 9.20$
Average \pm SD		1.183 \pm 0.189	2.824 \pm 0.189	70.468 \pm 4.718	
6.851	4.680	0.320	4.360	93.162	$C_i = 7.21$
		0.200	4.480	95.726	$C_b = 6.98$
		0.540	4.140	88.462	$C_e = 9.23$
Average \pm SD		0.353 \pm 0.172	4.327 \pm 0.172	92.450 \pm 3.684	
7.880	5.800	1.200	4.600	79.310	$C_i = 7.17$
		0.870	4.930	85.000	$C_b = 6.90$
		1.100	4.700	81.034	$C_e = 9.09$
Average \pm SD		1.057 \pm 0.169	4.743 \pm 0.169	81.782 \pm 2.917	
10.982	7.350	2.015	5.335	72.585	$C_i = 7.10$
		2.000	5.350	72.789	$C_b = 6.85$
		2.000	5.350	72.789	$C_e = 8.86$
Average \pm SD		2.005 \pm 0.009	5.345 \pm 0.009	72.721 \pm 0.118	

¹ ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น

² ความเข้มข้นแบลจค์ตะกั่ว

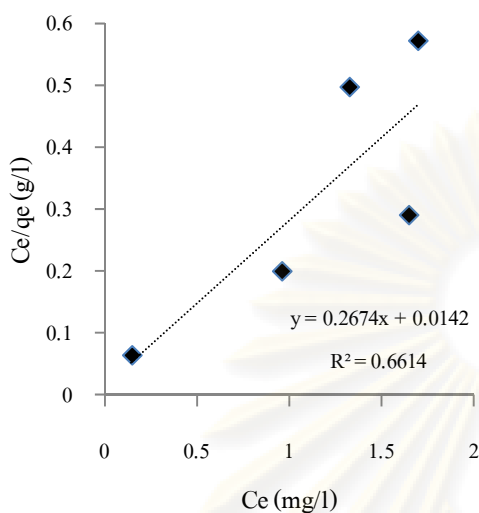
³ ความเข้มข้นตะกั่วที่สภาวะสมดุล

⁴ ความสามารถในการซับตะกั่ว

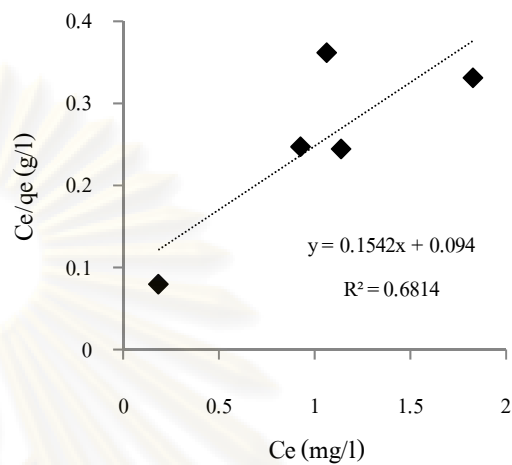
⁵ ประสิทธิภาพในการซับตะกั่ว

⁶ ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

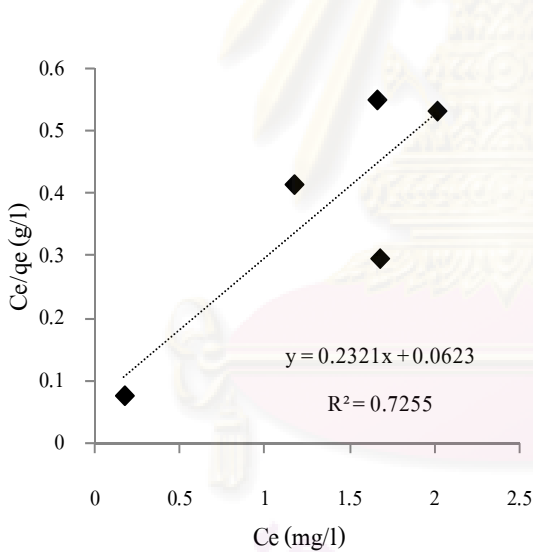
(ก) 0.5 DPC-ออร์กาโนเคลย์



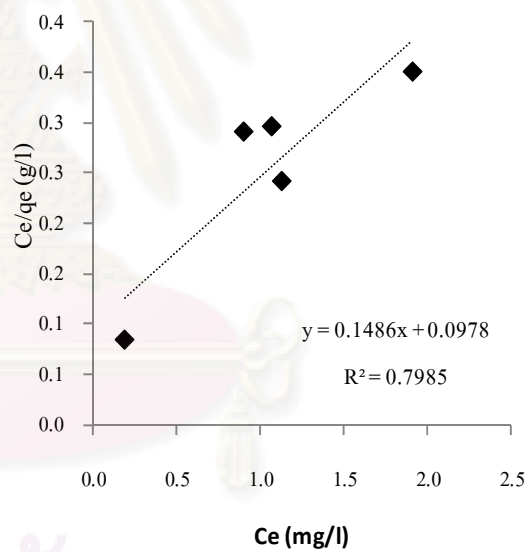
(ข) 1.0 DPC-ออร์กาโนเคลย์



(ค) 1.5 DPC-ออร์กาโนเคลย์



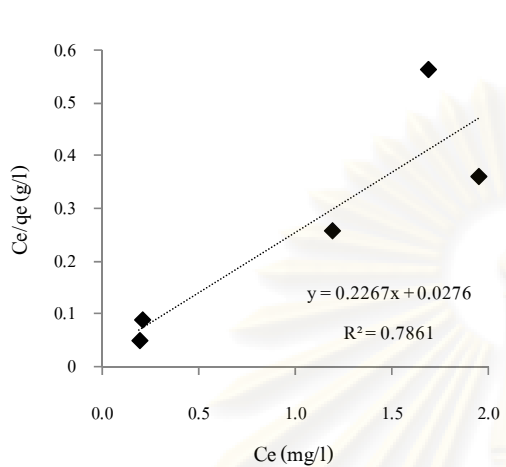
(ง) 2.0 DPC-ออร์กาโนเคลย์



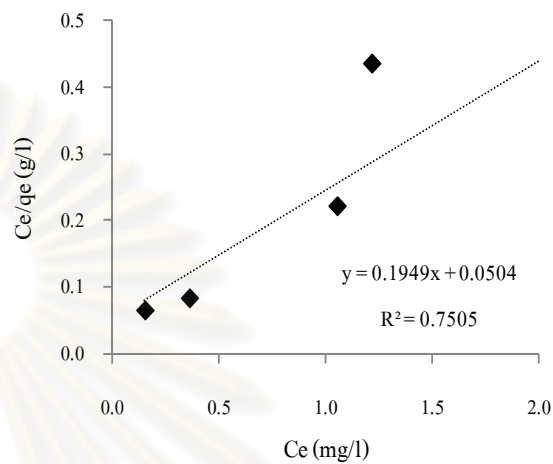
ภาพที่ ค1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของตะกั่วด้วย DPC-ออร์กาโนเคลย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

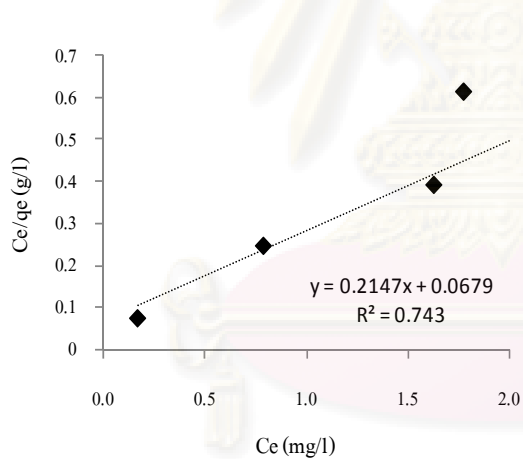
(จ) 0.5 DTAB-ออร์กาโนเคลย์



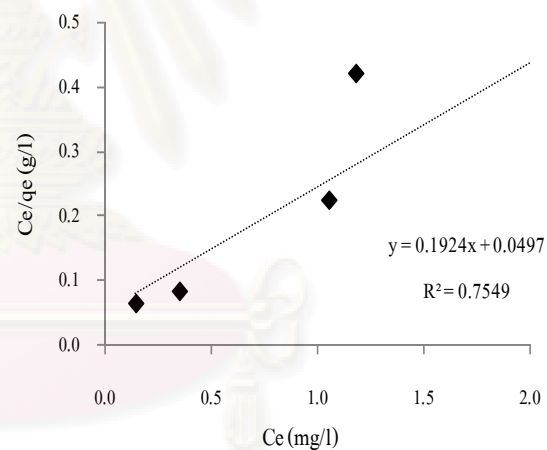
(ฉ) 1.0 DTAB-ออร์กาโนเคลย์



(ช) 1.5 DTAB-ออร์กาโนเคลย์



(ซ) 2.0 DTAB-ออร์กาโนเคลย์



ภาพที่ ค2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของตะกั่วด้วย DTAB-ออร์กาโนเคลย์

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง

ผลกระทบของฟินอลต่อการขับตะกั่ว และผลกระทบของตะกั่วต่อการขับฟินอล

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลกระทบของฟีนอลต่อการจับตะกั่ว

ตารางที่ ง-1 ข้อมูลการจับน้ำเสียผสมความเข้มข้นตะกั่วต่อฟีนอลเท่ากับ 10:5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตัวดูดซับ	น้ำเสียผสมตะกั่วต่อฟีนอล (มก./ลิตร); $C_b^1 = 4.8700$ มก./ลิตร		
	C_e^2 (มก./ลิตร)	q_e^3 (มก./ก.)	%R ⁴
โซเดียมเบนโทไนด์	0.150	2.360	96.920
ค่าเฉลี่ย	0.124	2.373	97.454
	0.137	2.367	97.187
0.5DPC	0.250	2.310	94.867
ค่าเฉลี่ย	0.187	2.342	96.160
	0.219	2.326	95.513
1.0DPC	0.287	2.292	94.107
ค่าเฉลี่ย	0.294	2.288	93.963
	0.291	2.290	94.035
1.5DPC	0.254	2.308	94.784
ค่าเฉลี่ย	0.387	2.242	92.053
	0.321	2.275	93.419
2.0DPC	0.510	2.180	89.528
ค่าเฉลี่ย	0.463	2.204	90.493
	0.487	2.192	90.010
0.5DTAB	0.254	2.308	94.784
ค่าเฉลี่ย	0.101	2.385	97.934
	0.177	2.346	96.359
1.0DTAB	0.154	2.358	96.838
ค่าเฉลี่ย	0.485	2.193	90.041
	0.320	2.275	93.439
1.5DTAB	0.569	2.151	88.316
ค่าเฉลี่ย	0.350	2.260	92.813
	0.460	2.205	90.565
2.0DTAB	0.074	2.398	98.480
ค่าเฉลี่ย	0.035	2.418	99.281
	0.055	2.408	98.881

ตารางที่ ง-2 ข้อมูลการซึบน้ำเสียดสมความเข้มข้นตะกั่วต่อฟีนอลเท่ากับ 10:10 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตัวดูดซับ	น้ำเสียดสมตะกั่วต่อฟีนอล (มก./ลิตร) ; $C_b^1 = 6.125$ มก./ลิตร		
	C_c^2 (มก./ลิตร)	q_c^3 (มก./ก.)	%R ⁴
โซเดียมเบนโทไนด์	0.028	3.049	99.543
ค่าเฉลี่ย	0.034	3.046	99.445
	0.031	3.047	99.494
0.5DPC	0.356	2.885	94.188
ค่าเฉลี่ย	0.330	2.898	94.612
	0.343	2.891	94.400
1.0DPC	0.358	2.884	94.155
ค่าเฉลี่ย	0.480	2.823	92.163
	0.419	2.853	93.159
1.5DPC	0.044	3.041	99.282
ค่าเฉลี่ย	0.556	2.785	90.922
	0.300	2.913	95.102
2.0DPC	0.044	3.041	99.282
ค่าเฉลี่ย	0.580	2.773	90.531
	0.312	2.907	94.906
0.5DTAB	0.015	3.055	99.755
ค่าเฉลี่ย	0.030	3.048	99.510
	0.023	3.051	99.633
1.0DTAB	0.022	3.052	99.641
ค่าเฉลี่ย	0.036	3.045	99.412
	0.029	3.048	99.527
1.5DTAB	0.017	3.054	99.722
ค่าเฉลี่ย	0.532	2.797	91.314
	0.275	2.925	95.518
2.0DTAB	0.044	3.041	99.282
ค่าเฉลี่ย	0.079	3.023	98.710
	0.062	3.032	98.996

ตารางที่ ง-3 ข้อมูลการซึบน้ำเสียดสมความเข้มข้นตะกั่วต่อฟีนอลเท่ากับ 10:20 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตัวคูณซึบ	น้ำเสียดสมตะกั่วต่อฟีนอล (มก./ลิตร) ; $C_b^1 = 5.750$ มก./ลิตร		
	C_c^2 (มก./ลิตร)	q_c^3 (มก./ก.)	%R ⁴
โซเดียมเบนโทไนด์	1.360	2.195	76.348
	1.200	2.275	79.130
	ค่าเฉลี่ย 1.280	2.235	77.739
0.5DPC	0.749	2.501	86.974
	0.450	2.650	92.174
	ค่าเฉลี่ย 0.600	2.575	89.574
1.0DPC	0.600	2.575	89.565
	0.654	2.548	88.626
	ค่าเฉลี่ย 0.627	2.562	89.096
1.5DPC	0.507	2.622	91.183
	0.589	2.581	89.757
	ค่าเฉลี่ย 0.548	2.601	90.470
2.0DPC	0.550	2.600	90.435
	0.450	2.650	92.174
	ค่าเฉลี่ย 0.500	2.625	91.304
0.5DTAB	0.055	2.848	99.043
	0.180	2.785	96.870
	ค่าเฉลี่ย 0.118	2.816	97.957
1.0DTAB	0.056	2.847	99.026
	0.074	2.838	98.887
	ค่าเฉลี่ย 0.065	2.843	98.8777
1.5DTAB	0.008	2.871	99.998
	0.017	2.867	99.704
	ค่าเฉลี่ย 0.013	2.869	99.783
2.0DTAB	0.009	2.871	99.843
	0.025	2.863	99.565
	ค่าเฉลี่ย 0.017	2.867	99.704

¹ ความเข้มข้นแบลงค์น้ำเสียฟีนอลและตะกั่ว

² ความเข้มข้นตะกั่วที่สภาวะสมดุล

³ ความสามารถในการจับตะกั่ว

⁴ ประสิทธิภาพในการจับตะกั่ว



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลกระทบตะกั่วต่อการจับฟีนอล

ตารางที่ ง-4 ข้อมูลการจับน้ำเสียผสมตะกั่วต่อฟีนอลต่อตะกั่วเท่ากับ 10:5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตัวดูดซับ	น้ำเสียผสมตะกั่วต่อฟีนอล (มก./ลิตร); $C_b^1 = 7.5360$ มก./ลิตร		
	C_e^2 (มก./ลิตร)	q_e^3 (มก./ก.)	%R ⁴
โซเดียมเบนโทไนด์	9.5600	N/D ⁵	N/D
ค่าเฉลี่ย	8.6750	N/D	N/D
	9.1175	N/D	N/D
0.5DPC	5.564	0.9860	26.1677
ค่าเฉลี่ย	5.4870	1.0245	27.1895
	5.5255	1.0053	26.6786
1.0DPC	6.4800	0.5280	14.0127
ค่าเฉลี่ย	6.5470	0.4945	13.1237
	6.5135	0.5113	13.5682
1.5DPC	5.5400	0.9980	26.4862
ค่าเฉลี่ย	5.4870	1.0245	27.1895
	5.5135	1.0113	26.8378
2.0DPC	5.0080	1.2640	33.5456
ค่าเฉลี่ย	5.124	1.2060	32.0064
	5.0660	1.2350	32.7760
0.5DTAB	5.5060	1.0150	33.5456
ค่าเฉลี่ย	5.6410	0.9475	32.0064
	5.5735	0.9813	32.7760
1.0DTAB	5.9450	0.7955	21.1120
ค่าเฉลี่ย	5.9410	0.7975	21.1651
	5.9430	0.7965	21.1385
1.5DTAB	7.1056	0.2152	5.7113
ค่าเฉลี่ย	7.2079	0.1641	4.3538
	7.1568	0.1896	5.0325
2.0DTAB	7.1240	0.2060	5.4671
ค่าเฉลี่ย	7.3504	0.0928	2.4628
	7.2372	0.1494	3.9650

ตารางที่ ง-5 ข้อมูลการซึบน้ำเสียดสมความเข้มข้นฟีนอลต่อตะกั่วเท่ากับ 10:10 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตัวดูดซับ	น้ำเสียดสมตะกั่วต่อฟีนอล (มก./ลิตร) ; $C_b^1 = 7.5360$ มก./ลิตร		
	C_c^2 (มก./ลิตร)	q_c^3 (มก./ก.)	%R ⁴
โซเดียมเบนโทไนด์	8.6970	N/D ⁵	N/D
ค่าเฉลี่ย	9.0045	N/D	N/D
	8.8508	N/D	N/D
0.5DPC	6.2450	0.6455	17.1311
ค่าเฉลี่ย	5.7700	0.8830	23.4342
	6.0075	0.7643	20.2826
1.0DPC	6.4250	0.5555	14.7426
ค่าเฉลี่ย	6.5129	0.5116	13.5762
	6.4690	0.5335	14.1594
1.5DPC	6.4580	0.5390	14.3047
ค่าเฉลี่ย	6.3280	0.6040	16.0297
	6.3930	0.5715	15.1672
2.0DPC	6.1278	0.7041	18.6863
ค่าเฉลี่ย	6.2100	0.6630	17.5955
	6.1689	0.6836	18.1409
0.5DTAB	6.1009	0.7176	19.0433
ค่าเฉลี่ย	6.1270	0.7045	18.6969
	6.1139	0.7110	18.8701
1.0DTAB	6.5809	0.4776	12.6738
ค่าเฉลี่ย	6.6100	0.4630	12.2877
	6.5954	0.4703	12.4808
1.5DTAB	7.0450	0.2455	6.5154
ค่าเฉลี่ย	7.1005	0.2178	5.7789
	7.0728	0.2316	6.1472
2.0DTAB	7.1560	0.1900	5.0425
ค่าเฉลี่ย	7.2680	0.1340	3.5563
	7.2120	0.1620	4.2994

¹ ความเข้มข้นแบลงค์น้ำเสียฟีนอลและตะกั่ว

² ความเข้มข้นฟีนอลที่สภาวะสมดุล

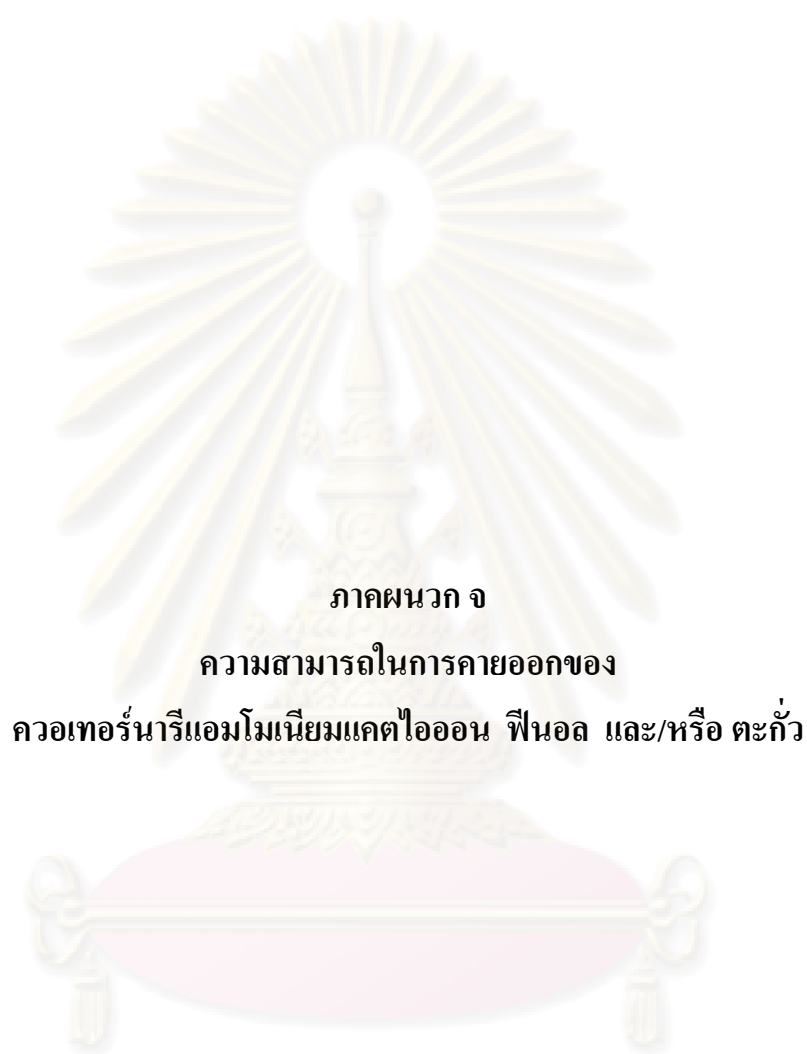
³ ความสามารถในการจับฟีนอล

⁴ ประสิทธิภาพในการจับฟีนอล

⁵ ไม่สามารถหาค่าได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

ความสามารถในการคายออกของ

ควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน ฟีนอล และ/หรือ ตะกั่ว

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง จ-1 -ข้อมูลความสามารถในการคายออกของ QACs, ฟีนอล และ/หรือ ตะกั่ว

ตัวดูดซับ	ความเข้มข้นก่อนการคายออก (มก./ลิตร)			ความเข้มข้นหลังการคายออก (มก./ลิตร)		
	QACs	ฟีนอล	ตะกั่ว	QACs	ฟีนอล	ตะกั่ว
2.0DPC	2.5551	-	-	2.4785	-	-
	2.5553	-	-	2.4905	-	-
ค่าเฉลี่ย	2.5552	-	-	2.4845	-	-
2.0DTAB	2.7759	-	-	2.5460	-	-
	2.7751	-	-	2.4780	-	-
ค่าเฉลี่ย	2.7755	-	-	2.5120	-	-
ออร์การ์โนเคลย์ที่ ดูดซับฟีนอล	-	-	-	0.0938	3.0050	-
	-	-	-	0.0980	3.5046	-
ค่าเฉลี่ย	-	-	-	0.0959	3.2548	-
ออร์การ์โนเคลย์ที่ ดูดซับตะกั่ว	-	-	-	-	-	4.8052
	-	-	-	-	-	5.3600
ค่าเฉลี่ย	-	-	-	-	-	5.0826
ออร์การ์โนเคลย์ที่ ดูดซับน้ำเสียผสม	-	-	-	-	5.9004	3.2500
	-	-	-	-	4.680	3.7040
ค่าเฉลี่ย	-	-	-	-	5.2902	3.4770

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ
วิธีการคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จ-1 ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณ DPC และ DTAB ที่ใช้เตรียมออร์กาโนเคลย์

ปริมาณ DPC ที่ใช้เตรียมออร์กาโนเคลย์สามารถคำนวณได้จาก

$$f = \frac{M_{cation}}{CEC \times M_{clay} \times GMW_{cation} \times Z}$$

เมื่อ

- f = สัดส่วนค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)
- M_{cation} = มวลควอเตอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออนตามสัดส่วนค่า CEC (กรัม)
- CEC = ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ
- M_{clay} = มวลของโซเดียมเบนโทไนต์ (กรัม)
- GMW_{cation} = น้ำหนักโมเลกุลของควอเตอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน (กรัมต่อโมล)
- Z = โมลของประจุต่ออิกวิวาเลนต์ (โมลต่ออิกวิวาเลนต์)

ตัวอย่าง; การคำนวณหาปริมาณ DPC เพื่อเตรียมออร์กาโนเคลย์จากโซเดียมเบนโทไนต์ 10 กรัม และค่าสัดส่วนการแลกเปลี่ยนประจุ 0.5 เท่าของค่า CEC

จาก $f = 0.5$, $M_{clay} = 10$ กรัม, $CEC = 90$ eq/100 กรัม, $GMW_{cation(DPC)} = 283.90$ กรัม/โมล
 $Z = 1$ โมล/eq

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } M_{cation} &= \frac{0.5 \times 90 \times 10^{-3} \text{ eq} \times 10 \text{ กรัม} \times 283.90 \text{ กรัม} \times 1 \text{ โมล}}{100 \text{ กรัม} \quad \quad \quad \text{โมล} \quad \quad \quad \text{eq}} \\ &= 1.2776 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จ-2 ตัวอย่างการคำนวณหาความสามารถในการดูดซับฟีนอล และ/หรือ ตะกั่ว

ความสามารถในการดูดซับคำนวณได้จาก

$$q_e = \frac{(C_b - C_e)V}{M}$$

- เมื่อ
- q_e = ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
 - C_b = ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)
 - C_e = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)
 - V = ปริมาณสารละลาย (ลิตร)
 - M = มวลของตัวดูดซับ (กรัม)

ตัวอย่าง; การคำนวณหาความสามารถในการดูดซับฟีนอลจากตารางที่ ข-2;

$M_{0,SDPC} = 0.1002$ กรัม, ความเข้มข้นแบลงค์ฟีนอล = 3.7267 มก./ลิตร,

ความเข้มข้นฟีนอลที่สภาวะสมดุล = 1.8634 มก./ลิตร, ปริมาณ 25 มิลลิลิตร(0.025 ลิตร)

$$\begin{aligned} q_e &= \frac{(3.7267 \text{ มก./ลิตร} - 1.8634 \text{ มก./ลิตร}) \times 0.025 \text{ ลิตร}}{0.1002 \text{ กรัม}} \\ &= 0.4649 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม} \end{aligned}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จ-3 ตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล และ/หรือ ตะกั่ว
ประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล และ/หรือ ตะกั่วคำนวณได้จาก

$$\% \text{ Removal} = \frac{(C_b - C_e)}{C_b} \times 100$$

เมื่อ

q_c = ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

C_b = ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_e = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

% Removal = ประสิทธิภาพในการกำจัด

ตัวอย่าง การคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลจากตารางที่ ข-2;

ความเข้มข้นแบลงค์ฟีนอล = 3.7267 มก./ลิตร,

ความเข้มข้นฟีนอลที่สภาวะสมดุล = 1.8634 มก./ลิตร

$$\begin{aligned} \% \text{ Removal} &= \frac{(3.7267 - 1.8634)}{3.7267} \times 100 \\ &= 50 \% \end{aligned}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวฐิติรัตน์ ดิษฐ์แก้ว เกิดเมื่อวันที่ 11 กันยายน พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา 2549 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย