



## รายงานการวิจัย

# การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำโดยใช้ Montmorillonite Clay (Removal of Organic Compounds from Water using Montmorillonite Clay)

หัวหน้าโครงการ

ดร.รัตนวรรณ วิบูลย์สวัสดิ์

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2544

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2545

### กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง “ การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยใช้ Montmorillonite clay ” (Removal of Organic Compounds from Water using Montmorillonite Clay) ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเมื่อปีงบประมาณ 2544 งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จด้วยดีจากความร่วมมือและการสนับสนุนของหลายฝ่ายดังนี้

1. เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือ 1 (F1) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความร่วมมือในการนำตัวอย่างสารละลายไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ
2. เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือ 2 (F2) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความช่วยเหลือในการให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือวัดและวิเคราะห์
3. เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือ 5 (F5) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการใช้อุปกรณ์และสารเคมี
4. บริษัท ไทยนิปโปนเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์ Montmorillonite Clays มาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งน้ำใจเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

## บทคัดย่อ

จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite Clay) ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวมาดูดซับสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ มอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินในกลุ่มสมคไทต์ (Smectite) ที่มี อลูมินา-ซิลิกา เป็นส่วนประกอบในลักษณะ โครงสร้างซ้อนกันเป็นชั้นๆ ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้มอนต์มอริลโลไนต์มีคุณลักษณะคล้ายกับซีโอไลต์ กล่าวคือมีพื้นที่ผิวสูง จากคุณสมบัตินี้จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย การปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวมอนต์มอริลโลไนต์เพื่อให้เหมาะกับการดูดซับสารอินทรีย์สามารถทำได้โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกของสารอนินทรีย์ที่มีอยู่ในโครงสร้างตามธรรมชาติของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารอินทรีย์ประเภท Quaternary Ammonium Compounds (QACs) ซึ่งบางครั้งจะเรียกสารประเภทนี้ว่า สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก สารที่ใช้ได้แก่ tetramethylammonium chloride ( $C_4H_{12}ClN$ ), hexadecyltrimethylammonium bromide ( $C_{19}H_{42}BrN$ ), tetradecyltrimethylammonium bromide ( $C_{17}H_{38}NBr$ ) และ benzyldimethylhexadecylammonium chloride ( $C_{25}H_{46}ClN$ ) ซึ่งสารเหล่านี้จะมีความยาวของหมู่อัลคิลและขนาดโมเลกุลต่างกัน

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาความสามารถของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวแล้วในการดูดซับสารอินทรีย์ 6 ชนิด คือ humic acid, methylene blue, methyl orange, naphthalene, phenol และ 3-monochlorophenol โดยทำการทดลองเป็นแบบกะ สารอินทรีย์แต่ละชนิดที่เลือกมาศึกษามีสมบัติเฉพาะสารที่แตกต่างกัน เช่น humic acid เป็นสารอินทรีย์ที่พบทั่วไปในแหล่งน้ำธรรมชาติ methylene blue เป็นสียอินทรีย์ (Dye) ที่มีประจุบวก methyl orange เป็นสียที่มีประจุลบ phenols และ naphthalene เป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์ จากการทดลองพบว่าการดูดซับสารอินทรีย์จากน้ำโดยใช้มอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวแล้วได้แก่ TMA-clays, BDHDMMA-clays, HDTMA-clays และ TDMA-clays จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์ดีกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้งานจริง นอกจากนี้จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ (เช่น ระยะห่างระหว่างชั้นโครงสร้างและพื้นที่ผิว) ระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวแล้ว พบว่ามีความสัมพันธ์กันระหว่างลักษณะทางกายภาพและความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดต่างๆ

## ABSTRACT

The aims of this study is to investigate the feasibility of utilising Montmorillonite and various type of its modified forms as an adsorbent for the removal of organic compounds from aqueous solutions. Montmorillonite is a smectite clay based on alumino-silicate structures and for this reason it, like zeolite, has been proposed as an adsorbent in water treatment application. In order to improve the organic adsorption ability of Montmorillonite, the clay was modified by replacing its natural exchangeable inorganic cations with four different quarternary ammonium compounds (QACs). The QACs, sometimes named as cationic surfactant, used in preparation of organo-clays were TMA, BDHDMA, HDTMA and TDMA. These QACs are different in their alkyl chain length and size. Adsorption of six different organic compounds by these modified clays were studied; humic acid, two types of dyes (methylene blue and methyl orange), naphthalene and two phenolic substances (phenol and 3-monochlorophenol). Most of them are classified as polluting elements, which cause problem to the environment. The choice of organic sorbates studied is justified by their properties. Humic acid is a natural occurring organic compound, which is resistant to biodegradable. Methylene blue is a cationic dye while methyl orange is an anionic dye. Phenols represent the synthetic organic compounds. Naphthalene was selected as an ideal hydrophobic sorbate without polar functional groups. A series of adsorption experiments have been carried out in batch modes. Comparative experiments were carried out using Montmorillonite, which is the starting clay, as a reference material. The batch adsorption tests show an interesting capacity of modified Montmorillonite in separating organic contaminants from water. These modified Montmorillonite samples, TMA-clays, HDTMA-clays, BDHDMA-clays and TDMA-clays, were also characterised for their interlayer spacing and BET surface area by X-ray Diffraction and  $N_2$  adsorption technique respectively. Relations between those physical properties and the adsorption capacities of the modified Montmorillonite were noticed.



## สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| กิตติกรรมประกาศ                                  | ก    |
| บทคัดย่อภาษาไทย                                  | ข    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ                               | ค    |
| สารบัญ   | ง    |
| สารบัญตาราง                                      | ฉ    |
| สารบัญภาพ  | ๗    |
| คำอธิบายสัญลักษณ์                                | ๘    |
| บทที่ 1 บทนำ                                     |      |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา               | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย                      | 3    |
| 1.3 ระเบียบวิธีวิจัย                             | 3    |
| 1.4 ขอบเขตของการวิจัย                            | 4    |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย         | 4    |
| บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 5    |
| 2.1 แร่ดิน                                       | 5    |
| 2.2 Montmorillonite                              | 7    |
| 2.3 กรดฮิวมิก                                    | 11   |
| 2.4 สีข้อม                                       | 13   |
| 2.5 สารประกอบฟีนอล                               | 15   |
| 2.6 แนฟธาลิน                                     | 16   |
| 2.7 กระบวนการดูดซับ                              | 17   |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย                       |      |
| 3.1 รูปแบบการทดลองและสถานที่ทำการทดลอง           | 22   |
| 3.2 ประชากรศึกษาและขนาดตัวอย่าง                  | 22   |
| 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง                       | 22   |
| 3.4 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง         | 23   |
| 3.5 วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล                      | 24   |

## บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

|   |    |
|---|----|
| 4.1 ลักษณะทางกายภาพของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์                          | 29 |
| 4.2 ความสามารถของมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับกรดฮิวมิก                 | 30 |
| 4.3 ความสามารถของมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับเมธิลีนบลู                | 36 |
| 4.4 ความสามารถของมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับเมธิลออเรนจ์              | 40 |
| 4.5 ความสามารถของมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับฟีนอล                     | 44 |
| 4.6 ความสามารถของมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับคลอโรฟีนอล                | 47 |
| 4.7 ความสามารถของมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับแนฟธาลิน                  | 50 |
| 4.8 ความสามารถของ Organo-clay ในการดูดซับฟีนอล คลอโรฟีนอล และแนฟธาลิน | 53 |

## บทที่ 5 บทสรุป

|                    |    |
|--------------------|----|
| 5.1 สรุปผลการวิจัย | 54 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ     | 54 |

|            |    |
|------------|----|
| บรรณานุกรม | 55 |
|------------|----|

|                    |    |
|--------------------|----|
| Output จากการวิจัย | 57 |
|--------------------|----|

## ภาคผนวก

|                       |    |
|-----------------------|----|
| ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐาน | 58 |
|-----------------------|----|

|                      |    |
|----------------------|----|
| ภาคผนวก ข ผลการทดลอง | 64 |
|----------------------|----|

|                 |    |
|-----------------|----|
| ประวัติผู้วิจัย | 86 |
|-----------------|----|

## สารบัญตาราง

- ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์
- ตารางที่ 3.1 ความยาวคลื่นสำหรับการดูดกลืนแสงของสารละลายอินทรีย์ที่ศึกษา
- ตารางที่ 3.2 สารอินทรีย์ QACs ที่ใช้ปรับเปลี่ยนพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์
- ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงสมบัติแล้ว
- ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบความสามารถการดูดซับกรดฮิวมิกของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดต่างๆ
- ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติที่อุณหภูมิต่างๆ
- ตารางที่ 4.4 ความสามารถในการดูดซับเมธิลีนบลูของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดต่างๆ
- ตารางที่ 4.5 ความสามารถในการดูดซับเมธิลีนบลูของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และ 50% CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิต่างๆ
- ตารางที่ 4.6 ความสามารถในการดูดซับเมธิลออเรนจ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดต่างๆ
- ตารางที่ 4.7 ความสามารถในการดูดซับเมธิลออเรนจ์ของ 100%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิต่างๆ
- ตารางที่ 4.8 ความสามารถในการดูดซับคลอโรฟินอลของ Organo-Clays ชนิดต่างๆ
- ตารางที่ 4.9 ความสามารถในการดูดซับแนฟธาลินของ 150% CEC HDTMA-clay ที่อุณหภูมิต่างๆ
- ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบสมบัติทางเคมีของฟินอล คลอโรฟินอลและแนฟธาลิน
- ตารางที่ ข1 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ
- ตารางที่ ข2 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 100%CEC-TMA-clay
- ตารางที่ ข3 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 200%CEC-TMA-clay
- ตารางที่ ข4 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 200%CEC-HDTMA-clay
- ตารางที่ ข5 ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เวลาต่างๆเมื่อใช้มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ
- ตารางที่ ข6 ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 100% CEC-HDTMA clay เป็นตัวดูดซับ
- ตารางที่ ข7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณกรดฮิวมิกบนมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ





- ตารางที่ ข30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลีนบลูที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลีนบลูบน 100%CEC-TMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-TMA-clay
- ตารางที่ ข31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลีนบลูที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลีนบลูบน 200%CEC-TMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-TMA-clay
- ตารางที่ ข32 % การดูดซับเมธิลีนบลูที่ pH ต่างๆ
- ตารางที่ ข33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลีนบลูที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลีนบลูบนมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติที่อุณหภูมิ 288 K
- ตารางที่ ข34 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลีนบลูที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลีนบลูบนมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติที่อุณหภูมิ 308 K
- ตารางที่ ข35 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลีนบลูที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลีนบลูบน 50%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 50%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิ 288 K
- ตารางที่ ข36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลีนบลูที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลีนบลูบน 50%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 50%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิ 308 K
- ตารางที่ ข37 ความเข้มข้นของเมธิลอเรนจ์ที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 100% CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ
- ตารางที่ ข38 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลอเรนจ์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลอเรนจ์บน 50%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 50%CEC-HDTMA-clay
- ตารางที่ ข39 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลอเรนจ์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลอเรนจ์บน 100%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-HDTMA-clay
- ตารางที่ ข40 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลอเรนจ์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลอเรนจ์บน 200%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-HDTMA-clay

- ตารางที่ ข41 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลลอเรนจ์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลลอเรนจ์บน 50%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 50%CEC-TDMA-clay
- ตารางที่ ข42 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลลอเรนจ์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลลอเรนจ์บน 100%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-TDMA-clay
- ตารางที่ ข43 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลลอเรนจ์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลลอเรนจ์บน 200%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-TDMA-clay
- ตารางที่ ข44 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลลอเรนจ์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลลอเรนจ์บน 100%CEC-BDHDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-BDHDMA-clay
- ตารางที่ ข45 % การดูดซับเมธิลลอเรนจ์ของ 100%CEC-HDTMA-clay ที่ pH ต่างๆ
- ตารางที่ ข46 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลลอเรนจ์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลลอเรนจ์บน 100%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิ 293 K
- ตารางที่ ข47 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลลอเรนจ์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลลอเรนจ์บน 100%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิ 313 K
- ตารางที่ ข48 ความเข้มข้นของฟีนอลที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 100% CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ
- ตารางที่ ข49 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณฟีนอลบน 100%CEC-TMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-TMA-clay
- ตารางที่ ข50 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณฟีนอลบน 50%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 50%CEC-HDTMA-clay
- ตารางที่ ข51 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณฟีนอลบน 100%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-HDTMA-clay

- ตารางที่ ข52 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ กับปริมาณฟีนอลบน 200%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-HDTMA-clay
- ตารางที่ ข53 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ กับปริมาณฟีนอลบน 50%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 50%CEC-TDMA-clay
- ตารางที่ ข54 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ กับปริมาณฟีนอลบน 100%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-TDMA-clay
- ตารางที่ ข55 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ กับปริมาณฟีนอลบน 200%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-TDMA-clay
- ตารางที่ ข56 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ กับปริมาณฟีนอลบน 100%CEC-BDHDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-BDHDMA-clay
- ตารางที่ ข57 % การดูดซับฟีนอลของ 200%CEC-HDTMA-clay ที่ pH ต่างๆ
- ตารางที่ ข58 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ กับปริมาณฟีนอลบน 200%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิ 293 K
- ตารางที่ ข59 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ กับปริมาณฟีนอลบน 200%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิ 303 K
- ตารางที่ ข59 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ กับปริมาณฟีนอลบน 200%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิ 313 K
- ตารางที่ ข60 ความเข้มข้นของคลอโรฟีนอลที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 200% CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ
- ตารางที่ ข61 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอโรฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณคลอโรฟีนอลบน 100%CEC-TMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-TMA-clay





- ตารางที่ ข73 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอฟธาตินที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณแอฟธาตินบน 50%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 50%CEC-TDMA-clay
- ตารางที่ ข74 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอฟธาตินที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณแอฟธาตินบน 100%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-TDMA-clay
- ตารางที่ ข75 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอฟธาตินที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณแอฟธาตินบน 200%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-TDMA-clay
- ตารางที่ ข76 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอฟธาตินที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณแอฟธาตินบน 100%CEC-BDHDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-BDHDMA-clay
- ตารางที่ ข77 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอฟธาตินที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณแอฟธาตินบน 150%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 150%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิ 288 K
- ตารางที่ ข78 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอฟธาตินที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณแอฟธาตินบน 150%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 150%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิ 313 K

## สารบัญภาพ

- รูปที่ 2.1 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนท์
- รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของ pH กับระยะห่างระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนท์
- รูปที่ 2.3 การปรับแปลงพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติด้วย QACs
- รูปที่ 2.4 กระบวนการสังเคราะห์ชีวมีสตามธรรมชาติ
- รูปที่ 2.5 โมเดลของชีวมีค
- รูปที่ 2.6 การเกิดสารไตรฮาโลมีเทน
- รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเมทริลออเรนจ์
- รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเมทริลินบลู
- รูปที่ 2.9 โครงสร้างของฟินอล
- รูปที่ 2.10 โครงสร้างของโมโนคลอโรฟินอล
- รูปที่ 2.11 โครงสร้างของแนฟทาลีน
- รูปที่ 2.12 รูปแบบของ Adsorption Isotherm
- รูปที่ 3.1 การทดลองการดูดซับแบบกะ
- รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย QACs แล้ว
- รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของกรดชีวมีคที่เวลาต่างๆเมื่อใช้มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ
- รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบความเข้มข้นของกรดชีวมีคที่เวลาต่างๆเมื่อใช้มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและ Organo Clay (100% CEC-HDTMA clay) เป็นตัวดูดซับ
- รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดชีวมีคที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณกรดชีวมีคบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

คำอธิบายสัญลักษณ์

- $R^2$  Correlation Coefficient
- $\theta$  The Bragg Angle
- $d_{001}$  ระยะห่างระหว่างชั้นโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์

## บทที่ 1

## บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาอุตสาหกรรม และการขยายตัวของเมืองก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำซึ่งเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ สาเหตุหลักของการละลายการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ได้แก่ ค่าใช้จ่ายของการลงทุนที่ค่อนข้างสูงในการบำบัดน้ำเสีย เช่น โรงงานผลิตเยื่อกระดาษจะต้องใช้เงินลงทุนสูงถึง 500 ล้านบาทในการก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสีย (ฉัฐยา พูนสุวรรณ 2545) ดังนั้นหากสามารถปรับปรุงกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพแต่มีราคาถูกลงก็อาจเป็นแรงจูงใจให้ภาคอุตสาหกรรมทำการบำบัดน้ำเสียเพิ่มขึ้น ในปัจจุบันจึงมีความพยายามและงานวิจัยมากมายเพื่อปรับปรุงและพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ในการบำบัดน้ำเสีย โดยทั่วไปแล้วกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ กระบวนการทางกายภาพ และกระบวนการทางชีวภาพ การดูดซับเป็นกระบวนการทางกายภาพกระบวนการหนึ่งในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีความสำคัญมาก โดยเฉพาะในการกำจัดสารที่ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยกระบวนการทางชีวภาพ (McKay 1996) คุณสมบัติของตัวดูดซับที่ดีจะต้องมีพื้นที่ผิวมาก และมีขนาดของรูพรุนใหญ่พอที่จะให้โมเลกุลที่จะถูกดูดซับเข้าไปได้ เมื่อพิจารณาในเชิงเศรษฐศาสตร์ตัวดูดซับที่ดีไม่ควรมีราคาสูง และควรรนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (regenerated easily) ตัวดูดซับหลายชนิดได้ถูกคิดค้นขึ้นจากอดีตต่อเนื่องจนถึงปัจจุบันเช่น ถ่านกัมมันต์ (Goswai et al., 1994) zeolite (Vansant, 1994) hydrotalcites (.Amin and Jayson, 1996) และ silicalite ซึ่งตัวดูดซับแต่ละชนิดก็มีความสามารถในการดูดซับต่างกัน ไปทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของสารที่ถูกดูดซับและสภาวะของระบบ เช่น อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่างของระบบ เป็นต้น ปัจจุบันนี้ได้มีความสนใจที่จะนำสารที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แร่ดิน (Clay Mineral) ชนิด Montmorillonite หรือ Bentonite มาใช้เป็นตัวดูดซับในระบบการบำบัดน้ำเสีย แร่ดินทั้งสองชนิดนี้มีส่วนประกอบหลักคือ อลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) และซิลิกาออกไซด์ ( $SiO_2$ ) ซ้อนกันเป็นชั้น (lamellar structure) การเกิดช่องว่างระหว่างชั้นเหล่านี้จึงทำให้ Montmorillonite และ Bentonite โดยธรรมชาติมีพื้นที่ผิวสูง และลักษณะ โครงสร้างที่เป็นชั้นยังสามารถขยายตัวได้เมื่ออยู่ในของเหลว เนื่องจากมอนต์มอริลโลไนต์จากแต่ละแหล่งก็จะมีสมบัติแตกต่างกันออกไป การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์บางครั้งจึงเป็นเรื่องจำเป็นเพื่อให้มีสภาพเหมาะสมกับการนำไปใช้ดูดซับสารปนเปื้อนที่ต่างชนิดกันในน้ำ เช่น การขยายโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์โดยกระบวนการ Pillaring ทำให้มอนต์มอริลโลไนต์สามารถดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำที่มีขนาดใหญ่ได้ (Albanis et al., 1997) หรือ การทำปฏิกิริยาของมอนต์มอริลโลไนต์กับสารลดแรงดึงผิวประเภท QACs (Quaternary Ammonium Cations) เพื่อเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ (from

hydrophilic to organophilic) ให้เหมาะกับการดูดซับสารอินทรีย์ (Dentel et al. 1998, Michot and Pinnavaia 1991, Gitipour et al. 1997) ในโครงการวิจัยนี้สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนสมบัติของมอนต์มอริลโลไนต์ได้แก่ สารที่ใช้ได้แก่ tetramethylammonium chloride ( $C_4H_{12}ClN$ ), hexadecyltrimethylammonium bromide ( $C_{19}H_{42}BrN$ ), tetradecyltrimethylammonium bromide ( $C_{17}H_{38}NBr$ ) และ benzyldimethylhexadecylammonium chloride ( $C_{25}H_{46}ClN$ ) ซึ่งสารเหล่านี้จะมีความยาวของหมู่อัลคิลและขนาดโมเลกุลที่แตกต่างกัน

โครงการวิจัยนี้มีความมุ่งหมายที่จะผลิต ศึกษาความสามารถ และพัฒนาการใช้ตัวดูดซับ (Adsorbent) มอนต์มอริลโลไนต์ในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยเน้นการใช้มอนต์มอริลโลไนต์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวแล้วเป็นตัวแยกสารอินทรีย์ 6 ชนิดจากน้ำ คือ humic acid, methylene blue, methyl orange, naphthalene, phenol และ 3-monochlorophenol โดยใช้กระบวนการดูดซับแบบกะ (Batch Adsorption System) โดยสารอินทรีย์แต่ละชนิดที่เลือกมาศึกษามีสมบัติเฉพาะสารที่แตกต่างกัน เช่น Humic Acid เป็นสารอินทรีย์ที่พบทั่วไปในแหล่งน้ำธรรมชาติ Methylene Blue เป็นสีอินทรีย์ (Dye) ที่มีประจุบวก Methyl Orange เป็นสีที่มีประจุลบ Phenols และ Naphthalene เป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์

เนื่องจากมอนต์มอริลโลไนต์ เป็นสารที่พบได้โดยทั่วไปในธรรมชาติ และสามารถพบได้ในประเทศไทย เช่น ในเขตอำเภอสบปราบ จังหวัดลำปาง และเขตอำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ (จุมพล คินตัก และคณะ 2521) จึงมีราคาถูก คือ ประมาณ 7 บาท ต่อ 1 กิโลกรัม (ราคาจากบริษัท ไทยนิปปอน เคมีภัณฑ์ อุตสาหกรรมจำกัด) Montmorillonite Clay มีการผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์อยู่แล้วเพื่อใช้เป็นส่วนผสมของโคลนเจาะ (Drilling mud) ที่ใช้ในการก่อสร้าง รวมทั้งใช้ในกระบวนการขุดเจาะสำรวจหาก๊าซธรรมชาติและน้ำมัน จึงไม่มีปัญหาในด้าน Supply และ Impurity ของมอนต์มอริลโลไนต์

นอกจากนี้การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์ ไม่ต้องการกระบวนการทางความร้อน (Thermal process) ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เช่น ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ซึ่งในกระบวนการผลิตต้องการการเผาที่อุณหภูมิสูง ทำให้มีต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง จึงเหมาะสมมากกว่าที่จะทดลองนำมอนต์มอริลโลไนต์ มาใช้เป็นตัวดูดซับในระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อลดค่าใช้จ่าย

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

### 1.2.1 วัตถุประสงค์ทั่วไป

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำโดยใช้มอนต์มอริลโลไนต์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวแล้วเป็นตัวดูดซับ

### 1.2.2 วัตถุประสงค์เฉพาะสำหรับการทดลองแบบกะ (Batch operation)

- เพื่อศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวแล้ว
- เพื่อศึกษาผลของปริมาณสารอินทรีย์ที่นำมาปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ต่อความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำ
- เพื่อศึกษาผลของชนิดของสารอินทรีย์ที่นำมาปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ต่อความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำ
- เพื่อหาชนิดของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวแล้ว ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์แต่ละชนิดที่ศึกษา

## 1.3 ระเบียบวิธีวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของมอนต์มอริลโลไนต์ เช่น โครงสร้างผลึก, ขนาดของอนุภาค, พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน
- 1.3.2 ทดลองเปลี่ยนแปลงสมบัติของมอนต์มอริลโลไนต์ ที่สภาวะต่างๆ เช่น ให้ทำปฏิกิริยากับ QACs (Quarternary Ammonium Cations) ชนิดต่างๆ เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของพื้นผิว แล้วนำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพตามวิธีในข้อ 1.3.1 อีกครั้งเพื่อเปรียบเทียบ
- 1.3.3 ศึกษากระบวนการดูดซับของสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ โดยใช้มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวแล้ว โดยการนำมอนต์มอริลโลไนต์แช่ในสารละลายของสารอินทรีย์ที่สนใจศึกษาพร้อมเขย่าตามเวลาที่กำหนดเพื่อให้ระบบเข้าสู่สมดุล จากนั้นแยกมอนต์มอริลโลไนต์ออกจากสารละลายโดยใช้เครื่องเหวี่ยงแยก แล้ววิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ที่เหลือในสารละลาย
- 1.3.4 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการดูดซับสารอินทรีย์ของมอนต์มอริลโลไนต์ โดยวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ที่เหลือในสารละลายที่เขย่ารวมกับมอนต์มอริลโลไนต์ ในระยะเวลาที่ต่างกัน

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ดำเนินการทดลองโดยลดขนาด และคัดขนาดแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ จนได้ช่วงขนาดอนุภาคที่ต้องการ
- 1.4.2 เปลี่ยนแปลงสมบัติของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ โดยให้ทำปฏิกิริยากับ QACs (Quarternary Ammonium Cations) เพื่อเปลี่ยนแปลงลักษณะของพื้นผิว
- 1.4.3 นำมอนต์มอริลโลไนต์ที่ได้มาวิเคราะห์สมบัติต่างๆทางกายภาพ เช่น ศึกษาหาพื้นที่ผิว และขนาดรูพรุนของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์โดยใช้ BET Micromeritics ASAP; ศึกษาโครงสร้างผลึกโดยใช้ X-ray Diffraction และ วัดขนาดของอนุภาคด้วย Laser Particle Size Analyser ฯลฯ
- 1.4.4 ดำเนินการทดลองโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ในการดูดซับสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ เช่น สีย้อม ; humic acid ; phenolic compounds ฯลฯ โดยสารอินทรีย์แต่ละชนิดที่เลือกมาศึกษามีสมบัติเฉพาะสารที่แตกต่างกัน เช่น Humic Acid เป็นสารอินทรีย์ที่พบทั่วไปในแหล่งน้ำธรรมชาติ Methylene Blue เป็นสีอินทรีย์ (Dye) ที่มีประจุบวก Methyl Orange เป็นสีที่มีประจุลบ Phenols และ Naphthalene เป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์
- 1.4.5 วิเคราะห์ผลการดูดซับ โดยใช้ UV spectrophotometer หรืออุปกรณ์วิเคราะห์อื่นๆขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับ และเปรียบเทียบคุณสมบัติการดูดซับของมอนต์มอริลโลไนต์ ชนิดต่างๆ
- 1.4.6 ดำเนินการทดลองในข้อ 1.4.4 ข้างต้นโดยเปลี่ยนแปลงสภาวะของการดูดซับ เช่น อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่างของระบบการดูดซับ รวมทั้งปริมาณและชนิดของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ที่ใช้

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

- 1.5.1 เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการกำจัดสารอินทรีย์กระบวนการบำบัดน้ำเสีย และสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้เปรียบเทียบกับวิธีการบำบัดน้ำเสียที่ใช้อยู่เดิม
- 1.5.2 เป็นการนำวัสดุธรรมชาติที่มีในประเทศมาใช้ให้เกิดประโยชน์
- 1.5.3 ลดอันตรายและค่าใช้จ่ายที่อาจ เกิดจากตัวดูดซับที่เป็นสารสังเคราะห์



## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ขอบเขตของการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยครั้งนี้ คือ

- แร่ดิน
- มอนต์มอริลโลไนต์
- Humic Acid
- สีซ้อม
- Phenols
- Naphthalene
- กระบวนการดูดซับ

#### 2.1 แร่ดิน

แร่ดินเป็นแร่ที่พบในตะกอนและการสลายตัวของแร่ภูเขาไฟ กลุ่มแร่ดินที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้น (Phyllosilicate) อยู่ในสภาพคอลลอยด์มีชื่อเรียกรวมกันว่า “เบนโทไนต์” ผลึกแร่ดินสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- แร่ดินซิลิเกต (Silicate Clays) ได้แก่แร่ที่มีอลูมิเนียมและซิลิเกตเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ มีโครงสร้างเป็นแผ่นซ้อนๆ กัน
- แร่ดินที่มีส่วนผสมของเหล็กและอลูมิเนียม (Iron and Aluminum Clays) ได้แก่ แร่ดินที่มีเหล็กและอลูมิเนียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบ

แร่ดินซิลิเกต (Silicate) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

- กลุ่มแร่ดินขาว (Kaolinite group) เป็นดินเหนียวแบบ 1:1 คือมีแผ่นอลูมินาและแผ่นซิลิกาอย่างละแผ่นประกอบเป็น 1 หน่วย
- กลุ่มสมคไทต์ (Smectite or Montmorillonite) เป็นดินเหนียวแบบ 2:1 คือแผ่นซิลิกา 2 แผ่น ประกบแผ่นอลูมินา 1 แผ่น เป็น 1 หน่วย
- กลุ่มแร่ไมก้า (Illite or Hydrus mica) มีการจัดตัวแบบ 2:1 เช่นเดียวกับกลุ่มสมคไทต์แต่ในโครงสร้างมีโปแตสเซียมอยู่ทำให้ขยายตัวได้น้อย

## สมบัติสำคัญของแร่ดินซิลิเกต

แร่ดินซิลิเกตมีคุณสมบัติแตกต่างจากแร่ที่มีเหล็กและอลูมินาในด้านคุณสมบัติการขยายตัว หดตัว การดูดซับไอออน โดยแร่ดินที่มีเหล็กและอลูมินัมผสมอยู่จะมีการขยายตัว หดตัว ตลอดจนความเหนียวน้อยกว่าแร่ดินซิลิเกต อำนาจในการดูดซับไอออนน้อยกว่า แต่ความคงทนต่อการชะล้างมากกว่าแร่ดินซิลิเกต อย่างไรก็ตามในกลุ่มของแร่ดินซิลิเกตเองมีคุณสมบัติแตกต่างกันในแต่ละกลุ่ม ทั้งนี้เนื่องมาจากการจัดตัวที่แตกต่างกัน โดยแร่ดินที่มีการจัดตัวประเภท 2:1 มีการขยายตัวและอำนาจการดูดซับมากกว่าประเภท 1:1

## รูปร่างและขนาดของแร่ดินซิลิเกต

ขนาดของอนุภาคแร่ดินซิลิเกตมีขนาดตั้งแต่ 0.01 ถึง 5.0 ไมครอน แปรตามชนิดและองค์ประกอบทางแร่ 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) ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวที่อยู่หลึบระหว่างแผ่นผลึกของแร่ดินเหนียวซิลิเกตที่ซ้อนทับกันเป็นอนุภาคหรือ micelle ของแร่ดินเหนียวแต่ละชนิด

## ความเหนียว (Cohesion) และอ่อนตัว (Plasticity)

ความเหนียวหมายถึง ความสามารถในการเกาะยึดกันระหว่างอนุภาคของดินและความอ่อนนุ่มบีบขึ้นให้เป็นรูปต่างๆ และคงสภาพอยู่เช่นนั้นได้เมื่อน้ำมีความชื้นที่เหมาะสม คุณสมบัติทางด้านความเหนียวและความอ่อนตัวนี้จะเกี่ยวข้องกับพื้นที่ผิวของดิน โดยดินที่มีความเหนียวและอ่อนตัวสูงจะเป็นดินที่มีพื้นที่ผิวมากจึงมีโอกาสดูดยึดอนุภาคของน้ำไว้ในผิวได้มาก ทำให้การยึดเกาะกันเพิ่มมากขึ้นด้วย

## การขยายตัว (Swelling) และการหดตัว (Shrinking)

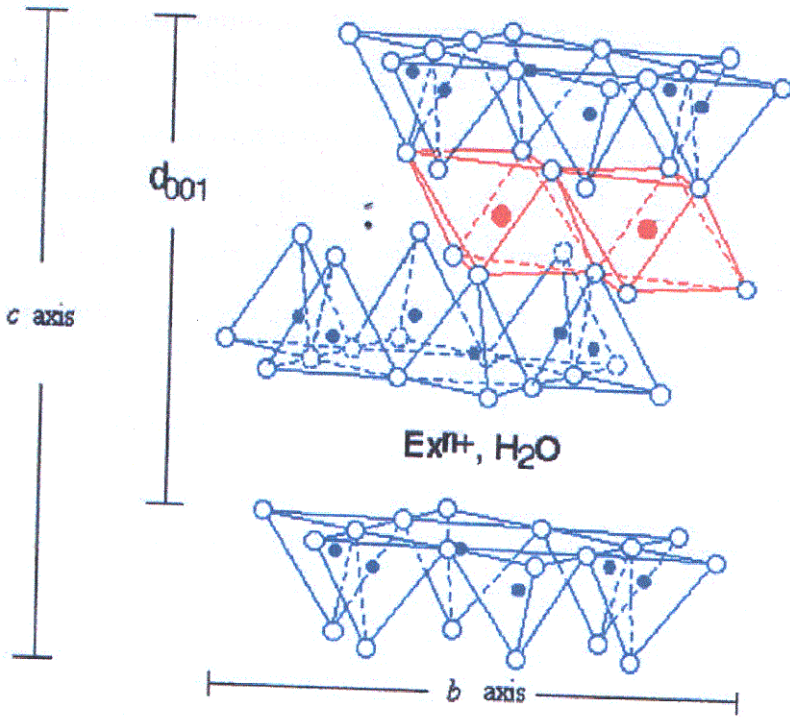
อนุภาคแร่ดินที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นผลึกที่ซ้อนทับกันเป็น Clay Micelle จะมีช่องหรือหลืบระหว่างแผ่นค่อนข้างกว้างและการยึดเกาะไม่เหนียวนักทำให้อนุภาคของแร่ดินที่เปียกน้ำมีการพองตัวและขยายตัวมากขึ้น และหดตัวเมื่อเผาไล่น้ำที่อยู่ภายในอนุภาคให้หมดไป

## ประจุลบและการดูดยึดไอออนบวก

ตามปกติอนุภาคของแร่ดินในธรรมชาติจะมีประจุลบ และสามารถดึงดูดไอออนบวก ทำให้เกิดสภาพของประจุสองชั้น หรือ Ionic Double Layer โดยอนุภาคดินเหนียวเป็นประจุลบที่มีกลุ่มไอออนบวกล้อมรอบอยู่ ไอออนบวกเหล่านี้จะถูกยึดติดอยู่ที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวและสามารถถูกแทนที่โดยไอออนบวกชนิดอื่น หรือที่เรียกว่า Exchangable Cation

## 2.2 Montmorillonite (มอนต์มอริลโลไนต์)

มอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินในกลุ่มสเมคไทน์ มีสูตรโครงสร้างทางเคมีทั่วไปคือ  $M_{y+}(A_{12-y}Mg_y)(Si_4O_{10}(OH_2))_nH_2O$  เมื่อ  $y$  คือระดับความไม่สมบูรณ์ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1 ประกอบด้วยแผ่นซิลิกาสองแผ่นและอลูมินาหนึ่งแผ่นสอดอยู่ระหว่างแผ่นซิลิกาและเกาะยึดออกซิเจนร่วมกันผลึกจะเชื่อมต่อกันในแนวระดับเป็นชั้นๆ และมักมีไอออนของโซเดียม แคลเซียม อยู่ด้วยในระหว่างชั้นโครงสร้าง คุณลักษณะคือสามารถขยายตัวได้เนื่องจากไม่มีพันธะไฮโดรเจนทำให้ประจุบวกต่างๆ สามารถเข้าแทรกในระหว่างชั้นโครงสร้างได้ง่าย อนุภาคชนิดนี้จึงมีความสามารถในการดูดยึดสูงและเกิดการแตกสลายของผลึกได้ง่ายทำให้อนุภาคที่พบมีขนาดเล็กคือมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.01–0.1 ไมครอน ช่องว่างระหว่างแผ่นที่ซ้อนทับกันมีความหนาน้อยที่สุดประมาณ 9.5 อังสตรอม ช่องว่างอาจจะขยายเพิ่มขึ้นได้ จากการศึกษาโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์โดยการฉายรังสี X – ray diffraction หรือ XRD พบว่าการสะท้อนกลับของรังสีทั้งหมดจะเกิดในทิศทางแนวแกน  $c$  ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการพองตัวในระหว่างชั้นอาจเป็นหนึ่งเท่า สองเท่าหรือหลายๆเท่าของจำนวนชั้นของน้ำที่มีอยู่ในโครงสร้าง โมเลกุลและแต่ละระดับของการพองตัวทำให้เกิดช่องว่างในการวัดระยะแกน  $c$  จะต้องมีการควบคุมความชื้น การสะท้อนกลับของรังสีโดยทั่วไปจากระบบ  $hk$ -band ในทิศทาง  $a$  และ  $b$  สามารถใช้บอกลักษณะของแร่แต่ละชนิดได้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ วงกลมสีน้ำเงินคือ  $\text{Si}^{4+}$  วงกลมสีแดงคือ  $\text{Al}^{3+}$  หรือ  $\text{Mg}^{2+}$  และวงกลมกลวง คือ ออกซิเจน

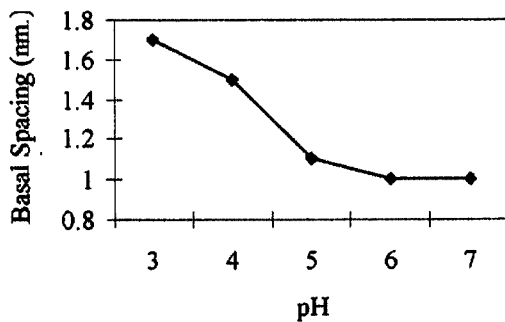
แร่ดินชนิดนี้จะมีประจุลบและสามารถดึงดูดไอออนที่มีประจุบวกได้ ซึ่งประจุลบของมอนต์มอริลโลไนต์เกิดจากการแทนที่ของประจุจาก  $\text{Al}^{3+}$  ถูกแทนที่ด้วยประจุ  $\text{Mg}^{2+}$  ในแผ่นออลูมินาทำให้ดินเหนียวชนิดนี้แสดงประจุเป็นลบเนื่องจาก  $\text{Mg}^{2+}$  มีวาเลนซ์ต่ำกว่า  $\text{Al}^{3+}$  ประจุลบจึงตกค้าง เมื่อการถูกแทนที่เกิดขึ้นมากๆ ประจุลบจะมีอำนาจสูงพอที่จะยึดไอออนบวกได้ และ  $\text{Al}^{3+}$  สามารถเข้าไปแทนที่  $\text{Si}^{4+}$  ได้จึงทำให้ประจุโดยรวมเป็นลบเช่นกัน การแทนที่ของ  $\text{Al}^{3+}$  ด้วยประจุ  $\text{Mg}^{2+}$  และการแทนที่ของ  $\text{Si}^{4+}$  ด้วยประจุ  $\text{Al}^{3+}$  เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ทางโครงสร้างของแร่ดินตามธรรมชาติของมอนต์มอริลโลไนต์

การจัดเรียงตัวของแผ่นซิลิกาจะขึ้นอยู่กับประจุบวกที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ โดยปกติแล้วในแต่ละแผ่นจะมีโครงสร้างประกอบด้วยจำนวนของแผ่นที่รวมกันด้วยแรงดึงดูดระหว่างประจุซึ่งโครงสร้างนี้อาจเรียกว่าแทคทอยด์ (Tactoids) ซึ่งประกอบด้วย Lattice Platelets ประกบเข้าด้วยกัน ในธรรมชาติพบว่าประจุบวกส่วนใหญ่ที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์คือ โซเดียม และแคลเซียม ถ้าการแขวนลอยของแทคทอยด์มีเฉพาะโซเดียมเป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุบวกจะมี 1.4 platelets ต่อ 1 แทคทอยด์ แต่ถ้ามีเฉพาะแคลเซียมจะเป็น 3.9 platelets ต่อ 1 แทคทอยด์

ดังนั้น มอนต์มอริลโลไนต์ อาจแบ่งออกตามองค์ประกอบที่มีธาตุโซเดียมและแคลเซียมอยู่ คือ

1. มอนต์มอริลโลไนต์ ที่ประกอบด้วยแร่ดินโซเดียม มอนต์มอริลโลไนต์ (Sodium-Montmorillonite) จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้มากเพราะว่าผลึกของดินที่มีขนาดเล็กมาก กระจัดกระจายอยู่ในน้ำทำให้น้ำโคลนมีลักษณะกึ่งแข็งและกึ่งเหลวคล้ายวุ้นเหมาะสำหรับเป็นน้ำโคลนไหลวนใช้ในการเจาะหรือเรียกว่า โคลนเจาะ (Dilling Mud) นอกจากนี้ยังใช้ผสมทรายทำเบ้าหลอม และวัสดุทนไฟ (Refractories)
2. มอนต์มอริลโลไนต์ ที่ประกอบด้วยแร่ดิน แคลเซียม มอนต์มอริลโลไนต์ (Calcium-Montmorillonite) หรือเรียกประเภทที่ไม่พองตัวมาก (Non Swelling Type) ซึ่งจะมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำและพองขยายตัวได้น้อยกว่าชนิดแรก แต่ก็สามารถนำมาทำโคลนเจาะหลุมตื้น ๆ ได้ ซึ่งก่อนจะนำไปทำโคลนเจาะได้ ต้องผ่านกรรมวิธีการปรับปรุงคุณภาพด้วย Soda Ash Polymers หรือสารเคมีอื่นเสียก่อน สำหรับเบนโทไนต์ชนิดนี้ ส่วนใหญ่จะใช้ทำสารที่ดูดซับหรือฟอกสี ใช้ในเครื่องกรองน้ำมันในโรงกลั่น กรองน้ำบาดาล และน้ำมันพืชให้ปราศจากมลทิน ใช้ฟอกหนังและกรองน้ำมันเครื่องใช้แล้วให้คืนสู่สภาพเดิมได้

น้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ในชั้น โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ได้เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนคู่โคเดเคียวในโมเลกุลของน้ำกับประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้น โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ เมื่อมีน้ำในโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์จะเกิดการพองตัว ซึ่งปริมาณการพองตัวนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำว่ามากน้อยเพียงใดจึงจะสามารถแลกเปลี่ยนประจุได้ ถ้าประจุที่แลกเปลี่ยนคือประจุโซเดียมและมีน้ำอยู่จำนวนมากจะสามารถพองตัวได้หลายเท่า แต่ถ้าดินนั้นเกิดแข็งตัวลงก็จะเกิดการแยกตัวได้ จากการศึกษาพบว่าระยะห่างระหว่างชั้น โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์จะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยจะมีค่าลดลงเมื่อมีความเป็นด่างมากขึ้นและลดลงมากที่สุดเมื่อพีเอชอยู่ระหว่าง 4 ถึง 5 (Schnitzer and Khan, 1972) แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของ pH กับระยะห่างระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์

มอนต์มอริลโลไนต์ ที่พบในประเทศไทย มักมี Smectite หรือ Montmorillonite 70-80 % และมีสิ่งเจือปน ซึ่งบางครั้งประกอบด้วยคริสโตบาร์ไรต์ แกลไซต์ ฮีมาไทต์ เฟลด์สปาร์ ควอตซ์ ไมก้า และกาโอลิไนต์ปนอยู่บ้าง ซึ่งเป็นส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ ส่วนมอนต์มอริลโลไนต์ ที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ เป็นมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีชื่อทางการค้าว่า MAC-GEL ของบริษัทไทยนิปปอนเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรมจำกัด ซึ่งมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีน้ำตาล ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดเฉพาะของมอนต์มอริลโลไนต์ ที่ใช้ในการวิจัย

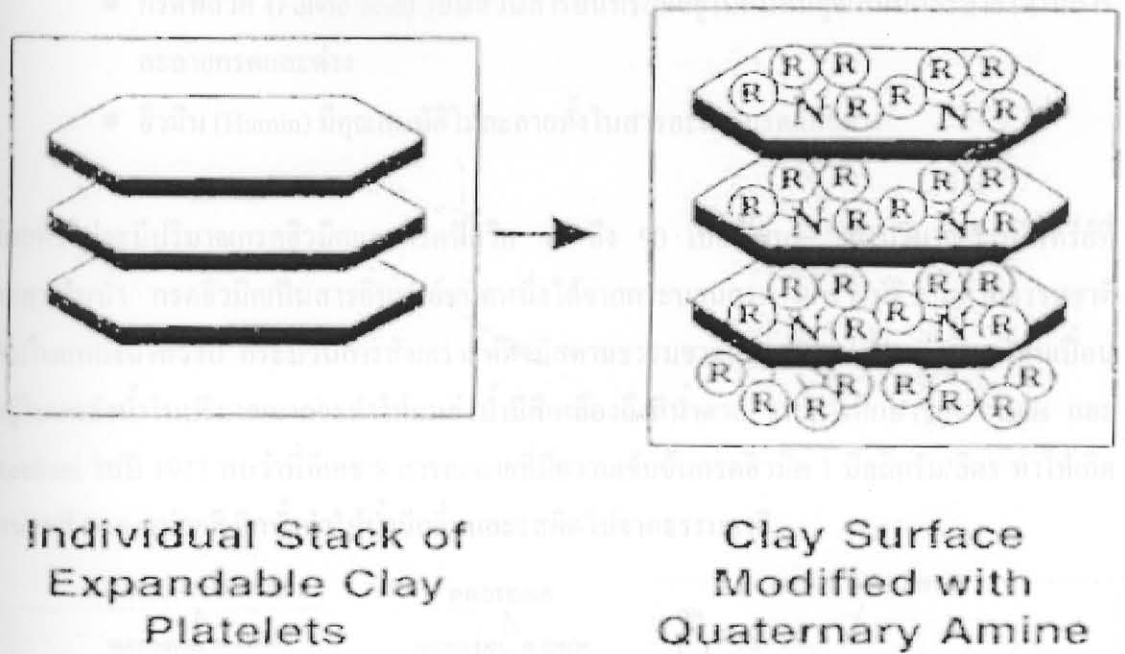
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์ (แสดงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

|                                |       |                               |                               |
|--------------------------------|-------|-------------------------------|-------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 56-60 | MgO                           | 1.5-2.0                       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 16-18 | CaO                           | 1.9-2.1                       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5-7   | K <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.3-0.5                       |
| Na <sub>2</sub> O              | 2.4-3 | TiO <sub>2</sub>              | 1.2-1.5                       |
| LOI <sup>αα</sup>              | 11-12 | CEC*                          | 0.8 meq./g of Montmorillonite |

\*CEC= ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity)

<sup>αα</sup>LOI = Loss of Ignition

เนื่องจากมอนต์มอริลโลไนต์จากแต่ละแหล่งจะมีสมบัติแตกต่างกันออกไป การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์บางครั้งจึงเป็นเรื่องจำเป็นเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ดูดซับสารปนเปื้อนที่ต่างชนิดกันในน้ำ เช่น การขยายโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์โดยกระบวนการ Pillaring ทำให้มอนต์มอริลโลไนต์สามารถดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำที่มีขนาดใหญ่ได้ หรือ การแลกเปลี่ยนประจุบวกที่มีอยู่ตามธรรมชาติของมอนต์มอริลโลไนต์กับสารลดแรงตึงผิวประเภท QACs (Quarternary Ammonium Cations) เพื่อเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ (from hydrophilic to organophilic) ให้เหมาะกับการดูดซับสารอินทรีย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การปรับเปลี่ยนพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติด้วย QACs

### 2.3 กรดฮิวมิก (Humic Acid)

สารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ (Organic contaminatants) แบ่งเป็น 3 กลุ่ม (ปิยรัตน์ สารวงค์ 2545) คือ

- Natural Organic Matter (NOM) ประกอบด้วย Humic substance, Microbial exudates และสารอื่นที่ละลายในน้ำจากแหล่งกำเนิด เช่น เนื้อเยื่อพืชและของเสียจากสัตว์
- Synthetic Organic Chemicals (SOCs) ประกอบด้วย ยาฆ่าแมลง, Volatile organic chemical (VOCs) และสารเคมีสังเคราะห์ตัวอื่น
- Chemical by-Product and additives ที่เข้ามาหรือเกิดขึ้นในน้ำระหว่างการบำบัด (Treatment System) หรือในระบบจ่ายน้ำ (Distribution System)

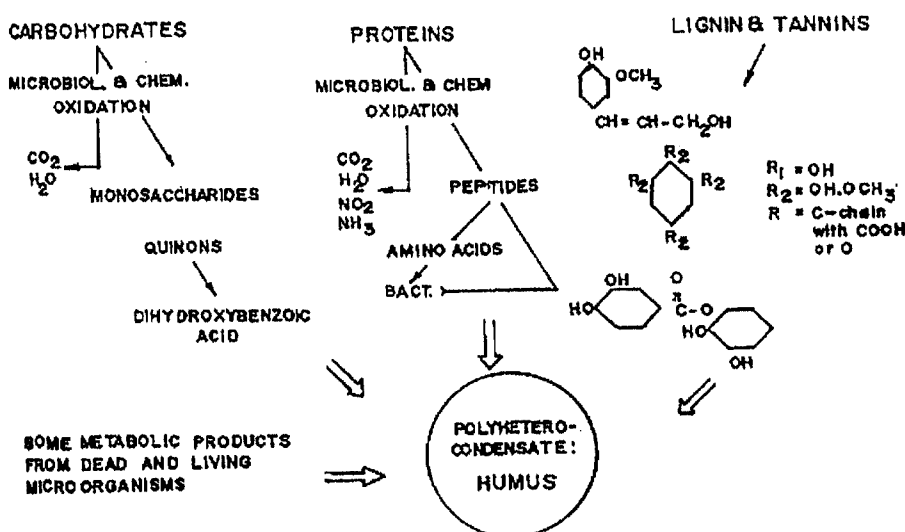
สารอินทรีย์ที่พบมากในแหล่งน้ำตามธรรมชาติคือสารฮิวมิก (Humic substance) ส่วนใหญ่พบในรูปกรดฮิวมิก (Humic Acid) ที่เกิดจากการย่อยสลายของซากพืชซากสัตว์ตามขบวนการทางธรรมชาติ และจากการใช้ประโยชน์ในหลายลักษณะเช่น ทางการเกษตรใช้เป็นสารเพิ่มผลผลิต สารฮิวมิกสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

- กรดฮิวมิก เป็นส่วนที่พบมากของสารอินทรีย์ที่อยู่ในดิน มีคุณสมบัติละลายได้ในน้ำ แต่ไม่ละลายในสภาวะที่เป็นกรดที่มีพีเอชต่ำกว่า 2 หรือในเอทานอล



- กรดฟัลวิก (Fulvic acid) เป็นส่วนสารอินทรีย์ที่อยู่ในดินที่มีคุณสมบัติละลายได้ในสารละลายกรดและด่าง
- ฮิวมิน (Humins) มีคุณสมบัติไม่ละลายทั้งในสารละลายกรดและด่าง

โดยทั่วไปจะมีปริมาณกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก 40 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำ กรดฮิวมิกเป็นสารอินทรีย์ชนิดหนึ่งได้จากกระบวนการสังเคราะห์ฮิวมัสตามธรรมชาติ พบในแหล่งน้ำทั่วไป กระบวนการสังเคราะห์ฮิวมัสตามธรรมชาติแสดงดังรูปที่ 3 ถ้าสารนี้ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำในปริมาณมากจะพื้อให้แหล่งน้ำมีสีเหลืองถึงสีน้ำตาล จากการศึกษาของ Nakis และ Rebbum ในปี 1977 พบว่าที่พีเอช 8 สารละลายที่มีความเข้มข้นกรดฮิวมิก 1 มิลลิกรัม/ลิตร ทำให้เกิดหน่วยสี 26.5 หน่วยสี อีกทั้งทำให้น้ำมีกลิ่นและรสผิดไปจากธรรมชาติ



รูปที่ 2.4 กระบวนการสังเคราะห์ฮิวมัสตามธรรมชาติ

การเกิดปฏิกิริยาหรือการรวมตัวเป็นสารประกอบฮิวมิกไม่เป็นที่แน่ชัด แต่ละโมเลกุลของกรดฮิวมิกมีโครงสร้างซับซ้อนไม่แน่นอน แต่มีผู้ทำการศึกษาคือ Davies และ Ghabbour ปี 1999 พบว่าสูตรโครงสร้างกรดฮิวมิกคือ  $C_36H_{30}O_{15}N_2 \cdot xH_2O$  เมื่อค่า x อยู่ระหว่าง 0 ถึง 15 มีขนาดโมเลกุลอยู่ระหว่าง 60 ถึง 100 อังสตรอม (Fitch and Du, 1996) กรดฮิวมิกจะประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิลิก (carboxylic: -COOH) และหมู่เอไมด์ (amide: -N(OH)) เกาะกันอยู่ดังนั้นจึงมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และส่วนไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะรวมกับสารประกอบเชิงซ้อน NOCs (nonionic organic compounds) ขณะที่ส่วนชอบน้ำจะรวมตัวกับแร่ที่มีพื้นผิวเป็นบวก ในสารประกอบที่เป็นกรด หมู่เอไมด์จะรับประจุบวกกลายเป็น (-N(OH)H<sub>2</sub><sup>+</sup>) ทำให้กรดฮิวมิกมีสมบัติเป็นบวก แต่สถานะที่เป็นกลางหรือเป็นด่างหมู่คาร์บอกซิลิกจะสูญเสียประจุบวกกลายเป็น (-COO<sup>-</sup>)





รูปที่ 2.5 โมเดลของฮิวมิก

กรดฮิวมิกมีลักษณะที่สำคัญคือมีความคงตัวสูง ปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่มีมาตรฐานสำหรับความเข้มข้นกรดฮิวมิกที่ยอมให้ปนเปื้อนในน้ำได้ แต่ในบางประเทศ เช่น สาธารณรัฐเชกมีการกำหนดให้ ความเข้มข้นกรดฮิวมิกที่ยอมให้ปนเปื้อนในน้ำได้ไม่เกิน 2.5 mg/L การกำจัดกรดฮิวมิก ออกจากน้ำ ไม่สามารถกำจัดได้โดยวิธีการทางชีวภาพ ดังนั้นวิธีการกำจัดกรดฮิวมิกสามารถกำจัดได้ด้วยวิธีทาง กายภาพ เช่น กระบวนการดูดซับ

กรดฮิวมิกและกรดฟัลวิกสามารถทำปฏิกิริยากับคลอรีนซึ่งมีอยู่ทั่วไปในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย เกิดเป็นสารไตรฮาโลมีเทน สมการการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้คือ



รูปที่ 2.6 การเกิดสารไตรฮาโลมีเทน

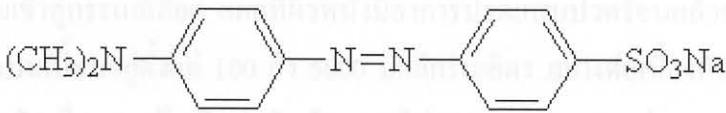
สาร THMs มีอันตรายต่อสุขภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งคลอโรฟอร์มซึ่งมีรายงานว่าทำให้เกิดมะเร็งใน สัตว์ทดลอง สำนักงานสิ่งแวดล้อมแห่งชาติสหรัฐอเมริกา (US.EPA) กำหนดค่าการปนเปื้อนสูงสุด (Maximum Contamination Level; MCL) สำหรับสารในกลุ่ม THMs ไว้ไม่เกิน 100 ไมโครกรัม/ลิตร

## 2.4 สีขุ่น

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอหรืออุตสาหกรรมฟอกย้อมสีจะทำให้เกิดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของสีอินทรีย์ ที่ปนเปื้อนมากับน้ำ ทำให้ทั้งพื้นที่ไม่ได้เพราะกฎหมายกำหนดไว้ว่าน้ำทิ้งต้องมีสีที่ไม่เป็นที่พึงรัง เกียจ เพราะสีของน้ำมีผลสิ่งมีชีวิตในน้ำและการนำน้ำจากแหล่งมาใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น น้ำใน การทำน้ำประปาที่องค์การอนามัยโลกกำหนดไว้ว่าต้องน้อยกว่า 300 หน่วยสี (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2536) นอกจากนี้มาตรฐานน้ำดื่มถูกกำหนดโดยองค์การอนามัยโลกยอมให้มีค่าสูงสุดได้ 50 หน่วยสี และมาตรฐานการประปานครหลวง ยอมให้มีค่าสีสูงสุด 20 หน่วยสี ดังนั้น โครงการนี้จึง ศึกษาความสามารถของ มอนต์มอริลโลไนต์ ในการกำจัดสีอินทรีย์ 2 ชนิดจากน้ำ คือ เมทิลออเรนจ์ (Methyl Orange) ซึ่งเป็นสีอินทรีย์ที่มีประจุลบ และ เมทิลีนบลู (Methylene Blue) ซึ่งเป็นสีอินทรีย์ที่ มีประจุบวก

### เมทิลออเรนจ์ (methyl orange)

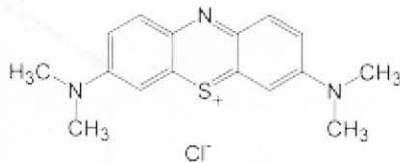
เมทิลออเรนจ์เป็นสารอินทรีย์ที่มีสีและมีประจุลบ สูตรเคมีคือ  $C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$  ลักษณะโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.7 อาจเรียกได้หลายชื่อดังนี้ C.I. Acid Orange 52, C.I. 13025, Halianthine B, Orange III, Gold Orange และ Tropaeolin ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุล 327.34 ทางวิทยาศาสตร์จะใช้เมทิลออเรนจ์เป็นตัวบ่งชี้ (indicator) ในการไทเทรตด้วยกรดแก่โดยจะเปลี่ยนจากสีแดง (ที่พีเอช 3.1) ไปเป็นสีส้มถึงสีเหลือง (ที่พีเอช 4.4) เนื่องมาจากการแตกตัวของไอออนไฮโดรเจน สารชนิดนี้พบในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมย้อมสีและการพิมพ์ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติและมีผลกระทบต่อร่างกายคือ ทางระบบทางเดินหายใจจะมีอาการไอและหายใจติดขัด ระบบทางเดินอาหารทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน อาจมีอาการท้องร่วงได้ เกิดการระคายเคืองผิวหนังแต่จะไม่รุนแรงมาก เมื่อสัมผัสกับดวงตาจะเกิดการระคายเคืองทำให้ตาแดงและก่อให้เกิดทัศนียภาพที่ไม่ดี (ปิยะภรณ์ จารวงศ์ 2545)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเมทิลออเรนจ์

### เมทิลีนบลู (methylene blue)

เมทิลีนบลูเป็นสารอินทรีย์ที่มีสีและมีประจุบวกมีสูตรโมเลกุล  $C_{16}H_{18}ClN_3S$  ลักษณะโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.8 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

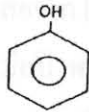


รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเมทิลีนบลู

## 2.5 Phenolic compounds

### ฟีนอล (phenol)

คือแอลกอฮอล์ที่มีลักษณะเป็นวง (aromatics alcohol) มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กรดคาร์บอริก สูตรโมเลกุลคือ  $C_6H_5OH$  ประกอบด้วยวงเบนซีนหนึ่งวง ลักษณะโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.9 มีพื้นที่ผิว  $0.255 \times 10^{-8}$  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 มิลลิกรัม/ลิตร อย่างต่อเนื่องกันจะเป็นอันตรายถึงชีวิตได้ภายใน 14 วันเนื่องจากเป็นพิษต่อตับ ไต และไปก่ระบบประสาทส่วนกลาง (สุชาติา ชินะจิตร 2545) องค์การอนามัยโลก (World Health Organization) ได้กำหนดมาตรฐานปริมาณฟีนอลในน้ำได้ไม่เกิน 0.002 มิลลิกรัม/ลิตร



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของฟีนอล



### โมนอคลอโรฟีนอล (monochlorophenol)

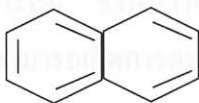
โมนอคลอโรฟีนอลเป็นสารมีพิษที่ไม่มีสี มีกลิ่นเหม็น ประกอบด้วยวงเบนซินหนึ่งวง ลักษณะโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.10 โมนอคลอโรฟีนอลจะมีอันตรายต่อระบบในร่างกาย ปกติแล้ว จะใช้โมนอคลอโรฟีนอลในสารประกอบที่เกี่ยวกับการกำจัดแบคทีเรีย เห็ด รา แมลง และวัชพืช ความเป็นพิษของโมนอคลอโรฟีนอลมีพิษมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิมากขึ้น และเมื่อค่าพีเอชมีค่าลดลง



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของโมนอคลอโรฟีนอล

### 2.6 แนฟทาลีน (Naphthalene)

แนฟทาลีนคือสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอนที่มีวงเบนซินหลายวง (polyaromatic hydrocarbon) แนฟทาลีนประกอบด้วยวงเบนซิน 2 วง มีสูตรโมเลกุลคือ  $C_{10}H_8$  ลักษณะโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.11 เป็นสารที่ไม่ชอบน้ำและเป็นพวกไม่มีขั้ว สารชนิดนี้เป็นหนึ่งในสารที่มีขนาดใหญ่ที่ไม่มีไอออนที่พบในดิน การตกตะกอนของผิวหนังของดิน และน้ำใต้ดิน ในธรรมชาติพบในน้ำมันดิบ creosote ทาร์ของถ่านหิน และถ่านหิน พบในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหลายชนิดเช่น โรงงานผลิตยาฆ่าแมลง โรงงานเคมีภัณฑ์ต่างๆ เป็นต้น เมื่อปี พ.ศ. 2529 กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและพลังงานได้กำหนดปริมาณแนฟทาลีนที่เป็นอันตรายต่อชีวิตไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อได้รับสารชนิดนี้จะเกิดอันตรายต่อระบบหายใจ เช่น ปอด หรือหลอดลม เนื่องจากสารชนิดนี้เข้าไปทำลายเนื้อเยื่อต่างๆ นอกจากนี้ในการทดลองพบว่าสารชนิดนี้เป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์และมีผลต่อสุขภาพของคน



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของแนฟทาลีน

## 2.7 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นการแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซโดยให้สารละลายหรือก๊าซผสมไหลสัมผัสกับตัวดูดซับ องค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิวและเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน ปฏิกิริยาการดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับเอง คุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับนั้น จำนวนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวและขนาดของรูพรุนที่ทำหน้าที่ดูดซับได้ จึงสามารถแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกได้ โดยเลือกตัวดูดซับให้เหมาะกับองค์ประกอบนั้น กลไกการดูดซับมี 2 ลักษณะ คือ

### ก. การดูดซับทางกายภาพ

เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ถูกดูดซับ ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย ดังนั้นองค์ประกอบที่ยึดเกาะแน่นบนผิวของตัวดูดซับ ถ้าตัวดูดซับมีความพรุนสูง ของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่นนั้นจะสามารถซึมผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในของตัวดูดซับได้ ถึงแม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอขององค์ประกอบนั้นก็ตาม ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติ ให้ความร้อนออกมาเล็กน้อย แต่มากกว่าความร้อนของการควบแน่น ขึ้นโดยตรงกับความดันย่อยของก๊าซหรือของเหลวชนิดนั้นและสามารถดูดซับก๊าซและของเหลวไว้ได้ในปริมาณสูงมากต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เมื่อลดความดันของระบบลงหรือเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง ทำให้ตัวดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับ ปฏิกิริยาช่วงนี้เรียกว่า Desorption ซึ่งเป็นวิธีการนำตัวถูกดูดซับกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

### ข. การดูดซับทางเคมี

เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพทุกประการ โดยที่จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ต้องการดูดซับสร้างสารประกอบระหว่างตัวดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับ ทำให้ปริมาณของตัวดูดซับลดลง จะให้ความร้อนออกมาสูงมากเพราะการเกิดปฏิกิริยาเคมีไม่ขึ้นกับความดันมากนัก และดูดซับตัวถูกดูดซับได้ในปริมาณน้อยต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เนื่องจากการดูดซับโดยเกิดปฏิกิริยาเคมีจะไม่สามารถเกิด Desorption ได้ เพราะองค์ประกอบและสถานะแวดล้อมที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าองค์ประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็นำสามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้

## สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium and Adsorption Isotherm)

ในเวลาที่เกิดการดูดซับหรือสภาพที่ตัวถูกละลายเคลื่อนที่ออกจากสารละลายและก่อให้เกิดความเข้มข้นเพิ่มขึ้นที่ผิวหน้าของของแข็งจะเป็นภาวะสมดุลพลศาสตร์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของของแข็งที่ภาวะสมดุล (Adsorption

Equilibrium) เป็นร้อยละของน้ำหนัก หรือน้ำหนัก หรือปริมาตรของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับไว้บนตัวดูดซับหนึ่งหน่วยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท ซึ่งอาจแสดงได้โดยการสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นหรือปริมาตรของตัวถูกดูดซับแบบไอโซเทอม (Adsorption Isotherm) ซึ่งเป็นแบบที่นิยมมากที่สุด ซึ่งกราฟนี้อธิบายการกระจายตัวของตัวถูกละลายระหว่างเฟสของของเหลวและของแข็งได้ที่จุดสมดุลและจะเป็นฟังก์ชันกับความเข้มข้นของตัวทำละลาย คุณสมบัติของตัวทำละลาย หรือความเข้มข้นและสมบัติตัวถูกละลาย การกระจายตัวในรูปความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล การแสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงของการดูดซับ เมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเปลี่ยนไปที่อุณหภูมิคงที่นี้ โดยทั่วไปจำนวนของสารที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น แต่อาจจะไม่แปรผันเป็นเส้นตรง

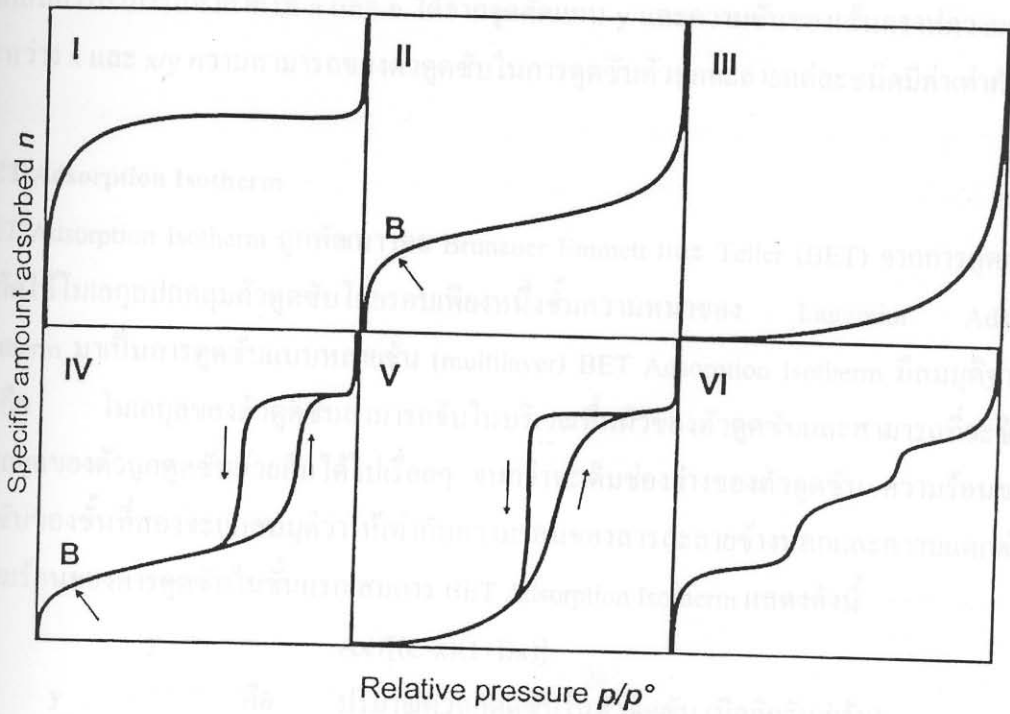
### รูปแบบของ Adsorption Isotherm

มี 5 รูปแบบ (McCabe et al., 1993) คือ

1. Type I Isotherm (รูปที่ 2.12) เป็นการดูดซับที่พบมากที่สุด ซึ่งดูดซับ โดยที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับคลุมบนผิวของตัวดูดซับได้หนาเพียงหนึ่งชั้น (Single Layer Adsorption) พบทั้งในการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ จะเป็นปรากฏการณ์การดูดซับของ Microporous Powders ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative Pressure) ต่ำ ๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูง ๆ เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยซึ่งถ้ามีการดูดซับแบบนี้แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีรูพรุนเป็น Microporous และมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวภายนอกของผลิตภัณฑ์
2. Type II Isotherm (รูปที่ 2.12) พบมากในการดูดซับที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับคลุมผิวของตัวดูดซับหนาขึ้นเรื่อย ๆ (ปริมาณที่ถูกดูดซับเข้าสู่ค่านันต์) 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
3. Type III Isotherm เป็นการดูดซับคล้าย Type II Isotherm แต่การดูดซับของชั้นแรกนั้นให้ความร้อนออกมาน้อยกว่าความร้อนของการควบแน่น เป็นลักษณะเฉพาะของการเกิดความร้อนของการดูดซับ (Heat of Adsorption) มีน้อยกว่าความร้อนของการจับตัวกันของตัวถูกดูดซับของของเหลว ดังนั้นการดูดซับที่เพิ่มขึ้น เกิดเพราะตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากับชั้นของตัวถูกดูดซับมากกว่าการเกิดปฏิกิริยากับผิวของตัวถูกดูดซับ

4. Type IV Isotherm (รูปที่ 2.12) เป็นการดูดซับคล้ายกับ Type II Isotherm ความหนาของโมเลกุลชั้นแรก ๆ แต่การดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัวเนื่องจากรูพรุนเล็ก ๆ ภาพในตัวดูดซับเต็มหมดแล้ว เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดบนตัวดูดซับรศมีประมาณ 15-1000 อังสตรอม ความชันที่มีจุดเปลี่ยนกราฟนี้เกิดเช่นเดียวกับใน Type II Isotherm คือเกือบเป็น Mono Layer สมบูรณ์

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



รูปที่ 2.12

รูปแบบของ Adsorption Isotherm

ที่มา:

หนังสือ Adsorption by Powders and Polus Solids (19), Rouquerol, Rouquerol and Sing, 1999, London: ACADEMIC PRESS.



## Langmuir Adsorption Isotherm

แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$y = (ax)/(1+bx)$$

สามารถจัดใหม่ได้เป็น

$$(x/y) = (1/a) + (bx/a)$$

เมื่อ  $x$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สมดุลหลังการดูดซับ(mg/L)

$y$  = ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ(mg/ g of adsorbent)

$a, b$  = ค่าคงที่

จากสมการสามารถหาค่าคงที่  $a$  และ  $b$  ได้จากจุดตัดแกน  $y$  และความชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $x$  และ  $x/y$  ความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับตัวถูกละลายแต่ละชนิดมีค่าเท่ากับ  $a/b$

## BET Adsorption Isotherm

BET Adsorption Isotherm ถูกพัฒนาโดย Brunauer Emmett และ Teller (BET) จากการดูดซับที่ถูกจำกัดให้โมเลกุลปกคลุมตัวดูดซับโดยรอบเพียงหนึ่งชั้นความหนาของ Langmuir Adsorption Isotherm มาเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer) BET Adsorption Isotherm มีสมมุติฐานเบื้องต้นคือ โมเลกุลของตัวดูดซับสามารถจับในบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับและสามารถที่จะซ้อนทับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับด้วยกันได้ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะเต็มช่องว่างของตัวดูดซับ ความร้อนของการดูดซับของชั้นที่สองจะถูกสมมุติว่าให้เท่ากับความร้อนของสารละลายข้างนอกและความแตกต่างของความร้อนของการดูดซับในชั้นแรก สมการ BET Adsorption Isotherm แสดงดังนี้

$$y = Ax / [(C-x)(1+Bx)]$$

เมื่อ  $y$  คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับในตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

$x$  คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)

$A, B$  และ  $C$  คือ ค่าคงที่

จัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$x/y = C/A + [(BC-1)/A]x - (B/A)x^2$$

เมื่อพล็อตค่า  $x/y$  กับ  $x$  จะได้สมการกำลังสองดังนี้

$$x/y = a + bx - cx^2$$

เมื่อค่า  $a$   $b$  และ  $c$  จะมีค่าบวกทั้งหมด จะได้

$$b = [A^2ac-1]/A$$

ดังนั้นค่า  $A$  จะหาได้จากรากของสมการกำลังสอง

$$A^2ac - Ab - 1 = 0$$



และค่าของ B และ C คือ  $B = Ac$  และ  $C = Aa$

### Freundlich Adsorption Isotherm

แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$y = kx^{1/n}$$

เมื่อ  $k$  และ  $n$  คือค่าคงที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยทั่วไป  $n$  มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1-5

สมการ Freundlich Adsorption Isotherm สามารถจัดรูปแบบสมการใหม่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\log y = \log k + (1/n) \log x$$

จากสมการสามารถหาค่าคงที่  $k$  และ  $n$  ได้จากจุดตัดแกน  $y$  และความชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log x$  และ  $\log y$  โดยทั่วไปค่า  $k$  มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ค่า  $n$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

ส่วนประกอบอื่น ๆ ของงานทดลอง ได้แก่ การทดลองในส่วนที่สามเป็นการศึกษาอิทธิพลของระบบการดูดซับสารอินทรีย์ 6 ชนิด โดยใช้ตัวดูดซับ 3 ชนิด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2 ระดับ รวมการทดลองในส่วนที่สามนี้ 60 หน่วยการทดลอง ส่วนที่สี่เป็นการศึกษาอิทธิพลของระบบการดูดซับสารอินทรีย์ 6 ชนิด โดยใช้ตัวดูดซับ 1 ชนิด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ อุณหภูมิของระบบการดูดซับแตกต่างกัน 3 อุณหภูมิ รวมการทดลองในส่วนที่สาม 90 หน่วยการทดลอง ส่วนที่ห้าเป็นการศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่าง (ค่า pH) ของระบบการดูดซับสารอินทรีย์ 6 ชนิด โดยใช้ตัวดูดซับ 1 ชนิด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ และปรับเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบ 3 ค่า รวมการทดลองในส่วนที่สี่ 90 หน่วยการทดลอง ดังนั้นโดยรวมค่าการทดลองทั้งหมด 60+300+90+90 = 540 หน่วยการทดลอง

### 3.1 จำนวนที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.1.1 ตัวแปรอิสระ

- ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอินทรีย์
- ค่าพีเอชของสารละลายอินทรีย์

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 รูปแบบการทดลองและสถานที่ทำการทดลอง

การศึกษาการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำโดยใช้มอนต์มอริลโลไนต์ ใช้รูปแบบการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการดูดซับสารอินทรีย์ของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวแล้วเป็นตัวดูดซับ สถานที่ทำการทดลองคือ อาคารศูนย์เครื่องมือ 1 อาคารศูนย์เครื่องมือ 2 และอาคารศูนย์เครื่องมือ 5 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

#### 3.2 ประชากรศึกษาและขนาดตัวอย่าง

การศึกษาวิจัยนี้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเป็นตัวอย่างที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดลองแบบกะ และแบ่งการทดลองเป็น 4 ส่วน ส่วนแรกเพื่อศึกษาหาเวลาในการเข้าสู่สมดุลของระบบการดูดซับซึ่งอาจมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของสารอินทรีย์ที่ศึกษา 6 ชนิด ใช้ตัวดูดซับ 5 ชนิด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2 ระดับ รวมการทดลองในส่วนที่หนึ่ง 60 หน่วยการทดลอง

การทดลองส่วนที่สองเป็นการศึกษาระบบการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ โดยดูดซับสารอินทรีย์ 6 ชนิด ใช้ตัวดูดซับ 5 ชนิด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับโดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง รวมการทดลองในส่วนที่สอง 300 หน่วยการทดลอง

ส่วนที่สามเป็นการศึกษาอิทธิพลต่อระบบการดูดซับสารอินทรีย์ 6 ชนิด โดยใช้ตัวดูดซับ 1 ชนิด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ อุณหภูมิของระบบการดูดซับแบบกะ 3 อุณหภูมิรวมการทดลองในส่วนที่สาม 90 หน่วยการทดลอง

ส่วนที่สี่เป็นการศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่าง (ค่า pH) ต่อระบบการดูดซับสารอินทรีย์ 6 ชนิด โดยใช้ตัวดูดซับ 1 ชนิด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ และปรับเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบ 3 ค่า รวมการทดลองในส่วนที่สี่ 90 หน่วยการทดลอง

ดังนั้นในรวมทำการทดลองทั้งหมด  $60+300+90+90 = 540$  หน่วยการทดลอง

#### 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.3.1 ตัวแปรอิสระ

- ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอินทรีย์
- ค่าพีเอชของสารละลายอินทรีย์
- อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง
- ชนิดของตัวดูดซับ

### 3.3.2 ตัวแปรควบคุม

- ระยะเวลาในการเขย่า
- ความเร็วรอบของการเขย่า
- ระยะเวลาในการปั่นเหวี่ยง
- ความเร็วรอบของการปั่นเหวี่ยง

### 3.3.3 ตัวแปรตาม

- ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์จากน้ำ

## 3.4 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

### 3.4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- เครื่อง Micromeritics ASAP 2010 วัดค่า BET surface area โดยวัดปริมาณการดูดซับ  $N_2$
- เครื่อง Bruker D5005 system โดยใช้  $CuK\alpha$  radiation เพื่อวัด X-Ray diffraction (XRD)
- เครื่องวัดขนาดอนุภาค
- เครื่องปั่นเหวี่ยงแยก รุ่น UNIVERSAL 30 RF ของ Hettich
- เครื่อง UV spectrophotometer รุ่น Cary 5E ของ Varian
- เครื่องเขย่าแนวราบ รุ่น 3006 ของ GRL
- เครื่องเขย่าแนวราบแบบควบคุมอุณหภูมิ รุ่น 3006 ของ GRL รุ่น SWB 5050 Shaking Water Bath ของ National Labnet Company
- ชุดกรองสูญญากาศ ของ Sartorius
- เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH meter) รุ่น CG840 ของ SCHOTT
- เครื่องวัดการนำไฟฟ้า รุ่น inoLab Cond Level 2 ของ WTW
- เครื่องชั่งไฟฟ้าอย่างละเอียด 2 ตำแหน่ง
- เครื่องชั่งไฟฟ้าอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง

### 3.4.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทไทยนิปปอนเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม
- กรดฮิวมิก (Humic acid)
- เมทิลออเรนจ์ (Methyl orange)
- เมทิลีนบลู (Methylene blue)

- ฟีนอล (Phenol)
- โมโนคลอโรฟีนอล (3-monochlorophenol) ของบริษัท Fluka Chemie
- แนฟทาลีน (Naphthalene)
- Tetramethylammonium chloride ของบริษัท Fluka Chemie
- Hexadecyltrimethylammonium bromide ของบริษัท Fluka Chemie
- Tetradecyltrimethylammonium bromide ของบริษัท Fluka Chemie
- Benzylidimethylhexadecylammonium chloride ของบริษัท Fluka Chemie
- สารเคมีที่ใช้ปรับค่าพีเอช
  - HCl 0.1 M
  - NaOH 0.1 M

### 3.5 วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล

#### 3.5.1 วิธีการวัดปริมาณตัวถูกละลายอินทรีย์

ในการวิจัยนี้เลือกใช้หลักการวัดสีตามหลักการของ Beer's Law ที่กล่าวว่า สำหรับสารหนึ่งๆ ค่าการดูดกลืนแสงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของทางเดินแสง (Light Path Length) และความเข้มข้นของสารนั้นๆ ดังนั้นแสงที่ลอดผ่านสารละลายจะถูกตรวจวัดค่าความเข้มในรูปของการส่องผ่าน (Transmittance) หรือ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance; Abs)) เครื่องมือที่ใช้ คือ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ วิธีวิเคราะห์ดังนี้

- (1) เตรียมสารละลายมาตรฐาน 1 กรัม/ลิตร (ยกเว้น แนฟทาลีน 0.03 กรัม/ลิตร)
- (2) เตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้ความสัมพันธ์

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

โดยที่  $C_1$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอินทรีย์

$V_1$  = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานสารอินทรีย์ที่ต้องใช้

$C_2$  = ความเข้มข้นสารละลายอินทรีย์ที่ต้องการ

$V_2$  = ปริมาตรของสารที่ต้องการเตรียม

- (3) อ่านค่าดูดกลืนแสง (Absorbance: Abs) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ แล้วแต่ชนิดของสารอินทรีย์ที่ศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความยาวคลื่นสำหรับการดูดกลืนแสงของสารละลายอินทรีย์ที่ศึกษา

| สาร           | ความยาวคลื่น (นาโนเมตร) |
|---------------|-------------------------|
| กรดฮิวมิก     | 400                     |
| เมทริลออเรนจ์ | 463.33                  |
| เมทริลีนบลู   | 698                     |
| ฟีนอล         | 268.89                  |
| คลอโรฟีนอล    | 277                     |
| แนฟทาลีน      | 275                     |

นำผลที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่าง Abs กับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ได้กราฟมาตรฐานดังแสดงในภาคผนวก ก

- (4) การวัดปริมาณสารอินทรีย์ของการทดลอง นำสารละลายอินทรีย์ส่วนที่ใสมาวัดค่า Abs
- (5) นำค่า Abs ไปเทียบหาความเข้มข้นสีจากกราฟมาตรฐาน

### 3.5.2 การปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์โดยใช้ QACs

สารอินทรีย์ประเภท Quaternary Ammonium Compounds (QACs) ที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ได้แก่ tetramethylammonium chloride ( $C_4H_{12}ClN$ ), hexadecyltrimethylammonium bromide ( $C_{19}H_{42}BrN$ ), tetradecyltrimethylammonium bromide ( $C_{17}H_{38}NBr$ ) และ benzyldimethylhexadecylammonium chloride ( $C_{25}H_{46}ClN$ ) ซึ่งสารเหล่านี้จะมีความยาวของหมู่อัลคิลและขนาดโมเลกุลต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สารอินทรีย์ QACs ที่ใช้ปรับเปลี่ยนพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์

| ชื่อสารอินทรีย์                 | ชื่อย่อ | น้ำหนักโมเลกุล | สูตรเคมี                                       |
|---------------------------------|---------|----------------|--|
| Tetramethylammonium             | TMA     | 74             | $(CH_3)_4N^+$                                  |
| Hexadecyltrimethylammonium      | TDMA    | 286            | $[CH_3(CH_2)_{13}](CH_3)_3N^+$                 |
| Tetradecyltrimethylammonium     | HDTMA   | 314            | $[CH_3(CH_2)_{15}](CH_3)_3N^+$                 |
| Benzyldimethylhexadecylammonium | BDHDMA  | 361            | $[CH_3(CH_2)_{15}]N^+(CH_3)_2$<br>$CH_2C_6H_6$ |

(1) คำนวณหาปริมาณ Tetramethylammonium chloride (TMA) ที่ต้องใช้ปรับประจุพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ 20 กรัม โดยคำนวณจาก

มอนต์มอริลโลไนต์ 1 กรัม มีประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) 0.8 meq.

มอนต์มอริลโลไนต์ 20 กรัม มีประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) 32 meq.

MA 1 โมเลกุล มี 1 eq. หรือ 1000 meq. หรือ 109.6 กรัม (น้ำหนักโมเลกุลในรูปของ  $TMA^+Cl^-$ )

ดังนั้น น้ำหนักของ TMA สำหรับ 100% CEC =  $32 \text{ meq.} \times 109.6 \text{ กรัม} / 1000 \text{ meq.} = 3.5072 \text{ กรัม}$

น้ำหนักของ TMA สำหรับ 200% CEC =  $2 \times 32 \text{ meq.} \times 109.6 \text{ กรัม} / 1000 \text{ meq.} = 7.0144 \text{ กรัม}$

(2) นำ TMA ที่คำนวณได้ไปละลายน้ำกลั่น 1 ลิตร

(3) สารละลายที่ได้นำไปเขย่าวรวมกับมอนต์มอริลโลไนต์เป็นเวลา 1 คืน

(4) ล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่าการนำไฟฟ้าเหลือน้อยกว่า 1.5  $\mu S$

(5) กรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ แล้วปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดให้ละเอียดจะได้มอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวแล้ว (ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า organo-clays) ที่มีชื่อว่า TMA-clays

(6) ในการเตรียม HDTMA-clays, TDMA-clays และ BDHDTMA-clays ทำเช่นเดียวกับ TMA-clays แต่เปลี่ยนชนิดของ QACs ที่ใช้

ทุกขั้นตอนนี้จะได้มอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวแล้วด้วย QACs จำนวน 9 ตัวอย่าง (ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า Organo Clays) ดังนี้

- 100%CEC-TMA clay คือ มอนต์มอริลโลไนต์ที่มี TMA ปริมาณ 1 เท่าของค่า CEC ของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ
- 200%CEC-TMA clay คือ มอนต์มอริลโลไนต์ที่มี TMA ปริมาณ 2 เท่าของค่า CEC ของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ
- 50%CEC-HDTMA clay คือ มอนต์มอริลโลไนต์ที่มี HDTMA ปริมาณ 0.5 เท่าของค่า CEC ของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ
- 100%CEC-HDTMA clay คือ มอนต์มอริลโลไนต์ที่มี HDTMA ปริมาณ 1 เท่าของค่า CEC ของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ
- 200%CEC-HDTMA clay คือ มอนต์มอริลโลไนต์ที่มี HDTMA ปริมาณ 2 เท่าของค่า CEC ของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ
- 50%CEC-TDMA clay คือ มอนต์มอริลโลไนต์ที่มี TDMA ปริมาณ 0.5 เท่าของค่า CEC ของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

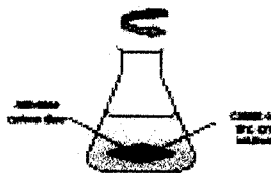
- 100%CEC- TDMA clay คือ มอนต์โมริลโลไนต์ที่มี TDMA ปริมาณ 1 เท่าของค่า CEC ของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ
- 200%CEC- TDMA clay คือ มอนต์โมริลโลไนต์ที่มี TDMA ปริมาณ 2 เท่าของค่า CEC ของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ
- 100%CEC- BDHDMA clay คือ มอนต์โมริลโลไนต์ที่มี BDHDMA ปริมาณ 1 เท่าของค่า CEC ของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

### 3.5.3 การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวแล้ว ดังนี้

- (1) การหาระยะห่างระหว่างชั้น โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวด้วย QACs แล้ว โดยใช้เทคนิค X-Ray diffraction (XRD)
- (2) การหาพื้นที่ผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวด้วย QACs แล้ว โดยใช้ Micromeritics ASAP 2010 เพื่อวัดค่า BET surface area โดยวัดความสามารถในการดูดซับ  $N_2$  ของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวด้วย QACs แล้ว
- (3) การหาขนาดอนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวด้วย QACs แล้วด้วย Laser Particle Size Analyzer

### 3.5.4 การทดลองการดูดซับสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิคงที่

- (1) เตรียมสารละลายอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ
- (2) นำตัวดูดซับเขย่าร่วมกับสารละลายอินทรีย์ในข้อ (1) เป็นเวลา 1 คืน ด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที
- (3) นำสารละลายที่ได้ไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที
- (4) นำสารละลายที่ได้จากการปั่นเหวี่ยงไปวัดค่าการดูดกลืนแสง



รูปที่ 3.1

การทดลองการดูดซับแบบกะ (Batch adsorption)





## บทที่ 4

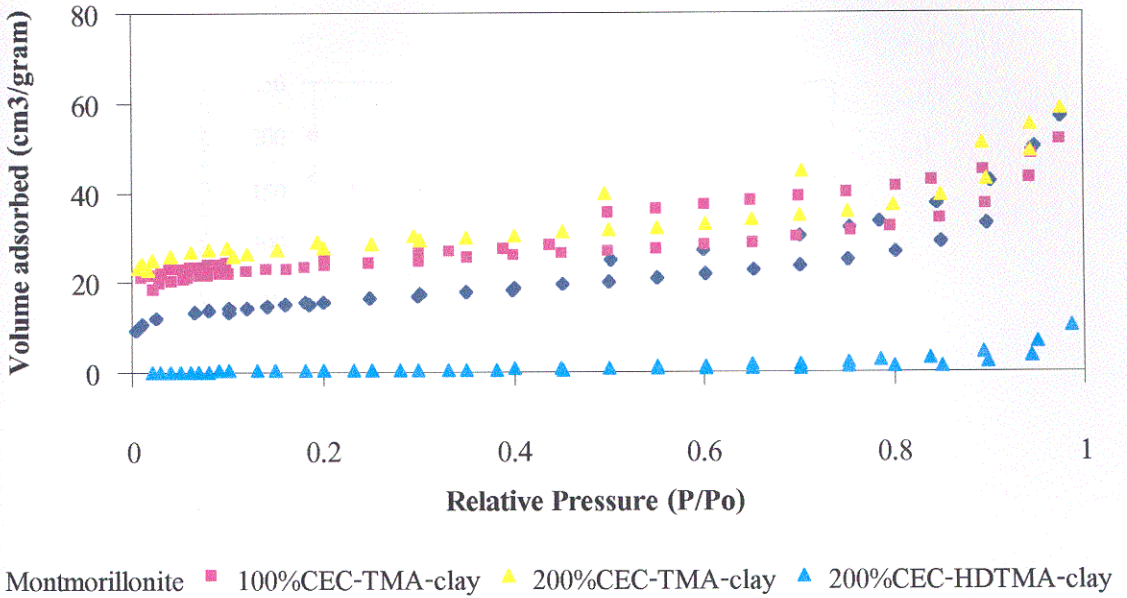
## ผลการวิจัย

## 4.1 ลักษณะทางกายภาพของมอนต์มอริลโลไนต์

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงสมบัติแล้ว

| ชนิดของตัวดูดซับ     | BET surface area<br>( $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ ) | $d_{001}$ spacing<br>( $\text{\AA}$ ) | $2\theta$ | ขนาดอนุภาค<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|----------------------|--|---------------------------------------|-----------|---------------------------------|
| Montmorillonite clay | 49.5   | 13.143                                | 6.72      | 9.7                             |
| 100%CEC-TMA clay     | 82.6   | 14.718                                | 6.00      | 9.22                            |
| 200%CEC-TMA clay     | 97.7   | 14.623                                | 6.04      | 12.72                           |
| 50%CEC-HDTMA clay    | 11.6   | 17.381                                | 5.08      | 27.1                            |
| 100%CEC-HDTMA clay   | 11.2   | 21.325                                | 4.14      | 57.2                            |
| 200%CEC-HDTMA clay   | 2.0  | 22.872                                | 3.86      | 49.1                            |
| 50%CEC-TDMA clay     | 17.6   | 18.019                                | 4.90      | 41.5                            |
| 100%CEC- TDMA clay   | 10.4   | 21.325                                | 4.14      | 50.6                            |
| 200%CEC- TDMA clay   | 7.10   | 21.639                                | 4.08      | 65.2                            |
| 100%CEC- BDHDMA clay | 11.3   | 24.253                                | 3.64      | 72.34                           |

จากตารางที่ 4.1 เห็นว่ามอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย QACs แล้วทุกชนิด ยกเว้น TMA-clays จะมีพื้นที่ผิวลดลงกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ดั้งเดิม เนื่องจาก QACs เข้าไปอยู่ในรูพรุนของมอนต์มอริลโลไนต์ทำให้พื้นที่ผิวอิสระของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติลดลง แต่ TMA-clays จะมีพื้นที่ผิวมากกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ดั้งเดิม เนื่องจาก TMA cations สามารถจับกับน้ำได้ดีทำให้พื้นที่ผิวและ porosity ของมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้น (Kulladapu and Boyd 1995) ซึ่งสอดคล้องกับ  $\text{N}_2$  adsorption-desorption isotherm ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จะเห็นว่า TMA-clays มีความสามารถในการดูดซับก๊าซไนโตรเจนมากกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ดั้งเดิมดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว แต่ 200%CEC-HDTMA clay มีความสามารถในการดูดซับก๊าซไนโตรเจนน้อยกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ดั้งเดิม เนื่องจากมีพื้นที่ผิวลดลง นอกจากนี้  $\text{N}_2$  adsorption-desorption isotherm ของทั้งมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย QACs แล้วจะแสดง hysteresis loop ซึ่งหมายความว่าถึงลักษณะรูพรุนแบบ mesopore (ขนาดของรูพรุน 2-50 นาโนเมตร)



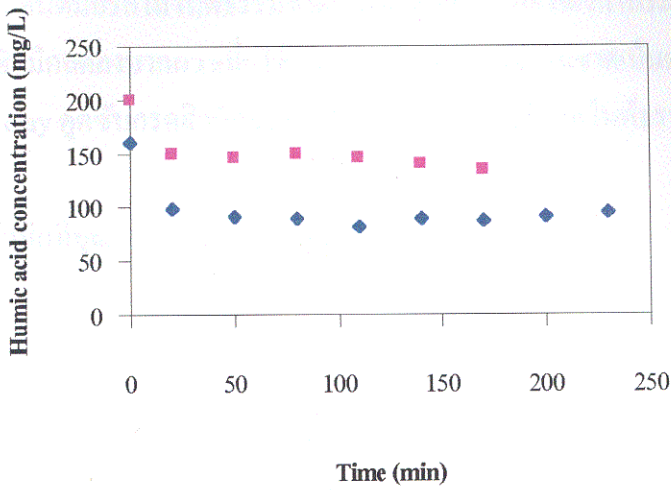
รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย QACs แล้ว

เมื่อดูระยะห่างระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์โดยการทำ XRD จากค่า  $d_{001}$  พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงแล้วด้วยสารอินทรีย์ประเภท QACs จะมีค่า  $d_{001}$  มากขึ้นและค่า  $2\theta$  มีค่าน้อยลงแสดงว่าโมเลกุลของ QACs เข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์และเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ขึ้นอยู่กับขนาดของสารที่นำมาปรับปรุงคุณสมบัติ นั่นคือระยะห่างระหว่างชั้นของ BDHDM-clays > HDTMA-clays > TDMA-clays > TMA-clays ค่า  $d_{001}$  ในตารางที่ 4.1 จะรวมระยะห่างระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์และความหนาของชั้นมอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งความหนาของชั้นมอนต์มอริลโลไนต์เท่ากับ 9.4 Å (Nzengung V.A. et al. 1996) เพราะฉะนั้นช่องว่างระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์จะเท่ากับค่า  $d_{001}$  ลบด้วย 9.4 Å จะเห็นว่าเมื่อปริมาณสารที่ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติมีค่ามากจะทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นมีค่ามากขึ้นจึงทำให้ขนาดของอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น

#### 4.2 ความสามารถของมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับกรดฮิวมิก

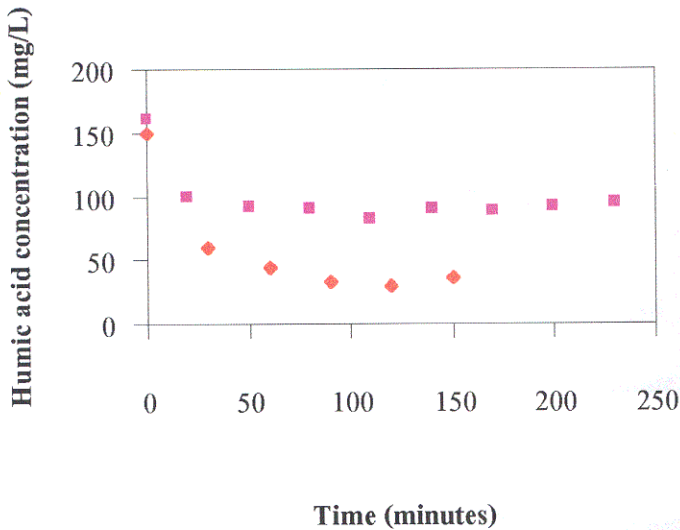
|                     |          |
|---------------------|----------|
| น้ำหนักของตัวดูดซับ | 0.3 กรัม |
| ปริมาตรของกรดฮิวมิก | 250 mL   |

#### 4.2.1 การดูดซับกรดฮิวมิกที่ระยะเวลาการดูดซับต่างๆ



รูปที่ 4.2

ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เวลาต่างๆเมื่อใช้มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ



◆ 100% CEC-HDTMA-clay

■ Montmorillonite

รูปที่ 4.3

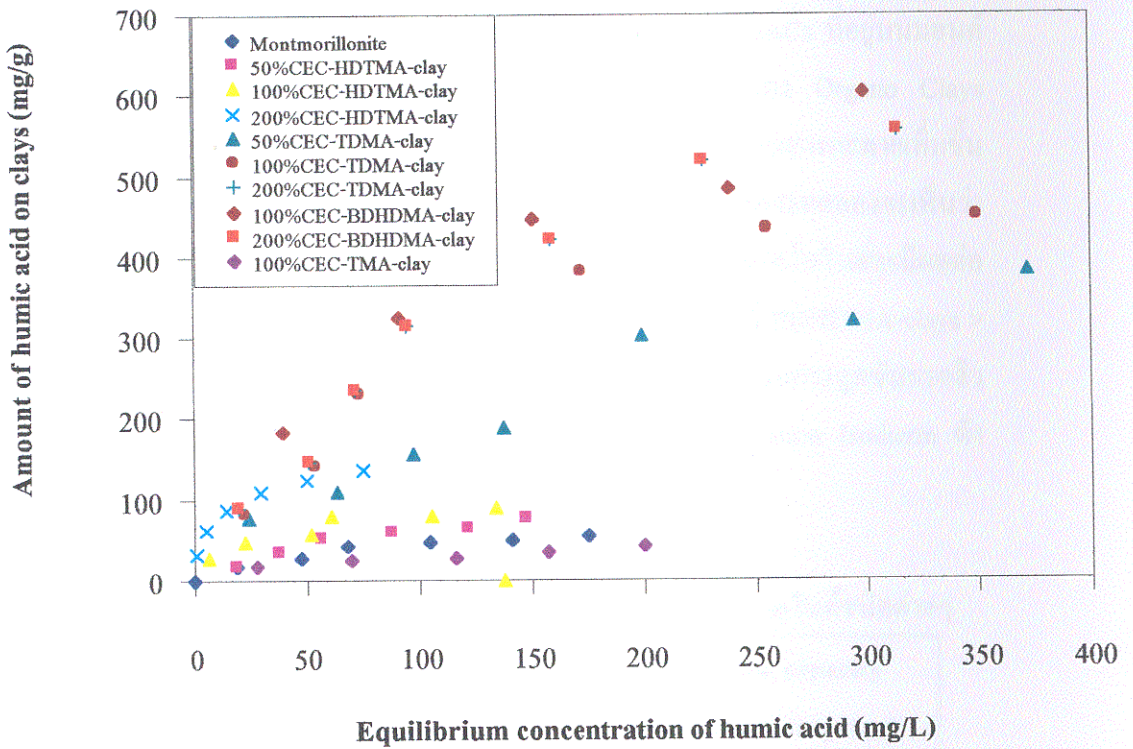
เปรียบเทียบความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เวลาต่างๆเมื่อใช้มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและ Organo Clay (100% CEC-HDTMA clay) เป็นตัวดูดซับ

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับกรดฮิวมิกโดยใช้มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับจะใช้เวลาประมาณ 20 นาที แม้ว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิกจะแตกต่างกัน แต่ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลจะใช้ระยะเวลาใกล้เคียงกัน และความเข้มข้นกรดฮิวมิกจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป แสดงว่ามอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติสามารถดูดซับกรดฮิวมิกจากน้ำได้ จากรูปที่ 4.3 เมื่อใช้



Organo Clay (100% CEC-HDTMA clay) เป็นตัวดูดซับพบว่าระยะเวลาการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับนานขึ้นกว่าเมื่อใช้มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ โดยใช้เวลาประมาณ 90 นาทีและความเข้มข้นของกรดฮิวมิกตกลงมากกว่าเมื่อใช้มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ แสดงว่า 100% CEC-HDTMA clay ดูดซับกรดฮิวมิกจากน้ำได้ดีกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

#### 4.2.2 การดูดซับกรดฮิวมิกที่อุณหภูมิคงที่ (อุณหภูมิห้อง)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

ปริมาณของกรดฮิวมิกที่ถูกดูดซับบนมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดต่างๆ หาได้จากสมการมวลสาร โดยถือว่ากรดฮิวมิกที่หายไปจากสารละลายถูกดูดซับอยู่บนมอนต์มอริลโลไนต์ และปริมาณกรดฮิวมิกที่ถูกดูดซับที่สถานะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่จะมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายกรดฮิวมิก และปริมาณตัวดูดซับที่ใส่ลงไป (McCabe W.L. et al. 1993)

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าปริมาณกรดฮิวมิกที่ถูกดูดซับโดย Organo Clay จะมากกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ ยกเว้น TMA-clays ที่ไม่สามารถดูดซับกรดฮิวมิกได้แม้ว่าจะเพิ่มปริมาณ TMA บนมอนต์มอริลโล

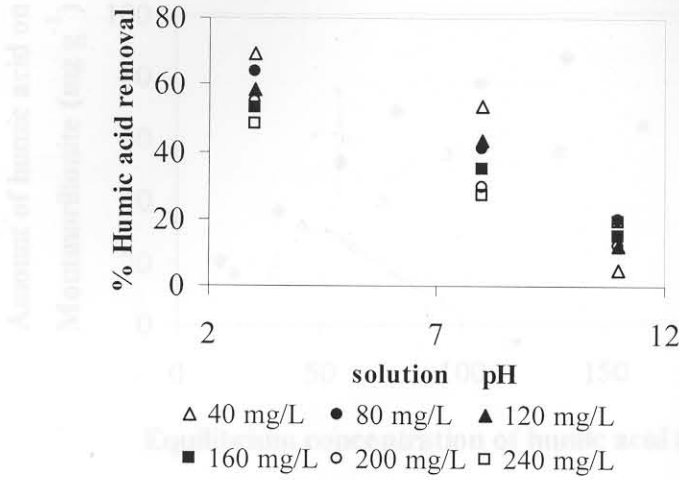
ไนต์จนถึง 200% ของค่า CEC ของมอนต์มอริลโลไนต์ดั้งเดิม เนื่องมาจากขนาดของ TMA cation มีขนาดใหญ่ (Sanchez-Camazano and Sanchez-Martin 1994) ทำให้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์จาก Hydrophilic เป็น Organophilic ได้ ซึ่งเหมือนกับ  $Ca^{2+}$  และ  $Na^+$  ที่มีอยู่ในโครงสร้างตามธรรมชาติของมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีค่า Hydration สูง ดังนั้น TMA-clays จึงมีแนวโน้มเป็น Hydrophilic มากกว่า Organophilic

ในทางตรงกันข้ามจากกราฟจะเห็นว่าทั้ง BDHDMA-clays, HDTMA-clays และ TDMA-clays จะมีความสามารถดูดซับกรดฮิวมิกมากขึ้นเมื่อมีปริมาณ QACs บนมอนต์มอริลโลไนต์มากขึ้น เนื่องจากส่วนที่ไม่ชอบน้ำของกรดฮิวมิกซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีประจุจะจับกับหมู่อัลคิลของ QACs ที่อยู่บนมอนต์มอริลโลไนต์เหล่านี้ได้มากขึ้น จะเห็นว่าความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของ Organo Clays และมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติจะเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อความเข้มข้นของกรดฮิวมิกในสารละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการดูดซับแบบ Langmuir Adsorption Isotherm จากผลการทดลองจะเห็นว่าความยาวหมู่อัลคิล (alkyl group) บน QACs ที่ปรับปรุงสมบัติของมอนต์มอริลโลไนต์จะมีผลต่อปริมาณการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกจะเป็นไปตามลำดับดังนี้ BDHDMA-clays > HDTMA-clays > TDMA-clays > มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และความสามารถการดูดซับกรดฮิวมิกของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดต่างๆ สามารถคำนวณได้จาก Langmuir Adsorption Isotherm ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบความสามารถการดูดซับกรดฮิวมิกของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดต่างๆ

| ชนิดของตัวดูดซับ    | Correlation Coefficient, $R^2$ | Adsorption capacity<br>(mg humic acid/g clay) |
|---------------------|--------------------------------|---|
| Monmorillonite      | 0.9907                         | 68.49   |
| 100%CEC-TMA clay    | 0.9249                         | 52.97   |
| 50%CEC-HDTMA clay   | 0.9131                         | 129.87  |
| 100%CEC-HDTMA clay  | 0.9665                         | 99.01   |
| 200%CEC-HDTMA clay  | 0.9886                         | 144.93  |
| 50%CEC-TDMA clay    | 0.8517                         | 625.00  |
| 100%CEC-TDMA clay   | 0.9586                         | 714.29  |
| 200%CEC-TDMA clay   | 0.9107                         | 1000.0  |
| 100%CEC-BDHDMA clay | 0.9593                         | 833.33  |
| 200%CEC-BDHDMA clay | 0.9581                         | 909.09  |

## 4.2.3 การดูดซับกรดฮิวมิกที่ pH ต่างๆ



รูปที่ 4.5

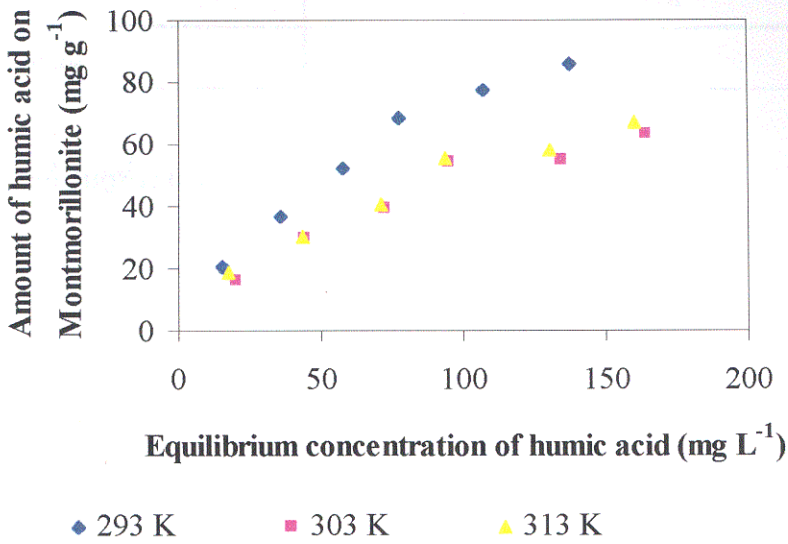
อิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างต่อปริมาณการดูดซับกรดฮิวมิกที่อุณหภูมิห้อง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิกต่างๆกัน

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกในสภาวะความเป็นกรด-ด่างต่างๆกัน โดยใช้มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับจะเป็นไปตามลำดับดังนี้คือสภาวะกรด > สภาวะเป็นกลาง > สภาวะด่าง เนื่องมาจากระยะห่างระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ ( $d_{001}$ ) จะขึ้นอยู่กับค่า pH เมื่อค่า pH มีค่ามากขึ้นระยะห่างจะลดลง และลดลงมากที่สุดเมื่อ pH มีค่าระหว่าง 4 ถึง 5 (Schnitzer and Khan 1972) นอกจากนั้น ที่สภาวะเป็นด่างกรดฮิวมิกจะมีประจุลบเช่นเดียวกับชั้นโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติทำให้เกิดแรงผลักร แต่ที่สภาวะเป็นกรดกรดฮิวมิกจะมีประจุเป็นบวกส่วนมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติจะมีประจุเป็นลบทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล

| จุดดูดซับ (g) | Absorption Capacity (mg of humic acid/g of clay) | R <sup>2</sup> |
|---------------|--|----------------|
| 293           | 151.31   | 0.9797         |
| 303           | 166.28   | 0.943          |
| 315           | 162.64   | 0.939          |



## 4.2.4 การดูดซับกรดฮิวมิกที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.6 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับกรดฮิวมิกของมอนต์มอริลโลไนต์ ธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ตามลำดับดังนี้ที่อุณหภูมิ 293 K > อุณหภูมิ 303 K > อุณหภูมิ 313 K แสดงว่าการดูดซับกรดฮิวมิกของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถคำนวณได้จาก Langmuir's Isotherm ดังแสดงในตารางที่ 4.3

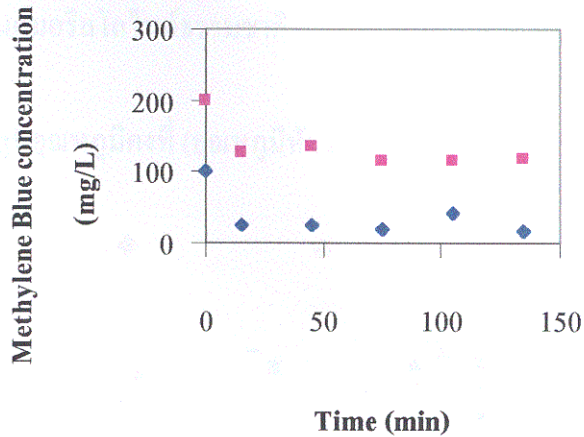
ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติที่อุณหภูมิต่างๆ

| อุณหภูมิ (K) | Adsorption Capacity (mg of humic acid/g of clay) | R <sup>2</sup> |
|--------------|--|----------------|
| 293          | 151.51   | 0.9797         |
| 303          | 106.38   | 0.948          |
| 313          | 102.04   | 0.939          |

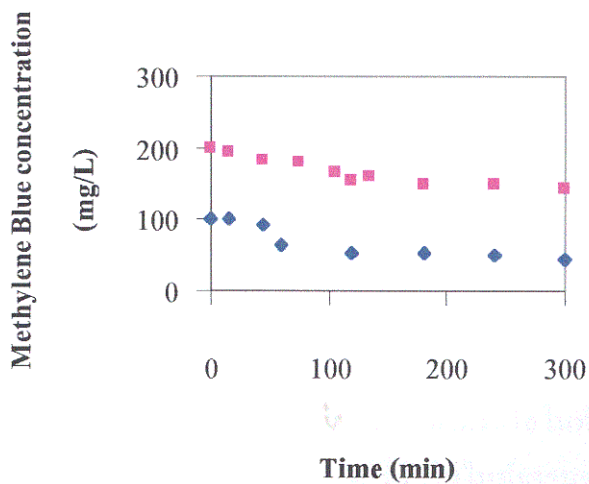
#### 4.3 ความสามารถของมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับเมธิลีนบลู

|                      |          |
|----------------------|----------|
| น้ำหนักของตัวดูดซับ  | 0.1 กรัม |
| ปริมาตรของเมธิลีนบลู | 300 mL   |

##### 4.3.1 การดูดซับเมธิลีนบลูที่ระยะเวลาการดูดซับต่างๆ



รูปที่ 4.7 ความเข้มข้นของเมธิลีนบลูที่เวลาต่างๆเมื่อใช้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นตัวดูดซับ



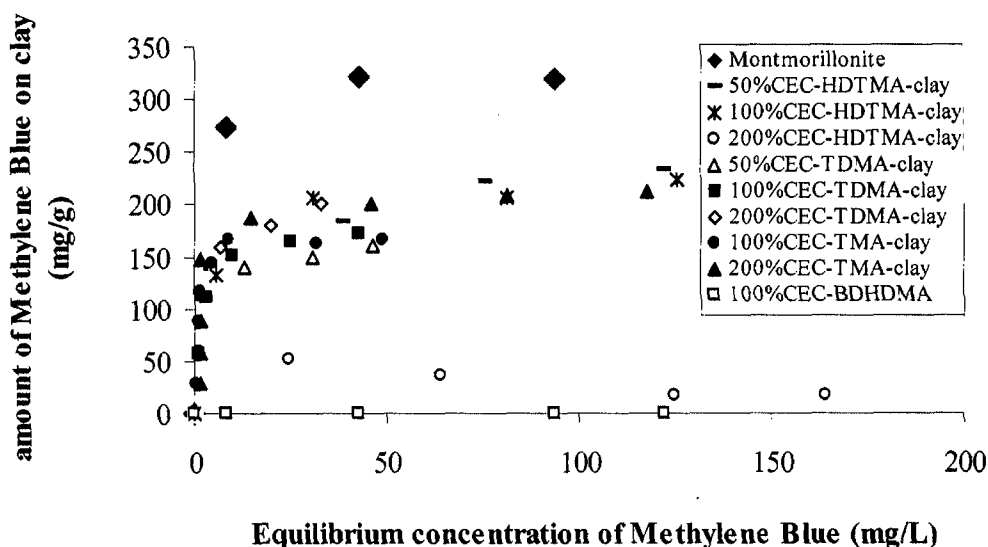
รูปที่ 4.8 ความเข้มข้นของเมธิลีนบลูที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 50% CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับเมธิลีนบลูโดยใช้มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับจะใช้เวลาประมาณ 15 นาที แม้ว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของเมธิลีนบลูจะแตกต่างกัน แต่ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลจะใช้ระยะเวลาใกล้เคียงกัน แต่จากรูปที่ 4.8 เมื่อใช้ Organo Clay (50%



CEC-HDTMA clay) เป็นตัวดูดซับพบว่า ระยะเข้าสู่สมดุลของการดูดซับนานขึ้นโดยใช้เวลาประมาณ 60 นาทีเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของเมธิลีนบลูเท่ากับ 100 mg/L และใช้เวลาประมาณ 120 นาทีเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของเมธิลีนบลูเท่ากับ 200 mg/L เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับเมธิลีนบลูจากน้ำโดยใช้มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและ Organo Clay (50% CEC-HDTMA clay) เป็นตัวดูดซับพบว่า เมื่อใช้มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับความเข้มข้นของเมธิลีนบลูในน้ำลดลงมากกว่าเมื่อใช้ 50% CEC-HDTMA clay เป็นตัวดูดซับ แสดงว่า 50% CEC-HDTMA clay ดูดซับเมธิลีนบลูจากน้ำได้น้อยกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

#### 4.3.2 การดูดซับเมธิลีนบลูที่อุณหภูมิคงที่ (อุณหภูมิห้อง)



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลีนบลูหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลีนบลูบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

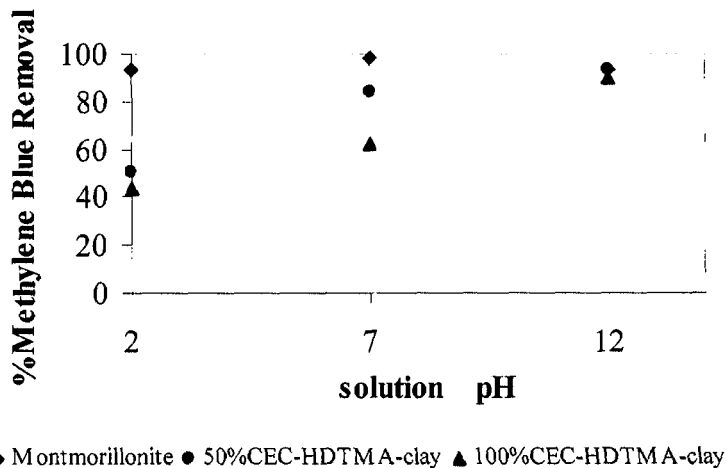
การดูดซับเมธิลีนบลูด้วยมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ที่มี QACs ในปริมาณที่แตกต่างกันนั้น พบว่าปริมาณ QACs ในมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติทำให้ความสามารถในการดูดซับเมธิลีนบลูมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติสามารถดูดซับเมธิลีนบลูได้ดีที่สุด ในขณะที่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับเปลี่ยนสภาพพื้นผิวด้วย BDHDMA ไม่สามารถดูดซับเมธิลีนบลูได้เลย เนื่องจากเมธิลีนบลูเป็นสียอนทรีย์มีประจุบวก และกลไกการดูดซับสีเมธิลีนบลูบนมอนต์มอริลโลไนต์เกิดขึ้นด้วยการแลกเปลี่ยนประจุบวกระหว่างเมธิลีนบลูกับ  $\text{Na}^+$  และ  $\text{Ca}^{2+}$  ที่มีอยู่ในมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

ความสามารถในการดูดซับเมธิลีนบลูของตัวดูดซับต่างๆ สามารถคำนวณได้จาก Langmuir's Isotherm ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ความสามารถในการดูดซับเมธิลีนบลูของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดต่างๆ

| ชนิดของตัวดูดซับ   | Adsorption Capacity (mg methylene blue/g clay) | Adsorption Capacity (meq/100 g. of clay) | R <sup>2</sup> |
|--------------------|--|--|----------------|
| Montmorillonite    | 322.6  | 100                                      | 0.9997         |
| 100%CEC-TMA clay   | 172.4  | 53.9                                     | 0.9965         |
| 200%CEC-TMA clay   | 217.4  | 68.0                                     | 0.9967         |
| 50%CEC-HDTMA clay  | 243.9  | 76.3                                     | 0.9939         |
| 100%CEC-HDTMA clay | 227.3  | 71.1                                     | 0.9975         |
| 200%CEC-HDTMA clay | 13.7   | 4.3                                      | 0.9972         |
| 50%CEC-TDMA clay   | 163.9  | 51.3                                     | 0.9969         |
| 100%CEC-TDMA clay  | 178.6  | 55.9                                     | 1              |
| 200%CEC-TDMA clay  | 208.3  | 65.2                                     | 0.9969         |

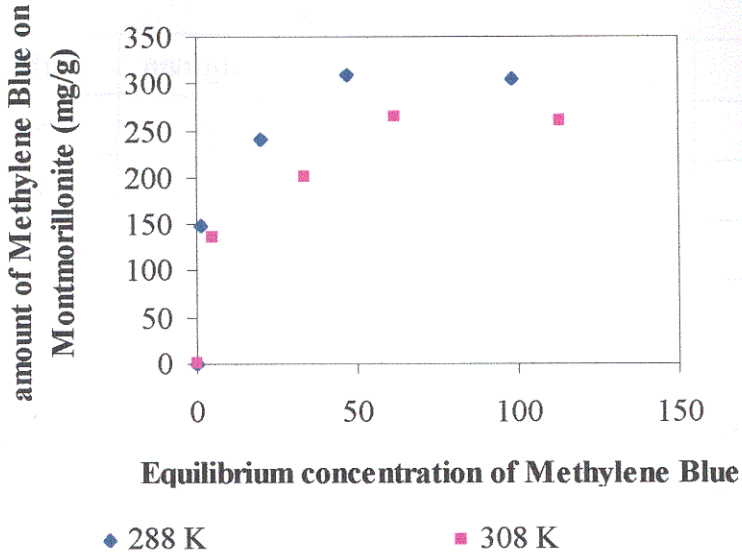
#### 4.3.3 การดูดซับเมธิลีนบลูที่ pH ต่างๆ



รูปที่ 4.10 อิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับเมธิลีนบลูที่อุณหภูมิห้อง

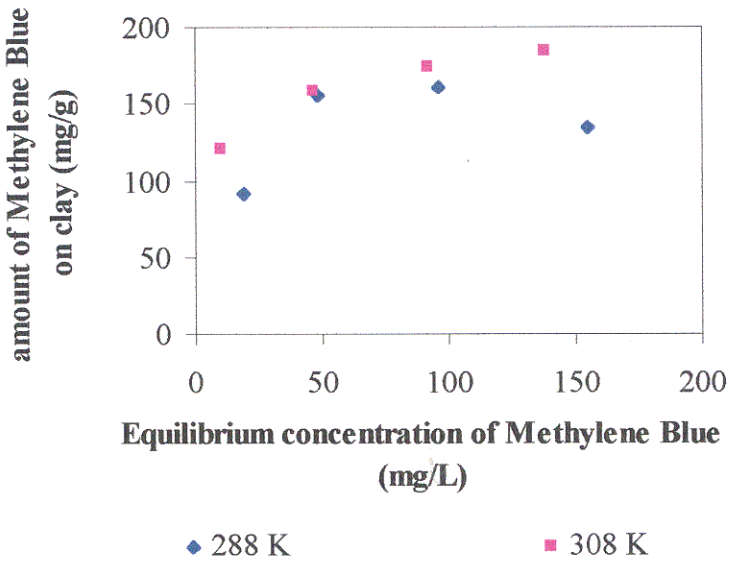
จากรูปที่ 4.10 การดูดซับเมธิลีนบลูด้วยมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเกิดได้ดีใกล้เคียงกันไม่ว่า pH ของสารละลายจะเป็นกลาง (pH = 7) เป็นกรด (pH = 2) หรือเป็นเบส (pH = 12) ส่วนการดูดซับเมธิลีนบลูจากน้ำด้วย 50%CEC-HDTMA-clay และ 100%CEC-HDTMA-clay จะเกิดการดูดซับได้ดีที่สุดที่สารละลายมีสถานะเป็นเบสด้วยความสามารถในการดูดซับที่ใกล้เคียงกับการดูดซับด้วยดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ แต่การดูดซับเมธิลีนบลูจากน้ำด้วย 50%CEC-HDTMA-clay และ 100%CEC-HDTMA-clay เกิดได้ไม่ดีในสถานะที่เป็นกรด

4.3.4 การดูดซับเมธิลีนบลูที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.11

อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับเมธิลีนบลูของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ



รูปที่ 4.12

อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับเมธิลีนบลูของ 50%CEC-HDTMA-clay

ความสามารถในการดูดซับเมธิลีนบลูของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและ 50%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถคำนวณได้จาก Langmuir's Isotherm ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความสามารถในการดูดซับเมธิลินบลูของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและ 50%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิต่างๆ

| ชนิดของตัวดูดซับ  | อุณหภูมิ (K) | Adsorption Capacity (mg/g) | R <sup>2</sup> |
|-------------------|--------------|----------------------------|----------------|
| Montmorillonite   | 288          | 312.5                      | 0.997          |
| Montmorillonite   | 308          | 277.8                      | 0.992          |
| 50%CEC-HDTMA-clay | 288          | 142.8                      | 0.970          |
| 50%CEC-HDTMA-clay | 308          | 192.3                      | 0.998          |

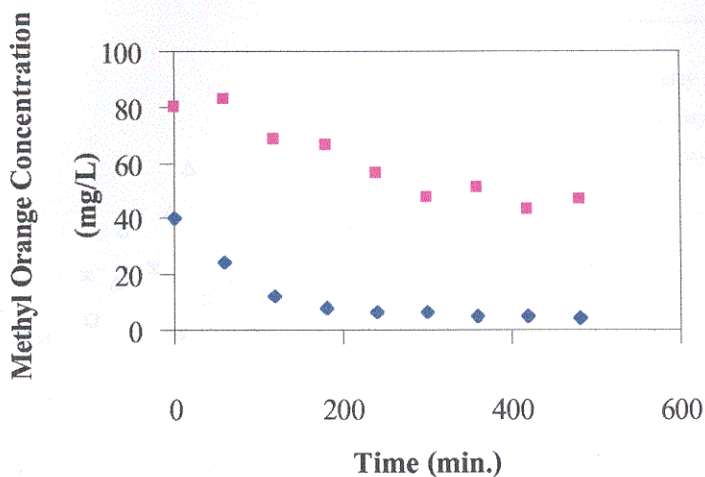
จากรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.5 เห็นได้ว่าความสามารถในการดูดซับเมธิลินบลูของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แสดงว่าปฏิกิริยาการดูดซับเมธิลินบลูของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ในทางตรงกันข้าม จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าความสามารถในการดูดซับเมธิลินบลูของ 50%CEC-HDTMA-clay เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แสดงว่าการดูดซับเมธิลินบลูของ 50%CEC-HDTMA-clay เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

จากผลการทดลองในส่วนนี้ อาจเป็นไปได้ว่ากลไกการดูดซับเมธิลินบลูของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและ Organo Clay (50%CEC-HDTMA-clay) แตกต่างกัน

#### 4.4 ความสามารถของมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับเมธิล ออเรนจ์

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| น้ำหนักของตัวดูดซับ     | 0.2 mg |
| ปริมาตรของเมธิล ออเรนจ์ | 200 mL |

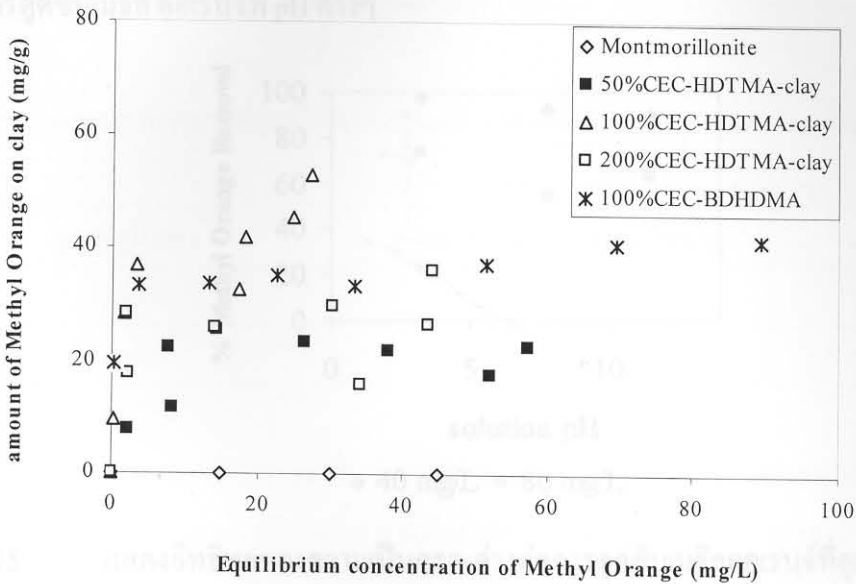
#### 4.4.1 การดูดซับเมธิล ออเรนจ์ที่ระยะเวลาการดูดซับต่างๆ



รูปที่ 4.13 ความเข้มข้นของเมธิล ออเรนจ์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ 100% CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ

จากรูปที่ 4.13 เมื่อใช้ Organo Clay (100% CEC-HDTMA clay) เป็นตัวดูดซับเมธิล ออเรนจ์ พบว่า ระยะเวลาการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับใช้เวลาประมาณ 200 นาทีเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของเมธิล ออเรนจ์เท่ากับ 40 mg/L และใช้เวลาประมาณ 300 นาทีเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของเมธิล ออเรนจ์เท่ากับ 80 mg/L อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าความเข้มข้นของเมธิล ออเรนจ์ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป แสดงว่า 100% CEC-HDTMA clay ดูดซับเมธิล ออเรนจ์ได้

#### 4.4.2 การดูดซับเมธิล ออเรนจ์ที่อุณหภูมิคงที่ (อุณหภูมิห้อง)



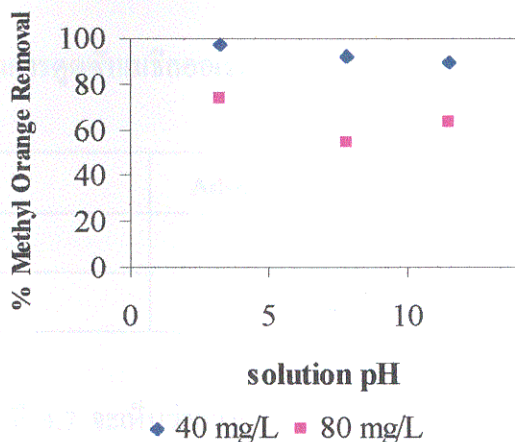
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลออเรนจ์หลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลออเรนจ์บนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

จากผลการทดลองตามรูปที่ 4.14 พบว่ามอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติไม่สามารถดูดซับเมธิล ออเรนจ์จากน้ำได้เลยเนื่องจากเมธิล ออเรนจ์เป็นสีข้อมที่มีประจุลบจึงเกิดแรงผลักรกกับชั้น โครงสร้างที่มีประจุลบของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ ในขณะที่ HDTMA-clays และ BDHDMA-clays สามารถดูดซับเมธิล ออเรนจ์ จากน้ำได้โดยความสามารถในการดูดซับเมธิล ออเรนจ์ จากน้ำของ Organo-Clays (HDTMA-clays และ BDHDMA-clays) เพิ่มขึ้นเมื่อ ปริมาณและจำนวนคาร์บอนอะตอมของ QACs บนมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้น แสดงว่าการดูดซับเมธิล ออเรนจ์จากน้ำของ HDTMA-clays และ BDHDMA-clays เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำระหว่างเมธิล ออเรนจ์กับหมู่อัลคิล (alkyl group) ของ QACs บนมอนต์มอริลโลไนต์ (hydrophobic interaction) ความสามารถในการดูดซับเมธิล ออเรนจ์ของตัวดูดซับต่างๆ สามารถคำนวณได้จาก Langmuir's Isotherm ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ความสามารถในการดูดซับเมธิลออเรนจ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดต่างๆ

| ชนิดของตัวดูดซับ    | Adsorption Capacity (mg/g) | R <sup>2</sup> |
|---------------------|----------------------------|----------------|
| 50%CEC-HDTMA clay   | 21.6                       | 0.9459         |
| 100%CEC-HDTMA clay  | 48.08                      | 0.9383         |
| 200%CEC-HDTMA clay  | 31.45                      | 0.9499         |
| 100%CEC-BDHDMA clay | 39.84                      | 0.9956         |

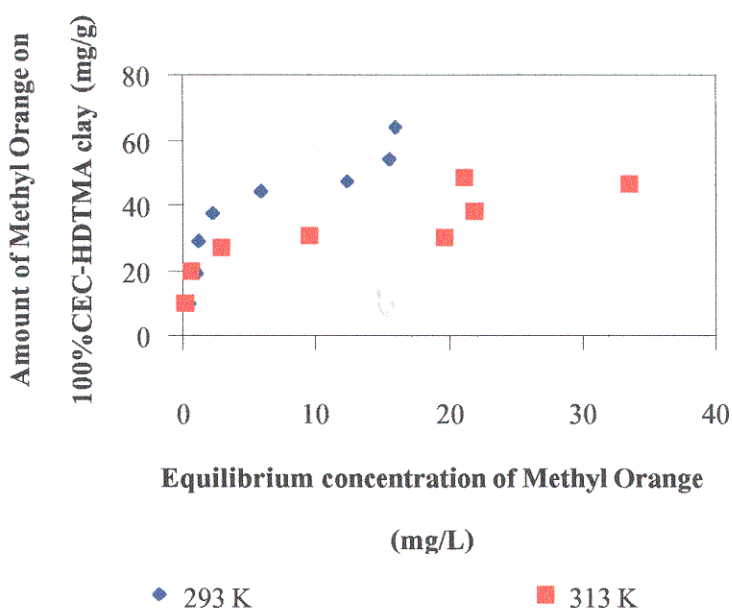
#### 4.4.3 การดูดซับเมธิล ออเรนจ์ที่ pH ต่างๆ



รูปที่ 4.15 แสดงอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับเมธิลออเรนจ์ที่อุณหภูมิห้อง

รูปที่ 4.15 อิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับเมธิลออเรนจ์ของ 100% CEC HDTMA-clay จากรูปที่ 4.15 จะเห็นว่า การดูดซับเมธิลออเรนจ์ของ 100% CEC HDTMA-clay มีค่าลดลงเมื่อ pH มีค่าเพิ่มขึ้น

#### 4.4.4 การดูดซับเมธิลออเรนจ์ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.16 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับเมธิลออเรนจ์ของ 100% CEC HDTMA-clay



ความสามารถในการดูดซับเมธิลออเรนจ์ของ 100%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถคำนวณได้จาก Langmuir's Isotherm ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ความสามารถในการดูดซับเมธิลออเรนจ์ของ 100%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิต่างๆ

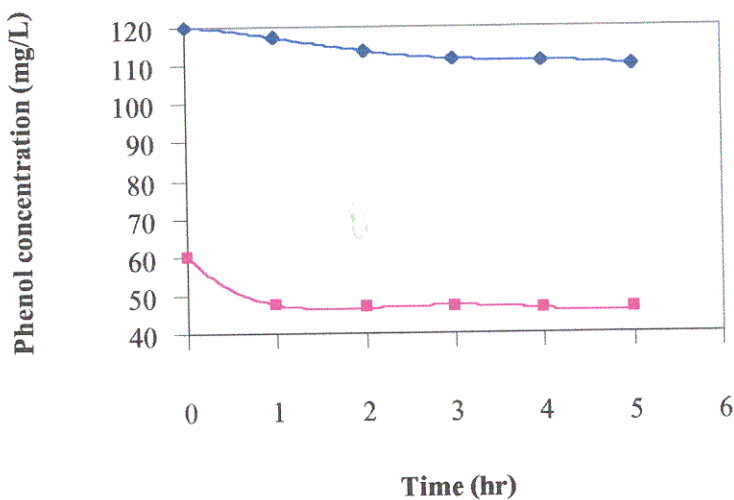
| อุณหภูมิ (K) | Adsorption Capacity (mg/g) | R <sup>2</sup> |
|--------------|----------------------------|----------------|
| 298          | 64.10                      | 0.9679         |
| 313          | 45.04                      | 0.9191         |

จากรูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.7 จะเห็นว่าความสามารถในการดูดซับเมธิลออเรนจ์ของ 100% CEC HDTMA-clay ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ตามลำดับดังนี้ที่อุณหภูมิ 293 K > อุณหภูมิ 313 K แสดงว่าการดูดซับเมธิลออเรนจ์ของ 100% CEC HDTMA-clay เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

#### 4.5 ความสามารถของมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับฟีนอล

|                     |          |
|---------------------|----------|
| น้ำหนักของตัวดูดซับ | 0.4 กรัม |
| ปริมาตรของฟีนอล     | 200 mL   |

##### 4.5.1 การดูดซับฟีนอลที่ระยะเวลาการดูดซับต่างๆ

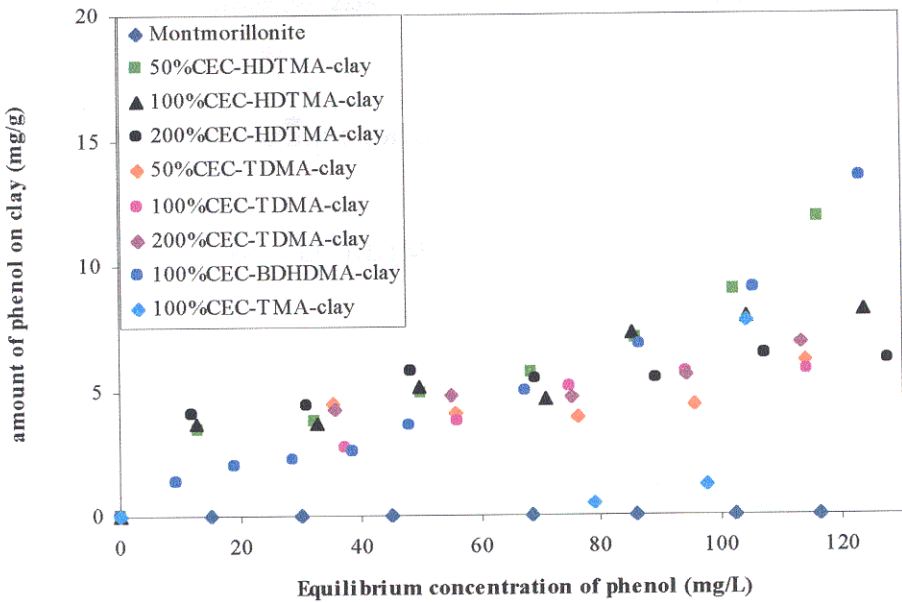


รูปที่ 4.17 ความเข้มข้นของฟีนอลที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 100% CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ



ในการศึกษาระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟีนอลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 60 และ 120 mg/L ตามรูปที่ 4.17 พบว่าที่ความเข้มข้นฟีนอล 120 mg/L ใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลประมาณชั่วโมงที่ 4 ส่วนที่ความเข้มข้น 60 mg/L จะใช้เวลาเข้าสู่สมดุลประมาณชั่วโมงที่ 1 แสดงว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอลจะมีผลต่อเวลาในการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ คือเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลมีค่าต่ำจะใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลน้อยกว่าที่ความเข้มข้นสูง

#### 4.4.2 การดูดซับฟีนอลที่อุณหภูมิกงที่ (อุณหภูมิต่ำ)

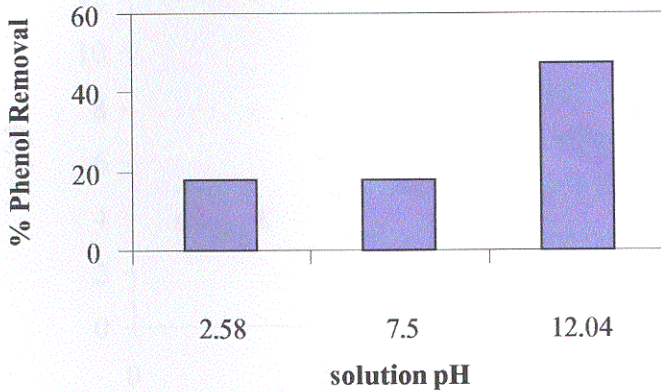


รูปที่ 4.18

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลหลังการดูดซับกับปริมาณฟีนอลบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

จากผลการทดลองดังแสดงใน รูปที่ 4.18 สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาว่า มอนต์โมริลโลไนท์ธรรมชาติไม่สามารถดูดซับฟีนอลได้ (Wibulswas 1999) ในขณะที่ Organo-Clays สามารถดูดซับฟีนอลจากน้ำได้โดยความสามารถในการดูดซับฟีนอลจากน้ำของ Organo-Clays เพิ่มขึ้นเมื่อ ปริมาณและจำนวนคาร์บอนอะตอมของ QACs บนมอนต์โมริลโลไนต์เพิ่มขึ้น แสดงว่าการดูดซับฟีนอลจากน้ำของ Organo-Clays เกิดขึ้นด้วยกลไกเดียวกับการดูดซับเมธิล ออเรนจ์ของ Organo-Clays คือ เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำระหว่างฟีนอลกับหมู่อัลคิล (alkyl group) ของ QACs บน Organo-Clays (hydrophobic interaction)

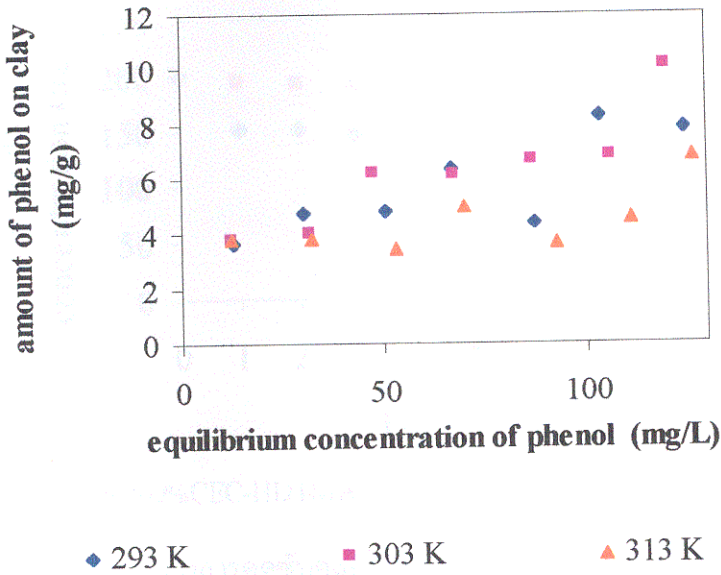
#### 4.5.3 การดูดซับฟีนอลที่ pH ต่างๆ



รูปที่ 4.19 อิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับฟีนอลของ 200% CEC-HDTMA-clay

การดูดซับฟีนอลบน โดยใช้ 200% CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับขึ้นอยู่กับความเป็นกรดเบสของสารละลาย จากกราฟรูปที่ 4.19 เมื่อ pH เท่ากับ 2.58 (สารละลายเป็นกรด) ฟีนอลจะถูกดูดซับไปจากสารละลายประมาณ 20% เมื่อเพิ่ม pH ของสารละลายเป็น 7.5 (สารละลายเป็นกลาง) ปริมาณของฟีนอลที่ถูกดูดซับจะมีค่าใกล้เคียงกับที่ pH 2.58 และเมื่อเพิ่มค่า pH เป็น 12.04 (สารละลายเป็นเบส) ปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบน 200% CEC-HDTMA-clay จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 50% จากผลการทดลองจะพบว่าที่สภาวะของสารละลายเป็นเบส 200% CEC-HDTMA-clay จะมีความสามารถในการดูดซับฟีนอลได้มากที่สุด

## 4.5.4 การดูดซับฟีนอลที่อุณหภูมิต่างๆ



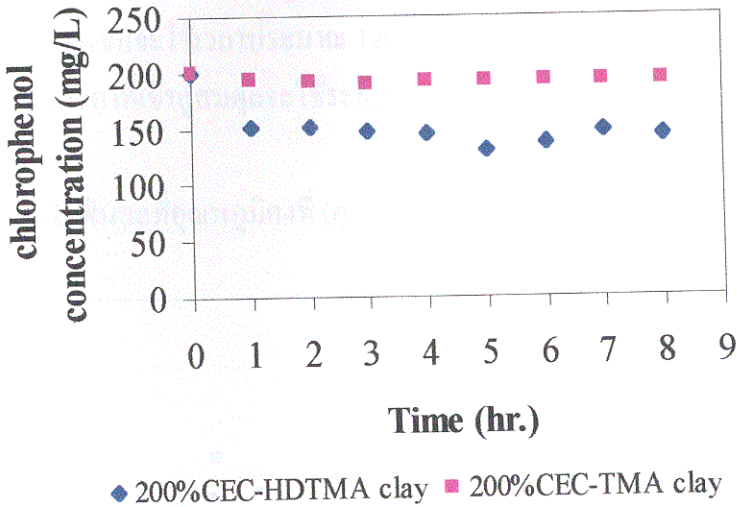
รูปที่ 4.20 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับฟีนอลของ 200% CEC HDTMA-clay

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับ โดยทำการทดลองที่ 3 อุณหภูมิ คือ ที่ 293 303 และ 313 K ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 4.20 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

## 4.6 ความสามารถของมอนิเตอร์ไลต์ไนต์ในการดูดซับคลอโรฟีนอล

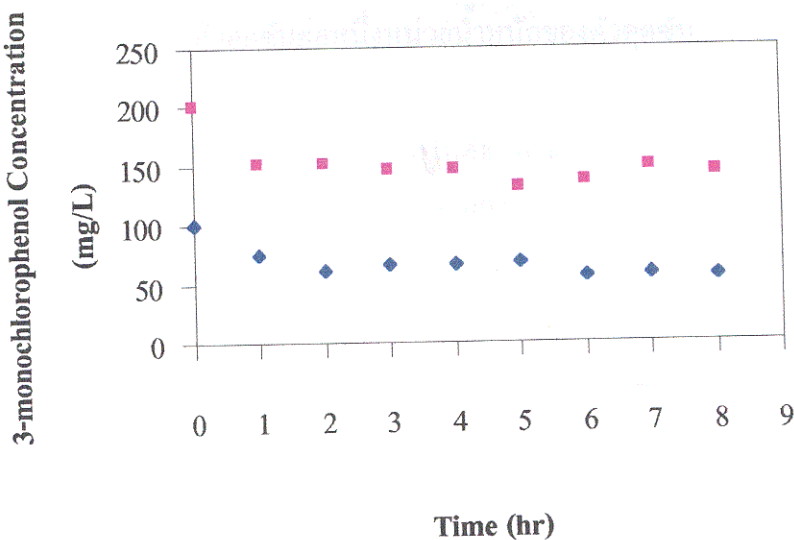
|                      |          |
|----------------------|----------|
| น้ำหนักของตัวดูดซับ  | 0.1 กรัม |
| ปริมาตรของคลอโรฟีนอล | 150 mL   |

#### 4.6.1 การดูดซับคลอโรฟินอลที่ระยะเวลาการดูดซับต่างๆ



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบเวลาการดูดซับคลอโรฟินอลเมื่อใช้ Organo Clays ต่างชนิดกันเป็นตัวดูดซับ

คลอโรฟินอลชนิดที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 3-monochlorophenol ผลการทดลองจากรูปที่ 4.21 พบว่าระยะเวลาการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับและปริมาณของคลอโรฟินอลที่เหลืออยู่ในสารละลายต่างกันเมื่อใช้ Organo Clays ต่างชนิดกันเป็นตัวดูดซับ โดยระยะเวลาการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับจะแปรผันตรงกับจำนวนคาร์บอนอะตอมบน Organo Clays และเมื่อใช้ 200%-CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับพบว่าความเข้มข้นคลอโรฟินอลในสารละลายลดลงมากกว่าเมื่อใช้ 200%-CEC-TMA-clay เป็นตัวดูดซับ แสดงว่า 200%-CEC-HDTMA-clay ดูดซับคลอโรฟินอลจากน้ำได้ดีกว่า 200%-CEC-TMA-clay



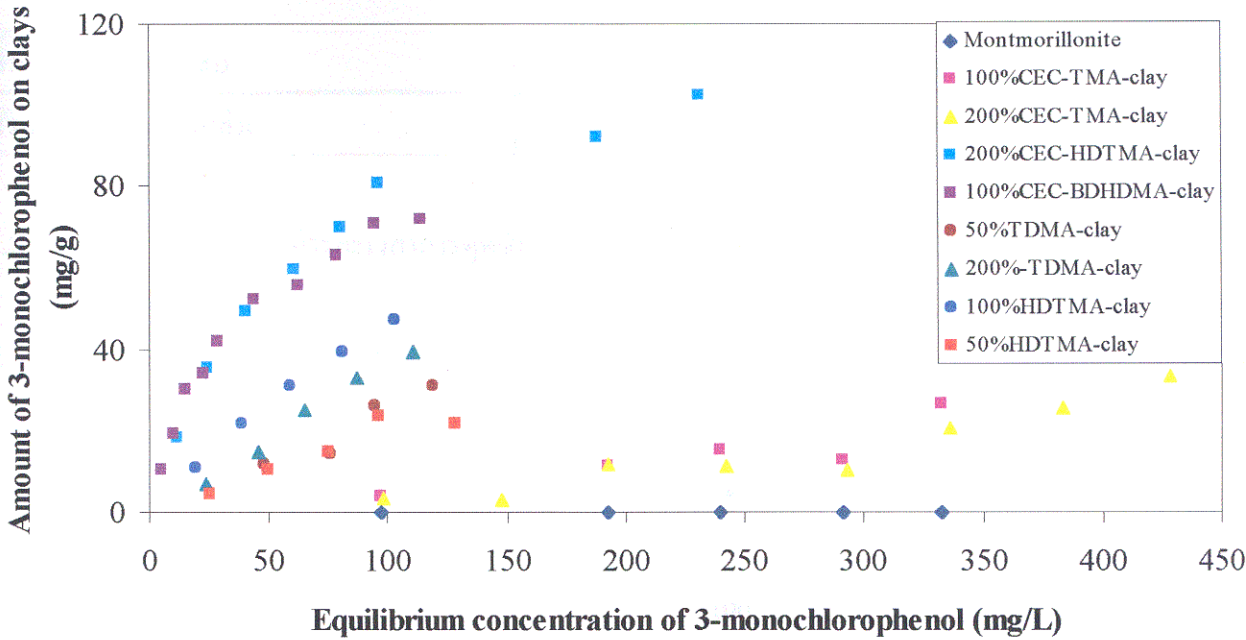
รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นของคลอโรฟินอลที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 200% CEC-HDTMA-clay เป็นตัว



### ดูดซับ

จากรูปที่ 4.22 จะเห็นว่าระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับคลอโรฟีนอลโดยใช้ 200% CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับจะใช้เวลาประมาณ 120 นาที แม้ว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของคลอโรฟีนอลจะแตกต่างกันแต่ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลจะใช้ระยะเวลาใกล้เคียงกัน

#### 4.6.2 การดูดซับคลอโรฟีนอลที่อุณหภูมิคงที่ (อุณหภูมิห้อง)



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอโรฟีนอลหลังการดูดซับกับปริมาณคลอโรฟีนอลบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

จากผลการทดลองตามรูปที่ 4.23 พบว่ามอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติไม่สามารถดูดซับคลอโรฟีนอลจากน้ำได้เลย ในขณะที่ Organo-Clays สามารถดูดซับคลอโรฟีนอลจากน้ำได้โดยความสามารถในการดูดซับคลอโรฟีนอลของ Organo-Clays เพิ่มขึ้นเมื่อ ปริมาณและจำนวนคาร์บอนอะตอมของ QACs บนมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้น แสดงว่าการดูดซับคลอโรฟีนอลจากน้ำของ Organo-Clays เกิดขึ้นด้วยกลไกเดียวกับการดูดซับฟีนอลของ Organo-Clays คือ เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำระหว่างคลอโรฟีนอลกับหมู่อัลคิล (alkyl group) ของ QACs บนมอนต์มอริลโลไนต์ (hydrophobic interaction)

ความสามารถในการดูดซับคลอโรฟีนอลจากน้ำของ Organo-Clays สามารถคำนวณได้จาก Langmuir's Isotherm ดังแสดงในตารางที่ 4.8

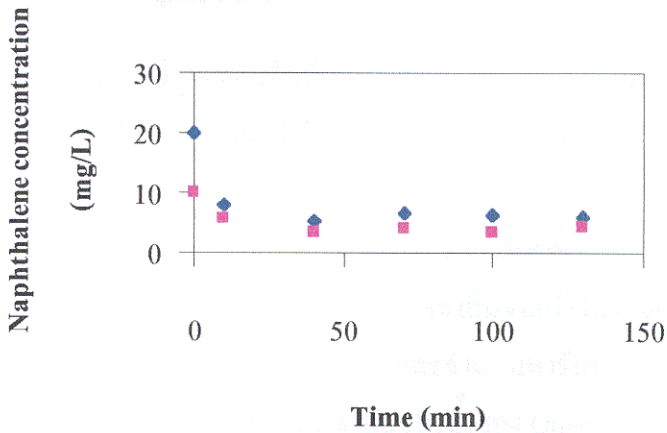
ตารางที่ 4.8 ความสามารถในการดูดซับคลอโรฟีนอลของ Organo-Clays ชนิดต่างๆ

| ชนิดของตัวดูดซับ    | Adsorption Capacity (mg/g) | R <sup>2</sup> |
|---------------------|----------------------------|----------------|
| 200%CEC-HDTMA clay  | 131.58                     | 0.9938         |
| 100%CEC-BDHDMA clay | 97.08                      | 0.9897         |

#### 4.7 ความสามารถของมอนิเตอร์โลโนต์ในการดูดซับแนฟธาลิน

|                     |          |
|---------------------|----------|
| น้ำหนักของตัวดูดซับ | 0.1 กรัม |
| ปริมาตรของแนฟธาลิน  | 200 mL   |

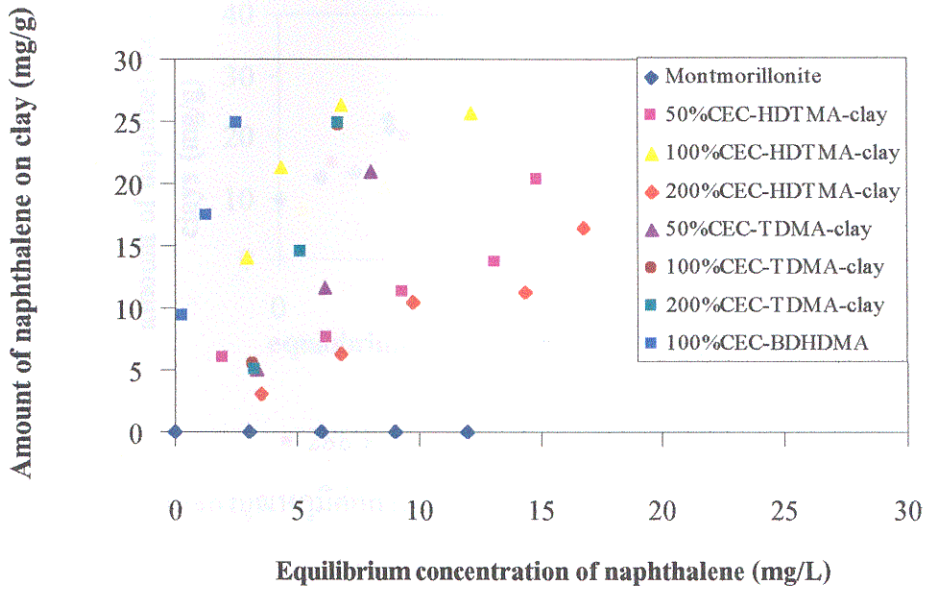
##### 4.7.1 การดูดซับแนฟธาลินที่ระยะเวลาการดูดซับต่างๆ



รูปที่ 4.24 ความเข้มข้นของแนฟธาลินที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 150% CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ

จากรูปที่ 4.24 จะเห็นว่าระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับแนฟธาลิน โดยใช้ 150% CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับจะใช้เวลาประมาณ 40 นาที แม้ว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของแนฟธาลินจะแตกต่างกัน แต่ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลจะใช้ระยะเวลาใกล้เคียงกัน

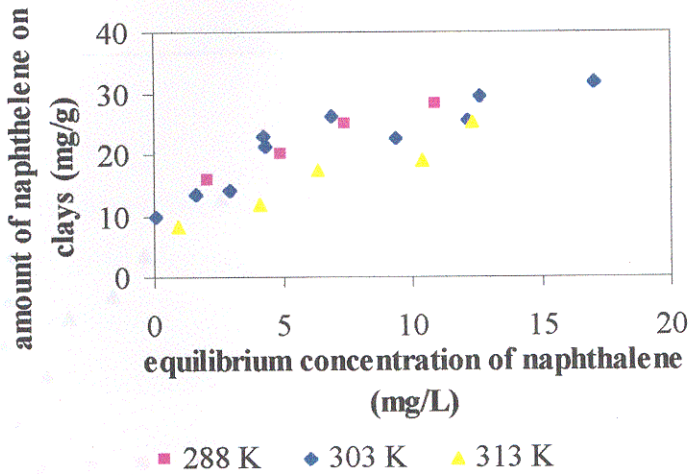
#### 4.7.2 การดูดซับแนฟทาลินที่อุณหภูมิคงที่ (อุณหภูมิห้อง)



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแนฟทาลินหลังการดูดซับกับปริมาณแนฟทาลินบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

จากผลการทดลองตามรูปที่ 4.25 พบว่ามอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติไม่สามารถดูดซับแนฟทาลินจากน้ำได้เลย ในขณะที่ Organo-Clays สามารถดูดซับแนฟทาลินจากน้ำได้โดยความสามารถในการดูดซับแนฟทาลินของ Organo-Clays เพิ่มขึ้นเมื่อ ปริมาณและจำนวนคาร์บอนอะตอมของ QACs บนมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้น แสดงว่าการดูดซับแนฟทาลินจากน้ำของ Organo-Clays เกิดขึ้นด้วยกลไกเดียวกับการดูดซับคลอโรฟีนอลของ Organo-Clays คือ เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำระหว่างแนฟทาลินกับหมู่อัลคิล (alkyl group) ของ QACs บน Organo-Clays (hydrophobic interaction)

## 4.7.4 การดูดซับแนฟธาไลน์ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.26 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับแนฟธาไลน์ของ 150% CEC HDTMA-clay

จากรูปที่ 4.26 จะเห็นว่าความสามารถในการดูดซับแนฟธาไลน์ของ 150% CEC HDTMA-clay ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แสดงว่าการดูดซับแนฟธาไลน์ของ 150% CEC HDTMA-clay เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

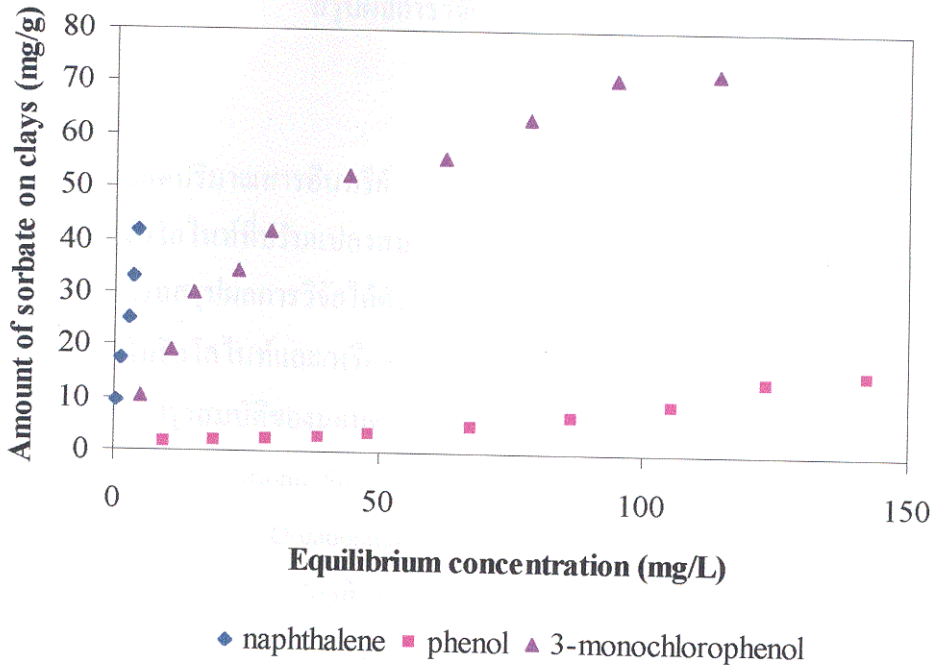
ความสามารถในการดูดซับแนฟธาไลน์ของ 150% CEC HDTMA-clay ที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถคำนวณได้จาก Langmuir's Isotherm ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ความสามารถในการดูดซับแนฟธาไลน์ของ 150% CEC HDTMA-clay ที่อุณหภูมิต่างๆ

| อุณหภูมิ (K) | Adsorption Capacity (mg of naphthalene/g of clay) | $R^2$  |
|--------------|---|--------|
| 298          | 35.59   | 0.9816 |
| 303          | 33.12   | 0.9429 |
| 313          | 30.58   | 0.8539 |



#### 4.8 เปรียบเทียบความสามารถของ Organo-clays ในการดูดซับฟีนอล คลอโรฟีนอลและแนฟธาไลน์



รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบความสามารถของ 100%CEC BDHDMA clay ในการดูดซับฟีนอล คลอโรฟีนอลและแนฟธาไลน์

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบสมบัติทางเคมีของฟีนอล คลอโรฟีนอลและแนฟธาไลน์

| ชนิดของสาร | มวลโมเลกุล | ขนาดของอนุภาค (Å) | ความสามารถในการละลายน้ำ (g/kg H <sub>2</sub> O) |
|------------|------------|-------------------|---|
| ฟีนอล      | 100.16     | 4.3               | 77.5  |
| คลอโรฟีนอล | 128.56     | 5.0               | 25.0  |
| แนฟธาไลน์  | 128.17     | 7.3               | 31.7  |

จากรูปที่ 4.27 และตารางที่ 4.10 พบว่า 100%CEC BDHDMA clay ดูดซับแนฟธาไลน์ได้มากที่สุดตามด้วยคลอโรฟีนอล และฟีนอลตามลำดับ ซึ่งอาจมีความสัมพันธ์สมบัติของสารเคมีแต่ละชนิด กล่าวคือ ฟีนอลความสามารถในการละลายน้ำได้ดีจึงมีแนวโน้มที่จะชอบอยู่ในน้ำมากกว่าอยู่บน 100%CEC BDHDMA clay ในทางตรงข้ามคลอโรฟีนอล และฟีนอลละลายน้ำได้น้อยกว่าจึงมีแนวโน้มที่จะชอบอยู่บน 100%CEC BDHDMA clay มากกว่าอยู่ในน้ำ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองเพื่อลดปริมาณสารอินทรีย์ 6 ชนิดในน้ำสังเคราะห์ โดยใช้มอนต์โมริลโลไนท์ธรรมชาติและมอนต์โมริลโลไนท์ที่ปรับปรุงสมบัติพื้นผิวด้วย QACs ในปริมาณและชนิดที่แตกต่างกันเป็นตัวดูดซับ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

- มอนต์โมริลโลไนท์และ/หรือ Organo Clays กำจัดสารอินทรีย์ที่ศึกษาออกจากรน้ำได้
- การปรับปรุงสมบัติของมอนต์โมริลโลไนท์ธรรมชาติด้วย QACs ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic Surfactant) สามารถเปลี่ยนพื้นผิวของ Montmorillonite จากชอบน้ำ (Hydrophilic = Organophobic) เป็นชอบสารอินทรีย์ (Hydrophobic = Organophilic) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของมอนต์โมริลโลไนท์ธรรมชาติทั้งพื้นที่ผิว ขนาดของอนุภาค และระยะห่างระหว่างชั้นโครงสร้าง ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ของ Organo Clays เทียบกับมอนต์โมริลโลไนท์ธรรมชาติ
- ความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ของมอนต์โมริลโลไนท์และ Organo Clays ขึ้นอยู่กับทั้งชนิดของสารอินทรีย์ อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่างของระบบ เช่น การดูดซับเมธิลีนบลูซึ่งเป็นสีอินทรีย์ที่มีประจุบวกโดย Organo Clays จะเกิดได้ดีเมื่อสถานะของระบบเป็นด่าง ในทางตรงกันข้ามการดูดซับเมธิลีน ออเรนจ์ซึ่งเป็นสีอินทรีย์ที่มีประจุลบโดย Organo Clays จะเกิดได้ดีเมื่อสถานะของระบบเป็นกรด และจากผลการทดลองส่วนใหญ่พบว่า การดูดซับจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ แสดงว่า การดูดซับสารอินทรีย์ของมอนต์โมริลโลไนท์และ Organo Clays เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน นอกจากนี้ยังพบว่า Organo Clays ดูดซับสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ (Hydrophobic) ได้ดีกว่าสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง

#### 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยต่อไป

- ศึกษาความสามารถของมอนต์โมริลโลไนท์และ Organo Clays ในการดูดซับสารอินทรีย์และอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ
- ปรับปรุงกระบวนการดูดซับสารอินทรีย์ด้วยมอนต์โมริลโลไนท์และ Organo Clays เพื่อให้ใช้ได้ในระบบที่มีการไหลของน้ำ (Flow System) เช่น ในระบบหอดูดซับ เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมจริงได้

## บรรณานุกรม

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2536). วิศวกรรมการประปา. มิตรนราการพิมพ์ : กรุงเทพมหานคร  
 จุมพล คีนตัก, ธงชัย พึ่งรัมย์ และ พิภพ วสุวานิช (2521). ดิน (Clays). เอกสารเศรษฐศาสตร์วิทยา  
 เล่มที่ 19. กองเศรษฐศาสตร์วิทยา กรมทรัพยากรธรณี : กรุงเทพมหานคร
- ณัฐยา พูนสุวรรณ (2545). การเตรียมและวัดสมบัติถ่านกัมมันต์จากถ่านหินและชานอ้อยโดยวิธีการ  
 กระตุ้นทางเคมี. โครงร่างวิทยานิพนธ์ระดับมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชา  
 วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ปิยมภรณ์ จารุวงศ์ (2545). การดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำโดยใช้มอนต์มอริลโลไนต์. โครงร่างวิทยา  
 นิพนธ์ระดับมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย  
 เทคโนโลยีสุรนารี
- ปิยรัตน์ สารวงษ์ (2545). การกำจัดกรดฮิวมิกในน้ำดิบเพื่อการผลิตน้ำประปาโดยกระบวนการโค  
 แอกลูเลชันด้วยไคโตแซนและเบนโทไนต์. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขานามัยสิ่งแวดล้อม  
 ภาควิชาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- สุชาติา ชินะจิตร (2545). พิษภัยใกล้ตัว. สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.):  
 กรุงเทพมหานคร
- 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
- Davies G. and Ghabbour E.A. (1999) Understanding life after death. Chemistry & Industry, Society  
 of Chemical Industry. 11. 426-430
- Dentel S.K., Jamrah A.L. and Sparks D.L. (1998) Sorption and co-sorption of 1-2-4-trichloro  
 benzene and tannic acid by organo-clays. Water Research. 32. 3689-3697
- 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

- 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
- Kulladapu R.K. and Boyd S.A. (1995) Tetramethylphosphonium- and Tetramethylamethylammonium- Smectite as Adsorbents of Aromatic and Chlorinated Hydrocarbons: Effect of water on Adsorption Efficiency. Clay and Clay Mineral. 43. 318-323
- 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
- Nzungu 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
- 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
- Vansant E.F. (1994) Inorganic Porous Material. Separation Process Technology Proceeding. 11. 229-241
- 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

## Output จากการวิจัย

างงานวิจัยนี้ทำให้เกิดผลงานตีพิมพ์ และนำเสนอในการประชุมวิชาการดังต่อไปนี้

ปิยมภรณ์ จารุงศ์ และ รัตนวรรณ วิบูลย์สวัสดิ์. ผลของปริมาณคาร์บอนที่มีผลกระทบต่อ

ปริมาณการดูดซับกรดฮิวมิก. การประชุมวิศวกรรมเคมี และเคมีประยุกต์ แห่งประเทศไทย

ครั้งที่ 11. พฤศจิกายน 2544

ปิยมภรณ์ จารุงศ์ และ รัตนวรรณ วิบูลย์สวัสดิ์. การดูดซับกรดฮิวมิกโดยกระบวนการดูด

ซับแบบเบดนิ่งโดยใช้มอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติ

เป็นตัวดูดซับ. การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3.

กรกฎาคม 2545

R.Wibulswas. Batch and Fixed Bed Sorption of Methylene Blue on Montmorillonite and its

Modified Forms. The 9th APCCChE(Asian Pacific Confederation of Chemical

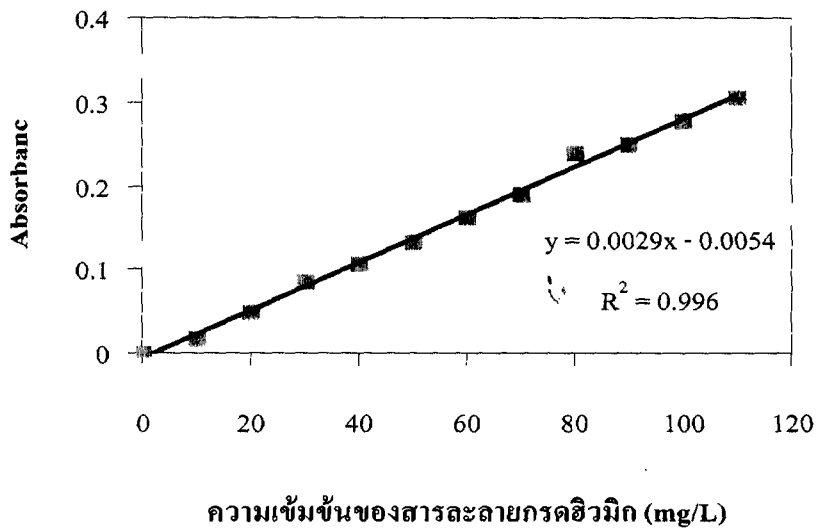
Engineering) Congress and CHEMECA 2002 New Zealand. September 2002

## ภาคผนวก ก

## กราฟมาตรฐาน (Calibration Curve)

## 1. กราฟมาตรฐานของสารละลายกรดซิวมิก

| ความเข้มข้นของสารละลายกรดซิวมิก (mg/L) | Absorbance |
|--|------------|
| 0                                      | 0.00016    |
| 10                                     | 0.01695    |
| 20                                     | 0.04918    |
| 30                                     | 0.08570    |
| 40                                     | 0.10756    |
| 50                                     | 0.13331    |
| 60                                     | 0.16259    |
| 70                                     | 0.19035    |
| 80                                     | 0.24032    |
| 90                                     | 0.24926    |
| 100                                    | 0.2783     |
| 110                                    | 0.3059     |

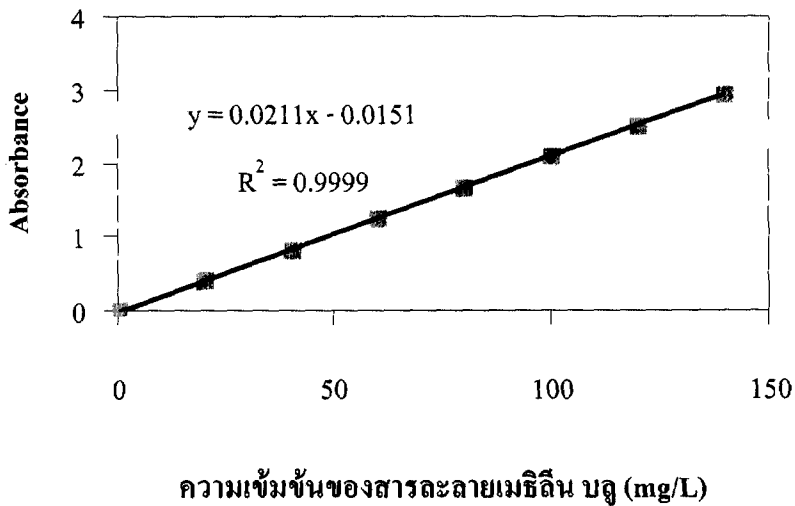


รูปที่ ก1

กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกรดซิวมิกกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 400 nm.

## 2. กราฟมาตรฐานของสารละลายเมธิลินบลู

| ความเข้มข้นของสารละลายเมธิลินบลู (mg/L) | Absorbance |
|---|------------|
| 0                                       | 0          |
| 20                                      | 0.39965    |
| 40                                      | 0.82194    |
| 60                                      | 1.24703    |
| 80                                      | 1.673      |
| 100                                     | 2.10025    |
| 120                                     | 2.51648    |
| 140                                     | 2.94803    |

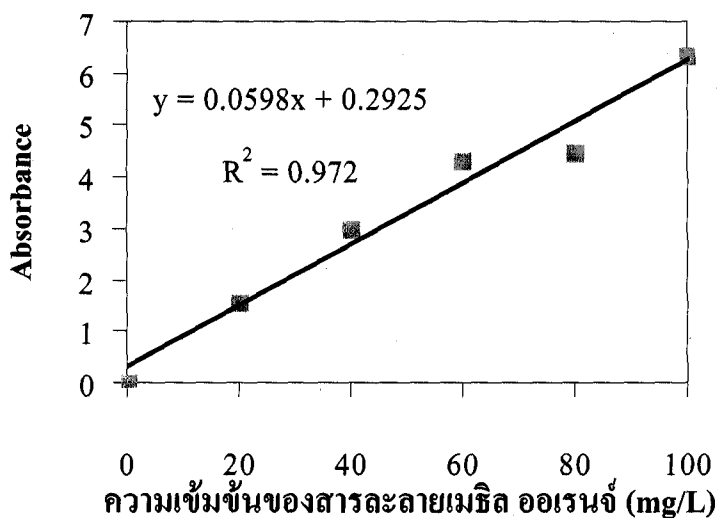


รูปที่ ก2

กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมธิลิน บลู กับ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 698 nm.

### 3. กราฟมาตรฐานของสารละลายเมธิล ออเรนจ์

| ความเข้มข้นของสารละลายเมธิล ออเรนจ์ (mg/L) | Absorbance |
|--|------------|
| 0  | 0          |
| 20   | 1.54921    |
| 40   | 3.00201    |
| 60   | 4.30612    |
| 80   | 4.48928    |
| 100  | 6.34597    |



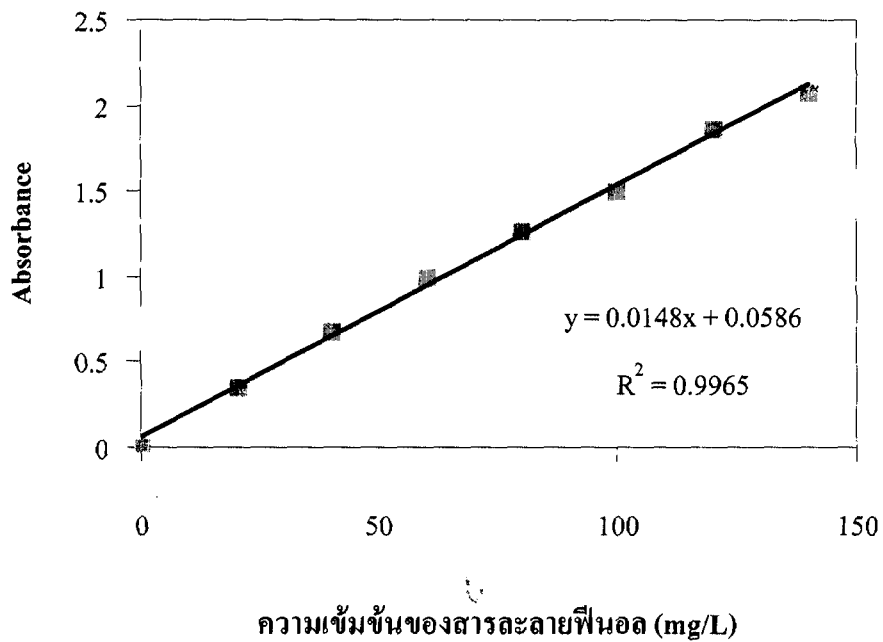
รูปที่ ก3

กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมธิล ออเรนจ์ กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 463 nm.



## 4. กราฟมาตรฐานของสารละลายฟีนอล

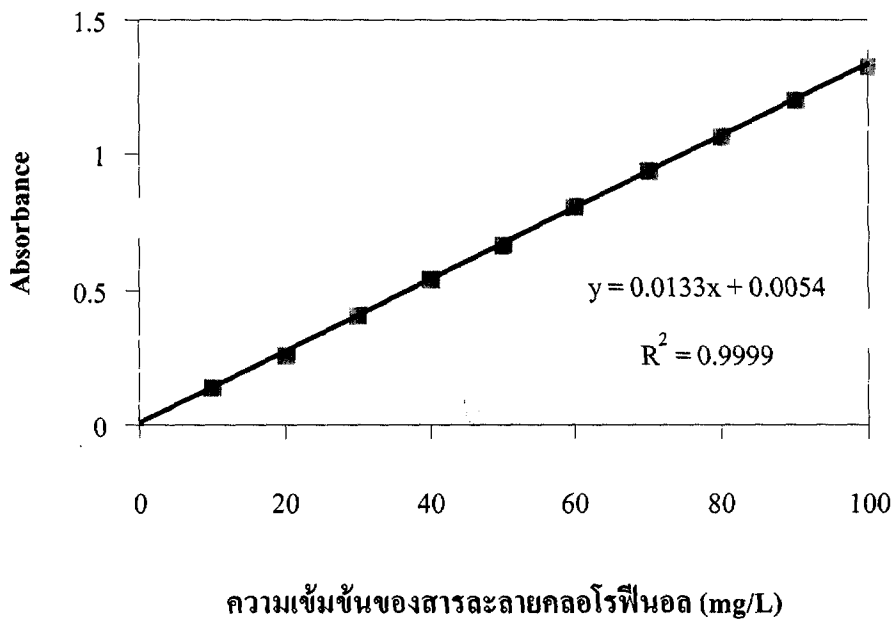
| ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล (mg/L) | Absorbance |
|------------------------------------|------------|
| 0                                  | 0          |
| 20                                 | 0.3568     |
| 40                                 | 0.67585    |
| 60                                 | 1.00082    |
| 80                                 | 1.26784    |
| 100                                | 1.50179    |
| 120                                | 1.86752    |
| 140                                | 2.0766     |



รูปที่ ก4 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล กับ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 269 nm.

5. กราฟมาตรฐานของสารละลายคลอโรฟีนอล (3-monochlorophenol)

| ความเข้มข้นของสารละลายคลอโรฟีนอล (mg/L) | Absorbance |
|---|------------|
| 0                                       | 0          |
| 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     |

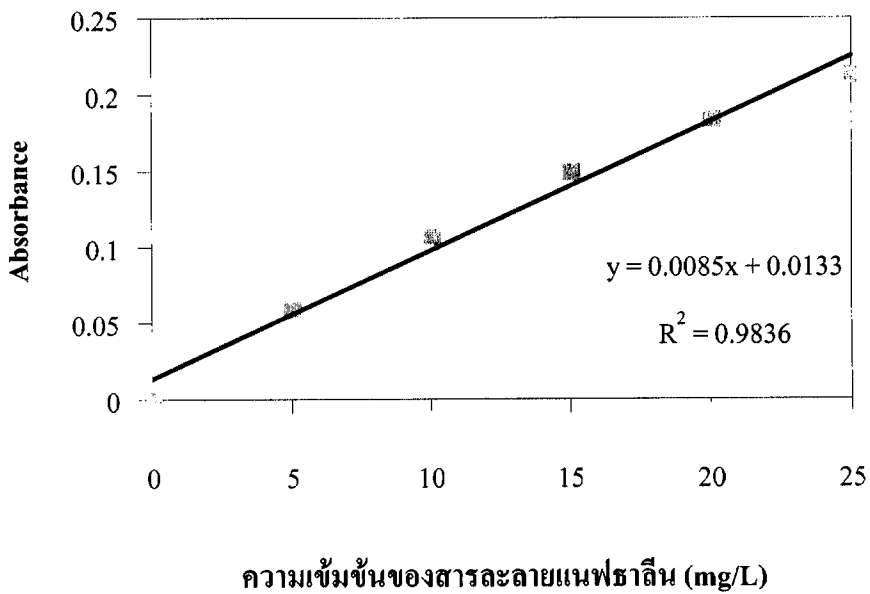


รูปที่ 5

กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายคลอโรฟีนอล กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 274 nm.

### 6. กราฟมาตรฐานของสารละลายแอฟธาไลน์

| ความเข้มข้นของสารละลายแอฟธาไลน์ (mg/L) | Absorbance |
|--|------------|
| 0                                      | 0          |
| 5                                      | 0.05972    |
| 10                                     | 0.10798    |
| 15                                     | 0.1498     |
| 20                                     | 0.18402    |
| 25                                     | 0.21334    |



รูปที่ ก6

กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแอฟธาไลน์กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 275 nm.

## ภาคผนวก ข

## ผลการทดลอง

1. การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย QACs แล้ว

ตารางที่ ข1 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

| Relative Pressure(P/Po) | Vol Adsorbed (cm <sup>3</sup> /g STP) | Relative Pressure (P/Po) | Vol Adsorbed (cm <sup>3</sup> /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                | 12.055200                             | 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 ๗๒ การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 100%CEC-TMA-clay

| Relative Pressure<br>(P/Po) | Vol Adsorbed (cm <sup>3</sup> /g STP) | Relative Pressure<br>(P/Po) | Vol Adsorbed (cm <sup>3</sup> /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                             |
| 0.898394                    | 37.103400                             |                             |                                       |

ตารางที่ ข3 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 200%CEC-TMA-clay

| Relative Pressure<br>(P/Po) | Vol Adsorbed (cm <sup>3</sup> /g STP) | Relative Pressure<br>(P/Po) | Vol Adsorbed (cm <sup>3</sup> /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 ๗4 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ 200%CEC-HDTMA-clay

| Relative Pressure<br>(P/Po) | Vol Adsorbed (cm <sup>3</sup> /g STP) | Relative Pressure<br>(P/Po) | Vol Adsorbed (cm <sup>3</sup> /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                              |                             |                                       |



## 2. ความสามารถของมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับกรดฮิวมิก

ตารางที่ ข5 ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เวลาต่างๆเมื่อใช้มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ

| เวลา (นาที)                    | 0   | 20   | 50   | 80   | 110  | 140  | 170  | 200  | 230  | 500 |
|--------------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก (mg/L) | 160 | 99.6 | 91.7 | 89.7 | 81.3 | 89.2 | 88.2 | 91.1 | 94.6 |     |
| ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก (mg/L) | 200 | 149  | 145  | 149  | 145  | 139  | 134  |      |      | 117 |

ตารางที่ ข6 ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 100% CEC-HDTMA clay เป็นตัวดูดซับ

| เวลา (นาที)                    | 0   | 30     | 60     | 90     | 120    | 150    |
|--------------------------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก (mg/L) | 150 | 60.125 | 43.875 | 33.167 | 29.958 | 36.917 |

ตารางที่ ข7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณกรดฮิวมิกบนมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

|                                   |       |        |        |        |        |        |
|-----------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก (mg/L)    | 18.6  | 47.47  | 68.20  | 104.46 | 140.84 | 174.96 |
| ปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับ (mg/g) | 17.81 | 27.112 | 43.163 | 46.278 | 49.304 | 54.202 |

ตารางที่ ข8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณกรดฮิวมิกบน 50%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 50%CEC-HDTMA-clay

|                                   |       |       |       |       |        |        |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก (mg/L)    | 19.02 | 37.28 | 56.34 | 87.08 | 121.53 | 146.94 |
| ปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับ (mg/g) | 17.48 | 35.60 | 53.05 | 60.77 | 65.39  | 77.55  |

ตารางที่ ข9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณกรดฮิวมิกบน 100%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-HDTMA-clay

|                                   |       |       |       |       |        |        |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก (mg/L)    | 5.86  | 22.25 | 51.36 | 61.08 | 105.06 | 133.95 |
| ปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับ (mg/g) | 28.45 | 48.12 | 57.20 | 79.94 | 79.12  | 88.38  |

ตารางที่ ข10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณกรดฮิวมิกบน 200%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-HDTMA-clay

|                                   |       |       |        |        |        |        |
|-----------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก (mg/L)    | 0.629 | 5.756 | 14.588 | 29.414 | 49.897 | 75.035 |
| ปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับ (mg/g) | 32.81 | 61.87 | 87.85  | 108.82 | 125.09 | 137.47 |

ตารางที่ ข11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณกรดฮิวมิกบน 50%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 50%CEC-TDMA-clay

|                                   |      |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก (mg/L)    | 24.3 | 63.5  | 97.6  | 137.2 | 198.8 | 293.7 | 372.3 |
| ปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับ (mg/g) | 76.9 | 109.5 | 157.1 | 188.4 | 303.6 | 319   | 383.1 |

ตารางที่ ข12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณกรดฮิวมิกบน 100%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-TDMA-clay

|                                   |       |        |        |        |        |        |
|-----------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก (mg/L)    | 22.56 | 53.13  | 73.29  | 172.32 | 255.58 | 350.07 |
| ปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับ (mg/g) | 82.33 | 140.60 | 230.12 | 383.04 | 433.25 | 449.8  |

ตารางที่ ข13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณกรดฮิวมิกบน 200%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-TDMA-clay

|                                   |        |        |        |        |        |     |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
| ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก (mg/L)    | 19.81  | 50.9   | 71.75  | 94.944 | 159.15 | 227 |
| ปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับ (mg/g) | 90.583 | 147.31 | 234.75 | 315.17 | 422.54 | 519 |

ตารางที่ ข14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณกรดฮิวมิกบน 100%CEC-BDHDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-BDHDMA-clay

|                                   |        |       |         |         |         |
|-----------------------------------|--------|-------|---------|---------|---------|
| ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก (mg/L)    | 38.9   | 91.5  | 150.79  | 238.792 | 298.958 |
| ปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับ (mg/g) | 183.25 | 325.5 | 447.625 | 483.625 | 603.125 |

ตารางที่ ข15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณกรดฮิวมิกบน 200%CEC-BDHDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-BDHDMA-clay

|                                   |        |         |        |         |         |
|-----------------------------------|--------|---------|--------|---------|---------|
| ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก (mg/L)    | 19.81  | 50.9    | 71.75  | 94.94   | 159.152 |
| ปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับ (mg/g) | 90.583 | 147.312 | 234.75 | 315.167 | 422.542 |

ตารางที่ ข16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณกรดฮิวมิกบน 100%CEC-TMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-TMA-clay

|                                   |         |         |         |         |         |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก (mg/L)    | 28.0277 | 69.5833 | 115.764 | 157.014 | 199.653 |
| ปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับ (mg/g) | 18.3102 | 25.3472 | 28.5301 | 35.82   | 41.956  |

ตารางที่ ข17 % การดูดซับกรดฮิวมิกของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติที่ pH ต่างๆ

| ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก (mg/L) | % การดูดซับกรดฮิวมิก |        |         |
|--|----------------------|--------|---------|
|  | pH = 3               | pH = 8 | pH = 11 |
| 40                                     | 69.39                | 53.43  | 5.1     |
| 80                                     | 63.64                | 40.67  | 19.9    |
| 120                                    | 58.37                | 43.16  | 11.88   |
| 160                                    | 53.04                | 34.71  | 15.16   |
| 200                                    | 54.71                | 29.58  | 12      |
| 240                                    | 48.29                | 27.1   | 19.1    |

ตารางที่ ข18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณกรดฮิวมิกบนมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติที่อุณหภูมิ 293 K

|                                   |       |        |        |        |       |        |
|-----------------------------------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|
| ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก (mg/L)    | 15.46 | 35.584 | 57.624 | 77.584 | 107.3 | 137.14 |
| ปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับ (mg/g) | 20.45 | 37.013 | 51.98  | 68.68  | 77.25 | 85.72  |

ตารางที่ ข19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณกรดฮิวมิกบนมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติที่อุณหภูมิ 303 K

|                                   |        |        |       |        |        |        |
|-----------------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก (mg/L)    | 20.748 | 44.288 | 72.78 | 94.832 | 134.24 | 164.13 |
| ปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับ (mg/g) | 16.043 | 29.76  | 39.35 | 54.307 | 54.8   | 63.22  |

ตารางที่ ข20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณกรดฮิวมิกบนมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติที่อุณหภูมิ 313 K

|                                   |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก (mg/L)    | 17.376 | 43.624 | 71.292 | 93.376 | 130.42 | 159.86 |
| ปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับ (mg/g) | 18.853 | 30.313 | 40.59  | 55.52  | 57.983 | 66.78  |

### 3. ความสามารถของมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับเมธิลินบลู

ตารางที่ ข21 ความเข้มข้นของเมธิลินบลูที่เวลาต่างๆเมื่อใช้มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ

|                                 |     |          |        |          |          |         |
|---------------------------------|-----|----------|--------|----------|----------|---------|
| เวลา (นาที)                     | 0   | 15       | 45     | 75       | 105      | 135     |
| ความเข้มข้นของเมธิลินบลู (mg/L) | 100 | 26.6215  | 25.643 | 18.9145  | 40.678   | 15.4495 |
|                                 | 200 | 125.9725 | 133.31 | 113.9495 | 115.0245 | 117.676 |

ตารางที่ ข22 ความเข้มข้นของเมธิลินบลูที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 50% CEC-HDTMA clay เป็นตัวดูดซับ

|                                 |     |     |      |      |     |     |      |     |      |      |      |
|---------------------------------|-----|-----|------|------|-----|-----|------|-----|------|------|------|
| เวลา (นาที)                     | 0   | 15  | 45   | 60   | 75  | 105 | 120  | 135 | 180  | 240  | 300  |
| ความเข้มข้นของเมธิลินบลู (mg/L) | 100 | 100 | 91.3 | 63.6 |     |     | 53.5 |     | 52.3 | 49.4 | 44.9 |
|                                 | 200 | 194 | 183  |      | 178 | 164 | 153  | 158 | 149  | 148  | 142  |

ตารางที่ ข23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลินบลูที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลินบลูบนมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

|                                    |        |        |        |
|------------------------------------|--------|--------|--------|
| ความเข้มข้นของเมธิลินบลู (mg/L)    | 8.575  | 42.64  | 93.763 |
| ปริมาณเมธิลินบลูบนตัวดูดซับ (mg/g) | 274.28 | 322.08 | 318.71 |

ตารางที่ ข24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลินบลูที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลินบลูบน 50%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 50%CEC-HDTMA-clay

|                                    |          |         |         |         |
|------------------------------------|----------|---------|---------|---------|
| ความเข้มข้นของเมธิลินบลู (mg/L)    | 4.0405   | 38.749  | 75.747  | 122.506 |
| ปริมาณเมธิลินบลูบนตัวดูดซับ (mg/g) | 137.8785 | 183.753 | 222.759 | 232.482 |

ตารางที่ ข25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลินบลูที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลินบลูบน 100%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-HDTMA-clay

|                                    |         |        |        |          |
|------------------------------------|---------|--------|--------|----------|
| ความเข้มข้นของเมธิลินบลู (mg/L)    | 5.712   | 30.87  | 81.243 | 125.4675 |
| ปริมาณเมธิลินบลูบนตัวดูดซับ (mg/g) | 132.864 | 207.39 | 206.71 | 223.5975 |

ตารางที่ ข26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลินบลูที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลินบลูบน 200%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-HDTMA-clay

|                                    |        |        |         |         |
|------------------------------------|--------|--------|---------|---------|
| ความเข้มข้นของเมธิลินบลู (mg/L)    | 24.317 | 63.994 | 125.126 | 163.937 |
| ปริมาณเมธิลินบลูบนตัวดูดซับ (mg/g) | 51.366 | 36.006 | 16.583  | 16.259  |

ตารางที่ ข27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลินบลูที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลินบลูบน 50%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 50%CEC-TDMA-clay

|                                    |         |         |          |          |          |
|------------------------------------|---------|---------|----------|----------|----------|
| ความเข้มข้นของเมธิลินบลู (mg/L)    | 1.51659 | 1.97156 | 13.26007 | 30.5545  | 46.44076 |
| ปริมาณเมธิลินบลูบนตัวดูดซับ (mg/g) | 56.54   | 114.085 | 140.218  | 148.3365 | 160.6777 |

ตารางที่ ข28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลินบลูที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลินบลูบน 100%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-TDMA-clay

|                                    |         |          |          |          |          |
|------------------------------------|---------|----------|----------|----------|----------|
| ความเข้มข้นของเมธิลินบลู (mg/L)    | 0.88626 | 3.236967 | 9.952607 | 24.8673  | 42.85782 |
| ปริมาณเมธิลินบลูบนตัวดูดซับ (mg/g) | 57.3412 | 110.2891 | 150.1422 | 165.3981 | 171.4265 |

ตารางที่ ข29 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลินบลูที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลินบลูบน 200%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-TDMA-clay

|                                    |         |          |          |          |          |
|------------------------------------|---------|----------|----------|----------|----------|
| ความเข้มข้นของเมธิลินบลู (mg/L)    | 0.88626 | 1.753556 | 6.853081 | 19.94313 | 32.9763  |
| ปริมาณเมธิลินบลูบนตัวดูดซับ (mg/g) | 57.3412 | 114.7393 | 159.4408 | 180.1706 | 201.0711 |

ตารางที่ ข30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลินบลูที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลินบลูบน 100%CEC-TMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-TMA-clay

|                                    |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ความเข้มข้นของเมธิลินบลู (mg/L)    | 0.77 | 0.89 | 0.86 | 1.74 | 4.68 | 8.88 | 31.9 | 49.0 |
| ปริมาณเมธิลินบลูบนตัวดูดซับ (mg/g) | 28.8 | 58.7 | 88.7 | 117  | 142  | 166  | 162  | 166  |

ตารางที่ ข31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลินบลูที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลินบลูบน 200%CEC-TMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-TMA-clay

|                                    |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ความเข้มข้นของเมธิลินบลู (mg/L)    | 1.346 | 1.621 | 1.749 | 14.74 | 45.87 | 81.46 | 117.9 |
| ปริมาณเมธิลินบลูบนตัวดูดซับ (mg/g) | 27.98 | 87.57 | 147.4 | 187.9 | 201.2 | 207.8 | 213.1 |



ตารางที่ ข32 % การดูดซับเมธิลีนบลูที่ pH ต่างๆ

| ชนิดของตัวดูดซับ         | % การดูดซับเมธิลีนบลู |        |         |
|--------------------------|-----------------------|--------|---------|
|                          | pH = 2                | pH = 7 | pH = 12 |
| มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ | 93                    | 98.519 | 93.376  |
| 50%CEC-HDTMA-clay        | 50.247                | 83.832 | 92.922  |
| 100%CEC-HDTMA-clay       | 43.958                | 61.833 | 89.785  |

ตารางที่ ข33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลีนบลูที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลีนบลูบนมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติที่อุณหภูมิ 288 K

|                                    |         |        |         |         |
|------------------------------------|---------|--------|---------|---------|
| ความเข้มข้นของเมธิลีนบลู (mg/L)    | 0.971   | 19.714 | 46.998  | 98.349  |
| ปริมาณเมธิลีนบลูบนตัวดูดซับ (mg/g) | 147.087 | 240.86 | 309.036 | 304.953 |

ตารางที่ ข34 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลีนบลูที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลีนบลูบนมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติที่อุณหภูมิ 308 K

|                                    |          |         |         |         |
|------------------------------------|----------|---------|---------|---------|
| ความเข้มข้นของเมธิลีนบลู (mg/L)    | 5.1495   | 33.478  | 61.885  | 113.352 |
| ปริมาณเมธิลีนบลูบนตัวดูดซับ (mg/g) | 134.5515 | 199.566 | 264.345 | 259.944 |

ตารางที่ ข35 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลีนบลูที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลีนบลูบน 50%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 50%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิ 288 K

|                                    |         |         |         |         |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| ความเข้มข้นของเมธิลีนบลู (mg/L)    | 19.3495 | 48.058  | 96.315  | 154.905 |
| ปริมาณเมธิลีนบลูบนตัวดูดซับ (mg/g) | 91.952  | 155.832 | 161.055 | 135.285 |

ตารางที่ ข36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลินบลูที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลินบลูบน 50%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 50%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิ 308 K

|                                    |         |         |         |         |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| ความเข้มข้นของเมธิลินบลู (mg/L)    | 10.083  | 47.186  | 92.236  | 138.349 |
| ปริมาณเมธิลินบลูบนตัวดูดซับ (mg/g) | 119.751 | 158.444 | 173.292 | 184.953 |

#### 4. ความสามารถของมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับเมธิล ออเรนจ์

ตารางที่ ข37 ความเข้มข้นของเมธิลออเรนจ์ที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 100% CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ

| เวลา (นาที)                          | 0  | 60    | 120   | 180   | 240   | 300   | 360   | 420   | 480   |
|--------------------------------------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ความเข้มข้นของเมธิลออเรนจ์ (mg/L)    | 40 | 24.62 | 12.25 | 7.929 | 6.616 | 6.552 | 4.781 | 4.882 | 4.406 |
| ปริมาณเมธิลออเรนจ์บนตัวดูดซับ (mg/g) | 80 | 82.41 | 68.51 | 66.29 | 56.26 | 47.43 | 50.83 | 43.14 | 46.69 |

ตารางที่ ข38 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลออเรนจ์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลออเรนจ์บน 50%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 50%CEC-HDTMA-clay

|                                      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ความเข้มข้นของเมธิลออเรนจ์ (mg/L)    | 2.23 | 8.24 | 7.63 | 14.4 | 26.5 | 38.1 | 52.2 | 57.2 |
| ปริมาณเมธิลออเรนจ์บนตัวดูดซับ (mg/g) | 7.77 | 11.7 | 22.4 | 25.6 | 23.5 | 22   | 17.8 | 22.8 |

ตารางที่ ข39 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลออเรนจ์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลออเรนจ์บน 100%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-HDTMA-clay

|                                      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ความเข้มข้นของเมธิลออเรนจ์ (mg/L)    | 0.27 | 0.79 | 1.53 | 3.30 | 17.2 | 18.2 | 24.7 | 27.3 |
| ปริมาณเมธิลออเรนจ์บนตัวดูดซับ (mg/g) | 7    | 55   | 45   | 58   | 58   | 68   | 5    | 06   |
| ปริมาณเมธิลออเรนจ์บนตัวดูดซับ (mg/g) | 9.72 | 19.2 | 28.4 | 36.6 | 32.7 | 41.7 | 45.2 | 52.6 |
|                                      | 3    | 04   | 65   | 94   | 42   | 32   | 5    | 94   |

ตารางที่ ข40 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลลอเรนจ์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลลอเรนจ์บน 200%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-HDTMA-clay

|                                      |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ความเข้มข้นของเมธิลลอเรนจ์ (mg/L)    | 2.213 | 1.793 | 14.04 | 34.24 | 30.37 | 43.55 | 43.99 |
| ปริมาณเมธิลลอเรนจ์บนตัวดูดซับ (mg/g) | 17.79 | 28.21 | 25.96 | 15.76 | 29.63 | 26.45 | 36.01 |

ตารางที่ ข41 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลลอเรนจ์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลลอเรนจ์บน 50%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 50%CEC-TDMA-clay

|                                      |          |          |          |          |          |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| ความเข้มข้นของเมธิลลอเรนจ์ (mg/L)    | 12.30268 | 14.41304 | 15.03679 | 19.3612  | 26.02007 |
| ปริมาณเมธิลลอเรนจ์บนตัวดูดซับ (mg/g) | 27.69732 | 65.58696 | 104.9632 | 140.6388 | 173.9799 |

ตารางที่ ข42 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลลอเรนจ์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลลอเรนจ์บน 100%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-TDMA-clay

|                                      |          |          |          |          |          |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| ความเข้มข้นของเมธิลลอเรนจ์ (mg/L)    | 18.73244 | 25.47826 | 30.09365 | 38.90301 | 42.85782 |
| ปริมาณเมธิลลอเรนจ์บนตัวดูดซับ (mg/g) | 61.26756 | 94.52174 | 129.9064 | 161.0967 | 171.4265 |

ตารางที่ ข43 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลลอเรนจ์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลลอเรนจ์บน 200%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-TDMA-clay

|                                      |          |          |          |          |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| ความเข้มข้นของเมธิลลอเรนจ์ (mg/L)    | 12.37291 | 21.52508 | 22.70903 | 26.3411  |
| ปริมาณเมธิลลอเรนจ์บนตัวดูดซับ (mg/g) | 67.62709 | 98.47492 | 137.291  | 173.7659 |

ตารางที่ ข44 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลลอเรนจ์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลลอเรนจ์บน 100%CEC-BDHDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-BDHDMA-clay

|                                      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ความเข้มข้นของเมธิลลอเรนจ์ (mg/L)    | 0.23 | 3.45 | 13.2 | 22.5 | 33.3 | 51.3 | 69.5 | 89.3 | 110  | 130  |
| ปริมาณเมธิลลอเรนจ์บนตัวดูดซับ (mg/g) | 19.5 | 33.0 | 33.5 | 34.9 | 33.2 | 37.2 | 40.8 | 41.3 | 39.1 | 38.2 |

ตารางที่ ข45 % การดูดซับเมธิลลอเรนจ์ของ 100%CEC-HDTMA-clay ที่ pH ต่างๆ

| ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมธิลลอเรนจ์ (mg/L) | % การดูดซับเมธิลลอเรนจ์ |          |           |
|---|-------------------------|----------|-----------|
|   | pH = 3.3                | pH = 7.8 | pH = 11.5 |
| 40  | 97.1374                 | 92.3147  | 89.901    |
| 80  | 73.5739                 | 54.5375  | 63.4585   |

ตารางที่ ข46 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลลอเรนจ์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลลอเรนจ์บน 100%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิ 293 K

|                                      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ความเข้มข้นของเมธิลลอเรนจ์ (mg/L)    | 0.44 | 1.01 | 1.22 | 2.21 | 5.83 | 12.4 | 15.6 | 16.0 |
| ปริมาณเมธิลลอเรนจ์บนตัวดูดซับ (mg/g) | 9.55 | 19.0 | 28.8 | 37.8 | 44.2 | 47.6 | 54.4 | 64.0 |

ตารางที่ ข47 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมธิลลอเรนจ์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณเมธิลลอเรนจ์บน 100%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิ 313 K

|                                      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ความเข้มข้นของเมธิลลอเรนจ์ (mg/L)    | 0.09 | 0.61 | 2.82 | 9.49 | 19.8 | 21.9 | 21.2 | 33.4 |
| ปริมาณเมธิลลอเรนจ์บนตัวดูดซับ (mg/g) | 9.91 | 19.4 | 27.2 | 30.5 | 30.4 | 38.1 | 48.8 | 46.6 |

### 5. ความสามารถของมอนคัมอริโดไนต์ในการดูดซับฟีนอล

ตารางที่ ข48 ความเข้มข้นของฟีนอลที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 100% CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ

| เวลา (นาที)                   | 0   | 60       | 120      | 180      | 240      | 300      |
|-------------------------------|-----|----------|----------|----------|----------|----------|
| ความเข้มข้นของฟีนอล (mg/L)    | 60  | 47.14765 | 46.9381  | 46.56911 | 46.48975 | 46.06367 |
| ปริมาณฟีนอลบนตัวดูดซับ (mg/g) | 120 | 117.1503 | 113.8872 | 111.4282 | 111.1539 | 109.8277 |

ตารางที่ ข49 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ กับปริมาณฟีนอลบน 100%CEC-TMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-TMA-clay

|                               |             |            |             |
|-------------------------------|-------------|------------|-------------|
| ความเข้มข้นของฟีนอล (mg/L)    | 78.9662     | 97.541     | 104.4189189 |
| ปริมาณฟีนอลบนตัวดูดซับ (mg/g) | 0.516891892 | 1.22972973 | 7.790540541 |

ตารางที่ ข50 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ กับปริมาณฟีนอลบน 50%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 50%CEC-HDTMA-clay

|                               |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ความเข้มข้นของฟีนอล (mg/L)    | 13.13 | 32.53 | 50.29 | 68.62 | 85.84 | 102.1 | 116.3 |
| ปริมาณฟีนอลบนตัวดูดซับ (mg/g) | 3.433 | 3.734 | 4.855 | 5.689 | 7.077 | 8.944 | 11.86 |

ตารางที่ ข51 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ กับปริมาณฟีนอลบน 100%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-HDTMA-clay

|                               |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ความเข้มข้นของฟีนอล (mg/L)    | 12.71 | 32.68 | 49.75 | 70.79 | 85.37 | 104.1 | 123.7 |
| ปริมาณฟีนอลบนตัวดูดซับ (mg/g) | 3.645 | 3.663 | 5.126 | 4.603 | 7.315 | 7.931 | 8.160 |

ตารางที่ ข52 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ กับปริมาณฟีนอลบน 200%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-HDTMA-clay

|                               |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ความเข้มข้นของฟีนอล (mg/L)    | 11.91 | 31.25 | 48.55 | 69.10 | 89.08 | 107.2 | 127.6 |
| ปริมาณฟีนอลบนตัวดูดซับ (mg/g) | 4.045 | 4.377 | 5.728 | 5.452 | 5.459 | 6.403 | 6.184 |

ตารางที่ ข53 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ  
กับปริมาณฟีนอลบน 50%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ  
50%CEC-TDMA-clay

|                               |          |          |          |          |          |
|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| ความเข้มข้นของฟีนอล (mg/L)    | 35.50676 | 55.89189 | 76.04054 | 95.58784 | 113.8581 |
| ปริมาณฟีนอลบนตัวดูดซับ (mg/g) | 4.493243 | 4.108108 | 3.959459 | 4.412162 | 6.141892 |

ตารางที่ ข54 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ  
กับปริมาณฟีนอลบน 100%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ  
100%CEC-TDMA-clay

|                               |          |          |          |          |          |
|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| ความเข้มข้นของฟีนอล (mg/L)    | 37.29054 | 56.21622 | 74.91216 | 94.2973  | 114.223  |
| ปริมาณฟีนอลบนตัวดูดซับ (mg/g) | 2.709459 | 3.783784 | 5.087838 | 5.702703 | 5.777027 |

ตารางที่ ข55 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ  
กับปริมาณฟีนอลบน 200%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ  
200%CEC-TDMA-clay

|                               |         |          |          |          |          |
|-------------------------------|---------|----------|----------|----------|----------|
| ความเข้มข้นของฟีนอล (mg/L)    | 35.73   | 55.22297 | 75.27703 | 94.39189 | 113.1486 |
| ปริมาณฟีนอลบนตัวดูดซับ (mg/g) | 4.27027 | 4.77027  | 4.722973 | 5.608108 | 6.851351 |

ตารางที่ ข56 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ  
กับปริมาณฟีนอลบน 100%CEC-BDHDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ  
100%CEC-BDHDMA-clay

| ความเข้มข้นของ<br>ฟีนอล (mg/L) | ปริมาณฟีนอลบน<br>ตัวดูดซับ (mg/g) | ความเข้มข้นของ<br>ฟีนอล (mg/L) | ปริมาณฟีนอลบน<br>ตัวดูดซับ (mg/g) |
|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 9.31818                        | 1.363636364                       | 67.5325                        | 4.935064935                       |
| 18.9805                        | 2.038961039                       | 86.6169                        | 6.766233766                       |
| 28.8961                        | 2.207792208                       | 105.487                        | 9.025974026                       |
| 38.7143                        | 2.571428571                       | 123.266                        | 13.46753247                       |
| 48.2013                        | 3.597402597                       | 142.494                        | 15.01298701                       |

ตารางที่ ข57 % การดูดซับฟีนอลของ 200%CEC-HDTMA-clay ที่ pH ต่างๆ

| ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล (mg/L) | % การดูดซับฟีนอล |          |            |
|------------------------------------|------------------|----------|------------|
|                                    | pH = 2.58        | pH = 7.5 | pH = 12.04 |
| 40                                 | 17.9757          | 17.934   | 47.10309   |

ตารางที่ ข58 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณฟีนอลบน 200%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิ 293 K

|                               |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ความเข้มข้นของฟีนอล (mg/L)    | 12.73 | 30.49 | 50.38 | 67.21 | 87.17 | 103.5 | 124.3 |
| ปริมาณฟีนอลบนตัวดูดซับ (mg/g) | 3.636 | 4.754 | 4.811 | 6.398 | 4.416 | 8.272 | 7.841 |

ตารางที่ ข59 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณฟีนอลบน 200%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิ 303 K

|                               |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ความเข้มข้นของฟีนอล (mg/L)    | 12.45 | 31.88 | 47.61 | 67.72 | 86.66 | 106.3 | 119.8 |
| ปริมาณฟีนอลบนตัวดูดซับ (mg/g) | 3.775 | 4.059 | 6.196 | 6.140 | 6.671 | 6.832 | 10.08 |

ตารางที่ ข59 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณฟีนอลบน 200%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิ 313 K

|                               |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ความเข้มข้นของฟีนอล (mg/L)    | 12.42 | 32.42 | 53.06 | 70.02 | 92.72 | 111.0 | 126.4 |
| ปริมาณฟีนอลบนตัวดูดซับ (mg/g) | 3.789 | 3.792 | 3.471 | 4.989 | 3.64  | 4.534 | 6.782 |



6. ความสามารถของมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับคลอโรฟีนอล (3-monochlorophenol)

ตารางที่ ข60 ความเข้มข้นของคลอโรฟีนอลที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 200% CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ

| เวลา (นาทีก)      | 0   | 60    | 120   | 180   | 240   | 300   | 360   | 420 | 480   |
|-------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|
| ความเข้มข้นของ    | 100 | 75.07 | 60.51 | 66.80 | 66.98 | 67.36 | 55.97 | 58  | 56.38 |
| คลอโรฟีนอล (mg/L) | 200 | 152.1 | 151.3 | 146.5 | 145.6 | 130.4 | 136.4 | 147 | 142.6 |

ตารางที่ ข61 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอโรฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณคลอโรฟีนอลบน 100%CEC-TMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-TMA-clay

|                                    |        |         |         |         |         |
|------------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| ความเข้มข้นของคลอโรฟีนอล (mg/L)    | 97.511 | 192.541 | 239.962 | 291.541 | 332.237 |
| ปริมาณคลอโรฟีนอลบนตัวดูดซับ (mg/g) | 3.733  | 11.188  | 15.056  | 12.688  | 26.645  |

ตารางที่ ข62 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอโรฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณคลอโรฟีนอลบน 200%CEC-TMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-TMA-clay

|                                    |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ความเข้มข้นของคลอโรฟีนอล (mg/L)    | 97.8 | 148. | 192  | 242  | 293  | 336  | 383  | 428  |
| ปริมาณคลอโรฟีนอลบนตัวดูดซับ (mg/g) | 3.24 | 2.79 | 11.6 | 11.1 | 10.4 | 20.9 | 25.4 | 33.2 |

ตารางที่ ข63 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอโรฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณคลอโรฟีนอลบน 50%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 50%CEC-HDTMA-clay

|                                    |         |    |         |         |         |
|------------------------------------|---------|----|---------|---------|---------|
| ความเข้มข้นของคลอโรฟีนอล (mg/L)    | 25.6653 | 50 | 75.3306 | 96.6048 | 128.528 |
| ปริมาณคลอโรฟีนอลบนตัวดูดซับ (mg/g) | 4.33468 | 10 | 14.6694 | 23.3952 | 21.4718 |

ตารางที่ ข64 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอโรฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณคลอโรฟีนอลบน 100%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-HDTMA-clay

|                                    |         |         |         |         |         |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ความเข้มข้นของคลอโรฟีนอล (mg/L)    | 19.2258 | 38.4153 | 58.8911 | 80.8185 | 102.851 |
| ปริมาณคลอโรฟีนอลบนตัวดูดซับ (mg/g) | 10.7742 | 21.5847 | 31.1086 | 39.1815 | 47.1492 |

ตารางที่ ข65 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอโรฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณคลอโรฟีนอลบน 200%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-HDTMA-clay

|                                    |    |    |      |      |      |      |      |     |
|------------------------------------|----|----|------|------|------|------|------|-----|
| ความเข้มข้นของคลอโรฟีนอล (mg/L)    | 12 | 25 | 40.6 | 60.4 | 80.4 | 96.3 | 188  | 231 |
| ปริมาณคลอโรฟีนอลบนตัวดูดซับ (mg/g) | 18 | 35 | 49.4 | 59.6 | 69.6 | 80.5 | 92.1 | 102 |

ตารางที่ ข66 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอโรฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณคลอโรฟีนอลบน 50%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 50%CEC-TDMA-clay

|                                    |         |         |         |         |         |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ความเข้มข้นของคลอโรฟีนอล (mg/L)    | 25.5726 | 47.9919 | 75.6452 | 94.1653 | 119.254 |
| ปริมาณคลอโรฟีนอลบนตัวดูดซับ (mg/g) | 4.42742 | 12.0081 | 14.3548 | 25.8347 | 30.7460 |

ตารางที่ ข67 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอโรฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณคลอโรฟีนอลบน 200%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-TDMA-clay

|                                    |    |         |         |         |         |
|------------------------------------|----|---------|---------|---------|---------|
| ความเข้มข้นของคลอโรฟีนอล (mg/L)    | 23 | 45.2218 | 65.0565 | 87.1452 | 110.685 |
| ปริมาณคลอโรฟีนอลบนตัวดูดซับ (mg/g) | 7  | 14.7782 | 24.9435 | 32.8548 | 39.3145 |

ตารางที่ ข68 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอโรฟีนอลที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณคลอโรฟีนอลบน 100%CEC-BDHDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-BDHDMA-clay

| ความเข้มข้นของคลอโรฟีนอล (mg/L) | ปริมาณคลอโรฟีนอลบนตัวดูดซับ (mg/g) | ความเข้มข้นของคลอโรฟีนอล (mg/L) | ปริมาณคลอโรฟีนอลบนตัวดูดซับ (mg/g) |
|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 4.814516                        | 10.37096774                        | 43.87097                        | 52.25806452                        |
| 10.45161                        | 19.09677419                        | 62.1129                         | 55.77419355                        |
| 14.98387                        | 30.03225806                        | 78.41129                        | 63.17741935                        |
| 23.03226                        | 33.93548387                        | 94.47581                        | 71.0483871                         |
| 29.08065                        | 41.83870968                        | 114.0403                        | 71.91935484                        |

## 7. ความสามารถของมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับแอฟธาลิน

ตารางที่ ข69 ความเข้มข้นของแอฟธาลินที่เวลาต่างๆเมื่อใช้ 150% CEC-HDTMA-clay เป็นตัวดูดซับ

| เวลา (นาที)     | 0  | 10       | 40       | 70       | 100      | 130      |
|-----------------|----|----------|----------|----------|----------|----------|
| ความเข้มข้นของ  | 10 | 5.6      | 3.49     | 3.943529 | 3.49     | 4.21     |
| แอฟธาลิน (mg/L) | 20 | 7.932941 | 5.407059 | 6.710588 | 6.328235 | 5.929412 |

ตารางที่ ข70 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอฟธาลินที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณแอฟธาลินบน 50%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 50%CEC-HDTMA-clay

|                                  |         |         |         |         |         |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ความเข้มข้นของแอฟธาลิน (mg/L)    | 1.99765 | 6.23176 | 9.38471 | 13.1435 | 14.8753 |
| ปริมาณแอฟธาลินบนตัวดูดซับ (mg/g) | 6.00471 | 7.53647 | 11.2306 | 13.7129 | 20.2494 |

ตารางที่ ข71 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอฟธาลินที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณแอฟธาลินบน 100%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-HDTMA-clay

|                                  |          |          |          |          |
|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| ความเข้มข้นของแอฟธาลิน (mg/L)    | 2.94824  | 4.34235  | 6.86235  | 12.13765 |
| ปริมาณแอฟธาลินบนตัวดูดซับ (mg/g) | 14.10353 | 21.31529 | 26.27529 | 25.72471 |

ตารางที่ ข72 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอฟธาลินที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณแอฟธาลินบน 200%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-HDTMA-clay

|                                  |         |         |         |         |         |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ความเข้มข้นของแอฟธาลิน (mg/L)    | 3.49647 | 6.84235 | 9.75529 | 14.3506 | 16.7871 |
| ปริมาณแอฟธาลินบนตัวดูดซับ (mg/g) | 3.00706 | 6.31529 | 10.4894 | 11.2988 | 16.4259 |

ตารางที่ ข73 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอฟธาลินที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณแอฟธาลินบน 50%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 50%CEC-TDMA-clay

|                                  |      |         |         |         |         |
|----------------------------------|------|---------|---------|---------|---------|
| ความเข้มข้นของแอฟธาลิน (mg/L)    | 3.33 | 6.12538 | 8.02141 | 9.83486 | 11.0428 |
| ปริมาณแอฟธาลินบนตัวดูดซับ (mg/g) | 5    | 11.6239 | 20.9358 | 30.4954 | 41.8716 |

ตารางที่ ข74 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอฟธาไลน์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณแอฟธาไลน์บน 100%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-TDMA-clay

|                                   |         |         |         |         |         |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ความเข้มข้นของแอฟธาไลน์ (mg/L)    | 3.18654 | 5.16514 | 6.7737  | 7.81346 | 9.19877 |
| ปริมาณแอฟธาไลน์บนตัวดูดซับ (mg/g) | 5.44037 | 14.5046 | 24.6789 | 36.5596 | 47.4037 |

ตารางที่ ข75 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอฟธาไลน์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณแอฟธาไลน์บน 200%CEC-TDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 200%CEC-TDMA-clay

|                                   |     |         |         |         |         |
|-----------------------------------|-----|---------|---------|---------|---------|
| ความเข้มข้นของแอฟธาไลน์ (mg/L)    | 3.3 | 5.18949 | 6.72171 | 7.93578 | 9.29664 |
| ปริมาณแอฟธาไลน์บนตัวดูดซับ (mg/g) | 5   | 14.4495 | 24.8349 | 36.1927 | 47.1101 |

ตารางที่ ข76 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอฟธาไลน์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณแอฟธาไลน์บน 100%CEC-BDHDMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 100%CEC-BDHDMA-clay

|                                   |         |     |         |         |         |
|-----------------------------------|---------|-----|---------|---------|---------|
| ความเข้มข้นของแอฟธาไลน์ (mg/L)    | 0.31579 | 1.3 | 2.55639 | 3.45865 | 4.06015 |
| ปริมาณแอฟธาไลน์บนตัวดูดซับ (mg/g) | 9.36842 | 17  | 24.8872 | 33.0827 | 41.8797 |

ตารางที่ ข77 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอฟธาไลน์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณแอฟธาไลน์บน 150%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 150%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิ 288 K

|                                   |          |          |          |          |
|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| ความเข้มข้นของแอฟธาไลน์ (mg/L)    | 2.118824 | 4.978824 | 7.467059 | 10.95412 |
| ปริมาณแอฟธาไลน์บนตัวดูดซับ (mg/g) | 2.118824 | 4.978824 | 7.467059 | 10.95412 |

ตารางที่ ข78 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอฟธาไลน์ที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับกับปริมาณแอฟธาไลน์บน 150%CEC-HDTMA-clay ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ 150%CEC-HDTMA-clay ที่อุณหภูมิ 313 K

|                                   |         |         |         |         |         |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ความเข้มข้นของแอฟธาไลน์ (mg/L)    | 0.96588 | 4.11177 | 6.33412 | 10.4141 | 12.2965 |
| ปริมาณแอฟธาไลน์บนตัวดูดซับ (mg/g) | 8.06824 | 11.7765 | 17.3318 | 19.1718 | 25.4071 |

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ ดร. รัตน์วรรณ วิบูลย์สวัสดิ์

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ที่อยู่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา

โทร (044) 224-491

โทรสาร (044) 224-220

E-mail [ratanawa@ccs.sut.ac.th](mailto:ratanawa@ccs.sut.ac.th)

## ประวัติการศึกษา

| ปีที่จบการศึกษา | ระดับปริญญา | ชื่อปริญญา            | สาขาวิชา     | ชื่อสถาบันศึกษา       | ประเทศ |
|-----------------|-------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------|
| 2542            | ปริญญาเอก   | PhD                   | วิศวกรรมเคมี | Imperial College      | อังกฤษ |
| 2539            | ปริญญาโท    | MSc.                  | วิศวกรรมเคมี | Imperial College      | อังกฤษ |
| 2537            | ปริญญาตรี   | วทบ.<br>(เกียรตินิยม) | เคมีเทคนิค   | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย | ไทย    |

## ผลงานวิจัยตีพิมพ์ (Selected Publication)

1. R.Wibulswas, D.A. White and R.Rautiu, **Removal of Humic Substances from water by Alumina-based Pillared Clays**, *Environmental Technology*, **19**, 627-632 (1998)
2. R.Wibulswas, D.A. White and R.Rautiu, **Adsorption of Phenolic Compounds from water by Surfactant-modified Pillared Clays**, *ICemE*, **77**, Part B, 88-92 (1999)
3. R.Wibulswas, *Removal of Organic Compounds from Water using Modified Montmorillonite*, PhD thesis, Imperial College of Science Technology and Medicine London (September 1999)
4. D.A.White, G.Onkal-Engin and R.Wibulswas, **Simulation of the Errors in Equilibrium Correlations Using the Langmuir and BET Isotherms**, *Separation Science and Technology*, **35**(3), 367-377 (2000)
5. G.Onkal-Engin, R.Wibulswas and D.A. White, **Humic Acid Uptake from Aqueous media using Hydrotalcite and modified Montmorillonite**, *Environmental Technology*, **21**, 167-175 (2000)