

การดูดซับสารอินทรีย์จากน้ำโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

นางสาว ปิยะมาภรณ์ จารวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-533-228-3

**REMOVAL OF ORGANIC COMPOUNDS FROM AQUEOUS
SOLUTION BY MONTMORILLONITE CLAY**

Miss Piyamaporn Charuwong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Chemical Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2002

ISBN 974-533-228-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การดูดซับสารอินทรีย์จากน้ำโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

REMOVAL OF ORGANIC COMPOUNDS FROM AQUEOUS SOLUTION BY
MONTMORILLONITE CLAY

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย)

ประธานกรรมการ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนวรรณ เกียรติโกมล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาลี ตั้งสถิตย์กุลชัย)

กรรมการ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

.....
(รองศาสตราจารย์ น.อ.ดร.วราภรณ์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปิยมภรณ์ จารวงศ์ : การดูดซับสารอินทรีย์จากน้ำ โดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์
(REMOVAL OF ORGANIC COMPOUNDS FROM AQUEOUS SOLUTION BY
MONTMORILLONITE CLAY)

อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. รัตน์วรรณ (วิบูลสวัสดิ์) เกียรติโกมล, 118 หน้า
ISBN 974-533-228-3

จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ และ Organo-clays (แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวด้วยสารอินทรีย์ประเภท Quaternary Ammonium Compounds [QACs]) มาดูดซับสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ สาร QACs ที่ใช้ในการทดลองได้แก่ Tetramethylammonium (TMA), Hexadecyltrimethylammonium (HDTMA), Tetradecyltrimethylammonium (TDMA) และ Benzyltrimethylhexadecylammonium (BDHDMA) ซึ่งสารเหล่านี้จะมีความยาวของหมู่อัลคิลและขนาดโมเลกุลต่างกัน สารอินทรีย์ที่ต้องการดูดซับจากน้ำได้แก่ กรดฮิวมิก เมธิลีนบลู เมธิลออเรนจ์ ฟีนอล 3-คลอโรฟีนอล และแอฟทาลีน

ในการศึกษาแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วนคือ การทดลองแบบกะและการทดลองแบบเบดนิ่ง ในการทดลองแบบกะแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และ Organo-clays สามารถดูดซับสารอินทรีย์จากน้ำได้ และพบว่า Organo-clays (HDTMA-clays, TDMA-clays และ BDHDMA-clays) มีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ได้มากกว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ สำหรับการทดลองแบบเบดนิ่งจะเลือกใช้ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับสารละลายอินทรีย์แต่ละชนิดจากการทดลองแบบกะเพื่อหาอัตราการดูดซับ ผลการทดลองพบว่าปริมาณการดูดซับสารอินทรีย์ในระบบหอดูดซับขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับซึ่งสามารถหาปริมาณที่จุดเบรคทROUGHของสารละลายอินทรีย์แต่ละชนิดได้ นอกจากนี้ยังศึกษาสมบัติทางกายภาพของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและ Organo-clays เช่น ระยะห่างระหว่างชั้นโครงสร้าง พื้นผิว และ ปริมาณคาร์บอนบนแร่ดิน พบว่ามีความสัมพันธ์กันระหว่างลักษณะทางกายภาพและความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดต่างๆ

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

PIYAMAPORN CHARUWONG : REMOVAL OF ORGANIC COMPOUNDS FROM
AQUEOUS SOLUTION BY MONTMORILLONITE CLAY THESIS ADVISOR :
ASSIST.PROF RATANAWAN (WIBULSWAS) KIATKOMON, Ph.D. 118 PP.
ISBN 974-533-228-3

MONTMORILLONITE/ORGANO-CLAYS/ADSORPTION

The aim of this research is to investigate the feasibility of utilizing Montmorillonite and Organo-clays (Montmorillonite modified by Quaternary Ammonium Compounds [QACs]) for the removal of organic compounds from aqueous solution. The QACs used in the preparation of Organo-clays were Tetramethylammonium (TMA), Hexadecyltrimethylammonium (HDTMA), Tetradecyltrimethylammonium (TDMA) and Benzyldimethylhexadecylammonium (BDHDMA). These QACs are different in their alkyl chain length and size. The targets of the removal were humic acid, methylene blue, methyl orange, phenol, 3-chlorophenol and naphthalene.

The experiments consisted of two parts, batch and fixed-bed adsorption experiments. For batch adsorption results, Montmorillonite And Organo-clays were able to uptake the studied organic compounds from aqueous solution and Organo-clays (HDTMA-clays, TDMA-clays and BDHDMA-clays) had the higher efficiency. For fixed-bed experiments, the best sorbent clay for each studied sorbate were selected from batch adsorption results. The kinetic rates of adsorption were determined. For fixed-bed adsorption results, the capacity of adsorption depends on the contact time between the adsorbent and adsorbate. The breakthrough curve of each studied sorbate were found. Relations between the physical properties such as interlayer spacing, BET surface area and carbon content, and the adsorption capacities of the Montmorillonite and Organo-clays were noticed.

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร.รัตวรรณ (วิบูลย์สวัสดิ์) เกียรติโกมล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ รศ.ดร.ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย และ ผศ.ดร.มาลี ตั้งสถิตย์กุลชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ รวมทั้งตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการทำวิจัย และขอขอบคุณอาจารย์สาขาวิศวกรรมเคมี สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนเงินวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยนิปปอนเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่อาคารศูนย์เครื่องมือ 1 อาคารศูนย์เครื่องมือ 2 และอาคารศูนย์เครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์การทดลองและสถานที่ในการทดลอง

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทและปริญญาเอก รหัส M43 และ M44 สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือทั้งทางร่างกายและแรงใจ โดยเฉพาะ ณิชฐ์ บุ่ม และน้องขวัญ

ท้ายสุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้องที่เป็นกำลังใจอันสำคัญยิ่ง และให้การสนับสนุนส่งเสริมในการศึกษาตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

ปิยมาภรณ์ จารุงศ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	๗
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 นิยามคำศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย.....	6
2 ปรีทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 แร่ดิน.....	7
2.2 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์.....	9
2.3 Organo-clays.....	13
2.4 สารลดแรงตึงผิว.....	15
2.5 กรดฮิวมิก.....	18
2.6 สีข้อม.....	20
2.7 สารประกอบฟีนอลิก.....	22
2.8 แนนพธาไลน์.....	23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.9	กระบวนการดูดซับ	24
2.10	โมเดลจลนพลศาสตร์การดูดซับ	27
2.11	โมเดลการดูดซับ	28
2.12	บริเวณการเคลื่อนย้ายมวลสารสำหรับการดูดซับในหอดูดซับ	30
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
3.1	รูปแบบการทดลองและสถานที่ทำการทดลอง.....	32
3.2	ประชากรศึกษาและขนาดตัวอย่าง	32
3.3	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง.....	33
3.4	เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	34
3.5	วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล.....	34
3.5.1	วิธีวัดปริมาณตัวถูกละลายอินทรีย์	34
3.5.2	การปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติโดยใช้ QACs.....	34
3.5.3	การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพระหว่างแร่ดิน มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และ Organo-clays.....	35 36
3.5.4	การศึกษาผลการดูดซับสารอินทรีย์ในกระบวนการดูดซับแบบกะ	36
3.5.5	การศึกษาผลการดูดซับสารอินทรีย์ในกระบวนการดูดซับแบบเบดนิ่ง.....	37
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล	39
4.1	ลักษณะทางกายภาพของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์และ Organo-clay.....	39
4.2	ความสามารถของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับสารอินทรีย์ ในการทดลองแบบกะ	44
4.2.1	ศึกษาจลนพลศาสตร์ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์และ Organo-clays.....	44
4.2.2	ศึกษาความสามารถของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและ Organo-clays ในการดูดซับสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิคงที่	53
4.2.3	ศึกษาผลกระทบของความเป็นกรด-ด่าง ต่อความสามารถในการ ดูดซับสารอินทรีย์	65

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.4	ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์	69
4.3	ความสามารถของเรซินมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับสารอินทรีย์ ในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง.....	74
4.3.1	ศึกษาค่าการซึมผ่านทรายผสมตัวดูดซับของน้ำ.....	74
4.3.2	ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับในระบบหอดูดซับ.....	77
4.3.3	ศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ.....	84
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	88
5.1	สรุปผลการวิจัย	88
5.1	ข้อจำกัดของการวิจัย	89
5.2	ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยต่อไป	89
	เอกสารอ้างอิง.....	90
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐาน.....	94
	ภาคผนวก ข ลักษณะทางกายภาพ.....	101
	ภาคผนวก ค เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	113
	ประวัติผู้เขียน	118

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	องค์ประกอบทางเคมีของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (แสดงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)..... 12
3.1	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองแบบกะ และการทดลองแบบเบคนิ่ง.....33
3.2	ความยาวคลื่น (λ) สำหรับการดูดกลืนแสงของสารละลายอินทรีย์ที่ศึกษา35
3.3	ปริมาณตัวดูดซับ และปริมาตรของสารอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองแบบกะ36
3.4	อัตราส่วนระหว่างทรายและปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลองแบบเบคนิ่ง38
4.1	พื้นที่ผิวจำเพาะ และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ และ Organo-clays.....40
4.2	ลักษณะทางกายภาพของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์และ Organo-clays โดยเทคนิค XRD และMastersizer42
4.3	ปริมาณคาร์บอนและประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนประจุของ Organo-clays43
4.4	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากสมการ Psuedo-Second Order.....51
4.5	เปรียบเทียบความสามารถการดูดซับกรดฮิวมิคของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดต่างๆ54
4.6	ความสามารถการดูดซับเมธิลีนบลูของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดต่างๆ57
4.7	ความสามารถการดูดซับเมธิลออเรนจ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดต่างๆ59
4.8	ความสามารถการดูดซับ 3-คลอโรฟีนิลของ Organo-clays ชนิดต่างๆ62
4.9	แสดงค่าที่ได้จากสมการ Linear Adsorption Isotherm62
4.10	แสดงคุณสมบัติของตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดสำหรับการกำจัด สารอินทรีย์แต่ละชนิดที่ทำการศึกษาและคุณสมบัติของสารอินทรีย์.....64
4.11	ความสามารถการดูดซับกรดฮิวมิคของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ ที่อุณหภูมิต่างๆ69
4.12	ความสามารถการดูดซับเมธิลีนบลูของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และ 50% CEC- HDTMA-clay ที่อุณหภูมิต่างๆ 70
4.13	ความสามารถการดูดซับเมธิลออเรนจ์ของ 100%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิต่างๆ..... 71
4.14	ความสามารถการดูดซับแนฟธาซีนของ 150%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิต่างๆ 73

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.15 แสดงค่าการซึมผ่านทรายของน้ำที่ความสูงของเบคกิ้งต่างกัน.....	75
4.16 แสดงค่าการซึมผ่านทรายผสมแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ของน้ำ ที่ ความสูงเบคกิ้ง 10 cm.	76
4.17 ระยะเวลาสัมผัสระหว่างสารละลายอินทรีย์กับตัวดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ของสารละลายอินทรีย์ต่างกัน	83
4.18 ระยะเวลาสัมผัสระหว่างสารละลายอินทรีย์กับตัวดูดซับที่ปริมาณตัวดูดซับต่างกัน	86
4.19 เปรียบเทียบปริมาณสารอินทรีย์บนตัวดูดซับในการทดลองแบบกะและเบคกิ้ง	87
ก1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกรดฮิวมิกกับค่า Absorbance	95
ก2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมธิลีนบลู กับค่า Absorbance	96
ก3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมธิลออเรนจ์ กับค่า Absorbance.....	97
ก4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล กับค่า Absorbance	98
ก5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย 3-คลอโรฟีนอล กับค่า Absorbance	99
ก6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเนฟธาไลน์ กับค่า Absorbance.....	100
ข1 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ	102
ข2 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 100%CEC-TMA-clay	103
ข3 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 200%CEC-TMA-clay	104
ข4 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 50%CEC-HDTMA-clay	105
ข5 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 100%CEC-HDTMA-clay.....	106
ข6 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 200%CEC-HDTMA-clay	107
ข7 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 50%CEC-TDMA-clay	108
ข8 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 100%CEC-TDMA-clay.....	109
ข9 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 200%CEC-TDMA-clay	110
ข10 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 100%CEC-TDMA-clay	111

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์..... 10
2.2	ความสัมพันธ์ของ pH กับระยะห่างระหว่างชั้นของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์..... 12
2.3	การปรับเปลี่ยนพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติด้วย QACs..... 14
2.4	โครงสร้างทางเคมีของ TMA 15
2.5	โครงสร้างทางเคมีของ HDTMA 16
2.6	โครงสร้างทางเคมีของ TDMA 16
2.7	โครงสร้างทางเคมีของ BDHDMA 17
2.8	กระบวนการสังเคราะห์อิวมัสตามธรรมชาติ..... 19
2.9	โครงสร้างทางเคมีของเมธิลออเรนจ์..... 21
2.10	โครงสร้างทางเคมีของเมธิลีนบลู..... 21
2.11	โครงสร้างทางเคมีของฟีนอล..... 22
2.12	โครงสร้างทางเคมีของ 3-คลอโรฟีนอล 23
2.13	โครงสร้างทางเคมีของแนฟทาลีน 23
2.14	รูปแบบของ Adsorption Isotherm..... 26
2.15	แสดง Mass Transfer Zone..... 30
3.1	การทดลองการดูดซับแบบเบดนิ่ง..... 38
4.1	เปรียบเทียบการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และ Organo-clays..... 40
4.2	การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและ Oranno-clays..... 41
4.3	ร้อยละการกำจัดกรดฮิวมิกที่เวลาต่างๆเมื่อใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ 44
4.4	เปรียบเทียบร้อยละการกำจัดกรดฮิวมิกที่เวลาต่างๆเมื่อใช้มอนต์มอริลโลไนต์ธรรม ชาติ และ Organo-clays (100%CEC-HDTMA clay) เป็นตัวดูดซับ $C_0=160$ mg/L 45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	ร้อยละการกำจัดเมธิลีนบลูที่เวลาต่างๆเมื่อใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ..... 46
4.6	ร้อยละการกำจัดเมธิลีนบลูที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 50%CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ 46
4.7	ร้อยละการกำจัดเมธิลีนบลูที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 100%CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ..... 47
4.8	ร้อยละการกำจัดฟีนอลที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 100%CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ 48
4.9	ร้อยละการกำจัด 3-คลอโรฟีนอลที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 200%CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ..... 49
4.10	ร้อยละการกำจัดเนฟธาลินที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 150%CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ..... 50
4.11	การดูดซับกรดฮิวมิกโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์..... 52
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ กับปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ โดยใช้ Organo- clays ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย QACs ต่างชนิดกัน 54
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ กับปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ โดยใช้ Organo- clays ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย QACs ต่างชนิดกันและปริมาณแตกต่างกัน 55
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลีนบลูที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ กับปริมาณเมธิลีนบลูบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ 56
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลีนบลูที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ กับปริมาณเมธิลีนบลูบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ 58
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับ ปริมาณฟีนอลบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ 60
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ 3-คลอโรฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการ ดูดซับกับปริมาณ 3-คลอโรฟีนอลบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ 61
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเนฟธาลินที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ กับปริมาณเนฟธาลินบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ. 63
4.19	อิทธิพลของความเป็นกรด-ด่าง ต่อปริมาณการดูดซับกรดฮิวมิกที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นตัวดูดซับ. 65
4.20	อิทธิพลของความเป็นกรด-ด่าง ต่อการดูดซับเมธิลีนบลูที่อุณหภูมิห้อง..... 66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 อิทธิพลของความเป็นกรด-ด่าง ต่อการดูดซับเมธิลออเรนจ์ที่อุณหภูมิห้องของ 100% CEC-HDTMA-clay	67
4.22 อิทธิพลของความเป็นกรด-ด่าง ต่อการดูดซับฟีนอลของ 200%CEC-HDTMA-clay ที่ $C_0=40$ mg/L.....	68
4.23 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับกรดฮิวมิคของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ.....	69
4.24 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับเมธิลีนบลูของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ	70
4.25 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับเมธิลออเรนจ์ของ 100%CEC-HDTMA-clay.....	71
4.26 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับฟีนอลของ 200%CEC-HDTMA-clay	72
4.27 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับแนฟทาลีนของ 150%CEC-HDTMA-clay	73
4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln h_0/h$ กับเวลาที่ความสูงของเบตต์ต่างกัน	75
4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln h_0/h$ กับเวลาที่ %wt ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่างกัน ที่ความสูงเบตต์ 10 cm.....	76
4.30 กราฟเบรคทรูของกรดฮิวมิคโดยใช้ 100%CEC-BDHDMA-clay เป็นตัวดูดซับที่ 5%wt h=20 cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min.....	77
4.31 กราฟเบรคทรูของกรดฮิวมิคโดยใช้ 100%CEC-BDHDMA-clay เป็นตัวดูดซับที่ 5%wt $C_0=40$ mg/L h=20 cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min.....	78
4.32 กราฟเบรคทรูของเมธิลีนบลูโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นตัวดูดซับที่ 2%wt $C_0=2.5$ mg/L h=20 cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min.....	79
4.33 กราฟเบรคทรูของเมธิลีนบลูโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นตัวดูดซับที่ 2%wt $C_0=15$ mg/L h=20 cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min.....	79
4.34 กราฟเบรคทรูของเมธิลออเรนจ์โดยใช้ 100%CEC-BDHDMA-clay เป็นตัวดูดซับที่ 5%wt h=20 cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min.....	80
4.35 กราฟเบรคทรูของ 3-คลอโรฟีนอลโดยใช้ 100%CEC-BDHDMA-clay เป็นตัวดูดซับที่ 5%wt h=20 cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min.....	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.36 กราฟเบรคทรูของแนฟธาลิน โดยใช้ 100%CEC-BDHDMA-clay เป็นตัวดูดซับ ที่ 5%wt $C_0=30$ mg/L h=20 cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min.....	82
4.37 กราฟเบรคทรูของกรดฮิวมิกโดยใช้ 100%CEC-BDHDMA-clay เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0=40$ mg/L h=10 cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min	84
4.38 กราฟเบรคทรูของฟีนอลโดยใช้ 100%CEC-BDHDMA-clay เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0=15$ mg/L h=20 cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min.....	85
ก1 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกรดฮิวมิก กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 400 nm.	95
ก2 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมธิลีนบลู กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 698 nm.	96
ก3 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมธิลออเรนจ์ กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 463 nm.	97
ก4 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 268.89 nm.....	98
ก5 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย 3-คลอโรฟีนอล กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 277 nm.	99
ก6 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแนฟธาลิน กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 275 nm.	100
ข1 ลักษณะของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ใช้ในการวิจัย โดยเทคนิค SEM	112
ข2 ลักษณะของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติที่ใช้ในการวิจัย	112
ค1 เครื่องปั่นเหวี่ยงแยก	114
ค2 เครื่อง pH meter	114
ค3 เครื่องเขย่าแนวราบ.....	115
ค4 เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ.....	115
ค5 เครื่อง UV-VIS-NIR Spectrophotometer.....	116

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค6 เครื่อง Conductivity	116
ค7 เครื่อง Automatic Surface Analyzer.....	117

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

R^2	=	Correlation Coefficient
θ	=	The Bragg Angel
d_{001}	=	ระยะห่างระหว่างชั้นโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์
QACs	=	Quaternary Ammonium Cations
NOCs	=	Nonionic Organic Compounds
CMCs	=	Critical Micelle Concentrations
BET	=	Brunauer, Emmett and Teller
C.I	=	Colour Index
XRD	=	X-Ray Diffusion
TMA	=	Tetramethylammonium
HDTMA	=	Hexadecyltrimethylammonium
TDMA	=	Tetradecyltrimethylammonium
BDHDMA	=	Benzyltrimethylhexadecylammonium
SEM	=	Scanning Electron Microscope
Organo-clay	=	แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารอินทรีย์ประเภท QACs
CEC	=	Cation Exchange Capacity
C_e	=	ความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์ที่สมดุลหลังการดูดซับ
C_0	=	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอินทรีย์
q	=	ปริมาณการดูดซับสาร
q_e	=	ปริมาณการดูดซับสารที่สภาวะสมดุล
q_t	=	ปริมาณการดูดซับสารที่เวลา t
MTZ	=	Mass Transfer Zone
h	=	ความสูงของเบคนิง
%wt	=	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวดูดซับทั้งหมด โดยที่เหลือเป็นทรายควอทซ์
Q_b	=	อัตราการใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาอุตสาหกรรมและการขยายตัวของเมืองก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำซึ่งเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ สาเหตุหลักของการละลายการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ได้แก่ ค่าใช้จ่ายของการลงทุนที่ค่อนข้างสูงในการบำบัดน้ำเสีย เช่น โรงงานผลิตเยื่อกระดาษจะต้องใช้เงินลงทุนสูงถึง 500 ล้านบาท ในการก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสีย (วารสารสิ่งแวดล้อม, 2537) ดังนั้นหากสามารถปรับปรุงกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพแต่มีราคาถูกลงก็อาจเป็นแรงจูงใจให้ภาคอุตสาหกรรมทำการบำบัดน้ำเสียเพิ่มขึ้น ในปัจจุบันจึงมีความพยายามและงานวิจัยมากมายเพื่อปรับปรุงและพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆในการบำบัดน้ำเสีย โดยทั่วไปแล้วกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ กระบวนการทางกายภาพ และกระบวนการทางชีวภาพ

การดูดซับเป็นกระบวนการทางกายภาพกระบวนการหนึ่งในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีความสำคัญมากโดยเฉพาะในการกำจัดสารที่ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยกระบวนการทางชีวภาพ (McKay, 1996) คุณสมบัติของตัวดูดซับที่ดีจะต้องมีพื้นที่ผิวมาก และมีขนาดของรูพรุนใหญ่พอที่จะให้โมเลกุลที่จะถูกดูดซับเข้าไปได้ เมื่อพิจารณาในเชิงเศรษฐศาสตร์ตัวดูดซับที่ดีไม่ควรมีราคาสูง และควรมีน้ำหนักเบาใช้ใหม่ได้ ตัวดูดซับหลายชนิดได้ถูกคิดค้นขึ้นจากอดีตต่อเนื่องจนถึงปัจจุบันเช่น ถ่านกัมมันต์ (Goswai, Sharma, Nanoti, Gupta and Rawat, 1994) Zeolite (Vansant, 1994) Hydrotalcites (Amin and Jayson, 1996) และ Silicalite ซึ่งตัวดูดซับแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการดูดซับต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ถูกดูดซับและสภาวะของระบบ เช่น อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่างของระบบ เป็นต้น

ปัจจุบันนี้ได้มีความสนใจที่จะนำสารที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แร่ดิน (Clay Mineral) ชนิดมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) และ เบนโทไนต์ (Bentonite) มาใช้เป็นตัวดูดซับในระบบการบำบัดน้ำเสียเนื่องจากราคาถูกและพบในประเทศไทย แร่ดินทั้งสองชนิดนี้มีส่วนประกอบหลักคือ อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ในลักษณะซ้อนกันเป็นชั้น (Lamellar Structure) การเกิดช่องว่างระหว่างชั้นเหล่านี้จึงทำให้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ และเบนโทไนต์ตามธรรมชาติมีพื้นที่ผิวสูง และลักษณะโครงสร้างที่เป็นชั้นยังสามารถขยายตัวได้เมื่ออยู่ในของเหลว

เนื่องจากแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จากแต่ละแหล่งก็จะมีสมบัติแตกต่างกันออกไป การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์บางครั้งจึงเป็นเรื่องจำเป็น เพื่อให้มีสภาพเหมาะสมกับการนำไปใช้ดูดซับสารปนเปื้อนที่ต่างชนิดกันในน้ำ เช่น การขยายโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์โดยกระบวนการ Pillaring ทำให้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์สามารถดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำที่มีขนาดใหญ่ได้ (Albanis, Danis and Pomonis, 1997; Wibulswas, White and Rautiu, 1999) หรือการทำปฏิกิริยาของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์กับสารลดแรงตึงผิวประเภท QACs (Quarternary Ammonium Cations) เพื่อเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ให้เหมาะกับการดูดซับสารอินทรีย์ (Dentel, Jamrah and Sparks, 1998; Michot and Pinnavaia 1991; Gitipour, Bowers and Bodocsi, 1997) ในโครงการวิจัยนี้สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนสมบัติของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ได้แก่ Tetramethylammonium chloride ($C_4H_{12}ClN$) Hexadecyltrimethylammonium bromide ($C_{19}H_{42}BrN$) Tetradecyltrimethylammonium bromide ($C_{17}H_{38}NBr$) และ Benzyltrimethylhexadecylammonium chloride ($C_{25}H_{46}ClN$) ซึ่งสารเหล่านี้จะมีความยาวของหมู่อัลคิลและขนาดโมเลกุลต่างกัน

โครงการวิจัยนี้มีความมุ่งหมายที่จะศึกษาความสามารถและพัฒนาตัวดูดซับ (Adsorbent) โดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นวัสดุคิบในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยเน้นการใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ และแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวแล้วเป็นตัวแยกสารอินทรีย์ 6 ชนิดจากน้ำ คือ กรดฮิวมิก (Humic Acid) เมธิลีนบลู (Methylene Blue) เมธิลออเรนจ์ (Methyl Orange) แนฟธาลิน (Naphthalene) ฟีนอล (Phenol) และ 3-คลอโรฟีนอล (3-Chlorophenol) โดยใช้กระบวนการดูดซับแบบกะ (Batch Adsorption System) และกระบวนการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง (Fixed Bed Adsorption Column System) โดยสารอินทรีย์แต่ละชนิดที่เลือกมาศึกษามีสมบัติเฉพาะสารที่แตกต่างกัน เช่น กรดฮิวมิกเป็นสารอินทรีย์ที่พบทั่วไปในแหล่งน้ำธรรมชาติ เมธิลีนบลูเป็นสีอินทรีย์ (Dye) ที่มีประจุบวก เมธิลออเรนจ์เป็นสีอินทรีย์ที่มีประจุลบ ฟีนอลและแนฟธาลินเป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์ ที่ประกอบด้วยวงเบนซีน (Benzene Ring)

เนื่องจากแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารที่พบได้โดยทั่วไปในธรรมชาติ และสามารถพบได้ในประเทศไทย เช่น ในเขตอำเภอสบปราบ จังหวัดลำปาง และเขตอำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ (จุมพล กิ่งตัก, ชงชัย พึ่งรัมย์ และ พิภพ วสุวานิช, 2521) จึงมีราคาถูก คือ ประมาณ 7 บาท ต่อ 1 กิโลกรัม (ราคาจากบริษัท ไทยนิปปอนเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม จำกัด) แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มีการผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์อยู่แล้วเพื่อใช้เป็นส่วนผสมของโคลนเจาะ (Drilling mud) ที่ใช้ในการก่อสร้าง รวมทั้งใช้ในการขุดเจาะสำรวจหาก๊าซธรรมชาติและน้ำมัน จึงไม่มีปัญหาในด้านการจัดซื้อและความบริสุทธิ์ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

นอกจากนี้การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ไม่ต้องใช้กระบวนการทางความร้อน (Thermal Process) ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ซึ่งในกระบวนการผลิตต้องการการเผาที่อุณหภูมิสูง ทำให้มีต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง จึงเหมาะสมมากกว่าที่จะทดลองนำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ มาใช้เป็นตัวดูดซับในระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อลดค่าใช้จ่าย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 วัตถุประสงค์ทั่วไป

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ และ Organo-clays เป็นตัวดูดซับในระบบการดูดซับแบบกะและแบบเบดนิ่ง

1.2.2 วัตถุประสงค์เฉพาะสำหรับการทดลองแบบกะ (Batch Operation)

1.2.2.1 เพื่อศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างและอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และ Organo-clays

1.2.2.2 เพื่อศึกษาผลของปริมาณสารอินทรีย์ที่นำมาปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่อความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำ

1.2.2.3 เพื่อศึกษาผลของชนิดของสารอินทรีย์ที่นำมาปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่อความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำ

1.2.2.4 เพื่อหาชนิดของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวแล้ว ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์แต่ละชนิดที่ศึกษา

1.2.2.5 เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสารอินทรีย์โดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

1.2.3 วัตถุประสงค์เฉพาะสำหรับการทดลองแบบเบดนิ่ง (Fixed Bed Operation)

1.2.3.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดสารอินทรีย์ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์โดยกระบวนการดูดซับในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

1.2.3.2 เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอินทรีย์และปริมาณของตัวดูดซับในหอดูดซับ ต่อความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ

1.2.3.3 เพื่อหาปริมาณที่จุดเบรคทู (Breakthrough) ของสารอินทรีย์แต่ละชนิด

1.2.3.4 เพื่อเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับสารอินทรีย์ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ โดยวิธีการทดลองแบบกะและกระบวนการดูดซับแบบเบดนิ่ง

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ในน้ำเท่ากันแต่ความเป็นกรด-ด่างของระบบต่างกัน ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่างกัน

1.3.2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ในน้ำเท่ากันแต่อุณหภูมิของระบบต่างกัน ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่างกัน

1.3.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ในน้ำเท่ากันแต่ตัวดูดซับต่างชนิดกัน ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่างกัน

1.3.4 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ในน้ำต่างกัน ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่างกัน

1.3.5 ปริมาณของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่บรรจุในคอลัมน์ต่างกันทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ต่างกัน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ดำเนินการทดลองโดยลดขนาดและคัดขนาดมอนต์มอริลโลไนต์จนได้ช่วงขนาดอนุภาคที่ต้องการคือน้อยกว่า $106 \mu\text{m}$

1.4.2 เปลี่ยนแปลงสมบัติของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์โดยให้ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ประเภท QACs เพื่อเปลี่ยนแปลงลักษณะของพื้นผิวจากไม่ชอบสารอินทรีย์เป็นชอบสารอินทรีย์

1.4.3 นำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ได้มาวิเคราะห์สมบัติต่างๆทางกายภาพ เช่น ศึกษาหาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์โดยใช้ Automatic Surface Analyzer; ศึกษาโครงสร้างผลึกโดยใช้ XRD และวัดขนาดของอนุภาคด้วย Mastersizer และการวัดปริมาณคาร์บอนด้วยเครื่อง CHNS Analyzer ฯลฯ

1.4.4 การทดลองแบบกะ

1.4.4.1 ดำเนินการทดลองโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ และ Organo-clay เป็นตัวดูดซับสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ออกจากน้ำ โดยสารอินทรีย์แต่ละชนิดที่เลือกมาศึกษามีสมบัติเฉพาะสารที่แตกต่างกัน เช่น กรดฮิวมิกเป็นสารอินทรีย์ที่พบทั่วไปในแหล่งน้ำธรรมชาติ เมธิลีนบลูเป็นสีอินทรีย์ที่มีประจุบวก เมธิลออเรนจ์เป็นสีอินทรีย์ที่มีประจุลบ ฟีนอลและแนฟธาลินเป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์ที่มีวงเบนซีน

1.4.4.2 วิเคราะห์ผลการดูดซับโดยใช้ UV-VIS-NIR Spectrophotometer เพื่อหาความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในสารละลาย และเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดต่างๆ

1.4.4.3 ดำเนินการทดลองโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ และ Organo-clays เป็นตัวดูดซับสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วโดยเปลี่ยนแปลงสภาวะของการดูดซับ เช่น อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่างของระบบการดูดซับ รวมทั้งปริมาณและชนิดของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ใช้

1.4.5 การทดลองแบบเบคหนึ่ง

1.4.5.1 เลือกแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์แต่ละชนิด จากการทดลองแบบกะเป็นตัวดูดซับในการทดลองแบบเบคหนึ่ง

1.4.5.2 ดำเนินการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงสภาวะการดูดซับ เช่น ปริมาณของตัวดูดซับในหลอดดูด ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอินทรีย์ เพื่อหาค่าปริมาตรที่จุดเบรคทรูของสารอินทรีย์ชนิดต่าง

1.4.5.3 วิเคราะห์ผลการดูดซับโดยใช้ UV-VIS-NIR Spectrophotometer และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างการทดลองแบบเบคหนึ่งและการทดลองแบบกะ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการกำจัดสารอินทรีย์ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียและสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้เปรียบเทียบกับวิธีการบำบัดน้ำเสียที่ใช้อยู่เดิม

1.5.2 เป็นการนำวัสดุธรรมชาติที่มีในประเทศมาใช้ให้เกิดประโยชน์

1.5.3 ลดอันตรายและค่าใช้จ่ายที่อาจเกิดจากตัวดูดซับที่เป็นสารสังเคราะห์

1.5.4 สามารถนำข้อมูลพื้นฐานที่ได้มาไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์จากแหล่งน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำประปา

1.6 นิยามคำศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

1.6.1 กระบวนการดูดซับ หมายถึงการแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซโดยให้สารละลายหรือก๊าซผสมไหลสัมผัสกับตัวดูดซับ

1.6.2 มอนต์มอริลโลไนต์ เป็นแร่ดินชนิดหนึ่งอยู่ในกลุ่มสเมคไทต์ (Smectite) ประกอบด้วยแผ่นซิลิกาสองแผ่นและอลูมินาหนึ่งแผ่นสอดอยู่ระหว่างแผ่นซิลิกา มีพื้นที่ผิวสูงและมีความสามารถขยายตัวได้เมื่ออยู่ในของเหลว

1.6.3 100%CEC-TMA-clay คือแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วย TMA ปริมาณ 1 เท่าของค่า CEC ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

1.6.4 200%CEC-TMA-clay คือแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วย TMA ปริมาณ 2 เท่าของค่า CEC ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

1.6.5 50%CEC-HDTMA-clay คือแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วย HDTMA ปริมาณ 0.5 เท่าของค่า CEC ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

1.6.6 100%CEC-HDTMA-clay คือแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วย HDTMA ปริมาณ 1 เท่าของค่า CEC ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

1.6.7 200%CEC-HDTMA-clay คือแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วย HDTMA ปริมาณ 2 เท่าของค่า CEC ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

1.6.8 50%CEC-TDMA-clay คือแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วย TDMA ปริมาณ 0.5 เท่าของค่า CEC ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

1.6.9 100%CEC-TDMA-clay คือแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วย TDMA ปริมาณ 1 เท่าของค่า CEC ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

1.6.10 200%CEC-TDMA-clay คือแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วย TDMA ปริมาณ 2 เท่าของค่า CEC ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

1.6.11 100%CEC-BDHDMA-clay คือแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วย BDHDMA ปริมาณ 1 เท่าของค่า CEC ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

บทที่ 2

ปฐพีศาสตร์ดินและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แร่ดิน (ปิยะรัตน์ สารวงษ์)

แร่ดินเป็นแร่ที่พบในตะกอนและการสลายตัวของแร่ซิลิเกตในดิน แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จัดอยู่ในกลุ่มแร่ซิลิเกตที่เป็นแผ่น (Phyllosilicate) อยู่ในสภาพคอลลอยด์ ผลึกแร่ดินแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

ก. แร่ดินซิลิเกต (Silicate Clays) ได้แก่แร่ดินที่มีอลูมิเนียมและซิลิเกตเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ มีโครงสร้างเป็นแผ่นซ้อนๆ กัน

ข. แร่ดินที่มีส่วนผสมของเหล็กและอลูมิเนียม (Iron and Aluminum Clays) ได้แก่แร่ดินที่มีเหล็กและอลูมิเนียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบ

แร่ดินซิลิเกต (Silicate) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

ก. กลุ่มแร่ดินขาว (Kaolinite Group) เป็นดินเหนียวแบบ 1:1 คือมีแผ่นอลูมินาและแผ่นซิลิกาอย่างละแผ่นประกอบเป็น 1 หน่วย

ข. กลุ่มสมคไทต์ (Smectite or Montmorillonite) เป็นดินเหนียวแบบ 2:1 คือแผ่นซิลิกา 2 แผ่น ประกบแผ่นอลูมินา 1 แผ่น เป็น 1 หน่วย

ค. กลุ่มแร่ไมกา (Illite or Hydrous Mica) มีการจัดตัวแบบ 2:1 เช่นเดียวกับกลุ่มสมคไทต์แต่ในโครงสร้างมีโปแตสเซียมอยู่ทำให้ขยายตัวได้น้อย

สมบัติสำคัญของแร่ดินซิลิเกต

แร่ดินซิลิเกตมีคุณสมบัติแตกต่างจากแร่ที่มีเหล็กและอลูมินาในด้านคุณสมบัติการขยายตัว หดตัว การดูดซับไอออน โดยแร่ดินที่มีเหล็กและอลูมิเนียมผสมอยู่จะมีการขยายตัว หดตัว ตลอดจนความเหนียวน้อยกว่าแร่ดินซิลิเกต อำนาจในการดูดซับไอออนน้อยกว่า แต่ความคงทนต่อการชะล้างมากกว่าแร่ดินซิลิเกต อย่างไรก็ตามในกลุ่มของแร่ดินซิลิเกตเองมีคุณสมบัติแตกต่างกันในแต่ละกลุ่ม ทั้งนี้เนื่องมาจากการจัดตัวที่แตกต่างกันโดยแร่ดินที่มีการจัดตัวประเภท 2:1 มีการขยายตัวและอำนาจการดูดซับมากกว่าประเภท 1:1

รูปร่างและขนาดของแร่ดินซิลิเกต

ขนาดของอนุภาคแร่ดินซิลิเกตมีขนาดตั้งแต่ 0.01 ถึง 5.0 ไมครอน แปรตามชนิด และองค์ประกอบทางแร่ รูปร่างของแร่ดินซิลิเกตมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ (Flake-Like) ประกอบด้วยผลึกของแร่ที่มีโครงสร้างแบน เช่น แร่ไมกา และอนุภาคของดินเหนียว บางชนิดจะอยู่ในรูปผลึก 6 เหลี่ยมเห็นมุมชัดเจน

พื้นที่ผิว (Surface Area)

อนุภาคของแร่ดินซิลิเกตมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่อหน่วยน้ำหนัก หรือ Specific Surface สูงมาก เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กและเป็นแผ่นแบนและบางพื้นที่แตกต่างกันไปตามลักษณะ ในอนุภาคที่มีน้ำหนักเท่ากันอนุภาคที่เป็นรูปทรงกลมจะมีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด ส่วนอนุภาคที่เป็นรูปแบนหรือแผ่นจะมีพื้นที่ผิวมากที่สุด นอกเหนือจากพื้นที่ผิวภายนอก (External Surface) อนุภาคดินของแร่ดินเหนียวซิลิเกตบางชนิดยังมีพื้นที่ผิวภายใน (Internal Surface) ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวที่อยู่หลึบระหว่างแผ่นผลึกของแร่ดินเหนียวซิลิเกตที่ซ้อนทับกันเป็นอนุภาคหรือโมเลกุลของดินเหนียวรวมตัวกัน

ความเหนียว (Cohesion) และอ่อนตัว (Plasticity)

ความเหนียวหมายถึงความสามารถในการเกาะยึดกันระหว่างอนุภาคของดินและความอ่อนนุ่มบีบป็นให้ป็นรูปต่างๆ และคงสภาพอยู่เช่นนั้นได้เมื่อน้ำมีความชื้นที่เหมาะสม คุณสมบัติทางด้านความเหนียวและความอ่อนตัวนี้จะเกี่ยวข้องกับพื้นที่ผิวของดิน โดยดินที่มีความเหนียวและอ่อนตัวสูงจะเป็นดินที่มีพื้นที่ผิวมากจึงมีโอกาสดูดยึดอนุภาคของน้ำไว้ในผิวได้มาก ทำให้การยึดเกาะกันเพิ่มมากขึ้นด้วย

การขยายตัว (Swelling) และการหดตัว (Shrinking)

อนุภาคแร่ดินที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นผลึกที่ซ้อนทับกันเป็น Clay Micell จะมีช่องหรือหลึบระหว่างแผ่นค่อนข้างกว้างและการยึดเกาะไม่เหนียวนักทำให้อนุภาคของแร่ดินที่เปียกน้ำมีการพองตัวและขยายตัวมากขึ้น และหดตัวเมื่อเผาไล่น้ำที่อยู่ภายในอนุภาคให้หมดไป

ประจุลบและการดูดยึดไอออนบวก

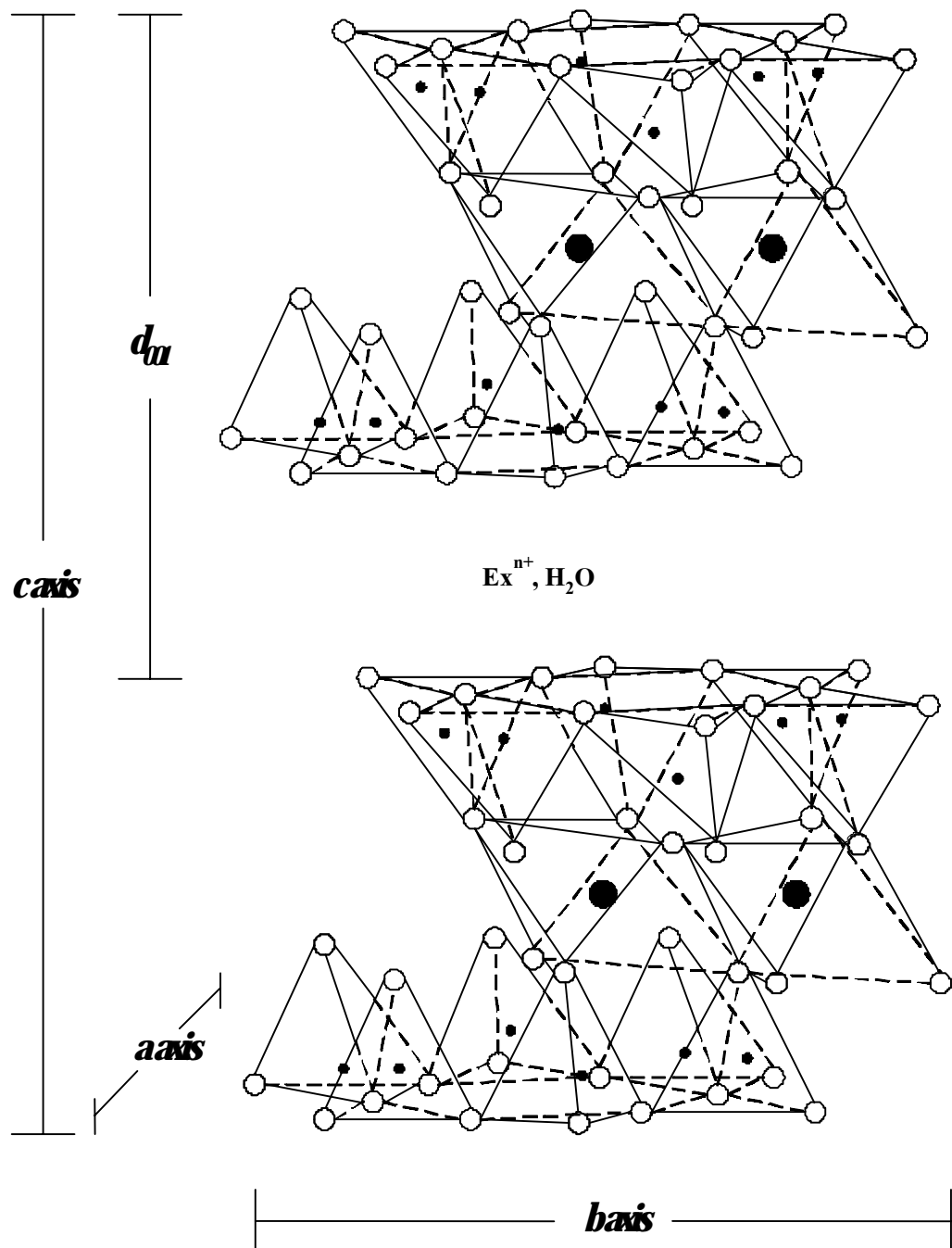
ตามปกติอนุภาคของแร่ดินในธรรมชาติจะมีประจุลบ และสามารถดึงดูดไอออนบวก ทำให้เกิดสภาพของประจูงสองชั้น หรือ Ionic Double Layer โดยอนุภาคดินเหนียวเป็นประจูงลบที่มีกลุ่มไอออนบวกล้อมรอบอยู่ไอออนบวกเหล่านี้จะถูกยึดติดอยู่ที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวและสามารถถูกแทนที่โดยไอออนบวกชนิดอื่น หรือที่เรียกว่า Exchangable Cation

2.2 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินในกลุ่มสมคไทต์ มีสูตรโครงสร้างทางเคมีทั่วไปคือ $M_{y+}(Al_{2-y}Mg_y)(Si_4O_{10}[OH_2]).nH_2O$ เมื่อ y คือระดับความไม่สมบูรณ์ของสารตัวอย่าง หรือสูตรอย่างง่ายคือ $Na_{0.6}(Al_{3.4}Mg_{0.6})(Si_8O_{20}[OH]_4).nH_2O$ (Caine et al., 1999) มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1 ประกอบด้วยแผ่นซิลิกาสองแผ่นและอลูมินาหนึ่งแผ่นสอดอยู่ระหว่างแผ่นซิลิกาและเกาะยึดออกซิเจนร่วมกันผลึกจะเชื่อมต่อกันในแนวระดับเป็นชั้นๆ และมักมีไอออนของโซเดียม แคลเซียมอยู่ด้วยในระหว่างชั้นโครงสร้าง คุณลักษณะคือสามารถขยายตัวได้เนื่องจากไม่มีพันธะไฮโดรเจนทำให้ประจุบวกต่างๆสามารถเข้าแทรกในระหว่างชั้นโครงสร้างได้ง่าย อนุภาคชนิดนี้จึงมีความสามารถในการดูดซับสูงและเกิดการแตกสลายของผลึกได้ง่ายทำให้อนุภาคที่พบมีขนาดเล็กคือมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.01–0.1 ไมครอน ช่องว่างระหว่างแผ่นที่ซ้อนทับกันมีความหนาแน่นที่สุดประมาณ 9.5 อังสตรอม (Wibulswas, 1999) ช่องว่างอาจจะขยายเพิ่มขึ้นได้ จากการศึกษาโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์โดยเทคนิค XRD พบว่าการสะท้อนกลับของรังสีทั้งหมดจะเกิดในทิศทางแนวแกน c ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการพองตัวในระหว่างชั้นอาจเป็นหนึ่งเท่า สองเท่าหรือหลายๆเท่าของจำนวนชั้นของน้ำที่มีอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลและแต่ละระดับของการพองตัวทำให้เกิดช่องว่าง ในการวัดระยะแกน c จะต้องมีการควบคุมความชื้น การสะท้อนกลับของรังสีโดยทั่วไปจากระบบ hk -band ในทิศทาง a และ b สามารถใช้บอกลักษณะของแร่แต่ละชนิดได้

ชั้นโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จะมีประจุลบและสามารถดึงดูดไอออนที่มีประจุบวกได้ ซึ่งประจุลบของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เกิดจากการแทนที่ของประจุโดย Al^{3+} ถูกแทนที่ด้วยประจุ Mg^{2+} ในแผ่นอลูมินาทำให้นิวเคลียสชนิดนี้แสดงประจุเป็นลบเนื่องจาก Mg^{2+} มีวาเลนซ์ต่ำกว่า Al^{3+} ประจุลบจึงตกค้าง เมื่อการถูกแทนที่เกิดขึ้นมากๆ ประจุลบจะมีอำนาจสูงพอที่จะยึดไอออนบวกได้ และ Al^{3+} สามารถเข้าไปแทนที่ Si^{4+} ได้จึงทำให้ประจุโดยรวมเป็นลบเช่นกัน

การจัดเรียงตัวของแผ่นซิลิกาจะขึ้นอยู่กับประจุบวกที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ซึ่งโดยปกติแล้วในแต่ละแผ่นจะมีโครงสร้างประกอบด้วยจำนวนของแผ่นที่รวมกันด้วยแรงดึงดูดระหว่างประจุซึ่งโครงสร้างนี้อาจเรียกว่าแทคทอยด์ (Tactoids) ซึ่งประกอบด้วย Lattice Platelets ประกบเข้าด้วยกัน ในธรรมชาติพบว่าประจุบวกส่วนใหญ่ที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์คือ โซเดียม และแคลเซียม ถ้าการแขวนลอยของแทคทอยด์มีเฉพาะโซเดียมเป็นประจุบวกในระหว่างชั้นโครงสร้างจะมี 1.4 หน่วยของ Platelets ต่อ 1 แทคทอยด์ แต่ถ้ามีเฉพาะแคลเซียมจะเป็น 3.9 หน่วยของ Platelets ต่อ 1 แทคทอยด์



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ วงกลมสีดำเล็กคือ Si^{4+} วงกลมสีดำใหญ่คือ Al^{3+} หรือ Mg^{2+} และวงกลมกลวง คือ ออกซิเจน

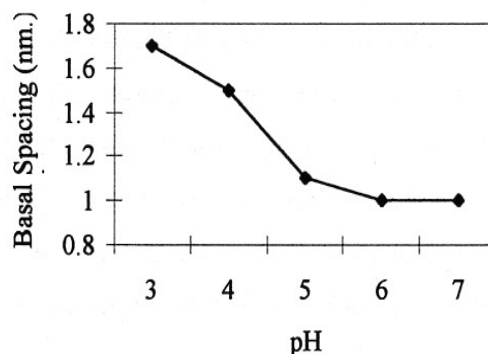
หมายเหตุ จาก Removal of Organic Compounds from Water using Modified Montmorillonite (26), โดย Wibulswas, 1999, PhD thesis. , Imperial College of Science Technology & Medicine, University of London.

ชนิดของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ แบ่งออกตามองค์ประกอบที่มีธาตุโซเดียมและแคลเซียมอยู่คือ

ก. แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ที่ประกอบด้วยแร่ดินโซเดียม-มอนต์มอริลโลไนต์ (Sodium-Montmorillonite) จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้มากเพราะว่าผลึกของดินที่มีขนาดเล็กมาก กระจัดกระจายอยู่ในน้ำทำให้น้ำโคลนมีลักษณะกึ่งแข็งและกึ่งเหลวคล้ายวุ้นเหมาะสำหรับเป็นน้ำโคลนไหลวนใช้ในการเจาะหรือเรียกว่า โคลนเจาะ (Drilling Mud) นอกจากนี้ยังใช้ผสมทรายทำเบ้าหลอม และวัสดุทนไฟ (Refractories)

ข. แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ที่ประกอบด้วยแร่ดิน แคลเซียม-มอนต์มอริลโลไนต์ (Calcium-Montmorillonite) หรือเรียกประเภทที่ไม่พองตัวมาก (Non Swelling Type) ซึ่งจะมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำและพองขยายตัวได้น้อยกว่าชนิดแรก แต่ก็สามารถนำมาทำโคลนเจาะหลุมตื้น ๆ ได้ ซึ่งก่อนจะนำไปทำโคลนเจาะได้ ต้องผ่านกรรมวิธีการปรับปรุงคุณภาพด้วย Soda Ash Polymers หรือสารเคมีอื่นเสียก่อน สำหรับแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดนี้ ส่วนใหญ่จะใช้ทำสารดูดซับหรือฟอกสี (Absorbents) ใช้ในเครื่องกรองน้ำมันในโรงกลั่น กรองน้ำบาดาลและน้ำมันพืชให้ปราศจากมลทิน ใช้ฟอกหนังและกรองน้ำมันเครื่องใช้แล้วให้คืนสู่สภาพเดิมได้

เมื่อมีน้ำใน โครงสร้างแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จะเกิดการพองตัวเนื่องจากแรงดึงดูดของโมเลกุลของน้ำเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวก ซึ่งปริมาณการพองตัวนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำว่ามากน้อยเพียงใดจึงจะสามารถแลกเปลี่ยนประจุได้ ถ้าประจุที่แลกเปลี่ยนคือประจุโซเดียมและมีน้ำอยู่จำนวนมากจะสามารถพองตัวได้หลายเท่า แต่ถ้าดินนั้นเกิดแห่งตัวลงก็จะเกิดการแยกตัวได้ จากการศึกษพบว่าระยะห่างระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบ โดยระยะห่างระหว่างชั้น โครงสร้างของแร่ดินจะมีค่าลดลงเมื่อมีความเป็นด่างมากขึ้น (Schnitzer and Khan, 1972) แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของ pH กับระยะห่างระหว่างชั้นของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

หมายเหตุ จาก Humic Substances in the Environment (253-279), โดย Schnitzer and Khan, 1972, New York : Marcel Dekker Inc.

แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่พบในประเทศไทยมักมีแร่ดินสมεκไทต์หรือแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ 70-80 % และมีสิ่งเจือปน ซึ่งบางครั้งประกอบด้วยคริสโตบาร์ไรต์ แคลไซต์ ซีมาไทต์ เฟลด์สปาร์ ควอตซ์ ไมกา และคาโอลิไนต์ปนอยู่บ้าง ซึ่งเป็นส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ ส่วนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ เป็นแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีชื่อทางการค้าว่า MAC-GEL ของบริษัท ไทยนิปปอนเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม จำกัด ซึ่งมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีน้ำตาล ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดเฉพาะของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ที่ใช้ในการวิจัย ค่า CEC ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มีค่าเท่ากับ 80 meq. ต่อ 100 g ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (แสดงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

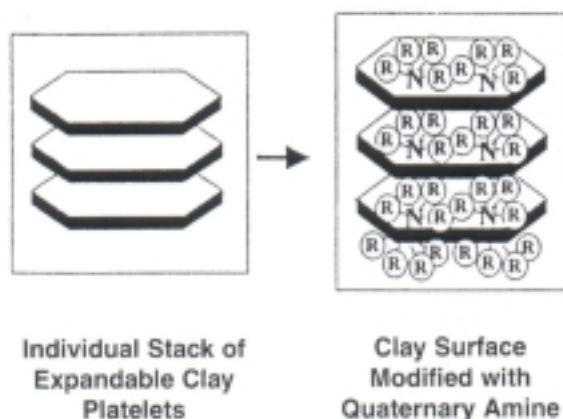
SiO ₂	56-60	MgO	1.5-2.0
Al ₂ O ₃	16-18	CaO	1.9-2.1
Fe ₂ O ₃	5-7	K ₂ O ₃	0.3-0.5
Na ₂ O	2.4-3	TiO ₂	1.2-1.5
Loss of Ignition	11-12		

หมายเหตุ จาก บริษัท ไทยนิปปอนเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม จำกัด

เนื่องจากแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จากแต่ละแหล่งจะมีสมบัติแตกต่างกันออกไป การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์บางครั้งจึงเป็นเรื่องจำเป็นเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ดูดซับสารปนเปื้อนที่ต่างชนิดกันในน้ำ เช่น การขยายโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์โดยกระบวนการ Pillaring ทำให้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์สามารถดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำที่มีขนาดใหญ่ได้ หรือ การแลกเปลี่ยนประจุบวกที่มีอยู่ตามธรรมชาติของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์กับสารลดแรงตึงผิวประเภท QACs เพื่อเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ให้เหมาะกับการดูดซับสารอินทรีย์

2.3 Organo-clays

ลักษณะพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในธรรมชาติจะแสดงพื้นผิวเป็นประจุลบและมีประจุบวกของสารอนินทรีย์เช่น Na^+ และ Ca^{2+} เกาะที่พื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ซึ่งสารเหล่านี้เป็นสารที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ทำให้ลักษณะพื้นผิวแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ แสดงลักษณะชอบน้ำ การดูดซับสารอินทรีย์ที่ไม่มีไอออน (Nonionic Organic Compounds, NOCs) เช่น เบนซีน อัลคิลเบนซีน และ Chlorinated Phenol ไม่สามารถที่จะดูดซับได้ (Kokkadapu and Boyd, 1995) เพื่อเป็นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เพื่อให้สามารถดูดซับสาร NOCs ได้ดีขึ้นจึงปรับปรุงด้วยสาร QACs โดย QACs สามารถที่จะถูกดูดซับได้ที่ที่ผิวด้านนอกและบริเวณช่องว่างระหว่างชั้นโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์โดยกระบวนการ Ion-Exchange (Dentel, 1996) ซึ่งจะแลกเปลี่ยนประจุระหว่าง QACs กับ Na^+ และ Ca^{2+} ทำให้มอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงสมบัติพื้นผิวด้วย QACs สามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้ทั้งที่ผิวด้านนอกและระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Michot and Pinnavaia, 1991) โดยระยะห่างระหว่างชั้นของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จะเปลี่ยนแปลงตามชนิดของ QACs ที่ใช้ปรับปรุงสมบัติพื้นผิว เช่น ระยะห่างระหว่างชั้นโครงสร้างของ TMA-Montmorillonite HDTMA-Montmorillonite และ DDDMA (Dioctecyldimethylammonium)-Montmorillonite มีค่าเท่ากับ 13.5 19.9 และ 19.5 Å ตามลำดับ (Dentel, 1996) โดยปกติจะเรียกแร่ดินที่ปรับปรุงคุณสมบัติว่า Organo-clays



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติด้วย QACs

หมายเหตุ จาก “The use of Modified Bentonite for Removal of Aromatic Organics from Contaminated Soil” โดย Gitipour, Bowersand and Bodocsi 1997, Journal of Colloid and Interface Science, 196, 191-198

Kukkadapu และ Boyd (1995) ศึกษาการดูดซับสารประกอบ Aromatic และ Chlorinated Hydrocarbons โดยใช้ Organo-clays (Tetramethylphosphonium: TMP-clay, TMA-clay) เป็นตัวดูดซับ การดูดซับไอของสารอินทรีย์ขึ้นกับค่า N_2 BET Surface Area ของตัวดูดซับ ส่วนการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำค่า Hydration ของตัวดูดซับจะมีความสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ TMP-clay จะมีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ดีกว่า TMA-clay เนื่องจาก ประจุบวกของ TMA จะมีค่า Hydration สูง

Dentel ในปี 1996 ศึกษาการใช้ Organo-clays ในการดูดซับสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำได้ดิน โดยสาร QACs ที่นำมาปรับปรุงแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์คือ TMA HDTMA และ DDDMA พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง มีผลต่อการดูดซับกรดอิมิกโดยใช้ HDTMA-montmorillonite เป็นตัวดูดซับและพบว่าสามารถดูดซับกรดอิมิกได้มากเมื่อค่า pH น้อยกว่า 5 เนื่องจากประจุบวกของกลุ่มคาร์บอกซิลและกลุ่มที่มีขั้วอื่นๆ ทำให้กรดอิมิกมีลักษณะเหมือน โมเลกุลที่ไม่มีประจุและเข้าไปแทรกที่ระยะห่างระหว่างชั้น โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์

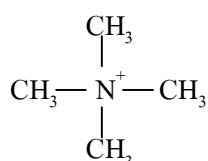
Lee และ Kim (2002) ได้ทำการศึกษาการดูดซับแนฟธาลินโดยใช้ แร่ดินกาอลินไนต์ (Kaolinite) และ แร่ดิน Halloysite ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วย HDTMA เป็นตัวดูดซับ พบว่าเมื่อปริมาณ HDTMA ที่นำมาปรับปรุงคุณสมบัติแร่ดินกาอลินไนต์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับแนฟธาลินมีมากขึ้น แต่สำหรับแร่ดิน Halloysite พบว่าปริมาณของ HDTMA ที่นำมาปรับปรุงคุณสมบัติไม่ค่อยมีผลต่อการดูดซับแนฟธาลิน แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างและลักษณะของแร่ดินที่จะนำมาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารลดแรงตึงผิวมีผลต่อความสามารถในการดูดซับสาร HOCs

2.4 สารลดแรงตึงผิว (Surfactants)

เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์จึงต้องปรับปรุงคุณสมบัติแร่ดินโดยการดูดซับสารลดแรงตึงผิวเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ที่ไม่ชอบน้ำ (Lee and Kim, 2002) สารลดแรงตึงผิวประเภท QACs เป็นสารอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจนำมาปรับปรุงคุณสมบัติแร่ดิน ลักษณะทั่วไปของ QACs คือ $([CH_3]_3NR)^+$ หรือ $([CH_3]_2NR_2)^+$ เมื่อ R โดยปกติคือ Aromatic หรือ Alkyl Hydrocarbon สาร QACs ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ TMA HDTMA TDMA และ BDHDMA ซึ่งสารลดแรงตึงผิวประเภทนี้มีประจุบวก (Ammonium Head Group) ทำให้สามารถดูดซับบนผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีประจุลบได้โดยกระบวนการ Cation Exchange กับ Na^+ และ Ca^{2+} ซึ่งมีอยู่ในโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ และส่วนหาง (Hydrocarbon Group) จะแสดงความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ทำให้สามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้มากขึ้น ลักษณะพิเศษของสารลดแรงตึงผิวคือ เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมีความเข้มข้นค่าหนึ่งโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเกิดการรวมตัวกันที่เรียกว่า Micelles การเกิด Micelles ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต้องมีค่ามากกว่าความเข้มข้นวิกฤติของโมโนเมอร์ของสารลดแรงตึงผิวเรียกความเข้มข้นที่จุดนี้ว่า Critical Micelle Concentrations (CMCs)

2.4.1 สารละลาย TMA

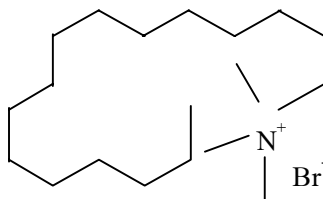
TMA เป็นสารโมเลกุลขนาดเล็ก มีน้ำหนักโมเลกุล 74 สูตรโมเลกุลคือ $(CH_3)_4N^+$ ลักษณะโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ TMA

2.4.2 สารละลาย HDTMA

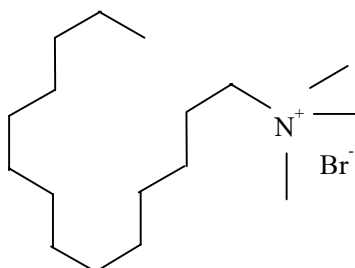
HDTMA เป็นสารโมเลกุลขนาดใหญ่มีน้ำหนักโมเลกุล 314 สูตรโมเลกุลคือ $(\text{CH}_3[\text{CH}_2]_{13})(\text{CH}_3)_3\text{N}^+$ ลักษณะโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.5 นอกจากนี้ไอออนของ HDTMA ยังไม่มีผลต่อความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลาย (Dentel, 1996) และมีค่า CMCs มีค่าเท่ากับ 0.9 meq/L



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของ HDTMA

2.4.3 สารละลาย TDMA

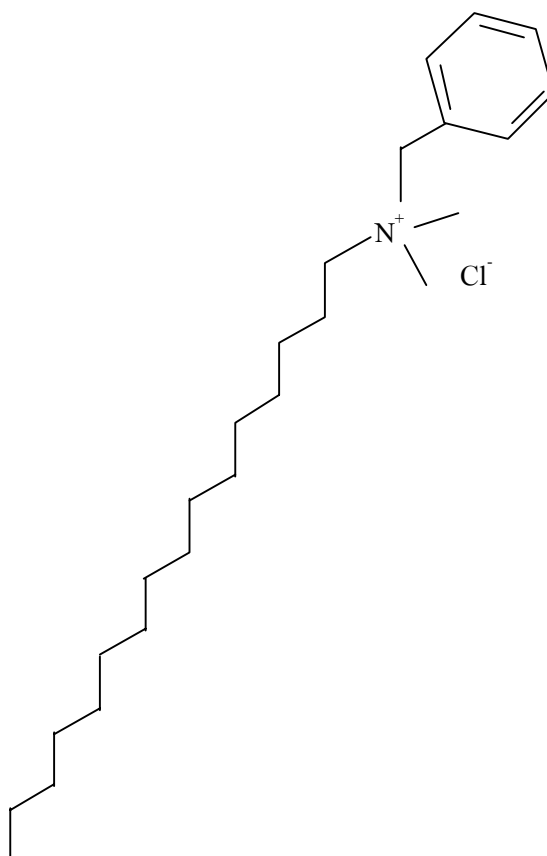
TDMA เป็นสารโมเลกุลขนาดใหญ่มีน้ำหนักโมเลกุล 286 มีสูตรโมเลกุลคือ $(\text{CH}_3[\text{CH}_2]_{13})(\text{CH}_3)_3\text{N}^+$ ลักษณะ โครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.6 ค่า CMCs มีค่าเท่ากับ 1.2 meq/L



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของ TDMA

2.4.4 สารละลาย BDHDMA

BDHDMA เป็นสารโมเลกุลขนาดใหญ่มีน้ำหนักโมเลกุล 361 สูตรโมเลกุลคือ $(\text{CH}_3[\text{CH}_2]_{15})\text{N}^+(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2\text{C}_6\text{H}_5$ ลักษณะโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของ BDHDMA

2.5 กรดฮิวมิก

สารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ (Organic Contaminants) แบ่งเป็น 3 กลุ่ม (ปิยรัตน์ สารระวงศ์, 2545) คือ

ก. Natural Organic Matter (NOM) ประกอบด้วย Humic Substance, Microbial Exudates และสารอื่นที่ละลายในน้ำจากแหล่งกำเนิด เช่น เนื้อเยื่อพืชและของเสียจากสัตว์

ข. Synthetic Organic Chemicals (SOCs) ประกอบด้วย ยาฆ่าแมลง, Volatile Organic Chemical (VOCs) และสารเคมีสังเคราะห์ตัวอื่น

ค. Chemical by-Product and Additives ที่เข้ามาหรือเกิดขึ้นในน้ำระหว่างการบำบัด (Treatment System) หรือในระบบจ่ายน้ำ (Distribution System)

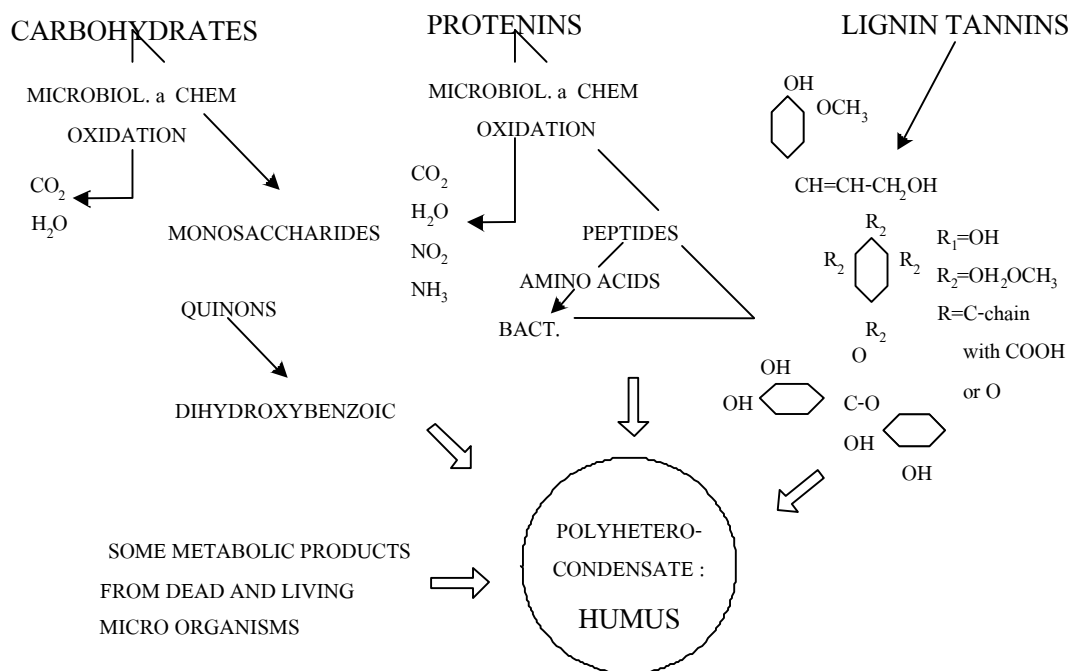
สารอินทรีย์ที่พบมากในแหล่งน้ำตามธรรมชาติคือสารฮิวมิก (Humic Substance) ส่วนใหญ่พบในรูปกรดฮิวมิกที่เกิดจากการย่อยสลายของซากพืชซากสัตว์ตามขบวนการทางธรรมชาติและจากการใช้ประโยชน์ในหลายลักษณะเช่น ทางการเกษตรใช้เป็นสารเพิ่มผลผลิต สารฮิวมิก สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

ก. กรดฮิวมิก เป็นส่วนที่พบมากของสารอินทรีย์ที่อยู่ในดิน มีคุณสมบัติละลายได้ในด่าง แต่ไม่ละลายในสภาวะที่เป็นกรดที่มีพีเอชต่ำกว่า 2 หรือในเอธานอล

ข. กรดฟัลวิก (Fulvic Acid) เป็นส่วนสารอินทรีย์ที่อยู่ในดินที่มีคุณสมบัติละลายได้ในสารละลายกรดและด่าง

ค. ฮิวมิน (Humic) มีคุณสมบัติไม่ละลายทั้งในสารละลายกรดและด่าง

โดยทั่วไปจะมีปริมาณกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก 40 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำ กรดฮิวมิกเป็นสารอินทรีย์ชนิดหนึ่งได้จากกระบวนการสังเคราะห์ฮิวมัสตามธรรมชาติพบในแหล่งน้ำทั่วไป กระบวนการสังเคราะห์ฮิวมัสตามธรรมชาติแสดงดังรูปที่ 2.8 ถ้าสารนี้ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำในปริมาณมากจะทำให้แหล่งน้ำมีสีเหลืองถึงสีน้ำตาล จากการศึกษาของ Nakis และ Rebbum ในปี 1977 พบว่าที่พีเอช 8 สารละลายที่มีความเข้มข้นกรดฮิวมิก 1 mg/L ทำให้เกิดหน่วยสี 26.5 หน่วยสี อีกทั้งทำให้น้ำมีกลิ่นและรสผิดไปจากธรรมชาติ



รูปที่ 2.8 กระบวนการสังเคราะห์ฮิวมัสตามธรรมชาติ

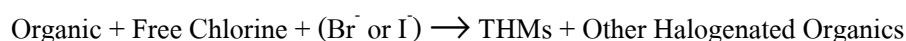
หมายเหตุ จาก Physical and chemical Characteristic of Aquatic Humus (268), โดย Gjessing, 1979, Michigan : Ann Arbor Science Publisher.

การเกิดปฏิกิริยาหรือการรวมตัวเป็นสารประกอบฮิวมิกไม่เป็นที่แน่ชัด แต่ละโมเลกุลของกรดฮิวมิกมีโครงสร้างซับซ้อนไม่แน่นอน แต่มีผู้ทำการศึกษาคือ Davies และ Ghabbour ปี 1999 พบว่าสูตรโครงสร้างกรดฮิวมิกคือ $C_{36}H_{30}O_{15}N_2 \cdot xH_2O$ เมื่อค่า x อยู่ระหว่าง 0 ถึง 15 มีขนาดโมเลกุลอยู่ระหว่าง 60 ถึง 100 อังสตรอม (Fitch and Du, 1996) กรดฮิวมิกประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic: $-COOH$) และหมู่เอไมด์ (Amide: $-N[OH]$) เกาะกันอยู่ดังนั้นจึงมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และส่วนไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะรวมกับสารประกอบเชิงซ้อน NOCs ขณะที่ส่วนชอบน้ำจะรวมตัวกับแร่ที่มีพื้นผิวเป็นบวก ในสารประกอบที่เป็นกรด หมู่เอไมด์จะรับประจุบวกกลายเป็น $(-N[OH]H_2^+)$ ทำให้กรดฮิวมิกมีสมบัติเป็นบวก แต่สถานะที่เป็นกลางหรือเป็นด่างหมู่คาร์บอกซิลิกจะสูญเสียประจุบวกกลายเป็น $(-COO^-)$



กรดฮิวมิกมีลักษณะที่สำคัญคือมีความคงตัวสูง ปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่มีมาตรฐานสำหรับความเข้มข้นกรดฮิวมิกที่ยอมให้ปนเปื้อนในน้ำได้แต่ในบางประเทศ เช่น สาธารณรัฐเชก กำหนดให้ความเข้มข้นกรดฮิวมิกที่ยอมให้ปนเปื้อนในน้ำได้ไม่เกิน 2.5 mg/L การกำจัดกรดฮิวมิกออกจากน้ำไม่สามารถกำจัดได้โดยวิธีการทางชีวภาพ ดังนั้นวิธีการกำจัดกรดฮิวมิกสามารถกำจัดได้ด้วยวิธีทางกายภาพ เช่น กระบวนการดูดซับ

กรดฮิวมิกและกรดฟัลวิกสามารถทำปฏิกิริยากับคลอรีนซึ่งมีอยู่ทั่วไปในกระบวนการบำบัดน้ำเสียเกิดเป็นสารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane:THMs) สมการการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้คือ



สารไตรฮาโลมีเทนเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ (El-Shafy and Gruwld, 2000) โดยเฉพาะอย่างยิ่งคลอโรฟอร์มซึ่งมีรายงานว่าทำให้เกิดมะเร็งในสัตว์ทดลอง สำนักงานสิ่งแวดล้อมแห่งชาติสหรัฐอเมริกา (US.EPA) กำหนดค่าการปนเปื้อนสูงสุด (Maximum Contamination Level; MCL) สำหรับสารในกลุ่ม THMs ไว้ไม่เกิน 100 $\mu\text{m/L}$

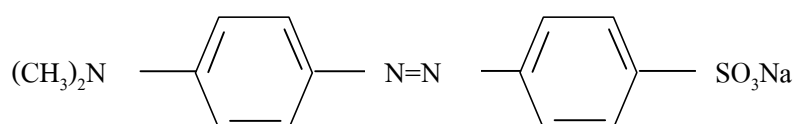
2.6 สีข้อม

ในอุตสาหกรรมประเภท อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ หรืออุตสาหกรรมฟอกย้อมสี จะก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของสีอินทรีย์ที่ปนเปื้อนมากับน้ำ ทำให้ไม่สามารถปล่อยน้ำเสียทิ้งลงสู่แหล่งน้ำได้ทันที เนื่องจากกฎหมายกำหนดไว้ว่าน้ำทิ้งต้องมีสีที่ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2539) เพราะสีของน้ำมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและการนำน้ำจากแหล่งน้ำมาใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น องค์การอนามัยโลกกำหนดไว้ว่าน้ำที่ใช้น้ำประปาต้องมีสีน้อยกว่า 300 หน่วยสี (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2536) นอกจากนี้มาตรฐานน้ำดื่มถูกกำหนดโดยองค์การอนามัยโลกยอมให้มีค่าสูงสุดได้ 50 หน่วยสี และมาตรฐานการประปานครหลวง ยอมให้มีค่าสีสูงสุด 20 หน่วยสี จึงได้มีผู้ทำการศึกษาการดูดซับสีข้อมผ้าด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ (อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์, กอบบุญ หล่อทองคำ, ไชยยันต์ ไชยยะ, ณัฐ งามเจตธรรมย์ และ ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ, 2540) การดูดซับด้วยเรซินผสมถ่านกัมมันต์ (Ho and Chiang, 2001) การดูดซับด้วยไคโตแซน (Wu, Tseng and Juang, 2001)

2.6.1 เมธิลออเรนจ์

เมธิลออเรนจ์เป็นสีอินทรีย์ที่มีประจุลบ สูตรเคมีคือ $\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{N}_3\text{NaO}_3\text{S}$ ลักษณะโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.9 อาจเรียกได้หลายชื่อดังนี้ C.I. Acid Orange 52, C.I. 13025,

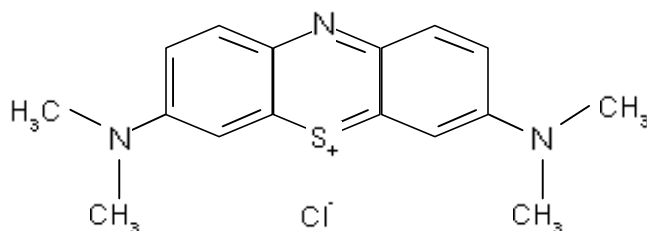
Halianthine B, Orange III, Gold Orange และ Tropaeolin ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุล 327.34 ทางวิทยาศาสตร์จะใช้เมธิลออเรนจ์เป็นตัวบ่งชี้ (Indicator) ในการไทเทรตด้วยกรดแก่โดยจะเปลี่ยนจากสีแดง (ที่พีเอช 3.1) ไปเป็นสีส้มถึงสีเหลือง (ที่พีเอช 4.4) เนื่องมาจากการแตกตัวของไอออนไฮโดรเจน สารชนิดนี้พบในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมย้อมสีและการพิมพ์ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติและมีผลกระทบต่อร่างกายคือ ทางระบบทางเดินหายใจจะมีอาการไอและหายใจติดขัด ระบบทางเดินอาหารทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน อาจมีอาการท้องร่วงได้ เกิดการระคายเคืองผิวหนังแต่จะไม่รุนแรงมาก เมื่อสัมผัสกับดวงตาจะเกิดการระคายเคืองทำให้ตาแดงและก่อให้เกิดทัศนียภาพที่ไม่ดี



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของเมธิลออเรนจ์

2.6.2 เมธิลีนบลู

เมธิลีนบลูเป็นสีอินทรีย์ที่มีประจุบวก สูตรเคมีคือ $C_{16}H_{18}ClN_3S$ ลักษณะโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.10 อาจเรียกได้หลายชื่อดังนี้ C.I. Basic Blue 9, Solvent Blue 8, C.I. 52015 ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุล 373.9 โดยทั่วไปใช้ในการย้อมไหม ไม้ กระดาษ ของใช้สำนักงาน เครื่องสำอางค์และในการพิมพ์ภาพในผ้าไหม ดังนั้นจึงพบในอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น อุตสาหกรรมการพิมพ์ อุตสาหกรรมฟอกหนัง อุตสาหกรรมย้อมสี เป็นต้น



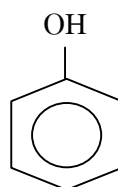
รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของเมธิลีนบลู

2.7 สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compounds)

สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารมีพิษ ตามกฎหมายสิ่งแวดล้อมไทยกำหนดให้มีสารประกอบฟีนอลิกในน้ำทิ้งไม่เกิน 1 mg/L (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2539) ได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการกำจัดฟีนอล เช่น การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (ปรีดา จิตขาว และ บุญญาแสง แสงคำมี, 2541; Chern and Chien, 2001) การดูดซับด้วย Surfactant-Modified Pillared Clays (Wibulswas, White and Rautiu, 1999)

2.7.1 ฟีนอล

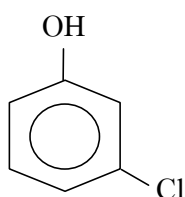
ฟีนอลคือแอลกอฮอล์ที่มีลักษณะเป็นวง (Aromatic Alcohol) มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กรดคาร์บอลิก สูตรโมเลกุลคือ C_6H_5OH ประกอบด้วยวงเบนซีนหนึ่งวง ลักษณะโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.11 มีพื้นที่ผิว 0.255×10^{-8} ตารางเมตรต่อโมเลกุล มีความสามารถในการละลายน้ำได้มาก เมื่อเป็นสารบริสุทธิ์มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว เมื่ออยู่ในรูปของเหลวมีกลิ่นแรง ฟีนอลส่วนใหญ่ได้มาจากการสังเคราะห์โดยเริ่มจากเบนซีนที่ได้จากปิโตรเลียม ฟีนอลที่เกิดตามธรรมชาติจะมีปริมาณน้อย ส่วนใหญ่มีการนำฟีนอลไปใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก และอุตสาหกรรมที่มีฟีนอลเป็นวัตถุดิบเช่น การผลิตน้ำยาฆ่าเชื้อโรค อุตสาหกรรมปิโตรเลียม อุตสาหกรรมโพลีเมอร์ ครึ่งชีวิตของฟีนอลในอากาศจะน้อยกว่า 1 วัน สามารถปนเปื้อนในดินได้นาน 2-5 วัน สามารถเจือปนอยู่ในน้ำได้นาน 9 วัน ฟีนอลเป็นอันตรายต่อพืชและสัตว์ อันตรายของฟีนอลขึ้นอยู่กับปริมาณและระยะเวลาในการได้รับ อันตรายที่เกิดกับคนส่วนใหญ่เกิดจากการสัมผัสกับฟีนอลโดยตรง คือ ฟีนอลเข้มข้นเมื่อถูกผิวหนังจะกัดผิวหนังและซึมเข้าสู่กระแสเลือด แผลที่ผิวหนังมีอาการปวดแสบปวดร้อนแล้วชา เมื่อคนหรือสัตว์ดื่มน้ำที่มีฟีนอลปนเปื้อนอยู่ตั้งแต่ 100 ถึง 5000 mg/L อย่างต่อเนื่องกันจะเป็นอันตรายถึงชีวิตได้ภายใน 14 วันเนื่องจากเป็นพิษต่อดับไต และไปก่กระบบประสาทส่วนกลาง (สุชาติา ชินะจิตร์, 2545) องค์การอนามัยโลก (World Health Organization) ได้กำหนดมาตรฐานปริมาณฟีนอลในน้ำได้ไม่เกิน 0.002 mg/L (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2538)



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของฟีนอล

2.7.2 3-คลอโรฟีนอล

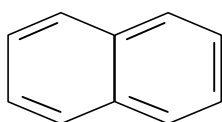
3-คลอโรฟีนอลเป็นสารมีพิษที่ไม่มีสี มีกลิ่นเหม็น ประกอบด้วยวงเบนซีนหนึ่งวง ลักษณะโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.12 3-คลอโรฟีนอลจะมีอันตรายต่อระบบในร่างกายปกติแล้วจะใช้ 3-คลอโรฟีนอลในสารประกอบที่เกี่ยวกับการกำจัดแบคทีเรีย เห็ด รา แมลง และวัชพืช ความเป็นพิษของ 3-คลอโรฟีนอลมีพิษมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิมากขึ้น และเมื่อค่าพีเอชมีค่าลดลง



รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของ 3-คลอโรฟีนอล

2.8 แนฟทาลีน

แนฟทาลีนคือสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอนที่มีวงเบนซีนหลายวง (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon) แนฟทาลีนประกอบด้วยวงเบนซีน 2 วง มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{10}H_8$ มีน้ำหนักโมเลกุล 128 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.13 เป็นสารที่ไม่ชอบน้ำและเป็นพวกไม่มีขั้ว สารชนิดนี้เป็นหนึ่งในสารที่มีขนาดใหญ่ที่ไม่มีไอออนที่พบในดิน การตกตะกอนของผิวหน้าของดิน และน้ำใต้ดิน ในธรรมชาติพบในน้ำมันดิบ ทาร์ของถ่านหิน และถ่านหิน พบในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหลายชนิดเช่น โรงงานผลิตยาฆ่าแมลง โรงงานเคมีภัณฑ์ต่างๆ เป็นต้น เมื่อปี พ.ศ. 2529 กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและพลังงานได้กำหนดปริมาณแนฟทาลีนที่เป็นอันตรายต่อชีวิตไม่เกิน 0.05 mg/L เมื่อได้รับสารชนิดนี้จะเกิดอันตรายต่อระบบหายใจ เช่น ปอด หรือหลอดลม เนื่องจากสารชนิดนี้เข้าไปทำลายเนื้อเยื่อต่างๆ นอกจากนี้ในการทดลองพบว่าสารชนิดนี้เป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์และมีผลต่อสุขภาพของคน



รูปที่ 2.13 โครงสร้างทางเคมีของแนฟทาลีน

2.9 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ เป็นการแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซโดยให้สารละลายหรือก๊าซผสมไหลสัมผัสกับตัวดูดซับ องค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิวและเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน ปรากฏการณ์การดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับเอง คุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับและตัวถูกละลายนั้น จำนวนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวและขนาดของรูพรุนที่ทำให้หน้าที่ยึดได้ จึงสามารถแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกได้ โดยเลือกตัวดูดซับให้เหมาะกับองค์ประกอบนั้น

ลักษณะกลไกการดูดซับมี 2 ลักษณะ คือ

ก. การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ถูกดูดซับ ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย ดังนั้นองค์ประกอบที่ยึดเกาะแน่นบนผิวของตัวดูดซับ ถ้าตัวดูดซับมีความพรุนสูง ของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่นนั้นจะสามารถแทรกเข้าสู่ช่องว่างภายในของตัวดูดซับได้ ถึงแม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอขององค์ประกอบนั้นก็ตาม ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ทั้งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิปกติ ให้ความร้อนออกมาเล็กน้อย แต่มากกว่าความร้อนของการควบแน่น ขึ้นอยู่กับความดันย่อยของก๊าซหรือของเหลวชนิดนั้นและสามารถดูดซับก๊าซและของเหลวไว้ได้ในปริมาณสูงมากต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เมื่อลดความดันของระบบลงหรือเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง ทำให้ตัวดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับ ปรากฏการณ์ช่วงนี้เรียกว่า Desorption ซึ่งเป็นวิธีการนำตัวถูกละลายกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

ข. การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพทุกประการ โดยที่จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ต้องการดูดซับสร้างสารประกอบระหว่างตัวดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับ ทำให้ปริมาณของตัวดูดซับลดลง จะให้ความร้อนออกมาสูงมากเพราะการเกิดปฏิกิริยาเคมีไม่ขึ้นกับความดันมากนัก และดูดซับตัวถูกละลายได้ในปริมาณน้อยต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เนื่องจากการดูดซับโดยเกิดปฏิกิริยาเคมีจะไม่สามารถเกิด Desorption ได้ เพราะองค์ประกอบและสถานะแวดล้อมที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าองค์ประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้

สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium and Adsorption Isotherm)

ในเวลาที่เกิดการดูดซับหรือสorptionที่ตัวถูกละลายเคลื่อนที่ออกจากสารละลายและก่อให้เกิดความเข้มข้นเพิ่มขึ้นที่ผิวหน้าของของแข็งจะเป็นสภาวะสมดุลพลศาสตร์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับความเข้มข้นของตัวละลายที่ผิวหน้า ที่สภาวะสมดุล (Equilibrium Adsorption) เป็นร้อยละของน้ำหนัก หรือน้ำหนัก หรือปริมาตรของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับไว้บนตัวดูดซับหนึ่งหน่วยน้ำหนัก โดยทั่วไปมักควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับคงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับกับความดันที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ เส้นความสัมพันธ์ที่ได้เรียกว่า ไอโซเทอม (Isotherm) ซึ่งเป็นลักษณะที่ขึ้นอยู่กับชนิดของรูพรุนบนตัวดูดซับ เมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเปลี่ยนไปที่อุณหภูมิคงที่นี้ โดยทั่วไปจำนวนของสารที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น แต่อาจจะไม่แปรผันเป็นเส้นตรง

รูปแบบของ Adsorption Isotherm มี 6 รูปแบบ (Gregg and Sing, 1967; Rouqurol F., Rouqurol J. and Sing, 1999) แสดงในรูปที่ 2.14 คือ

ก. Type I Isotherm เป็นการดูดซับที่พบมากที่สุด ซึ่งดูดซับโดยที่มีชั้นของตัวถูกละลายคลุมบนผิวของตัวดูดซับได้หนาเพียงหนึ่งชั้น (Single Layer Adsorption) พบทั้งในการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ จะเป็นปรากฏการณ์การดูดซับของ Microporous Powders ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative Pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงๆ เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยซึ่งถ้ามีการดูดซับแบบนี้แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีรูพรุนเป็น Microporous หรือ Nonporous และมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวภายนอกของผลิตภัณฑ์

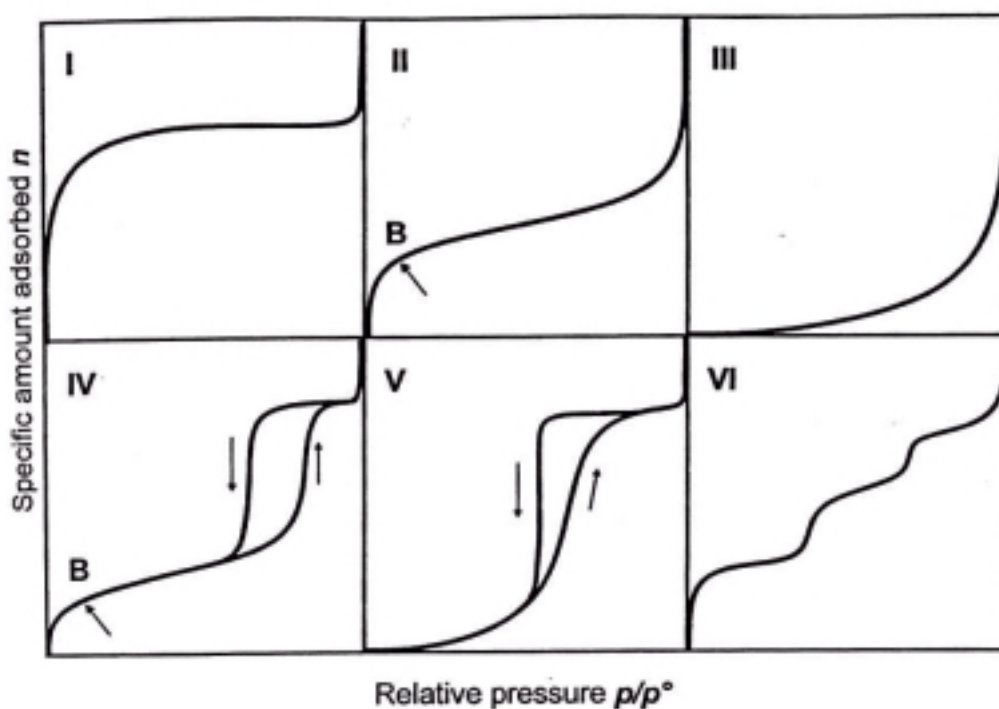
ข. Type II Isotherm พบมากในการดูดซับที่มีชั้นของตัวถูกละลายคลุมผิวของตัวดูดซับหนาขึ้นเรื่อยๆ (ปริมาณที่ถูกดูดซับเข้าสู่ค่าอนันต์) โดยจะเกิดบน Nonporous Powder ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนกว้างกว่า Micropore (1.5 มิลลิเมตร) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection Point or Knee of Isotherm) เกิดเมื่อการดูดซับบนพื้นผิวชั้นแรกเกิดเกือบสมบูรณ์แล้ว (เป็น Monolayer เกือบสมบูรณ์) และถ้าเพิ่ม Relative Pressure จะทำให้การดูดซับเกิดมากกว่า 1 ชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้จะเป็นการดูดซับแบบ Multi-layer

ค. Type III Isotherm เป็นการดูดซับคล้าย Type II Isotherm แต่การดูดซับของชั้นแรกนั้นให้ความร้อนออกมาน้อยกว่าความร้อนของการควบแน่น เป็นลักษณะเฉพาะของการเกิดความร้อนของการดูดซับ (Heat of Adsorption) มีน้อยกว่าความร้อนของการจับตัวกันของตัวถูกละลายของของเหลว ดังนั้นการดูดซับที่เพิ่มขึ้น เกิดเพราะตัวถูกละลายทำปฏิกิริยากับชั้นของตัวถูกละลายมากกว่าการเกิดปฏิกิริยากับผิวของตัวถูกละลาย

ค. Type IV Isotherm เป็นการดูดซับคล้ายกับ Type II Isotherm ความหนาของโมเลกุลชั้นแรกๆ แต่การดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัวเนื่องจากรูพรุนเล็ก ๆ ภาพในตัวดูดซับเต็มหมดแล้ว เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดบนตัวดูดซับรัศมีประมาณ 15-1000 อังสตรอม ความชันที่มีจุดเปลี่ยนกราฟนี้ เกิดเช่นเดียวกับใน Type II Isotherm คือเกือบเป็น Monolayer สมบูรณ์

ง. Type V Isotherm เป็นการดูดซับคล้ายกับ Type III Isotherm ในช่วงความเข้มข้นต่ำๆ แต่เมื่อการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะเข้าสู่ค่าสูงสุดค่าหนึ่งเช่นเดียวกับ Type IV Isotherm เป็นปรากฏการณ์การดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดของตัวถูกดูดซับมีค่าน้อย ซึ่งเกิดปฏิกิริยาค้ำกัน และขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วง 15-1000 อังสตรอม

จ. Type VI Isotherm หรือ Stepped Isotherm มีลักษณะการดูดซับเป็นขั้นๆ รูปร่างของสเตรปจะขึ้นอยู่กับระบบและอุณหภูมิ



รูปที่ 2.16 รูปแบบของ Adsorption Isotherm

หมายเหตุ จาก “Adsorption by Powders and Porus Solids (19)” โดย Rouquerol F., Rouquerol J. and Sing, 1999, London: Academic Press.

2.10 โมเดลจลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetic Models of Adsorption)

การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับวิเคราะห์ห้อย่างง่ายในรูปแบบ Pseudo-First Order Equation และ Pseudo-Second Order Equation ในรูปแบบของ Ho และ McKey ปี 1998 ดังนี้คือ

2.10.1 Pseudo-First Order Equation

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.1)$$

เมื่อ k_1 คือค่า Rate Constant ของการดูดซับแบบ Pseudo-First Order

q_e คือปริมาณการดูดซับสารที่สภาวะสมดุล

q_t คือปริมาณการดูดซับสารที่เวลา t

กำหนดให้สภาวะเริ่มต้นคือ

$$q_t = 0 \quad \text{ที่} \quad t = 0$$

$$q_t = q_t \quad \text{ที่} \quad t = t$$

$$q_t = q_e \quad \text{ที่} \quad t = \infty$$

ดังนั้น

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.2)$$

2.10.2 Pseudo-Second Order Equation

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ k_2 คือค่า Rate Constant ของการดูดซับแบบ Pseudo-Second Order

กำหนดให้สภาวะเริ่มต้นคือ

$$q_t = 0 \quad \text{ที่} \quad t = 0 \quad \text{และ}$$

$$q_t = q_t \quad \text{ที่} \quad t = t$$

ดังนั้น

$$\frac{1}{(q_e - q_t)} = \frac{1}{q_e} + k_2 t \quad (2.4)$$

จัดรูปแบบสมการใหม่

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.5)$$

2.11 โมเดลการดูดซับ (Adsorption Models)

ปริมาณของสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับบนมอนต์มอริลโลไนต์และ Organo-clays ชนิดต่างๆ หาได้จากสมการมวลสาร โดยถือว่าสารอินทรีย์ที่หายไปจากสารละลายถูกดูดซับอยู่บนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ หรือ Organo-clays ที่ใช้เป็นตัวดูดซับ และปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ จะมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายสารอินทรีย์ และปริมาณตัวดูดซับที่ใส่ลงไป (McCabe, Smith and Harriott, 1993)

$$q_e = \frac{(c_0 - c_e)V}{m} \quad (2.6)$$

เมื่อ q_e คือปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับที่สมดุลหลังการดูดซับ (mgg^{-1})

c_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (mgL^{-1})

c_e คือความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุลหลังการดูดซับ (mgL^{-1})

V คือปริมาตรของสารละลาย (L)

m คือน้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

2.11.1 Langmuir Adsorption Isotherm

เป็นรูปแบบการแสดงระบบของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ตัวถูกดูดซับถูกจำกัดให้ปกคลุมตัวดูดซับเพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ไม่มีการซ้อนทับกันของโมเลกุล แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$q = \frac{ac_e}{1 + bc_e} \quad (2.7)$$

เมื่อ c_e คือความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สมดุลหลังการดูดซับ (mgL^{-1})

q คือปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ (mgg^{-1})

a, b คือค่าคงที่

สามารถจัดใหม่ได้เป็น

$$\frac{c_e}{q} = \frac{1}{a} + \frac{bc_e}{a} \quad (2.8)$$

เมื่อ a/b คือความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับตัวถูกละลายแต่ละชนิด

2.11.2 Linear Adsorption Isotherm

ปริมาณการดูดซับจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สภาวะสมดุล โดยปกติจะเรียกว่า Henry's Law มีรูปแบบสมการดังนี้

$$q = K_d c_e \quad (2.9)$$

เมื่อ q คือปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ (mgg^{-1})

c_e คือความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สมดุลหลังการดูดซับ (mgL^{-1})

K_d คือ Distribution Coefficient หรือ Henry's Law Constants

2.11.3 Freundlich Adsorption Isotherm

สมการ Freundlich Adsorption Isotherm ใช้ความสัมพันธ์ของคณิตศาสตร์ในระบบของเหลวที่ประกอบด้วยน้ำได้ดังนี้

$$q = K_f c_e^{1/n} \quad (2.10)$$

เมื่อ q คือปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ (mgg^{-1})

c_e คือความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สมดุลหลังการดูดซับ (mgL^{-1})

K_f คือ Freundlich Capacity Factor

$1/n$ คือ Freundlich Intensity Parameter

สามารถจัดใหม่ได้เป็น

$$\log(q) = \log(K_f) + \frac{1}{n} \log c_e \quad (2.11)$$

2.11.4 BET Adsorption Isotherm

BET Adsorption Isotherm ถูกพัฒนาโดย Brunauer Emmett และ Teller (BET) จากการดูดซับที่ถูกจำกัดให้โมเลกุลปกคลุมตัวดูดซับโดยรอบเพียงหนึ่งชั้นความหนาของ Langmiur Adsorption Isotherm มาเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) BET Adsorption Isotherm มีสมมุติฐานเบื้องต้นคือ โมเลกุลของตัวดูดซับสามารถจับในบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับ และสามารถที่จะซ้อนทับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับด้วยกันได้ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะเต็มช่องว่างของตัวดูดซับ ความร้อนของการดูดซับของชั้นที่สองจะถูกสมมุติว่าให้เท่ากับความร้อนของสารละลายข้างนอก และความแตกต่างของความร้อนของการดูดซับในชั้นแรก สมการ BET Adsorption Isotherm แสดงดังนี้

$$q_i = \frac{A c_i}{(C - c_i)(1 + B c_i)} \quad (2.12)$$

เมื่อ q_i คือปริมาณตัวถูกดูดซับในตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

c_i คือความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)

i คือชั้นของการดูดซับเช่น 1, 2, 3,.....

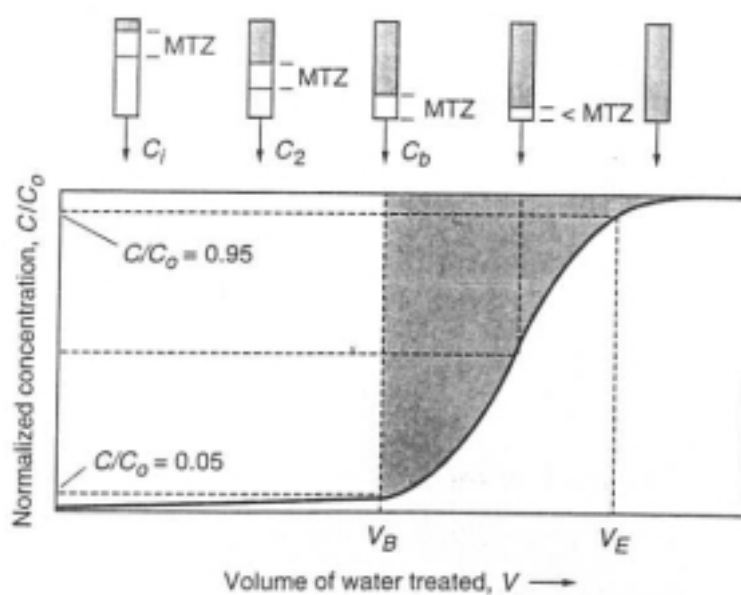
A, B และ C คือค่าคงที่

สามารถจัดใหม่ได้เป็น

$$\frac{c_i}{q_i} = \frac{C}{A} + \left(\frac{B c_i - 1}{A} \right) c_i - \frac{B}{A} c_i^2 \quad (2.13)$$

2.12 บริเวณการเคลื่อนย้ายมวลสารสำหรับการดูดซับในหอดูดซับ

บริเวณการเคลื่อนย้ายมวลสาร (Mass Transfer Zone, MTZ) หมายถึง ช่วงความสูงในคอลัมน์ที่เกิดการดูดซับระหว่างตัวถูกละลายกับตัวดูดซับในคอลัมน์ ความสูงที่อยู่ต่ำกว่า MTZ ลงมาจะยังไม่มี การดูดซับระหว่างตัวถูกละลายกับตัวดูดซับในคอลัมน์ ส่วนความสูงที่อยู่เหนือช่วง MTZ นี้จะมีการดูดซับ และเข้าสู่สภาวะสมดุลไปเรียบร้อยแล้ว ซึ่งที่สภาวะสมดุลปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ ในทางทฤษฎีจะมีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากการทดลองแบบกะ ช่วงความสูง MTZ จะเคลื่อนที่ต่ำลงมาเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดต่ำสุดของคอลัมน์ซึ่งเราจะเรียกจุดนี้ว่า เบรคทรู (Breakthrough) แสดงดังรูป 2.15 โดยทั่วไปจุดเบรคทรูจะเกิดที่ความเข้มข้นเท่า $0.05 C_0$ และจุดที่ตัวดูดซับหมดสภาพในการดูดซับ (Exhaustion) คือจุดที่ความเข้มข้นเท่ากับ $0.95 C_0$ กราฟเบรคทรูโดยทั่วไปมีลักษณะคล้ายตัวเอส (S-Shape)



รูปที่ 2.15 แสดง Mass Transfer Zone

หมายเหตุ จาก Advanced Wastewater Treatment (1146), โดย Tchobanoglous, Burton and Stensel, 2003, New York: McGraw-Hill Higher.

ความสูงของ MTZ จะแปรเปลี่ยนไปตามอัตราการไหล เนื่องจากจะทำให้ความปั่นป่วน (Dispersion) การแพร่กระจาย (Diffusion) และการไหลในช่องว่างเม็ดตัวดูดซับและในทางปฏิบัติจริงๆ แล้วจะมีการไหลรั่ว หรือการไหลลัดวงจร (Bypass) เกิดขึ้นเนื่องจากพื้นที่ผนังภายในคอลัมน์

เมื่อทำการกรองสารละลายที่มีตัวถูกละลายปริมาณหนึ่งๆ อยู่ด้วยตัวกลางเพื่อดูดซับตัวถูกละลายชนิดนั้น ช่วงแรกๆ สามารถหาปริมาณตัวถูกละลาย ณ ตำแหน่งที่ผ่านออกมาจากการกรองจะมีปริมาณน้อย หรือแทบไม่มีอยู่เลยเนื่องจากถูกดูดซับไปหมด และเมื่อปริมาณการกรองที่ผ่านออกมาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่หลุดออกมาจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งความเข้มข้นของตัวถูกละลายหลังการกรองเท่ากับก่อนการกรอง

การขยายขนาดของหอดูดซับ (Scale Up) ถูกพัฒนาโดย Fornwalt และ Hutchins ในปี 1966 (Reynolds and Richards, 1996, quoted in Wibulswat, 1999) ได้ดังนี้คือ

ก. คำนวณหาปริมาตรของตัวดูดซับ

$$\text{Bed Volume(BV)} = Q/Q_b \quad (2.14)$$

เมื่อ Q คืออัตราการไหลที่ใช้ในการออกแบบคอลัมน์

Q_b คืออัตราการไหลในคอลัมน์ทดลอง (หน่วยเป็นปริมาตรของเบดนิ่งต่อเวลา)

ข. มวลของการออกแบบคอลัมน์

$$M = (BV)\rho \quad (2.15)$$

เมื่อ M คือน้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ในการออกแบบคอลัมน์

ρ คือ Bulk Density ของตัวดูดซับ

ค. เวลาของการออกแบบคอลัมน์จนถึงจุดเบรคทู

$$T = M/M_t \quad (2.16)$$

เมื่อ T คือ Breakthrough Time สำหรับการออกแบบคอลัมน์

M_t คือมวลของตัวดูดซับในคอลัมน์ที่จุดตัวดูดซับหมดสภาพ (Exhaustion)

ต่อหน่วยเวลา

$$V_b = QT \quad (2.17)$$

เมื่อ V_b คือปริมาตรที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุดเบรคทู

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 รูปแบบการทดลองและสถานที่ทำการทดลอง

การศึกษาดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ใช้รูปแบบการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการดูดซับสารอินทรีย์ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและ Organo-clays เป็นตัวดูดซับ สถานที่ทำการทดลองคือ อาคารศูนย์เครื่องมือ 1 อาคารศูนย์เครื่องมือ 2 และอาคารศูนย์เครื่องมือ 5 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2 ประชากรศึกษาและขนาดตัวอย่าง

การศึกษานี้ใช้สารละลายอินทรีย์ตัวอย่างที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการ โดยสารอินทรีย์ที่ใช้ศึกษาดูดซับมี 6 ชนิด คือ กรดฮิวมิก เมธิลีนบลู เมธิลออเรนจ์ ฟีนอล 3-คลอโรฟีนอล และแนฟثالีน ดำเนินการทดลอง 2 แบบ คือ

3.2.1 การทดลองแบบกะ

3.2.1.1 ศึกษาหาเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของระบบการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2 ระดับ

3.2.1.2 ศึกษากระบวนการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ กัน และตัวดูดซับชนิดต่างๆ กัน

3.2.1.3 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อระบบการดูดซับสารอินทรีย์ ที่อุณหภูมิต่างกัน 2-3 ค่า

3.2.1.4 ศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่าง (ค่า pH) ต่อระบบการดูดซับสารอินทรีย์ ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3 ค่า

3.2.2 การทดลองระบบเบตนิ่ง

3.2.2.1 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแต่ละชนิดต่อความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน 2 ค่า

3.2.2.2 ศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ ที่ปริมาณตัวดูดซับต่างกัน 3 ค่า

3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองสำหรับการทดลองแบบกะ และการทดลองแบบเบคคิง

ตัวแปร	การทดลองแบบกะ	การทดลองแบบเบคคิง
ตัวแปรอิสระ	-ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอินทรีย์ -ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายอินทรีย์ -อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง -ชนิดของตัวดูดซับ	-ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอินทรีย์ -ปริมาณตัวดูดซับ
ตัวแปรควบคุม	-ระยะเวลาในการเขย่า -ความเร็วรอบของการเขย่า -ระยะเวลาในการปั่นเหวี่ยง -ความเร็วรอบของการปั่นเหวี่ยง	-อัตราการไหลของสารละลาย -แรงดันของปั๊ม -ความสูงของตัวดูดซับผสมทรายที่บรรจุในคอลัมน์
ตัวแปรตาม	-ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์จากน้ำ	-ปริมาตรที่จุดเบรคทู

3.4 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.4.1.1 เครื่องวัด Automatic Surface Analyzer รุ่น ASAP 2010 ของ Micromeritics โดยวัดปริมาณการดูดซับ N_2

3.4.1.2 เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) รุ่น Bruker D5005 System โดยใช้ $CuK\alpha$ radiation

3.4.1.3 เครื่อง Mastersizer D Ver. 2.15 Serial Number 33544-156 ของ Malvern Instruments Ltd.

3.4.1.4 เครื่องปั่นเหวี่ยงแยก รุ่น UNIVERSAL 30 RF ของ Hettich

3.4.1.5 เครื่อง UV-VIS-NIR Spectrophotometer รุ่น Cary 5E ของ Varian

3.4.1.6 เครื่องเขย่าแนวราบ รุ่น 3006 ของ GRL

3.4.1.7 เครื่อง CHNS analyzer รุ่น CNS-2000 ของ LECO

3.4.1.8 เครื่องเขย่าแนวราบแบบควบคุมอุณหภูมิ รุ่น SWB 5050 Shaking Water Bath ของ National Labnet Company

3.4.1.9 ชุดกรองสุญญากาศ ของ Sartorius

3.4.1.10 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (พีเอชมิเตอร์) รุ่น CG840 ของ SCHOTT

3.4.1.11 เครื่องวัดการนำไฟฟ้า รุ่น inoLab Cond Level 2 ของ WTW

3.4.1.12 เครื่องชั่งไฟฟ้าอย่างละเอียด 2 ตำแหน่ง และ 4 ตำแหน่ง

3.4.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.4.2.1 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ บริษัท ไทยนิปปอนเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม จำกัด

3.4.2.2 กรดฮิวมิก บริษัท Fluka Chemika

3.4.2.3 เมทิลออเรนจ์ บริษัท Riedel-deltaen

3.4.2.4 เมทิลีนบลู บริษัท APS Ajax Finecbhem

3.4.2.5 ฟีนอล ความบริสุทธิ์ 99.5% บริษัท CARLO ERBA

3.4.2.6 3-คลอโรฟีนอล ความบริสุทธิ์ 95% บริษัท Fluka Chemika

3.4.2.7 แนฟทาลิน ของศึกษาภัณฑ์พาณิชย์

3.4.2.8 Tetramethylammonium chloride ความบริสุทธิ์มากกว่า 98% ประกอบด้วยน้ำไม่เกิน 2% บริษัท Fluka Chemika

3.4.2.9 Hexadecyltrimethylammonium bromide ความบริสุทธิ์มากกว่า 98% ประกอบด้วยน้ำไม่เกิน 2% บริษัท Fluka Chemika

3.4.2.10 Tetradecyltrimethylammonium bromide ความบริสุทธิ์ 99% บริษัท Sigma

3.4.2.11 Benzylidimethylhexadecylammonium chloride ความบริสุทธิ์มากกว่า 97% ประกอบด้วยน้ำไม่เกิน 9% บริษัท Fluka Chemika

3.5 วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล

3.5.1 วิธีการวัดปริมาณตัวถูกละลายอินทรีย์

ในการวิจัยนี้เลือกใช้หลักการวัดสีตามหลักการของ Beer's Law ที่กล่าวว่า สำหรับสารหนึ่งๆ ค่าการดูดกลืนแสงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของทางเดินแสง (Light Path Length) และความเข้มข้นของสารนั้นๆ ดังนั้นแสงที่ลอดผ่านสารละลายจะถูกตรวจวัดค่าความเข้มในการส่องผ่าน (Transmittance) หรือ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance; Abs) เครื่องมือที่ใช้ คือ UV-VIS-NIR Spectrophotometer วิธีวิเคราะห์ดังนี้

ก. เตรียมสารละลายมาตรฐาน 1 g/L ยกเว้น แนฟทาลิน 0.03 g/L

ข. เตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้ความสัมพันธ์

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

เมื่อ C_1 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานสารอินทรีย์

V_1 คือปริมาตรของสารละลายมาตรฐานสารอินทรีย์ที่ต้องใช้

C_2 คือความเข้มข้นสารละลายอินทรีย์ที่ต้องการ

V_2 คือปริมาตรของสารละลายอินทรีย์ที่ต้องการเตรียม

ค. อ่านค่าดูดกลืนแสง (Abs) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ

ตารางที่ 3.2 ความยาวคลื่น (λ) สำหรับการดูดกลืนแสงของสารละลายอินทรีย์ที่ศึกษา

สาร	กรดฮิวมิก	เมทิลีนบลู	เมทิลลอรันจ์	ฟีนอล	3-คลอโรฟีนอล	แนฟทาลีน
λ (nm)	400.00	698.00	463.33	268.89	277.00	275.00

หมายเหตุ จาก [Removal of Organic Compounds from Water Using Modified Montmorillonite \(99\)](#), โดย Wibulswas, 1999, PhD thesis, Imperial College of Science Technology & Medicine, University of London.

นำผลที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่าง Abs กับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ได้กราฟมาตรฐานดังแสดงในภาคผนวก ก

ง. การวัดปริมาณสารอินทรีย์ของการทดลอง นำสารละลายอินทรีย์ส่วนที่ใสมาวัดค่าการดูดกลืนแสง (Abs)

จ. นำค่า Abs ไปเทียบหาความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์จากกราฟมาตรฐาน

3.5.2 การปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์โดยใช้ QACs

การเตรียมแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย QACs เริ่มจากคำนวณหาปริมาณ QACs ที่ต้องใช้ปรับปรุงพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ โดยคำนวณจาก

$$\text{ปริมาณ QACs (g)} = 0.8 \frac{\text{meq}}{\text{g}} * \text{น้ำหนักของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (g)}$$

$$* \text{MW ของ QACs} * \frac{\text{g}}{\text{mole}} * \frac{\text{mole}}{\text{eq}} * \frac{\text{eq}}{1000\text{meq}}$$

จากนั้นนำปริมาณ QACs ที่คำนวณได้ไปละลายน้ำกลั่น 1 ลิตร นำสารละลายที่ได้ไปเขย่ารวมกับปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่เตรียมไว้ด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 คืน จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่าการนำไฟฟ้าเหลือน้อยกว่า 1.5 μS กรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปอบให้ละเอียดจะได้มอนต์

มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวแล้วซึ่งเรียกว่า Organo-clays เช่น 100%CEC-TMA-clay ปริมาณ TMA ที่ต้องใช้คือ

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักของ TMA} &= 0.8 \frac{\text{meq}}{\text{g}} * 20 \text{ (g)} * 109.6 \frac{\text{g}}{\text{mole}} * \frac{\text{mole}}{\text{eq}} * \frac{\text{eq}}{1000\text{meq}} \\ &= 1.7536 \text{ g} \end{aligned}$$

3.5.3 การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพระหว่างแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และ Organo-clays ดังนี้

3.5.3.1 การหาระยะห่างระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และ Organo-clays โดยใช้เทคนิค XRD

3.5.3.2 การหาพื้นที่ผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และ Organo-clays โดยใช้ Micromeritics ASAP 2010 เพื่อวัดขนาดรูพรุนโดยวัดความสามารถในการดูดซับ N_2 ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และ Organo-clays

3.5.3.3 การหาขนาดอนุภาคของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และ Organo-clays โดยใช้เครื่องมือ Mastersizer

3.5.3.4 หาปริมาณคาร์บอนของ Organo-clays โดยใช้เครื่องมือ CHNS analyzer

3.5.4 การศึกษาผลการดูดซับสารอินทรีย์ในกระบวนการดูดซับแบบกะ

ตารางที่ 3.3 ปริมาณตัวดูดซับ และปริมาตรของสารอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองแบบกะ

สารอินทรีย์	น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)	ปริมาตรของสารละลายอินทรีย์ (mL)
กรดฮิวมิก	0.3	250
เมธิลีนบลู	0.1	300
เมธิลออเรนจ์	0.2	200
ฟีนอล	0.4	200
3-คลอโรฟีนอล	0.1	150
แนฟทาลีน	0.1	200

3.5.4.1 การทดลองการดูดซับสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิคงที่

ในการดูดซับสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิคงที่เริ่มจากนำตัวดูดซับเขย่ารวมกับสารละลายอินทรีย์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆกัน ด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 คืน จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปแยกตะกอนกับตัวดูดซับด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงแยกโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงแยกที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที นำสารละลายที่ได้จากการปั่นเหวี่ยงไปวัดค่าการดูดกลืนแสง เพื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณการดูดซับสารอินทรีย์ของแร่ดินมอนต์มอริลโลในต่อไป

3.5.4.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารอินทรีย์

ทำการทดลองเช่นเดียวกับกรณีการดูดซับสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิคงที่ แต่เปลี่ยนจากเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบเป็นเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบแบบควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิตามที่ต้องการ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 3 ค่า

3.5.4.3 การศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับสารอินทรีย์

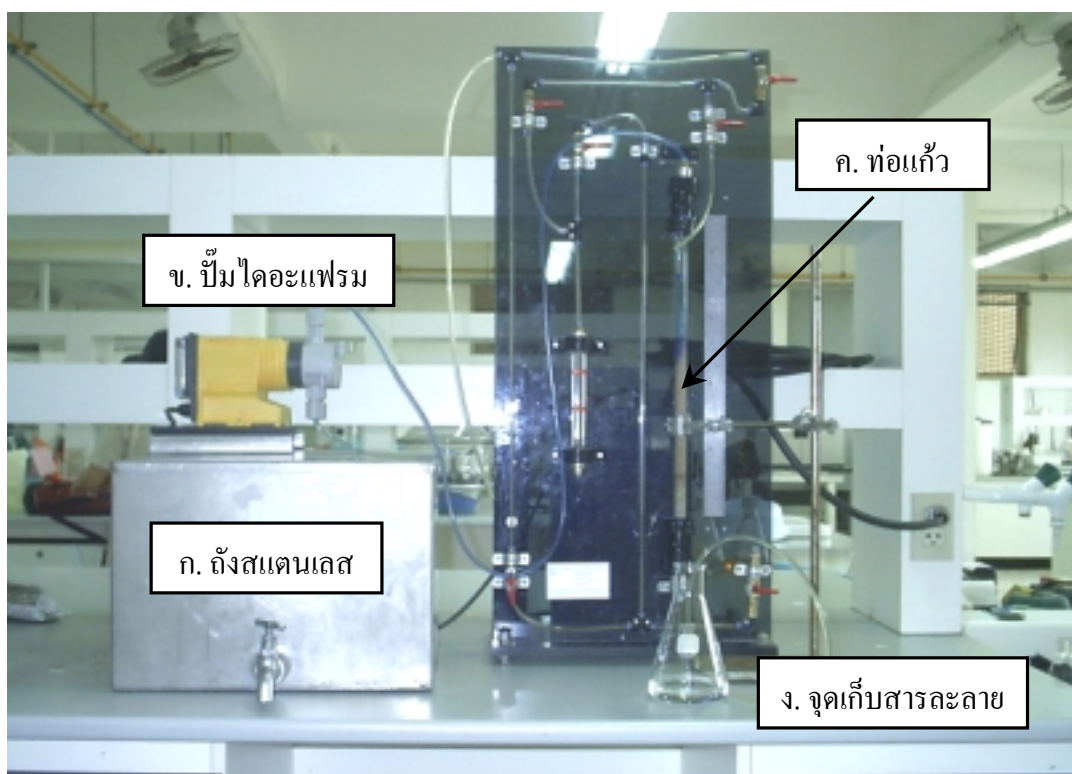
ทำการทดลองเช่นเดียวกับกรณีการดูดซับสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิคงที่ แต่ต้องปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายอินทรีย์ โดยใช้ HCl 0.1 M และ NaOH 0.1 M ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายอินทรีย์ให้ได้ตามต้องการ โดยทำการทดลองที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3 ค่า

3.5.5 การศึกษาผลการดูดซับสารอินทรีย์ในกระบวนการดูดซับแบบเบดนิ่ง

ในการศึกษาหาปริมาณการดูดซับสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการดูดซับแบบเบดนิ่ง มีรายละเอียดดังรูปที่ 3.1 เริ่มจากนำตัวดูดซับผสมทรายตามอัตราส่วนต่างๆเขย่าให้เข้ากัน (ทรายที่ใช้ในการทดลองเป็นทรายควอตซ์ขนาดอนุภาค $300 \mu\text{m}$) บรรจุลงในท่อแก้วรัศมี 0.75 ซม. สูง 40 ซม. (จุด ก) โดยใช้ใยแก้วรองรับตัวดูดซับผสมทราย จากนั้นปล่อยน้ำที่ไม่มีไอออนไหลผ่านให้ท่วมตัวดูดซับผสมทรายเก็บสารละลายที่ได้ในจุด ง (เพื่อนำไป Blank ในการปรับค่าศูนย์ในเครื่อง UV-VIS-NIR Spectrophotometer) ปล่อยน้ำให้ไหลออกจากท่อให้หมด จากนั้นปล่อยสารละลายอินทรีย์จากถังสแตนเลส (จุด ก) ให้ไหลผ่านท่อแก้วโดยใช้ปั๊มไดอะแฟรม (จุด ข) ที่แรงดันปั๊มมีค่าเท่ากับศูนย์ สโตรกเท่ากับสาม เก็บสารละลายที่ได้ในจุด ง ที่เวลาต่างๆกัน นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง เพื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณการดูดซับสารอินทรีย์ต่อไป

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนระหว่างทรายและปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลองแบบเบดนิ่ง

ตัวดูดซับที่ใช้, %wt	h, cm.	ปริมาณทราย, g	ปริมาณตัวดูดซับ, g
2	10	26	0.5306
2	20	52	1.0612
3	10	26	0.8041
3	20	52	1.6082
5	20	52 </td <td>2.7368</td>	2.7368
10	20	52	5.7778



รูปที่ 3.1 การทดลองการดูดซับแบบเบดนิ่ง

บทที่ 4

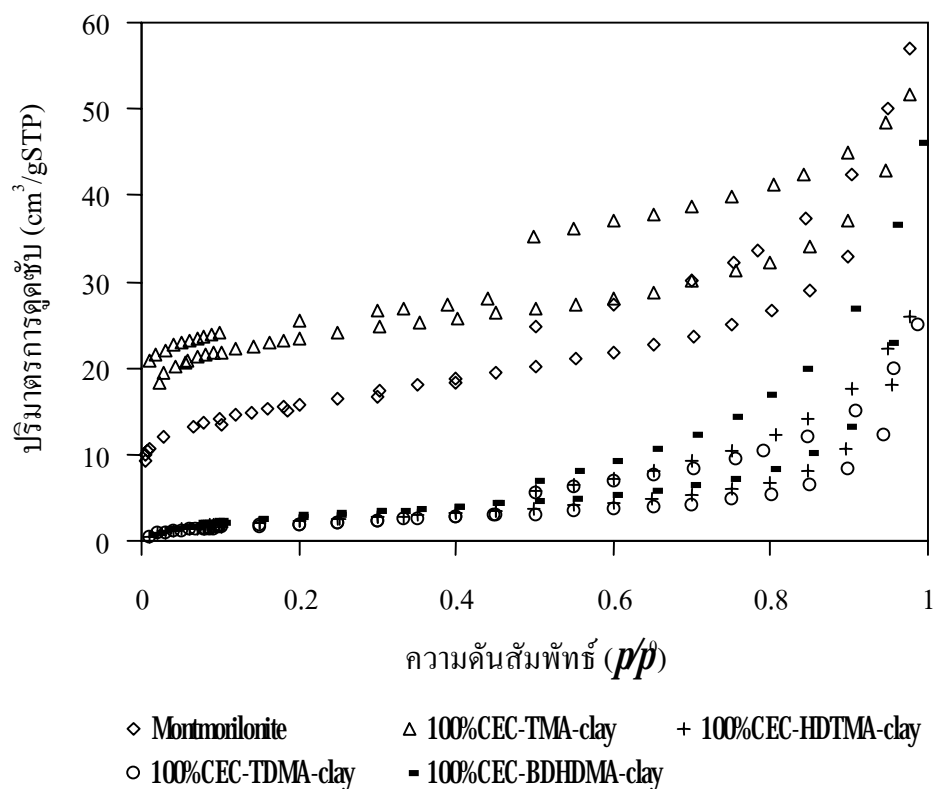
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล

4.1 ลักษณะทางกายภาพของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์และ Organo-clays

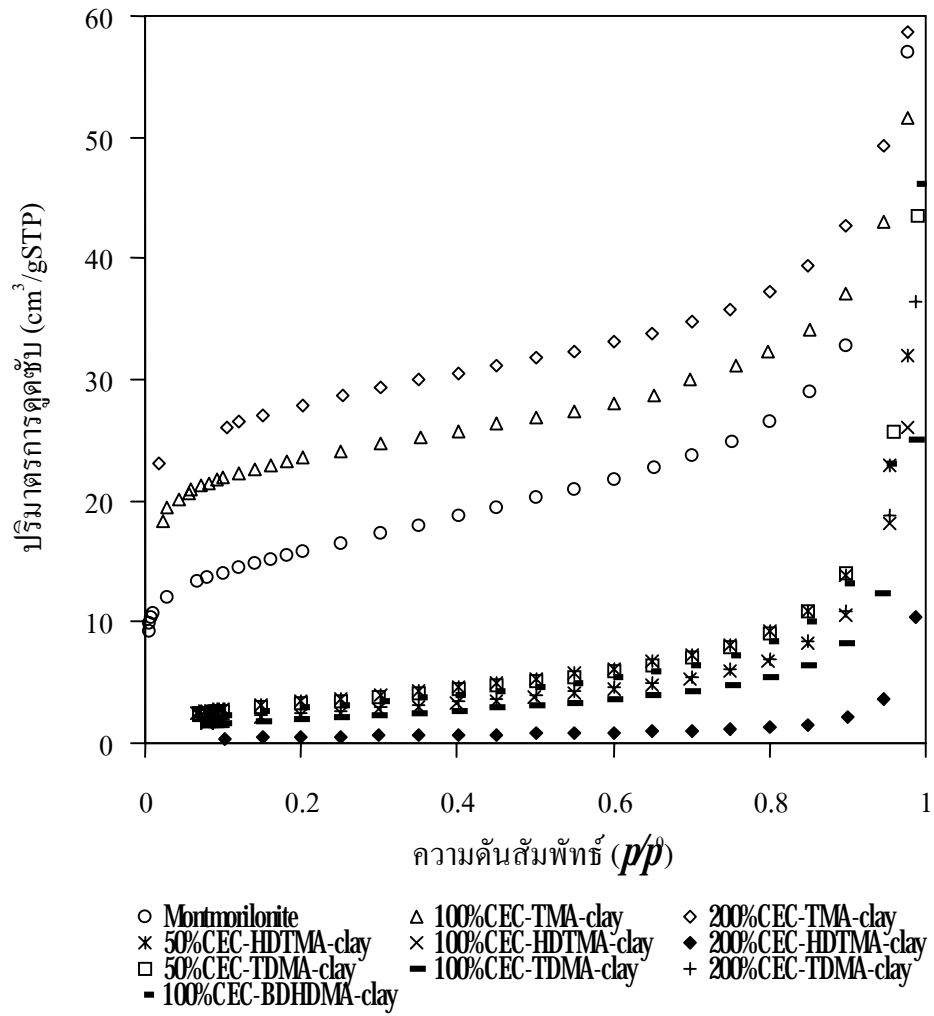
จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์และแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย QACs (Organo-clays) โดยใช้เครื่อง Automatic Surface Analyzer ในตารางที่ 4.1 พบว่า Organo-clays จะมีพื้นที่ผิวลดลงกว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ดั้งเดิมและมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ยกเว้น TMA-clays เนื่องจาก QACs เข้าไปอยู่ในรูพรุนของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ทำให้พื้นที่ผิวอิสระของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติลดลง และทำให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ TMA-clays จะมีพื้นที่ผิวมากกว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ดั้งเดิม เนื่องจากขนาดประจุบวกของ TMA มีขนาดเล็กทำให้พื้นที่ผิวและรูพรุนของมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้น (Kulladapu and Boyd, 1995) ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการดูดซับไนโตรเจน ดังรูปที่ 4.2 จะเห็นว่า TMA-clays มีความสามารถในการดูดซับก๊าซไนโตรเจนมากกว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ดั้งเดิมดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว แต่ 200%CEC-HDTMA-clay มีความสามารถในการดูดซับก๊าซไนโตรเจนน้อยกว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ดั้งเดิม เนื่องจากมีพื้นที่ผิวลดลงเพราะมี HDTMA เข้าไปอยู่ในรูพรุนของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ดั้งเดิม นอกจากนี้ N_2 Adsorption-Desorption Isotherm ของทั้งแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและ Organo-clays จะแสดง Hysteresis Loop แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งหมายความว่าถึงลักษณะรูพรุนแบบ Mesopore (ขนาดของรูพรุน 2-50 นาโนเมตร) ซึ่งสอดคล้องกับขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่วัดได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์และ Organo-clays

ชนิดของตัวดูดซับ	พื้นที่ผิวจำเพาะ, $m^2 g^{-1}$	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย, nm
แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ	55.80	6.3
100%CEC-TMA-clay	82.60	3.9
200%CEC-TMA-clay	97.70	3.7
50%CEC-HDTMA-clay	12.50	15.7
100%CEC-HDTMA-clay	9.00	17.9
200%CEC-HDTMA-clay	2.00	32.1
50%CEC-TDMA-clay	12.00	22.4
100%CEC-TDMA-clay	7.40	20.9
200%CEC-TDMA-clay	9.30	24.2
100%CEC-BDHDMA-clay	11.31	25.2



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและ Organo-clays



รูปที่ 4.2 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และ Organo-clays

เมื่อพิจารณาระยะห่างระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์และ Organo-clays โดยเทคนิค XRD จากค่า d_{001} พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Organo-clays จะมีค่า d_{001} มากขึ้นและค่า 2θ มีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ดั้งเดิม ดังตารางที่ 4.2 แสดงว่าโมเลกุลของ QACs เข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Kulladapu and Boyd, 1995) และเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Organo-clays ขึ้นอยู่กับขนาดของสารที่นำมาปรับปรุงคุณสมบัติ นั่นคือระยะห่างระหว่างชั้นของ BDHDMA-clays > HDTMA-clays > TDMA-clays > TMA-clays ค่า d_{001} ในตารางที่ 4.2 จะรวมระยะห่างระหว่างชั้นของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์และความหนาของชั้นแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งความหนาของชั้นแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มีค่าเท่ากับ 9.4 Å (Nzengung, Voudrias, Nkedi-kizza, Wampler and Weaver, 1996) เพราะฉะนั้นช่องว่างระหว่างชั้นของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จะเท่ากับค่า d_{001} ลบด้วย 9.4 Å และผลจากระยะห่างระหว่างชั้นมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้เครื่อง Mastersizer

ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์และ Organo-clays โดยเทคนิค XRD และ Mastersizer

ชนิดของตัวดูดซับ	d_{001} , Å	2θ	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, μm
แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ	13.143	6.72	9.70
100%CEC-TMA-clay	14.718	6.00	9.22
200%CEC-TMA-clay	14.623	6.04	12.72
50%CEC-HDTMA-clay	17.381	5.08	27.10
100%CEC-HDTMA-clay	21.325	4.14	57.20
200%CEC-HDTMA-clay	22.872	3.86	49.10
50%CEC-TDMA-clay	18.019	4.90	41.50
100%CEC-TDMA-clay	21.325	4.14	50.60
200%CEC-TDMA-clay	21.639	4.08	65.20
100%CEC-BDHDMA-clay	24.253	3.64	72.34

เมื่อพิจารณาปริมาณคาร์บอนบน Organo-clays โดยใช้เครื่อง CHNS analyzer ดังตารางที่ 4.3 พบว่าปริมาณคาร์บอนบน Organo-clays ขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนในโครงสร้างของสาร QACs ที่นำมาปรับปรุงคุณสมบัติ เช่น 100%CEC-clays จะมีปริมาณคาร์บอนเป็นดังนี้คือ BDHDMAClay > HDTMA-clay > TDMA-clay > TMA-clay นอกจากนั้นแล้วปริมาณคาร์บอนยังขึ้นอยู่กับปริมาณสาร QACs ที่นำมาปรับปรุงคุณสมบัติ ดังนี้คือ 200%CEC- > 100%CEC- > 50%CEC- (HDTMA-clays และ TDMA-clays) ส่วนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติไม่มีคาร์บอนในโครงสร้างแสดงในตารางที่ 2.1 แสดงว่าสาร QACs ที่นำมาปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับ Na^+ และ Ca^{2+} ที่มีอยู่ในแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติจริง เมื่อคำนวณย้อนกลับเพื่อหาประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนประจุบวกที่เกิดขึ้นจริงพบว่าโดยส่วนใหญ่มีค่าไม่เกิน 100% ยกเว้นที่ 200%CEC-HDTMA-clay ที่มีประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนประจุบวก 123.75% นั้นเป็นเพราะว่าสารลดแรงตึงผิวที่นำมาปรับปรุงคุณสมบัติแร่ดินสามารถเข้าไปแทรกที่ระยะห่างระหว่างชั้น โครงสร้างของแร่ดินและด้านนอกได้ (Lee and Kim, 2002)

ตารางที่ 4.3 ปริมาณคาร์บอนและประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนประจุบวกของ Organo-clays

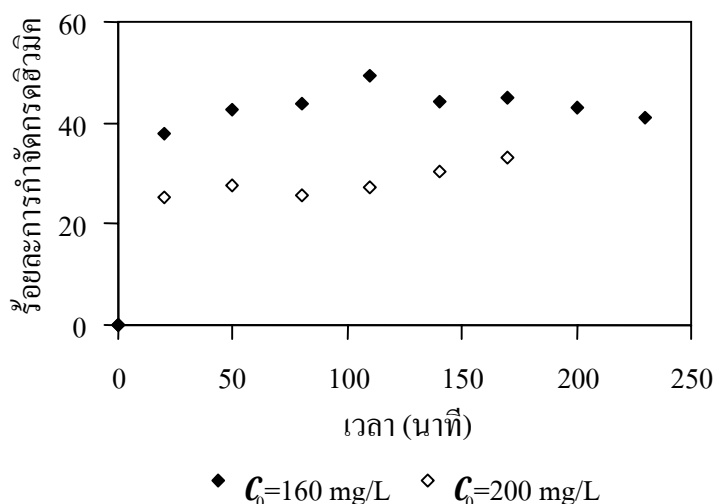
ชนิดของตัวดูดซับ	ปริมาณคาร์บอน, g/100 g ของตัวดูดซับ	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนประจุบวก (%)
100%CEC-TMA-clay	0.2643	74.58
50%CEC-HDTMA-clay	10.03	54.99
100%CEC-HDTMA-clay	16.51	90.52
200%CEC-HDTMA-clay	22.57	123.75
50%CEC-TDMA-clay	13.08	80.15
100%CEC-TDMA-clay	14.33	87.81
200%CEC-TDMA-clay	14.71	90.13
100%CEC-BDHDMAClay	20.17	84.04

4.2 ความสามารถของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับสารอินทรีย์ในการทดลองแบบกะ

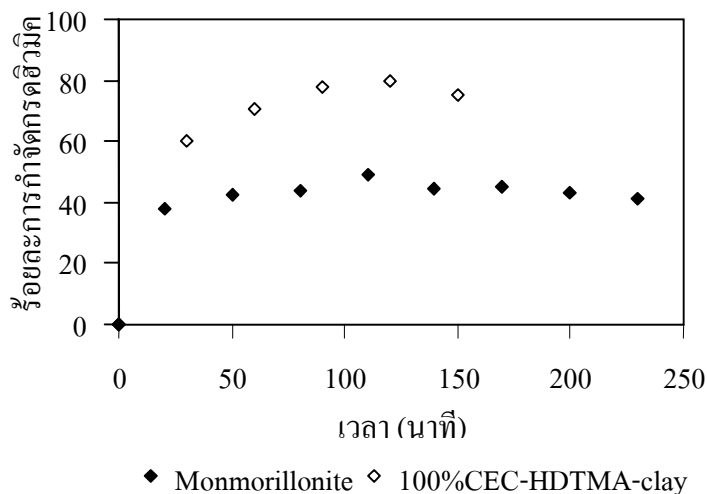
4.2.1 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์และ Organo-clays

4.2.1.1 การดูดซับกรดฮิวมิกที่ระยะเวลาการดูดซับต่างๆ

การศึกษาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับกรดฮิวมิกโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ แสดงผลดังรูปที่ 4.3 จะใช้เวลาประมาณ 20 นาที แม้ว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิกจะแตกต่างกันแต่ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลจะใช้ระยะเวลาใกล้เคียงกัน แต่ความสามารถในการกำจัดกรดฮิวมิกขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายกรดฮิวมิก เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายกรดฮิวมิกเพิ่มขึ้นความสามารถในการกำจัดกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จะลดลง และพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปร้อยละการกำจัดกรดฮิวมิกมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติสามารถดูดซับกรดฮิวมิกจากน้ำได้ จากรูปที่ 4.4 เมื่อใช้ Organo-clays (100%CEC-HDTMA-clay) เป็นตัวดูดซับและใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายกรดฮิวมิก 160 mg/L พบว่าระยะเวลาการเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับนานขึ้นกว่าเมื่อใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับโดยใช้เวลาประมาณ 90 นาที และจากการเปรียบเทียบร้อยละการกำจัดกรดฮิวมิกพบว่า 100%CEC-HDTMA-clay สามารถดูดซับกรดฮิวมิกจากน้ำได้ดีกว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ



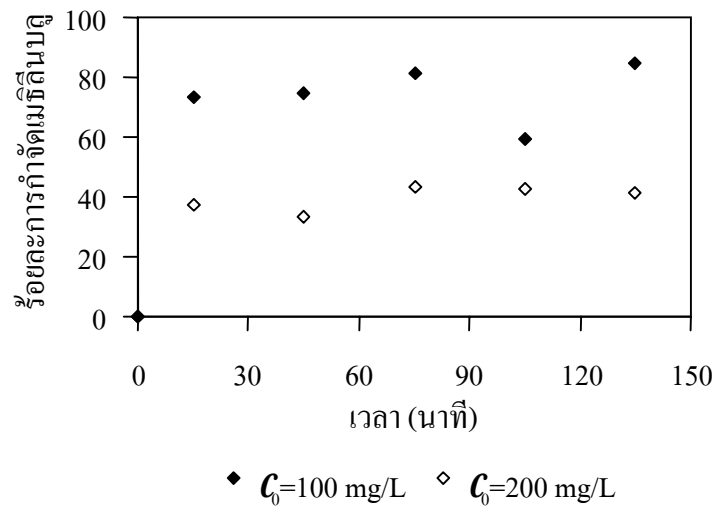
รูปที่ 4.3 ร้อยละการกำจัดกรดฮิวมิกที่เวลาต่างๆเมื่อใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ



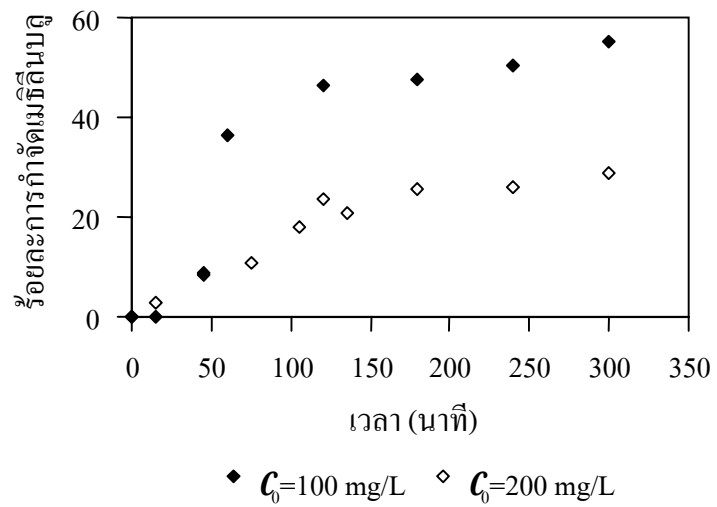
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบร้อยละการกำจัดกรดอิวมิกที่เวลาต่างๆเมื่อใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและ Organo-clays (100%CEC-HDTMA-clay) เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0=160$ mg/L

4.2.1.2 การดูดซับเมธิลีนบลูที่ระยะเวลาการดูดซับต่างๆ

การศึกษาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับเมธิลีนบลูโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ แสดงดังรูปที่ 4.5 จะใช้เวลาประมาณ 15 นาที และจากรูปที่ 4.6 เมื่อใช้ Organo-clays (50%CEC-HDTMA-clay) เป็นตัวดูดซับพบว่า ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับนานขึ้นโดยใช้เวลาประมาณ 120 นาที แม้ว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมธิลีนบลูจะแตกต่างกันแต่ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลจะใช้ระยะเวลาใกล้เคียงกัน และพบว่าความสามารถในการกำจัดเมธิลีนบลูขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมธิลีนบลู เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมธิลีนบลูเพิ่มขึ้นความสามารถในการกำจัดเมธิลีนบลูของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติจะลดลง เมื่อเปรียบเทียบการกำจัดเมธิลีนบลูจากน้ำโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและ Organo-clays (50%CEC-HDTMA-clay) เป็นตัวดูดซับ พบว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติมีความสามารถในการกำจัดเมธิลีนบลูในน้ำได้มากกว่า 50%CEC-HDTMA-clay เนื่องจากเมธิลีนบลูเป็นสีอินทรีย์ที่มีประจุบวก และกลไกการดูดซับสีเมธิลีนบลูบนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเกิดขึ้นด้วยการแลกเปลี่ยนประจุบวกระหว่างเมธิลีนบลูกับ Na^+ และ Ca^{2+} ที่มีอยู่ในแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ (Dentel, 1996)



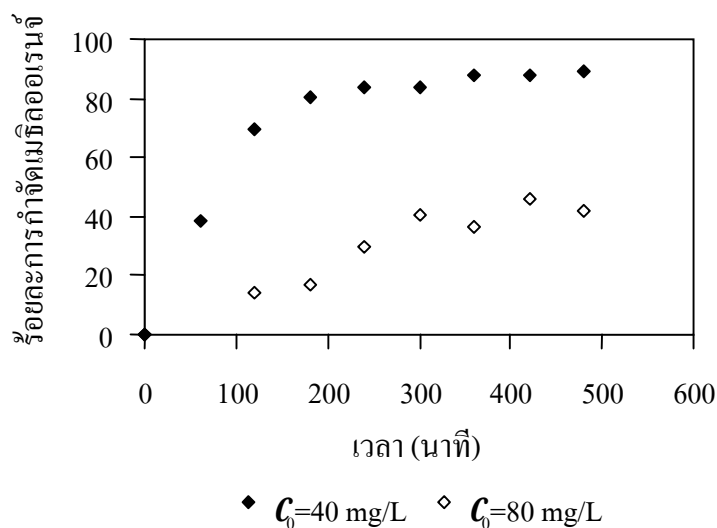
รูปที่ 4.5 ร้อยละการกำจัดเมธิลีนบลูที่เวลาต่างๆเมื่อใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ



รูปที่ 4.6 ร้อยละการกำจัดเมธิลีนบลูที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 50%CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ

4.2.1.3 การดูดซับเมธิลออเรนจ์ที่ระยะเวลาการดูดซับต่างๆ

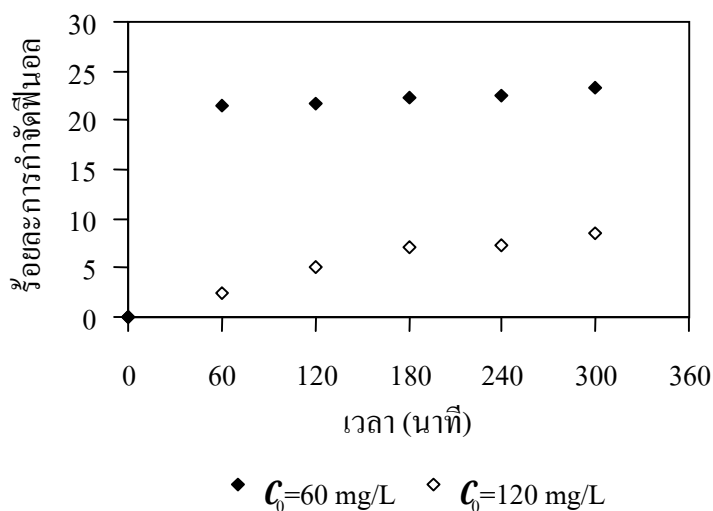
การศึกษาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของเมธิลออเรนจ์เมื่อใช้ Organo-clays (100% CEC-HDTMA-clay) เป็นตัวดูดซับ แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าระยะเวลาการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับใช้เวลาประมาณ 200 นาที เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมธิลออเรนจ์เท่ากับ 40 mg/L และใช้เวลาประมาณ 300 นาที เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของเมธิลออเรนจ์เท่ากับ 80 mg/L แสดงว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมธิลออเรนจ์ที่แตกต่างกันมีผลต่อระยะเวลาการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าร้อยละการกำจัดเมธิลออเรนจ์เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป แสดงว่า 100%CEC-HDTMA-clay ดูดซับเมธิลออเรนจ์ได้ และพบว่าความสามารถในการกำจัดเมธิลออเรนจ์ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมธิลออเรนจ์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมธิลออเรนจ์เพิ่มขึ้นความสามารถในการกำจัดเมธิลออเรนจ์จะลดลง



รูปที่ 4.7 ร้อยละการกำจัดเมธิลออเรนจ์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ 100%CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ

4.2.1.4 การดูดซับฟีนอลที่ระยะเวลาการดูดซับต่างๆ

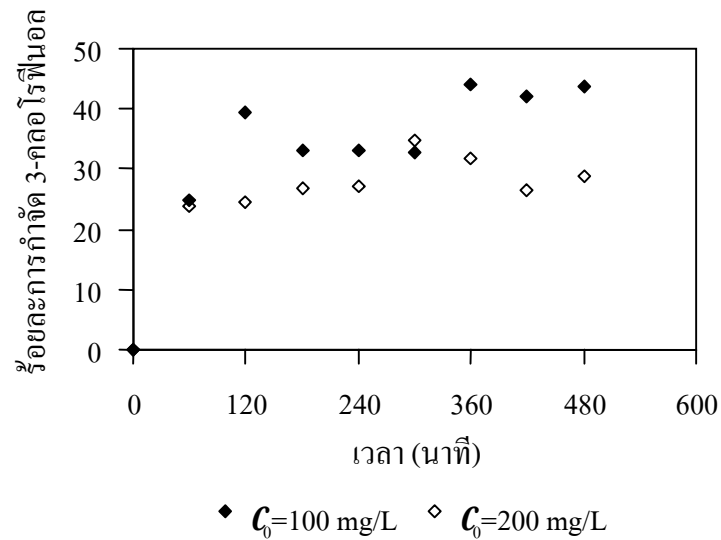
การศึกษาระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอล แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล 60 mg/L ใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลประมาณชั่วโมงที่ 1 ส่วนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล 120 mg/L จะใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลประมาณชั่วโมงที่ 4 แสดงว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอลมีผลต่อเวลาในการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ คือเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอลมีค่าต่ำจะใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลน้อยกว่าที่ความเข้มข้นสูง และพบว่าความสามารถในการกำจัดฟีนอลขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอลเพิ่มขึ้นความสามารถในการกำจัดฟีนอลจะลดลง



รูปที่ 4.8 ร้อยละการกำจัดฟีนอลที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 100%CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ

4.2.1.5 การดูดซับ 3-คลอโรฟีนอลที่ระยะเวลาการดูดซับต่างๆ

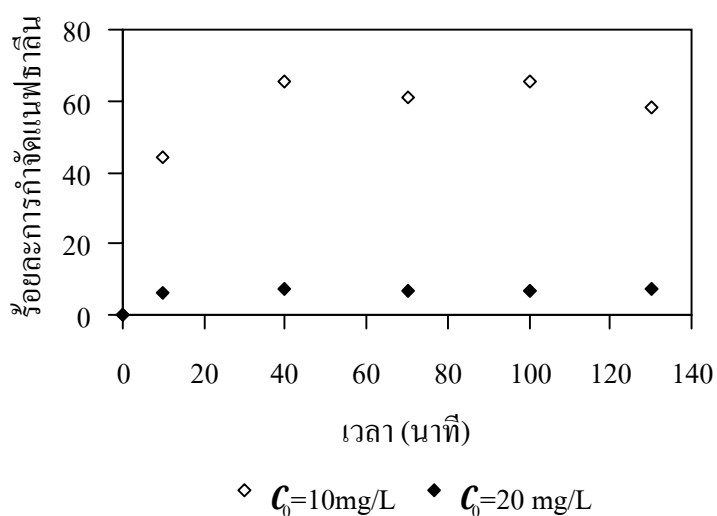
จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ 3-คลอโรฟีนอลโดยใช้ 200%CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับจะใช้เวลาประมาณ 120 นาที แม้ว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ 3-คลอโรฟีนอลจะแตกต่างกันแต่ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลจะใช้ระยะเวลาใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.9 ร้อยละการกำจัด 3-คลอโรฟีนอลที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 200%CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ

4.2.1.6 การดูดซับแนฟธาลินที่ระยะเวลาการดูดซับต่างๆ

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับแนฟธาลินโดยใช้ 150%CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับจะใช้เวลาประมาณ 40 นาที แม้ว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแนฟธาลินจะแตกต่างกันแต่ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลจะใช้ระยะเวลาใกล้เคียงกัน แต่ความสามารถในการกำจัดแนฟธาลินจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแนฟธาลิน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแนฟธาลินเพิ่มขึ้นความสามารถในการกำจัดแนฟธาลินจะลดลง



รูปที่ 4.10 ร้อยละการกำจัดแนฟธาลินที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 150%CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ

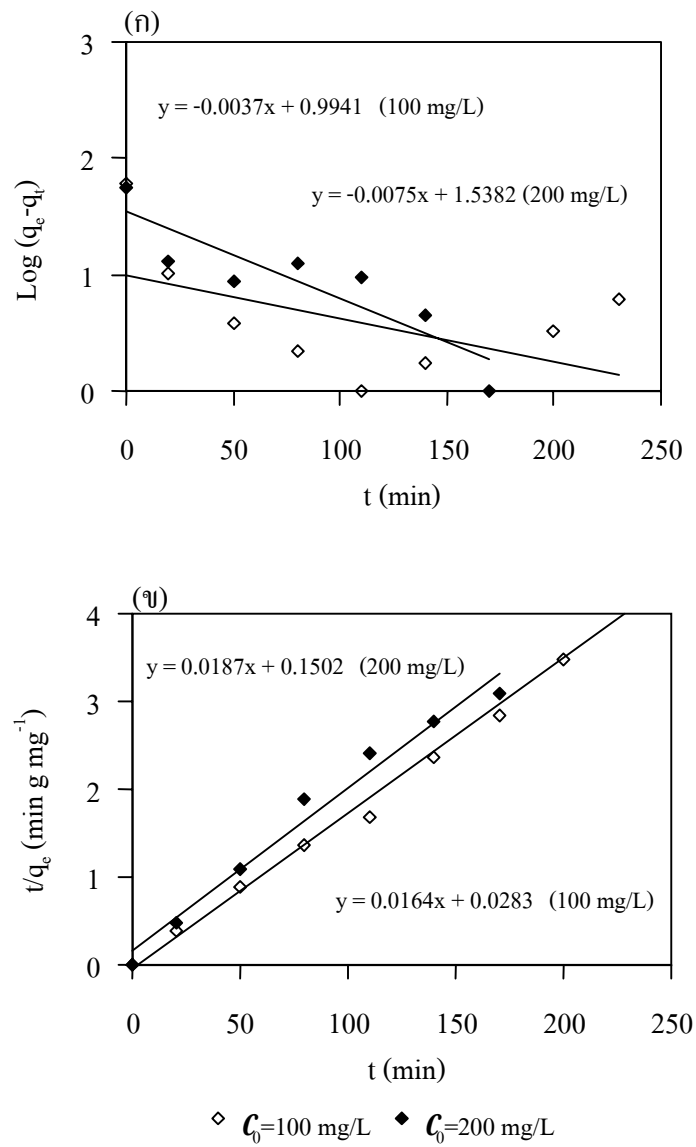
4.2.1.7 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารอินทรีย์

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารอินทรีย์โดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและ Organo-clays โดยใช้สมการ Pseudo-First Order และ Pseudo-Second Order พบว่าการดูดซับสารอินทรีย์โดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และ Organo-clays มีลักษณะการดูดซับแบบ Pseudo-Second Order ยกเว้นการดูดซับเมธิลีนบลูด้วย Organo-clays (50%CEC-HDTMA-clay) และพบว่าความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอินทรีย์เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอินทรีย์มากขึ้นความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ที่สภาวะสมดุลจะมีความสามารถน้อยลง (ค่า k_2 มีค่าน้อยลง) ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองก่อนหน้านี้

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากสมการ Pseudo-Second order

สารอินทรีย์	ชนิดของตัวดูดซับ	C_0, mgL^{-1}	R^2	$k_2 \text{gmin}^{-1} \text{mg}^{-1}$
กรดฮิวมิก	แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ	160	0.9951	0.00950
		200	0.9791	0.00233
	50%CEC-HDTMA-clay	150	0.9934	0.00243
เมธิลีนบลู	แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ	100	0.9302	0.00323
		200	0.9911	0.00126
	50%CEC-HDTMA-clay ¹	100	0.9020	0.0147
		200	0.9303	0.0106
เมธิลออเรนจ์	100%CEC-HDTMA-clay	40	0.9806	0.00062
		80	0.5489	0.00009
ฟีนอล	100%CEC-HDTMA-clay	60	0.9989	2.09164
		120	0.7346	0.09754
3-คลอโรฟีนิล	200%CEC-HDTMA-clay	100	0.9478	0.00038
		200	0.9715	0.00136
แนฟทาลีน	150%CEC-HDTMA-clay	10	0.9957	0.03514
		20	0.9985	0.05189

หมายเหตุ ¹การดูดซับเมธิลีนบลูด้วย 50%CEC-HDTMA-clay มีลักษณะการดูดซับแบบ Pseudo-First Order เมื่อ ค่า R^2 สำหรับ Pseudo-First Order และค่า k_1 สำหรับ Pseudo-First Order



รูปที่ 4.11 การดูดซับกรดซิวมิกโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ เมื่อ (ก) Pseudo-First Order
(ข) Pseudo-Second Order

4.2.2 ศึกษาความสามารถของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและ Organo-clays ในการดูดซับสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิคงที่

4.2.2.1 การดูดซับกรดฮิวมิกที่อุณหภูมิคงที่ (อุณหภูมิห้อง)

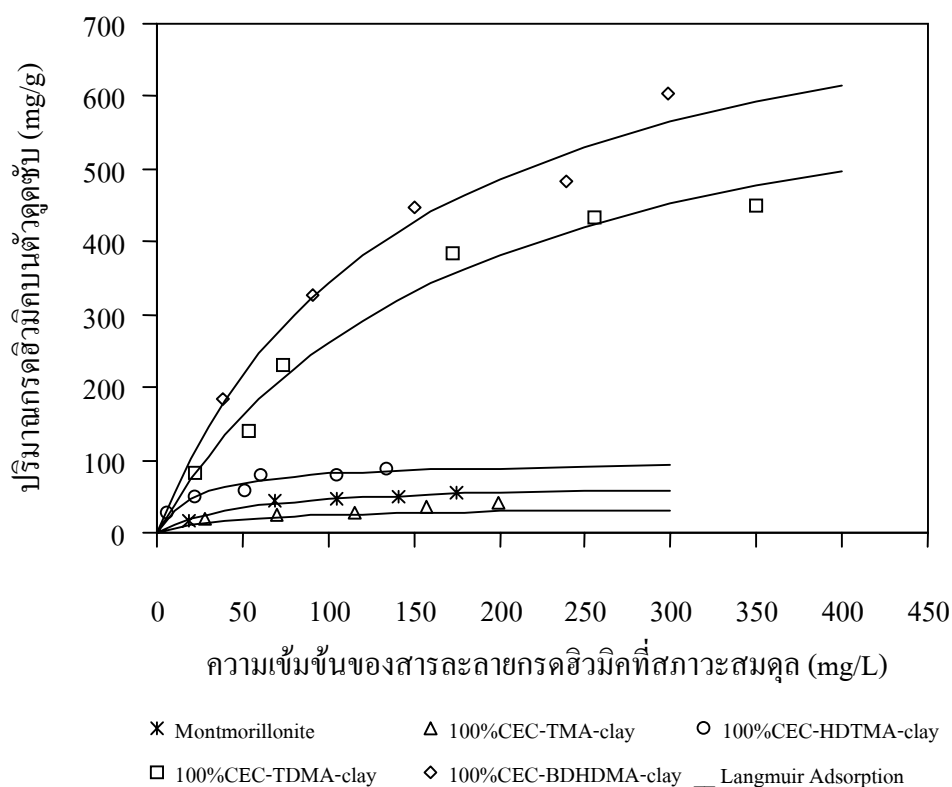
จากการศึกษาความสามารถของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและ Organo-clays ในการดูดซับกรดฮิวมิก พบว่าปริมาณกรดฮิวมิกที่ถูกดูดซับโดย Organo-clays จะมากกว่าปริมาณกรดฮิวมิกที่ถูกดูดซับโดยแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ แสดงดังรูปที่ 4.12 ยกเว้น TMA-clays ที่ไม่สามารถดูดซับกรดฮิวมิกได้แม้ว่าจะเพิ่มปริมาณ TMA บนมอนต์มอริลโลไนต์จนถึง 200% ของค่า CEC ของมอนต์มอริลโลไนต์ตั้งต้น เนื่องมาจากขนาดของ TMA cation มีขนาดเล็ก และมีค่า Hydration สูง (Sanchez-Camazano and Sanchez-Martin, 1994) ทำให้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติจากชอบน้ำ (Hydrophilic) เป็นชอบสารอินทรีย์ (Organophilic) ได้ ซึ่งเหมือนกับ Ca^{2+} และ Na^+ ที่มีอยู่ในโครงสร้างตามธรรมชาติของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีค่า Hydration สูง ดังนั้น TMA-clays จึงมีแนวโน้มเป็นชอบน้ำมากกว่าชอบสารอินทรีย์ จากผลการทดลองจะเห็นว่าความยาวหมู่แอลคิล (alkyl group) บน QACs ที่ใช้ปรับปรุงสมบัติของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จะมีผลต่อปริมาณการดูดซับกรดฮิวมิก ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกจะเป็นไปตามลำดับดังนี้ BDHMA-clays > TDMA-clays > HDTMA-clays > แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.13 จากกราฟจะเห็นว่าทั้ง BDHMA-clays, HDTMA-clays และ TDMA-clays จะมีความสามารถดูดซับกรดฮิวมิกมากขึ้นเมื่อมีปริมาณ QACs บนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มากขึ้น เนื่องจากส่วนที่ไม่ชอบน้ำของกรดฮิวมิกซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีประจุจะจับกับหมู่แอลคิลของ QACs ที่อยู่บนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เหล่านี้ได้มากขึ้น

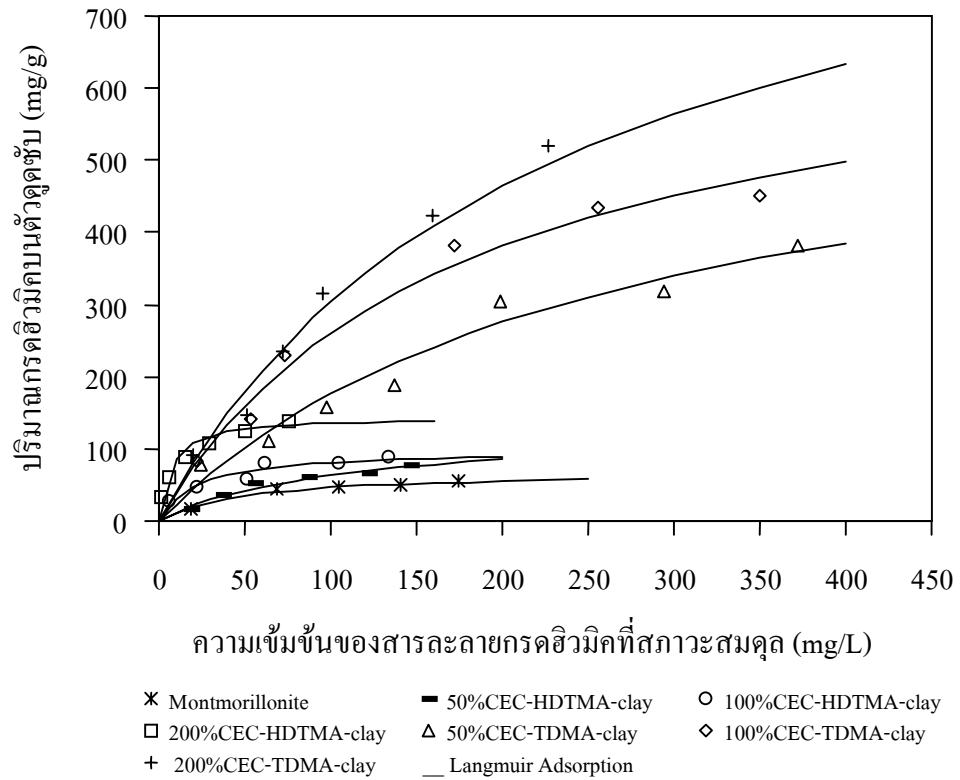
ความสามารถการดูดซับกรดฮิวมิกของตัวดูดซับชนิดต่างๆ สามารถคำนวณได้จาก Langmuir Adsorption Isotherm แสดงดังตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าปริมาณกรดฮิวมิกสูงสุดบนตัวดูดซับที่ได้จากการคำนวณจะให้ผลสอดคล้องกับ รูปที่ 4.12 นั่นคือความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกเป็นดังนี้คือ BDHMA-clays > TDMA-clays > HDTMA-clays > แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ > TMA-clays

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบความสามารถการดูดซับกรดฮิวมิคของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดต่างๆ

ชนิดของตัวดูดซับ	ปริมาณกรดฮิวมิคสูงสุดบนตัวดูดซับ, mg g ⁻¹	R ²
แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ	68.49	0.9907
100%CEC-TMA-clay	52.97	0.9249
50%CEC-HDTM-clay	129.87	0.9131
100%CEC-HDTMA-clay	99.01	0.9665
200%CEC-HDTMA-clay	144.93	0.9886
50%CEC-TDMA-clay	625.00	0.8517
100%CEC-TDMA-clay	714.29	0.9586
200%CEC-TDMA-clay	1000.0	0.9107
100%CEC-BDHDMA-clay	833.33	0.9593



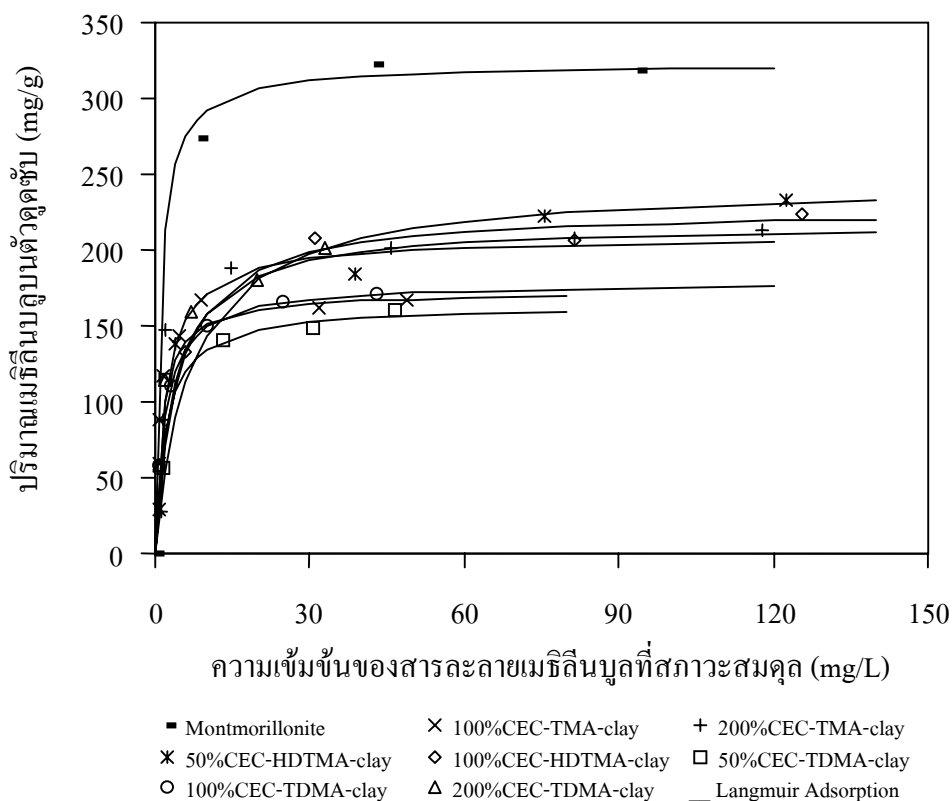
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิคที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณกรดฮิวมิคบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ โดยใช้ Organo-clays ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วย QACs ต่างชนิดกัน



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดอิมิกที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณกรดอิมิกบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ โดยใช้ Organo-clays ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วย QACs ต่างชนิดกันและปริมาณแตกต่างกัน

4.2.2.2 การดูดซับเมธิลีนบลูที่อุณหภูมิห้อง (อุณหภูมิห้อง)

การดูดซับเมธิลีนบลูด้วยแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและ Organo-clays ชนิดต่างๆ พบว่า Organo-clays มีความสามารถในการดูดซับเมธิลีนบลูน้อยกว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ นั้นเป็นเพราะว่า QACs ที่ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ ทำให้ความสามารถในการดูดซับเมธิลีนบลูมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.14 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติสามารถดูดซับเมธิลีนบลูได้ดีที่สุด ในขณะที่แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับเปลี่ยนสภาพพื้นผิวด้วย BDHDMMA ไม่สามารถดูดซับเมธิลีนบลูได้เลย เนื่องจากเมธิลีนบลูเป็นสีอินทรีย์มีประจุบวก และกลไกการดูดซับสีเมธิลีนบลูบนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเกิดขึ้นด้วยการแลกเปลี่ยนประจุบวกระหว่างเมธิลีนบลูกับ Na^+ และ Ca^{2+} ที่มีอยู่ในแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ แต่สำหรับ Organo-clays Na^+ และ Ca^{2+} ที่มีอยู่ในแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติถูกแลกเปลี่ยนกับ QACs ไปหมดแล้วจึงไม่เหลือประจุบวกของ Na^+ และ Ca^{2+} บนพื้นผิวทำให้ความสามารถในการดูดซับเมธิลีนบลูเกิดขึ้นได้น้อย



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลีนบลูหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลีนบลูบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

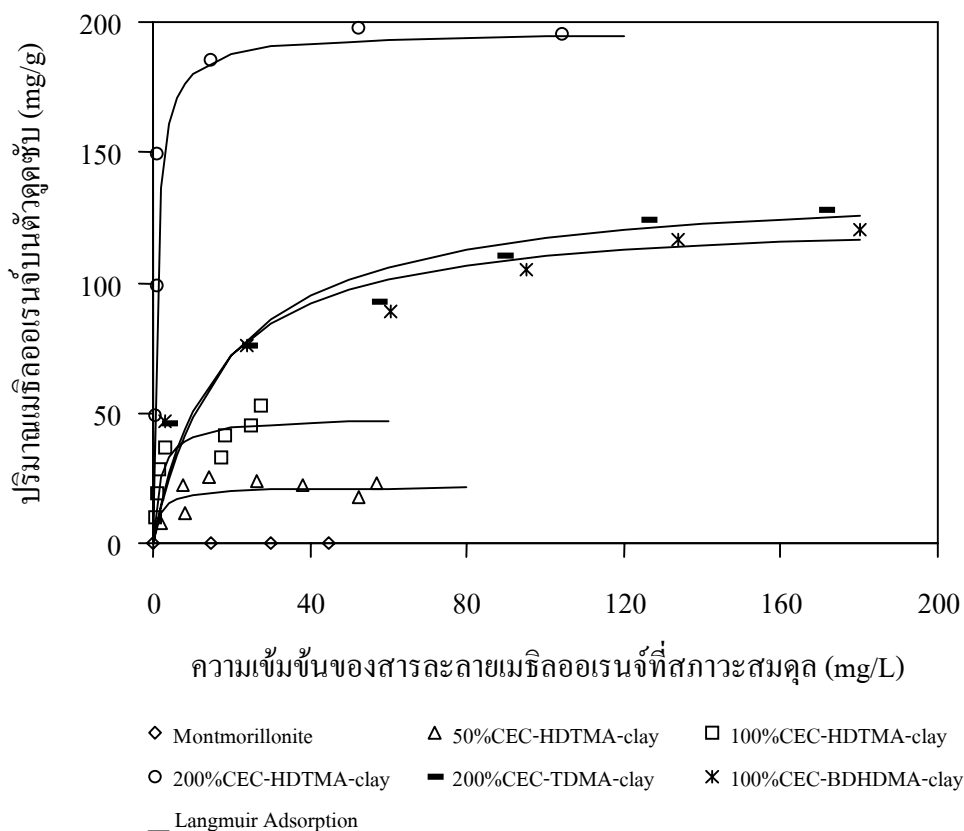
ความสามารถในการดูดซับเมธิลีนบลูของตัวดูดซับต่างๆ สามารถคำนวณได้จาก Langmuir Adsorption Isotherm ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่ามอนต์มอริลโลไนต์มีความสามารถในการดูดซับเมธิลีนบลูมากที่สุด

ตารางที่ 4.6 ความสามารถการดูดซับเมธิลีนบลูของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดต่างๆ

ชนิดของตัวดูดซับ	ปริมาณเมธิลีนบลูสูงสุดบนตัวดูดซับ, mg g ⁻¹	R ²
แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ	322.6	0.9997
100%CEC-TMA-clay	172.4	0.9965
200%CEC-TMA-clay	217.4	0.9924
50%CEC-HDTMA-clay	243.9	0.9939
100%CEC-HDTMA-clay	227.3	0.9975
50%CEC-TDMA-clay	163.9	0.9969
100%CEC-TDMA-clay	178.6	1.0000
200%CEC-TDMA-clay	208.3	0.9969

4.2.2.3 การดูดซับเมธิลออเรนจ์ที่อุณหภูมิคงที่ (อุณหภูมิห้อง)

จากผลการทดลองตามรูปที่ 4.15 พบว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติไม่สามารถดูดซับเมธิลออเรนจ์จากน้ำได้เลยเนื่องจากเมธิลออเรนจ์เป็นสีข้อมที่มีประจุลบจึงเกิดแรงผลักรกกับชั้นโครงสร้างที่มีประจุลบของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ ในขณะที่ Organo-clay สามารถดูดซับเมธิลออเรนจ์จากน้ำได้และพบว่าความสามารถในการดูดซับเมธิลออเรนจ์จากน้ำของ Organo-clays (HDTMA-clays และ BDHDM-clays) จะเพิ่มขึ้นเมื่อ ปริมาณและจำนวนคาร์บอนอะตอมของ QACs บนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้น แสดงว่าการดูดซับเมธิลออเรนจ์จากน้ำของ Organo-clays เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำระหว่างเมธิลออเรนจ์กับหมู่อัลคิล (Alkyl Group) ของ QACs บนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Hydrophobic Interaction)



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลออเรนจ์หลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลออเรนจ์บนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

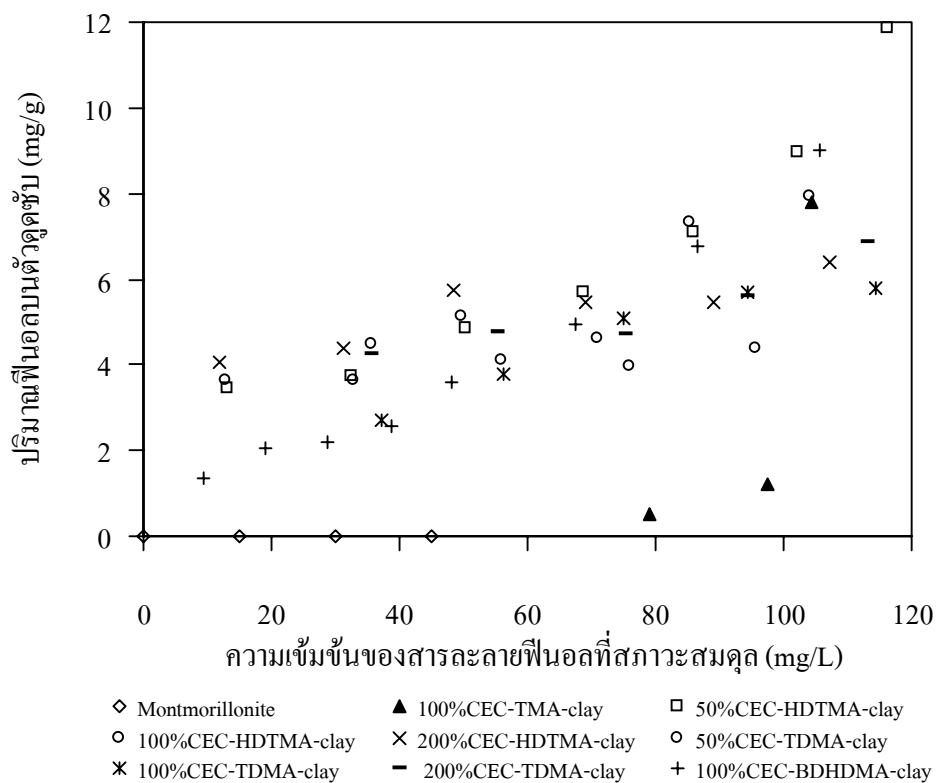
ความสามารถในการดูดซับเมธิลออเรนจ์ของตัวดูดซับต่างๆ สามารถคำนวณได้จาก Langmuir Adsorption Isotherm ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ความสามารถในการดูดซับเมธิลออเรนจ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดต่างๆ

ชนิดของตัวดูดซับ	ปริมาณเมธิลออเรนจ์สูงสุดบนตัวดูดซับ, mg g^{-1}	R^2
50%CEC-HDTMA-clay	21.6	0.9459
100%CEC-HDTMA-clay	48.08	0.9383
200%CEC-HDTMA-clay	196.08	0.9998
200%CEC-TDMA-clay	138.89	0.9869
100%CEC-BDHDMA-clay	126.58	0.9869

4.2.2.4 การดูดซับฟีนอลที่อุณหภูมิคงที่ (อุณหภูมิห้อง)

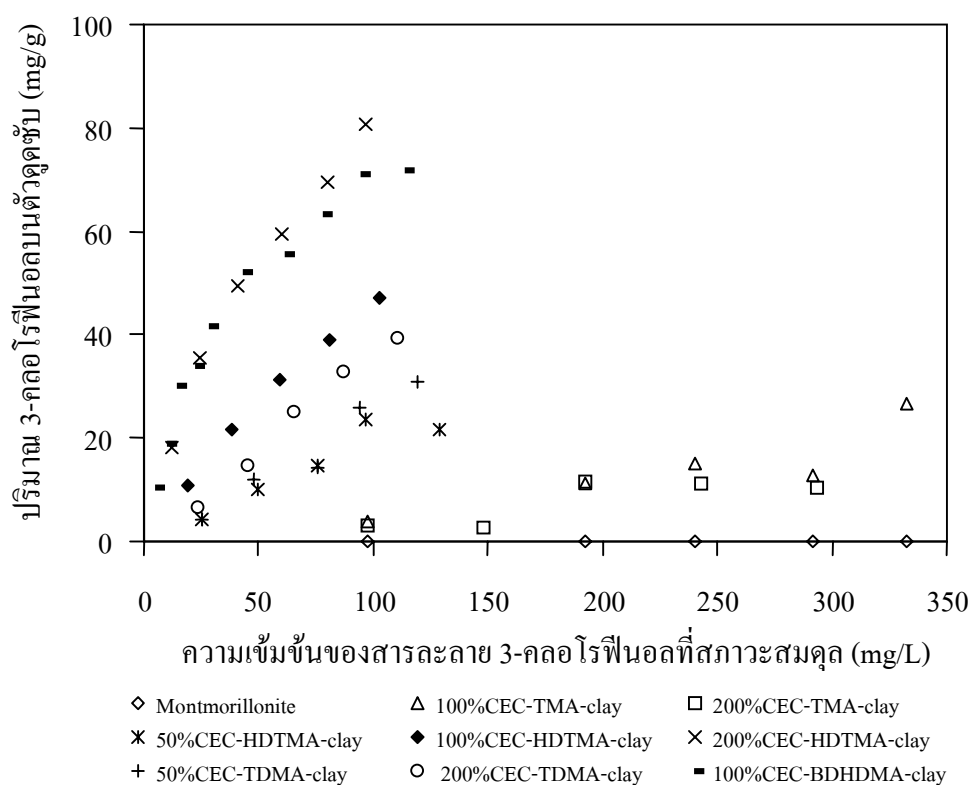
จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติไม่สามารถดูดซับฟีนอลได้เลย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wibulswas, White และ Rautiu ปี 1999 ว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติไม่สามารถดูดซับฟีนอลได้ ในขณะที่ Organo-clays สามารถดูดซับฟีนอลจากน้ำได้โดยความสามารถในการดูดซับฟีนอลจากน้ำของ Organo-clays เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณและจำนวนคาร์บอนอะตอมของ QACs บนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้น แสดงว่าการดูดซับฟีนอลจากน้ำของ Organo-clays เกิดขึ้นด้วยกลไกเกี่ยวกับการดูดซับเมธิลเออร์เรนต์ด้วย Organo-clays คือ เกิดจากแรงกระทำระหว่างฟีนอลกับหมู่อัลคิล ของ QACs บน Organo-clays



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลหลังการดูดซับกับปริมาณฟีนอลบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

4.2.2.5 การดูดซับ 3-คลอโรฟีนอลที่อุณหภูมิคงที่ (อุณหภูมิห้อง)

จากผลการทดลองตามรูปที่ 4.17 พบว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติไม่สามารถดูดซับ 3-คลอโรฟีนอลจากน้ำได้เลย ในขณะที่ Organo-clays สามารถดูดซับ 3-คลอโรฟีนอลจากน้ำได้โดยความสามารถในการดูดซับ 3-คลอโรฟีนอลของ Organo-clays เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณและจำนวนคาร์บอนอะตอมของ QACs บนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้น แสดงว่าการดูดซับ 3-คลอโรฟีนอลจากน้ำของ Organo-clays เกิดขึ้นด้วยกลไกเดียวกับการดูดซับฟีนอลด้วย Organo-clays คือ เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำระหว่าง 3-คลอโรฟีนอลกับหมู่อัลคิลของ QACs บน Organo-clays และสามารถคำนวณปริมาณการดูดซับ 3-คลอโรฟีนอลได้จาก Langmuir Adsorption Isotherm ดังแสดงในตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ 3-คลอโรฟีนอลหลังการดูดซับกับปริมาณ 3-คลอโรฟีนอลบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

ตารางที่ 4.8 ความสามารถการดูดซับ 3-กลอโรฟีนอลของ Organo-clays ชนิดต่างๆ

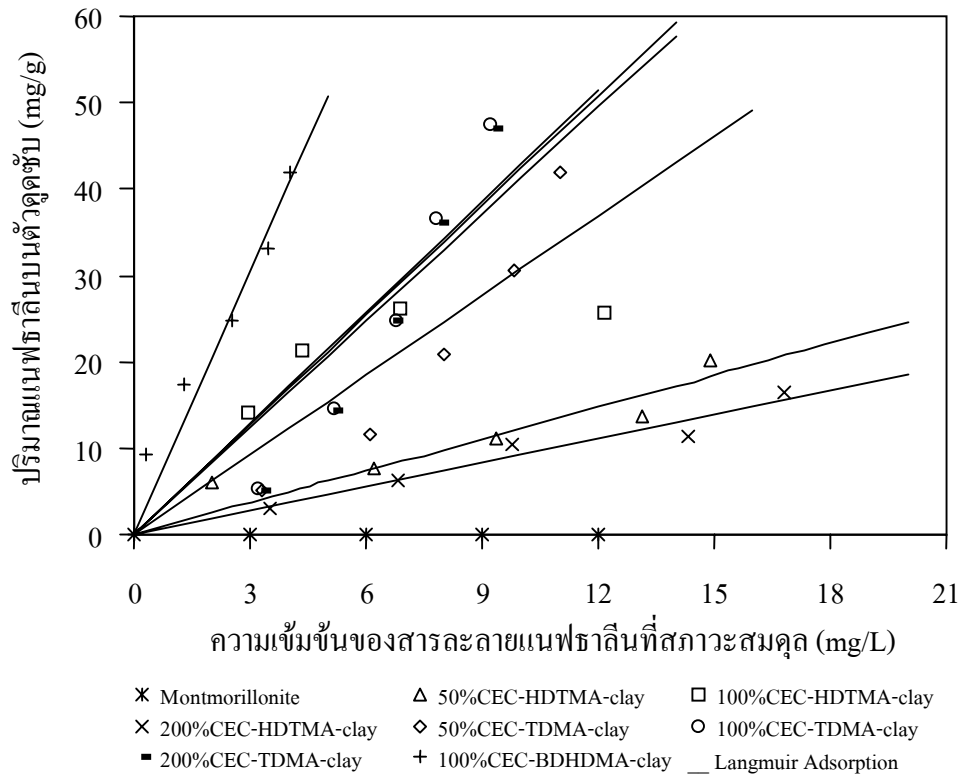
ชนิดของตัวดูดซับ	ปริมาณ 3-กลอโรฟีนอลสูงสุดบนตัวดูดซับ, mg g ⁻¹	R ²
200%CEC-HDTMA-clay	131.58	0.9938
100%CEC-BDHDMA-clay	97.087	0.9897

4.2.2.6 การดูดซับแนฟธาลินที่อุณหภูมิคงที่ (อุณหภูมิห้อง)

จากผลการทดลองตามรูปที่ 4.18 พบว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติไม่สามารถดูดซับแนฟธาลินจากน้ำได้เลยเนื่องจากแนฟธาลินเป็นสารไม่ชอบน้ำแต่ลักษณะพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติแสดงลักษณะชอบน้ำทำให้ไม่สามารถดูดซับแนฟธาลินได้ ในขณะที่ Organo-clays สามารถดูดซับแนฟธาลินจากน้ำได้โดยความสามารถในการดูดซับแนฟธาลินของ Organo-clays เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณและจำนวนคาร์บอนอะตอมของ QACs บนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้น แสดงว่าการดูดซับแนฟธาลินจากน้ำของ Organo-clays เกิดขึ้นด้วยกลไกเดียวกับการดูดซับ 3-กลอโรฟีนอลของ Organo-clays คือ เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำระหว่างแนฟธาลินกับหมู่อัลคิลของ QACs บน Organo-clays และลักษณะการดูดซับแนฟธาลินเกือบเป็นเส้นตรง แสดงดังตารางที่ 4.9 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lee และ Kim ศึกษาการดูดซับแนฟธาลินด้วยแร่ดินขาว (Kaolinite และ Holloysite) ที่ถูกปรับปรุงด้วย HDTMA

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าที่ได้จากสมการ Linear Adsorption Isotherm

ชนิดของตัวดูดซับ	K _d	R ²
50%CEC-HDTMA-clay	1.2303	0.9069
100%CEC-HDTMA-clay	4.2129	0.9518
200%CEC-HDTMA-clay	0.9252	0.9339
50%CEC-TDMA-clay	3.0700	0.8769
100%CEC-TDMA-clay	4.2900	0.8701
200%CEC-TDMA-clay	4.2311	0.8694
100%CEC-BDHDMA-clay	10.1600	0.9484



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอฟธาตินหลังการดูดซับกับปริมาณแอฟธาตินบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

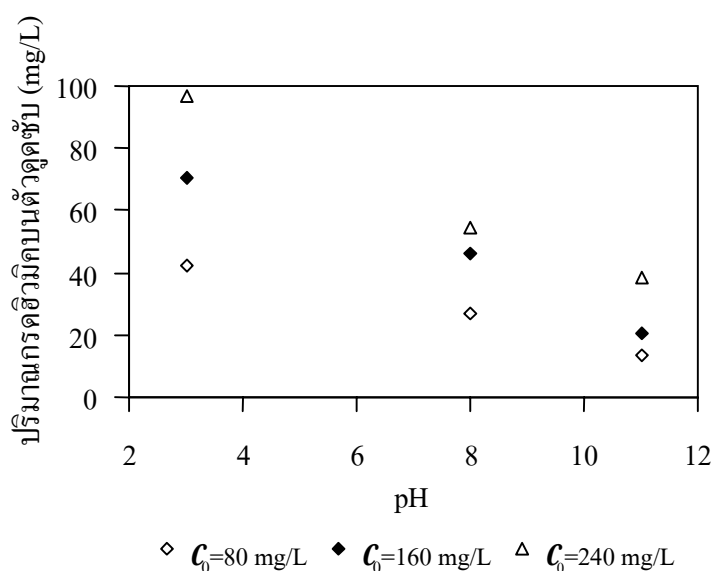
ตารางที่ 4.10 แสดงคุณสมบัติของตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์แต่ละชนิดที่ทำการศึกษาและคุณสมบัติของสารอินทรีย์

สารถูกดูดซับ	ลักษณะของสารถูกดูดซับ	ชนิดของตัวดูดซับ	ลักษณะสาร QACs	อธิบายการดูดซับ
กรดฮิวมิก	มีทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ	200%CEC-TDMA-clay	หมู่แอลคิลยาว	แรงกระทำระหว่างกรดฮิวมิกกับหมู่แอลคิลของ QACs บน Organo-clays
เมธิลีนบลู	สีประจวบ	มอนต์มอริลโลไนต์	พื้นผิวแสดงประจุเป็นลบ	แรงดึงดูดระหว่างประจวบและประจุลบ
เมธิลออเรนจ์	สีประจุลบ	200%CEC-HDTMA-clay	หมู่แอลคิลยาว	แรงกระทำระหว่างเมธิลออเรนจ์กับหมู่แอลคิลของ QACs บน Organo-clays
ฟีนอล	วงเบนซีน มีขั้ว และสามารถละลายน้ำได้มาก	Organo-clays	-	แรงกระทำระหว่างฟีนอลกับหมู่แอลคิลของ QACs บน Organo-clays
3-คลอโรฟีนอล	วงเบนซีน และมี Cl ซึ่งจะเพิ่มความไม่ชอบน้ำ	200%CEC-HDTMA-clay	หมู่แอลคิลยาว	แรงกระทำระหว่าง 3-คลอโรฟีนอลกับหมู่แอลคิลของ QACs บน Organo-clays
แนฟธาลิน	วงเบนซีนและเป็นสารไม่ชอบน้ำในอุดมคติ	100%CEC-BDHDMA-clay	หมู่แอลคิลยาวและหมู่แอลคิลเป็นวงเบนซีน	แรงกระทำระหว่างแนฟธาลินกับหมู่แอลคิลของ QACS บน Organo-clays

4.2.3 ศึกษาผลกระทบของความเป็นกรด-ด่าง ต่อความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์

4.2.3.1 การดูดซับกรดฮิวมิกที่ pH ต่างๆ

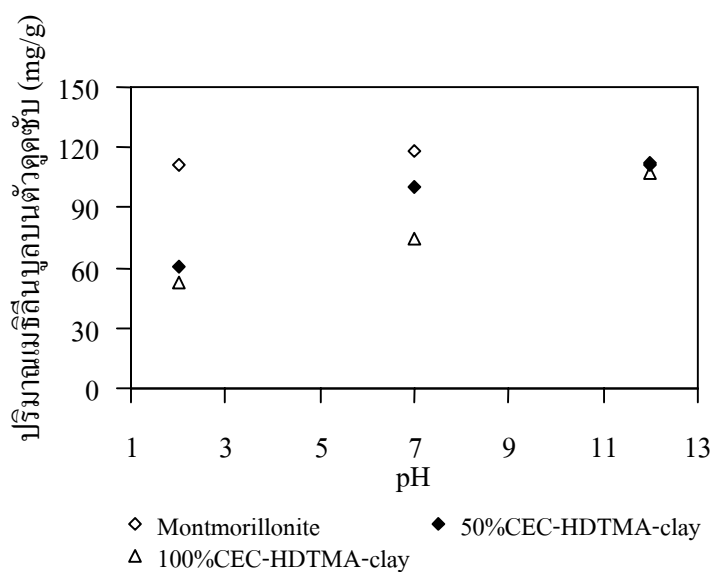
จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกในสภาวะความเป็นกรด-ด่างของระบบต่างๆ กันโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับจะเป็นไปตามลำดับดังนี้คือการดูดซับที่สภาวะกรด > สภาวะเป็นกลาง > สภาวะด่าง แสดงดังรูปที่ 4.19 เนื่องมาจากระยะห่างระหว่างชั้นของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (d_{001}) จะขึ้นอยู่กับค่า pH เมื่อค่า pH มีค่ามากขึ้นระยะห่างระหว่างชั้นของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จะลดลง นอกจากนั้นที่สภาวะของสารละลายเป็นด่างกรดฮิวมิกจะมีประจุลบเช่นเดียวกับชั้นโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติทำให้เกิดแรงผลัก แต่ที่สภาวะของสารละลายเป็นกรดกรดฮิวมิกจะมีประจุเป็นบวกส่วนชั้นโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติจะมีประจุเป็นลบทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล



รูปที่ 4.19 อิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างต่อปริมาณการดูดซับกรดฮิวมิกที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นตัวดูดซับ

4.2.3.2 การดูดซับเมธิลีนบลูที่ pH ต่างๆ

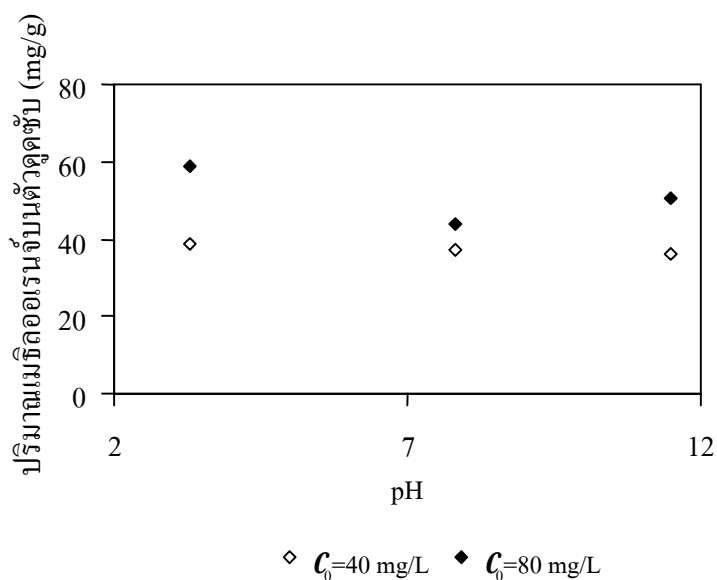
จากการศึกษาการดูดซับเมธิลีนบลูด้วยแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ แสดงดังรูปที่ 4.20 พบว่าเกิดการดูดซับได้ดีใกล้เคียงกันไม่ว่า pH ของสารละลายจะเป็นกลาง (pH=7) เป็นกรด (pH=2) หรือเป็นด่าง (pH=12) อาจเนื่องมาจากที่ pH สูงขึ้นระยะห่างระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ลดลง ส่วนที่ pH ต่ำจะเกิดการแข่งขันระหว่างเมธิลีนบลูและไฮโดรเจนไอออนทำให้การดูดซับเมธิลีนบลูที่ pH ต่างกันแต่ปริมาณการดูดซับใกล้เคียงกัน สำหรับการดูดซับเมธิลีนบลูจากน้ำด้วย 50%CEC-HDTMA-clay และ 100%CEC-HDTMA-clay จะเกิดการดูดซับได้ดีที่สุดที่สารละลายมีสถานะเป็นด่างด้วยความสามารถในการดูดซับที่ใกล้เคียงกับการดูดซับด้วยแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ แต่การดูดซับเมธิลีนบลูจากน้ำด้วย 50%CEC-HDTMA-clay และ 100%CEC-HDTMA-clay เกิดได้ไม่ดีในสถานะที่เป็นกรด อาจเนื่องมาจากการดูดซับ HDTMA บนพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติที่ขึ้นอยู่กับ pH เมื่อ pH ต่ำจะทำให้ HDTMA ดูดซับบนพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ได้น้อย เนื่องจากมีการแข่งขันกับไฮโดรเจนไอออนหรือประจุบวกของโลหะ แต่ค่า pH ไม่มีผลต่อคุณสมบัติของ HDTMA-clays (Dentel, 1996)



รูปที่ 4.20 อิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับเมธิลีนบลูที่อุณหภูมิห้อง

4.2.3.3 การดูดซับเมธิลออเรนจ์ที่ pH ต่างๆ

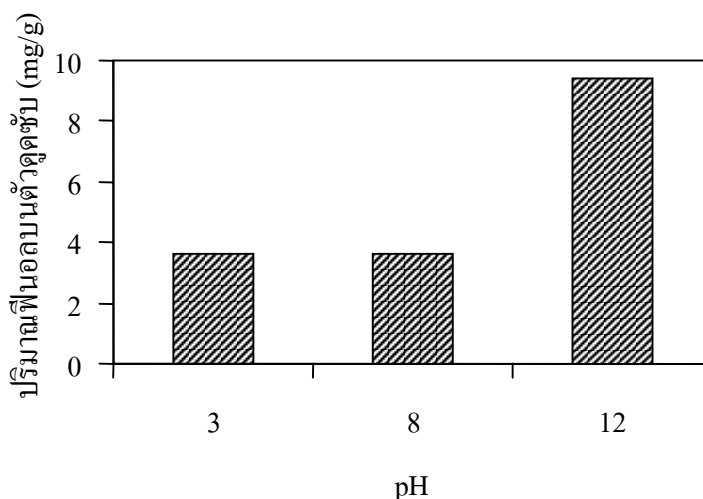
จากการศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับเมธิลออเรนจ์เมื่อใช้ 100%CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ พบว่าไม่ว่า pH ของสารละลายจะเป็นกลาง เป็นกรด หรือเป็นด่าง ความสามารถในการดูดซับเมธิลออเรนจ์ที่ $C_0=40$ และ 80 mg/L มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.21 อาจเนื่องมาจากสีของสารละลายเมธิลออเรนจ์เปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีแดงเมื่อเติมกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M ทำให้ที่สภาวะความเป็นกรดผลการทดลองคลาดเคลื่อนไปเนื่องจากการทดลองใช้เครื่อง UV-VIS-NIR Spectrophotometer



รูปที่ 4.21 อิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับเมธิลออเรนจ์ที่อุณหภูมิห้องของ 100%CEC-HDTMA-clay

4.2.3.4 การดูดซับฟีนอลที่ pH ต่างๆ

การดูดซับฟีนอลโดยใช้ 200%CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับขึ้นอยู่กับความเป็นกรดต่างของสารละลาย จากรูปที่ 4.22 เมื่อ pH เท่ากับ 2.58 (สารละลายเป็นกรด) ฟีนอลจะถูกดูดซับไปจากสารละลายประมาณ 20% เมื่อเพิ่ม pH ของสารละลายเป็น 7.5 (สารละลายเป็นกลาง) ปริมาณของฟีนอลที่ถูกดูดซับจะมีค่าใกล้เคียงกับที่ pH 2.58 และเมื่อเพิ่มค่า pH เป็น 12.04 (สารละลายเป็นด่าง) ปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบน 200%CEC-HDTMA-clay จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 50% เป็นไปได้ว่าปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบน 200%CEC-HDTMA-clay ไม่ใช่ปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับจริงๆ เนื่องจากฟีนอลมีค่า pK_a เท่ากับ 9.98 ที่ 20 °C ดังนั้นเมื่อระบบของสารละลายเป็นด่างฟีนอลจะเกิดการแตกตัวกลายเป็น ไอออนทำให้ปริมาณฟีนอลในสารละลายน้อยลง

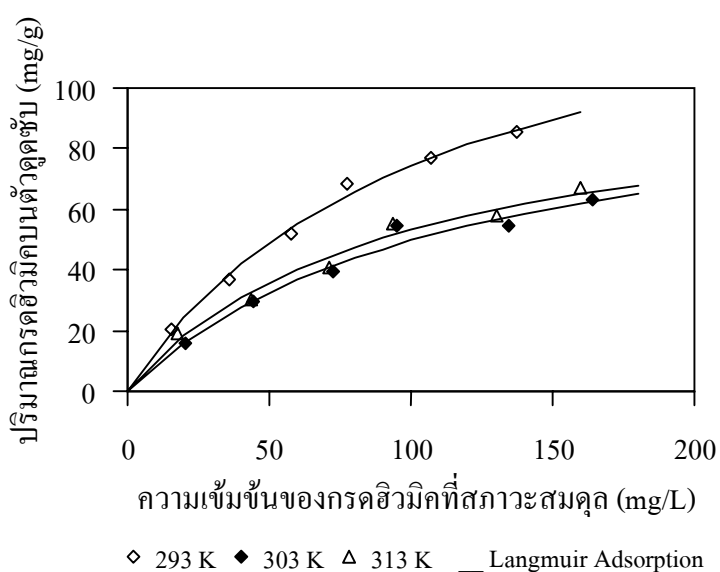


รูปที่ 4.22 อิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับฟีนอลของ 200%CEC-HDTMA-clay $C_0=40$ mg/L

4.2.4 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์

4.2.4.1 การดูดซับกรดฮิวมิกที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ พบว่าความสามารถการดูดซับกรดฮิวมิกมีปริมาณลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ตามลำดับดังนี้ที่อุณหภูมิ 293 K > อุณหภูมิ 303 K > อุณหภูมิ 313 K ดังรูปที่ 4.23 แสดงว่าการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน



รูปที่ 4.23 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

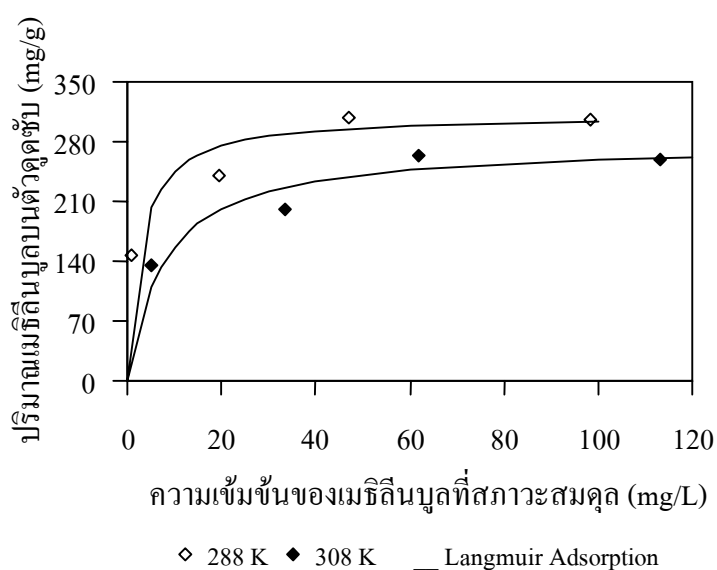
ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถคำนวณได้จาก Langmuir Adsorption Isotherm ดังแสดงในตารางที่ 4.11 ที่อุณหภูมิต่ำ (293 K) ปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับจะมีปริมาณมากกว่าที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 4.11 ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (K)	ปริมาณกรดฮิวมิกสูงสุดบนตัวดูดซับ, mg g^{-1}	R^2
293	151.51	0.9797
303	106.38	0.948
313	102.04	0.939

4.2.4.2 การดูดซับเมธิลินบลูที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับเมธิลินบลูโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ จะเห็นได้ว่าความสามารถในการดูดซับเมธิลินบลูของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังรูปที่ 4.24 แสดงว่าปฏิกิริยาการดูดซับเมธิลินบลูของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน



รูปที่ 4.24 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับเมธิลินบลูของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

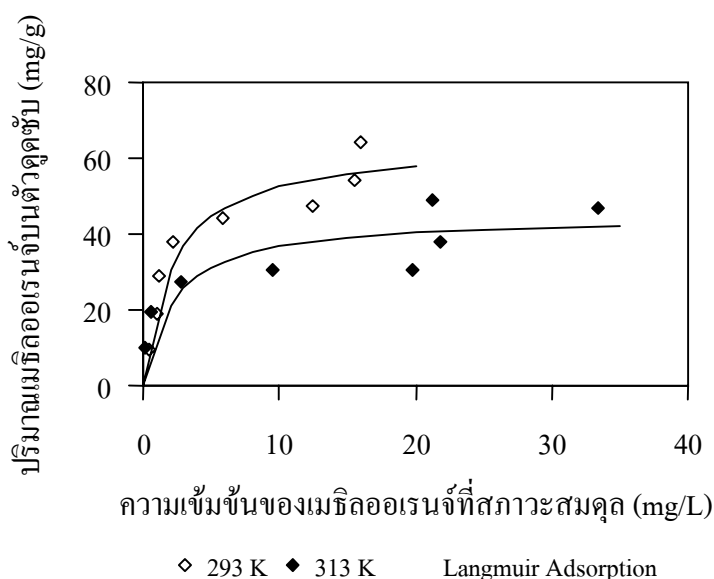
ความสามารถในการดูดซับเมธิลินบลูของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถคำนวณได้จาก Langmuir Adsorption Isotherm ดังแสดงในตารางที่ 4.12 ที่อุณหภูมิต่ำ (288 K) ปริมาณเมธิลินบลูบนตัวดูดซับจะมีปริมาณมากกว่าที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 4.12 ความสามารถในการดูดซับเมธิลินบลูของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และ 50%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (K)	ปริมาณเมธิลินบลูสูงสุดบนตัวดูดซับ, mg g^{-1}	R^2
288	312.5	0.997
308	277.8	0.992

4.2.4.3 การดูดซับเมธิลออเรนจ์ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับเมธิลออเรนจ์ โดยใช้ 100%CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ พบว่าปริมาณการดูดซับขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณการดูดซับเมธิลออเรนจ์จะลดลง แสดงดังรูปที่ 4.25 ตามลำดับดังนี้คือ อุณหภูมิ 293 K > อุณหภูมิ 313 K แสดงว่าการดูดซับเมธิลออเรนจ์ของ 100%CEC-HDTMA-clay เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน



รูปที่ 4.25 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับเมธิลออเรนจ์ของ 100%CEC-HDTMA-clay

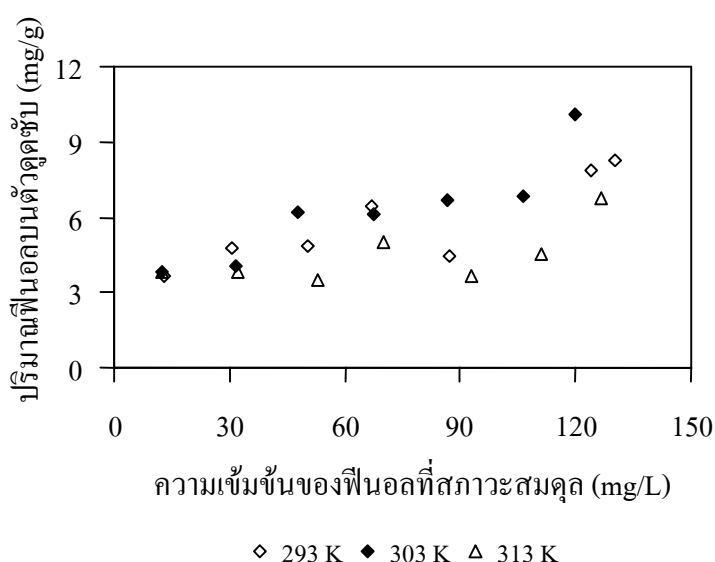
ความสามารถในการดูดซับเมธิลออเรนจ์ของ 100%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถคำนวณได้จาก Langmuir Adsorption Isotherm ดังแสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ความสามารถในการดูดซับเมธิลออเรนจ์ของ 100%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (K)	ปริมาณเมธิลออเรนจ์บนตัวดูดซับ, mg g^{-1}	R^2
293	64.10	0.9679
313	45.04	0.9191

4.2.4.4 การดูดซับฟีนอลที่อุณหภูมิต่างๆ

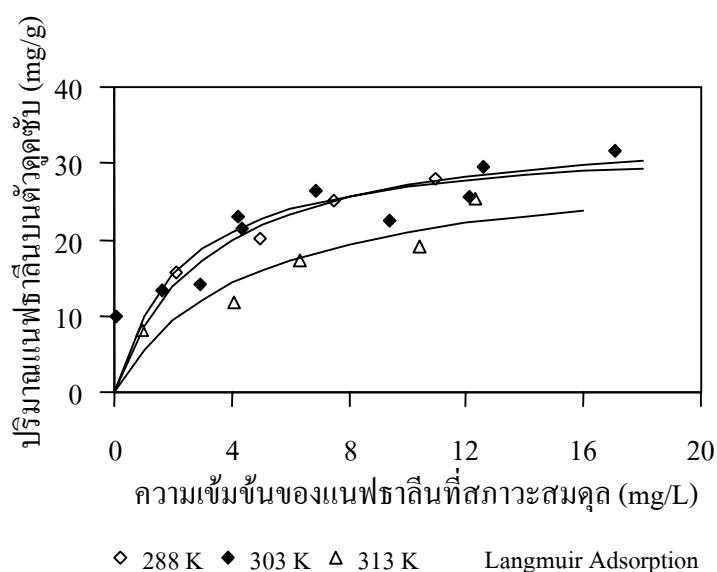
จากการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับฟีนอลโดยใช้ 200%CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ โดยทำการทดลองที่ 3 อุณหภูมิ คือ ที่ 293, 303 และ 313 K ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 4.26 จะพบว่าความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอลของ 100%CEC-HDTMA-clay ที่เตรียมไว้ ที่อุณหภูมิ 293 กับ 303 K มีค่าการดูดซับใกล้เคียงกันและมีค่าการดูดซับที่ดีกว่า ณ อุณหภูมิ 313 K โดยสังเกตปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบน 200%CEC-HDTMA-clay ที่ 313 K มีค่าน้อยกว่าที่ 293 และ 303 K แสดงว่าการดูดซับสารละลายฟีนอลของ 200%CEC-HDTMA-clay เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน



รูปที่ 4.26 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับฟีนอลของ 200%CEC-HDTMA-clay

4.2.4.5 การดูดซับแนฟธาลินที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับแนฟธาลิน โดยใช้ 150%CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ จากรูปที่ 4.27 จะเห็นว่าความสามารถในการดูดซับแนฟธาลินของ 150%CEC-HDTMA-clay ลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แสดงว่าการดูดซับแนฟธาลินของ 150%CEC-HDTMA-clay เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และความสามารถในการดูดซับแนฟธาลินของ 150%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถคำนวณได้จาก Langmuir Adsorption Isotherm ดังแสดงในตารางที่ 4.14 ปริมาณการดูดซับแนฟธาลินจะมีปริมาณมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง



รูปที่ 4.27 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับแนฟธาลินของ 150%CEC HDTMA-clay

ตารางที่ 4.14 ความสามารถในการดูดซับแนฟธาลินของ 150%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (K)	ปริมาณแนฟธาลินสูงสุดบนตัวดูดซับ, mg g^{-1}	R^2
288	35.59	0.9816
303	33.12	0.9429
313	30.58	0.8539

4.3 ความสามารถของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับสารอินทรีย์ในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

จากการศึกษาความสามารถของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์และ Organo-clays ในการทดลองแบบกะซึ่งศึกษาก่อนหน้านี้ พบว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์และ Organo-clays ชนิดต่างๆมีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ได้มากน้อยแตกต่างกัน แต่โดยส่วนใหญ่แล้ว 100%CEC-BDHDMA-clay มีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์จากน้ำได้ดีกว่าการดูดซับเมธิลินบลู แม้ว่าการดูดซับสารอินทรีย์ด้วย Organo-clays ชนิดอื่นจะดูดซับได้ดีกว่า เช่น 200%CEC- (TDMA-clay หรือ HDTMA-clay) แต่จากการศึกษาก่อนหน้านี้ที่พบว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของตัวดูดซับเหล่านี้ไม่ถึง 100% ทำให้สิ้นเปลืองสาร QACs ที่นำมาปรับปรุงคุณสมบัติ และความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ระหว่าง 100%CEC-BDHDMA-clay และ Organo-clays เหล่านี้ไม่ได้แตกต่างกันมาก จึงเลือก 100%CEC-BDHDMA-clay ในการทดลองในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง ส่วนเมธิลินบลูใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

4.3.1 ศึกษาการซึมผ่านทรายผสมตัวดูดซับของน้ำ

ค่าการซึมผ่านทรายผสมตัวดูดซับของน้ำสามารถหาได้จากสมการ

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\Delta P}{R_b + R_s} \quad (4.1)$$

เมื่อ ΔP คือความดันที่เปลี่ยนไป = ρgh

R_b คือความต้านทานของเบดนิ่ง = $\mu d / K$

R_s คือความต้านทานของตัวรองรับ

K คือค่าการซึมผ่านของเบดนิ่ง

d คือความหนาของเบดนิ่ง

μ คือค่าความหนืดของน้ำ

h คือความสูงของน้ำเหนือตัวรองรับ

t คือเวลาที่แต่ละความสูงของน้ำเหนือเบดนิ่ง

กำหนดให้สภาวะเริ่มต้นคือ

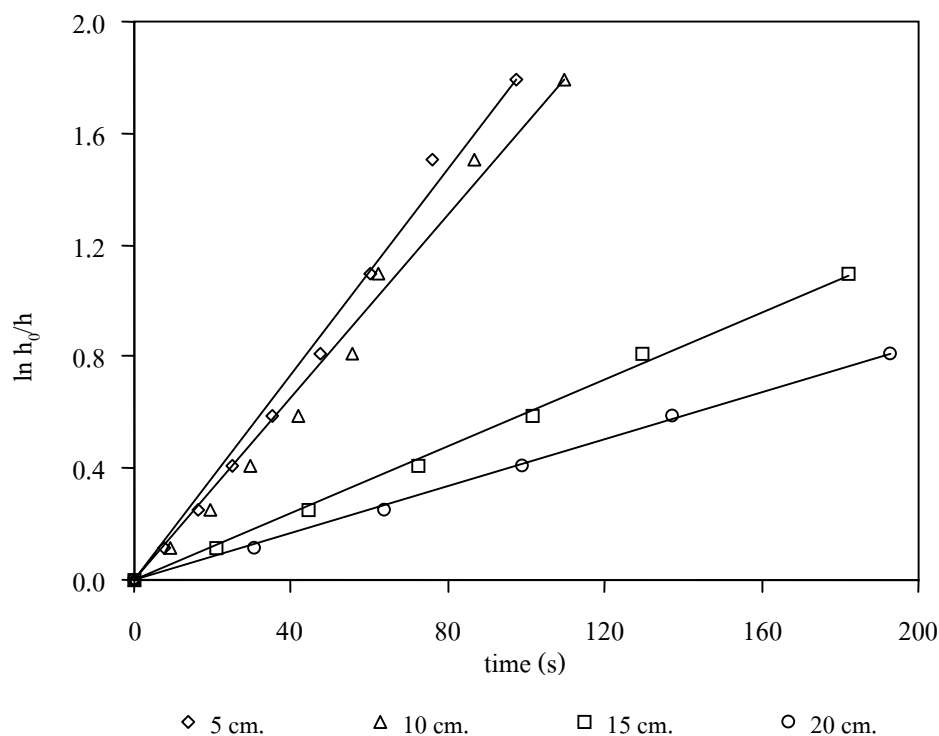
$$h = h_0 \quad \text{เมื่อ} \quad t = 0$$

$$h = h \quad \text{เมื่อ} \quad t = t$$

ดังนั้น

$$\ln \frac{h_0}{h} = \frac{\rho gh}{R_s + \frac{\mu d}{K}} \quad (4.2)$$

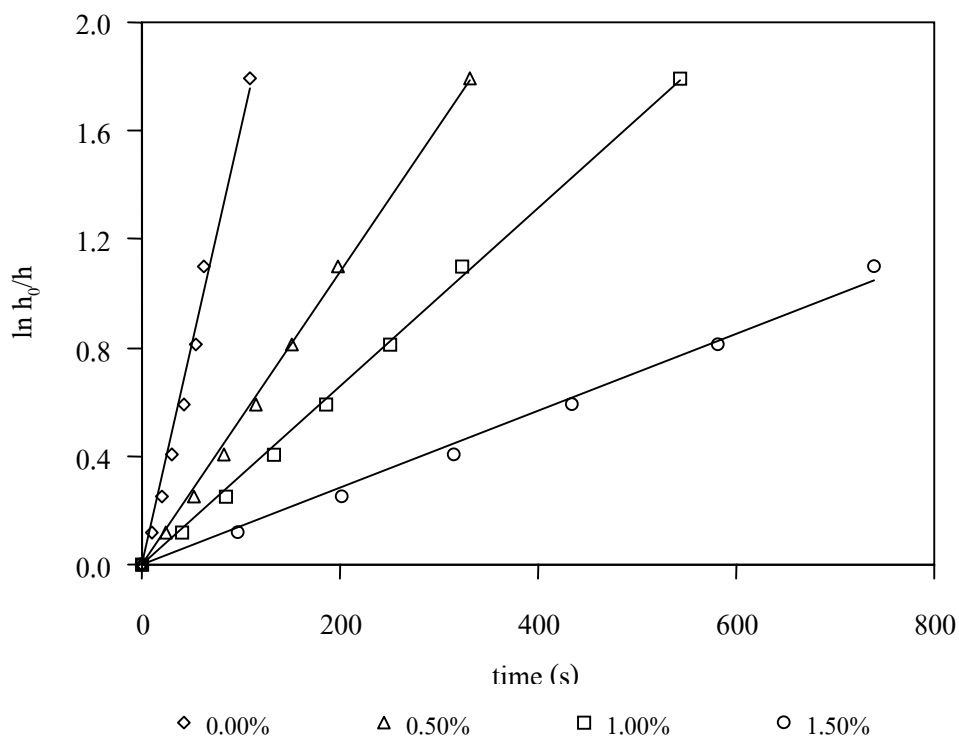
เมื่อพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln h_0/h$ กับเวลา สามารถหาค่าการซึมผ่านของเบดนิ่งได้ ดังรูปที่ 4.28 และตารางที่ 4.15 เมื่อความสูงของเบดนิ่งสูงขึ้นค่าการซึมผ่านของเบดนิ่งมีค่าน้อยลง และเมื่อเพิ่มปริมาณแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (%wt) ค่าการซึมผ่านของเบดนิ่งมีค่าน้อยลงเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 4.29 และตารางที่ 4.16



รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln h_0/h$ กับเวลา ที่ความสูงของเบดนิ่งต่างกัน

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าการซึมผ่านทรายของน้ำที่ความสูงของเบดนิ่งต่างกัน

ความสูงของเบดนิ่ง (cm.)	ค่าการซึมผ่านของเบดนิ่ง (m^2)
5	$0.9132 \cdot 10^{-10}$
10	$1.2107 \cdot 10^{-10}$
15	$0.8816 \cdot 10^{-10}$
20	$0.8212 \cdot 10^{-10}$



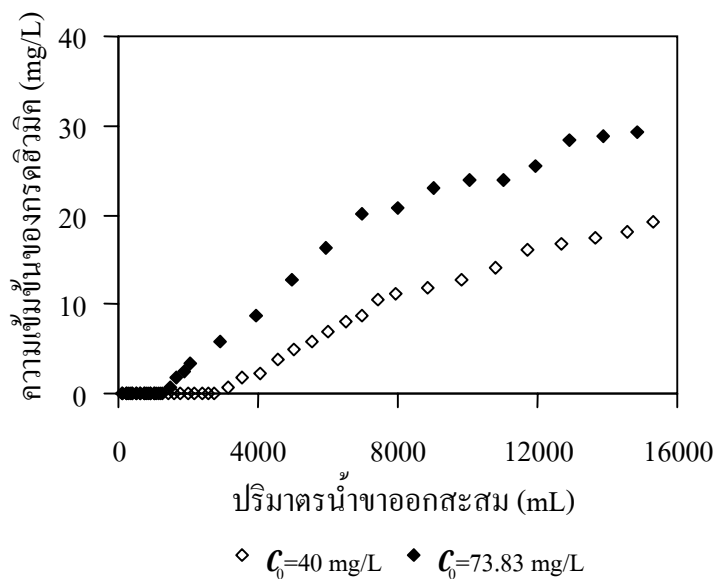
รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln h_0/h$ กับเวลาที่ %wt ของแร็ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่างกัน ที่ความสูงเบคหนึ่ง 10 cm.

ตารางที่ 4.16 แสดงค่าการซึมผ่านทรายผสมแร็ดินมอนต์มอริลโลไนต์ของน้ำ ที่ความสูงเบคหนึ่ง 10 cm.

%wt ของแร็ดินมอนต์มอริลโลไนต์	ค่าการซึมผ่านของน้ำ (m^2)
0.0	$1.2107 \cdot 10^{-10}$
0.5	$0.5286 \cdot 10^{-10}$
1.0	$0.3223 \cdot 10^{-10}$
1.5	$0.1365 \cdot 10^{-10}$

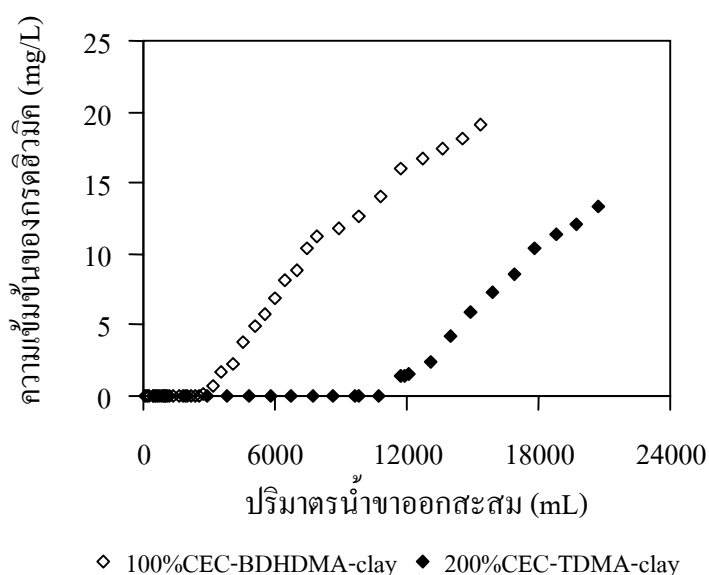
4.3.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับในระบบหอดูดซับ

จากรูปที่ 4.30 เมื่อศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายกรดฮิวมิกที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับในระบบหอดูดซับโดยใช้ 100%CEC-BDHDMA-clay เป็นตัวดูดซับ ที่สภาวะการทดลองใช้ปริมาณตัวดูดซับ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวดูดซับทั้งหมดโดยที่เกลือเป็นทรายควอซ (%wt) ความสูงของเบดนิ่ง (h) 20 cm. และที่อัตราการไหลของสารละลายกรดฮิวมิก (Q_b) 9.7 mL/min พบว่าปริมาตรที่จุดเบรคทลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายกรดฮิวมิก 40 mg/L และ 73.83 mg/L มีค่าเท่ากับ 4060.5 mL และ 1873 mL ตามลำดับ กำหนดให้ค่าความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่จุดเบรคทลูมีค่าเท่ากับ 2.5 mg/L ตามมาตรฐานของประเทศเชคโกสโลวาเกียที่กำหนดค่าสูงสุดที่ยอมให้มีการปนเปื้อนของสารฮิวมิกในน้ำดิบได้ต้องมีค่าไม่เกิน 2.5 mg/L เนื่องจากในประเทศไทยยังไม่มีข้อกำหนดมาตรฐานความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่ปนเปื้อนในน้ำ หลังจากจุดนี้ไปความเข้มข้นของกรดฮิวมิกจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ



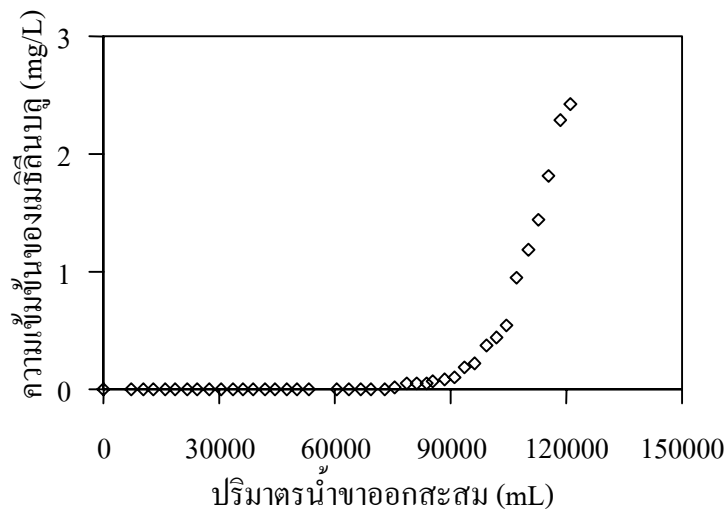
รูปที่ 4.30 กราฟเบรคทลูของกรดฮิวมิกโดยใช้ 100%CEC-BDHDMA-clay เป็นตัวดูดซับ ที่ 5%wt
h=20 cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min

เมื่อศึกษาความสามารถของ 100%CEC-BDHDMA-clay และ 200%CEC-TDMA-clay ในการดูดซับกรดฮิวมิกในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่งโดยทำการทดลองที่สภาวะการทดลอง 5%wt $C_0=40$ mg/L $h=20$ cm และ $Q_b=9.7$ mL/min พบว่าปริมาตรที่จุดเบรคทรูของ 100%CEC-BDHDMA-clay และ 200%CEC-TDMA-clay มีค่าเท่ากับ 4060.5 และ 13047.5 mL ตามลำดับดังรูปที่ 4.31 จะเห็นว่า 200%CEC-TDMA-clay มีความสามารถในการกำจัดกรดฮิวมิกได้ดีกว่า 100%CEC-BDHDMA-clay ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองแบบกะที่ศึกษาก่อนหน้านี้

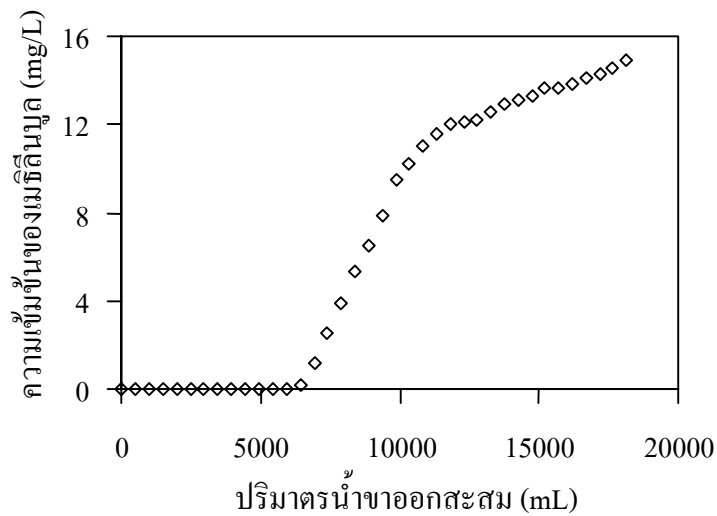


รูปที่ 4.31 กราฟเบรคทรูของกรดฮิวมิก ที่ 5%wt $C_0=40$ mg/L $h=20$ cm และ $Q_b=9.7$ mL/min

จากรูปที่ 4.32 และ 4.33 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมธิลีนบลู โดยใช้เรดิโนมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับที่สภาวะการทดลองเมื่อใช้ตัวดูดซับ 2%wt $h=20$ cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min พบว่าที่ $C_0=2.5$ mg/L ปริมาตรที่จุดเบรคทรูมีค่าเท่ากับ 93680 mL และ $C_0=15$ mg/L มีปริมาตรเท่ากับ 6918 mL โดยกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของสารละลายเมธิลีนบลูที่จุดเบรคทรูมีค่าเท่ากับ $0.05C_0$ หลังจากจุดนี้ไปความเข้มข้นของเมธิลีนบลูจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ลักษณะของกราฟเบรคทรูจะมีลักษณะคล้ายตัวเอส

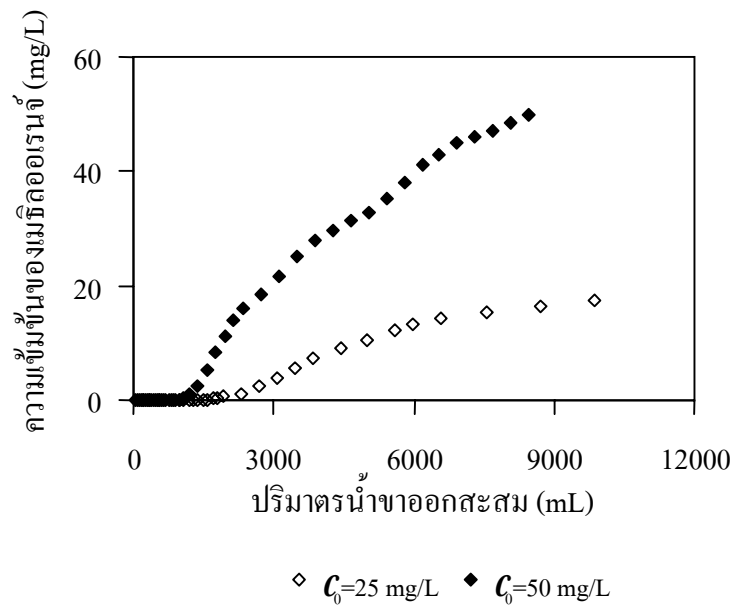


รูปที่ 4.32 กราฟเบรคทรูของเมธิลโบลู โดยใช้เร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ ที่ 2%wt $C_0=2.5$ mg/L $h=20$ cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min



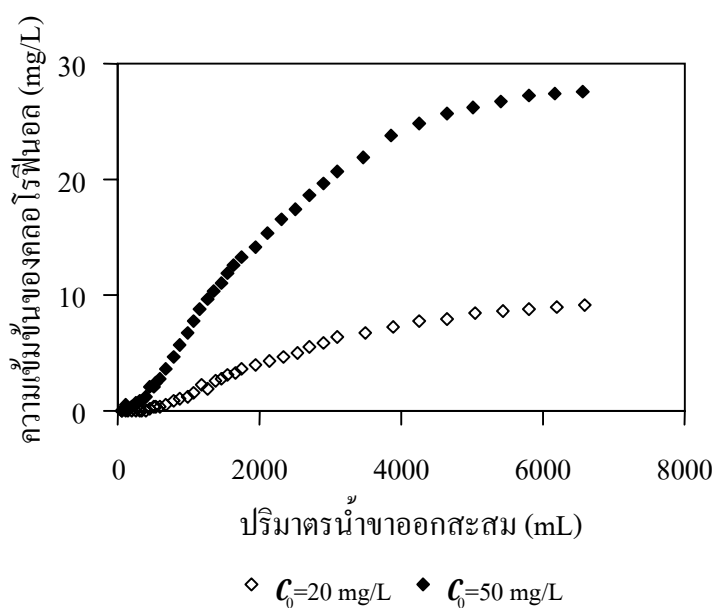
รูปที่ 4.33 กราฟเบรคทรูของเมธิลโบลู โดยใช้เร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ ที่ 2%wt $C_0=15$ mg/L $h=20$ cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min

จากรูปที่ 4.34 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมธิลออเรนจ์โดยใช้ 100%CEC-BDHDMA-clay เป็นตัวดูดซับที่สภาวะการทดลองเมื่อใช้ตัวดูดซับ 5%wt $h=20$ cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min พบว่าปริมาตรที่จุดเบรคทรูเมื่อ $C_0=25$ และ 50 mg/L มีค่าเท่ากับ 2291 และ 1380 mL ตามลำดับ กำหนดให้ค่าความเข้มข้นของเมธิลออเรนจ์ที่จุดเบรคทรูมีค่าเท่ากับ $0.05C_0$ หลังจากจุดนี้ไปความเข้มข้นของเมธิลออเรนจ์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ



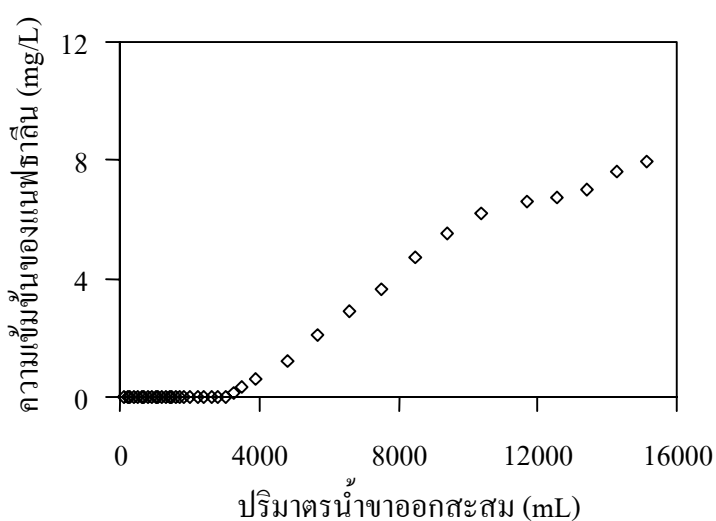
รูปที่ 4.34 กราฟเบรคทรูของเมธิลออเรนจ์โดยใช้ 100%CEC-BDHDMA-clay เป็นตัวดูดซับ ที่ 5%wt $h=20$ cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min

จากรูปที่ 4.35 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 3-คลอโรฟีนอล โดยใช้ 100%CEC-BDHDMA-clay เป็นตัวดูดซับที่สภาวะการทดลองเมื่อใช้ตัวดูดซับ 5%wt h=20 cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min พบว่าปริมาณที่จุดเบรคทรูเมื่อ $C_0=20$ และ 50 mg/L มีค่าเท่ากับ 881 และ 349 mL ตามลำดับ กำหนดให้ค่าความเข้มข้นของ 3-คลอโรฟีนอลที่จุดเบรคทรูมีค่าเท่ากับ 1 mg/L เนื่องจากตามกฎหมายสิ่งแวดล้อมของประเทศไทยกำหนดให้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในน้ำได้ไม่เกิน 1 mg/L หลังจากจุดนี้ไปความเข้มข้นของ 3-คลอโรฟีนอลจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ



รูปที่ 4.35 กราฟเบรคทรูของ 3-คลอโรฟีนอลโดยใช้ 100%CEC-BDHDMA-clay เป็นตัวดูดซับ ที่ 5%wt h=20 cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min

เมื่อศึกษาความสามารถของ 100%CEC-BDHDMA-clay ในการดูดซับแนฟธาลิน ในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่งที่สภาวะการทดลองเมื่อใช้ตัวดูดซับ 5%wt $C_0=30$ mg/L $h=20$ cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min พบว่าปริมาตรที่จุดเบรคทรมีค่าเท่ากับ 3917 mL ดังรูปที่ 4.36 กำหนดให้ค่าความเข้มข้นของแนฟธาลินที่จุดเบรคทรมีค่าเท่ากับ 1 mg/L เนื่องจากตามกฎหมายสิ่งแวดล้อม กำหนดให้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในน้ำได้ไม่เกิน 1 mg/L



รูปที่ 4.36 กราฟเบรคทรมีของแนฟธาลินโดยใช้ 100%CEC-BDHDMA-clay เป็นตัวดูดซับ ที่ 5%wt $C_0=30$ mg/L $h=20$ cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min

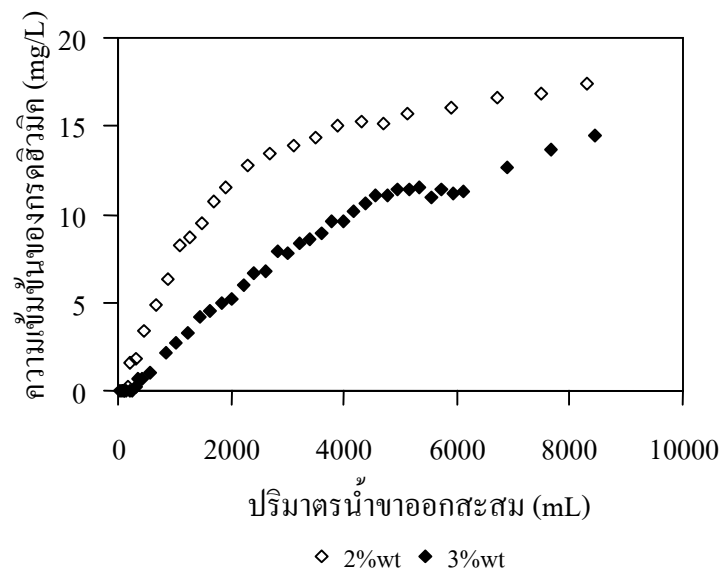
จากการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลายอินทรีย์ พบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาตรที่จุดเบรคทรมูลค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาสัมผัสระหว่างสารละลายอินทรีย์กับตัวดูดซับ พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอินทรีย์ต่ำจะมีระยะเวลาสัมผัสระหว่างสารละลายอินทรีย์กับตัวดูดซับมากกว่า ดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ระยะเวลาสัมผัสระหว่างสารละลายอินทรีย์กับตัวดูดซับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอินทรีย์ต่างกัน

ชนิดของสารละลาย	ชนิดของตัวดูดซับ	C_0 , mgL ⁻¹	ปริมาตรที่จุดเบรคทรมูล, mL	ระยะเวลาในการสัมผัส, minLmg ⁻¹
กรดฮิวมิก	100%CEC-BDHDMA-clay	40	4060.5	0.0920
		73.8	1873.0	0.0488
	200%CEC-TDMA-clay	40	13047.5	0.0928
เมธิลีนบลู	แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ	2.5	93680.0	1.5146
		15	6918.0	0.2402
เมธิลออเรนจ์	100%CEC-BDHDMA-clay	25	2291.0	0.1443
		50	1380.0	0.0734
3-คลอโรฟีนอล	100%CEC-BDHDMA-clay	20	881.0	0.1826
		50	349.0	0.0732
แนฟทาลีน	100%CEC-BDHDMA-clay	30	3917.0	0.1134

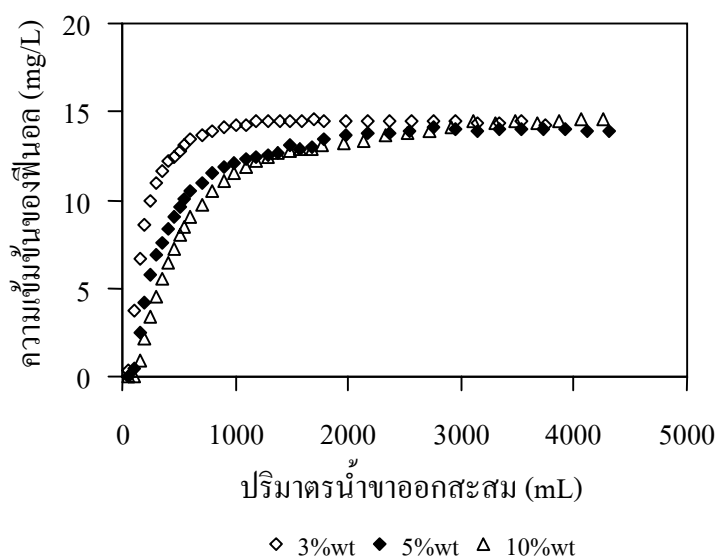
4.3.3 ศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

จากรูปที่ 4.37 ศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิก โดยทำการทดลองที่สภาวะ $C_0=40$ mg/L $h=10$ cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min พบว่าเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกได้มากกว่าดังนี้ 3%wt > 2%wt และปริมาตรที่จุดเบรคทรูของ 3%wt และ 2%wt มีค่าตามลำดับดังนี้คือ 1036.5 และ 334 mL



รูปที่ 4.37 กราฟเบรคทรูของกรดฮิวมิกโดยใช้ 100%CEC-BDHDMA-clay ที่ $C_0=40$ mg/L $h=10$ cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min

จากรูปที่ 4.38 จากการดูดซับฟีนอลโดยใช้ปริมาณของตัวดูดซับแตกต่างกันที่สภาวะการทดลอง $C_0=15$ mg/L $h=20$ cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min พบว่าเมื่อปริมาณตัวดูดซับมากขึ้นความสามารถในการกำจัดฟีนอลจากน้ำจะมากขึ้น ที่ปริมาณตัวดูดซับเป็น 10%wt ระบบมีความสามารถในการกำจัดฟีนอลจากน้ำได้มากกว่าเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับ 5%wt และ 3%wt แต่จากผลการทดลองพบว่าในการทดลองแบบเบดนิ่งการดูดซับฟีนอลด้วย 100%CEC-BDHDMA-clay สามารถดูดซับได้น้อยมากซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองแบบกะที่ความสามารถในการกำจัดฟีนอลสามารถกำจัดได้น้อย



รูปที่ 4.38 กราฟเบรคทรูของฟีนอลโดยใช้ 100%CEC-BDHDMA-clay ที่ $C_0=15$ mg/L $h=20$ cm. และ $Q_b=9.7$ mL/min

จากการศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน พบว่าเมื่อใช้ตัวดูดซับที่มีปริมาณมากขึ้นความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์จากน้ำจะมีค่ามากขึ้น ปริมาตรที่จุดเบรคทรมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาสัมผัสระหว่างสารละลายอินทรีย์กับตัวดูดซับพบว่าปริมาณตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อระยะเวลาสัมผัสระหว่างสารละลายอินทรีย์กับตัวดูดซับดังตารางที่ 4.18 แต่เมื่อมีปริมาณมากขึ้นความสามารถในการดูดซับสารจึงมีมากขึ้น

ตารางที่ 4.18 ระยะเวลาสัมผัสระหว่างสารละลายอินทรีย์กับตัวดูดซับ ที่ปริมาณตัวดูดซับต่างกัน

ชนิดของสารละลาย	ชนิดของตัวดูดซับ	%wt	ปริมาตรที่จุดเบรคทรู, mL	ระยะเวลาในการสัมผัส, minLmg ⁻¹
กรดฮิวมิก	100%CEC-BDHDMA-clay	2	334.0	0.0911
		3	1036.5	0.0911
ฟีนอล	100%CEC-BDHDMA-clay	3	0.0	0.2429
		5	0.0	0.2429
		10	0.0	0.2429

เมื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการดูดซับสารละลายอินทรีย์ในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง พบว่าขึ้นกับคุณสมบัติของสารอินทรีย์ และสภาวะที่ใช้ในการทดลอง สารอินทรีย์ที่มีค่าการละลายในน้ำ (Solubility) สูง เช่น ฟีนอล (8.28×10^4 mg/L ที่ 25 °C) ในการทดลองแบบเบดนิ่งไม่สามารถที่จะดูดซับได้ ซึ่งแตกต่างจาก 3-คลอโรฟีนอลที่มีค่าการละลายในน้ำต่ำกว่า (2.6×10^4 mg/L ที่ 25 °C) ทำให้สามารถดูดซับได้ดีกว่า และเมื่อสภาวะในการดูดซับแตกต่างกันความสามารถในการดูดซับที่ได้จะแตกต่างกัน เช่น ที่ความเข้มข้น และอัตราการไหลต่ำ ความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากระยะเวลาในการดูดซับนานขึ้น

จากตารางที่ 4.19 มีความเป็นไปได้ในการดูดซับสารอินทรีย์ด้วยระบบหอดูดซับแบบเบคคิงจะเห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองแบบกะจะอยู่ในช่วง 50-80% ขึ้นอยู่กับสภาวะการทดลองและพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์ต่ำประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์เทียบกับการทดลองแบบกะจะมีค่าสูงกว่าที่ความเข้มข้นสูง

ตารางที่ 4.19 เปรียบเทียบปริมาณสารอินทรีย์บนตัวดูดซับในการทดลองแบบกะและเบคคิง

สารละลาย	C_0 , mg/L	h, cm.	%wt	แบบกะ, mg/g	แบบเบคคิง, mg/g	ประสิทธิภาพ (%)
กรดฮิวมิก	40	10	2	833.33	640.87	70.90
เมธิลีนบลู	2.5	20	2	322.60	253.53	78.59
	15	20	2		138.38	42.90
เมธิลออเรนจ์	25	20	5	126.58	70.32	55.55
	50	20	5		69.39	54.82

หมายเหตุ ในการดูดซับกรดฮิวมิกและเมธิลออเรนจ์ใช้ 100%CEC-BDHDMA-clay เป็นตัวดูดซับ ส่วนในการดูดซับเมธิลีนบลูใช้แร่ดินมอนต์มอริล โคลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการปรับปรุงคุณสมบัติแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติด้วยสารลดแรงตึงผิวประเภท QACs ซึ่งเป็นสารที่มีประจุบวก ทำให้ลักษณะพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเปลี่ยนไปจากชอบน้ำเป็นชอบสารอินทรีย์ และทำให้ลักษณะทางกายภาพเปลี่ยนไป เช่น พื้นที่ผิว ระยะห่างระหว่างชั้นโครงสร้าง ขนาดของอนุภาค และขนาดรูพรุน ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์

จากการทดลองเพื่อลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และ Organo-clays เป็นตัวดูดซับ พบว่าตัวดูดซับทั้งสองชนิดมีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ได้ และส่วนใหญ่ Organo-clays (ที่ถูกปรับปรุงด้วย QACs ที่มีแขนของหมู่อัลคิลยาว) สามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้มากกว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

นอกจากนี้ความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และ Organo-clays ขึ้นอยู่กับ ชนิดของสารอินทรีย์ อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่างของระบบ เช่น การดูดซับเมธิลีนบลูโดยใช้ Organo-clays เป็นตัวดูดซับ จะเกิดได้ดีเมื่อสถานะของระบบเป็นด่าง แต่การดูดซับกรดฮิวมิกเมื่อใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ และการดูดซับฟีนอลเมื่อใช้ Organo-clays เป็นตัวดูดซับ จะเกิดการดูดซับได้ดีเมื่อสถานะของระบบเป็นกรด และจากผลการทดลองส่วนใหญ่พบว่า การดูดซับจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิของระบบต่ำ แสดงว่า การดูดซับสารอินทรีย์ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและ Organo-clays เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน นอกจากนี้ยังพบว่า Organo-clays สามารถดูดซับสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ เช่น แนฟธาลิน ได้ดีกว่าสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง เช่น ฟีนอล

จากการทดลองนำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและ Organo-clays ไปดูดซับสารอินทรีย์ในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ขึ้นอยู่กับสถานะการทดลอง เช่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย ความสูงของตัวดูดซับ ปริมาณตัวดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์ เป็นต้น ประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และ Organo-clays จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อระยะเวลาสัมผัสระหว่างสารอินทรีย์กับตัวดูดซับมีค่ามาก คือ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่ำ และปริมาณตัวดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์มีค่ามาก

5.2 ข้อจำกัดของการวิจัย

5.2.1 ปี้มที่ใช้ในการทดลองไม่สามารถกำหนดที่อัตราการไหลต่างๆได้ ทำให้ไม่สามารถหาผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ได้

5.2.2 การทดลองในระบบหอดูดซับแบบเบตนี้ระยะเวลาในการทดลองจะใช้เวลาานานทำให้มีข้อจำกัดในการเก็บรวบรวมสารตัวอย่าง

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยต่อไป

5.3.1 ศึกษาความสามารถของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และ Organo-clays ในการดูดซับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ

5.3.2 ศึกษาเพิ่มเติมกระบวนการดูดซับสารอินทรีย์ด้วยแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และ Organo-clays เพื่อให้ใช้ได้ในระบบที่มีการไหลของน้ำ (Flow System) เช่น ในระบบหอดูดซับ เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมจริงได้

เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงอุตสาหกรรม. (2539). ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 เรื่องกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2536). วิศวกรรมการประปา. กรุงเทพมหานคร: มิตรนราการพิมพ์.
- จุมพล คีนตัก, ชงชัย พึ่งรัมย์ และ พิภพ วสุวานิช. (2521). ดิน (Clays). เอกสารเศรษฐธรณีวิทยา เล่มที่ 19. กรุงเทพมหานคร: กองเศรษฐธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี.
- ปรีดา จิตขาว และ บุญญาแสง แสงคำมี. (2541). การเปรียบเทียบค่าปริมาณการดูดติดฟีนอลต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วยวิธี **Batch Type Adsorption** กับวิธี **Fixed Bed Adsorption Column Test**. icoรงงานปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ปิยรัตน์ สารวงษ์. (2545). การกำจัดกรดอิมิกในน้ำดิบเพื่อการผลิตน้ำประปาโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโคโคแซนและเบนโตไนด์. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- มันสิน ตัณฑุสวณ. (2538). วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุชาติ ชินะจิตร. (2545). พิษภัยใกล้ตัว. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย.
- วารสารสิ่งแวดล้อม. (2537). 11. 36.
- อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์, กอบบุญ หล่อทองคำ, ไชยยันต์ ไชยยะ, ณัฐ งามเจตธรรมย์ และ ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ. (2540). การดูดซับสีข้อมผ้าในน้ำด้วยถ่านคาร์บอนกัมมันต์ประเภทต่างๆ. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 7. เชียงใหม่: ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- Albanis, T.A., Danis, T.G. and Pomonis, P.J. (1997). Separation of chlorophenols using columns of hydroxylaluminium interlayered clays. **Clays Minerals**. 32. 143-147.
- Amin, S. and Jayson, G.G. (1996). Humic substance uptake by Hydrotalcites and PILCs. **Water Research**. 30. 299-306.
- Caine, M., Dyer, G., Holder, J.V., Osborne, W.A. Matear, McCabe, R.W., Mobbs, D., Richardson, S. and Wang, L. (1999). The use of clays as sorbents and catalyst. In P. Misaelides, F. Macasek, T.J. Pinnavaia and C. Colella (ed.). **Natural Microporous Materials in Environmental Technology** (pp 49-69). Netherlands: Kluwer Academic Publisher.

- Chern, J. and Chien, Y. (2002). Adsorption of nitrophenol onto activated carbon: isotherms and Breakthrough curves. **Water Research**. 36. 647-655.
- Davies, G. and Ghabbour, E.A. (1999). Understanding life after death. **Chemistry & Industry, Society of Chemical Industry**. 11. 426-430.
- Dentel, S.K., (1996). **Use of Organo-clays Adsorbent Materials for Groundwater Treatment Applications**. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Delaware. Newark.
- Dentel, S.K., Jamrah, A.L. and Sparks, D.L. (1998). Sorption and co-sorption of 1-2-4-trichlorobenzene and tannic acid by organo-clays. **Water Research**. 32. 3689-3697.
- El-Shafy, M.ABD and Grünwald, A. (2000). TMA formation in water South Bohemia, Czech Republic. **Water Research**. 34. 3453-3459.
- Fitch, A. and Du, J. (1996). Solute Transport in Clay Media: Effect of Humic Acid. **Environmental Science and Technology**. 30. 12-15.
- Gitipour, S., Bowers, M.T. and Bodocsi, A. (1997). The use of modified Bentonite for removal of aromatic organics from contaminated soil. **Journal of Colloid and Interface Science**. 196. 191-198.
- Gjessing, E.T. (1979). **Physical and Chemical Characteristic of Aquatic Humus**. Michigan: Ann Arbor Science Publisher Inc.
- Goswai, A.N., Sharma, S.K., Nanoti, A., Gupta, T.C.S.M and Rawat, B.S (1994). Removal of benzene from Hexane cut by liquid phase adsorption on activated carbon. **Separation Process Technology Proceeding**. 11. 229-241.
- Gregg, S.J. and Sing, S.K.W., (1967). **Adsorption, Surface Area and Porosity**. London and New York: Academic Press
- Ho, Y.S. and Ching, C.C. (2001). Sorption studies of acid dye by mixed sorbents. **Adsorption**. 7. 139-147.
- Ho, Y.S. and McKay, G. (2000). The kinetics of sorption of divalent metal ions onto sphagnum moss peat. **Water Research**. 34. 735-742.
- Kulladapu, R.K. and Boyd, S.A. (1995). Tetramethylphosphonium- and Tetramethylamethyl ammonium- Smectite as adsorbents of aromatic and chlorinated hydrocarbons: Effect of water on adsorption efficiency. **Clay and Clay Minerals**. 43. 318-323.

- Lee, S.Y., and Kim, S.J. (2002). Adsorption of naphthalene by HDTMA modified kaolinite and halloysite. **Applied Clay Science**. 22. 55-63.
- McCabe, W.L., Smith, J.C. and Harriott, P. (1993). **Adsorption; Operation of Chemical Engineering**. Mc-Graw Hill. 810-835.
- McKay, G. (1996). **Use of Adsorbent for the Removal of Pollutants from Wastewaters**. CRC Press Inc., New York.
- Michot, L.J. and Pinnavaia, T.J. (1991). Adsorption of chlorinated phenols from aqueous solution by surfactant-modified pillared clays. **Clays and Clay Minerals**. 39. (6) . 634-641.
- Narkis, N. and Rebhun, M. (1975). The mechanism of flocculation process in the presence of humic substance. **Journal of American Water Works Association**. 71. (10). 588-603.
- Nzengung, V.A., Voudrias, E.A., Nkedi-kizza, P., Wampler, J.M. and Weaver, C.E. (1996). Organic co-solvent effects on sorption equilibrium of hydrophobic organic chemicals by organoclays. **Environmental Science and Technology**. 30. 89-96.
- Rouqurol, F., Rouqurol, J. and Sing, K. (1999). **Adsorption by Powders and Porous Solids**. London: Academic Press.
- Sanchez-Camazano, M. and Sanchez-Martin, M.J. (1994). Organo-clays as adsorbents for azinphosmethyl and dichlorvos in aqueous medium. *Water, Air and Soil Pollution* 74. 19-28.**
- Schnitzer, M. and Khan, S.U. (1972). **Humic Substances in the Environment**. Marcel Dekker Inc., New York. 253-279.
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L. and Stensel, H.D., (2003). **Waste Water Engineering Treatment and Reuse**. 4. New York. Mc-Graw Hill. 1146-1155.
- Vansant, E.F. (1994). Inorganic Porous Material. **Separation Process Technology Proceeding**. 11. 229-241.
- Wibulswas, R. (1999). **Removal of Organic Compounds from Water using Modified Montmorillonite**. PhD thesis, Imperial College of Science Technology & Medicine, University of London.
- Wibulswas, R., White, D.A. and Rautiu, R. (1999). Adsorption of Phenolic Compounds from Water by Surfactant-modified Pillared Clays. **ICHEME**. 77. Part B. 88-92.

Wu, F., Tseng, R. and Juang, R. (2001). Kinetic modeling of liquid-phase adsorption of reaction dyes and metal ions on chitosan. **Water Research**. 35. 613-618.

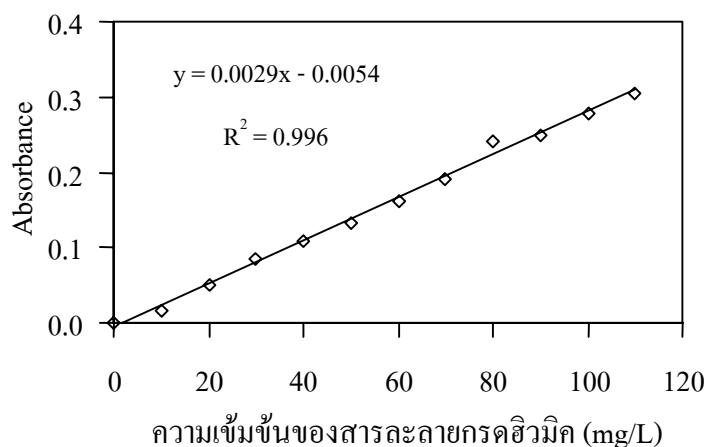
ภาคผนวก ก

กราฟมาตรฐาน

1. กราฟมาตรฐานของสารละลายกรดฮิวมิก

ตารางที่ ก1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกรดฮิวมิกกับค่า Absorbance

ความเข้มข้นของสารละลายกรดฮิวมิก (mg/L)	Absorbance	ความเข้มข้นของสารละลายกรดฮิวมิก (mg/L)	Absorbance
0	0.00016	60	0.16259
10	0.01695	70	0.19035
20	0.04918	80	0.24032
30	0.08570	90	0.24926
40	0.10756	100	0.27830
50	0.13331	110	0.30590

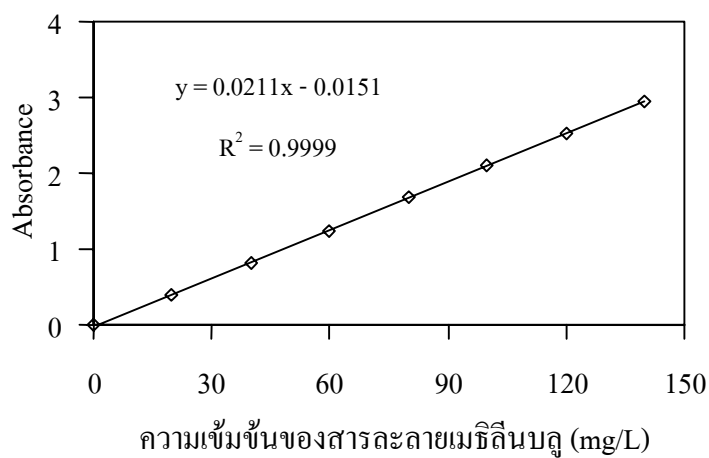


รูปที่ ก1 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกรดฮิวมิกกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 400 nm.

2. กราฟมาตรฐานของสารละลายเมธิลีนบลู

ตารางที่ ก2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมธิลีนบลู กับค่า Absorbance

ความเข้มข้นของสารละลายเมธิลีนบลู (mg/L)	Absorbance
0	0.0000
20	0.3997
40	0.8219
60	1.2470
80	1.6730
100	2.1003
120	2.5165
140	2.9480

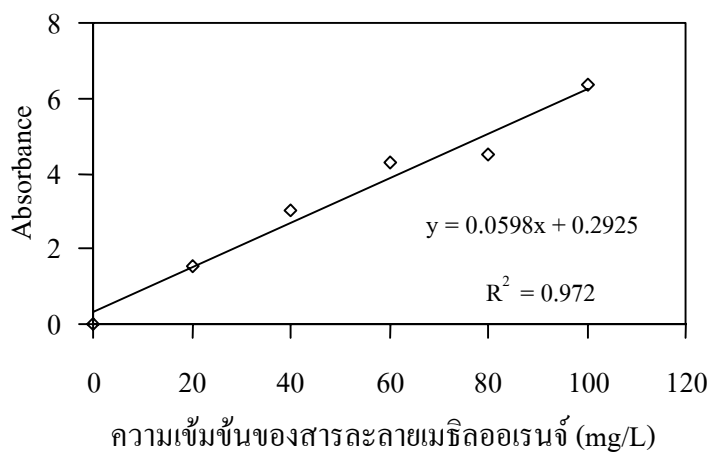


รูปที่ ก2 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมธิลีนบลู กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 698 nm.

3. กราฟมาตรฐานของสารละลายเมธิลออเรนจ์

ตารางที่ ก3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมธิลออเรนจ์ กับค่า Absorbance

ความเข้มข้นของสารละลายเมธิลออเรนจ์ (mg/L)	Absorbance
0	0.00000
20	1.54921
40	3.00201
60	4.30612
80	4.48928
100	6.34597

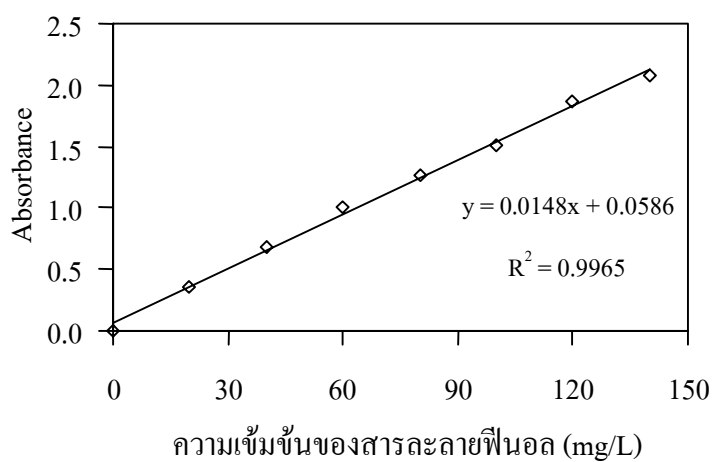


รูปที่ ก3 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมธิลออเรนจ์กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 463 nm.

4. กราฟมาตรฐานของสารละลายฟีนอล

ตารางที่ ก4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล กับค่า Absorbance

ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล (mg/L)	Absorbance
0	0.0000
20	0.3568
40	0.6758
60	1.0008
80	1.2678
100	1.5018
120	1.8675
140	2.0766

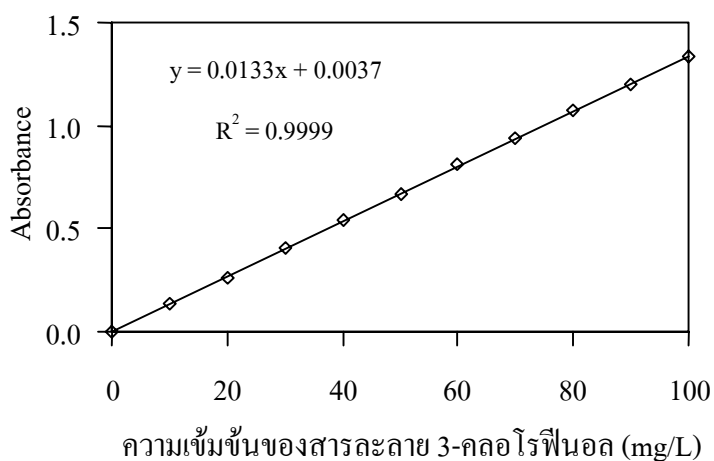


รูปที่ ก4 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 268.89 nm.

5. กราฟมาตรฐานของสารละลาย 3-คลอโรฟีนอล

ตารางที่ ก5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย 3-คลอโรฟีนอล กับค่า Absorbance

ความเข้มข้นของสารละลาย 3-คลอโรฟีนอล (mg/L)	Absorbance
0	0.0000
10	0.1396
20	0.2615
30	0.4065
40	0.5430
50	0.6714
60	0.8084
70	0.9397
80	1.0696
90	1.2034
100	1.3314

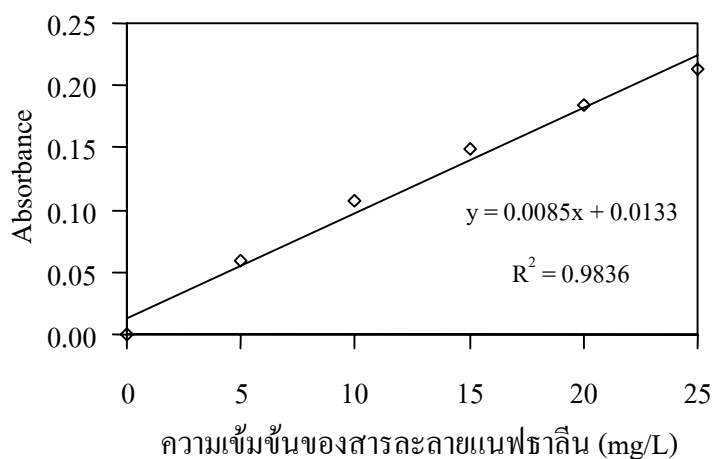


รูปที่ ก5 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย 3-คลอโรฟีนอลกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 277 nm.

6. กราฟมาตรฐานของสารละลายแอฟทาลีน

ตารางที่ 66 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแอฟทาลีน กับค่า Absorbance

ความเข้มข้นของสารละลายแอฟทาลีน (mg/L)	Absorbance
0	0.00000
5	0.05972
10	0.10798
15	0.14980
20	0.18402
25	0.21334



รูปที่ 66 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแอฟทาลีนกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 275 nm.

ภาคผนวก ข

ลักษณะทางกายภาพ

1. การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและ Organo-clays

ตารางที่ ข1 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

Relative Pressure (<i>pp</i>)	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)	Relative Pressure (<i>pp</i>)	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)
0.004225	9.230500	0.601009	21.780300
0.006248	9.941100	0.650945	22.666300
0.008235	10.397900	0.701167	23.691500
0.009968	10.683800	0.751080	24.945100
0.025715	12.052200	0.801025	26.609400
0.066029	13.291100	0.850701	28.999400
0.080077	13.645300	0.898250	32.861300
0.100478	14.088600	0.977283	56.964800
0.120574	14.481500	0.949773	50.148400
0.140620	14.844600	0.902098	42.485400
0.160720	15.187900	0.845399	37.333700
0.180875	15.512000	0.784888	33.670500
0.201039	15.816500	0.753492	32.189800
0.249875	16.544100	0.700918	30.168700
0.301590	17.295300	0.600122	27.233600
0.350692	18.019600	0.501267	24.882000
0.400760	18.769000	0.399628	18.326800
0.450911	19.511800	0.299862	16.764800
0.500944	20.251400	0.185926	15.035600
0.550999	21.000900	0.100805	13.508300

ตารางที่ ข2 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 100%CEC-TMA-clay

Relative Pressure (<i>pp</i>)	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)	Relative Pressure (<i>pp</i>)	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)
0.022407	18.335800	0.945455	42.942900
0.028767	19.526000	0.976428	51.546700
0.042811	20.185600	0.946580	48.306500
0.055476	20.620300	0.897587	44.849600
0.059466	20.914100	0.842426	42.447000
0.071849	21.285000	0.804553	41.226100
0.080863	21.506600	0.751400	39.865600
0.091813	21.738800	0.700969	38.776500
0.100817	21.843100	0.650495	37.844300
0.120473	22.213100	0.600725	36.989400
0.141464	22.578900	0.550871	36.101900
0.161711	22.906200	0.499843	35.266000
0.181757	23.222300	0.439195	28.034900
0.201606	23.512500	0.389769	27.441000
0.249921	24.128600	0.332977	26.913900
0.302390	24.723400	0.301235	26.603000
0.352652	25.268000	0.201744	25.520200
0.400770	25.779100	0.100113	24.093100
0.450982	26.304700	0.089383	23.806100
0.500958	26.834900	0.079287	23.618800
0.550994	27.409800	0.070814	23.451800
0.601401	28.013500	0.060466	23.216400
0.651027	28.701000	0.050251	22.960800
0.698732	30.053900	0.040530	22.650200
0.755927	31.191000	0.030941	22.121100
0.798331	32.303100	0.019025	21.518000
0.851122	34.139500	0.010499	20.821600

ตารางที่ ข3 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 200%CEC-TMA-clay

Relative Pressure (<i>pp</i>)	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)	Relative Pressure (<i>pp</i>)	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)
0.017203	23.006900	0.898804	42.704900
0.105250	26.069800	0.945838	49.267600
0.120797	26.459700	0.977112	58.648200
0.151189	27.080900	0.944253	54.834900
0.200844	27.899600	0.893795	51.113900
0.252001	28.660000	0.702801	44.588000
0.302345	29.325100	0.496393	39.948200
0.350277	29.935600	0.294390	30.530000
0.400425	30.553800	0.193409	29.224100
0.450536	31.144700	0.100160	27.594100
0.500477	31.744500	0.079403	27.125700
0.550508	32.382700	0.060307	26.626900
0.600631	33.068600	0.040516	25.974700
0.650570	33.837200	0.020184	24.954000
0.700607	34.734000	0.010117	24.059300
0.750460	35.837500	0.007632	23.705600
0.800421	37.275600	0.005978	23.393000
0.849934	39.332600		

ตารางที่ ข4 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 50%CEC-HDTMA-clay

Relative Pressure (<i>pp</i>)	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)	Relative Pressure (<i>pp</i>)	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)
0.066714	2.4650	0.891159	20.5899
0.070256	2.5062	0.846603	17.6021
0.075480	2.5616	0.806996	15.6650
0.080385	2.6079	0.751727	13.6188
0.085382	2.6541	0.701227	12.1885
0.090370	2.6978	0.651337	11.0299
0.095371	2.7393	0.600562	10.0533
0.100418	2.7797	0.550879	9.1876
0.149333	3.0906	0.500448	8.3659
0.200477	3.3900	0.447871	5.0694
0.250616	3.6624	0.398381	4.6432
0.300679	3.9451	0.332876	4.2031
0.350491	4.2430	0.300918	4.0006
0.400555	4.5655	0.250347	3.7080
0.450520	4.9202	0.200503	3.4290
0.500597	5.3056	0.150522	3.1285
0.550666	5.7220	0.100372	2.7882
0.600740	6.1749	0.090415	2.7016
0.650674	6.6871	0.080308	2.6127
0.700538	7.2975	0.070364	2.5170
0.750384	8.0864	0.060333	2.4105
0.800402	9.1749	0.050365	2.2884
0.849678	10.8415	0.040434	2.1412
0.898159	13.7736	0.030435	1.9423
0.954354	22.8417	0.020076	1.6218
0.977299	31.9166	0.009814	1.0593
0.952325	27.7735		

ตารางที่ ข5 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 100%CEC-HDTMA-clay

Relative Pressure (<i>pp</i>)	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)	Relative Pressure (<i>pp</i>)	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)
0.078176	1.7033	0.904001	17.5744
0.080342	1.7250	0.847614	14.1071
0.085506	1.7609	0.805381	12.2864
0.090501	1.7938	0.751153	10.4891
0.095365	1.8246	0.699891	9.1642
0.100315	1.8538	0.650981	8.1354
0.149287	2.0986	0.600731	7.2415
0.200182	2.3358	0.550608	6.4659
0.250198	2.5521	0.500584	5.7642
0.300347	2.7762	0.450258	3.5641
0.350307	3.0061	0.400503	3.2321
0.399979	3.2514	0.332457	2.8605
0.450017	3.5091	0.300813	2.6928
0.499918	3.7832	0.251013	2.4535
0.549810	4.0836	0.201004	2.2224
0.599799	4.4220	0.151078	1.9719
0.649676	4.8136	0.100875	1.6891
0.699468	5.2975	0.077781	1.5295
0.749371	5.9288	0.070379	1.4673
0.798995	6.8147	0.060270	1.3810
0.848465	8.1675	0.050427	1.2887
0.896481	10.5885	0.040396	1.1781
0.953169	18.1387	0.030369	1.0375
0.976297	26.0479	0.020510	0.8390
0.949226	22.2811	0.009830	0.4325

ตารางที่ ข6 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 200%CEC-HDTMA-clay

Relative Pressure (<i>pp</i>)	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)	Relative Pressure (<i>pp</i>)	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)
0.101224	0.398500	0.751827	2.239300
0.150402	0.465200	0.700230	1.853200
0.200353	0.529000	0.650246	1.572600
0.250605	0.569100	0.600253	1.342700
0.300399	0.610800	0.550165	1.153600
0.349941	0.650500	0.500222	0.976800
0.400354	0.692300	0.451324	0.638000
0.450362	0.729500	0.381465	0.571700
0.500246	0.772700	0.331169	0.524200
0.550277	0.818300	0.281149	0.471500
0.600268	0.869300	0.231125	0.424600
0.650214	0.930600	0.181119	0.370100
0.700101	1.009300	0.131115	0.305500
0.750077	1.118000	0.100338	0.254600
0.799978	1.276400	0.090303	0.235700
0.849763	1.547000	0.080214	0.210000
0.899117	2.098700	0.070220	0.195800
0.945903	3.642000	0.060488	0.171300
0.987632	10.425900	0.050296	0.144800
0.951900	6.875400	0.040380	0.114600
0.895040	4.471700	0.030114	0.075200
0.838203	3.266200	0.020396	0.025800
0.785067	2.571100		

ตารางที่ ข7 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 50%CEC-TDMA-clay

Relative Pressure (<i>pp</i>)	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)	Relative Pressure (<i>pp</i>)	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)
0.069508	2.3869	0.069508	34.4030
0.069508	2.4010	0.069508	26.2847
0.069508	2.4483	0.069508	22.0962
0.069508	2.4864	0.069508	18.9071
0.069508	2.5291	0.069508	16.2045
0.069508	2.5679	0.069508	14.2266
0.069508	2.6055	0.069508	12.6300
0.069508	2.6431	0.069508	11.2853
0.069508	2.9390	0.069508	10.1316
0.069508	3.2356	0.069508	8.9009
0.069508	3.4991	0.069508	4.7967
0.069508	3.7792	0.069508	4.3565
0.069508	4.0765	0.069508	3.8889
0.069508	4.4155	0.069508	3.6797
0.069508	4.7655	0.069508	3.3788
0.069508	5.1183	0.069508	3.1050
0.069508	5.5180	0.069508	2.8029
0.069508	5.9511	0.069508	2.4703
0.069508	6.4605	0.069508	2.2817
0.069508	7.0887	0.069508	2.1116
0.069508	7.9010	0.069508	2.1007
0.069508	9.0628	0.069508	1.9784
0.069508	10.8421	0.069508	1.7633
0.069508	13.9838	0.069508	1.6544
0.069508	25.6453	0.069508	1.3593
0.069508	43.5459	0.069508	0.8026

ตารางที่ ข8 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 100%CEC-TDMA-clay

Relative Pressure (<i>pp</i>)	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)	Relative Pressure (<i>pp</i>)	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)
0.079169	1.4578	0.907233	15.1422
0.080443	1.4723	0.847694	12.1140
0.085551	1.5030	0.791206	10.3192
0.090587	1.5305	0.754867	9.4365
0.095604	1.5577	0.702012	8.4078
0.100433	1.5820	0.651661	7.5901
0.149854	1.7740	0.600496	6.8975
0.200520	1.9619	0.550686	6.2872
0.250608	2.1301	0.500696	5.6700
0.300244	2.3054	0.448590	3.0402
0.350748	2.4916	0.399106	2.7407
0.400653	2.6894	0.332148	2.4403
0.450684	2.8994	0.300892	2.3024
0.500652	3.1178	0.249843	2.1054
0.550605	3.3753	0.200461	1.9312
0.600993	3.6340	0.150670	1.7314
0.650647	3.9111	0.100578	1.5154
0.700527	4.2765	0.090619	1.4606
0.750843	4.7585	0.069180	1.3387
0.800626	5.4258	0.060479	1.2767
0.850177	6.4491	0.050246	1.1995
0.898967	8.2785	0.040409	1.1120
0.944591	12.2988	0.030325	0.9973
0.986132	24.9776	0.020480	0.8220
0.957526	20.0196	0.010178	0.4902

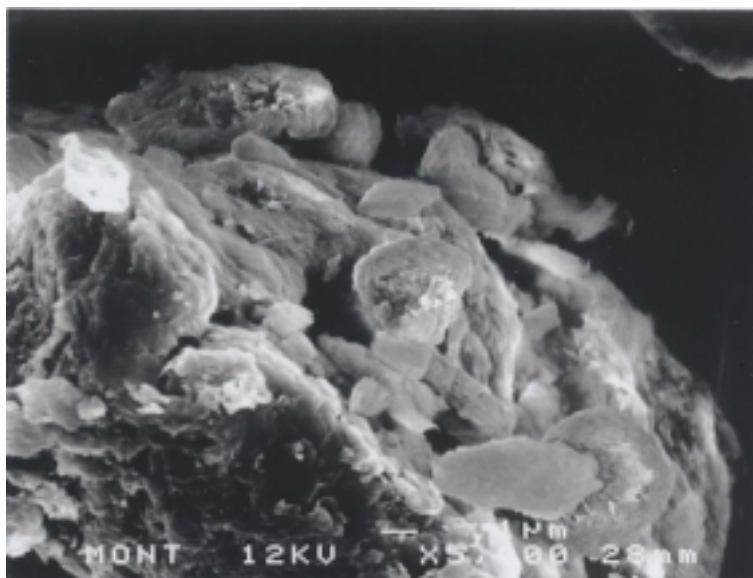
ตารางที่ ข9 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 200%CEC-TDMA-clay

Relative Pressure (<i>pp</i>)	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)	Relative Pressure (<i>pp</i>)	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)
0.077543	1.8585	0.893159	21.0255
0.080336	1.8792	0.849419	17.6507
0.085379	1.9131	0.806091	15.2698
0.090359	1.9433	0.752168	13.0885
0.095412	1.9728	0.701612	11.5122
0.100428	2.0018	0.651125	10.2334
0.149467	2.2412	0.600696	9.1573
0.200410	2.4729	0.550661	8.2253
0.250483	2.6868	0.501307	7.2297
0.300517	2.9094	0.448539	3.6972
0.350355	3.1441	0.399517	3.3216
0.400479	3.3963	0.332755	2.9264
0.450401	3.6683	0.300886	2.7422
0.500687	3.9563	0.249956	2.4874
0.550454	4.2608	0.200522	2.2564
0.600444	4.6011	0.151733	2.0100
0.650444	4.9928	0.101817	1.7339
0.700353	5.4780	0.077768	1.5697
0.750262	6.1126	0.070295	1.5085
0.800059	7.0033	0.060325	1.4241
0.849572	8.3863	0.050390	1.3298
0.897857	10.8669	0.039649	1.2084
0.953147	18.8191	0.030238	1.0678
0.987571	36.3851	0.019970	0.8276
0.949536	28.1065	0.010347	0.4134

ตารางที่ ข10 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 100%CEC-BDHDMA-clay

Relative Pressure (<i>pp</i>)	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)	Relative Pressure (<i>pp</i>)	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)
0.074103	2.0001	0.904363	26.9502
0.075334	2.0154	0.841005	20.0056
0.080463	2.0675	0.797414	16.8251
0.085341	2.1146	0.753900	14.4313
0.090419	2.1618	0.701455	12.2456
0.095400	2.2053	0.651627	10.5692
0.100408	2.2492	0.600625	9.2038
0.149208	2.5926	0.550948	8.0947
0.200569	2.9055	0.501030	7.0530
0.250611	3.1749	0.448796	4.3134
0.300775	3.4433	0.399129	3.9745
0.350975	3.7161	0.331888	3.5772
0.400154	3.9933	0.300860	3.3975
0.450664	4.2939	0.249948	3.1112
0.500666	4.6163	0.200417	2.8377
0.550709	4.9783	0.150766	2.5234
0.600718	5.3949	0.100690	2.1485
0.650761	5.8906	0.090784	2.0552
0.700753	6.4968	0.080720	1.9568
0.750716	7.2797	0.070410	1.8463
0.800418	8.3713	0.060308	1.7277
0.849644	10.0880	0.049758	1.5908
0.897740	13.2285	0.040334	1.4511
0.952279	23.0500	0.030335	1.2749
0.988961	46.1377	0.019805	1.0330
0.955874	36.5350	0.010485	0.7203

2. ลักษณะภายนอกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ



รูปที่ ข1 ลักษณะของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ใช้ในการวิจัย โดยเทคนิค SEM



รูปที่ ข2 ลักษณะของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติที่ใช้ในการวิจัย

ภาคผนวก ค

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ ค1 เครื่องปั่นเหวี่ยงแยก



ภาพที่ ค2 เครื่อง pH meter



ภาพที่ ค3 เครื่องเขย่าเนวราบ



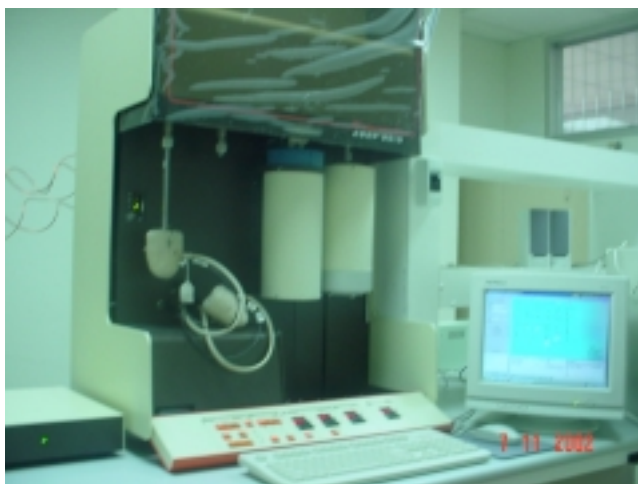
ภาพที่ ค4 เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ



ภาพที่ ค5 เครื่อง UV-VIS-NIR Spectrophotometer



ภาพที่ ค6 เครื่อง Conductivity



รูปที่ ค7 เครื่อง Automatic Surface Analyzer

ประวัติผู้เขียน

ปิยมาภรณ์ จารุงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2520 ที่อำเภอขามเฒ่า จังหวัดศรีสะเกษ เริ่มเข้าศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2539 และเข้าศึกษาต่อหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2543