



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นตัวดูดซับ
ในระบบหอดูดซับแบบฟลูอิดไธซ์เบด
(Adsorption Behavior of Montmorillonite Clay
in Fluidized Bed Column)

โดย

ผศ.ดร. รัตนวรรณ (วิบูลย์สวัสดิ์) เกียรติโกมล

กุมภาพันธ์ 2552

สัญญาเลขที่ RSA480002

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นตัวดูดซับ
ในระบบหอดูดซับแบบฟลูอิดไรซ์เบด
(Adsorption Behavior of Montmorillonite Clay
in Fluidized Bed Column)

โดย

ผศ.ดร. รัตนวรรณ (วิบูลย์สวัสดิ์) เกียรติโกมล
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

สนับสนุนทุนวิจัยโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: RSA480002

ชื่อโครงการ: การใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) เป็นตัวดูดซับในระบบหอ
ดูดซับแบบฟลูอิดไธเบต

ชื่อนักวิจัย: ผศ. ดร. รัตนวรรณ (วิบูลย์สวัสดิ์) เกียรติโกมล
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
11 ถ.มหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา
โทรศัพท์ 081-8668463 โทรสาร 02-9020597

E-mail address: ratanawan@teacher.com

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟลูอิดไธเซชันของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์
ภายในหอดูดซับ และศึกษาความสามารถและพัฒนากการใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นตัวดูดซับในระบบ
หอดูดซับแบบฟลูอิดไธเบต แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารประเภทอลูมินา-ซิลิเกต มีสมบัติในการดูดซับ
ได้ดี และเป็นวัสดุที่พบได้ในธรรมชาติจึงมีราคาถูก สำหรับแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็น
แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีการปรับปรุงคุณสมบัติของพื้นที่ผิวด้วยกรด เช่น HCl และ H_2SO_4 เพื่อเพิ่มประ
สิทธิภาพในการดูดซับสาร จากบริษัท Ashapura Volclay จำกัด

การทดลองเริ่มจากบรรจุแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ลงในหอฟลูอิดไธเบตที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 cm
และความสูงของหอเท่ากับ 50 cm นำแร่ดินที่ขนาดและปริมาณต่างกันมาทำฟลูอิดไธเซชันด้วยน้ำ เพื่อ
สังเกตปรากฏการณ์ฟลูอิดไธเซชันของแร่ดินและสังเกตหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไธเซชัน (U_{mf})
จากการทดลองพบว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์สามารถเกิดฟลูอิดไธเซชันในของเหลวได้ โดยค่า U_{mf} ที่ได้จาก
การทดลองไม่ขึ้นกับขนาดและปริมาณของแร่ดินในหอดูดซับ และจะมีค่าน้อยกว่าค่า U_{mf} ที่ได้จากการ
คำนวณจากสมการของ Ergun และสมการของ Riba แต่ค่าเศษส่วนช่องว่างของเบตจะขึ้นกับขนาดและ
น้ำหนักของแร่ดินภายในหอดูดซับ สำหรับการขยายตัวของเบตในการทดลองเมื่อเกิดฟลูอิดไธเซชันมีผล
สอดคล้องกับความสัมพันธ์ของ Richardson-Zaki ซึ่งสามารถหาค่าความเร็วสุดท้ายของการเกิดฟลูอิดไธ
เซชัน (U_t) และตัวชี้วัดการขยายตัวของเบต (n) จากการทดลองได้ ส่วนค่าเลขโบเดินสไตน์ การกระจายตัว
ของของแข็งและของเหลวในเบตที่มีการขยายตัวจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการทดลอง

จากนั้นนำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มาเป็นตัวดูดซับกรดฮิวมิกทั้งในระบบกะและในระบบฟลูอิดไธ
เบตพบว่า แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์สามารถนำมาเป็นตัวดูดซับกรดฮิวมิกออกจากน้ำได้ โดยผลการดูดซับ
กรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบกะพบว่า มีรูปแบบการดูดซับเป็นแบบ Langmuir Isotherm

และความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบกะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของแร่ดิน ส่วนผลการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบฟลูอิดิเซชันพบ่ว่า ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของแร่ดินในหลอดดูดซับ อัตราการไหลของสารละลายและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย แต่ไม่ขึ้นกับขนาดของแร่ดิน

คำหลัก: Montmorillonite Clays; Fluidization; Adsorption; Humic Acid; Wastewater Treatment

Abstract

Project Code: RSA480002

Project Title: Adsorption Behaviour of Montmorillonite Clay in Fluidized Bed Column

Investigator: Asst.Prof. Ratanawan (Wibulswas) Kiattikomol, PhD
 School of Chemical Engineering
 Suranaree University of Technology, Nakorn Ratchasima 30000
 Tel. 081-8668463 Fax 02-9020597

E-mail address: ratanawan@teacher.com

The thesis aim is to study the behaviors of Montmorillonite clays in a fluidized bed column and to use Montmorillonite clays as an adsorbent in the fluidized bed system. Montmorillonite is smectite clay mineral based on alumino-silicate structure. This clay is well known for its adsorption properties, low price and availability throughout the world. Montmorillonite, modified by inorganic acid (i.e. HCl and H₂SO₄), from Ashapura Volclay Ltd., was employed as the bed material in this research.

The behavior of Montmorillonite clay in the fluidized bed system was investigated in a fluidized bed column with I.D. of 4 cm and height of 50 cm. Water was used as the fluidizing liquid. Then, the minimum fluidization velocity (U_{mf}) was observed with different particle sizes and weights of Montmorillonite. The experimental results showed that the fluidization of Montmorillonite in liquid system was possible. The experimental U_{mf} did not depend on particle sizes and weights of Montmorillonite and it was lower than the calculated U_{mf} by Ergun and Riba equation because the particle sizes in the fluidization process decreased with time. The void fraction of the bed strongly depended on the clay particle sizes and weights. The terminal velocity (U_t) and expansion index (n) in the fluidized bed were well determined according to the Richard-Zaki correlation between the superficial velocity of the feed stream and the void fraction of the bed. Dispersion in liquid, solid phase and Bodenstein number (Bo) were found to depend on the liquid flow rates.

The adsorption of humic acid from aqueous solution by Montmorillonite was investigated in fluidized bed and, for comparison, in batch mode. The results indicated that Montmorillonite could be used as an adsorbent of humic acid from water. Batch adsorption experiments showed that the

adsorption isotherm fitted well with the Langmuir equation. The adsorption capacities did not depend on the clay particle sizes. For the fluidized bed adsorption, the adsorption capacities depended on the clay weights, flow rates and initial concentrations of solution but did not depend on the clay particle sizes.

Keywords: Montmorillonite Clays; Fluidization; Adsorption; Humic Acid; Wastewater Treatment

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคล ต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือจนกระทั่งโครงการวิจัยนี้สำเร็จ
ลุล่วงได้ด้วยดี

1. รศ.ดร.ชัยยศ ตั้งสฤติย์กุล ที่กรุณาให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ยิ่งในการทำการทำ
โครงการวิจัย
2. ดร.อิศรา ประมูลสุข ที่กรุณาให้แนะนำในการเขียนบทคัดย่อภาษาอังกฤษ
3. เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณสรณัย
ดอกไม้กุล ที่ได้ให้ความช่วยเหลือเรื่องอุปกรณ์การทดลอง และสถานที่ทดลอง
4. ทุนพัฒนานักวิจัย จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ประจำปีงบประมาณ
2548

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 แร่ดินเหนียว (Clay Mineral).....	6
2.2 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite Clay).....	8
2.3 กรดฮิวมิก (Humic Acid).....	12
2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption).....	16
2.5 ฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidize Bed).....	25
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	38
3.1 วิธีวิจัย.....	38
3.2 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง.....	38
3.3 ตัวแปรในการทดลอง.....	39

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	40
3.5 วิธีการทดลอง.....	42
3.6 วิธีวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	47
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล.....	49
4.1 ฟลูอิดเซชันของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในน้ำ.....	49
4.1.1 ลักษณะการเกิดฟลูอิดเซชันของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในน้ำ.....	49
4.1.2 ความสัมพันธ์ของการขยายตัวของเบคกับความเร็วที่ใช้ในการทดลอง.....	55
4.1.3 การกระจายตัวของของเหลว - วิเคราะห์ด้วยค่า B_0 และ $D_{ax,l}$	59
4.1.4 การกระจายตัวของของแข็ง - วิเคราะห์ด้วยค่า $D_{ax,p}$	61
4.2 การดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบกะ.....	62
4.3 การดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบฟลูอิดเซชันเบค.....	64
4.3.1 ผลของขนาดของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิก.....	64
4.3.2 ผลของปริมาณของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิก.....	66
4.3.3 ผลของอัตราการใช้ของสารละลายกรดฮิวมิกต่อประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิก.....	68
4.3.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายกรดฮิวมิกต่อประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิก.....	70
4.4 ผลการเปรียบเทียบการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบกะและในระบบฟลูอิดเซชันเบค.....	72
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	73
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	73
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยต่อไป.....	74

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

เอกสารอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	80
ภาคผนวก ข สมบัติทางกายภาพของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์.....	86
ภาคผนวก ค ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง.....	93
ภาคผนวก ง บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	115

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ผลสรุปสมบัติของเรซินมอนต์มอริลโลไนต์.....10
2.2	การแบ่งประเภทอนุภาคผงโดย Geldart.....37
3.1	ขนาดของอนุภาคที่ Mesh No.ต่าง ๆ และขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ใช้ในการทดลอง.....39
3.2	สมบัติทางกายภาพของเรซินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผลิตโดย บริษัท Ashapura Volclay จำกัด.....42
3.3	องค์ประกอบทางเคมี (%โดยน้ำหนัก) ของเรซินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผลิตโดย บริษัท Ashapura Volclay จำกัด.....42
3.4	ค่าความเร็วเชิงเส้นของน้ำที่อัตราการไหลเชิงปริมาณต่าง ๆ.....43
3.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกรดฮิวมิคกับค่า Absorbance.....45
4.1	ค่า U_{mf} ที่ได้จากรูปที่ 4.2 และค่า U_{mf} ที่สังเกตได้จากการทดลอง.....52
4.2	ค่า U_{mf} ที่ได้จากการทดลอง และค่า U_{mf} ที่ได้จากการคำนวณ และค่าเศษส่วนช่องว่างของเบด (ϵ) ที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ (2.17).....53
4.3	ค่า G_a และ Re_{mf} ที่ใช้ในการหาค่า U_{mf} จากสมการของ Riba.....54
4.4	ค่า U_t และค่า n ที่ได้จากความสัมพันธ์ของสมการ Richardson-Zaki.....56
4.5	ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิคของเรซินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ขนาดต่าง ๆ ในระบบกะ.....63
4.6	ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิคของเรซินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ขนาดต่าง ๆ ในระบบฟลูอิดไซ์เบด เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $W = 15 \text{ g}$65
4.7	ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิคของเรซินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปริมาณต่าง ๆ ในระบบฟลูอิดไซ์เบด เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$67
4.8	ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิคของเรซินมอนต์มอริลโลไนต์ ที่อัตราการไหลของสารละลายต่าง ๆ ในระบบฟลูอิดไซ์เบด เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $W = 15 \text{ g}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$69

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่าง ๆ ในระบบฟลูอิด์เบค เมื่อ $Q = 100 \text{ ml/min}$, $W = 20 \text{ g}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$	71
4.10 ผลการเปรียบเทียบการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ในระบบกะและในระบบฟลูอิด์เบค.....	72
ข.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดที่แท้จริงของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ เมื่อขนาดแร่ดินเริ่มต้นเท่ากับ 0.8 mm	88
ข.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดที่แท้จริงของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ เมื่อขนาดแร่ดินเริ่มต้นเท่ากับ 0.51 mm	90
ข.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดที่แท้จริงของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ เมื่อขนาดแร่ดินเริ่มต้นเท่ากับ 0.34 mm	92
ค.1 ค่าความสูงของเบดที่ความเร็วของน้ำต่าง ๆ เมื่อน้ำหนักเริ่มต้นของเบดคือ 10 กรัม 15 กรัม และ 20 กรัม.....	94
ค.2 ผลการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบกะเมื่อน้ำหนักของ ตัวดูดซับเท่ากับ 1 กรัม และปริมาตรของสารละลายกรดฮิวมิกเท่ากับ 100 ml และ คำนวณค่าปริมาณกรดฮิวมิกสูงสุดบนตัวดูดซับได้จากรูปที่ ข.....	95
ค.3 ผลการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ที่ขนาดต่าง ๆ เมื่อ $C_o = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $W = 15 \text{ g}$	97
ค.4 ผลการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ที่ปริมาณต่าง ๆ เมื่อ $C_o = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$	101
ค.5 ผลการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ที่อัตราการไหลของสารละลายต่าง ๆ เมื่อ $C_o = 100 \text{ mg/l}$, $W = 15 \text{ g}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$	105
ค.6 ผลการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่าง ๆ เมื่อ $Q = 100 \text{ ml/min}$, $W = 20 \text{ g}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$	109

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.7 ค่า pH ของสารละลายหลังการดูดซับที่ขนาดของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่าง ๆ เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $W = 15 \text{ g}$	113
ก.8 ค่า pH ของสารละลายหลังการดูดซับที่ปริมาณของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่าง ๆ เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$	113
ก.9 ค่า pH ของสารละลายหลังการดูดซับที่อัตราการไหลของสารละลายที่ถูกดูดซับต่าง ๆ เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $W = 15 \text{ g}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$	114
ก.10 ค่า pH ของสารละลายหลังการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่ถูกดูดซับ ต่าง ๆ เมื่อ $Q = 100 \text{ ml/min}$, $W = 20 \text{ g}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$	114

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์.....8
2.2	ภาพขยายพื้นที่ผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ที่ถ่ายจาก SEM (Scanning Electron Micrograph).....10
2.3	ความสัมพันธ์ของ pH กับระยะห่างระหว่างชั้นของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์.....11
2.4	กระบวนการเกิดการสารฮิวมิกตามธรรมชาติ.....12
2.5	การละลายของสารฮิวมิก (Humic Substances).....13
2.6	โครงสร้างของกรดฮิวมิก.....14
2.7	การดูดซับด้วยตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง.....16
2.8	รูปแบบของไอโซเทิร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ของระบบดูดซับก๊าซ.....20
2.9	รูปแบบของไอโซเทิร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ของระบบดูดซับของเหลว.....21
2.10	แสดงเบดขณะเกิดฟลูอิดไเซชัน.....25
2.11	ค่าความดันตกและความสูงเบดกับความเร็วของของไหลสำหรับชั้นอนุภาคของแข็ง.....27
2.12	B_o (สัญลักษณ์กลวง) และ $D_{ax,1}$ (สัญลักษณ์ทึบ) ที่คำนวณจากสมการที่ (2.33), (2.34) และ(2.35) กับค่าความเร็วของของเหลวที่ใช้ในการดูดซับในระบบฟลูอิดไเซชันเบด.....34
2.13	การแบ่งกลุ่มอนุภาคของแข็งประเภทผง (Powders) โดย Geldart.....36
3.1	ระบบหอดูดซับแบบฟลูอิดไเซชันเบด.....40
3.2	กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกรดฮิวมิกกับ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ความยาวคลื่น 400 nm.....45
4.1	ค่าความสูงของเบดที่ความเร็วของน้ำต่าง ๆ เมื่อน้ำหนักเริ่มต้นของเบดคือ (ก) 10 กรัม (ข) 15 กรัม และ (ค) 20 กรัม.....50
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln L$ กับ $\ln U$ เมื่อน้ำหนักเริ่มต้นของเบดคือ (ก) 10 กรัม (ข) 15 กรัม และ (ค) 20 กรัม.....51
4.3	กราฟความสัมพันธ์ตามสมการของ Richardson-Zaki เมื่อน้ำหนักเริ่มต้นของเบดคือ (ก) 10 กรัม (ข) 15 กรัม และ (ค) 20 กรัม.....55

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของเบด (L_o/L) กับเศษส่วนของแข็ง (ϕ_s/ϕ_{so}) ตามสมการที่ (2.32) เมื่อน้ำหนักเริ่มต้นของเบดคือ (ก) 10 กรัม (ข) 15 กรัม และ (ค) 20 กรัม.....	57
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า B_o (สัญลักษณ์กลวง) และ $D_{ax,l}$ (สัญลักษณ์ทึบ) กับความเร็วน้ำสำหรับฟลูอิดเซชันของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในน้ำ เมื่อน้ำหนักเริ่มต้นของเบดคือ (ก) 10 กรัม (ข) 15 กรัม และ (ค) 20 กรัม.....	59
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $D_{ax,p}$ กับความเร็วของน้ำ สำหรับฟลูอิดเซชันของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในน้ำ.....	61
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีขนาดต่างกัน.....	62
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q กับ C_e จากสมการที่ (2.10) เพื่อหาค่าปริมาณกรดฮิวมิกสูงสุดบนพื้นผิวตัวดูดซับของการดูดซับแบบชั้นเดียว (mg/g).....	63
4.9 รูปแบบการดูดซับกรดฮิวมิกโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ขนาดต่าง ๆ เป็นตัวดูดซับในระบบฟลูอิดเบดเมื่อ $C_o = 100$ mg/l, $Q = 100$ ml/min และ $W = 15$ g.....	64
4.10 ผลของขนาดของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่อกราฟเบรคทรูเมื่อ $C_o = 100$ mg/l, $Q = 100$ ml/min และ $W = 15$ g.....	65
4.11 ประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ขนาดต่าง ๆ เมื่อ $C_o = 100$ mg/l, $Q = 100$ ml/min และ $W = 15$ g.....	65
4.12 รูปแบบการดูดซับกรดฮิวมิกโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่าง ๆ เป็นตัวดูดซับในระบบฟลูอิดเบด เมื่อ $C_o = 100$ mg/l, $Q = 100$ ml/min และ $D_p = 0.51$ mm.....	66
4.13 ผลของปริมาณของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่อกราฟเบรคทรูเมื่อ $C_o = 100$ mg/l, $Q = 100$ ml/min และ $D_p = 0.51$ mm.....	67
4.14 ประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่าง ๆ เมื่อ $C_o = 100$ mg/l, $Q = 100$ ml/min และ $D_p = 0.51$ mm.....	67
4.15 รูปแบบการดูดซับกรดฮิวมิกที่อัตราการไหลของสารละลายต่าง ๆ ในระบบฟลูอิดเบดเมื่อ $C_o = 100$ mg/l, $W = 15$ g และ $D_p = 0.51$ mm.....	68

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 ผลของอัตราการไหลของสารละลายต่อกราฟเบรคทรูเมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $W = 15 \text{ g}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$	69
4.17 ประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของเรซินมอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราการไหล ของสารละลายต่าง ๆ เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $W = 15 \text{ g}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$	69
4.18 รูปแบบการดูดซับกรดฮิวมิกที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ในระบบฟลูอิดซ์เบด เมื่อ $Q = 100 \text{ ml/min}$, $W = 20 \text{ g}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$	70
4.19 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่อกราฟเบรคทรูเมื่อ $Q = 100 \text{ ml/min}$, $W = 20 \text{ g}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$	71
4.20 ประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของเรซินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ของสารละลายต่าง ๆ เมื่อ $Q = 100 \text{ ml/min}$, $W = 20 \text{ g}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$	71
ก.1 เรซินมอนต์มอริลโลไนต์จากบริษัท Ashapura Volclay จำกัด.....	81
ก.2 กรดฮิวมิกจากบริษัท Fluka จำกัด.....	81
ก.3 น้ำดื่มตรามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (น้ำดื่มตรา มทส).....	82
ก.4 หลอดเก็บตัวอย่าง.....	82
ก.5 เครื่องเขย่าแบบแนวราบ.....	83
ก.6 เครื่องปั่นเหวี่ยงแยก.....	83
ก.7 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง Spectronic 20.....	84
ก.8 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย.....	84
ก.9 เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำดื่ม มทส.....	85
ข.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดที่แท้จริงของเรซินมอนต์มอริลโลไนต์ เมื่อขนาดเรซินเริ่มต้นเท่ากับ 0.8 mm	87
ข.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดที่แท้จริงของเรซินมอนต์มอริลโลไนต์ เมื่อขนาดเรซินเริ่มต้นเท่ากับ 0.8 mm	89
ข.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดที่แท้จริงของเรซินมอนต์มอริลโลไนต์ เมื่อขนาดเรซินเริ่มต้นเท่ากับ 0.8 mm	91

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- ก ความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q กับ C_e จากสมการที่ (2.10) เพื่อหาค่าปริมาณกรดฮิวมิก
สูงสุดบนพื้นผิวตัวดูดซับของการดูดซับแบบชั้นเดียว (q_m : mg/g).....96

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Abs	=	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
BET	=	Brunauer Emmett and Teller
CEC	=	Cation Exchange Capacity
NOCs	=	Nonionic Organic Compounds
pH	=	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
R.O.	=	Reverse Osmosis
SEM	=	Scannig Electron Micrograph
THMs	=	Trihalomethane (สารไตรฮาโลมีเทน)
XRD	=	X-ray Diffractrometer
XRF	=	X-ray Fluorescence Spectrometer
Bo	=	ตัวเลขโบเดินสไตน์ (Bodenstein Number)
C	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย (g/cm^3 , mol/l หรือ mg/l)
C_0	=	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (mg/l)
C_e	=	ความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุลหลังการดูดซับ (mg/l)
C_s	=	ความสามารถในการละลาย (Solubility) ของตัวถูกละลายในสารละลาย (mg/l)
C_1	=	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายกรดอินทรีย์มาตรฐาน (mg/l)
C_2	=	ความเข้มข้นของสารละลายกรดอินทรีย์ที่ต้องการ (mg/l)
$D_{ax,l}$	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ตามแนวแกนของของเหลว (m^2/s)
$D_{ax,p}$	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ตามแนวแกนของของแข็ง (m^2/s)
D_c	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อฟลูอิดิซ์เบด (cm)
D_p	=	ขนาดอนุภาค (mm, μm หรือ nm)
Ga	=	ตัวเลขกาลิเลโอ (The Gallileo Number)
K_d	=	สัมประสิทธิ์การแจกแจง (Distribution Coefficient) หรือค่าคงที่ Henry's Law (Henry's Law Constant) (l/g)
K_f	=	Freundlich Capacity Factor
L	=	ความสูงของเบด (m หรือ cm)
L_0	=	ความสูงของเบดที่อัตราการไหลของของเหลวเท่ากับศูนย์ (m หรือ cm)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

m, W	=	น้ำหนักของตัวดูดซับหรือน้ำหนักเริ่มต้นของเบด (g)
$1/n$	=	Freundlich Intensity Parameter
n	=	ตัวชี้วัดการขยายตัว (The Expansion Index)
P	=	ความดันย่อยของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคก๊าซ
P°	=	ความดันไออิ่มตัวของสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิการดูดซับ
Pe_p	=	ตัวเลขเพคเลตของอนุภาค (The Particle Peclet Number)
ΔP	=	ความดันลด (Pressure Drop) ($\text{kg/m}^2 \text{ s}^2$)
q	=	ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (mol/g , g/g , mg/g หรือ $\text{cm}^3 \text{ STP/g}$ สำหรับการดูดซับก๊าซ)
q_e	=	ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับที่สมดุลหลังการดูดซับ (mg/g)
q_m	=	ปริมาณตัวถูกดูดซับสูงสุดบนพื้นผิวตัวดูดซับของการดูดซับแบบชั้นเดียว (mg/g)
q_0	=	ปริมาณตัวถูกดูดซับสูงสุดบนพื้นผิวตัวดูดซับในระบบฟลูอิดไเซชันเบด (mg/g)
Q	=	อัตราการไหลของของเหลว (ml/min)
Re	=	ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number)
Re_t	=	ตัวเลขเรย์โนลด์สุดท้าย (The Terminal Reynolds Number)
Re_{mf}	=	ตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำสุดสำหรับการฟลูอิดไเซชัน (The Minimum Reynolds Number for Fluidization)
T	=	อุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$)
U	=	ความเร็วของของเหลว (The Superficial Velocity) (m/s)
U_{mf}	=	ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไเซชัน (Minimum Fluidization Velocity) (m/s)
U_t	=	ความเร็วสุดท้ายของอนุภาคของแข็งหรือความเร็วสุดท้ายการเกิดฟลูอิดไเซชัน (Terminal Velocity) (m/s)
U_e	=	Effective Superficial Velocity = U/ε (m/s)
V	=	ปริมาตรของสารละลาย (l หรือ ml)
V_b	=	ปริมาตรของเบด (m^3 หรือ cm^3)
V_p	=	ปริมาตรของอนุภาค (m^3 หรือ cm^3)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

V_1	=	ปริมาตรของสารละลายกรดฮิวมิคมาตรฐานที่ต้องใช้ (ml)
V_2	=	ปริมาตรของสารละลายกรดฮิวมิคที่ต้องการเตรียม (ml)
% utilization	=	เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ในระบบฟลูอิด์เบดเทียบกับระบบกะ
α	=	ค่าความแตกต่างของความร้อนในการดูดซับของตัวถูกดูดซับชั้นที่หนึ่งกับชั้นอื่น ๆ
ε	=	ค่าความพรุนของอนุภาค (Porosity) หรือค่าเศษส่วนช่องว่างภายนอกของเบด (The External Void Fraction of the Bed)
ε_M	=	ค่าความพรุนต่ำสุดของอนุภาค (Minimum Porosity)
ε_o	=	ค่าเศษส่วนช่องว่างของเบดที่อัตราการไหลของของเหลวเท่ากับศูนย์
η	=	ประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิคเมื่อคิดในระบบของเหลว (%)
ρ, ρ_f	=	ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)
ρ_l	=	ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)
ρ_p, ρ_s	=	ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (kg/m^3)
Φ_s	=	แฟกเตอร์รูปร่าง (Shape Factor)
ϕ_s	=	เศษส่วนของแข็งของการขยายตัวที่ความสูงเบด L ซึ่งค่า $\phi_s = 1 - \varepsilon$
ϕ_{so}	=	เศษส่วนของแข็งที่อัตราการไหลของของเหลวเท่ากับศูนย์
μ	=	ความหนืดของของเหลว (kg/m s)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มลพิษทางน้ำหรือน้ำเสียเป็นปัญหาที่ทวีความรุนแรงมากขึ้นตามระดับการพัฒนาชุมชน และการพัฒนาประเทศที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชุมชนเมืองและในพื้นที่อุตสาหกรรม หากไม่มีการแก้ไขอย่างทันทั่วที่จะส่งผลที่ไม่พึงประสงค์อย่างมากมาต่อคุณภาพชีวิต น้ำเสียจากพื้นที่ อุตสาหกรรมเป็นน้ำเสียที่เกิดจากระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นน้ำล้างใน กระบวนการผลิตต่าง ๆ ที่มีสมบัติแตกต่างกันตามประเภทของอุตสาหกรรม น้ำเสียของ อุตสาหกรรมบางแห่งอาจปนเปื้อนสารเคมีที่เป็นพิษและพวกโลหะหนักต่าง ๆ รวมทั้งพวก สารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูงด้วย ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมก่อนปล่อยลงสู่ แหล่งน้ำธรรมชาติ จึงเป็นสิ่งจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่งที่ทางโรงงานอุตสาหกรรมควรปฏิบัติ เพราะ จะเป็นการรักษาแหล่งน้ำธรรมชาติให้สะอาดและนำไปสู่สภาพแวดล้อมที่ดี แต่ในปัจจุบันสาเหตุ หลักที่ทำให้ทางโรงงานอุตสาหกรรมละเลยการบำบัดน้ำเสีย คือ ค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงในการบำบัด น้ำเสีย ดังนั้นหากสามารถปรับปรุงกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพแต่มีราคาถูก อาจ เป็นแรงจูงใจให้ภาคอุตสาหกรรมทำการบำบัดน้ำเสียเพิ่มขึ้น (ปิยมภรณ์ จารุงศ์, 2545)

การบำบัดน้ำเสียเป็นการกำจัดสารต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียให้หมดไปหรือเหลือน้อย ที่สุดให้ได้มาตรฐานที่กำหนดและไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีวิธีการและกระบวนการที่ แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสมบัติและประเภทของน้ำเสีย โดยทั่วไปกระบวนการบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่ง ได้ 3 วิธี คือ 1. กระบวนการทางกายภาพ 2. กระบวนการทางเคมี และ 3. กระบวนการทางชีวภาพ การดูดซับเป็นกระบวนการทางกายภาพอย่างหนึ่งในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีความสำคัญโดยเฉพาะใน การกำจัดสารที่ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยกระบวนการทางชีวภาพ (McKay, 1996 อ้างถึงใน ปิยมภรณ์ จารุงศ์, 2545) สำหรับตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับต้องมีพื้นที่ผิวมาก และมีขนาดรูพรุน ใหญ่พอที่จะให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าไปได้ ซึ่งวัสดุและวิธีการผลิตตัวดูดซับตามหลักทาง เศรษฐศาสตร์ไม่ควรมีราคาสูงและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยตัวดูดซับแต่ละชนิดมี ความสามารถในการดูดซับที่ต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ถูกดูดซับ ระบบในการดูดซับ และสถานะของระบบ เช่น ความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิในการดูดซับ ตัวอย่างตัวดูดซับที่ใช้อยู่ใน ปัจจุบัน เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ใช้กำจัดสี กลิ่น ออกจากน้ำ ใช้ในการทำ

ไฮโดรเจนบริสุทธิ์ หรือใช้กำจัดสารอินทรีย์ในกระบวนการบำบัดน้ำ ซีโอไลต์ (Zeolite) ใช้ในกระบวนการทำให้แห้ง (Dehydration) การทำให้บริสุทธิ์ (Purification) การแยกสาร (Separation) (นิสกร ปานประสงค์, www, 2546) เช่น การนำออกซิเจนออกจากน้ำ การนำคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้ใหม่ และอื่น ๆ ซิลิกาเจล (Silica Gel) ใช้ในการดูดความชื้นในระบบต่าง ๆ และแร่ดิน (Clays Mineral) เป็นวัสดุหนึ่งที่ถูกเลือกมาเป็นตัวดูดซับ เช่น แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) (Thomas and Crittenden, 1998)

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาการนำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มาเป็นตัวดูดซับในระบบบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นวัสดุที่พบได้ในธรรมชาติ จึงมีราคาถูก และสามารถพบได้ในประเทศไทย เช่น ในเขตจังหวัดลพบุรี ในเขตอำเภอสนับปราย จังหวัดลำปาง และเขตอำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ (จุมพล คั่นดัก, ธงชัย พึ่งรัศมี และ พิกพ วสุวานิช, 2521 อ้างถึงใน ปิยะมาภรณ์ จารวงษ์, 2545) ราคาประมาณ 7 บาท ต่อ 1 กิโลกรัม (ราคาจากบริษัท ไทยนิปปอนเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม จำกัด) และราคา 3 บาท ต่อ 1 กิโลกรัม (ราคาจากบริษัท ZMC อุตสาหกรรม จำกัด)

แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จัดอยู่ในกลุ่มสเมคไทต์ (Smectite) เป็นดินเหนียวแบบ 2 : 1 คือ มีแผ่นซิลิกาออกไซด์ (SiO_4) 2 แผ่น ประกบแผ่นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) 1 แผ่น เป็นลักษณะที่ซ้อนกันเป็นชั้น (Lamellar Structure) และมีช่องว่างระหว่างชั้น ซึ่งแต่ละชั้นจะยึดเกาะด้วยประจุบวกที่มีอยู่ตามธรรมชาติในดิน เช่น แคลเซียม (Ca^{2+}) และโซเดียม (Na^+) โดยธรรมชาติอนุภาคของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มีขนาดเล็ก จึงมีผลทำให้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง นอกจากนี้ลักษณะโครงสร้างที่เป็นชั้นของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ สามารถขยายตัวได้เมื่ออยู่ในของเหลวจึงทำให้อนุภาคอื่น ๆ ที่อยู่ภายในของเหลวสามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ในชั้นโครงสร้างด้วยเหตุนี้จึงมีการนำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มาเป็นตัวดูดซับในการวิจัยครั้งนี้ นอกจากนี้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ยังสามารถนำมาปรับปรุงสมบัติของพื้นที่ผิวเพื่อให้เหมาะสมกับสารที่จะดูดซับ และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสาร โดยจะทำการแลกเปลี่ยนประจุบวกที่มีอยู่ในแร่ดินกับสารต่าง ๆ เช่น โซเดียม (Sodium : Na^+) จะเรียกแร่ดินนี้ว่าโซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Sodium Montmorillonite) สารอินทรีย์ (Organic Compounds) จะเรียกแร่ดินนี้ว่า Organic Clay สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ได้รับการปรับปรุงผิวโดยใช้กรด เช่น กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) จากบริษัท Ashapura Volclay จำกัด ซึ่งจะเรียกแร่ดินนี้ว่า Acid Modified Clay

ในการวิจัยครั้งนี้จะทำการศึกษาการดูดซับสารอินทรีย์คือ กรดฮิวมิกออกจากน้ำโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ได้รับการปรับปรุงสมบัติของพื้นที่ผิวด้วยกรด (Acid Modified Clay) เป็นตัวดูดซับ ซึ่งกรดฮิวมิกเป็นสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์หากมีปริมาณที่ไม่เหมาะสม การที่กรดฮิวมิกสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ เช่น เกิดจากการย่อย

สลายของซากพืชที่จมอยู่ในน้ำ เกิดจากน้ำมัน สารซักฟอกต่าง ๆ ที่มาจากพื้นที่อุตสาหกรรม และเกิดจากการใช้ประโยชน์จากกรดฮิวมิก เช่น ใช้เป็นสารมาปรับปรุงคุณภาพดินให้มีความอุดมสมบูรณ์ในทางการเกษตร ทำให้กรดฮิวมิกสามารถแพร่ไปสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ง่ายขึ้น ซึ่งที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นตัวดูดซับเพื่อใช้งานในระบบบำบัดน้ำเสีย เริ่มจาก ปิยะมากรณ์ จารุงศ์ และรัตนวรรณ วิบูลย์สวัสดิ์ (2547) ได้ศึกษาสมมูลการดูดซับในระบบการดูดซับขั้นตอนเดียวแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Single State Adsorption) จากนั้นเป็นการศึกษาความสามารถการดูดซับสารอินทรีย์จากน้ำของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง (Fixed Bed) ซึ่งเป็นระบบที่มีการไหล (Flow System) แบบต่อเนื่อง จักกฤษ อัมพฤษ และรัตนวรรณ (วิบูลย์สวัสดิ์) เกียรติโกมล (2548) ได้ศึกษาการกำจัดสีข้อมในน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมผ้าระดับอุตสาหกรรมครัวเรือนโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง โดยปัญหาที่พบในการดูดซับแบบเบดนิ่งคือ ความสามารถในการซึมผ่านเบดของสารละลายต่ำ ทำให้มีการสูญเสียพลังงานสูง โดยการสูญเสียพลังงานจะแสดงอยู่ในรูปความดันตก (Pressure Drop) และมีการสัมผัสระหว่างสารละลายกับอนุภาคของแร่ดินน้อย เพื่อแก้ปัญหานี้ จึงเลือกทำการศึกษการดูดซับในระบบหอดูดซับแบบฟลูอิดไคเซเบด และจากการค้นคว้าพบว่ายังไม่มีผู้ศึกษการดูดซับโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นตัวดูดซับในระบบหอดูดซับแบบฟลูอิดไคเซเบดมาก่อน

ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงเป็นทำการศึกษการดูดซับสารอินทรีย์ออกจากน้ำโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ได้รับการปรับปรุงสมบัติของพื้นที่ผิวด้วยกรด (Acid Modified Clay) เป็นตัวดูดซับในระบบหอดูดซับแบบฟลูอิดไคเซเบด

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 วัตถุประสงค์ทั่วไป

เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟลูอิดไคเซชันของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ และศึกษาความสามารถและพัฒนการใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นตัวดูดซับสารอินทรีย์ในระบบหอดูดซับแบบฟลูอิดไคเซเบด

1.2.2 วัตถุประสงค์เฉพาะสำหรับการศึกษาฟลูอิดไคเซชันของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

เพื่อศึกษาลักษณะฟลูอิดไคเซชันของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์และหาค่าที่เกี่ยวข้องกับฟลูอิดไคเซชัน เช่น ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไคเซชัน (U_{mf}) ความเร็วสุดท้ายของการเกิดฟลูอิดไคเซชัน (U) ตัวชี้วัดการขยายตัวของเบด (n) ตัวเลขโบเดินสไตน์ (Bo) ค่าสัมประสิทธิ์การผสมตามแนวแกนของของเหลวและของแข็ง ($D_{ax,l}$ และ $D_{ax,p}$) จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่า U_{mf} ที่ได้

จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการต่าง ๆ เช่น สมการของ Ergun และสมการของ Riba

1.2.3 วัตถุประสงค์เฉพาะสำหรับการศึกษาการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบฟลูอิดซ์เบดของเหลว

1.2.3.1 เพื่อศึกษาผลของขนาดและปริมาณของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ใช้เป็นเบดในหอฟลูอิดซ์ต่อการดูดซับกรดฮิวมิกออกจากน้ำ

1.2.3.2 เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่อการดูดซับกรดฮิวมิกออกจากน้ำ

1.2.3.3 เพื่อหาค่าความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบฟลูอิดซ์เบดที่สภาวะต่าง ๆ

1.2.3.4 เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบฟลูอิดซ์เบดและในระบบกะ

1.3 สมมติฐานการวิจัย

1.3.1 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ใช้เป็นเบดในหอฟลูอิดซ์เบดสามารถเกิดการฟลูอิดซ์ได้

1.3.2 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์สามารถใช้เป็นตัวดูดซับกรดฮิวมิกในระบบหอดูดซับแบบฟลูอิดซ์เบดได้

1.3.3 เมื่อขนาดและปริมาณของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ใช้เป็นตัวดูดซับในหอฟลูอิดซ์เบดไม่เท่ากัน จะให้ผลการดูดซับกรดฮิวมิกออกจากน้ำที่ต่างกัน

1.3.4 เมื่ออัตราการไหลและความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิกไม่เท่ากัน จะให้ผลการดูดซับกรดฮิวมิกออกจากน้ำที่ต่างกัน

1.3.5 ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบฟลูอิดซ์เบดไม่เท่ากับในระบบกะ

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ใช้ในการทดลองมาจาก บริษัท Ashapura Volclay จำกัด

1.4.2 ดำเนินการคัดขนาดของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ให้ได้ช่วงอนุภาคที่ต้องการคือ 0.80, 0.51 และ 0.34 มิลลิเมตร

1.4.3 ทำการทดลองฟลูอิดเซชันของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ที่ขนาดและปริมาณของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่างกัน

1.4.4 ดำเนินการทดลองการดูดซับกรดฮิวมิกออกจากน้ำ โดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นตัวดูดซับในระบบหอดูดซับแบบฟลูอิดเซชันที่สภาวะต่าง ๆ คือ ขนาดและปริมาณของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่างกัน อัตราการไหลและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายกรดฮิวมิกต่างกัน

1.4.5 วิเคราะห์ผลการดูดซับโดยใช้เทคนิคเคมีวิเคราะห์ เช่น การหาความเข้มข้นของกรดฮิวมิกในสารละลายหลังการดูดซับ

1.4.6 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบฟลูอิดเซชันและในระบบกะ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เป็นหน่วยปฏิบัติการต้นแบบอย่างง่ายที่ใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นตัวดูดซับในระบบหอดูดซับแบบฟลูอิดเซชัน

1.5.2 เป็นการนำแร่ดินที่เป็นวัสดุที่พบในธรรมชาติและพบในประเทศไทยมาใช้ให้เกิดประโยชน์

1.5.3 ลดอันตรายและค่าใช้จ่ายที่อาจเกิดจากตัวดูดซับที่เป็นสารสังเคราะห์

1.5.4 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการจริงต่อไป โดยจะเป็นอีกทางเลือกสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งใช้ในการดูดซับสิ่งเจือปนออกจากน้ำ

บทที่ 2

ปฐมนิเทศและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ขอบเขตของการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยครั้งนี้ จะกล่าวถึง แร่ดินเหนียว แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ สารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับออกจากน้ำคือ กรดฮิวมิก ทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับและฟลูอิดไรเซชัน ซึ่งจะแสดงรายละเอียดเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

2.1 แร่ดินเหนียว (Clay Mineral)

แร่ดินเหนียวเป็นแร่ที่พบในตะกอนและการสลายตัวของเถ้าภูเขาไฟ หรือเกิดจากการผุพังของหิน โดยทั่วไปอนุภาคมีขนาดเล็กกว่าระดับไมโครเมตร มีธาตุอลูมิเนียม ซิลิกอน และออกซิเจน เป็นองค์ประกอบหลักทางเคมี โครงสร้างของแร่ดินเหนียวหรือสารประกอบจำพวกแอนไฮดรัสอลูมิโนซิลิเกตส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นแผ่น เกิดจากการเรียงซ้อนกันของชั้นอลูมินา และซิลิกา และในระหว่างชั้นจะมีไอออนบวกของธาตุโลหะ เช่น โซเดียม แคลเซียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และเหล็กแทรกอยู่ (Deer, Howie, and Zussman, 1992 อ้างถึงใน สรินทร ลิ้มปนาท, 2545) โดยผลึกแร่ดินเหนียวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. แร่ดินเหนียวซิลิเกต (Silicate Clays) ได้แก่ แร่ดินเหนียวที่มีอลูมิเนียมและซิลิเกตเป็นองค์ประกอบที่สำคัญมีโครงสร้างเป็นแผ่นซ้อน ๆ กัน
2. แร่ดินเหนียวที่มีส่วนผสมของเหล็กและอลูมิเนียม (Iron and Aluminum Clays) ได้แก่ แร่ดินเหนียวที่มีเหล็กและอลูมิเนียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบ

2.1.1 แร่ดินเหนียวซิลิเกต (Silicate Clays) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

1. กลุ่มแร่ดินขาว (Kaolinite Group) เป็นดินเหนียวแบบ 1 : 1 ประกอบด้วยชั้นของซิลิกาเรียงสลับกับชั้นของอลูมินา
2. กลุ่มแร่ไมก้า (Illite or Hydrous Mica) เป็นดินเหนียวแบบ 2 : 1 คือ ในหน่วยโครงสร้างจะมีชั้นซิลิกา 2 ชั้นประกบชั้นอลูมินาอยู่และในแต่ละหน่วยมีไอออนของโพแทสเซียมแทรกอยู่ทำให้ดินในกลุ่มนี้ไม่สามารถพองตัวในน้ำได้

3. กลุ่มสเมคไทต์ (Smectite or Montmorillonite) เป็นดินเหนียวแบบ 2 : 1 เช่นเดียวกับกลุ่มแร่ไมกาแต่ในชั้นจะมีไอออนบวกแทรกอยู่ซึ่งส่วนใหญ่ที่พบจะเป็นแคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก และโซเดียม แร่กลุ่มนี้มีความสามารถในการพองตัวในน้ำได้ดี

2.1.2 สมบัติสำคัญของแร่ดินเหนียวซิลิเกต

แร่ดินเหนียวซิลิเกตมีคุณสมบัติแตกต่างจากแร่ที่มีเหล็กและอลูมินาในด้านคุณสมบัติ การขยายตัว หดตัว การดูดซับไอออน โดยแร่ดินเหนียวที่มีเหล็กและอลูมินัมผสมอยู่จะมีการ ขยายตัว หดตัว ตลอดจนความเหนียวน้อยกว่าแร่ดินเหนียวซิลิเกต อำนาจในการดูดซับไอออนน้อยกว่าแต่ความคงทนต่อการชะล้างมากกว่าแร่ดินเหนียวซิลิเกต อย่างไรก็ตามในกลุ่มของแร่ดินเหนียว ซิลิเกตเองมีคุณสมบัติแตกต่างกันในแต่ละกลุ่ม ทั้งนี้เนื่องมาจากการจัดตัวที่แตกต่างกันโดยแร่ดิน เหนียวที่มีการจัดตัวประเภท 2 : 1 มีการขยายตัวและอำนาจการดูดซับมากกว่าประเภท 1 : 1

1. รูปร่างและขนาดของแร่ดินเหนียวซิลิเกต

ขนาดของอนุภาคแร่ดินเหนียวซิลิเกตมีขนาดตั้งแต่ 0.01 ถึง 5.0 ไมโครเมตร แปรตามชนิดและองค์ประกอบทางแร่ รูปร่างของแร่ดินเหนียวซิลิเกตมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ (Flake-Like) ประกอบด้วยผลึกของแร่ที่มีโครงสร้างแบน เช่น แร่ไมกา และอนุภาคของดินเหนียว บางชนิดจะอยู่ในรูปผลึก 6 เหลี่ยมเห็นมุมชัดเจน

2. พื้นที่ผิว (Surface Area)

อนุภาคของแร่ดินเหนียวซิลิเกตโดยเฉพาะในกลุ่มสเมคไทต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่อ หน่วยน้ำหนัก หรือ Specific Surface สูงมาก ประมาณ 700-800 ตารางเมตรต่อกรัม เนื่องจากอนุภาค มีขนาดเล็ก เป็นแผ่นแบน และบางพื้นที่ผิวแตกต่างกันไปตามลักษณะ ในอนุภาคที่มีน้ำหนักเท่ากัน อนุภาคที่เป็นรูปทรงกลมจะมีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด ส่วนอนุภาคที่เป็นรูปแบนหรือแผ่นจะมีพื้นที่ผิวมากที่สุด นอกเหนือจากพื้นที่ผิวภายนอก (External Surface) อนุภาคดินของแร่ดินเหนียวซิลิเกตบาง ชนิดยังมีพื้นที่ผิวภายใน (Internal Surface) ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวที่อยู่ในหลืบระหว่างแผ่นผลึกของแร่ดิน เหนียวซิลิเกตที่ซ้อนทับกันเป็นอนุภาคหรือ micelle ของดินเหนียวแต่ละชนิด

3. ความเหนียว (Cohesion) และความอ่อนตัว (Plasticity)

ความเหนียว หมายถึง ความสามารถในการเกาะยึดกันระหว่างอนุภาคของ ดินเหนียวและความอ่อนนุ่มบีบป็นให้เป็นรูปต่าง ๆ และคงสภาพอยู่เช่นนั้นได้เมื่อดินมีความชื้นที่ เหมาะสม คุณสมบัติทางด้านความเหนียวและความอ่อนตัวนี้จะเกี่ยวข้องกับพื้นที่ผิวของดิน โดยดิน ที่มีความเหนียวและความอ่อนตัวสูงจะเป็นดินที่มีพื้นที่ผิวมาก จึงมีโอกาสดูดยึดอนุภาคของน้ำไว้ใน ผิวได้มาก ทำให้การยึดเกาะกันเพิ่มมากขึ้นด้วย

4. การขยายตัว (Swelling) และการหดตัว (Shrinking)

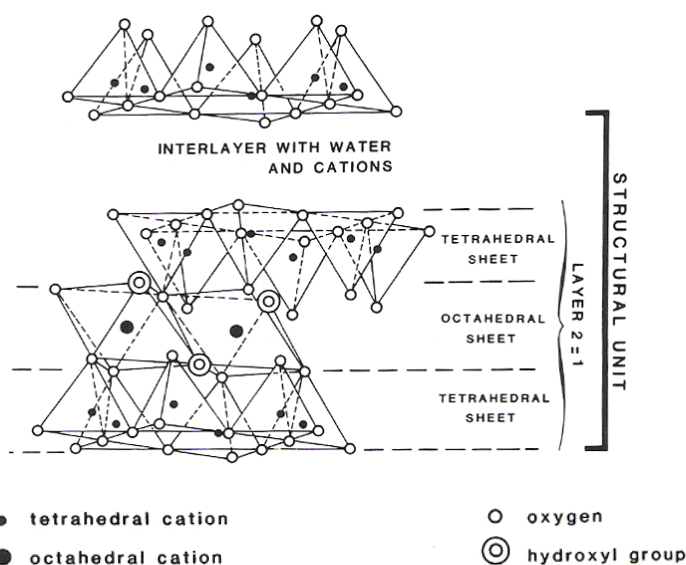
อนุภาคดินเหนียวที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นผลึกที่ซ้อนทับกันเป็น Clay micelle จะมีช่องหรือหลืบระหว่างแผ่นค่อนข้างกว้างและการยึดเกาะไม่เหนียวนักทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปได้ง่าย ชั้นระหว่างอนุภาคจึงกว้างขึ้นเรื่อย ๆ เป็นผลทำให้อนุภาคดินเหนียวที่เปียกน้ำมีการพองตัวมากขึ้น และจะหดตัวเมื่อให้ความร้อนไล่ น้ำที่อยู่ภายในอนุภาคให้หมดไป

5. ประจุลบและการดูดซับไอออนบวก

ตามปกติอนุภาคดินเหนียวในธรรมชาติจะมีประจุลบ และสามารถดึงดูดไอออนบวกทำให้เกิดสภาพของประจุสองชั้น หรือ Ionic Double Layer โดยอนุภาคดินเหนียวเป็นประจุลบที่มีกลุ่มไอออนบวกล้อมรอบอยู่ ไอออนบวกเหล่านี้จะถูกยึดติดอยู่ที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวสามารถถูกแทนที่โดยไอออนบวกชนิดอื่น ๆ หรือที่เรียกว่า Exchangeable Cation

2.2 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite Clay)

แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินในกลุ่มสมεκไทต์คือ มีโครงสร้างเป็นแบบ 2 : 1 ประกอบด้วยแผ่นซิลิกาซึ่งเป็นแผ่นทรงสี่หน้า (Tetrahedral Sheet) สองแผ่นประกบกับแผ่นอลูมินาซึ่งเป็นแผ่นทรงแปดหน้า (Octahedral Sheet) หนึ่งแผ่น ซึ่งแผ่นทั้งสองชนิดจะเชื่อมกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ และมีการใช้ออกซิเจนร่วมกันระหว่างแผ่น (Velde, 1992) ผลึกจะเชื่อมต่อในแนวระดับเป็นชั้น ๆ แสดงโครงสร้างของชั้นดินได้ดังรูปที่ 2.1

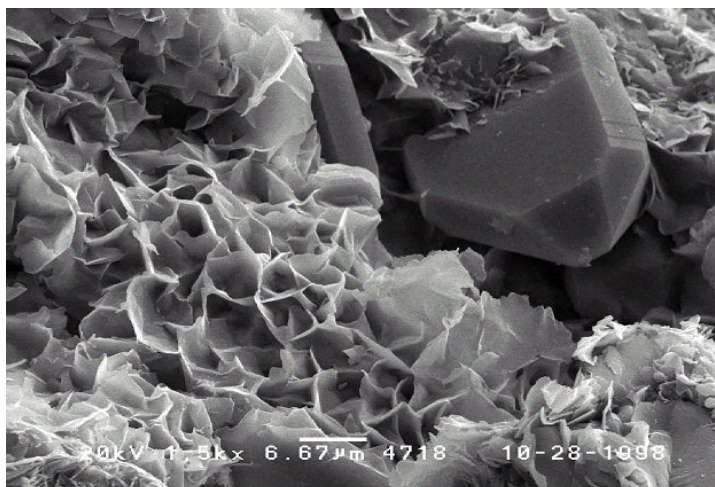


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Chamley, 1989)

แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มีสูตรโครงสร้างทางเคมีทั่วไปคือ (จักรกฤษณ์ อัมพพ, 2548) $M_{y+}(Al_{2-y}Mg_y)Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot n(H_2O)$ เมื่อ M คือ ประจุบวกที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable Cation) เช่น Na^+ และ Ca^{2+} มีอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้น (Interlayer) ส่วน Al^{3+} และ Mg^{2+} เป็นประจุบวกที่อยู่ในชั้นโครงสร้างจึงไม่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (Non Exchangeable Cations) และ y เป็นประจุของชั้น (Layer Charge) มีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 1.2 (Supamathanon, 2004) สำหรับตัวอย่างสูตร Empirical ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์คือ $Na_{0.33}(Al_{1.67}Mg_{0.33})Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot n(H_2O)$ (Chamley, 1989)

แร่ดินชนิดนี้จะมีการแทนที่ของอะตอมหนึ่งด้วยอีกอะตอมหนึ่งที่มีขนาดคล้าย ๆ กัน ทั้งในแผ่นทรงสี่หน้าและในแผ่นทรงแปดหน้า (Supamathanon, 2004) โดยในแผ่นทรงสี่หน้า Si^{4+} จะถูกแทนที่ด้วย Al^{3+} ทำให้ดินเหนียวชนิดนี้แสดงประจุเป็นลบ เนื่องจาก Al^{3+} มีวาเลนซ์ต่ำกว่า Si^{4+} ประจุลบจึงตกค้าง เมื่อการถูกแทนที่เกิดขึ้นมาก ๆ ประจุลบจะมีอำนาจสูงพอที่จะยึดไอออนบวกได้ ทำให้ชั้นของแร่ดินแสดงประจุเป็นลบ และในแผ่นทรงแปดหน้า Mg^{2+} จะเข้าไปแทนที่ Al^{3+} จึงทำให้ประจุโดยรวมเป็นลบเช่นกัน การแทนที่ของ Si^{4+} ด้วยประจุ Al^{3+} และการแทนที่ของ Al^{3+} ด้วยประจุ Mg^{2+} เกิดเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ทางโครงสร้างตามธรรมชาติของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (รัตนวรรณ วิบูลย์สวัสดิ์, 2545) ดังนั้นจึงต้องมีประจุบวก เช่น แคลเซียม (Ca^{2+}) โซเดียม (Na^+) ที่อยู่ในดินเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นโครงสร้างแต่ละชั้นเพื่อยึดชั้นโครงสร้างเข้าด้วยกัน แต่ประจุบวกเหล่านี้จะไม่ยึดติดกับชั้นโครงสร้างทำให้สามารถเคลื่อนที่เข้าออกได้ โดยเรียกประจุบวกนี้ว่า Exchangeable Cation ซึ่งแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ประกอบด้วยแร่ดินโซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Sodium Montmorillonite) จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้มากเพราะผลึกของดินมีขนาดเล็กมาก ส่วนแร่ดินแคลเซียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Calcium Montmorillonite) หรือเรียกว่าประเภทที่ไม่พองตัวมาก (Non Swelling Type) จะมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำและพองตัวได้น้อยกว่าชนิดแรก (ปิยะภรณ์ จารุงศ์, 2545) สำหรับปริมาณของประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity : CEC) ของแร่ดิน

สำหรับแรงดึงดูดระหว่างชุดโครงสร้างจะเป็นแรงดึงดูดระหว่างประจุ ซึ่งไม่แข็งแรง ทำให้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มีความสามารถในการขยายตัว หรือบวมตัว (Swelling) สูง โดยเฉพาะภายใต้สภาวะที่เปียก เช่น ในน้ำ และเกิดการแตกสลายของผลึกได้ง่าย ทำให้อนุภาคที่พบมีขนาดเล็ก คือ มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 10–100 ไมโครเมตร ด้วยเหตุนี้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จึงมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก รูปที่ 2.2 แสดงภาพขยายพื้นที่ผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ที่ถ่ายจาก SEM (Scanning Electron Micrograph)

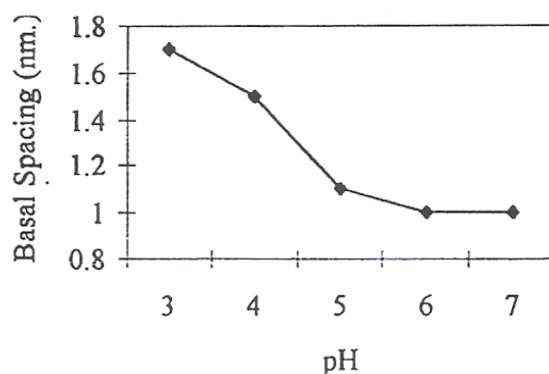


รูปที่ 2.2 ภาพขยายพื้นที่ผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ที่ถ่ายจาก SEM (Scanning Electron Micrograph) (OMNI Laboratoties, Inc., www, 1990)

สำหรับระยะห่างระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Basal spacing) จะอยู่ในช่วงระหว่าง 9.5 อังสตรอม (เมื่อไม่มีน้ำอยู่ในช่องว่าง) ถึง 21.4 อังสตรอม (เมื่อมีน้ำจำนวนมากแทรกตัวอยู่ในช่องว่าง) เนื่องจากแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากและมีช่องว่างระหว่างชั้นที่สามารถขยายตัวได้ทำให้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับเป็นอย่างมาก ซึ่งตารางที่ 2.1 จะเป็นการแสดงผลสรุปสมบัติของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ และจากการศึกษาพบว่าระยะห่างระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบ โดยระยะห่างระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินจะมีค่าลดลงเมื่อมีความเป็นด่างมากขึ้น (Schnitzer and Khan, 1972) แสดงดังรูปที่ 2.3

ตารางที่ 2.1 ผลสรุปสมบัติของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Supamathanon, 2004)

แร่ดินเหนียว	มอนต์มอริลโลไนต์	CEC (cmol/kg)	80-150
ประเภท	2 : 1	การบวมตัว	สูง
ช่องว่างระหว่างแผ่น	ขยายได้มาก	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	700-800
แรงดึงดูด	ไม่แข็งแรง	Basal spacing (Å)	9.8-18+



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของ pH กับระยะห่างระหว่างชั้นของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

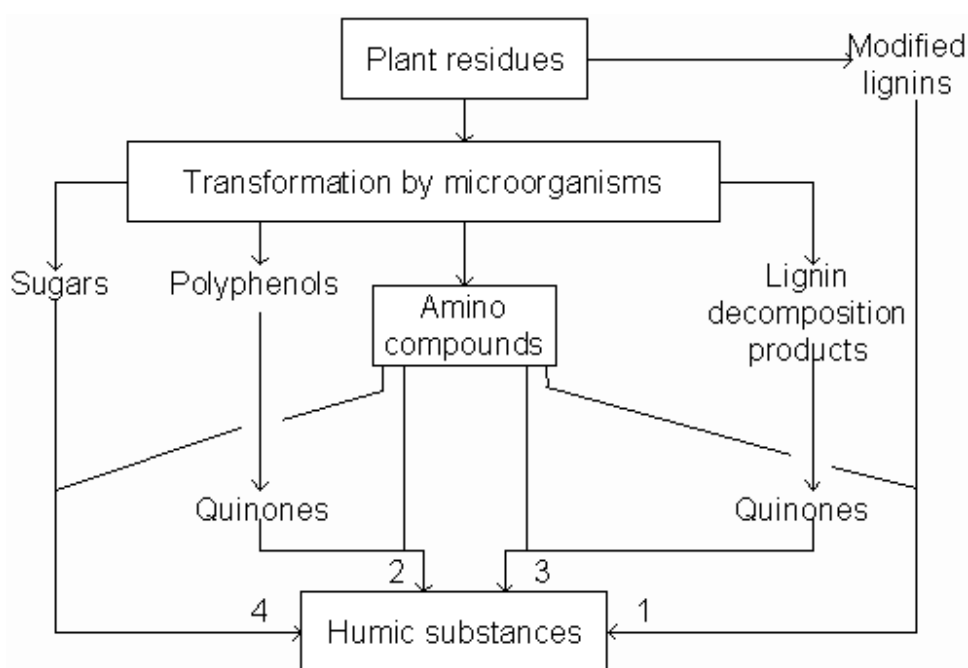
(Schnitzer and Khan, 1972)

นอกจากนี้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ยังสามารถนำมาปรับปรุงสมบัติของพื้นที่ผิวเพื่อให้เหมาะสมกับสารที่จะดูดซับและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสาร โดยจะทำการแลกเปลี่ยนประจุบวกที่มีอยู่ในแร่ดินกับสารต่าง ๆ เช่น โซเดียม (Na^+) จะเรียกแร่ดินนี้ว่า โซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Sodium Montmorillonite) สารอินทรีย์ (Organic Compounds) จะเรียกแร่ดินนี้ว่า Organic Clay หรือใช้กรดในการแลกเปลี่ยนประจุบวก เช่น กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ซึ่งจะเรียกแร่ดินนี้ว่า Acid Modified Clay โดยการปรับปรุงสมบัติของพื้นที่ผิวด้วยกรดนี้จะทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น $150\text{-}250 \text{ m}^2/\text{g}$ (Thomas and Crittenden, 1998) สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการดูดซับสารอินทรีย์ในระบบฟลูอิดไคเซเบด ผู้วิจัยจึงเลือกที่จะใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ได้รับการปรับปรุงสมบัติของพื้นที่ผิวด้วยกรด (Acid Modified Clay) มาเป็นตัวดูดซับในระบบฟลูอิดไคเซเบด เนื่องจากแร่ดินนี้มีขนาดใหญ่พอที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไคเซชันได้ง่ายกว่าแร่ดินที่มีขนาดเล็ก และเนื่องจากแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติมีสมบัติเป็นสารที่ชอบน้ำเมื่อนำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติมาทำการดูดซับสารอินทรีย์ พบว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติไม่สามารถที่จะดูดซับสารอินทรีย์ได้ ดังนั้นจึงต้องเลือกแร่ดินที่มีการปรับปรุงสมบัติพื้นที่ผิวมาเป็นตัวดูดซับเพื่อให้สามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้ โดยแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ได้รับการปรับปรุงสมบัติของพื้นที่ผิวด้วยกรด (Acid Modified Clay) ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท Ashapura Volclay จำกัด

ต่อจากนี้คำว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จะหมายถึง แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ได้รับการปรับปรุงสมบัติของพื้นที่ผิวด้วยกรด (Acid Modified Clay)

2.3 กรดฮิวมิก (Humic Acid)

กรดฮิวมิกเป็นประเภทหนึ่งของสารฮิวมิก (Humic Substances) ซึ่งสารฮิวมิกเป็นสารอินทรีย์ที่พบมากในธรรมชาติ และเป็นส่วนประกอบสำคัญของสารฮิวมัส (Humus) ในดินและน้ำ นั่นคือ เป็นสารที่เกิดจากการเน่าเปื่อยของสารอินทรีย์หรือเกิดจากการสลายตัวของซากพืช ซากสัตว์ ทำให้ดินเป็นสีน้ำตาล ซึ่งสามารถแสดงกระบวนการเกิดสารฮิวมิกได้ดังรูปที่ 2.4 สารฮิวมิกนั้นมีอยู่ทั่วไปในดิน และแหล่งน้ำธรรมชาติ ในปัจจุบันเราได้ทราบว่าอินทรีย์วัตถุในดินจะเป็นสารฮิวมิกประมาณร้อยละ 60 สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในธรรมชาตินั้นมีสารฮิวมิกเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 25 สำหรับในแหล่งน้ำธรรมชาติทั้งน้ำจืดและมหาสมุทรมีสารฮิวมิกอยู่ประมาณร้อยละ 50 โดยอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ อันเป็นสาเหตุของการเกิดสีในน้ำที่เป็นสีแหม่ที่ไม่สามารถกำจัดได้ง่าย ปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่มีมาตรฐานสำหรับความเข้มข้นสารฮิวมิกที่ยอมให้ปนเปื้อนในน้ำได้ แต่ในบางประเทศ เช่น ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเชกและสโลวัก มีการกำหนดให้ความเข้มข้นของสารฮิวมิกที่ปนเปื้อนในน้ำดื่มต้องมียกเว้นไม่เกิน 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (Christopher and Daniel, 1992 อ้างถึงใน ปิยรัตน์ สารวงษ์, 2545)



Mechanisms for the formation of soil humic substances

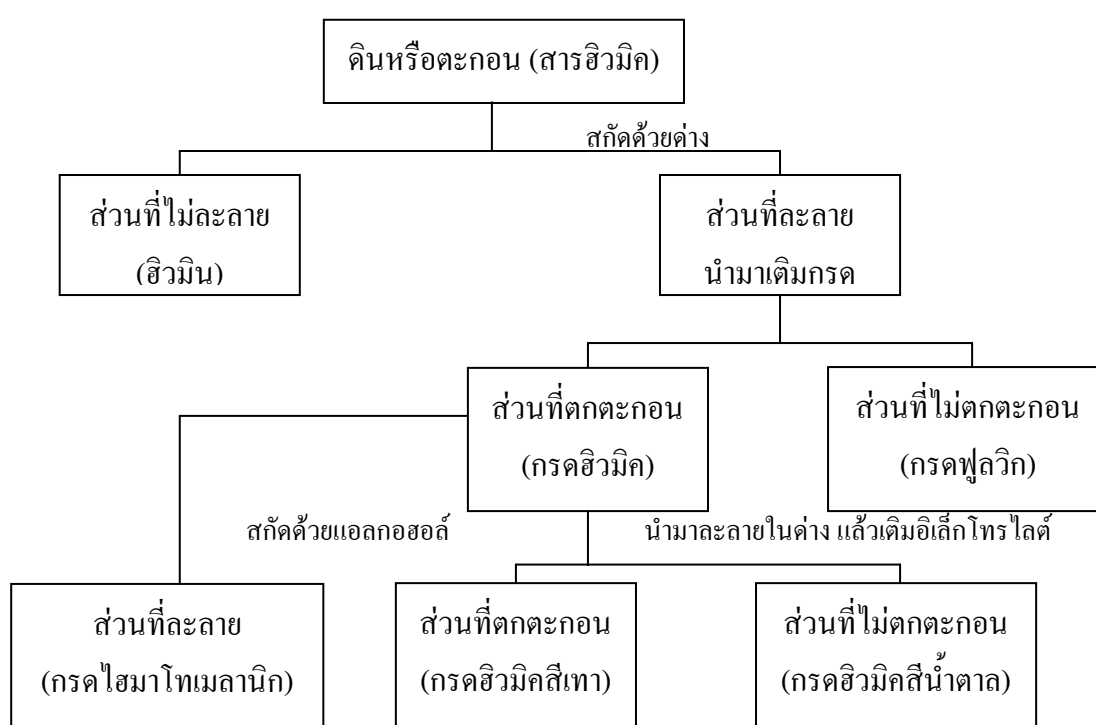
รูปที่ 2.4 กระบวนการเกิดสารฮิวมิกตามธรรมชาติ (Flucrumhealth, www, n.d.)

สารฮิวมิกสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ (ทวีลักษณ์ อ้นองอาจ และ กฤตย์ สมสาร, www, 2548)

1. กรดฮิวมิก (Humic Acid) เป็นส่วนที่พบมากของสารอินทรีย์ที่อยู่ในดิน มีคุณสมบัติละลายได้ในด่าง แต่ไม่ละลายในสภาวะที่เป็นกรดที่มีพีเอชต่ำกว่า 2 หรือในเอทานอล (ปิยรัตน์ สารวงศ์, 2545) ซึ่งกรดฮิวมิกสามารถสกัดได้จากการละลายสารฮิวมิกในสารละลายด่างเจือจาง และนำสารละลายด่างที่สกัดได้นั้นมาตกตะกอนด้วยกรดจะได้ตะกอนของกรดฮิวมิก เมื่อเอากรดฮิวมิกมาสกัดด้วยแอลกอฮอล์ได้จะส่วนที่ละลายคือ กรดไฮมาโทเมลานิก (Hymatomelanic Acid) หรือเอาตะกอนกรดฮิวมิกมาละลายด้วยด่าง แล้วเติมอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) จะได้ตะกอนของกรดฮิวมิกสีเทา ส่วนที่ไม่ตกตะกอนคือ กรดฮิวมิกสีน้ำตาล

2. กรดฟุลวิก (Fluvic Acid) เป็นสารละลายที่เหลือจากการทำให้เป็นกรดในข้อ 1 สามารถละลายได้ทั้งในกรดและด่าง

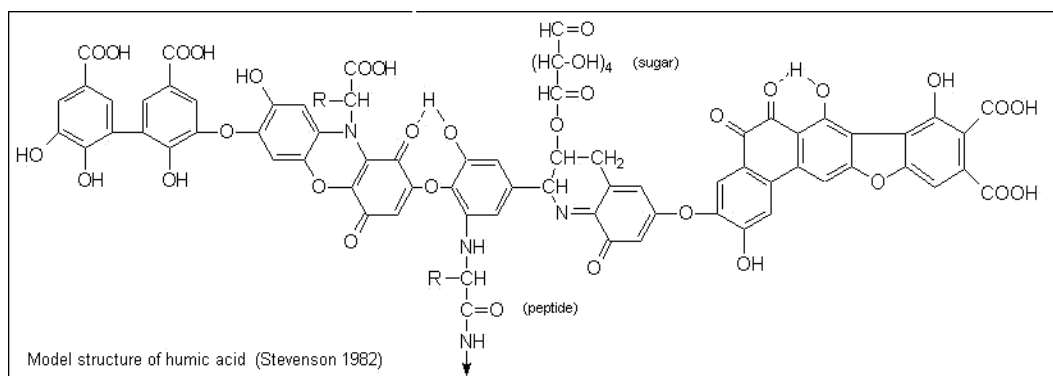
3. ฮิวมิน (Hummin) คือ สารฮิวมิกซึ่งไม่สามารถสกัดได้ด้วยสารละลายด่างเจือจางและกรด ซึ่งรายละเอียดแสดงตามแผนภูมิรูปที่ 2.5 (ทวีลักษณ์ อ้นองอาจ และ กฤตย์ สมสาร, www, 2548)



รูปที่ 2.5 การละลายของสารฮิวมิก (Humic Substances)

สารทั้ง 3 ประเภทที่กล่าวไว้ในข้างต้นนี้จะมีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายคลึงกันแต่ต่างกันที่น้ำหนักโมเลกุลและหมู่ฟังก์ชันแนลของแต่ละชนิด กรดฟุลวิกมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยแต่มีหมู่ฟังก์ชันแนลที่ประกอบด้วยออกซิเจนมากกว่ากรดฮิวมิกและฮิวมิน

กรดฮิวมิกเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างเป็น Polyphenol ที่เสถียรแต่สลายจับซ้อน ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของซากพืช ซากสัตว์ในดิน พบได้ในพีท ลิกไนต์ และแร่ลิโอนาไต์ เป็นต้น ในปี 1999 Davies และ Ghabbour ได้ทำการศึกษาและพบสูตรโครงสร้างของกรดฮิวมิกคือ $C_{36}H_{30}O_2 \cdot xH_2O$ เมื่อค่า x อยู่ระหว่าง 0 ถึง 15 โมเลกุล มีขนาดโมเลกุลอยู่ระหว่าง 60 ถึง 100 อังสตรอม และมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ต่ำกว่า 1,000 จนถึง 100,000 Daltons โดยโครงสร้างของกรดฮิวมิกแสดงดังรูปที่ 2.6 กรดฮิวมิกมีส่วนประกอบของหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic : $-COOH$) และหมู่เอไมด์ (Amide : $-N[OH]$) เกาะกันอยู่ ดังนั้นจึงทำให้กรดฮิวมิกมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะรวมกับสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่มีไอออน (Nonionic Organic Compounds : NOCs) ขณะที่ส่วนที่ชอบน้ำจะรวมตัวกับแร่ที่มีพื้นผิวเป็นบวก ในสารประกอบที่เป็นกรด หมู่เอไมด์จะรับประจุบวกกลายเป็น $(-N[OH]H_2^+)$ ทำให้กรดฮิวมิกมีสมบัติเป็นบวก แต่สภาวะที่เป็นกลางหรือด่าง หมู่คาร์บอกซิลิกจะสูญเสียประจุบวกกลายเป็น $(-COO^-)$ (ปิยะมาภรณ์ จารวงษ์, 2545)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของกรดฮิวมิก (Stevenson, www, 1982)

กรดฮิวมิกมีความสามารถสูงในการแลกเปลี่ยนประจุบวก สามารถรวมตัวกับประจุโลหะ (Amarasiriwardena, Siripinyanod, and Barnes, 2000) หรือโลหะหนักจึงช่วยป้องกันความเป็นพิษของโลหะหนักในแหล่งน้ำ ดินและสิ่งมีชีวิตได้ แต่กรดฮิวมิกเป็นสารอินทรีย์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับคลอรีนซึ่งมีทั่วไปในกระบวนการบำบัดน้ำเสียหรือกระบวนการผลิตน้ำประปาทำให้เกิดเป็นสารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane : THMs) ชนิดคลอโรฟอร์ม โบรโมได

คลอโรมีเทน ไดโบรโมคลอโรมีเทน และโบรโมฟอร์ม มากกว่าชนิดอื่น สามารถเขียนสมการการเกิดปฏิกิริยาได้ดังสมการที่ 2.1



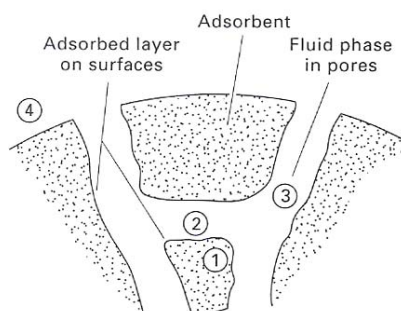
การศึกษาความเป็นพิษของสารไตรฮาโลมีเทนในสัตว์ทดลองที่ความเข้มข้นสูงมีผลต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม มีความเป็นพิษต่อตับ ไต ทำลายระบบประสาทส่วนกลาง ก่อให้เกิดความผิดปกติต่อตัวอ่อน และเป็นสารก่อมะเร็ง องค์การอนามัยโลก (WHO) กำหนดให้น้ำดื่มมีผลรวมอัตราส่วนระหว่างปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนที่ตรวจพบกับปริมาณสารตามเกณฑ์ที่กำหนดโดยมีค่าได้ไม่เกิน 100 ไมโครกรัมต่อลิตร (สารพันคำตอบเรื่องสิ่งแวดล้อม, www, ม.ป.ป.) และถ้าแหล่งน้ำมีกรดฮิวมิกปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่มากจะทำให้แหล่งน้ำมีสีเหลืองถึงสีน้ำตาล ลักษณะสำคัญของกรดฮิวมิกคือ มีความคงตัวสูงที่พีเอช 8 สารละลายที่มีความเข้มข้นของกรดฮิวมิก 1 มิลลิกรัมต่อลิตรจะทำให้เกิดหน่วยสี 26.5 หน่วยสี อีกทั้งทำให้น้ำมีกลิ่นและรสผิดไปจากธรรมชาติ (ปิยะมาภรณ์ จารุงศ์, 2545)

เนื่องจากกรดฮิวมิกในน้ำมีโทษตามที่ได้กล่าวมา จึงต้องมีการกำจัดกรดฮิวมิกออกจากน้ำซึ่งมีหลายวิธีที่ใช้ในการกำจัด เช่น การตกตะกอนด้วยโลหะหนัก การกรอง และการดูดซับ (ปิยะรัตน์ สารวงษ์, 2545) ในการวิจัยครั้งนี้เลือกการกำจัดกรดฮิวมิกโดยวิธีการดูดซับด้วยเรซินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบฟลูอิดไคซ์เบด

2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

2.4.1 คำนิยามของการดูดซับ

การดูดซับ เป็นการแยกสารผสมโดยสารที่ต้องการแยกจะอยู่ในรูปตัวถูกละลายในของเหลวหรือก๊าซ (Fluid Phase) โดยให้สารละลายหรือก๊าซผสมไหลไปสัมผัสกับตัวดูดซับ (Adsorbent) โมเลกุลของตัวถูกละลาย (Adsorbate) จะแพร่ผ่านเข้าไปยังพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ โดยตัวดูดซับจะสร้างพันธะหรือยึดเกาะด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน ๆ บนผิวตัวดูดซับ สำหรับวัสดุที่จะใช้เป็นตัวดูดซับต้องมีพื้นที่ผิวมากเมื่อเทียบกับหนึ่งหน่วยปริมาตรและมีรูพรุนมาก โดยรูพรุนจะมีขนาดเล็กเชื่อมต่อกัน (Interconnected) ภายในตัวดูดซับ ซึ่งสามารถแสดงการดูดซับด้วยตัวดูดซับที่เป็นของแข็งได้ดังรูปที่ 2.7 (Seader, 1998)



รูปที่ 2.7 การดูดซับด้วยตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง (Seader, 1998)

ลักษณะกลไกการดูดซับมี 2 ลักษณะคือ

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับตัวถูกละลายซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกละลายในสารละลาย ดังนั้นโมเลกุลจะยึดเกาะบนผิวของตัวดูดซับเมื่อมีการดูดซับแล้วจะมีการคายความร้อนออกมา โดยความร้อนที่เกิดขึ้นอาจน้อยกว่าความร้อนที่เกิดจากการควบแน่นของก๊าซที่แทรกเข้าสู่ช่องว่างภายในของตัวดูดซับเป็นของเหลว

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูงโดยที่จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับโมเลกุลที่ต้องการจะดูดซับเป็นกระบวนการดูดความร้อน ทำให้ต้องใช้ความร้อนมากในการเกิดปฏิกิริยา

2.4.2 ตัวดูดซับ (Adsorbent)

กระบวนการดูดซับจะสำเร็จหรือไม่ขึ้นอยู่กับตัวดูดซับที่ใช้เป็นสำคัญ โดยตัวดูดซับที่ใช้จะเป็นของแข็ง สิ่งที่ต้องพิจารณาสำหรับตัวดูดซับคือ ความสามารถในการเลือกดูดซับตัวถูกดูดซับ และประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับ และที่สำคัญอีกอย่างของตัวดูดซับคือ ของแข็งต้องมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) มาก และมีเครือข่ายของรูพรุนมาก สำหรับเคลื่อนย้ายตัวถูกดูดซับเข้าสู่ภายในตัวดูดซับ โดยรูพรุนในของแข็งต้องมีขนาดเล็ก และประกอบด้วยช่วงรูพรุน 2 ช่วงคือ ช่วงรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore Range) และช่วงรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore Range) โดยการแบ่งประเภทของขนาดรูพรุนจะแบ่งตามนิยามของ IUPAC ได้ดังนี้ (Do, 1998)

รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores)	มีเส้นผ่านศูนย์กลาง < 2 นาโนเมตร
รูพรุนขนาดกลาง (Mesopores)	มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2–50 นาโนเมตร
รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores)	มีเส้นผ่านศูนย์กลาง > 50 นาโนเมตร

ในทางการค้าตัวดูดซับอาจมีลักษณะเป็นเม็ด เป็นทรงกลม ทรงกระบอก เป็นแผ่น หรือเป็นผง โดยมีขนาดอยู่ในช่วง 50 ไมโครเมตร ถึง 1.2 เซนติเมตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 300 ถึง 1,200 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งวัดได้จากการดูดซับก๊าซไนโตรเจน (N_2) ของตัวดูดซับโดยใช้วิธี BET

2.4.3 สมดุลและไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium and adsorption Isotherm) (ชัยยศ ตั้งสติษฐ์กุลชัย, 2549)

ข้อมูลสมดุลการดูดซับของสารเดี่ยวเป็นข้อมูลพื้นฐานที่มีความสำคัญในการทำ ความใจเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับ ตลอดจนใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ระบบดูดซับของสารผสม การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับและการคำนวณออกแบบระบบดูดซับ เป็นต้น ในระบบการดูดซับ สารเดี่ยว ปริมาณของการดูดซับจะขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับ (Adsorbent) และตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และยังขึ้นกับอุณหภูมิและความดันสำหรับระบบดูดซับก๊าซ หรืออุณหภูมิและความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับสำหรับระบบดูดซับของเหลว ในรูปของสมการเขียนได้เป็น

สำหรับระบบดูดซับก๊าซ

$$q = f(P, T, \text{adsorbent}, \text{adsorbate}) \quad (2.2)$$

สำหรับระบบดูดซับของเหลว

$$q = f(C, T, \text{adsorbent, adsorbate}) \quad (2.3)$$

เมื่อ q = ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (mol/g, g/g หรือ cm^3 STP/g สำหรับการดูดซับก๊าซ)

T = อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

P = ความดันย่อยของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคก๊าซ

C = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย (g/cm^3 หรือ mol/l)

ถ้าการดูดซับของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับคู่หนึ่ง ๆ เกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ สมการที่ (2.2) และ (2.3) เขียนได้เป็น

$$q = f(P)_T \quad (2.4)$$

และ

$$q = f(C)_T \quad (2.5)$$

สำหรับระบบดูดซับก๊าซ ถ้าอุณหภูมิการดูดซับมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารถูกดูดซับ สมการที่ (2.4) เขียนได้อีกรูปแบบหนึ่ง ดังนี้

$$q = f(P/P^\circ)_T \quad (2.6)$$

เมื่อ P° = ความดันไออิ่มตัวของสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิการดูดซับ

ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.5) และ (2.6) เรียกว่าไอโซเทิร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ซึ่งเป็นข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นหรือความหนาแน่นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคก๊าซหรือวัฏภาคของเหลวกับปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูด

ระบบดูดซับก๊าซ

สำหรับระบบดูดซับก๊าซได้มีการจำแนกลักษณะของไอโซเทิร์มการดูดซับของระบบดูดซับก๊าซเป็น 6 แบบ โดย Brunauer และคณะ แสดงดังรูปที่ 2.8

1. แบบที่ 1 (Type I) เป็นการดูดซับของโมเลกุลของตัวดูดซับที่เกิดขึ้นเพียงหนึ่งชั้น (Monolayer Adsorption) เป็นลักษณะการดูดซับของวัสดุที่ไม่มีรูพรุนหรือมีความพรุนต่ำหรือพบในตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำแต่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์หรือ ซีโอไลต์ โดยตัวถูกดูดซับก๊าซจะถูกดูดซับจนเต็มรูพรุนและเข้าสู่สมดุลที่ช่วงความดันต่ำ ๆ อย่างรวดเร็ว

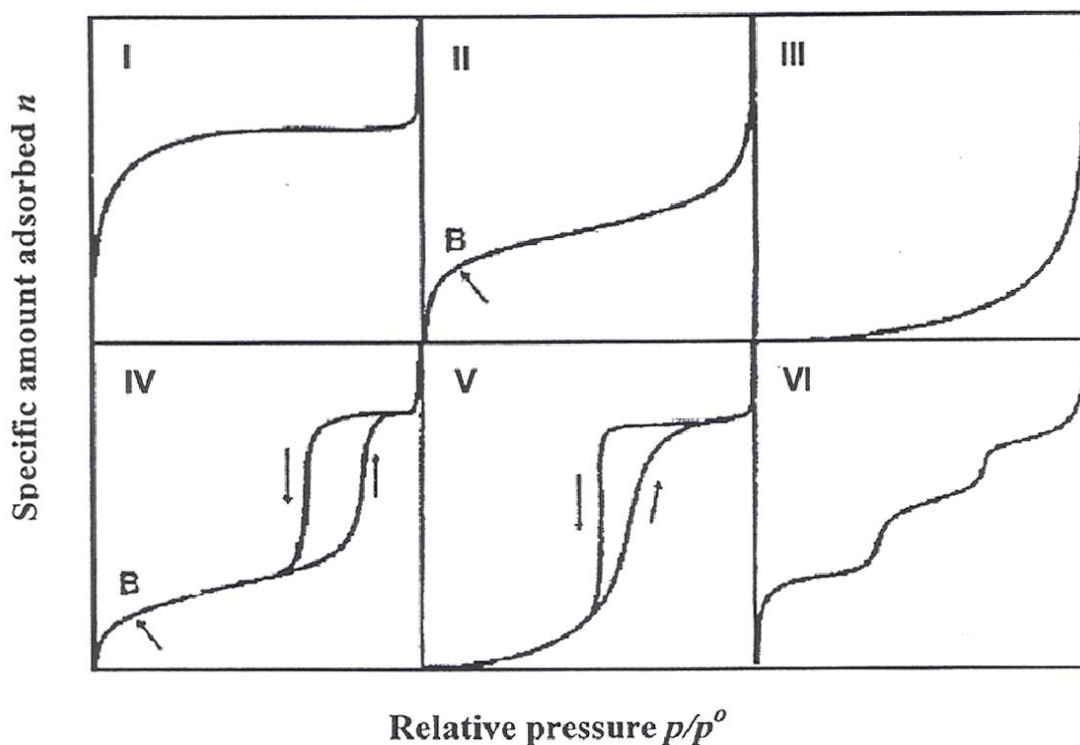
2. แบบที่ 2 (Type II) เป็นการดูดซับของโมเลกุลมากกว่าหนึ่งชั้น (Multilayer Adsorption) เกิดกับการดูดซับของวัสดุไม่มีความพรุน (Non-Porous) หรือมีการกระจายขนาดของรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ ลักษณะของไอโซเทิร์มมีจุดเปลี่ยนกราฟ (จุด B) ซึ่งเป็นสภาวะที่ผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแบบชั้นเดียวจนสมบูรณ์แล้ว ที่ช่วงความดันสูงกว่านี้จะเกิดการดูดซับเพิ่มขึ้นเป็นชั้น ๆ จนถึงสภาวะที่ตัวถูกดูดซับก๊าซเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวที่ความดันสัมพัทธ์เข้าใกล้หนึ่ง ($P/P^0 \approx 1$)

3. แบบที่ 3 (Type III) เป็นไอโซเทิร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีลักษณะคล้ายกระจกเว้าเป็นลักษณะการดูดซับที่แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและผิวหน้าของตัวดูดซับ ทำให้เกิดการดูดซับได้น้อยที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่การดูดซับจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับด้วยตัวเอง

4. แบบที่ 4 (Type IV) เป็นลักษณะไอโซเทิร์มที่พบในวัสดุที่มีช่วงรูพรุนขนาดกลาง (2-50 nm) เป็นส่วนใหญ่ เส้นไอโซเทิร์มในช่วงเพิ่มความดัน (Adsorption Branch) จะคล้ายกับแบบที่ 2 แต่ไอโซเทิร์มในช่วงลดความดัน (Desorption Branch) จากค่าความดันสัมพัทธ์ใกล้หนึ่งลงมา จะไม่ย้อนทับกับเส้นไอโซเทิร์มในช่วงขาขึ้น ทำให้เกิดบริเวณหรือพื้นที่ที่เรียกว่า Hysteresis Loop ซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์ Capillary Condensation โดยที่ค่าความดันสัมพัทธ์ใกล้หนึ่ง (ความดันย่อยของตัวดูดซับในวัฏภาคก๊าซมีค่าใกล้กับค่าความดันไออิ่มตัว) ตัวถูกดูดซับจะอยู่ในสภาวะคล้ายของเหลวที่บรรจุอยู่ในหลอดหรือช่องของรูพรุน ซึ่งจะมีแรงดึงผิวตรงบริเวณที่สัมผัสกับผนังของรูพรุนเข้ามาเกี่ยวข้อง การจะไล่ตัวถูกดูดซับออกจากรูพรุนจึงต้องลดความดันให้น้อยกว่าค่าความดันในช่วงขาขึ้น เพื่อเอาชนะแรงดึงผิวดังกล่าว เป็นสาเหตุให้เส้นไอโซเทิร์มของขาขึ้นและขาลงไม่ซ้อนทับกันเกิดเป็น loop ขึ้น พื้นที่ของ Hysteresis Loop จะแปรตามสัดส่วนของปริมาตรรูพรุนขนาดกลางเมื่อเทียบกับปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของตัวดูดซับ

5. แบบที่ 5 (Type V) ลักษณะของไอโซเทิร์มจะคล้ายกับแบบที่ 3 แต่จะมีจุดเปลี่ยนกราฟที่ค่าความดันสัมพัทธ์มากกว่า 0.5 หรืออาจมากกว่านั้นและยังแสดงลักษณะของ Hysteresis Loop เหมือนไอโซเทิร์มแบบที่ 4 ดังที่กล่าวมาแล้ว เช่นเดียวกับแบบที่ 3 ไอโซเทิร์มแบบที่ 5 นี้ เกิดกับระบบดูดซับที่แรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีค่าอ่อน ตัวอย่างได้แก่ การดูดซับไอน้ำ ซึ่งจัดเป็นสารมีขั้ว (Polar) โดยถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นสาร ไม่มีขั้ว (Non-Polar) เป็นต้น

6. แบบที่ 6 (Type VI) เป็นเส้นไอโซเทิร์มแบบขั้นบันได (Stepped Isotherm) เกิดกับตัวดูดซับที่ไม่มีความพรุน (Non-Porous) และมีลักษณะพื้นที่ผิวที่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดการดูดซับเป็นช่วง ๆ ตามความดันที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะแตกต่างจากไอโซเทิร์มแบบที่ 2 ที่มีการดูดซับเป็นขั้น ๆ อย่างต่อเนื่อง



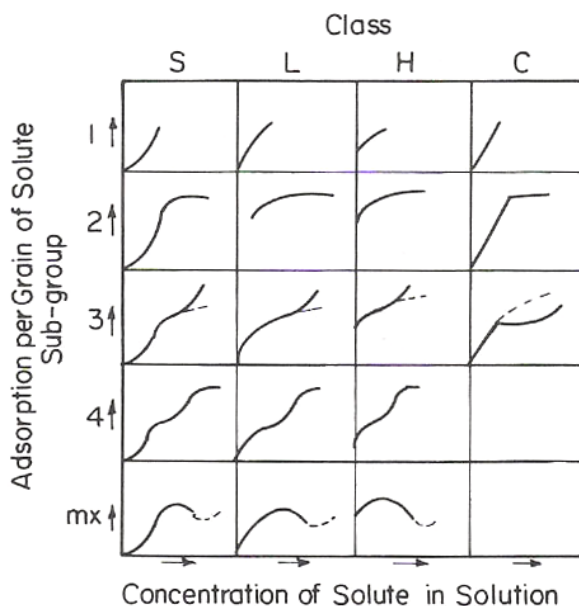
รูปที่ 2.8 รูปแบบของไอโซเทิร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ของระบบดูดซับก๊าซ (Rouquerol, Rouquerol, and Sing, 1999)

ระบบดูดซับของเหลว

ไอโซเทิร์มการดูดซับของระบบของเหลวจะต่างจากไอโซเทิร์มการดูดซับของระบบก๊าซตรงที่เป็นข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นในวัฏภาคของเหลวกับปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ

ในปี 1960 Giles และคณะได้แบ่งประเภทไอโซเทิร์มการดูดซับของระบบดูดซับของเหลวออกเป็น 4 แบบคือ แบบ S, L, H และ C ซึ่งแต่ละแบบสามารถแบ่งเป็นกลุ่มย่อยได้อีก ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ในการแบ่งประเภทไอโซเทิร์มนี้อาจแบ่งตามความโค้งเริ่มต้นของกราฟไอโซเทิร์ม โดยแบ่งได้ดังนี้ (Tien, 1994)

1. **แบบ S** ความโค้งเริ่มต้นของกราฟไอโซเทิร์มจะเป็นแบบโค้งนูนออกข้างนอก (Convex)
2. **แบบ L** ความโค้งเริ่มต้นของกราฟไอโซเทิร์มจะเป็นแบบโค้งเว้าเข้าด้านใน (Concave)
3. **แบบ H** เป็นการดูดซับที่พิเศษคือ เส้นกราฟจะสูงขึ้นที่ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายต่ำ
4. **แบบ C** กราฟไอโซเทิร์มจะเป็นเส้นตรง



รูปที่ 2.9 รูปแบบของไอโซเทิร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ของระบบดูดซับของเหลว (Tien, 1994)

2.4.4 สมการไอโซเทิร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm Equations) ในระบบดูดซับของเหลว

ปริมาณของตัวถูกละลายในสารละลายที่ถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับ หาได้จากสมดุลมวลสาร โดยถือว่าตัวถูกละลายที่หายไปจากสารละลายถูกดูดซับอยู่บนตัวดูดซับ และปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่จะมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายและปริมาณตัวดูดซับที่ใส่ลงไป (McCabe, Smith, and Harriott, 2001) แสดงดังสมการที่ (2.7)

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m} \quad (2.7)$$

เมื่อ q_e = ปริมาณตัวถูกละลายบนผิวของตัวดูดซับที่สมดุลหลังการดูดซับ (mg/g)
 C_o = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (mg/l)
 C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุลหลังการดูดซับ (mg/l)
 V = ปริมาตรของสารละลาย (l)
 m = น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

2.4.4.1 Linear Adsorption Isotherm

ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่สภาวะสมดุล โดยปกติจะเรียกว่า Henry's Law มีรูปแบบสมการดังนี้

$$q = K_d C_e \quad (2.8)$$

เมื่อ q = ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ (mg/g)
 C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สมดุลหลังการดูดซับ (mg/l)
 K_d = สัมประสิทธิ์การแจกแจง (Distribution Coefficient) หรือค่าคงที่ Henry's Law (Henry's Law Constant) (l/g)

2.4.4.2 Langmuir Adsorption Isotherm

เป็นรูปแบบการแสดงระบบของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยตัวถูกดูดซับถูกจำกัดให้ปกคลุมตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer Sorption) เท่านั้นไม่มีการซ้อนทับกันของโมเลกุล แสดงดังสมการที่ (2.9)

$$\frac{q}{q_m} = \frac{bC_e}{1 + bC_e} \quad (2.9)$$

เมื่อ q = ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ (mg/g)
 q_m = ปริมาณตัวถูกดูดซับสูงสุดบนพื้นผิวตัวดูดซับของการดูดซับแบบชั้นเดียว (mg/g)
 C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สมดุลหลังการดูดซับ (mg/l)
 b = ค่าคงที่

การหาค่าคงที่ในสมการไอโซเทิร์มการดูดซับของ Langmuir สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q กับ C_e จากสมการที่ (2.10)

$$\frac{C_e}{q} = \frac{1}{bq_m} + \frac{1}{q_m} C_e \quad (2.10)$$

เมื่อ q_m จะเป็นตัวบอกความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับตัวถูกละลายแต่ละชนิด

2.4.4.3 Freundlich Adsorption Isotherm

สมการไอโซเทิร์มการดูดซับของ Freundlich ดังแสดงไว้ในสมการที่ (2.11) อธิบายถึงการจับตัวกันเป็นชั้น ๆ ของตัวถูกดูดซับ (Multilayer) บนพื้นผิวของตัวดูดซับเนื่องจากโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันสูง

$$q = K_f C_e^{1/n} \quad (2.11)$$

เมื่อ K_f = Freundlich Capacity Factor
 $1/n$ = Freundlich Intensity Parameter

ค่าคงที่ในสมการไอโซเทิร์มของ Freundlich สามารถหาได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง
ลอการิทึมของ q กับลอการิทึมของ C_e ตามสมการที่ (2.12)

$$\log(q) = \log(K_f) + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.12)$$

2.4.4.4 BET Adsorption Isotherm

สมการไอโซเทิร์มการดูดซับของ BET ถูกพัฒนาโดย Brunauer Emmett และ Teller (BET) จากการดูดซับที่ถูกจำกัดให้โมเลกุลปกคลุมตัวดูดซับโดยรอบเพียงหนึ่งชั้นความหนาของ Langmuir Adsorption Isotherm มาเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น สมการไอโซเทิร์มการดูดซับของ BET มีสมมติฐานเบื้องต้นคือ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับสามารถจับในบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับและสามารถที่จะซ้อนทับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับด้วยกันได้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะเต็มช่องว่างของตัวดูดซับ ซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่อยู่ใกล้กันจะไม่มีแรงปฏิสัมพันธ์ต่อกัน สำหรับความร้อนของการดูดซับระหว่างการเกิดการดูดซับในชั้นที่หนึ่งจะคงที่ และความร้อนของการดูดซับในชั้นที่สองและชั้นต่อมากจะเท่ากับความร้อนของสารละลายข้างนอก (Junpirom, 2006) สมการไอโซเทิร์มการดูดซับของ BET แสดงดังสมการที่ (2.13)

$$\frac{q}{q_m} = \frac{C/C_s}{(1 - \frac{C}{C_s})(1 + (\alpha - 1) \frac{C}{C_s})} \quad (2.13)$$

เมื่อ q = ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ (mg/g)
 q_m = ปริมาณตัวถูกดูดซับสูงสุดบนพื้นผิวตัวดูดซับของการดูดซับแบบชั้นเดียว (mg/g)
 C = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย (mg/l)
 C_s = ความสามารถในการละลาย (Solubility) ของตัวถูกละลายในสารละลาย (mg/l)
 α = ค่าความแตกต่างของความร้อนในการดูดซับของตัวถูกดูดซับชั้นที่หนึ่งกับชั้นอื่น ๆ
 จากสมการที่ (2.13) สามารถหาค่าคงที่ต่าง ๆ ได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $C/(C_s - C)q$ กับ C ตามสมการที่ (2.14)

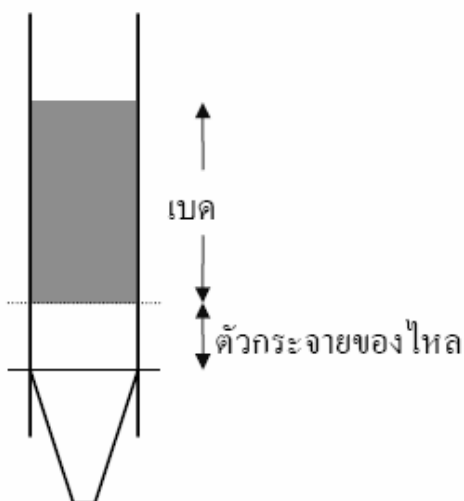
$$\frac{C}{(C_s - C)q} = \frac{C_s}{q_m} + \frac{(\alpha - 1)}{q_m} C \quad (2.14)$$

2.5 ฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized Bed)

2.5.1 หลักการเกิดฟลูอิดไคซ์เบด

การประยุกต์ใช้การไหลของของไหลผ่านภายนอกวัตถุที่เป็นของแข็งมีด้วยกันในหลาย ๆ ระบบ แต่ที่จะกล่าวถึงคือ ระบบฟลูอิดไคซ์เบด ซึ่งเป็นระบบที่ของไหลไหลผ่านชั้นของอนุภาคที่เป็นของแข็งโดยให้ไหลจากด้านล่างขึ้นไปทางด้านบนแล้ว ถ้าความเร็วของของไหลเพิ่มมากขึ้นถึงระดับหนึ่ง อนุภาคของแข็งจะเกิดการเคลื่อนไหว (ความเร็วของของไหลนี้อาจจะน้อยกว่าความเร็วสุดท้าย (Terminal Velocity) ของอนุภาคของแข็งที่ตกโดยอิสระในอากาศก็ได้) การเคลื่อนไหวของอนุภาคของแข็งนี้มีลักษณะเหมือนกำลังแขวนลอยอยู่ในของไหลที่ไหลผ่าน (Dynamic Suspension) การที่ชั้นของอนุภาคของแข็งที่บรรจุอยู่ภายในเปลี่ยนสภาพจากอยู่นิ่งมาเป็นสภาพแขวนลอยนี้ เรียกว่า เปลี่ยนเป็นฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized Bed) ขึ้น สภาพของฟลูอิดไคซ์เบดนี้เป็นสภาพซึ่งอยู่กึ่งกลางระหว่างสภาพเบดนิ่ง (Fixed Bed) และสภาพการถูกพัดพาด้วยของไหล (Pneumatic Conveyor) (ไพรินทร์ ชูโชติถาวร, 2532)

เบด หมายถึงอาณาเขตของอนุภาคของแข็งในหอฟลูอิดไคซ์เบดทั้งหมดตั้งแต่ตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุด คือผิวหน้าของเม็ดของแข็งไม่ว่าเม็ดของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงเบดขณะเกิดฟลูอิดไคซ์เบด

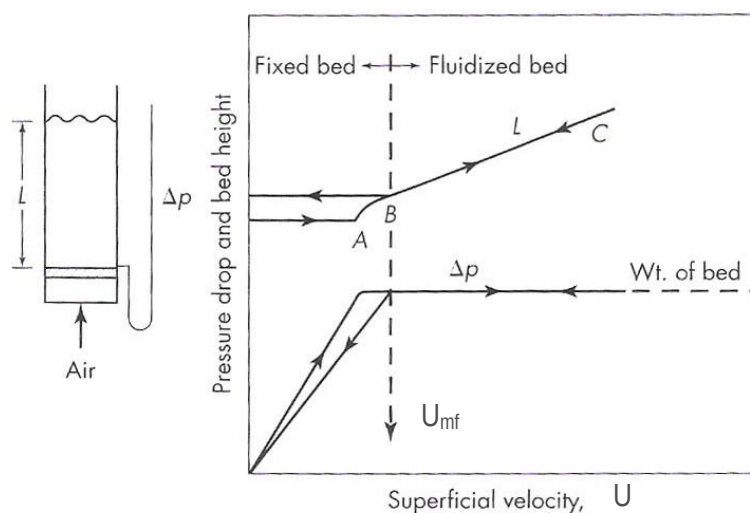
เหตุที่ใช้คำว่าฟลูอิดซ์เบดกับปรากฏการณ์ดังกล่าวข้างต้นนี้ เพราะว่าในขณะที่เกิดฟลูอิดเซชัน อนุภาคของแข็งที่บรรจุอยู่ในห่อจะมีการเคลื่อนไหวกระจายในลักษณะแวนลอย และมีคุณสมบัติในการไหลคล้ายของเหลว (Thomson, 2000) เมื่อมองจากภายนอกจะเห็นว่าผิวของฟลูอิดซ์เบดนั้นจะมีลักษณะคล้ายของเหลวที่กำลังเดือด เนื่องจากการเคลื่อนไหวของอนุภาคของแข็งมีลักษณะคล้ายของเหลวนั่นเอง ถ้าต่อท่อไว้กับหอบรรจุที่ระดับผิวบนของฟลูอิดซ์เบด อนุภาคของแข็งที่อยู่สูงเกินกว่าระดับนี้จะสั่นไหลออกมาได้เช่นเดียวกับของเหลว (Harriott, 2003)

ถ้าหากเพิ่มความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านชั้นอนุภาคของแข็งให้สูงขึ้นจนเกินความเร็วสุดท้ายของการตกโดยอิสระของอนุภาคของแข็งอนุภาคเดียว อนุภาคของแข็งที่บรรจุอยู่ทั้งหมดจะไหลออกไปกับของไหลทั้งหมด

เพราะปรากฏการณ์ของฟลูอิดซ์เบดทำให้มีการนำฟลูอิดซ์เบดมาใช้ในการอุตสาหกรรมมากมาย เช่น ในปี 1941 ที่สหรัฐอเมริกา ได้นำฟลูอิดซ์เบดมาใช้ในการกระบวนการแยกสลายน้ำมันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Cracking) สำหรับในปัจจุบันยังใช้กับปฏิกิริยาเคมีทั่วไป เช่น การเผาอย่างเร็ว (Roast) ปฏิกิริยาการดูดซึม (Absorption) และการอบแห้ง เป็นต้น ในบางกรณีอาจจะมีการป้อนอนุภาคของแข็งเข้าหอฟลูอิดซ์เบด และดึงส่วนที่ถูกใช้งานแล้วออกอย่างต่อเนื่อง (ไพรินทร์ ชูโชติถาวร, 2532)

2.5.2 สภาวะสำหรับฟลูอิดเซชัน (McCabe, Smith, and Harriott, 2001)

พิจารณาห่อในแนวตั้งภายในบรรจุด้วยอนุภาคของแข็งเป็นเม็ดละเอียด เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังในรูปที่ 2.11 ด้านบนห่อเป็นปลายเปิดและที่ด้านล่างห่อจะมีแผ่นรองรับอนุภาคของแข็งที่บรรจุอยู่ โดยจะเจาะรูพรุนไว้เพื่อให้ของไหลสามารถไหลผ่านได้ ของไหลจะถูกปล่อยให้ไหลจากทางด้านล่างผ่านตะแกรงแล้วผ่านไปยังชั้นอนุภาคขึ้นไปทางด้านบนด้วยอัตราการไหลต่ำของไหลจะไหลไปตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็ง โดยที่อนุภาคของแข็งที่บรรจุอยู่ยังคงอยู่นิ่งกับที่ เนื่องจากอนุภาคของแข็งโดยปกติมีขนาดเล็ก ทำให้การไหลของของไหลระหว่างชั้นของแข็งจึงอยู่ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ดังนั้นในช่วงนี้ถ้าวัดค่าความดันลดระหว่างด้านล่างและด้านบนของชั้นอนุภาคของแข็งนี้ จะพบว่าค่าความดันลด (Pressure Drop : ΔP) จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้น แต่สำหรับความสูงของชั้นอนุภาคหรือความสูงเบดยังคงเท่าเดิม ซึ่งดูได้จากกราฟในรูปที่ 2.11 ในช่วงสภาพเบดนิ่ง (Fixed Bed)



รูปที่ 2.11 ค่าความดันตกและความสูงเบดกับความเร็วของของไหลสำหรับชั้นอนุภาคของแข็ง
(McCabe, Smith, and Harriott, 2001)

จากที่ชั้นของอนุภาคอยู่นิ่ง เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นอีกเรื่อยๆ จนถึงค่าหนึ่งที่ค่าหนึ่ง ปรากฏว่าแรงกระทำของของไหลที่ไหลผ่านชั้นของอนุภาคของแข็งสมดุลกับแรงโน้มถ่วงของโกลที่กระทำต่ออนุภาคของแข็งพอดี หรือสมดุลกับน้ำหนักของเบด ทำให้อนุภาคของแข็งเริ่มขยับตัวและเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นภายในหอ ซึ่งตรงกับจุด A ในรูปที่ 2.11 บางครั้งเบดขยายตัวขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากอนุภาคของแข็งบางส่วนยังมีการยึดเกาะกัน เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นอีกจะทำให้อนุภาคเริ่มแยกตัวกันจนสามารถเคลื่อนที่ในลักษณะแขวนลอยอยู่ในกระแสของไหลที่ไหลผ่าน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดฟลูอิไดเซชัน (Fluidization) ซึ่งตรงกับจุด B ในรูปที่ 2.11 จากรูปที่ 2.11 ในช่วงฟลูอิไดเซชัน (Fluidized Bed) จะเห็นได้ว่าขณะเกิดฟลูอิไดเซชัน ค่าความดันตกภายในชั้นของแข็งจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ความสูงของชั้นอนุภาคของแข็งจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านอนุภาคของแข็งเพิ่มขึ้น การใช้งานของฟลูอิไดเซชันนั้นจะใช้งานในช่วงที่ความเร็วของของไหลสูงพอที่จะทำให้อนุภาคเกิดฟลูอิไดเซชัน และต้องไม่ทำให้อนุภาคหลุดออกจากหอหรือหลุดออกไปได้น้อย หรือจะกล่าวได้ว่าความเร็วของของไหลที่ใช้ต้องน้อยกว่าความเร็วสุดท้าย (Terminal Velocity : U_t) ของอนุภาคของแข็ง

ถ้าลดอัตราการไหลขณะที่อยู่ในช่วงฟลูอิไดเซชัน (Fluidized Bed) พบว่า ค่าความดันตกจะยังคงที่ แต่ความสูงของเบดจะลดลงตามเส้น CB ซึ่งเป็นเส้นเดียวกับเส้น BC ที่ได้จากการสังเกตไว้ตอนเพิ่มความเร็วของของไหล สำหรับในช่วงสภาพเบดนิ่ง (Fixed Bed) ความสูงเบดในตอนสุดท้ายจะมีค่าสูงกว่าค่าตอนเริ่มต้นเนื่องจากในตอนแรกอนุภาคของแข็งถูกบรรจุในหอแน่นกว่าในตอนสุดท้าย เพราะในตอนสุดท้ายอนุภาคของแข็งตกลงมากองอยู่ในหออย่างหลวมๆ สำหรับ

ค่าความดันลด ที่จุด B ย้อนไปจนถึงจุดเริ่มต้น พบว่าที่ความเร็วของของไหลต่ำ ๆ ค่าความดันลดในตอนสุดท้ายจะมีค่าน้อยกว่าในตอนเริ่มแรก ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.11 และที่จุด B นี้เองจะให้ค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไลเซชัน (Minimum Fluidization Velocity : U_{mf}) คือ จุดที่ค่าความดันลดเริ่มคงที่ และความเร็วสูงเบดเริ่มเพิ่มขึ้น หรือสามารถหาค่า U_{mf} ได้จากจุดตัดของกราฟค่าความดันลดหรือความเร็วสูงเบดในช่วงสภาพเบดนิ่งและในช่วงฟลูอิดไลเซชัน

2.5.3 ค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไลเซชัน (Minimum Fluidization Velocity : U_{mf})

สมการสำหรับค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไลเซชัน อธิบายโดยกำหนดให้ค่าความดันลดที่คร่อมเบดเท่ากับน้ำหนักของเบดต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดของหอ

$$\Delta P = g(1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho)L \quad (2.15)$$

เมื่อ ΔP = ค่าความดันลดที่คร่อมเบด (kg/ms^2)

L = ความสูงเบด (m)

ε = ค่าความพรุนของอนุภาค (Porosity)

ρ = ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

ρ_p = ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (kg/m^3)

ที่ฟลูอิดไลเซชันเริ่มเกิดขึ้น ε คือ ค่าความพรุนต่ำสุดของอนุภาค (Minimum Porosity : ε_M) (ถ้าอนุภาคมีรูพรุนภายในตัว ε คือ ค่าเศษส่วนช่องว่างภายนอกของเบด) จะได้

$$\frac{\Delta P}{L} = g(1 - \varepsilon_M)(\rho_p - \rho) \quad (2.16)$$

โดยค่าเศษส่วนช่องว่างภายนอกของเบด (The External Void Fraction of the Bed : ε) สามารถได้จาก

$$\varepsilon = \frac{V_b - V_p}{V_b} \quad (2.17)$$

เมื่อ V_b = ปริมาตรของเบด ($V_b = \pi D_c^2 L / 4$) (m^3)

V_p = ปริมาตรของอนุภาค ($V_p = m / \rho_p$) (m^3)

สมการของ Ergun สำหรับความดันลดในเบดนิ่ง (Packed Beds) สามารถจัดรูปได้เป็น

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu U}{\Phi_s^2 D_p^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + \frac{1.75\rho U^2}{\Phi_s D_p} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (2.18)$$

ประยุกต์สมการที่ (2.18) ที่จุดฟลูอิดไอเซชันเริ่มเกิดขึ้น ให้เป็นสมการในพีชคณิตที่มีกำลังสอง สำหรับค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอเซชัน U_{mf}

$$\frac{150\mu U_{mf}}{\Phi_s^2 D_p^2} \frac{(1-\varepsilon_M)}{\varepsilon_M^3} + \frac{1.75\rho U_{mf}^2}{\Phi_s D_p} \frac{1}{\varepsilon_M^3} = g(\rho_p - \rho) \quad (2.19)$$

สำหรับอนุภาคนาโนละเอียดมาก ๆ จะพิจารณาเฉพาะพจน์การไหลแบบราบเรียบในสมการของ Ergun เท่านั้น (พจน์แรกในสมการที่ (2.19)) เมื่อ $Re_p < 1$ สมการสำหรับค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอเซชันจะเป็น

$$U_{mf} \approx \frac{g(\rho_p - \rho)}{150\mu} \frac{\varepsilon_M^3}{(1-\varepsilon_M)} \Phi_s^2 D_p^2 \quad (2.20)$$

สำหรับสมการที่ (2.20) นี้ ค่า U_{mf} อาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการตัดพจน์ที่ 2 ในสมการที่ (2.19) ออก และค่าเศษส่วนช่องว่างภายนอกของเบด (ε_M) อาจเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ 0.4 ถึง 0.5 ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค (D_p) สำหรับอนุภาคทรงกลมผิวขรุขระ ε_M จะอยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 0.45 สำหรับค่าแฟกเตอร์รูปร่าง (Shape Factor : Φ_s) จะมีค่าไม่แน่นอนเช่นเดียวกัน เช่น อนุภาคที่ไม่เรียบจะมี Φ_s อยู่ในช่วงระหว่าง 0.6 ถึง 0.8 และอนุภาคที่เป็นทรงกลม จะอยู่ในช่วง 0.85 ถึง 1.0

2.5.4 ฟลูอิดเซชันของอนุภาคตัวดูดซับในระบบของเหลว (Thömmes, 1997)

ฟลูอิดเซชันของอนุภาคตัวดูดซับในระบบของเหลว เมื่อเพิ่มความเร็วจนกระทั่งการขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและหมุนรอบตัวเองของแข็งเป็นไปอย่างช้า ๆ เรียกว่าเบดสม่ำเสมอ (Smooth Fluidized Bed) หลังจากนั้นไปแล้วความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นจะไปทำให้เบดขยายตัวขึ้นตามความเร็วของของไหล เม็ดของแข็งยังอยู่ชิดกันมาก ดูเหมือนว่าเม็ดของแข็งยังจับกันเป็นกลุ่มก้อน เบดลักษณะนี้เกือบจะพาเอาเม็ดของแข็งออกไปจากหอฟลูอิดเซชันเบด จะเรียกว่าเบดเจือจาง (Diluted Phase Fluidized Bed) หลังจากนั้นเพิ่มความเร็วของไหลอีกเล็กน้อยเม็ดของแข็งจะหลุดลอยออกจากหอฟลูอิดเซชันเบดไปซึ่งในลักษณะนี้เราใช้เป็นการขนส่งของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ เรียกว่าขนส่งด้วยของเหลว (Hydraulic Transport)

Martin et al. (1981, quoted in Thömmes, 1997) ได้ใช้ตัวแปรไร้หน่วย 2 ตัวเพื่ออธิบายการประพัตตัวของอนุภาคในการเกิดฟลูอิดเซชันในระบบของเหลว คือค่าตัวเลขกาลิเลโอ (The Gallileo Number : Ga) และตัวเลขเรย์โนลด์สุดท้าย (The Terminal Reynolds Number : Re_t) ซึ่งสามารถคำนวณค่าความเร็วสุดท้ายของการเกิดฟลูอิดเซชัน (Terminal Setting Velocity of the Fluidized Particle : U_t) และตัวชี้วัดการขยายตัวของเบด (The Expansion Index : n) ได้ดังสมการข้างล่าง (Lin et al., online, 2006; Anspach, Curbelo, Hartmann, Garke, and Deckwer., online, 1999)

$$Ga = \frac{\rho_p g (\rho_p - \rho_l) D_p^3}{\mu^2} \quad (2.21)$$

$$Re_t = \left[\frac{23}{Ga} + \frac{0.6}{Ga^{0.5}} \right]^{-1} \cdot \frac{1}{1 + 2.35 \frac{D_p}{D_c}} \quad (2.22)$$

$$\text{เมื่อ} \quad Re_t = \frac{U_t \rho_p D_p}{\mu} \quad (2.23)$$

$$\frac{5.1 - n}{n - 2.4} = 0.016 \cdot Ga^{0.67} \quad (2.24)$$

ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำสุดสำหรับการเกิดฟลูอิดเซชัน (The Minimum Reynolds Number for Fluidization : Re_{mf}) และค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชันในระบบของเหลว (The

Minimum Fluidization Velocity : U_{mf}) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของ Riba et al. (1978, quoted in Thömmes, 1997) คือ

$$Re_{mf} = 1.54 \times 10^{-2} Ga^{0.66} Mv^{0.7} \quad (2.25)$$

เมื่อ
$$Mv = \frac{(\rho_p - \rho_l)}{\rho_l} \quad (2.26)$$

และ
$$Re_{mf} = \frac{U_{mf} \rho_p D_p}{\mu} \quad (2.27)$$

ชุดสมการนี้เพียงพอที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับในระบบฟลูอิดไคซ์เบด โดยเป็นการศึกษาการประพตัตวในการเกิดฟลูอิดไคซ์ชั้นของอนุภาคในระบบของเหลว

การดูดซับในระบบฟลูอิดไคซ์เบด อัตราการไหลของของเหลวจะต้องมีค่ามากกว่าค่า U_{mf} และต้องน้อยกว่าค่า U_c เพื่อไม่ให้อนุภาคของแข็งหลุดลอยออกจากหอฟลูอิดไคซ์เบด ที่ผ่านมาได้ มีทฤษฎีและความสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับหาค่าช่วงอัตราการไหลที่เหมาะสมจะใช้งาน และอธิบายการขยายตัวของเบด ในที่นี้จะขอยกความสัมพันธ์ที่เข้าใจง่ายและสามารถอธิบายข้อมูลต่าง ๆ ได้ อย่างพอเพียงคือ ความสัมพันธ์ของ **Richardson-Zaki** (Lin, Miao, and Yao, online, 2006) ซึ่งจะใช้สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหอฟลูอิดไคซ์เบด (Richardson and Zaki, 1954, quoted in Anspach et al., online, 1999) โดยที่อัตราส่วนของ $D_p/D_c > 0.01$ คาดว่า จะมีผลของผนังของหอฟลูอิดไคซ์เบดเข้ามาเกี่ยวข้อง (Joshi, 1983, quoted in Anspach et al., online, 1999) แสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.28) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนช่องว่างของเบด (The Void Fraction of the Bed : ε) กับความเร็วของของเหลว (The Superficial Velocity : U) มีตัวแปร 2 ตัวที่สามารถหาได้จากสมการนี้คือ ความเร็วสุดท้ายของการเกิดฟลูอิดไคซ์ชั้น (U_c) และตัวชี้วัดการขยายตัวของเบด (n)

$$U = U_c \varepsilon^n \quad (2.28)$$

ซึ่งค่า U_c และ n จากสมการที่ (2.28) หาได้จากจุดตัดแกน y และความชันของกราฟลอการิทึมระหว่าง U กับ ε ดังสมการที่ (2.29) ตัวแปรที่ได้นี้อาจช่วยในการประมาณค่าช่วงอัตราการไหลของของเหลวเพื่อใช้ในระบบฟลูอิดไคซ์เบด

$$\ln U = \ln U_t + n \ln \varepsilon \quad (2.29)$$

ในการขยายตัวของเบค ความสูงของเบคที่ขยายตัวขึ้น (L) จะอธิบายได้ด้วยค่าเศษส่วนช่องว่างของเบคที่ความสูงเบคนั้น ๆ (ε) แสดงได้ตามสมการที่ (2.30)

$$L = L_o \frac{(1 - \varepsilon_o)}{(1 - \varepsilon)} \quad (2.30)$$

เมื่อ ε_o และ L_o คือค่าเศษส่วนช่องว่างของเบคและความสูงของเบคที่อัตราการไหลของของเหลวเท่ากับศูนย์ตามลำดับ จัดรูปสมการที่ (2.30) ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างเบคที่มีการขยายตัว (L/L_o) กับค่าเศษส่วนของเบค (ϕ_s/ϕ_{so}) เพื่อใช้อธิบายการขยายตัวของเบคแสดงได้ดังสมการที่ (2.31) เมื่อ ϕ_s และ ϕ_{so} คือค่าเศษส่วนของเบคที่ความสูงเบค L และ L_o ซึ่ง $\phi_s = 1 - \varepsilon$ (Chae, Yoon, and Ryu, 2004; Lee, Kwon, and Ryu, 2006)

$$\frac{L_o}{L} = \frac{\phi_s}{\phi_{so}} \quad (2.31)$$

2.5.5 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการดูดซับในระบบฟลูอิด์เบคของเหลว

การกระจายตัวของของเหลว

การกระจายตัวของของเหลวภายในระบบฟลูอิด์เบคจะขึ้นอยู่กับความเร็วของของเหลวที่อยู่ในรูปตัวเลขเพคเลตของอนุภาค (The Particle Peclet Number : Pe_p) และตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number : Re) (Thömmes, 1997) ซึ่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคในฟลูอิด์เบคถูกสมมติว่าเกิดขึ้นจากการกระจายตัวในแนวกว้าง ดังนั้นการดูดซับในระบบฟลูอิด์เบคจึงมีผู้สนใจในเรื่องการผสมในแนวแกนของของเหลว ซึ่งก่อนหน้านี้ได้มีการอธิบายสำหรับการดูดซับในระบบฟลูอิด์เบคว่าเป็นการปฏิบัติที่มีการผสมแบบสมบูรณ์หรือการผสมแบบไหลย้อนกลับ แต่ในกรณีนี้การผสมจะมีการประพัตตัวคล้ายกับการดูดซับในระบบกะที่มีการกวนในถังซึ่งจะมีการผสมในแนวแกนเป็นตัวควบคุม

สำหรับลักษณะการแพร่กระจายตัวจะขึ้นอยู่กับผลของแบบจำลองการกระจายตัวที่มีตัวเลขไร์หน่วยอธิบายถึงระดับของการผสมตามแนวแกนภายในเบคคือ ตัวเลขโบเดินสไตน์ (Bodenstein Number : Bo) เป็นความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวของของเหลวแบบนำพาในการกระจายตัว ตามสมการที่ (2.32)

$$Bo = \frac{UL}{D_{ax,l}} \quad (2.32)$$

เมื่อ L คือ ความสูงของฟลูอิด์เบค และ $D_{ax,l}$ คือ สัมประสิทธิ์การผสมตามแนวแกนของของเหลว ซึ่ง Bo เป็นตัววัดลักษณะการกระจายตัวของของเหลวและเหมาะที่จะใช้ในการอธิบายอิทธิพลของการผสมในแนวแกนต่อพฤติกรรมการดูดซับในระบบฟลูอิด์เบค

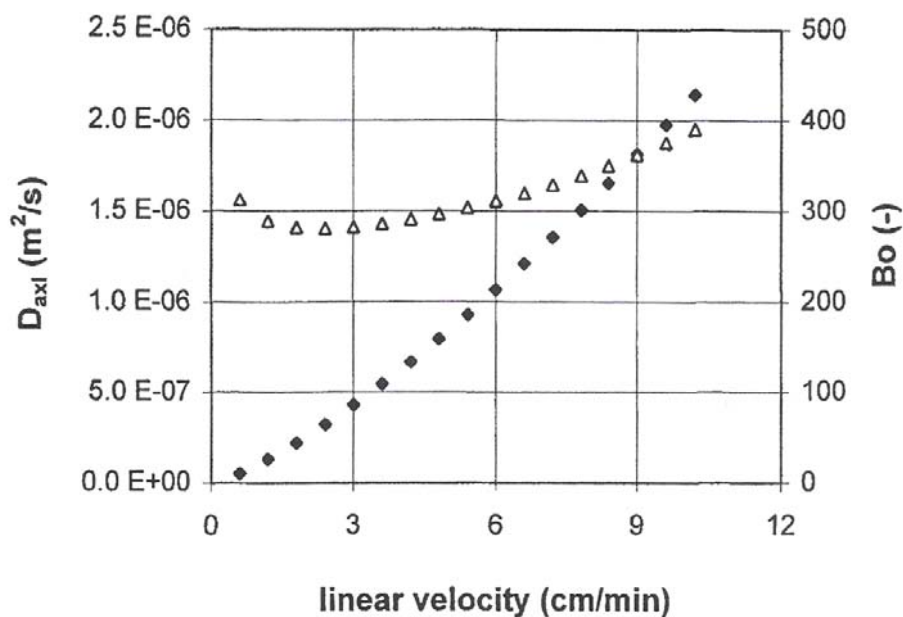
ตัวแปรไร้มิติอื่น ๆ สำหรับแสดงลักษณะของการผสมของของเหลวคือ ตัวเลขเพคเลตของอนุภาค (The Particle Peclet Number : Pe_p) เมื่อ $U_e = U/\varepsilon$

$$Pe_p = \frac{U_e D_p}{D_{ax,l}} \quad (2.33)$$

Tang และ Fan (1990, quoted in Thömmes, 1997) ได้เสนอความสัมพันธ์ของค่าตัวเลขเพคเลตของอนุภาคที่มีรูพรุนและความหนาแน่นต่ำ (ρ_p อยู่ในช่วง 1040 ถึง 1300 kg/m³) ไว้ดังสมการที่ (2.34)

$$Pe_p = 0.23 \left(\frac{\rho_p}{\rho_l} \right)^{-2.637} \cdot \varepsilon^{-2.4467} \quad (2.34)$$

รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวแกนของของเหลว $D_{ax,l}$ และค่าตัวเลขโบเดินสไตน์ Bo คำนวณจากสมการที่ (2.32), (2.33) และ (2.34) กับค่าความเร็วของของเหลวที่ใช้ในการดูดซับในระบบฟลูอิด์เบค (ข้อมูลทางกายภาพของตัวดูดซับ : $D_p = 274 \mu\text{m}$, $\rho_p = 1,143 \text{ kg/m}^3$, $U_t = 4.4 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, $n = 4.7$) จะเห็นว่าค่า $D_{ax,l}$ เพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของของเหลว แต่สำหรับการผสมโดยรวมทั้งหมดจะอธิบายด้วยค่า Bo ที่คำนวณจากสมการที่ (2.32) พบว่าในช่วงอัตราการไหลของของเหลวต่ำ ๆ ค่า Bo จะลดลง ในช่วงนี้การผสมตามแนวแกนจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อที่อัตราการไหลของของเหลวสูงขึ้น เบคมีการกระจายตัวทำให้ความสูงของเบคมีค่าสูงขึ้น ทำให้การผสมโดยรวมในช่วงนี้จะลดลง



รูปที่ 2.12 Bo (สัญลักษณ์กลวง) และ $D_{ax,l}$ (สัญลักษณ์ทึบ) ที่คำนวณจากสมการที่ (2.32), (2.33) และ (2.34) กับค่าความเร็วของของเหลวที่ใช้ในการดูดซับในระบบฟลูอิดไซ์เบด (ข้อมูลทางกายภาพของตัวดูดซับ : $D_p = 274 \mu m$, $\rho_p = 1,143 \text{ kg/m}^3$, $U_t = 4.4 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, $n = 4.7$) (Thömmes, 1997)

การกระจายตัวของของแข็ง

การเคลื่อนตัวของอนุภาคตัวดูดซับภายในเบดเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างเบดนิ่ง (Fixed Bed) กับฟลูอิดไซ์เบด (Fluidized Bed) พอ ๆ กับการผสมตามแนวแกนของของเหลว ส่วนการกระจายตัวของของแข็งจะอธิบายในส่วนนี้

มีการศึกษาจำนวนน้อยเกี่ยวกับการผสมของอนุภาคในการแบ่งประเภทของฟลูอิดไซ์เบด Al Dibouni และ Garside (1979, quoted in Thömmes, 1997) อธิบายการผสมของอนุภาคในฟลูอิดไซ์เบดว่าเป็นการประกอบกันของเศษส่วนความแตกต่างของขนาดแกว่งนั้นคือ อัตราส่วนของขนาดอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดกับอนุภาคขนาดเล็กที่สุดเพื่อแบ่งประเภทของฟลูอิดไซ์เบด และสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของของแข็ง $D_{ax,p}$ ขึ้นอยู่กับเศษส่วนช่องว่างของเบด ซึ่งค่าเศษส่วนช่องว่างของเบด 0.7 จะให้การกระจายตัวสูงสุด ซึ่งผลนี้จะเหมือนกับ Kang et al. (1990, quoted in Thömmes, 1997) และ Yutani et al. (1982, quoted in Thömmes, 1997) ที่เป็นผู้รายงานการกระจายตัวสูงสุดสำหรับเม็ดแก้วที่มีเศษส่วนช่องว่างของเบดอยู่ในช่วงกลาง ($D_p = 1-6 \text{ mm}$, $\rho_p = 2,500 \text{ kg/m}^3$ และเศษส่วนของอนุภาคในช่วงแคบ) สำหรับข้อมูลของ Van der Meer et al. (1984, quoted in

Thömmes, 1997) พบว่าค่า $D_{ax,p}$ เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการใช้ของเหลวเพิ่มขึ้น ที่อนุภาคนาเล็กและความหนาแน่นของอนุภาคน้อยกว่า ($D_p = 500-720 \mu m$, $\rho_p = 1,200-1,400 kg/m^3$) โดย Van der Meer et al. และ Kang et al. ได้เสนอความสัมพันธ์สำหรับ $D_{ax,p}$ ที่จะใช้ประมาณค่าการผสมของแข็งในการดูดซับ โดยความสัมพันธ์ของ Van der Meer et al. แสดงดังสมการที่ (2.35)

$$D_{ax,p} = 0.04 \cdot U^{1.8} \quad (2.35)$$

และสมการที่นำเสนอโดย Kang et al. แสดงดังสมการที่ (2.36)

$$D_{ax,p} = 2.97 \times 10^{-3} \cdot (U + U_{mf})^{0.802} \quad (2.36)$$

ความแตกต่างของสองสมการข้างต้นคือ Kang et al. ใช้สำหรับคำนวณค่า $D_{ax,p}$ เมื่ออนุภาคมีขนาดเท่า ๆ กัน ส่วน Van der Meer et al. วัดการกระจายตัวของอนุภาคที่มีขนาดต่างกันในฟลูอิดไซเบด

2.5.6 การแบ่งกลุ่มอนุภาคของแข็งประเภทผง (Powders) ที่ใช้ในการเกิดฟลูอิดเซชันด้วย

ก๊าซโดย Geldart (Gupta and Sathiyamoorthy, 1999)

ประเภทฟลูอิดเซชันโดยเฉพาะการเกิดฟลูอิดเซชันด้วยก๊าซมีความสัมพันธ์กับสมบัติของก๊าซและของแข็ง โดย Geldart ได้แบ่งกลุ่มอนุภาคของแข็งประเภทผงที่มีสมบัติคล้าย ๆ กันออกเป็น 4 กลุ่มคือ A B C และ D โดยกลุ่มนี้จะถูกแบ่งลักษณะเฉพาะด้วยความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างของแข็งกับของไหล (เช่น ก๊าซ) ที่ใช้ในการเกิดฟลูอิดเซชันและขนาดเฉลี่ยของอนุภาค แสดงได้ดังรูปที่ 2.13 สำหรับระบบที่ใช้ก๊าซในการเกิดฟลูอิดเซชัน ใน 4 กลุ่มนี้จะมีอยู่ 2 กลุ่มที่แตกต่างออกมากคือ กลุ่ม C ที่เกิดฟลูอิดเซชันได้ยาก และกลุ่ม D ที่สามารถพุ่งขึ้นไปด้านบน สำหรับอนุภาคที่อยู่ระหว่างกลุ่ม A และ B เหมาะที่จะใช้ในการเกิดฟลูอิดเซชัน โดยอนุภาคผงกลุ่ม A จะมีการขยายตัวหลังจุดต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชัน แต่การขยายตัวจะเกิดก่อนการเริ่มเกิดเป็นฟองพองพ่น ส่วนอนุภาคผงกลุ่ม B จะเกิดฟองพองพ่นที่จุดความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชัน การเรียกชื่ออนุภาคผง กลุ่ม A จะเรียกว่า Aeratable Powders กลุ่ม B จะเรียกว่า Sandlike Powders กลุ่ม C จะเรียกว่า Cohesive Powders และกลุ่ม D จะเรียกว่า Spoutable Powders ซึ่งคำอธิบายลักษณะของอนุภาคผงทั้ง 4 กลุ่ม อยู่ในตารางที่ 2.4 Geldart ได้พัฒนาเกณฑ์ที่เป็น

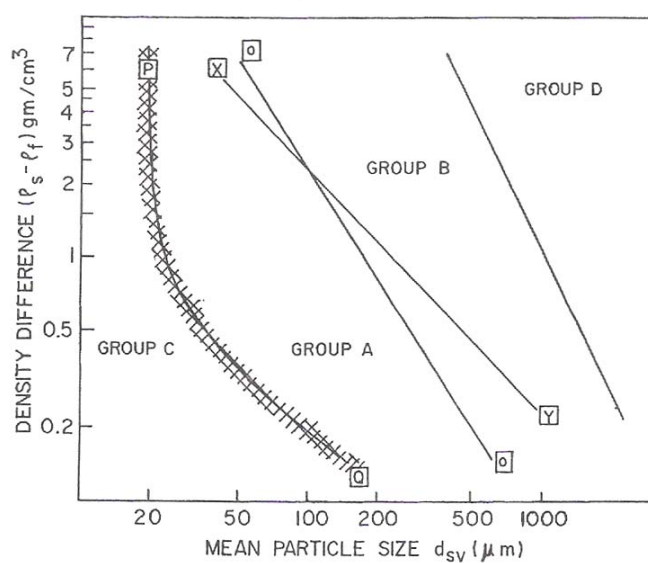
ตัวเลขเพื่อที่จะแสดงให้เห็นความแตกต่างของกลุ่ม A B และ C โดยเกณฑ์ที่เป็นตัวเลขสำหรับขนาดอนุภาคของแข็ง (D_p) ความหนาแน่นของของแข็งและของของไหล (ρ_s) และ (ρ_f) คือ

$$1. (\rho_s - \rho_f) D_p \leq 225 \quad \text{สำหรับกลุ่ม A} \quad (2.37)$$

สมการที่ (2.37) เป็นขอบเขตระหว่างกลุ่ม A และ กลุ่ม B

$$2. (\rho_s - \rho_f) D_p^2 \geq 10^6 \quad \text{สำหรับกลุ่ม D} \quad (2.38)$$

สมการที่ (2.38) เป็นขอบเขตระหว่างกลุ่ม B และ กลุ่ม D เมื่อความหนาแน่นมีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (D_p) มีหน่วยเป็นไมโครเมตร ไม่มีเกณฑ์ที่เป็นตัวเลขหรือสมการสำหรับขอบเขตของเส้นระหว่างกลุ่ม A และ กลุ่ม C เสนอไว้



รูปที่ 2.13 การแบ่งกลุ่มอนุภาคของแข็งประเภทผง (Powders) โดย Geldart
(Gupta and Sathiyamoorthy, 1999)

ตารางที่ 2.2 การแบ่งประเภทอนุภาคผงโดย Geldart

	กลุ่ม	
	A	B
ตัวอย่าง	ตัวเร่งปฏิกิริยา	ทราย
ขนาดอนุภาค (D_p), μm	30-100	$40 < D_p < 500$
ความหนาแน่น (ρ_s), kg/m^3	< 1400	$1400 \leq \rho_s \leq 4000$
การขยายตัว	มาก	น้อย
อัตราการยวบตัวของเบด	ช้า (0.3–0.6 cm/s)	เร็วมาก
	กลุ่ม	
	C	D
ตัวอย่าง	วัสดุละเอียด	วัสดุหยาบ
ขนาดอนุภาค (D_p), μm	$< 60 \mu\text{m}$ ถ้า $(\rho_s - \rho_g) < 500 \text{ kg/m}^3$ $< 20 \mu\text{m}$ ถ้า $(\rho_s - \rho_g) > 1000 \text{ kg/m}^3$	> 500
ความหนาแน่น (ρ_s), kg/m^3	< 1400	> 1400
การขยายตัว	ผงมีการยืดเกาะตามธรรมชาติ ฟลูอิดิซ์ได้ยาก	อนุภาคของแข็งสามารถ พุ่งขึ้นไปด้านบน
อัตราการยวบตัวของเบด	ไม่ค่อยยวบตัว	เร็วที่สุด เพราะว่ามีขนาด อนุภาคใหญ่

สำหรับแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จัดอยู่ในกลุ่ม C ตามการแบ่งประเภทของ Geldart

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีวิจัย

การวิจัยการใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นตัวดูดซับในระบบหอดูดซับแบบฟลูอิดไคซ์เบด เป็นรูปแบบการวิจัยเชิงทดลอง (Experiment Research) เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟลูอิดไคซ์เบดของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่เป็นตัวดูดซับ และศึกษาความสามารถและพัฒนาการใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นตัวดูดซับในระบบหอดูดซับแบบฟลูอิดไคซ์เบด โดยในการทดลองจะใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นตัวดูดซับสารอินทรีย์คือ กรดฮิวมิกออกจากน้ำในระบบหอดูดซับแบบฟลูอิดไคซ์เบด สำหรับสถานที่ทำการทดลองคือ อาคารเครื่องมือ 5 และสำหรับการตรวจวิเคราะห์ต่าง ๆ จะทำที่อาคารเครื่องมือ 1 และอาคารเครื่องมือ 4 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

การวิจัยนี้จะเริ่มต้นจากการนำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ของบริษัท Ashapura Volclay จำกัด มาคัดขนาดด้วยการร่อนแร่ดินด้วยตะแกรงเมชเบอร์ (Mesh No.) 18, 30, 40, 60 และถาดเปล่า แร่ดินที่อยู่ระหว่างตะแกรงเมชเบอร์ 18-30, 30-40 และ 40-60 จะมีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 1-0.6 mm, 0.6-0.425 mm และ 0.425-0.25 mm ซึ่งขนาดอนุภาคที่ใช้ในการทดลองนี้คิดจากค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคแต่ละช่วงจะได้อนุภาคต่างกัน 3 ขนาดคือ 0.80, 0.51 และ 0.34 mm โดย Mesh No. ของตะแกรงคิดเทียบเป็นขนาดของอนุภาคจะแสดงดังตารางที่ 3.1 เมื่อได้อนุภาคจากการคัดขนาดแล้ว นำอนุภาคทั้ง 3 ขนาดมาทำการทดลองฟลูอิดไคซ์เบดเพื่อดูความเป็นไปได้และลักษณะในการเกิดฟลูอิดไคซ์เบด จากนั้นนำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มาเป็นตัวดูดซับกรดฮิวมิกออกจากน้ำ โดยจะทำการศึกษา 2 ระบบคือ ระบบกะ และระบบฟลูอิดไคซ์เบด

ตารางที่ 3.1 ขนาดของอนุภาคที่ Mesh No.ต่าง ๆ และขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ใช้ในการทดลอง

Mesh No.	ขนาดอนุภาค (mm)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (mm)
18	1.00	0.80
30	0.60	
40	0.425	0.51
60	0.25	0.34

3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 ตัวแปรอิสระ

- ขนาดของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์
- ปริมาณของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่บรรจุเป็นเบคในหอฟลูอิด์เบค
- อัตราการไหลของสารละลายกรดฮิวมิก
- ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายกรดฮิวมิก

3.3.2 ตัวแปรควบคุม

- คุณภาพของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (เปลี่ยนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ใหม่ทุกครั้งที่มีการทดลอง)

3.3.3 ตัวแปรตาม

- ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกออกจากน้ำของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

3.4 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.4.1.1 ระบบหอดูดซับแบบฟลูอิดไคซ์เบด เป็นเครื่องมือที่ดัดแปลงมาจากเครื่องมือที่ใช้ในการปฏิบัติการของวิศวกรรมเคมี 1 การทดลองเรื่องการฟลูอิดไคซ์ ที่อาคารศูนย์เครื่องมือ 5 ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 40 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50 mm และมีความสูง 50 cm

3.4.1.2 ปั๊มน้ำอัดโนมัติ แบบมีถังแรงดัน

3.4.1.3 เครื่องวัดอัตราการไหลของสารละลายกรดฮิวมิก

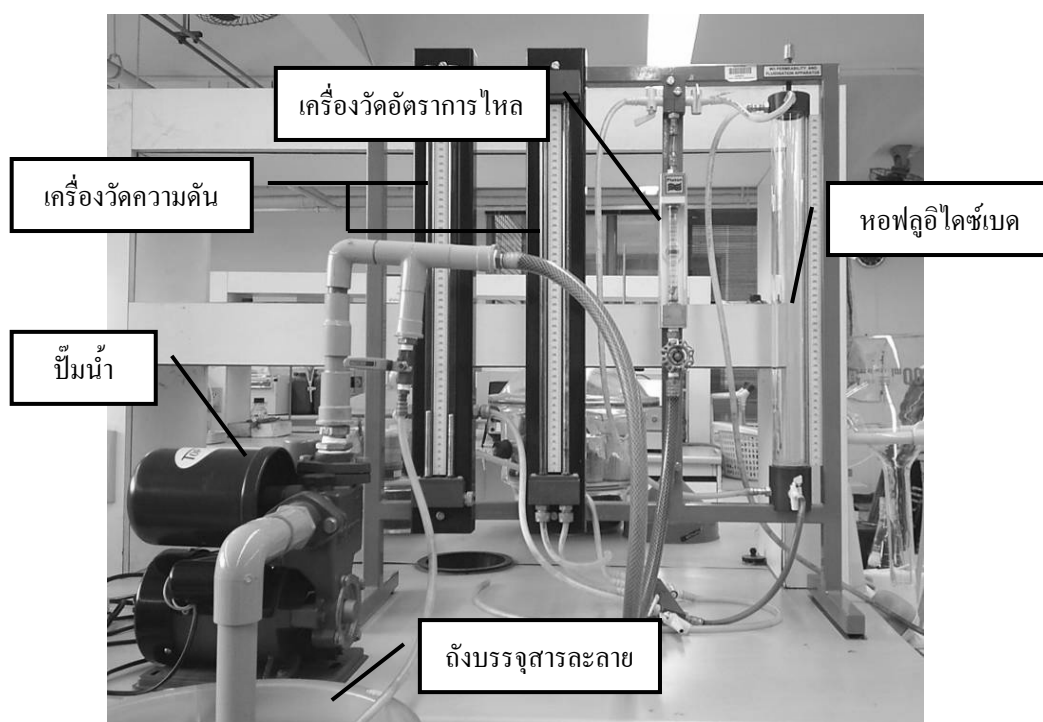
3.4.1.4 ถังบรรจุสารละลายกรดฮิวมิก

3.4.1.5 เครื่องชั่งไฟฟ้าอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง

3.4.1.6 หลอดเก็บสารละลายตัวอย่าง

3.4.1.7 เครื่องเขย่าแบบแนวราบ รุ่น Innova 2100 ของ New Brunswick Scientific

3.4.1.8 เครื่องปั่นเหวี่ยงแยก รุ่น UNIVERSAL 30 RF ของ Hettich



รูปที่ 3.1 ระบบหอดูดซับแบบฟลูอิดไคซ์เบด

3.4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ต่าง ๆ

3.4.2.1 เครื่อง Automatic Surface Analyzer รุ่น ASAP 2010 ของ Micromeritics เพื่อหาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 3.2

3.4.2.2 เครื่อง Mastersizer D Ver. 2.15 Serial Number 33544-156 ของ Malvern Instruments Ltd. เพื่อหาขนาดที่แท้จริงของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ โดยผลการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ข

3.4.2.3 เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) รุ่น Bruker D 5005 System เพื่อหาระยะห่างระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ แสดงค่าในตารางที่ 3.2

3.4.2.4 เครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF) รุ่น ED 2000 ของ Oxford เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ แสดงค่าในตารางที่ 3.3

3.4.2.5 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง Spectronic 20 เพื่อวัดการดูดกลืนแสงของสารละลายกรดฮิวมิก

3.4.2.6 เครื่องวัดความหนาแน่น รุ่น Accu Pyc 1330 TC ของบริษัท Micromeritics เพื่อหาค่าความหนาแน่นที่แท้จริงของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ แสดงค่าในตารางที่ 3.2

3.4.2.7 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter) รุ่น 3020 ของ Jenway เพื่อวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายกรดฮิวมิก

3.4.2.8 เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า รุ่น inoLab Cond Level 2 ของ WTW เพื่อวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำดื่มตรา มทส

3.4.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.4.3.1 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จากบริษัท Ashapura Volclay จำกัด ประเทศอินโดนีเซีย ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของแร่ดินแสดงในตารางที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ โดยจะใช้เครื่อง Automatic Surface Analyzer, XRD และเครื่องวัดความหนาแน่น ในการหาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน ระยะห่างระหว่างชั้นโครงสร้างและค่าความหนาแน่นที่แท้จริงของแร่ดิน และใช้เครื่อง XRF สำหรับหาองค์ประกอบทางเคมีของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

3.4.3.2 กรดฮิวมิกจากบริษัท Fluka จำกัด

3.4.3.3 น้ำดื่มตรามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (น้ำดื่มตรา มทส) เป็นน้ำ R.O. (Reverse Osmosis) มีค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) อยู่ในช่วง 11-17 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ที่อุณหภูมิ 28-29 °C

ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกายภาพของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผลิตโดยบริษัท Ashapura Volclay จำกัด

Bulk Density (kg/m³)	1,300 – 1,900	Micropore volume (cm³/g)	0.010966
True Density (kg/m³)	1,385	%porosity	34
BET surface area (m²/g)	274.1669	% moisture	6
Pore diameter (Å)	55.4475	pH	3
Particle size (mm)	0.25 - 1	Color	light brown
Interlayer spacing (Å)	15.764		

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมี (%โดยน้ำหนัก) ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผลิตโดยบริษัท Ashapura Volclay จำกัด

Na₂O	0.000	K₂O	1.236
MgO	0.747	CaO	1.085
Al₂O₃	11.468	TiO₂	2.165
SiO₂	71.139	Fe₂O₃	9.155
Loss of Ignition	3.005		

จากตารางที่ 3.2 พบว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous Material)

3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 การติดตั้งอุปกรณ์

3.5.1.1 ทำการไล่ฟองอากาศออกจากปั๊ม

3.5.1.2 บรรจุแร่ดินลงในหอพลูอิโดซ์เบด

3.5.1.3 ใส่น้ำหรือสารละลายเข้าไปในหอพลูอิโดซ์เบดให้พอท่วมเบด แล้วเขย่าเล็กน้อยเพื่อให้ดินเกาะตัวกัน

3.5.1.4 ปิดตะแกรงด้านบนหอพลูอิโดซ์เบด เพื่อไม่ให้แร่ดินที่ฟุ้งกระจายตัวหลุดออกจากหอพลูอิโดซ์เบด

3.5.1.5 นำหอพลูอิโดซ์เบดมาประกอบเข้ากับตัวยึดบนและล่าง

3.5.1.6 เปิดปั๊มน้ำเพื่อให้น้ำหรือสารละลายไหลจากด้านล่างของหอพลูอิโดซ์เบดขึ้นสู่ด้านบน และไหลออกจากตัวหอพลูอิโดซ์เบด สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้ไม่สามารถใช้เครื่องวัดความดันวัดค่าความดันที่คร่อมเบดขณะทำการทดลองได้ เนื่องจากแรงดันจะมีการฟุ้งกระจายขณะทำการทดลองอาจเกิดการตกค้างภายในเครื่องมือได้

3.5.2 การทดลองฟลูอิโดเซชันของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์และหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิโดเซชัน (Minimum fluidization velocity : U_{mf})

3.5.2.1 บรรจุแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ขนาด 0.8 mm ปริมาณ 10 กรัม ลงในหอพลูอิโดซ์เบด

3.5.2.2 ติดตั้งอุปกรณ์ตามหัวข้อที่ 3.5.1

3.5.2.3 ทำการวัดอุณหภูมิของน้ำได้ประมาณ 30 °C

3.5.2.4 อ่านค่าความสูงเบดเริ่มต้น จากนั้นปรับระดับอัตราการไหลของน้ำตั้งแต่ 0 จนถึง 600 ml/min พร้อมกับสังเกตลักษณะการเคลื่อนตัวของเบดและอ่านค่าความสูงของเบดที่อัตราการไหลนั้น ๆ แล้วบันทึกผล ซึ่งค่าอัตราการไหลของน้ำสามารถเปลี่ยนเป็นความเร็วของน้ำได้ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยความเร็วของน้ำที่ทำให้อนุภาคแร่ดินเริ่มมีการเคลื่อนตัวทั่วทั้งเบดจะเรียกว่า ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิโดเซชัน (U_{mf})

3.5.2.5 เปลี่ยนขนาดของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์อีก 2 ค่า คือ 0.51 และ 0.34 mm แล้วทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่ 3.5.2.1–3.5.2.4 ตามลำดับ

3.5.2.6 เปลี่ยนปริมาณของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เริ่มต้นอีก 2 ค่า คือ 15 และ 20 กรัม แล้วทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่ 3.5.2.1–3.5.2.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.4 ค่าความเร็วเชิงเส้นของน้ำที่อัตราการไหลเชิงปริมาณต่าง ๆ

อัตราการไหลของน้ำ (ml/min)	ความเร็วของน้ำ (m/s)	อัตราการไหลของน้ำ (ml/min)	ความเร็วของน้ำ (m/s)
0	0.00000	250	0.00331
50	0.00066	300	0.00398
100	0.00133	400	0.00530
150	0.00199	500	0.00663
200	0.00265	600	0.00795

3.5.3 การวัดความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่ละลายในน้ำ

ในการวิจัยนี้เลือกใช้หลักการวัดสีตามหลักการของ Beer's law ที่กล่าวว่า สำหรับสารหนึ่ง ๆ ค่าการดูดกลืนแสงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของทางเดินแสง (Light Path Length) และความเข้มข้นของสารนั้น ๆ ดังนั้นแสงที่ลอดผ่านสารละลายจะถูกตรวจวัดค่าความเข้มข้นในรูปของการส่องผ่าน (Transmittance) หรือ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance : Abs) เครื่องมือที่ใช้ คือ Spectronic 20 (ปิยะภรณ์ จารุงศ์, 2545) วิธีการวัดมีดังนี้

3.5.3.1 เตรียมสารละลายกรดฮิวมิกมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 500 mg/l

3.5.3.2 เตรียมสารละลายกรดฮิวมิกที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อยู่ในช่วง 0 -400 mg/l โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3.1)

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad (3.1)$$

เมื่อ C_1 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายกรดฮิวมิกมาตรฐาน (mg/l)

V_1 = ปริมาตรของสารละลายกรดฮิวมิกมาตรฐานที่ต้องใช้ (ml)

C_2 = ความเข้มข้นของสารละลายกรดฮิวมิกที่ต้องการ (mg/l)

V_2 = ปริมาตรของสารละลายกรดฮิวมิกที่ต้องการเตรียม (ml)

3.5.3.3 ทำการวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectronic 20 โดยเริ่มต้นตั้งค่าความยาวคลื่น 400 nm

3.5.3.4 นำน้ำดื่มตรา มทส ใส่ในคิวเวต (Cuvet) แล้วกด Set Blank

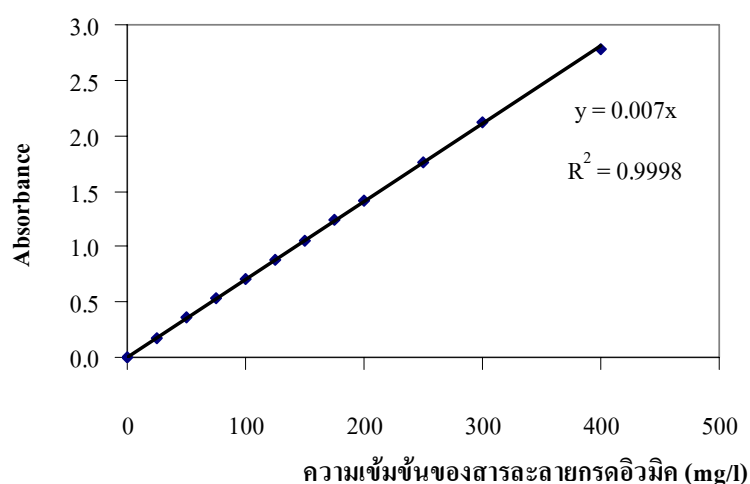
3.5.3.5 นำสารละลายกรดฮิวมิกที่เตรียมไว้ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ มาทำการวัดค่า Absorbance โดยหลังจากการวัดแต่ละครั้งต้องนำน้ำดื่มตรา มทส ล้างคิวเวตให้สะอาด แล้วกลั้วด้วยสารตัวอย่างต่อไปที่จะวัด

3.5.3.6 นำค่า Absorbance ที่ได้จากการวัดที่ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกต่าง ๆ มาสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration Curve) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.2

3.5.3.7 นำตัวอย่างที่ต้องการวัดมาทำการวัดการดูดกลืนแสง แล้วเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้นของกรดฮิวมิก

ตารางที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกรดฮิวมิกกับค่า Absorbance

ความเข้มข้นของสารละลาย กรดฮิวมิก (mg/l)	Absorbance	ความเข้มข้นของสารละลาย กรดฮิวมิก (mg/l)	Absorbance
0	0.000	150	1.060
25	0.176	175	1.240
50	0.358	200	1.409
75	0.536	250	1.755
100	0.699	300	2.114
125	0.884	400	2.781



รูปที่ 3.2 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกรดฮิวมิกกับค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ความยาวคลื่น 400 nm

3.5.4 การทดลองการดูดซับกรดฮิวมิกด้วยเรซินมอนต์มอริลไลต์ในระบบกะ

3.5.4.1 ใส่เรซินมอนต์มอริลไลต์ในขนาด 0.8 mm ปริมาณ 1 กรัม ลงในสารละลายกรดฮิวมิกที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100, 200, 300, 400 และ 500 mg/l ปริมาตร 100 ml ที่อยู่ในขวดรูปชมพู่

3.5.4.2 เขย่าขวดทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ด้วยเครื่องเขย่าแบบแนวราบที่อุณหภูมิห้อง

3.5.4.3 นำสารละลายมาทำการปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกเศษเรซินออกจากสารละลายด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงแยก

3.5.4.4 นำสารละลายที่อยู่ด้านบนมาทำการวัดการดูดกลืนแสง แล้วนำค่า Absorbance ที่ได้มาเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้นของกรดฮิวมิกในสารละลาย

3.5.4.5 ทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่ 3.5.4.1–3.5.4.4 แต่เปลี่ยนขนาดของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์อีก 2 ค่าคือ 0.51 และ 0.34 mm

3.5.5 การทดลองการดูดซับกรดฮิวมิกด้วยแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบฟลูอิดไชน์เบดของเหลว

3.5.5.1 บรรจุแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ขนาด 0.8 mm ปริมาณ 10 กรัม ลงในหอฟลูอิดไชน์เบด

3.5.5.2 ติดตั้งอุปกรณ์ตามหัวข้อที่ 3.5.1

3.5.5.3 เตรียมสารละลายกรดฮิวมิกความเข้มข้น 25 mg/l

3.5.5.4 ปรับอัตราการไหลของสารละลายกรดฮิวมิกที่ 50 ml/min

3.5.5.5 จับเวลาเมื่อสารละลายกรดฮิวมิกเริ่มสัมผัสกับอนุภาคแร่ดินภายในหอฟลูอิดไชน์เบด และเมื่อสารละลายกรดฮิวมิกไหลออกจากหอฟลูอิดไชน์เบดเก็บตัวอย่างทุก ๆ 15 ml พร้อมทั้งบันทึกเวลา จนได้ปริมาตรตัวอย่าง 720 ml จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มาทำให้เศษแร่ดินที่ฟุ้งกระจายอยู่ในสารละลายตกตะกอนโดยทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 48 ชั่วโมง และวัดค่า pH ของสารละลายทุก ๆ 150 ml

3.5.5.6 นำสารละลายที่อยู่ด้านบนมาทำการวัดการดูดกลืนแสง แล้วนำค่า Absorbance ที่ได้มาเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้นของกรดฮิวมิกในสารละลาย

3.5.5.7 ทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่ 3.5.5.1–3.5.5.6 แต่เปลี่ยนขนาดของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์อีก 2 ขนาดคือ 0.51 และ 0.34 mm

3.5.5.8 ทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่ 3.5.5.1–3.5.5.7 แต่เปลี่ยนปริมาณของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์อีก 2 ค่าคือ 15 และ 20 กรัม

3.5.5.9 ทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่ 3.5.5.1–3.5.5.8 แต่ปรับอัตราการไหลของสารละลายกรดฮิวมิกอีก 2 ค่าคือ 100 และ 150 ml/min

3.5.5.10 ทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่ 3.5.5.1–3.5.5.9 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายกรดฮิวมิกอีก 2 ค่าคือ 50 และ 100 mg/l

3.6 วิธีวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.6.1 ฟลูอิดเซชันของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์และหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชัน (U_{mf})

3.6.1.1 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบด (L) กับความเร็วของน้ำ (U) เพื่อดูลักษณะการเกิดฟลูอิดเซชันของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ และหาค่า U_{mf} โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln L$ กับ $\ln U$ จะได้กราฟเป็นเส้นตรง 2 เส้นตัดกัน ตรงจุดที่เส้นกราฟตัดกันคือ $\ln U_{mf}$

3.6.1.2 เปรียบเทียบค่า U_{mf} ที่สังเกตได้ในการทดลองกับค่าที่ได้จากกราฟในข้อที่

3.6.1.1

3.6.1.3 คำนวณค่า U_{mf} จากสมการของ Ergun สมการที่ (2.21) และสมการของ Riba สมการที่ (2.29), (2.30) และ (2.31)

3.6.1.4 เปรียบเทียบค่า U_{mf} ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ

3.6.1.5 นำผลฟลูอิดเซชันมาวิเคราะห์การขยายตัวของเบดกับแบบจำลองของ Richardson-Zaki สมการที่ (2.23) และสมการที่ (2.32) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของเบด (L_0/L) กับเศษส่วนของแข็ง (ϕ_s/ϕ_{so})

3.6.1.6 คำนวณตัวเลขโบเดินสไตน์ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวแกนของของเหลวและของของแข็งจากสมการที่ (2.33), (2.34), (2.35) และ (2.37)

3.6.2 การดูดซับกรดฮิวมิกด้วยแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบกะ

3.6.2.1 คำนวณปริมาณกรดฮิวมิกที่ถูกดูดซับบนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (q) ในระบบกะด้วยสมการสมดุลมวล สมการที่ (2.7) ที่ขนาดของแร่ดินต่างกัน

3.6.2.2 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดฮิวมิกที่ถูกดูดซับบนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (q) กับความเข้มข้นของสารละลายกรดฮิวมิกที่สมดุลหลังการดูดซับ (C_e) เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการดูดซับ

3.6.2.3 คำนวณความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกสูงสุด (q_m) ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จากรูปแบบการดูดซับที่ได้

3.6.3 การดูดซับกรดฮิวมิกด้วยแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบฟลูอิด์เบด

3.6.3.1 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกขาออกกับ ปริมาตรของสารละลายกรดฮิวมิกขาออกสะสม เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบฟลูอิด์เบดที่สภาวะต่าง ๆ คือ ที่ขนาดและปริมาณของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่างกัน อัตราการไหลและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายกรดฮิวมิกต่างกัน

3.6.2.2 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดฮิวมิกขาออกกับเวลา เพื่อวิเคราะห์ผลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อการดูดซับกรดฮิวมิกและต่อเวลาเบรคทู

3.6.3.3 คำนวณประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิก (η) เมื่อคิดในระบบของเหลวตามสมการข้างล่างนี้

$$\eta(\%) = \frac{C_o - C}{C_o} \times 100\% \quad (3.2)$$

เมื่อ C_o และ C คือความเข้มข้นของสารละลายกรดฮิวมิกที่เวลาเริ่มต้นและที่เวลาใด ๆ ตามลำดับ

3.6.3.4 คำนวณปริมาณกรดฮิวมิกที่ถูกดูดซับบนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (q_o) ในระบบฟลูอิด์เบดที่สภาวะต่าง ๆ คือ ที่ขนาดและปริมาณของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่างกัน อัตราการไหลและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายกรดฮิวมิกต่างกัน ด้วยสมการสมดุลมวลสมการที่ (2.7) ซึ่งจัดรูปใหม่ได้เป็นสมการที่ (3.3) โดยผลการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค

$$q_o = \frac{\sum_{i=1}^n [(C_o - C_i)V]}{W} \quad (3.3)$$

เมื่อ C_o = ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดฮิวมิก (mg/l)

C = ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกขาออก (mg/l)

V = ปริมาตรของตัวอย่างที่เก็บเท่ากับ 15 ml (0.015 l)

W = น้ำหนักเริ่มต้นของเบด (g)

i = ลำดับที่ของตัวอย่าง

3.6.3.5 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบกะและในระบบฟลูอิด์เบด

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล

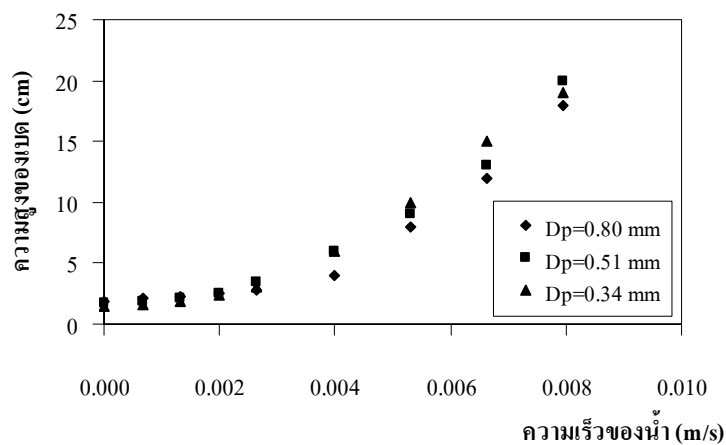
4.1 ฟลูอิดิเซชันของแร่ดินมอนต์มอริลโลในต้นน้ำ

4.1.1 ลักษณะการเกิดฟลูอิดิเซชันของแร่ดินมอนต์มอริลโลในต้นน้ำ

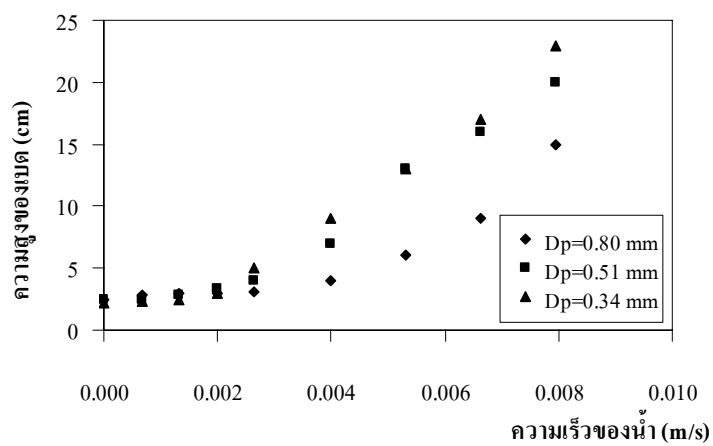
ผลการทดลองฟลูอิดิเซชันของแร่ดินมอนต์มอริลโลในต้นน้ำแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 (ก) (ข) และ (ค) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบด (L) ที่ความเร็วของน้ำ (U) ต่าง ๆ เมื่อน้ำหนักเริ่มต้นของเบดคือ 10, 15 และ 20 กรัม ตามลำดับ ซึ่งกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นโค้งที่มีความชันค่อย ๆ เพิ่มขึ้น โดยจะหาค่า U_{mf} ของกราฟนี้ได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln L$ กับ $\ln U$ แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 พบว่าได้กราฟเป็นเส้นตรง 2 เส้นตัดกัน ตรงจุดที่เส้นกราฟตัดกันคือค่า $\ln U_{mf}$ ซึ่งค่า U_{mf} ที่ได้จากกราฟนี้จะนำมาเปรียบเทียบกับค่า U_{mf} ที่สังเกตได้จากการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากรูปที่ 4.1 พบว่าที่อัตราการไหลของน้ำต่ำกว่าค่า U_{mf} ความสูงของเบดจะคงที่หรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากเบดยังมีการเกาะตัวกันทำให้การไหลของน้ำไหลไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดอนุภาคเป็นผลให้เบดไม่เกิดการขยับตัวหรือขยับตัวน้อยมาก ตรงจุดนี้ความสูงเบดของอนุภาคขนาดใหญ่จะสูงกว่าความสูงเบดของอนุภาคขนาดเล็ก เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเท่ากับค่า U_{mf} เบดจะเริ่มมีการเคลื่อนตัวทั่วทั้งเบด และเมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มสูงกว่าค่า U_{mf} ค่าความสูงของเบดจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยความสูงเบดของอนุภาคขนาดเล็กจะสูงกว่าความสูงเบดของอนุภาคขนาดใหญ่ และเมื่อพิจารณาที่ขนาดของอนุภาคคงที่พบว่า เมื่อน้ำหนักเริ่มต้นของเบดเพิ่มขึ้น ความสูงของเบดจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

ส่วนค่า U_{mf} ทางทฤษฎีสามารถคำนวณได้จากสมการของ Ergun สมการที่ (2.19) และสมการของ Riba สมการที่ (2.25), (2.26) และ (2.27) ซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 4.2 และจากสมการของ Riba การคำนวณค่า U_{mf} ต้องใช้ค่าตัวเลขกาลิเลโอ (Galileo Number : Ga) และตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำสุดสำหรับการเกิดฟลูอิดิเซชัน (The Minimum Reynolds Number for Fluidization : Re_{mf}) ที่คำนวณจากสมการที่ (2.21) และ (2.25) ตามลำดับ โดยค่าทั้งสองแสดงในตารางที่ 4.3

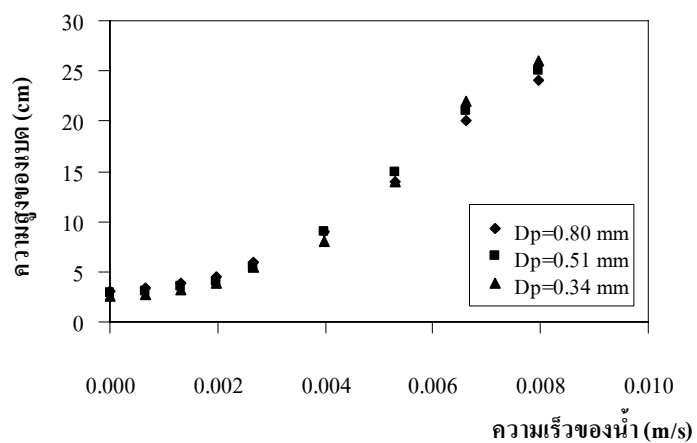
(ก)



(ข)

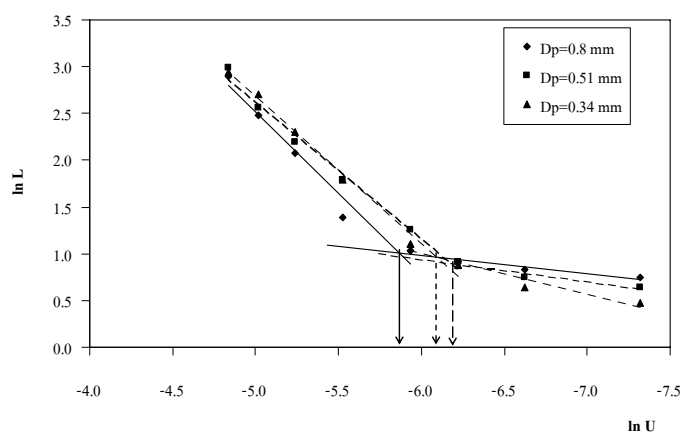


(ค)

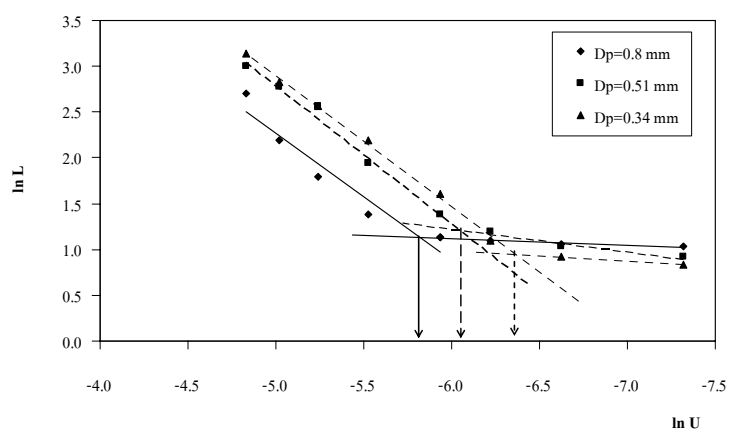


รูปที่ 4.1 ค่าความสูงของเบดที่ความเร็วของน้ำต่าง ๆ เมื่อน้ำหนักเริ่มต้นของเบดคือ
(ก) 10 กรัม (ข) 15 กรัม และ (ค) 20 กรัม

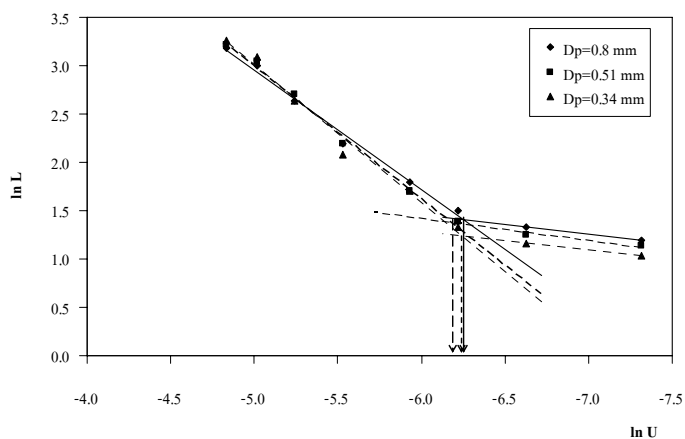
(ก)



(ข)



(ค)



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln L$ กับ $\ln U$ เมื่อน้ำหนักเริ่มต้นของเบคคือ
(ก) 10 กรัม (ข) 15 กรัม และ (ค) 20 กรัม

ตารางที่ 4.1 ค่า U_{mf} ที่ได้จากรูปที่ 4.2 และค่า U_{mf} ที่สังเกตได้จากการทดลอง

น้ำหนักเบด เริ่มต้น (กรัม)	ขนาดของ แร่ดิน (mm)	จากรูปที่ 4.2		จากการทดลอง
		$\ln U_{mf}$	U_{mf} (m/s)	U_{mf} (m/s)
10	0.80	-5.88	0.00279	0.00133
	0.51	-6.18	0.00207	0.00133
	0.34	-6.10	0.00224	0.00133
15	0.80	-5.82	0.00297	0.00133
	0.51	-6.08	0.00229	0.00133
	0.34	-6.38	0.00170	0.00133
20	0.80	-6.26	0.00191	0.00133
	0.51	-6.20	0.00203	0.00133
	0.34	-6.25	0.00193	0.00133

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าค่า U_{mf} ที่อ่านได้จากกราฟในรูปที่ 4.2 มีค่ามากกว่าค่า U_{mf} ที่สังเกตได้จากการทดลอง (ค่า U_{mf} ที่สังเกตได้จากการทดลองเป็นความเร็วที่ทำให้อนุภาคแร่ดินเริ่มมีการเคลื่อนตัวทั่วทั้งเบด) แสดงว่าแท้จริงแล้วค่า U_{mf} ที่อ่านได้จากกราฟในรูปที่ 4.2 เป็นความเร็วที่อยู่ในช่วงอนุภาคเกิดฟลูอิไลเซชันแล้ว ดังนั้นผู้วิจัยจึงขอเลือกค่า U_{mf} ที่สังเกตได้จากการทดลองมาเป็นตัวเปรียบเทียบกับค่า U_{mf} ที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งรายละเอียดจะแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่า U_{mf} ที่ได้จากการทดลอง และค่า U_{mf} ที่ได้จากการคำนวณ และค่าเศษส่วนช่องว่างของเบด (ε) ที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ (2.17)

น้ำหนักเบดเริ่มต้น (กรัม)	ขนาดของแร่ดิน (mm)	U_{mf} (m/s)			ε
		จากการทดลอง	สมการของ Ergun	สมการของ Riba	
10	0.80	0.00133	0.01351	0.00198	0.681
	0.51	0.00133	0.00626	0.00127	0.662
	0.34	0.00133	0.00220	0.00086	0.617
15	0.80	0.00133	0.01187	0.00198	0.655
	0.51	0.00133	0.00547	0.00127	0.641
	0.34	0.00133	0.00193	0.00086	0.599
20	0.80	0.00133	0.00968	0.00198	0.617
	0.51	0.00133	0.00427	0.00127	0.604
	0.34	0.00133	0.00125	0.00086	0.541

จากตารางที่ 4.2 พบว่าที่ขนาดของแร่ดินและน้ำหนักเริ่มต้นของเบดต่างกัน ค่า U_{mf} ที่สังเกตได้จากการทดลองมีค่าเท่ากัน เนื่องจากการเกิดฟลูอิดไอเซชัน อนุภาคภายในห่อฟลูอิดไอซ์เบดได้รับแรงกระทำจากน้ำทำให้อนุภาคภายในห่อฟลูอิดไอซ์เบดมีขนาดเล็กลง จึงเป็นผลให้ขนาดเริ่มต้นของแร่ดินไม่มีผลต่อค่า U_{mf} ที่ได้จากการทดลอง

สำหรับค่า U_{mf} ที่ได้จากสมการของ Ergun พบว่ามีค่ามากกว่าค่า U_{mf} ที่ได้จากการทดลองทั้งนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของแร่ดินในการทดลอง อันเนื่องมาจากแรงภายนอกที่มากกระทำกับอนุภาคแร่ดินระหว่างการเกิดฟลูอิดไอเซชัน ทำให้อนุภาคภายในห่อฟลูอิดไอซ์เบดมีขนาดเล็กลง เป็นผลให้ค่า U_{mf} ที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยลงด้วย และสมการของ Ergun เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณสำหรับเบดหนึ่งที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความสูงของเบด (Chopard, Welsh, Ng, Ottenberg, and Holbrook, online, 2003) แต่ในการทดลองเป็นฟลูอิดไอเซชันซึ่งความสูงของเบดจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดฟลูอิดไอเซชัน จึงทำให้ค่า U_{mf} ที่ได้จากการคำนวณและจากการทดลองไม่เท่ากัน

ส่วนค่า U_{mf} ที่ได้จากสมการของ Riba พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่า U_{mf} ที่ได้จากการทดลอง แสดงว่าสมการของ Riba สามารถอธิบายการเกิดฟลูอิดไอเซชันของแร่ดินมอนต์มอริล-

โลไนต์ในของเหลวได้ดีกว่าสมการของ Ergun เนื่องจากสมการของ Riba เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณในระบบฟลูอิดซ์เบดแต่สมการของ Ergun เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณในระบบเบดนิ่ง

จากการคำนวณค่าเศษส่วนช่องว่างของเบด (ε) จากสมการที่ (2.17) พบว่า ที่น้ำหนักรีดเริ่มต้นของเบดเท่ากัน เมื่อขนาดของเรดิโนใหญ่ขึ้นส่งผลให้ค่าเศษส่วนช่องว่างของเบดมีค่ามากขึ้น ทำให้ค่า U_{mf} ที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากขึ้นด้วย และที่ขนาดของเรดิโนเท่ากัน ค่าเศษส่วนช่องว่างของเบดจะลดลงเมื่อน้ำหนักเริ่มต้นของเบดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคมากขึ้น

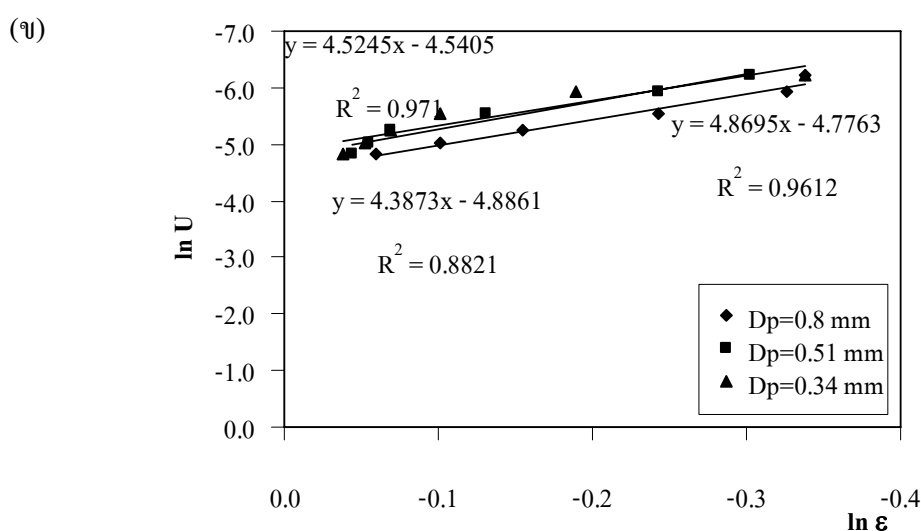
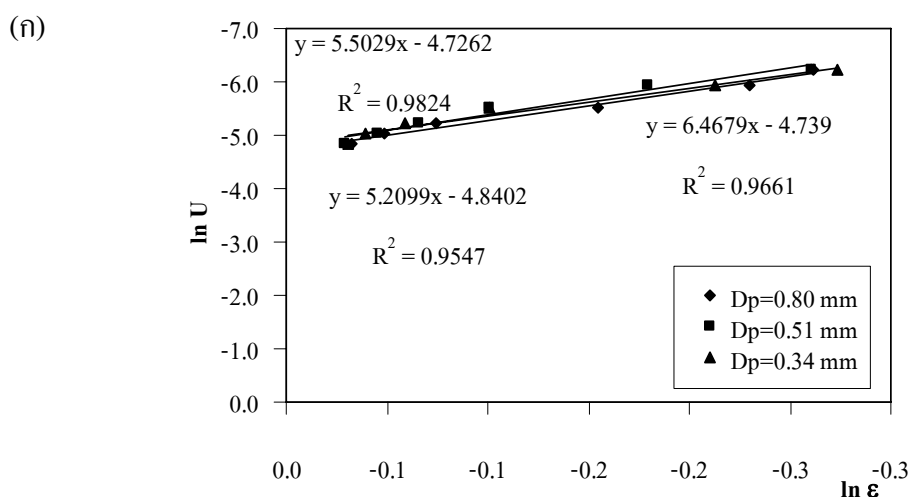
ตารางที่ 4.3 ค่า G_a และ Re_{mf} ที่ใช้ในการหาค่า U_{mf} จากสมการของ Riba

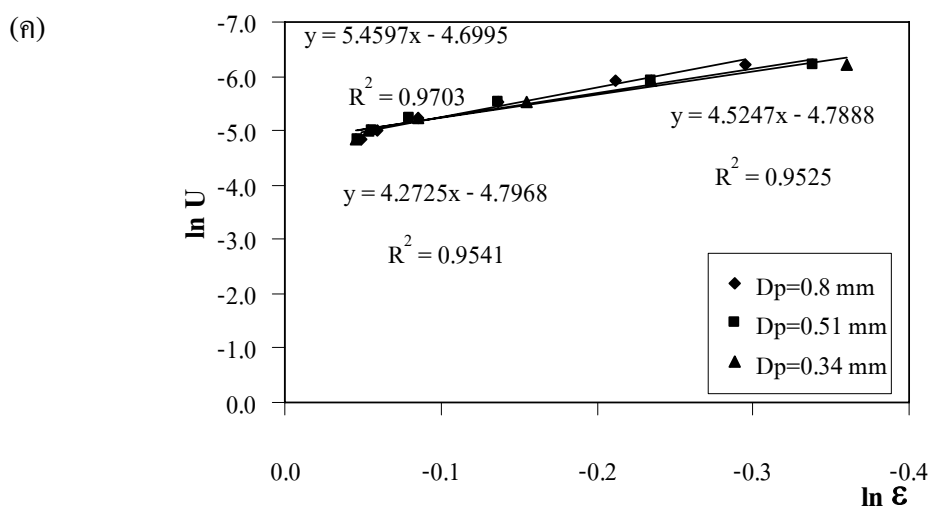
ขนาดของเรดิโน (mm)	G_a	Re_{mf}	U_{mf} (m/s)
0.80	4249.45	1.979	0.00198
0.51	1100.96	0.811	0.00127
0.34	326.21	0.364	0.00086

จากตารางที่ 4.3 ค่า G_a และ Re_{mf} ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของเรดิโนใหญ่ขึ้น เป็นผลให้ค่า U_{mf} มีค่ามากขึ้นด้วย

4.1.2 ความสัมพันธ์ของการขยายตัวของเบดกับความเร็วของน้ำที่ใช้ในการทดลอง

เมื่อนำผลการทดลองในช่วงที่อนุภาคเกิดฟลูอิไดเซชันมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ของ Richardson-Zaki ตามสมการที่ (2.29) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.3(ก) (ข) และ (ค) เมื่อน้ำหนักเริ่มต้นของเบดคือ 10, 15 และ 20 กรัม ตามลำดับ เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความเร็วน้ำ ($\ln U$) และลอการิทึมของค่าเศษส่วนช่องว่างของเบด ($\ln \varepsilon$) ซึ่งได้กราฟเป็นเส้นตรง ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีผลสอดคล้องกับความสัมพันธ์ของ Richardson-Zaki ซึ่งสามารถหาค่าความเร็วสุดท้ายของการเกิดฟลูอิไดเซชัน (U_f) และตัวชี้วัดการขยายตัวของเบด (n) ได้จากจุดตัดกราฟทางแกน y และความชันของกราฟตามลำดับ แสดงค่าในตารางที่ 4.4





รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ตามสมการของ Richardson-Zaki เมื่อน้ำหนักเริ่มต้นของเบคคือ (ก) 10 กรัม (ข) 15 กรัม และ (ค) 20 กรัม

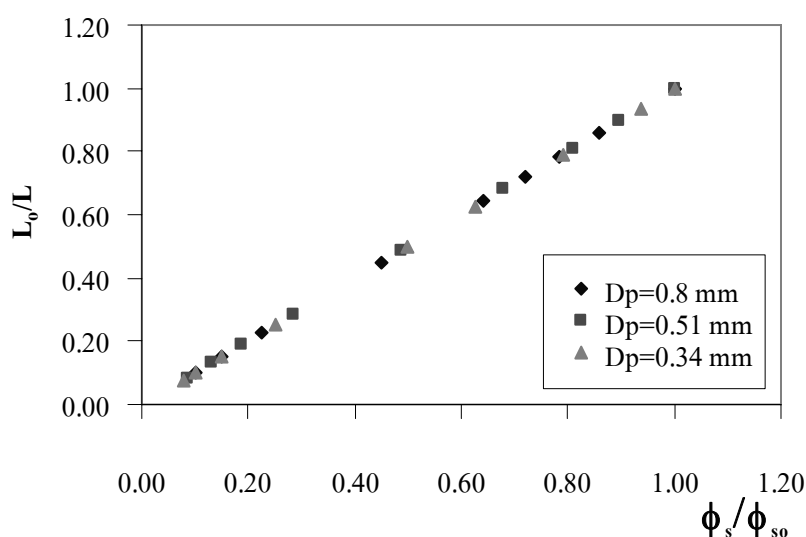
ตารางที่ 4.4 ค่า U_t และค่า n ที่ได้จากความสัมพันธ์ของสมการ Richardson-Zaki

น้ำหนักเบคเริ่มต้น (กรัม)	ขนาดของแร่ดิน (mm)	U_t (m/s)	n
10	0.80	0.00886	5.50
	0.51	0.00875	6.47
	0.34	0.00791	5.21
15	0.80	0.01067	4.52
	0.51	0.00843	4.87
	0.34	0.00755	4.39
20	0.80	0.00910	5.46
	0.51	0.00832	4.52
	0.34	0.00826	4.27

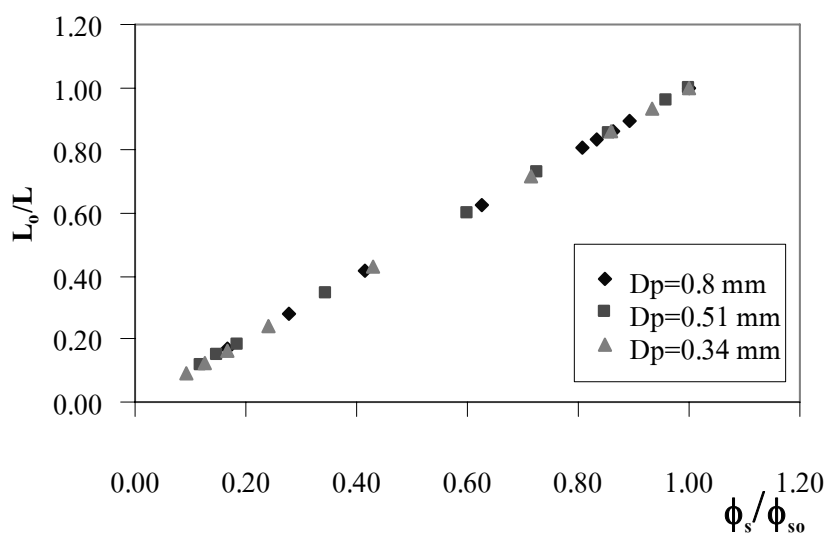
จากตารางที่ 4.4 พบว่า ที่น้ำหนักเริ่มต้นของเบคเท่ากัน ค่า U_t ที่ได้จากความสัมพันธ์ของสมการ Richardson-Zaki มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของแร่ดินใหญ่ขึ้น แต่ค่า n จะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของแร่ดิน และที่ขนาดของแร่ดินเท่ากัน ค่า n จะลดลงเมื่อน้ำหนักเริ่มต้นของเบคเพิ่มขึ้น แต่ค่า U_t จะไม่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักเริ่มต้นของเบค

นอกจากนี้การขยายตัวของเบดสามารถแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างเบดที่มีการขยายตัว (L_0/L) กับเศษส่วนของแข็ง (ϕ_s/ϕ_{so}) ตามสมการที่ (2.31) ได้อีกด้วย ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 พบว่าได้กราฟเป็นเส้นตรงตัดแกน x และ y ที่จุด (0, 0) มีค่าความชันเท่ากับ 1

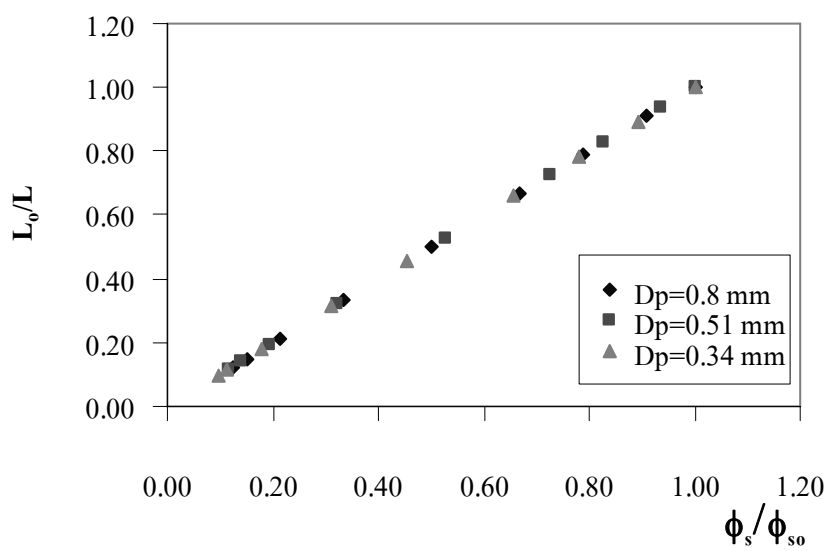
(ก)



(ข)



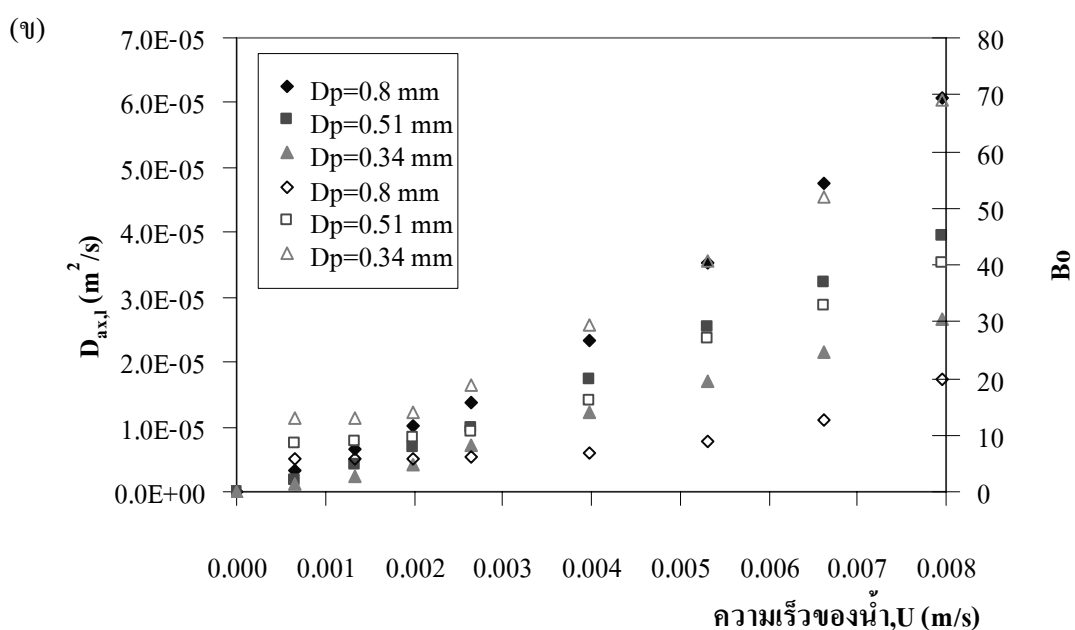
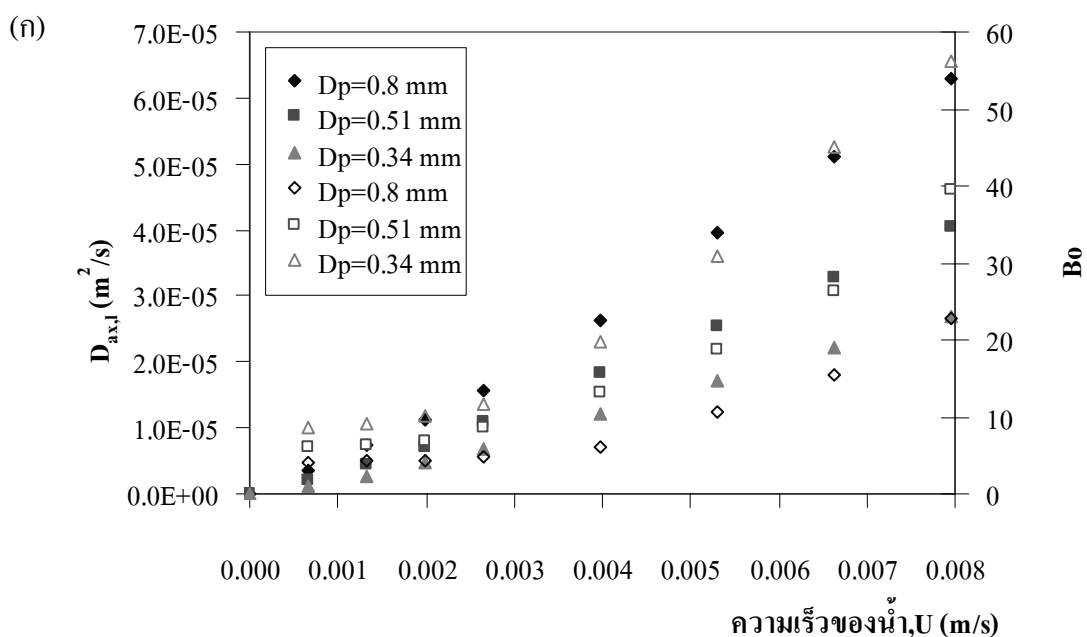
(ค)

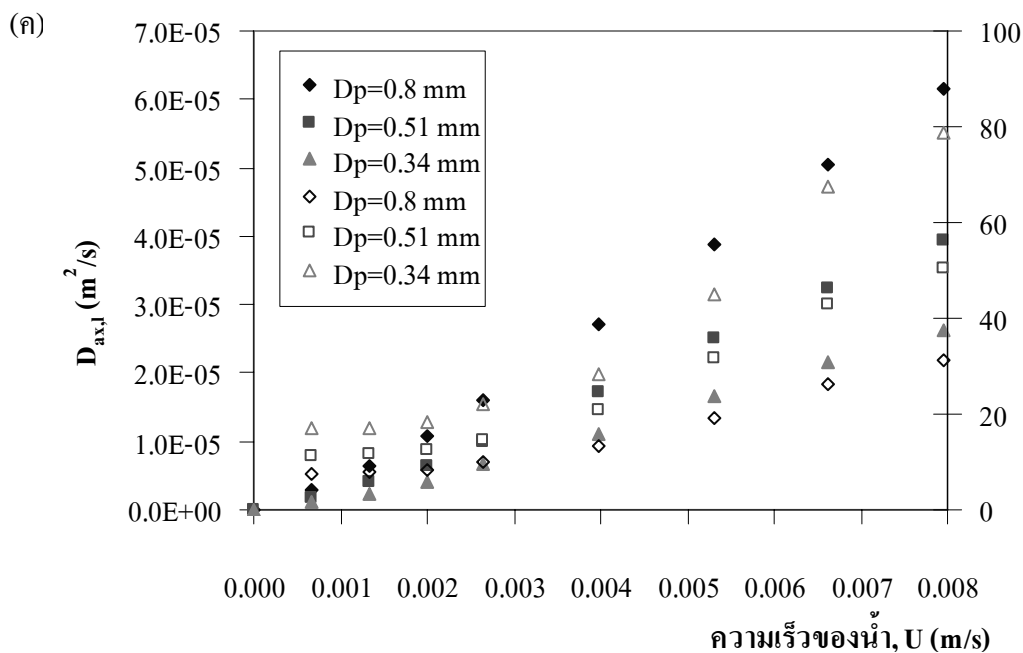


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของเบด (L_0/L) กับเศษส่วนของแข็ง (ϕ_s/ϕ_{s0}) ตามสมการที่ (2.32) เมื่อน้ำหนักเริ่มต้นของเบดคือ (ก) 10 กรัม (ข) 15 กรัม และ (ค) 20 กรัม

4.1.3 การกระจายตัวของของเหลว - วิเคราะห์ด้วยค่า Bo และ $D_{ax,l}$

ผลของการกระจายตัวของของเหลวในเบดที่มีการขยายตัวแสดงได้ด้วยค่าตัวเลขโบเดินสไตน์ (Bodenstein Number : Bo) คำนวณได้จากสมการที่ (2.32) และค่าสัมประสิทธิ์การผสมตามแนวแกนของของเหลว (Axial Mixing Coefficient in the Liquid Phase : $D_{ax,l}$) คำนวณได้จากค่าตัวเลขเพคเลตของอนุภาค (The Particle Peclet Number : Pe_p) สมการที่ (2.33) และ (2.34) โดยผลการคำนวณทั้งสองค่าแสดงในรูปที่ 4.5





รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Bo (สัญลักษณ์กลวง) และ $D_{ax,l}$ (สัญลักษณ์ทึบ) กับความเร็วของน้ำ สำหรับฟลูอิดเซชันของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในน้ำ เมื่อน้ำหนักเริ่มต้นของเบคคือ (ก) 10 กรัม (ข) 15 กรัม และ (ค) 20 กรัม

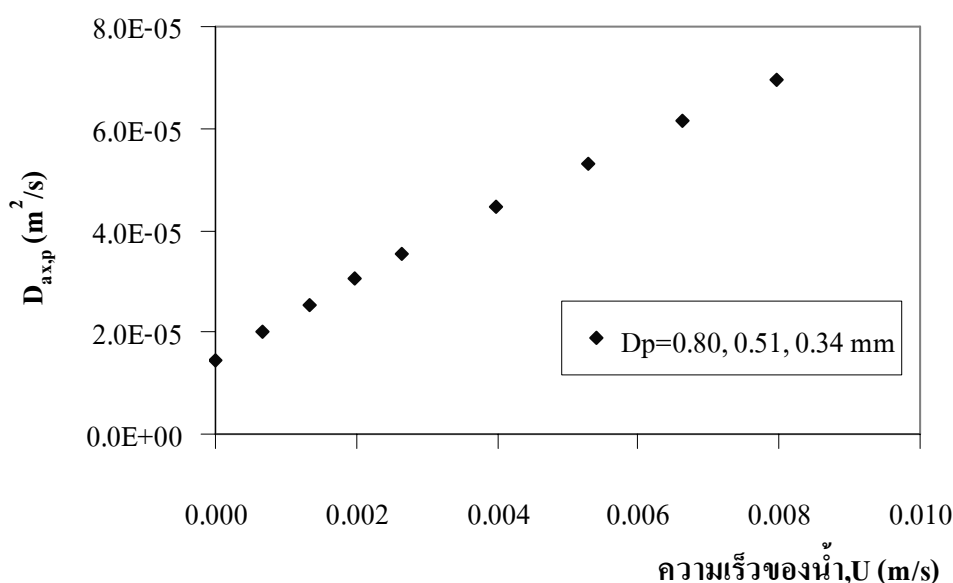
จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่า เมื่อความเร็วของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ค่า $D_{ax,l}$ และ Bo จะมีค่าเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนที่ไม่เท่ากัน นั่นคือ ที่อัตราการเพิ่มขึ้นของ $D_{ax,l}$ สูง ๆ อัตราการเพิ่มขึ้นของ Bo จะต่ำและที่อัตราการเพิ่มขึ้นของ $D_{ax,l}$ ต่ำ ๆ อัตราการเพิ่มขึ้นของ Bo จะสูง ซึ่งถ้าค่า $Bo > 40$ การผสมตามแนวแกนจะไม่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ (Anspach et al, online, 1999)

เมื่อพิจารณาที่น้ำหนักเริ่มต้นของเบคเท่ากัน ค่า $D_{ax,l}$ ของแร่ดินขนาดใหญ่จะมีค่ามากกว่าค่า $D_{ax,l}$ ของแร่ดินขนาดเล็ก เป็นผลให้ค่า Bo ของแร่ดินขนาดเล็กมีค่ามากกว่าค่า Bo ของแร่ดินขนาดใหญ่ เนื่องจากแร่ดินขนาดใหญ่จะมีค่าเศษส่วนช่องว่างของเบคมากกว่าแร่ดินขนาดเล็ก จึงทำให้ค่า $D_{ax,l}$ ของแร่ดินขนาดใหญ่มีค่ามากกว่าแร่ดินขนาดเล็ก

เมื่อพิจารณาที่ขนาดของแร่ดินเท่ากัน น้ำหนักเริ่มต้นของเบคไม่มีผลต่อค่า $D_{ax,l}$ แต่สำหรับค่า Bo พบว่าที่น้ำหนักเริ่มต้นของเบคเพิ่มขึ้น ค่า Bo จะมีค่ามากขึ้นด้วย

4.1.4 การกระจายตัวของของแข็ง - วิเคราะห์ด้วยค่า $D_{ax,p}$

การกระจายตัวของของแข็งในเบดที่มีการขยายตัวแสดงได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การผสมตามแนวแกนของของแข็ง (Axial Mixing Coefficient in the Solid Phase : $D_{ax,p}$) คำนวณได้จากสมการของ Kang สมการที่ (2.36) ผลการคำนวณแสดงในรูปที่ 4.6 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า $D_{ax,p}$ กับความเร็วของน้ำ

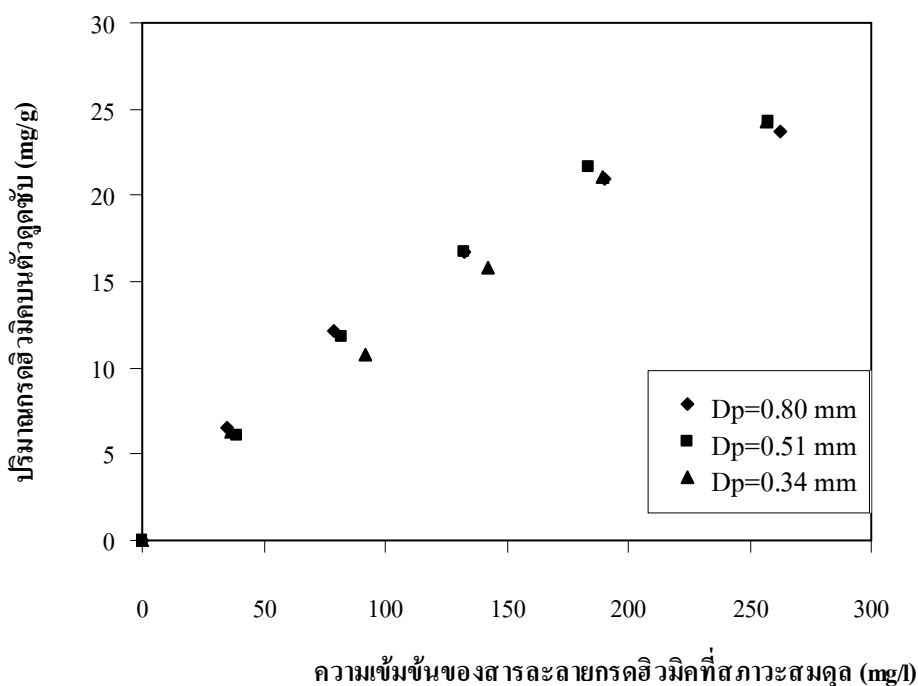


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $D_{ax,p}$ กับความเร็วของน้ำ สำหรับฟลูอิดไอเซนซ์ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในน้ำ

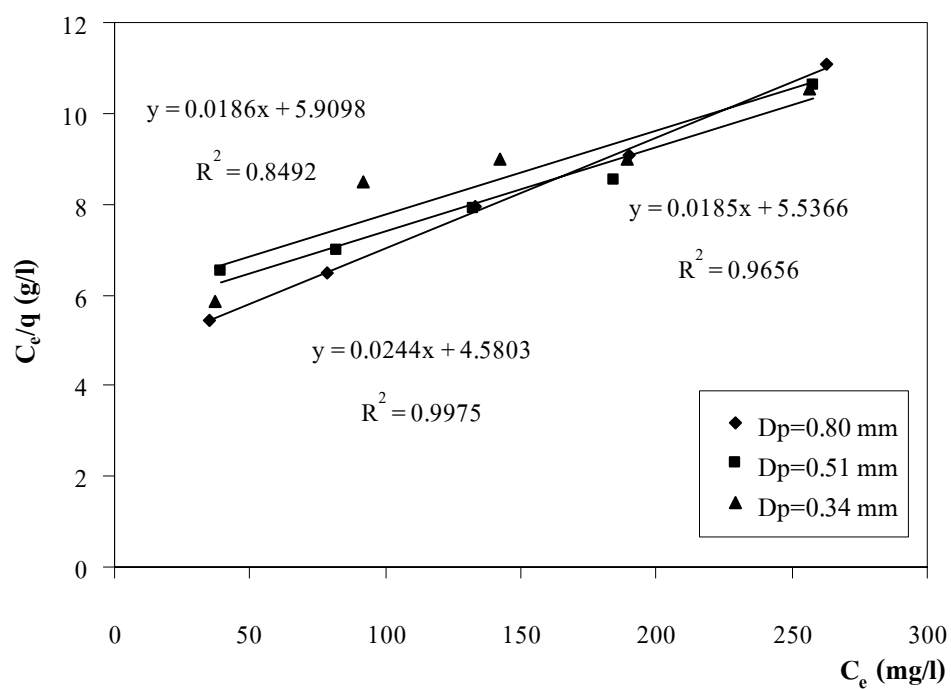
ค่า $D_{ax,p}$ ที่ได้จากการคำนวณจากสมการของ Kang สมการที่ (2.36) ของอนุภาคทั้ง 3 ขนาดมีค่าเท่ากัน เนื่องจากว่าในการคำนวณจะต้องใช้ค่า U_{mf} ที่ได้จากการทดลองมาคำนวณ ซึ่งค่า U_{mf} ที่ได้จากการทดลองของอนุภาคทั้งสามขนาดมีค่าเท่ากัน จึงทำให้ค่า $D_{ax,p}$ มีค่าเท่ากัน และจากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าค่า $D_{ax,p}$ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของน้ำเพิ่มขึ้น นั่นคือ เมื่ออัตราการไหลของน้ำมากขึ้นจะทำให้ของแข็งมีการผสมตามแนวแกนมากขึ้น ซึ่งค่านี้จะใช้อธิบายในกระบวนการดูดซับต่อไป

4.2 การดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบกะ

ผลการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ขนาดต่าง ๆ ในระบบกะแสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าปริมาณกรดฮิวมิกที่ถูกดูดซับโดยแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ขนาดต่าง ๆ ให้ผลแตกต่างกันไม่มาก โดยผลการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบกะมีรูปแบบการดูดซับเป็นแบบ Langmuir Isotherm ตามสมการที่ (2.9) ซึ่งสามารถคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 จากตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าปริมาณกรดฮิวมิกสูงสุดบนตัวดูดซับที่ได้จากการคำนวณให้ผลสอดคล้องกับค่าที่ได้จากรูปที่ 4.7 นั่นคือ ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ขนาดต่าง ๆ มีค่าแตกต่างกันไม่มาก



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่เหลือในสารละลายหลังการดูดซับ โดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีขนาดต่างกัน



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q กับ C_e จากสมการที่ (2.10) เพื่อหาค่าปริมาณกรดฮิวมิกสูงสุดบนพื้นผิวตัวดูดซับของการดูดซับแบบชั้นเดียว (mg/g)

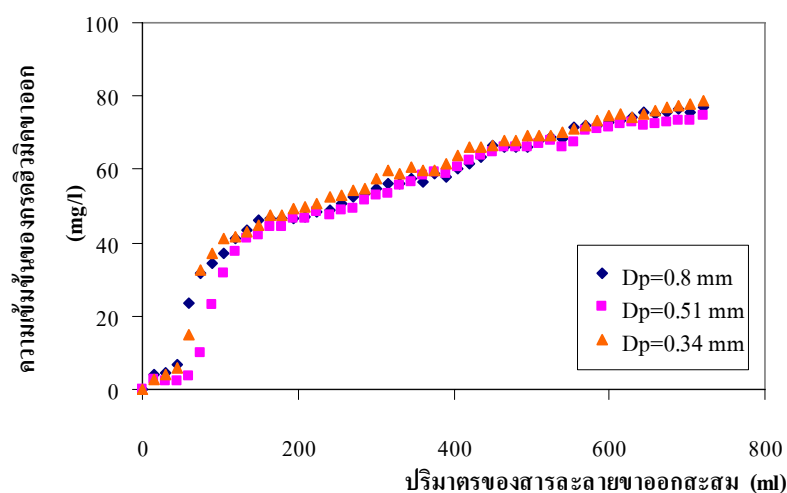
ตารางที่ 4.5 ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ขนาดต่าง ๆ ในระบบกะ

ขนาดของแร่ดิน (mm)	ปริมาณกรดฮิวมิกสูงสุดบนตัวดูดซับ (q_m : mg/g)
0.80	40.98
0.51	54.05
0.34	53.76

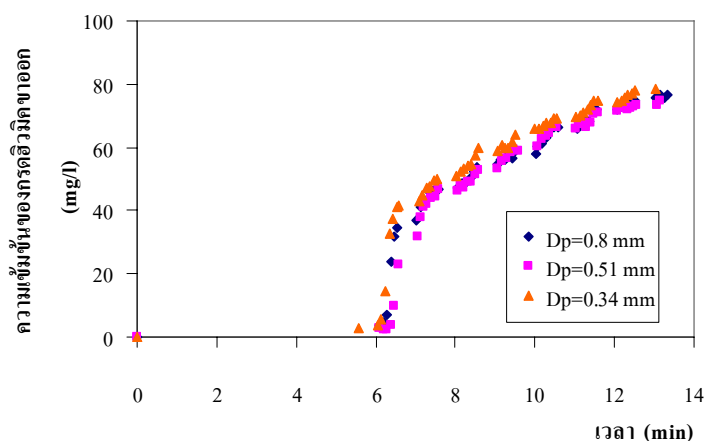
4.3 การดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบฟลูอิดซ์เบด

4.3.1 ผลของขนาดของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิก

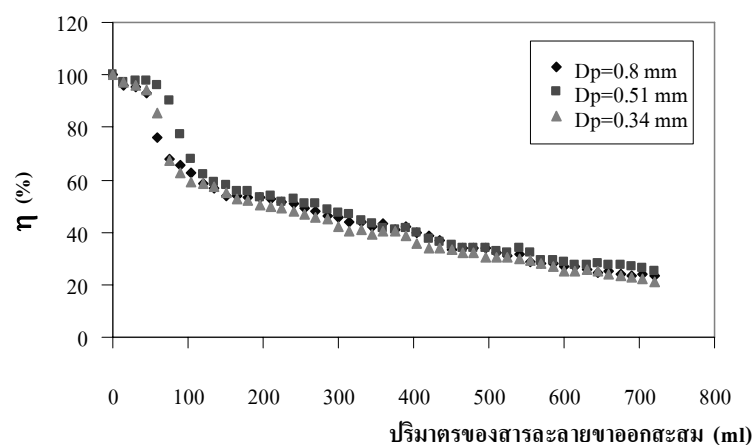
รูปที่ 4.9 แสดงรูปแบบการดูดซับกรดฮิวมิกโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ขนาดต่าง ๆ (D_p) เป็นตัวดูดซับ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายกรดฮิวมิก (C_0) เท่ากับ 100 mg/l อัตราการไหลของสารละลายกรดฮิวมิก (Q) เท่ากับ 100 ml/min และน้ำหนักเริ่มต้นของเบด (W) เท่ากับ 15 กรัม พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะรูปตัวเอส (S) โดยผลของขนาดของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่อกราฟเบรคทรูแสดงได้ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งเวลาในช่วงแรกคือประมาณ 0-6 นาทีเป็นเวลาที่สารละลายอยู่ในหอดูดซับ และเมื่อสารละลายออกจากหอดูดซับพบว่า ขนาดของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ไม่มีผลต่อกราฟเบรคทรูของกรดฮิวมิก คือ เวลาที่จุดเบรคทรูของแร่ดินขนาดต่าง ๆ จะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 6.3 นาที โดยประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกเมื่อคิดในระบบของเหลวที่แร่ดินขนาด ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.11 พบว่ามีประสิทธิภาพการดูดซับไม่แตกต่างกัน และเมื่อคำนวณปริมาณกรดฮิวมิกที่ถูกดูดซับออกจากสารละลายที่มีปริมาตร 720 ml พบว่าค่าปริมาณการดูดซับกรดฮิวมิกไม่ต่างกันมากดังแสดงในตารางที่ 4.6 เนื่องจากขณะเกิดฟลูอิดเซชัน อนุภาคภายในหอดูดซับมีแรงภายนอกมากระทำทำให้ขนาดของแร่ดินภายในหอดูดซับเล็กลง เป็นผลให้การดูดซับของแร่ดินแต่ละขนาดไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.9 รูปแบบการดูดซับกรดฮิวมิกโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ขนาดต่าง ๆ เป็นตัวดูดซับในระบบฟลูอิดซ์เบดเมื่อ $C_0 = 100$ mg/l, $Q = 100$ ml/min และ $W = 15$ g



รูปที่ 4.10 ผลของขนาดของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่อกราฟเบรคทรูเมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $W = 15 \text{ g}$



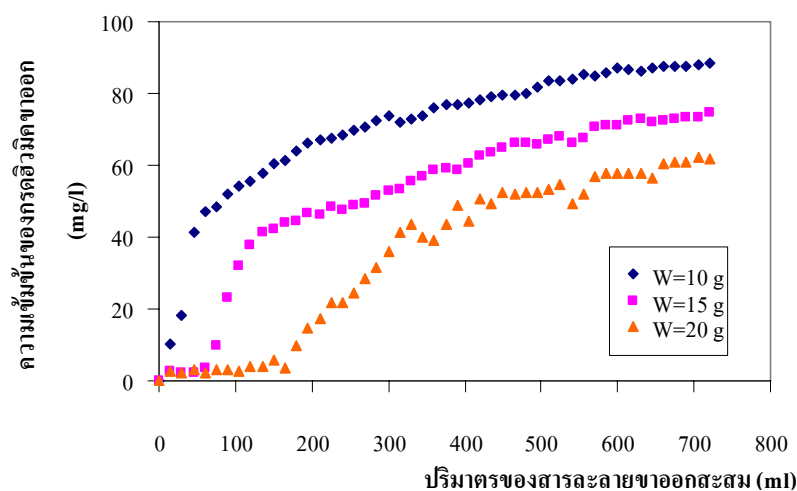
รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ขนาดต่าง ๆ เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $W = 15 \text{ g}$

ตารางที่ 4.6 ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ขนาดต่าง ๆ ในระบบฟลูอิดไคซ์เบด เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $W = 15 \text{ g}$

ขนาดของแร่ดิน (mm)	ปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับ (q_0 : mg/g)
0.80	2.142
0.51	2.265
0.34	2.076

4.3.2 ผลของปริมาณของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิก

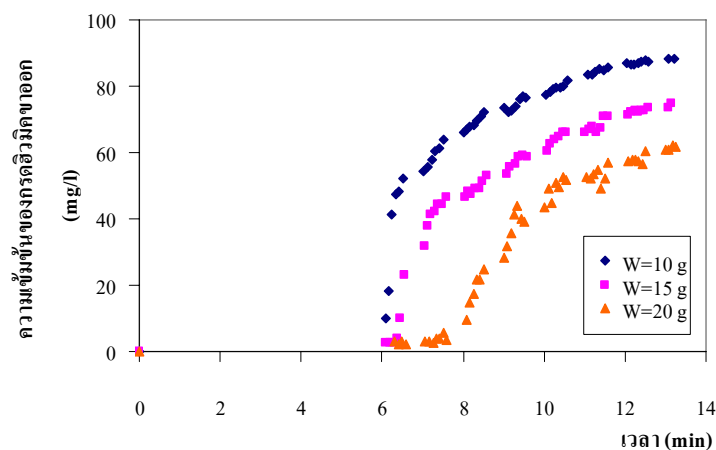
จากรูปที่ 4.12 แสดงรูปแบบการดูดซับกรดฮิวมิกที่ใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณต่าง ๆ เป็นตัวดูดซับ เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$ และรูปที่ 4.13 แสดงผลของปริมาณของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่อกราฟเบรคทฤษฎีของกรดฮิวมิกพบว่า เมื่อน้ำหนักเริ่มต้นของเบดเพิ่มขึ้น ปริมาตรและเวลาที่จุดเบรคทฤษฎีจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกเมื่อเกิดในระบบของเหลวจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักเริ่มต้นของเบดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และสามารถคำนวณปริมาณกรดฮิวมิกที่ถูกดูดซับออกจากสารละลายที่มีปริมาตร 720 ml ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งจะเห็นว่าความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่น้ำหนักเริ่มต้นของเบด $20 \text{ g} > 15 \text{ g} > 10 \text{ g}$



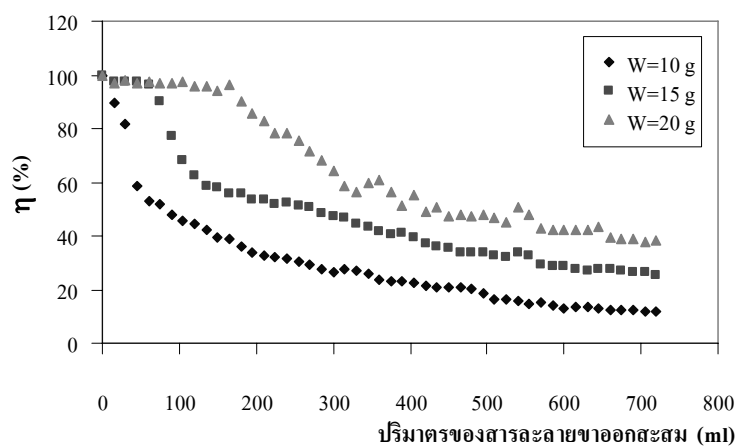
รูปที่ 4.12 รูปแบบการดูดซับกรดฮิวมิกโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่าง ๆ

เป็นตัวดูดซับในระบบฟลูอิดไคซ์เบด เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$

และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$



รูปที่ 4.13 ผลของปริมาณของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่อกราฟเบรคทรูเมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$



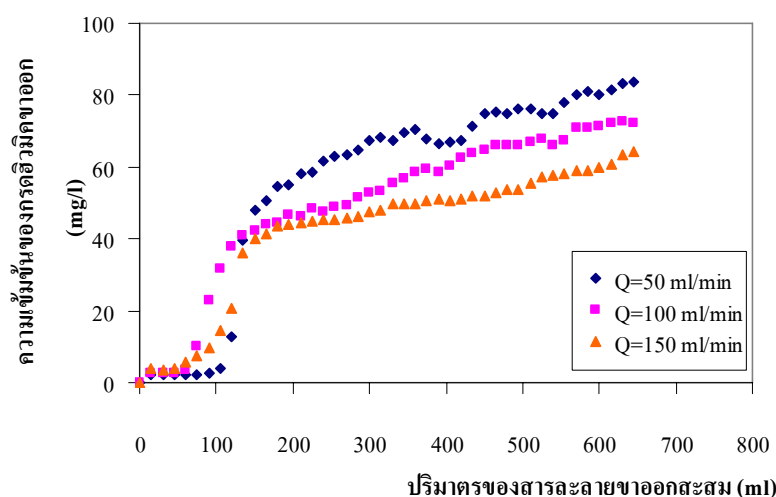
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่าง ๆ เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$

ตารางที่ 4.7 ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปริมาณต่าง ๆ ในระบบฟลูอิดไคซ์เบด เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$

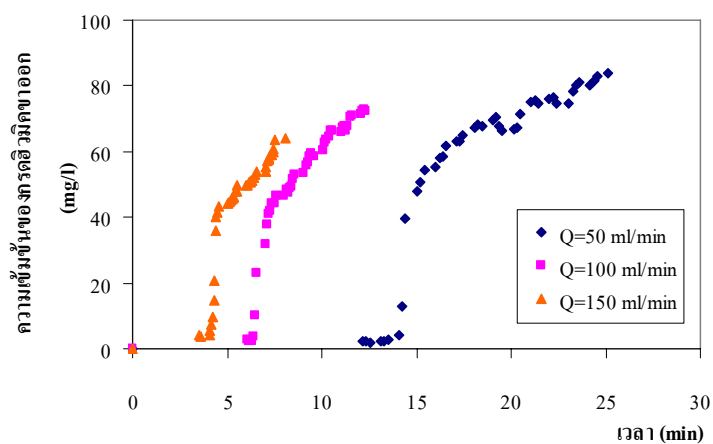
น้ำหนักเริ่มต้นของเบด (กรัม)	ปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับ (q_0 : mg/g)
10	2.065
15	2.265
20	2.315

4.3.3 ผลของอัตราการไหลของสารละลายกรดฮิวมิกต่อประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิก

สำหรับอัตราการไหลของสารละลายที่ใช้ในการทดลองนั้นความเร็วจะอยู่ในช่วงก่อนการเกิดฟลูอิดไอเซชัน (50 ml/min) และช่วงที่เกิดฟลูอิดไอเซชัน (100 และ 150 ml/min) แต่ไม่เกิดความเร็วสุดท้ายของการเกิดฟลูอิดไอเซชัน โดยรูปแบบการดูดซับกรดฮิวมิกที่อัตราการไหลของสารละลายต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.15 เมื่อ $C_0 = 100$ mg/l, $W = 15$ g และ $D_p = 0.51$ mm ส่วนผลของอัตราการไหลของสารละลายต่อกราฟเบรคทรูแสดงได้ดังรูปที่ 4.16 พบว่า ที่อัตราการไหลของสารละลายต่ำ ๆ เวลาที่สารละลายอยู่ภายในหลอดดูดซับจะมากกว่าที่อัตราการไหลของสารละลายสูง ๆ โดยประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกเมื่อคิดในระบบของเหลวที่อัตราการไหลของสารละลายต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าเมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากที่อัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่า $D_{ax,l}$ และ ค่า $D_{ax,p}$ ที่คำนวณไว้ในส่วนของฟลูอิดไอเซชันจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย นั่นหมายความว่าเมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น การผสมตามแนวแกนทั้งของของเหลวและของของแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลให้เกิดการดูดซับได้ดีขึ้น สำหรับความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของเรซินมอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราการไหลของสารละลายต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่าปริมาณกรดฮิวมิกที่ถูกดูดซับออกจากสารละลายที่มีปริมาตร 645 ml ที่อัตราการไหล 150 ml/min > 100 ml/min > 50 ml/min

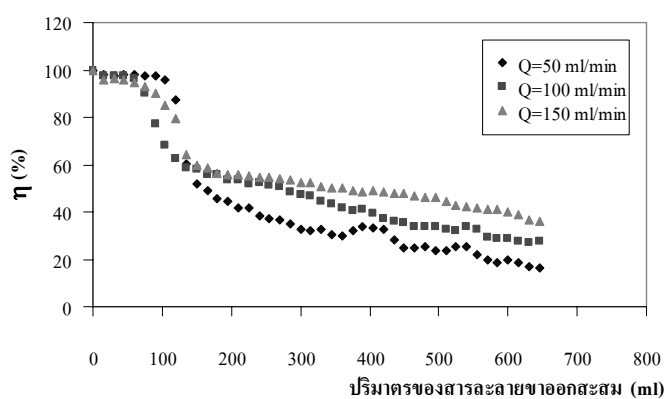


รูปที่ 4.15 รูปแบบการดูดซับกรดฮิวมิกที่อัตราการไหลของสารละลายต่าง ๆ ในระบบฟลูอิดไอเซชัน
เมื่อ $C_0 = 100$ mg/l, $W = 15$ g และ $D_p = 0.51$ mm



รูปที่ 4.16 ผลของอัตราการไหลของสารละลายต่อกราฟเบรคทรูเมื่อ $C_0 = 100$ mg/l,

$W = 15$ g และ $D_p = 0.51$ mm



รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของเรซินมอนต์มอริลไลไนต์ที่อัตราการไหล

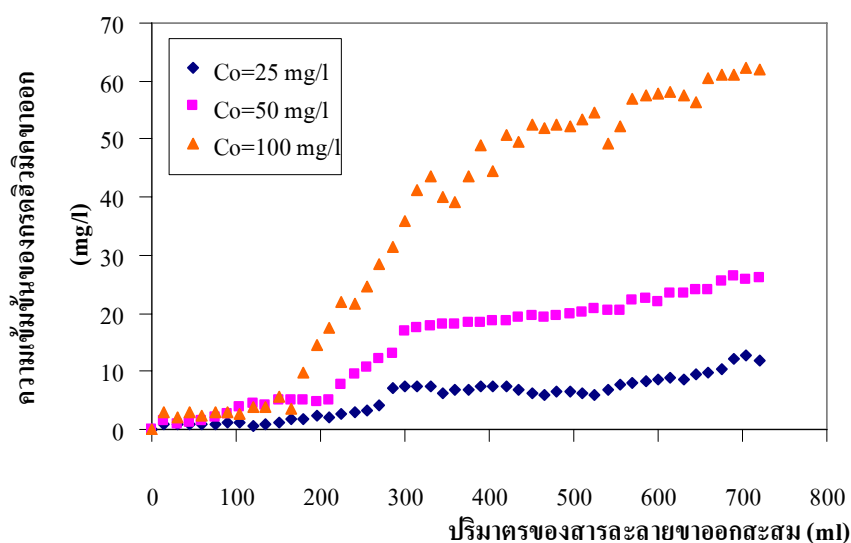
ของสารละลายต่าง ๆ เมื่อ $C_0 = 100$ mg/l, $W = 15$ g และ $D_p = 0.51$ mm

ตารางที่ 4.8 ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของเรซินมอนต์มอริลไลไนต์ที่อัตราการไหลของสารละลายต่าง ๆ ในระบบฟลูอิด์เบด เมื่อ $C_0 = 100$ mg/l, $W = 15$ g และ $D_p = 0.51$ mm

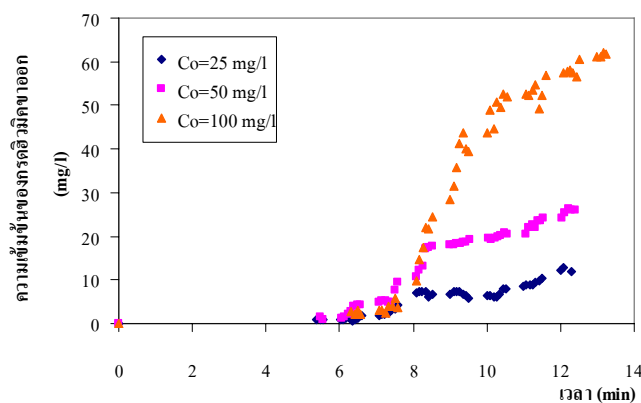
อัตราการไหลของสารละลาย (ml/min)	ปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับ (q_0 : mg/g)
50	1.873
100	2.132
150	2.444

4.3.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายกรดฮิวมิกต่อประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิก

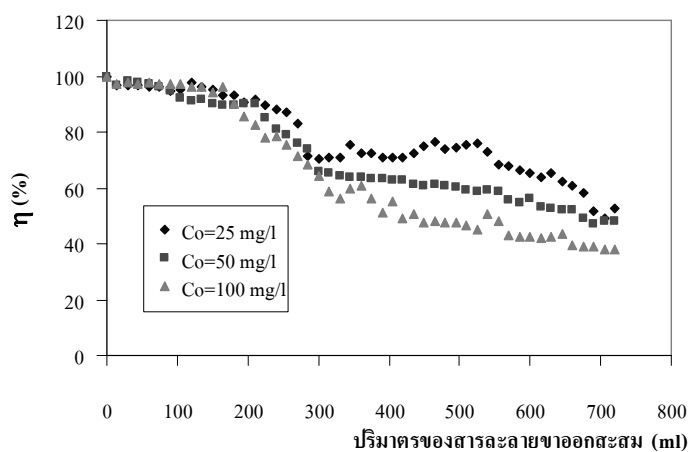
รูปที่ 4.18 แสดงรูปแบบการดูดซับกรดฮิวมิกที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ เมื่อ $Q = 100$ ml/min, $W = 20$ g และ $D_p = 0.51$ mm และผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่อกราฟเบรคทรูของกรดฮิวมิกแสดงได้ดังรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าปริมาตรและเวลาที่จุดเบรคทรูจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเพิ่มขึ้น โดยรูปที่ 4.20 จะแสดงประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกเมื่อเกิดในระบบของเหลวพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกจะลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของเรซินมอนต์มอริลโลไนต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงค่าดังกล่าวในตารางที่ 4.9 จะเห็นว่าปริมาณกรดฮิวมิกที่ถูกดูดซับออกจากสารละลายที่มีปริมาตร 720 ml ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/l > 50 mg/l > 25 mg/l



รูปที่ 4.18 รูปแบบการดูดซับกรดฮิวมิกที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ในระบบฟลูอิดไคซ์เบด
เมื่อ $Q = 100$ ml/min, $W = 20$ g และ $D_p = 0.51$ mm



รูปที่ 4.19 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่อกราฟเบรคทรูเมื่อ $Q = 100$ ml/min, $W = 20$ g และ $D_p = 0.51$ mm



รูปที่ 4.20 ประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิคของเรซินมอนต์มอริลไลไนต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่าง ๆ เมื่อ $Q = 100$ ml/min, $W = 20$ g และ $D_p = 0.51$ mm

ตารางที่ 4.9 ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิคของเรซินมอนต์มอริลไลไนต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่าง ๆ ในระบบฟลูอิด์เบด เมื่อ $Q = 100$ ml/min, $W = 20$ g และ $D_p = 0.51$ mm

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย(mg/l)	ปริมาณกรดฮิวมิคบนตัวดูดซับ (q_0 : mg/g)
25	0.698
50	1.269
100	2.315

4.4 ผลการเปรียบเทียบการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบกะและในระบบฟลูอิด์เบด

ผลการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบกะและในระบบฟลูอิด์เบดที่สภาวะ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $W = 15 \text{ g}$ เมื่อขนาดของแร่ดินต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.10 จะเห็นว่าปริมาณกรดฮิวมิกที่ถูกดูดซับออกจากสารละลายในระบบกะมีค่ามากกว่าในระบบฟลูอิด์เบด เนื่องจากในระบบฟลูอิด์เบดมีการเคลื่อนที่ของสารละลายผ่านตัวดูดซับทำให้เวลาที่สารละลายสัมผัสกับตัวดูดซับน้อยกว่าในระบบกะ จึงเป็นผลให้ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบกะมากกว่าในระบบฟลูอิด์เบด

ตารางที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบกะและในระบบฟลูอิด์เบด

ขนาดของแร่ดิน (mm)	ปริมาณกรดฮิวมิกบนตัวดูดซับ (mg/g)		% utilization
	ระบบกะ	ระบบฟลูอิด์	
0.80	40.98	2.142	5.226
0.51	54.05	2.265	4.191
0.34	53.76	2.076	3.862

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์สามารถเกิดการฟลูอิดิซ์ในของเหลวได้

5.1.2 ค่า U_{mf} ที่ได้จากการทดลองไม่ขึ้นกับขนาดและปริมาณของแร่ดินและจะมีค่าน้อยกว่าค่า U_{mf} ที่ได้จากการคำนวณ เนื่องจากมีแรงภายนอกมากระทำกับอนุภาคขณะเกิดการฟลูอิดิซ์ทำให้อนุภาคภายในห่อฟลูอิดิซ์เบดมีขนาดเล็กลง เป็นผลให้ค่า U_{mf} ที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยลงด้วย

5.1.3 เมื่อขนาดอนุภาคของแร่ดินใหญ่ขึ้นส่งผลให้ค่าเศษส่วนช่องว่างของเบดมีค่ามากขึ้น ทำให้ค่า U_{mf} ที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากขึ้นด้วย ส่วนที่ขนาดของแร่ดินเท่ากัน ค่าเศษส่วนช่องว่างของเบดจะลดลงเมื่อน้ำหนักเริ่มต้นของเบดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคมากขึ้น

5.1.4 สำหรับการขยายตัวของเบดในการทดลองมีผลสอดคล้องกับความสัมพันธ์ของ Richardson-Zaki ซึ่งสามารถหาค่าความเร็วสุดท้ายของการเกิดฟลูอิดิเซชัน (U_f) และตัวชี้วัดการขยายตัวของเบด (n) จากการทดลองได้

5.1.5 สำหรับตัวเลขโบเดินสไตน์ ค่าสัมประสิทธิ์การผสมตามแนวแกนของของเหลวและของแข็งในเบดที่มีการขยายตัวจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการทดลอง

5.1.6 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์สามารถนำมาเป็นตัวดูดซับกรดฮิวมิกออกจากน้ำได้

5.1.7 สำหรับผลการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบกะพบว่า มีรูปแบบการดูดซับเป็นแบบ Langmuir Isotherm และความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบกะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของแร่ดิน

5.1.8 ส่วนผลการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบฟลูอิดิซ์เบดพบว่า ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของแร่ดิน อัตราการไหลของสารละลาย และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย แต่ไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของแร่ดิน

5.1.9 เมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบกะกับระบบฟลูอิดิซ์เบดพบว่าในระบบกะแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มีความสามารถในการดูดซับมากกว่าในระบบฟลูอิดิซ์เบด เนื่องจากในระบบฟลูอิดิซ์เบดมีการ

เคลื่อนตัวของสารละลาย ทำให้เวลาที่เรตินสัมผัสกับสารละลายน้อยกว่าในระบบกะ เป็นผลให้ความสามารถในการดูดซับในระบบฟลูอิดซ์เบคน้อยกว่าในระบบกะ

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยต่อไป

5.2.1 ศึกษาความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ ของเรตินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบฟลูอิดซ์เบค

5.2.2 จัดทำอุปกรณ์ใหม่ให้ปรับค่าในการทดลองในช่วงกว้าง ๆ ได้ เพื่อทำการศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ได้มากขึ้น เช่น ทำการสร้างห่อฟลูอิดซ์ให้มีความสูงมากขึ้นเพื่อรองรับปริมาณเรตินและอัตราการไหลของสารละลายได้มากขึ้น หรือทำการติดตั้งระบบไหลย้อนกลับของสารละลายขาออกให้กลับเข้ามาผ่านห่อดูดซับเพื่อทำการดูดซับอีกครั้ง

5.2.3 ศึกษาการจัดทำและติดตั้งอุปกรณ์ในการดูดซับสารของเรตินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบฟลูอิดซ์เบคให้สามารถใช้งานได้อีกต่อเนื่อง เพื่อพัฒนาไปใช้ในอุตสาหกรรมจริงได้

เอกสารอ้างอิง

- คลอรีนในน้ำประปาและการเกิดสารไตรฮาโลมีเทน. (ม.ป.ป). สารพันคำตอบเรื่องสิ่งแวดล้อม [ออนไลน์]. ได้จาก : <http://nutrition.anamai.moph.go.th/1675/new1675/html/nmenu09/nm0915.html>
- จักรกฤษ อัมพูช และ รัตนวรรณ (วิบูลย์สวัสดิ์) เกียรติโกมล. (2548). การกำจัดสีข้อมจากกระบวนการย้อมผ้าแบบอุตสาหกรรมในครัวเรือนโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบหอดูดซับ. ใน การประชุมเสนอผลงานระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จักรกฤษณ์ อัมพูช. (2548). การกำจัดสีข้อมในน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมผ้าในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือนโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- จุมพล คีนดัก, ชงชัย พึ่งรัมย์ และ พิกพ วสุวานิช. (2521). ดิน (Clays). เอกสารเศรษฐธรณีวิทยา เล่มที่ 19. กรุงเทพฯ : กองเศรษฐธรณี กรมทรัพยากรธรณี. อ้างถึงใน ปิยะมากรณ์ จารูวงศ์. (2545). การดูดซับสารอินทรีย์ด้วยแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ชัยยศ ตั้งสติย์กุลชัย. (2549). รายงานการวิจัยเรื่อง การเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลและการวัดสมบัติโครงสร้างรูพรุน. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ทวีลักษณ์ อ้นองอาจ และ กฤตย์ สมสาร. (2548). กรดฮิวมิก (Humic Acid) [ออนไลน์]. ได้จาก : www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/cp_1_2548_humic_acid.pdf
- นิสากร ปานประสงค์. (2546). ซีโอไลต์เคมีที่ไม่ธรรมชาติ. สารคดีวิทยาศาสตร์ # 12. ฉบับที่ 192 กันยายน 2546 [ออนไลน์]. ได้จาก : <http://update.se-ed.com/192/zeolite.htm>
- ปิยะมากรณ์ จารูวงศ์. (2545). การดูดซับสารอินทรีย์ด้วยแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- ปิยมภรณ์ จารุงศ์ และ รัตนวรรณ วิบูลย์สวัสดิ์. (2547). การดูดซับสารอินทรีย์จากน้ำโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี 11 (1) : 39-51.
- ปิยรัตน์ สารวงษ์. (2545). การกำจัดกรดไขมันโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยไคโตรแซนและเบนโทไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ไพรินทร์ ชูโชติถาวร (2532). ฟลูอิดิเซชันเบด (Fluidization Apparatus). ใน ชิงะฟูมิ ฟุจิตะ. คู่มืออุปกรณ์การผลิตในอุตสาหกรรมเคมี (หน้า 86-98). กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ศ.ส.ท. (สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)).
- รัตนวรรณ วิบูลย์สวัสดิ์. (2545). รายงานการวิจัยเรื่อง การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite Clay). สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Al Dibouni, M.R., and Garsid, J. (1979). **Trans. I. Chem. E.** 57 : 94. Quoted in Thömmes, J. (1997). Fluidized bed adsorption as a primary recovery step in protein purification. **Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology** 58 : 185-230.
- Amarasiriwardena, D., Siripinyanond, A., and Barnes, R.M. (2000). Flow field flow fraction-inductively couple plasma mass spectrometry (flow-FFF-ICP-MS) : A versatile approach for characterization of trace metals complexed to soil derive humic acids. In Ghabbour, E.A., and Davies, G (eds). **Humic substances : Versatile components of plant soils and water** (pp. 215–226). Cornwall, England : MGP.
- Anspach, F.B., Curbelo, D., Hartmann, R., Garke, G., and Deckwer, W-D. (1999). Expanded bed chromatography in primary protein purification [64 paragraphs]. **Journal of Chromatography A** [On-line serial] 1107. Available : www.elsevier.com/locate/chroma
- Chae, Y.R., Yoon, Y.J., and Ryu, K.G. (2004). Development of modified Stokes expression to model the behavior of expanded beds containing polydisperse resins for protein adsorption. **Korean J. Chem. Eng.** 21 (5) : 999-1002.
- Chamley, H. (1989). **Clay sedimentology**. Berlin : Springer-Verlag.
- Chopard, M., Welsh, A., Ng, J., Ottenberg, M., and Holbrook, R. (2003). **Packed beds and the Ergun equation : The relationship between fluid flow and pressure drop** [On-line]. Available : rothfus.chem.cmu.edu/tlab/pbeds/projects/t5_s03/t5_s03.pdf

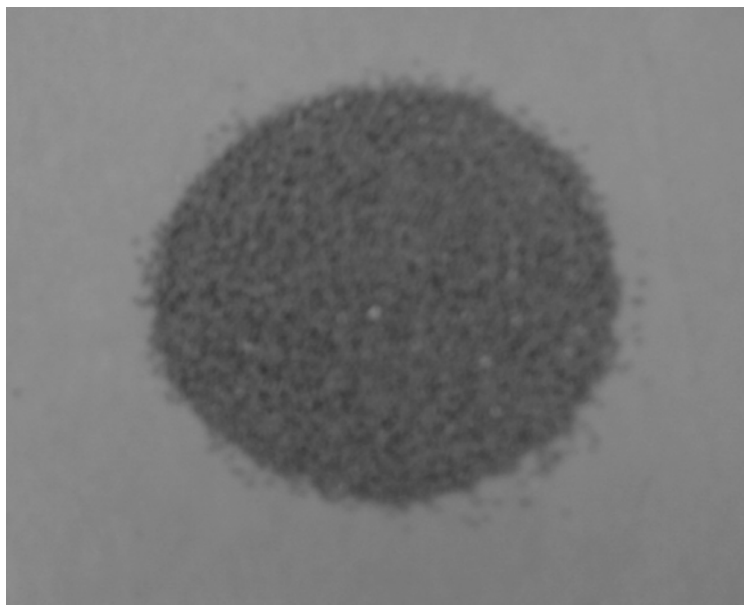
- Christopher, R. and Daniel, A. (1992). **Surface water treatment for communities in developing country**. University of North Carolina at Chapel Hill. อ้างถึงใน ปีชรัตน์ สารวงศ์. (2545). การกำจัดกรดไขมันโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยไคโตรแซนและเบนโทไนด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- Davies, G. and Ghabbour, E.A. (1999). Understanding life after death. **Chemistry & Industry, Society of Chemical Industry** 11 : 426-430.
- Deer, Howie, and Zussman. (1992). **An introduction to the rock forming minerals** (2nd ed., pp. 353-381). Longman. อ้างถึงใน สรินทร ลิ้มปนาท. (2545). โครงสร้างและชนิดของแร่ดินเหนียว [ออนไลน์]. ได้จาก : <http://www.material.chula.ac.th/Radio45/April/radio4-2.htm>
- Do, D.D. (1998). **Adsorption analysis : Equilibria and kinetics**. London : Imperial College Press.
- Flucrumhealth. (n.d.). **Description of humet®-R (humifulvate and multiminerale) product, toxicological and clinical studies** [On-line]. Available : <http://www.fulcrumhealth.co.uk/hmfsci.htm>
- Gupta, C.K. and Sathiyamoorthy, D. (1999). **Fluid bed technology in materials processing**. Florida : CRC Press.
- Harriott, P. (2003). **Chemical reactor design**. New York : Marcel Dekker.
- Joshi, J.B. (1983). **Chem. Eng. Res. Des.** 61. Quoted in Anspach, F.B., Curbelo, D., Hartmann, R., Garke, G., and Deckwer, W-D. (1999). Expanded bed chromatography in primary protein purification [64 paragraphs]. **Journal of Chromatography A** [On-line serial] 1107. Available : www.elsevier.com/locate/chroma
- Junpirom, S. (2006). **Activated carbon from Longan seed : Its activation model and adsorption of water vapor and benzene**. A Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Chemical Engineering, Suranaree University of Technology.
- Kang, Y., Nah, J.B., and Min, B.T. (1990). **Chem. Eng. Comm.** 97 : 197. Quoted in Thömmes, J. (1997). Fluidized bed adsorption as a primary recovery step in protein purification. **Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology** 58 : 185-230.
- Lee, Y.M., Kwon, O-Y., and Ryu, K.G. (2007). General applications of modified Stokes expression for modeling and scale-up of expanded beds. **Korean J. Chem. Eng.** 24 (2) : 261-264.

- Lin, D-Q., Miao, Z-J., and Yao, S-J. (2006). Expansion and hydrodynamic properties of cellulose-stainless steel power composite matrix for expanded bed adsorption [27 paragraphs]. **Journal of Chromatography A** [On-line serial] 1107. Available : www.elsevier.com/locate/chroma
- Martin, B.L.A., Kolar, Z., and Wesselingh, J.A. (1981). **Trans. I. Chem. E.** 59 : 100. Quoted in Thömmes, J. (1997). Fluidized bed adsorption as a primary recovery step in protein purification. **Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology** 58 : 185-230.
- McCabe, W.L., Smith, J.C., and Harriott, P. (2001). **Unit operations of chemical engineering.** New York : McGraw-Hill Companies.
- McKay, G. (1996). **Use of adsorbent for the removal of pollutants from wastewater.** New York : CRC Press Inc. อ้างถึงใน ปิยะมากรณ์ จารุงศ์. (2545). การดูดซับสารอินทรีย์ด้วยแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- OMNI Laboratories, Inc. (1990). **Montmorillonite image** [On-line]. Available : webmineral.com/data/Montmorillonite.shtml
- Riba, J.P., Rautic, R., Couderc, J.C. (1978). **Can. J. Chem. E.** 56 : 26. Quoted in Thömmes, J. (1997). Fluidized bed adsorption as a primary recovery step in protein purification. **Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology** 58 : 185-230.
- Richardson, J.F. and Zaki, W.N. (1954). **Trans. Inst. Chem. Eng.** 32 : 35. Quoted in Anspach, F.B., Curbelo, D., Hartmann, R., Garke, G., and Deckwer, W-D. (1999). Expanded bed chromatography in primary protein purification [64 paragraphs]. **Journal of Chromatography A** [On-line serial] 1107. Available : www.elsevier.com/locate/chroma
- Rouquerol F., Rouquerol J., and Sing. (1999). **Adsorption by powders and porous solids.** California : Academic Press.
- Schnitzer, M. and Khan, S.U. (1972). **Humic substances in the environment.** New York : Marcel Dekker.
- Seader, J.D. (1998). **Separation process principles.** New York : John Wiley and Sons.
- Stevenson. (1982). **Properties of humic substances** [On-line]. Available : <http://www.ar.wroc.pl/~weber/kwasy2.htm>

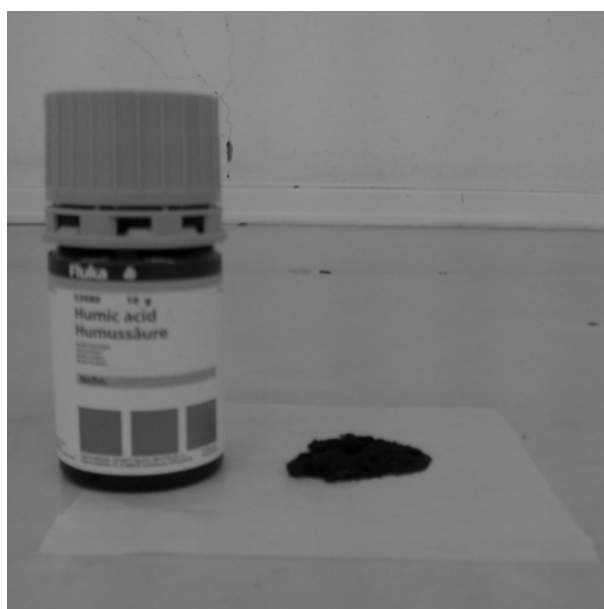
- Supamathanon, N. (2004). **Separation, characterization and modification of Montmorillonite on clay from Nakhonratchasima province, Thailand**. A Thesis for the Degree of Master of Science in Chemistry, Suranaree University of Technology.
- Tang, W.T., and Fan, L-S. (1990). **Chem. Eng. Sci.** 45 : 543. Quoted in Thömmes, J. (1997). Fluidized bed adsorption as a primary recovery step in protein purification. **Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology** 58 : 185-230.
- Tien, C. (1994). **Adsorption calculations and modeling**. Newton : Butterworth-Heinemann.
- Thomas, W.J., and Crittenden, B. (1998). **Adsorption technology & design**. Oxford : Butterworth-Heinemann.
- Thömmes, J. (1997). Fluidized bed adsorption as a primary recovery step in protein purification. **Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology** 58 : 185-230.
- Thomson, W.J. (2000). **Introduction to transport phenomena**. New Jersey : Prentice-Hall.
- Van der Meer, A.P., Blanchard C.M.R.J.P., and Wesselingh, J.A. (1984). **Chem. Eng. Res. Des.** 62 : 214. Quoted in Thömmes, J. (1997). Fluidized bed adsorption as a primary recovery step in protein purification. **Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology** 58 : 185-230.
- Velce, B. (1992). **Introduction to clay minerals**. London : Chapman & Hall.
- Yutani, N., Ototake, N., Too, J.R., and fan, L.T. (1982). **Chem. Eng. Sci.** 37 : 1079. Quoted in Thömmes, J. (1997). Fluidized bed adsorption as a primary recovery step in protein purification. **Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology** 58 : 185-230.

ภาคผนวก ก

สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง



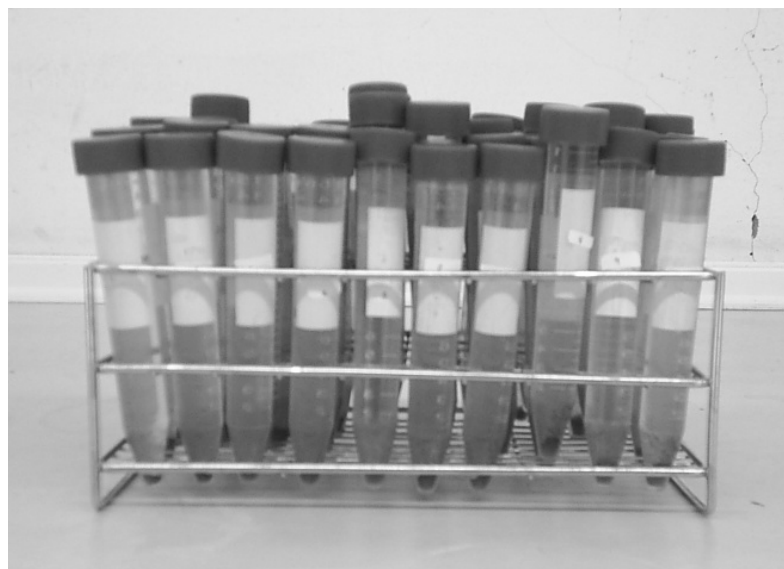
รูปที่ ก.1 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จากบริษัท Ashapura Volclay จำกัด



รูปที่ ก.2 กรดฮิวมิกจากบริษัท Fluka จำกัด



รูปที่ ก.3 น้ำดื่มตรามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (น้ำดื่ม มหส)



รูปที่ ก.4 หลอดเก็บตัวอย่าง



รูปที่ ก.5 เครื่องเขย่าแบบแนวราบ



รูปที่ ก.6 เครื่องปั่นเหวี่ยงแยก



รูปที่ ก.7 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง Spectronic 20



รูปที่ ก.8 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย



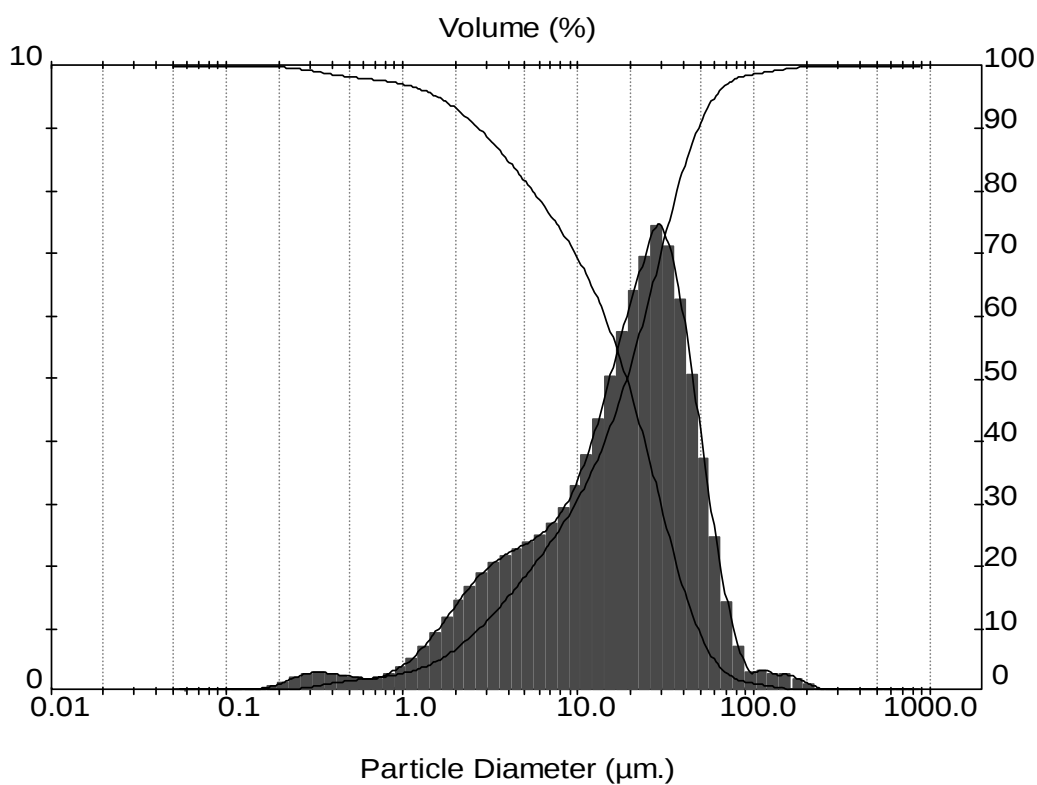
รูปที่ ก.9 เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำดื่ม มทส

ภาคผนวก ข

สมบัติทางกายภาพของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

สมบัติทางกายภาพของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

ในที่นี้จะแสดงผลของขนาดที่แท้จริงของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ได้จากเครื่อง Mastersizer D Ver. 2.15 Serial Number 33544-156 ของ Malvern Instruments Ltd. เมื่อนำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการคัดขนาดทั้ง 3 ขนาดคือ 0.8, 0.51 และ 0.34 mm ไปวิเคราะห์หาขนาดที่แท้จริงพบว่า แร่ดินทั้ง 3 ขนาดมีขนาดอนุภาคที่แท้จริงประมาณ 23 μm ซึ่งสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ได้ดังรูปและตารางที่ ข.1 ข.2 และ ข.3 ตามลำดับ

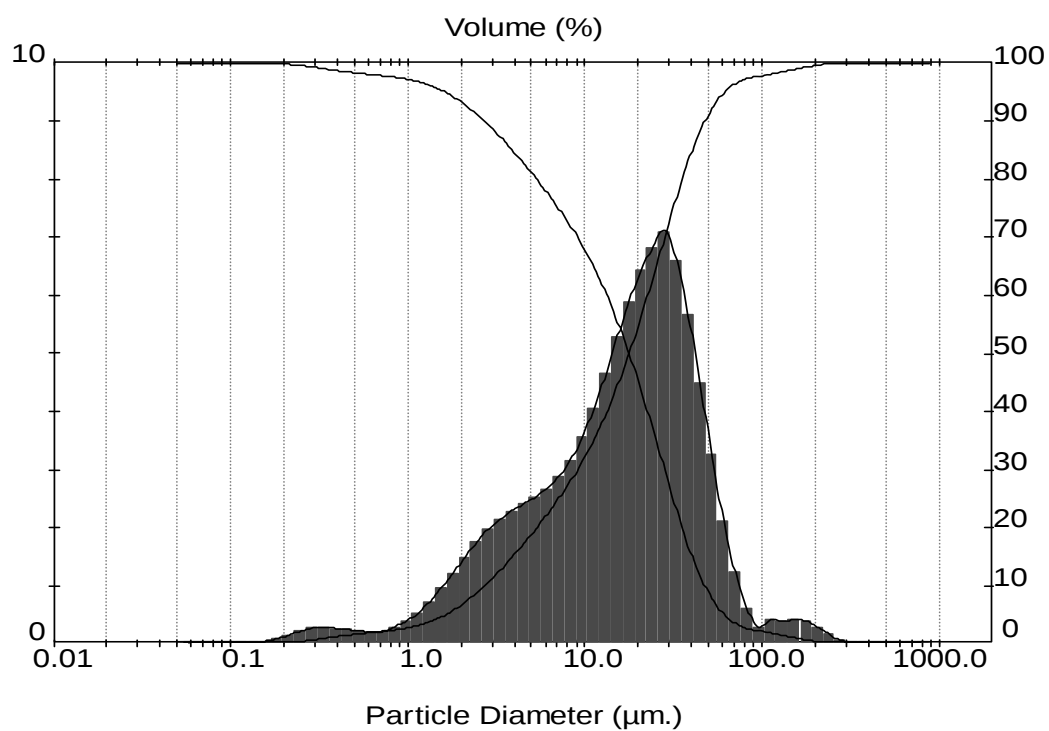


รูปที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดที่แท้จริงของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์
เมื่อนำขนาดแร่ดินเริ่มต้นเท่ากับ 0.8 mm

ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดที่แท้จริงของเรซินมอนต์มอริลไลน์เมื่อขนาดเรซินเริ่มต้นเท่ากับ 0.8 mm

Result: Histogram Table

ID: pt 0701/50		Run No: 8		Measured: 4/6/107 9:53PM			
File: PRASIT		Rec. No: 79		Analysed: 4/6/107 9:53PM			
Path: C:\SIZERS\DATA\		Source: Analysed					
Range: 300RF mm		Beam: 2.40 mm	Sampler: MS17		Obs': 15.0 %		
Presentation: 3OHD		Analy sis: Poly disperse		Residual: 0.522 %			
Modifications: None							
Conc. = 0.0154 %Vol		Density = 1.000 g/cm^3		S.S.A.= 1.1217 m^2/g			
Distribution: Volume		D[4, 3] = 23.73 um		D[3, 2] = 5.35 um			
D(v , 0.1) = 2.73 um		D(v , 0.5) = 18.92 um		D(v , 0.9) = 48.19 um			
Span = 2.403E+00		Uniformity = 8.167E-01					
Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %
0.055	0.00	0.635	2.10	7.31	24.66	84.15	98.19
0.061	0.00	0.700	2.23	8.06	26.45	92.79	98.49
0.067	0.00	0.772	2.37	8.89	28.34	102.3	98.67
0.074	0.00	0.851	2.55	9.80	30.38	112.8	98.89
0.082	0.00	0.938	2.76	10.81	32.60	124.4	99.11
0.090	0.00	1.03	3.02	11.91	35.01	137.2	99.28
0.099	0.00	1.14	3.33	13.14	37.67	151.3	99.46
0.109	0.01	1.26	3.71	14.49	40.59	166.8	99.63
0.121	0.02	1.39	4.17	15.97	43.79	183.9	99.77
0.133	0.03	1.53	4.71	17.62	47.28	202.8	99.87
0.147	0.04	1.69	5.36	19.42	51.05	223.6	99.94
0.162	0.07	1.86	6.10	21.42	55.09	246.6	99.98
0.178	0.12	2.05	6.94	23.62	59.36	271.9	99.99
0.196	0.18	2.26	7.89	26.04	63.87	299.8	100.00
0.217	0.27	2.49	8.95	28.72	68.62	330.6	100.00
0.239	0.39	2.75	10.09	31.66	73.36	364.6	100.00
0.263	0.54	3.03	11.31	34.92	77.89	402.0	100.00
0.290	0.72	3.34	12.60	38.50	82.09	443.3	100.00
0.320	0.92	3.69	13.95	42.45	85.87	488.8	100.00
0.353	1.12	4.07	15.34	46.81	89.13	539.0	100.00
0.389	1.31	4.48	16.78	51.62	91.85	594.3	100.00
0.429	1.49	4.94	18.26	56.92	94.02	655.4	100.00
0.473	1.66	5.45	19.78	62.76	95.67	722.7	100.00
0.522	1.82	6.01	21.35	69.21	96.86	796.9	100.00
0.576	1.97	6.63	22.97	76.32	97.67	878.7	100.00

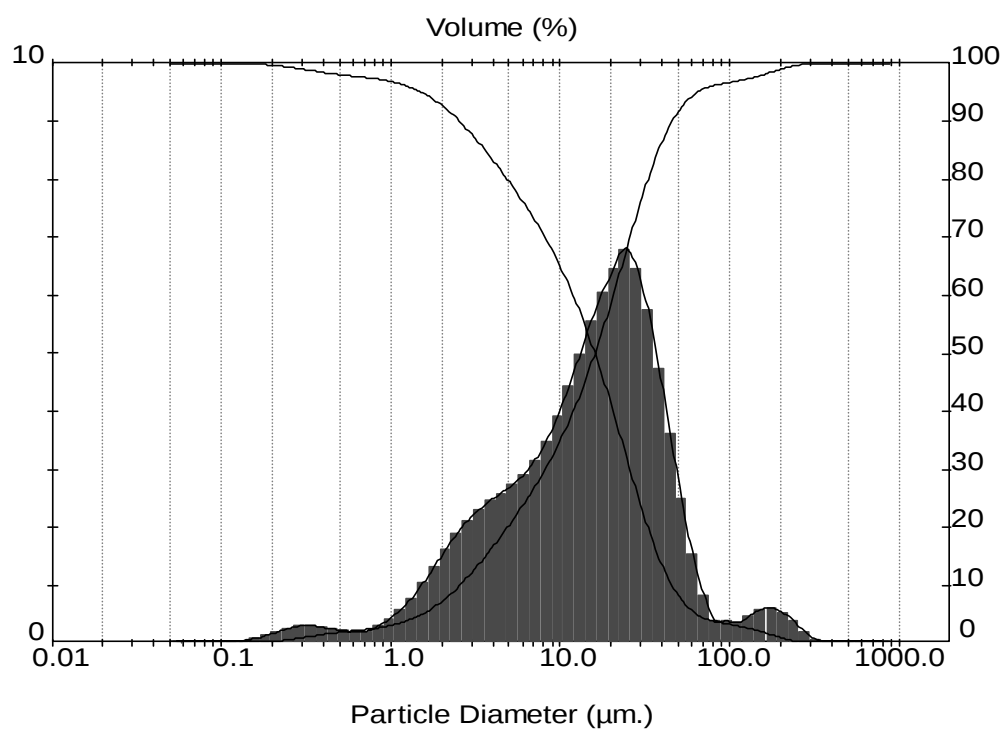


รูปที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดที่แท้จริงของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์
เมื่อขนาดแร่ดินเริ่มต้นเท่ากับ 0.51 mm

ตารางที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดที่แท้จริงของเรซินมอนต์มอริลไลไนต์เมื่อขนาดเรซินเริ่มต้นเท่ากับ 0.51 mm

Result: Histogram Table

ID: pt 0702/50		Run No: 11		Measured: 4/6/107 9:58PM			
File: PRASIT		Rec. No: 82		Analysed: 4/6/107 9:58PM			
Path: C:\SIZERS\DATA\		Source: Analysed					
Range: 300RF mm		Beam: 2.40 mm	Sampler: MS17		Obs': 12.5 %		
Presentation: 3OHD		Analy sis: Poly disperse		Residual: 0.382 %			
Modif ications: None							
Conc. = 0.0124 %Vol		Density = 1.000 g/cm^3		S.S.A.= 1.1299 m^2/g			
Distribution: Volume		D[4, 3] = 24.08 um		D[3, 2] = 5.31 um			
D(v, 0.1) = 2.71 um		D(v, 0.5) = 17.79 um		D(v, 0.9) = 47.70 um			
Span = 2.528E+00		Uniformity = 9.103E-01					
Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %
0.055	0.00	0.635	2.02	7.31	25.55	84.15	97.38
0.061	0.00	0.700	2.15	8.06	27.47	92.79	97.64
0.067	0.00	0.772	2.29	8.89	29.51	102.3	97.81
0.074	0.00	0.851	2.46	9.80	31.71	112.8	98.06
0.082	0.00	0.938	2.67	10.81	34.10	124.4	98.33
0.090	0.00	1.03	2.93	11.91	36.70	137.2	98.57
0.099	0.01	1.14	3.23	13.14	39.54	151.3	98.83
0.109	0.01	1.26	3.61	14.49	42.64	166.8	99.10
0.121	0.02	1.39	4.07	15.97	46.00	183.9	99.36
0.133	0.03	1.53	4.63	17.62	49.61	202.8	99.58
0.147	0.05	1.69	5.28	19.42	53.47	223.6	99.76
0.162	0.08	1.86	6.04	21.42	57.54	246.6	99.88
0.178	0.13	2.05	6.91	23.62	61.78	271.9	99.94
0.196	0.19	2.26	7.89	26.04	66.18	299.8	99.98
0.217	0.28	2.49	8.98	28.72	70.74	330.6	100.00
0.239	0.40	2.75	10.17	31.66	75.21	364.6	100.00
0.263	0.55	3.03	11.44	34.92	79.40	402.0	100.00
0.290	0.72	3.34	12.79	38.50	83.23	443.3	100.00
0.320	0.90	3.69	14.20	42.45	86.62	488.8	100.00
0.353	1.09	4.07	15.66	46.81	89.50	539.0	100.00
0.389	1.27	4.48	17.18	51.62	91.88	594.3	100.00
0.429	1.44	4.94	18.74	56.92	93.77	655.4	100.00
0.473	1.60	5.45	20.35	62.76	95.20	722.7	100.00
0.522	1.75	6.01	22.01	69.21	96.22	796.9	100.00
0.576	1.89	6.63	23.74	76.32	96.93	878.7	100.00



รูปที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดที่แท้จริงของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์
เมื่อขนาดแร่ดินเริ่มต้นเท่ากับ 0.34 mm

ตารางที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดที่แท้จริงของเรซินมอนต์มอริลไลไนต์เมื่อขนาดเรซินเริ่มต้นเท่ากับ 0.34 mm

Result: Histogram Table

ID: pt 0703/50	Run No: 18	Measured: 4/6/107 10:09PM
File: PRASIT	Rec. No: 89	Analy sed: 4/6/107 10:09PM
Path: C:\SIZERS\DATA\		Source: Analysed

Range: 300RF mm	Beam: 2.40 mm	Sampler: MS17	Obs': 14.7 %
Presentation: 3OHD	Analy sis: Poly disperse		Residual: 0.425 %
Modifications: None			

Conc. = 0.0138 %Vol	Density = 1.000 g/cm ³	S.S.A.= 1.2617 m ² /g
Distribution: Volume	D[4, 3] = 24.33 um	D[3, 2] = 4.76 um
D(v, 0.1) = 2.54 um	D(v, 0.5) = 16.04 um	D(v, 0.9) = 45.80 um
Span = 2.697E+00	Unif ormity = 1.076E+00	

Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %
0.055	0.00	0.635	2.30	7.31	27.67	84.15	96.26
0.061	0.00	0.700	2.42	8.06	29.78	92.79	96.50
0.067	0.00	0.772	2.56	8.89	32.04	102.3	96.75
0.074	0.00	0.851	2.73	9.80	34.47	112.8	96.98
0.082	0.01	0.938	2.96	10.81	37.10	124.4	97.22
0.090	0.01	1.03	3.23	11.91	39.94	137.2	97.52
0.099	0.02	1.14	3.56	13.14	43.01	151.3	97.88
0.109	0.03	1.26	3.96	14.49	46.32	166.8	98.26
0.121	0.05	1.39	4.46	15.97	49.85	183.9	98.65
0.133	0.07	1.53	5.06	17.62	53.60	202.8	99.03
0.147	0.11	1.69	5.76	19.42	57.53	223.6	99.35
0.162	0.17	1.86	6.58	21.42	61.63	246.6	99.61
0.178	0.23	2.05	7.52	23.62	65.91	271.9	99.80
0.196	0.33	2.26	8.58	26.04	70.27	299.8	99.92
0.217	0.45	2.49	9.75	28.72	74.49	330.6	99.98
0.239	0.59	2.75	11.03	31.66	78.46	364.6	100.00
0.263	0.76	3.03	12.39	34.92	82.11	402.0	100.00
0.290	0.95	3.34	13.84	38.50	85.36	443.3	100.00
0.320	1.15	3.69	15.35	42.45	88.16	488.8	100.00
0.353	1.35	4.07	16.92	46.81	90.48	539.0	100.00
0.389	1.53	4.48	18.55	51.62	92.34	594.3	100.00
0.429	1.71	4.94	20.23	56.92	93.76	655.4	100.00
0.473	1.87	5.45	21.98	62.76	94.80	722.7	100.00
0.522	2.03	6.01	23.78	69.21	95.52	796.9	100.00
0.576	2.17	6.63	25.68	76.32	95.98	878.7	100.00

ภาคผนวก ค

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ค.1 การฟลูอิดิซของเรตินมอนต์มอริลโลในต้นน้ำ

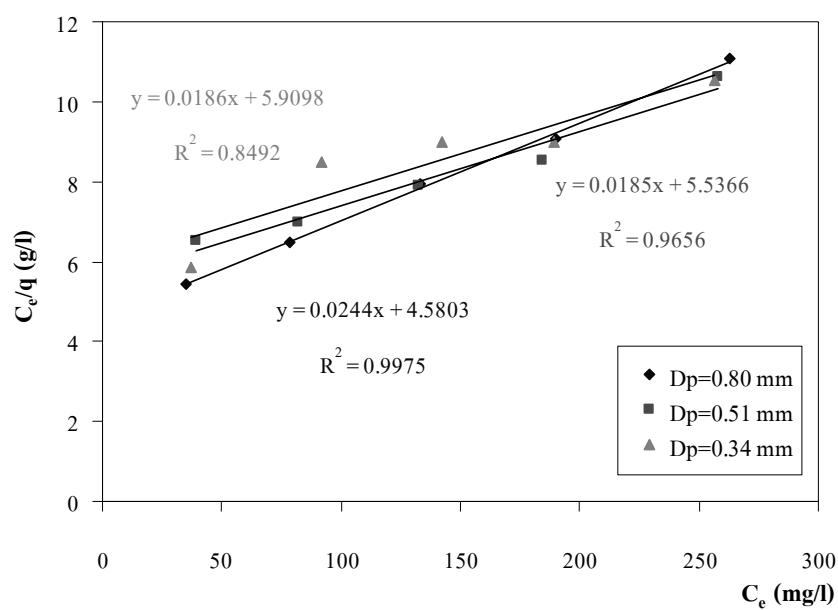
ตารางที่ ค.1 ค่าความสูงของเบดที่ความเร็วของน้ำต่าง ๆ เมื่อน้ำหนักเริ่มต้นของเบดคือ 10 กรัม 15 กรัม และ 20 กรัม

Q (ml/min)	U (m/s)	L (cm)								
		D _p = 0.80 mm			D _p = 0.51 mm			D _p = 0.34 mm		
		W = 10 g	W = 15 g	W = 20 g	W = 10 g	W = 15 g	W = 20 g	W = 10 g	W = 15 g	W = 20 g
0	0.00000	1.80	2.50	3.00	1.70	2.40	2.90	1.50	2.15	2.50
50	0.00066	2.10	2.80	3.30	1.90	2.50	3.10	1.60	2.30	2.80
100	0.00133	2.30	2.90	3.80	2.10	2.80	3.50	1.90	2.50	3.20
150	0.00199	2.50	3.00	4.50	2.50	3.30	4.00	2.40	3.00	3.80
200	0.00265	2.80	3.10	6.00	3.50	4.00	5.50	3.00	5.00	5.50
300	0.00398	4.00	4.00	9.00	6.00	7.00	9.00	6.00	9.00	8.00
400	0.00530	8.00	6.00	14.00	9.00	13.00	15.00	10.00	13.00	14.00
500	0.00663	12.00	9.00	20.00	13.00	16.00	21.00	15.00	17.00	22.00
600	0.00795	18.00	15.00	24.00	20.00	20.00	25.00	19.00	23.00	26.00

ค.2 การดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบกะ

ตารางที่ ค.2 ผลการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบกะเมื่อน้ำหนักของตัวดูดซับเท่ากับ 1 กรัม และปริมาตรของสารละลายกรดฮิวมิกเท่ากับ 100 ml และคำนวณค่าปริมาณกรดฮิวมิกสูงสุดบนตัวดูดซับได้จากรูปที่ ข

D_p (mm)	C_o (mg/l)	Absorbance	C_e (mg/l)	q (mg/g)	C_e/q (g/l)	$1/q_m$ (g/mg)	q_m (mg/g)
0.80	0	0.000	0.000	0.000	-	0.0244	40.984
	100	0.247	35.286	6.471	5.453		
	200	0.550	78.571	12.143	6.471		
	300	0.930	132.857	16.714	7.949		
	400	1.331	190.143	20.986	9.061		
	500	1.839	262.714	23.729	11.072		
0.51	0	0.000	0.000	0.000	-	0.0185	54.054
	100	0.276	39.429	6.057	6.509		
	200	0.576	82.286	11.771	6.990		
	300	0.928	132.571	16.743	7.918		
	400	1.288	184.000	21.600	8.519		
	500	1.804	257.714	24.229	10.637		
0.34	0	0.000	0.000	0.000	-	0.0186	53.76
	100	0.258	36.857	6.314	5.837		
	200	0.643	91.857	10.814	8.494		
	300	0.995	142.143	15.786	9.005		
	400	1.324	189.143	21.086	8.970		
	500	1.797	256.714	24.329	10.552		



รูปที่ ค ความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q กับ C_e จากสมการที่ (2.10) เพื่อหาค่าปริมาณกรดฮิวมิกสูงสุดบนพื้นผิวตัวดูดซับของการดูดซับแบบชั้นเดียว (q_m : mg/g)

ก.3 การดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบฟลูอิดไชเบด

ก.3.1 ผลของขนาดของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิก

ตารางที่ ก.3 ผลการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ขนาดต่าง ๆ เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $W = 15 \text{ g}$

No.	V (ml)	$D_p = 0.80 \text{ mm}$			$D_p = 0.51 \text{ mm}$			$D_p = 0.34 \text{ mm}$			$\eta (\%)$			Adsorption Capacity		
		Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	0.80 mm	0.51 mm	0.34 mm	0.80 mm	0.51 mm	0.34 mm
0	0	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	100.00	100.0	100.0	0.000	0.000	0.000
1	15	6.09	0.027	3.86	6.10	0.019	2.71	5.57	0.019	2.71	96.14	97.29	97.29	1.442	1.459	1.459
2	30	6.19	0.032	4.57	6.19	0.017	2.43	6.05	0.027	3.86	95.43	97.57	96.14	1.431	1.464	1.442
3	45	6.28	0.049	7.00	6.28	0.017	2.43	6.14	0.040	5.71	93.00	97.57	94.29	1.395	1.464	1.414
4	60	6.37	0.166	23.71	6.37	0.026	3.71	6.24	0.103	14.71	76.29	96.29	85.29	1.144	1.444	1.279
5	75	6.45	0.223	31.86	6.46	0.070	10.00	6.34	0.228	32.57	68.14	90.00	67.43	1.022	1.350	1.011
6	90	6.52	0.242	34.57	6.57	0.161	23.00	6.44	0.261	37.29	65.43	77.00	62.71	0.981	1.155	0.941
7	105	7.02	0.260	37.14	7.05	0.223	31.86	6.53	0.288	41.14	62.86	68.14	58.86	0.943	1.022	0.883
8	120	7.13	0.289	41.29	7.12	0.264	37.71	6.59	0.292	41.71	58.71	62.29	58.29	0.881	0.934	0.874
9	135	7.21	0.304	43.43	7.20	0.288	41.14	7.09	0.300	42.86	56.57	58.86	57.14	0.849	0.883	0.857
10	150	7.31	0.324	46.29	7.29	0.295	42.14	7.17	0.314	44.86	53.71	57.86	55.14	0.806	0.868	0.827

ตารางที่ ก.3 ผลการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ขนาดต่าง ๆ เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $W = 15 \text{ g}$ (ต่อ)

No.	V (ml)	D _p = 0.80 mm			D _p = 0.51 mm			D _p = 0.34 mm			η (%)			Adsorption Capacity		
		Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	0.80 mm	0.51 mm	0.34 mm	0.80 mm	0.51 mm	0.34 mm
11	165	7.41	0.325	46.43	7.39	0.309	44.14	7.26	0.332	47.43	53.57	55.86	52.57	0.804	0.838	0.789
12	180	7.50	0.326	46.57	7.49	0.311	44.43	7.36	0.334	47.71	53.43	55.57	52.29	0.801	0.834	0.784
13	195	7.57	0.327	46.71	7.57	0.326	46.57	7.45	0.346	49.43	53.29	53.43	50.57	0.799	0.801	0.759
14	210	8.07	0.330	47.14	8.04	0.325	46.43	7.54	0.350	50.00	52.86	53.57	50.00	0.793	0.804	0.750
15	225	8.16	0.339	48.43	8.13	0.338	48.29	8.03	0.356	50.86	51.57	51.71	49.14	0.774	0.776	0.737
16	240	8.27	0.342	48.86	8.21	0.332	47.43	8.12	0.366	52.29	51.14	52.57	47.71	0.767	0.789	0.716
17	255	8.40	0.354	50.57	8.30	0.343	49.00	8.21	0.372	53.14	49.43	51.00	46.86	0.741	0.765	0.703
18	270	8.47	0.366	52.29	8.39	0.344	49.14	8.30	0.380	54.29	47.71	50.86	45.71	0.716	0.763	0.686
19	285	8.55	0.375	53.57	8.49	0.360	51.43	8.39	0.383	54.71	46.43	48.57	45.29	0.696	0.729	0.679
20	300	9.06	0.382	54.57	8.58	0.370	52.86	8.49	0.403	57.57	45.43	47.14	42.43	0.681	0.707	0.636
21	315	9.15	0.393	56.14	9.07	0.373	53.29	8.57	0.419	59.86	43.86	46.71	40.14	0.658	0.701	0.602
22	330	9.23	0.393	56.14	9.17	0.389	55.57	9.06	0.413	59.00	43.86	44.43	41.00	0.658	0.666	0.615
23	345	9.32	0.403	57.57	9.28	0.397	56.71	9.16	0.425	60.71	42.43	43.29	39.29	0.636	0.649	0.589
24	360	9.43	0.396	56.57	9.38	0.410	58.57	9.24	0.418	59.71	43.43	41.43	40.29	0.651	0.621	0.604

ตารางที่ ก.3 ผลการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ขนาดต่าง ๆ เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $W = 15 \text{ g}$ (ต่อ)

No.	V (ml)	$D_p = 0.80 \text{ mm}$			$D_p = 0.51 \text{ mm}$			$D_p = 0.34 \text{ mm}$			$\eta \text{ (%)}$			Adsorption Capacity		
		Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	0.80 mm	0.51 mm	0.34 mm	0.80 mm	0.51 mm	0.34 mm
25	375	9.52	0.413	59.00	9.47	0.415	59.29	9.33	0.419	59.86	41.00	40.71	40.14	0.615	0.611	0.602
26	390	10.01	0.405	57.86	9.57	0.411	58.71	9.42	0.431	61.57	42.14	41.29	38.43	0.632	0.619	0.576
27	405	10.08	0.421	60.14	10.07	0.423	60.43	9.51	0.448	64.00	39.86	39.57	36.00	0.598	0.594	0.540
28	420	10.18	0.430	61.43	10.17	0.438	62.57	10.00	0.462	66.00	38.57	37.43	34.00	0.579	0.561	0.510
29	435	10.28	0.443	63.29	10.27	0.446	63.71	10.11	0.462	66.00	36.71	36.29	34.00	0.551	0.544	0.510
30	450	10.37	0.465	66.43	10.37	0.453	64.71	10.20	0.467	66.71	33.57	35.29	33.29	0.504	0.529	0.499
31	465	10.47	0.463	66.14	10.46	0.464	66.29	10.30	0.474	67.71	33.86	33.71	32.29	0.508	0.506	0.484
32	480	10.57	0.463	66.14	10.54	0.464	66.29	10.40	0.475	67.86	33.86	33.71	32.14	0.508	0.506	0.482
33	495	11.06	0.462	66.00	11.02	0.462	66.00	10.48	0.485	69.29	34.00	34.00	30.71	0.510	0.510	0.461
34	510	11.17	0.475	67.86	11.11	0.470	67.14	10.56	0.485	69.29	32.14	32.86	30.71	0.482	0.493	0.461
35	525	11.26	0.482	68.86	11.20	0.475	67.86	11.04	0.486	69.43	31.14	32.14	30.57	0.467	0.482	0.459
36	540	11.37	0.478	68.29	11.29	0.463	66.14	11.14	0.492	70.29	31.71	33.86	29.71	0.476	0.508	0.446
37	555	11.47	0.500	71.43	11.39	0.473	67.57	11.23	0.496	70.86	28.57	32.43	29.14	0.429	0.486	0.437
38	570	11.55	0.505	72.14	11.48	0.495	70.71	11.33	0.505	72.14	27.86	29.29	27.86	0.418	0.439	0.418

ตารางที่ ๓.3 ผลการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ขนาดต่าง ๆ เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $W = 15 \text{ g}$ (ต่อ)

No.	V (ml)	$D_p = 0.80 \text{ mm}$			$D_p = 0.51 \text{ mm}$			$D_p = 0.34 \text{ mm}$			$\eta (\%)$			Adsorption Capacity		
		Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	0.80 mm	0.51 mm	0.34 mm	0.80 mm	0.51 mm	0.34 mm
39	585	12.06	0.504	72.00	11.58	0.497	71.00	11.41	0.512	73.14	28.00	29.00	26.86	0.420	0.435	0.403
40	600	12.17	0.510	72.86	12.08	0.499	71.29	11.49	0.522	74.57	27.14	28.71	25.43	0.407	0.431	0.381
41	615	12.25	0.513	73.29	12.16	0.506	72.29	11.58	0.525	75.00	26.71	27.71	25.00	0.401	0.416	0.375
42	630	12.33	0.521	74.43	12.24	0.509	72.71	12.07	0.521	74.43	25.57	27.29	25.57	0.384	0.409	0.384
43	645	12.42	0.528	75.43	12.32	0.505	72.14	12.17	0.525	75.00	24.57	27.86	25.00	0.369	0.418	0.375
44	660	12.53	0.525	75.00	12.40	0.508	72.57	12.25	0.531	75.86	25.00	27.43	24.14	0.375	0.411	0.362
45	675	13.04	0.530	75.71	12.48	0.509	72.71	12.34	0.537	76.71	24.29	27.29	23.29	0.364	0.409	0.349
46	690	13.15	0.536	76.57	12.56	0.513	73.29	12.43	0.541	77.29	23.43	26.71	22.71	0.351	0.401	0.341
47	705	13.24	0.530	75.71	13.06	0.514	73.43	12.53	0.546	78.00	24.29	26.57	22.00	0.364	0.399	0.330
48	720	13.35	0.537	76.71	13.14	0.524	74.86	13.02	0.551	78.71	23.29	25.14	21.29	0.349	0.377	0.319
											Total (mg)			32.130	33.979	31.142
											q_0 (mg/g)			2.142	2.265	2.076

ก.3.2 ผลของปริมาณของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิก

ตารางที่ ก.4 ผลการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปริมาณต่าง ๆ เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ

$D_p = 0.51 \text{ mm}$

No.	V (ml)	W = 10 g			W = 15 g			W = 20 g			η (%)			Adsorption Capacity		
		Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	10 g	15 g	20 g	10 g	15 g	20 g
0	0	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	100.00	100.00	100.00	0.000	0.000	0.000
1	15	6.10	0.071	10.14	6.10	0.019	2.71	6.32	0.020	2.86	89.86	97.29	97.14	1.348	1.459	1.457
2	30	6.17	0.127	18.14	6.19	0.017	2.43	6.42	0.015	2.14	81.86	97.57	97.86	1.228	1.464	1.468
3	45	6.25	0.290	41.43	6.28	0.017	2.43	6.50	0.021	3.00	58.57	97.57	97.00	0.879	1.464	1.455
4	60	6.34	0.331	47.29	6.37	0.026	3.71	6.58	0.016	2.29	52.71	96.29	97.71	0.791	1.444	1.466
5	75	6.43	0.338	48.29	6.46	0.070	10.00	7.07	0.021	3.00	51.71	90.00	97.00	0.776	1.350	1.455
6	90	6.52	0.364	52.00	6.57	0.161	23.00	7.15	0.021	3.00	48.00	77.00	97.00	0.720	1.155	1.455
7	105	7.03	0.380	54.29	7.05	0.223	31.86	7.25	0.018	2.57	45.71	68.14	97.43	0.686	1.022	1.461
8	120	7.13	0.390	55.71	7.12	0.264	37.71	7.33	0.028	4.00	44.29	62.29	96.00	0.664	0.934	1.440
9	135	7.23	0.404	57.71	7.20	0.288	41.14	7.42	0.028	4.00	42.29	58.86	96.00	0.634	0.883	1.440
10	150	7.32	0.422	60.29	7.29	0.295	42.14	7.50	0.040	5.71	39.71	57.86	94.29	0.596	0.868	1.414
11	165	7.42	0.428	61.14	7.39	0.309	44.14	7.59	0.026	3.67	38.86	55.86	96.33	0.583	0.838	1.445

ตารางที่ ก.4 ผลการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปริมาณต่าง ๆ เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$ (ต่อ)

No.	V (ml)	W = 10 g			W = 15 g			W = 20 g			η (%)			Adsorption Capacity		
		Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	10 g	15 g	20 g	10 g	15 g	20 g
12	180	7.52	0.447	63.86	7.49	0.311	44.43	8.07	0.068	9.71	36.14	55.57	90.29	0.542	0.834	1.354
13	195	8.00	0.464	66.29	7.57	0.326	46.57	8.17	0.102	14.57	33.71	53.43	85.43	0.506	0.801	1.281
14	210	8.09	0.470	67.14	8.04	0.325	46.43	8.26	0.122	17.43	32.86	53.57	82.57	0.493	0.804	1.239
15	225	8.17	0.474	67.71	8.13	0.338	48.29	8.34	0.153	21.86	32.29	51.71	78.14	0.484	0.776	1.172
16	240	8.26	0.478	68.29	8.21	0.332	47.43	8.42	0.151	21.57	31.71	52.57	78.43	0.476	0.789	1.176
17	255	8.34	0.488	69.71	8.30	0.343	49.00	8.51	0.172	24.57	30.29	51.00	75.43	0.454	0.765	1.131
18	270	8.45	0.495	70.71	8.39	0.344	49.14	9.00	0.199	28.43	29.29	50.86	71.57	0.439	0.763	1.074
19	285	8.53	0.506	72.29	8.49	0.360	51.43	9.09	0.221	31.57	27.71	48.57	68.43	0.416	0.729	1.026
20	300	9.01	0.515	73.57	8.58	0.370	52.86	9.18	0.251	35.86	26.43	47.14	64.14	0.396	0.707	0.962
21	315	9.11	0.505	72.14	9.07	0.373	53.29	9.26	0.288	41.14	27.86	46.71	58.86	0.418	0.701	0.883
22	330	9.20	0.509	72.71	9.17	0.389	55.57	9.34	0.306	43.71	27.29	44.43	56.29	0.409	0.666	0.844
23	345	9.29	0.517	73.86	9.28	0.397	56.71	9.43	0.280	40.00	26.14	43.29	60.00	0.392	0.649	0.900
24	360	9.40	0.533	76.14	9.38	0.410	58.57	9.52	0.275	39.29	23.86	41.43	60.71	0.358	0.621	0.911
25	375	9.48	0.539	77.00	9.47	0.415	59.29	10.02	0.305	43.57	23.00	40.71	56.43	0.345	0.611	0.846

ตารางที่ ก.4 ผลการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปริมาณต่าง ๆ เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$ (ต่อ)

No.	V (ml)	W = 10 g			W = 15 g			W = 20 g			η (%)			Adsorption Capacity		
		Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	10 g	15 g	20 g	10 g	15 g	20 g
26	390	9.56	0.537	76.71	9.57	0.411	58.71	10.10	0.343	49.00	23.29	41.29	51.00	0.349	0.619	0.765
27	405	10.05	0.542	77.43	10.07	0.423	60.43	10.18	0.312	44.57	22.57	39.57	55.43	0.339	0.594	0.831
28	420	10.14	0.549	78.43	10.17	0.438	62.57	10.28	0.356	50.86	21.57	37.43	49.14	0.324	0.561	0.737
29	435	10.22	0.554	79.14	10.27	0.446	63.71	10.37	0.346	49.43	20.86	36.29	50.57	0.313	0.544	0.759
30	450	10.31	0.556	79.43	10.37	0.453	64.71	10.46	0.367	52.43	20.57	35.29	47.57	0.309	0.529	0.714
31	465	10.40	0.556	79.43	10.46	0.464	66.29	10.55	0.363	51.86	20.57	33.71	48.14	0.309	0.506	0.722
32	480	10.49	0.559	79.86	10.54	0.464	66.29	11.05	0.367	52.43	20.14	33.71	47.57	0.302	0.506	0.714
33	495	10.59	0.571	81.57	11.02	0.462	66.00	11.14	0.366	52.29	18.43	34.00	47.71	0.276	0.510	0.716
34	510	11.08	0.585	83.57	11.11	0.470	67.14	11.23	0.374	53.43	16.43	32.86	46.57	0.246	0.493	0.699
35	525	11.17	0.584	83.43	11.20	0.475	67.86	11.32	0.383	54.71	16.57	32.14	45.29	0.249	0.482	0.679
36	540	11.27	0.589	84.14	11.29	0.463	66.14	11.41	0.345	49.29	15.86	33.86	50.71	0.238	0.508	0.761
37	555	11.36	0.598	85.43	11.39	0.473	67.57	11.50	0.365	52.14	14.57	32.43	47.86	0.219	0.486	0.718
38	570	11.46	0.595	85.00	11.48	0.495	70.71	11.59	0.399	57.00	15.00	29.29	43.00	0.225	0.439	0.645
39	585	11.56	0.600	85.71	11.58	0.497	71.00	12.08	0.403	57.57	14.29	29.00	42.43	0.214	0.435	0.636

ตารางที่ ก.4 ผลการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปริมาณต่าง ๆ เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$ (ต่อ)

No.	V (ml)	W = 10 g			W = 15 g			W = 20 g			η (%)			Adsorption Capacity		
		Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	10 g	15 g	20 g	10 g	15 g	20 g
40	600	12.04	0.609	87.00	12.08	0.499	71.29	12.17	0.404	57.71	17.14	28.71	42.29	0.195	0.431	0.634
41	615	12.13	0.607	86.71	12.16	0.506	72.29	12.26	0.406	58.00	17.71	27.71	42.00	0.199	0.416	0.630
42	630	12.22	0.605	86.43	12.24	0.509	72.71	12.34	0.403	57.57	17.00	27.29	42.43	0.204	0.409	0.636
43	645	12.31	0.609	87.00	12.32	0.505	72.14	12.43	0.395	56.43	17.43	27.86	43.57	0.195	0.418	0.654
44	660	12.40	0.613	87.57	12.40	0.508	72.57	12.52	0.423	60.43	15.57	27.43	39.57	0.186	0.411	0.594
45	675	12.49	0.614	87.71	12.48	0.509	72.71	13.00	0.427	61.00	16.29	27.29	39.00	0.184	0.409	0.585
46	690	12.58	0.613	87.57	12.56	0.513	73.29	13.09	0.427	61.00	16.14	26.71	39.00	0.186	0.401	0.585
47	705	13.07	0.617	88.14	13.06	0.514	73.43	13.17	0.435	62.14	15.86	26.57	37.86	0.178	0.399	0.568
48	720	13.20	0.618	88.29	13.14	0.524	74.86	13.25	0.433	61.86	15.29	25.14	38.14	0.176	0.377	0.572
											Total (mg)			20.646	33.979	46.310
											q_0 (mg/g)			2.065	2.265	2.315

ก.3.3 ผลของอัตราการไหลของสารละลายกรดฮิวมิกต่อประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิก

ตารางที่ ก.5 ผลการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของเรซินมอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราการไหลของสารละลายต่าง ๆ เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$,

$W = 15 \text{ g}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$

No.	V (ml)	Q = 50 ml/min			Q = 100 ml/min			Q = 150 ml/min			η (%)			Adsorption Capacity		
		Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	50 ml/min	100 ml/min	150 ml/min	50 ml/min	100 ml/min	150 ml/min
0	0	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	100.00	100.00	100.00	0.000	0.000	0.000
1	15	12.14	0.015	2.14	6.10	0.019	2.71	3.52	0.029	4.14	97.86	97.29	95.86	1.468	1.459	1.438
2	30	12.34	0.016	2.29	6.19	0.017	2.43	3.58	0.026	3.71	97.71	97.57	96.29	1.466	1.464	1.444
3	45	12.53	0.014	2.00	6.28	0.017	2.43	4.04	0.029	4.14	98.00	97.57	95.86	1.470	1.464	1.438
4	60	13.11	0.015	2.14	6.37	0.026	3.71	4.11	0.039	5.57	97.86	96.29	94.43	1.468	1.444	1.416
5	75	13.30	0.016	2.29	6.46	0.070	10.00	4.16	0.051	7.29	97.71	90.00	92.71	1.466	1.350	1.391
6	90	13.49	0.018	2.57	6.57	0.161	23.00	4.22	0.068	9.71	97.43	77.00	90.29	1.461	1.155	1.354
7	105	14.08	0.029	4.14	7.05	0.223	31.86	4.28	0.103	14.71	95.86	68.14	85.29	1.438	1.022	1.279
8	120	14.26	0.089	12.71	7.12	0.264	37.71	4.33	0.144	20.57	87.29	62.29	79.43	1.309	0.934	1.191
9	135	14.43	0.277	39.57	7.20	0.288	41.14	4.38	0.252	36.00	60.43	58.86	64.00	0.906	0.883	0.960
10	150	15.03	0.337	48.14	7.29	0.295	42.14	4.43	0.282	40.29	51.86	57.86	59.71	0.778	0.868	0.896
11	165	15.21	0.355	50.71	7.39	0.309	44.14	4.49	0.291	41.57	49.29	55.86	58.43	0.739	0.838	0.876

ตารางที่ ค.5 ผลการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับกรดไขมันของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราการใช้ของสารละลายต่าง ๆ เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $W = 15 \text{ g}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$ (ต่อ)

No.	V (ml)	Q = 50 ml/min			Q = 100 ml/min			Q = 150 ml/min			η (%)			Adsorption Capacity		
		Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	50 ml/min	100 ml/min	150 ml/min	50 ml/min	100 ml/min	150 ml/min
12	180	15.41	0.381	54.43	7.49	0.311	44.43	4.55	0.304	43.43	45.57	55.57	56.57	0.684	0.834	0.849
13	195	16.01	0.387	55.29	7.57	0.326	46.57	5.01	0.309	44.14	44.71	53.43	55.86	0.671	0.801	0.838
14	210	16.21	0.408	58.29	8.04	0.325	46.43	5.07	0.310	44.29	41.71	53.57	55.71	0.626	0.804	0.836
15	225	16.38	0.410	58.57	8.13	0.338	48.29	5.14	0.314	44.86	41.43	51.71	55.14	0.621	0.776	0.827
16	240	16.56	0.431	61.57	8.21	0.332	47.43	5.19	0.317	45.29	38.43	52.57	54.71	0.576	0.789	0.821
17	255	17.12	0.441	63.00	8.30	0.343	49.00	5.25	0.319	45.57	37.00	51.00	54.43	0.555	0.765	0.816
18	270	17.29	0.443	63.29	8.39	0.344	49.14	5.31	0.322	46.00	36.71	50.86	54.00	0.551	0.763	0.810
19	285	17.45	0.454	64.86	8.49	0.360	51.43	5.37	0.324	46.29	35.14	48.57	53.71	0.527	0.729	0.806
20	300	18.04	0.471	67.29	8.58	0.370	52.86	5.43	0.334	47.71	32.71	47.14	52.29	0.491	0.707	0.784
21	315	18.24	0.477	68.14	9.07	0.373	53.29	5.49	0.335	47.86	31.86	46.71	52.14	0.478	0.701	0.782
22	330	18.44	0.473	67.57	9.17	0.389	55.57	5.55	0.347	49.57	32.43	44.43	50.43	0.486	0.666	0.756
23	345	19.02	0.486	69.43	9.28	0.397	56.71	6.01	0.349	49.86	30.57	43.29	50.14	0.459	0.649	0.752
24	360	19.20	0.492	70.29	9.38	0.410	58.57	6.07	0.348	49.71	29.71	41.43	50.29	0.446	0.621	0.754
25	375	19.38	0.475	67.86	9.47	0.415	59.29	6.14	0.355	50.71	32.14	40.71	49.29	0.482	0.611	0.739

ตารางที่ ๕.5 ผลการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราการไหลของสารละลายต่าง ๆ เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $W = 15 \text{ g}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$ (ต่อ)

No.	V (ml)	Q = 50 ml/min			Q = 100 ml/min			Q = 150 ml/min			η (%)			Adsorption Capacity		
		Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	50 ml/min	100 ml/min	150 ml/min	50 ml/min	100 ml/min	150 ml/min
26	390	19.56	0.465	66.43	9.57	0.411	58.71	6.20	0.359	51.29	33.57	41.29	48.71	0.504	0.619	0.731
27	405	20.15	0.469	67.00	10.07	0.423	60.43	6.25	0.356	50.86	33.00	39.57	49.14	0.495	0.594	0.737
28	420	20.31	0.471	67.29	10.17	0.438	62.57	6.31	0.359	51.29	32.71	37.43	48.71	0.491	0.561	0.731
29	435	20.50	0.501	71.57	10.27	0.446	63.71	6.37	0.364	52.00	28.43	36.29	48.00	0.426	0.544	0.720
30	450	21.05	0.525	75.00	10.37	0.453	64.71	6.43	0.365	52.14	25.00	35.29	47.86	0.375	0.529	0.718
31	465	21.24	0.528	75.43	10.46	0.464	66.29	6.50	0.371	53.00	24.57	33.71	47.00	0.369	0.506	0.705
32	480	21.44	0.524	74.86	10.54	0.464	66.29	6.55	0.376	53.71	25.14	33.71	46.29	0.377	0.506	0.694
33	495	22.01	0.533	76.14	11.02	0.462	66.00	7.00	0.376	53.71	23.86	34.00	46.29	0.358	0.510	0.694
34	510	22.24	0.534	76.29	11.11	0.470	67.14	7.05	0.388	55.43	23.71	32.86	44.57	0.356	0.493	0.669
35	525	22.41	0.524	74.86	11.20	0.475	67.86	7.12	0.400	57.14	25.14	32.14	42.86	0.377	0.482	0.643
36	540	23.06	0.524	74.86	11.29	0.463	66.14	7.17	0.403	57.57	25.14	33.86	42.43	0.377	0.508	0.636
37	555	23.27	0.547	78.14	11.39	0.473	67.57	7.23	0.408	58.29	21.86	32.43	41.71	0.328	0.486	0.626
38	570	23.43	0.562	80.29	11.48	0.495	70.71	7.30	0.413	59.00	19.71	29.29	41.00	0.296	0.439	0.615
39	585	23.59	0.568	81.14	11.58	0.497	71.00	7.35	0.414	59.14	18.86	29.00	40.86	0.283	0.435	0.613

ตารางที่ ค.5 ผลการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราการไหลของสารละลายต่าง ๆ เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$,
 $W = 15 \text{ g}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$ (ต่อ)

No.	V (ml)	Q = 50 ml/min			Q = 100 ml/min			Q = 150 ml/min			η (%)			Adsorption Capacity		
		Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	50 ml/min	100 ml/min	150 ml/min	50 ml/min	100 ml/min	150 ml/min
40	600	24.17	0.562	80.29	12.08	0.499	71.29	7.41	0.419	59.86	19.71	28.71	40.14	0.296	0.431	0.602
41	615	24.36	0.570	81.43	12.16	0.506	72.29	7.47	0.426	60.86	18.57	27.71	39.14	0.279	0.416	0.587
42	630	24.53	0.582	83.14	12.24	0.509	72.71	7.54	0.445	63.57	16.86	27.29	36.43	0.253	0.409	0.546
43	645	25.13	0.587	83.86	12.32	0.505	72.14	8.07	0.449	64.14	16.14	27.86	35.86	0.242	0.418	0.538
											Total (mg)			28.101	31.982	36.660
											q ₀ (mg/g)			1.873	2.132	2.444

ก.3.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายกรดฮิวมิกต่อประสิทธิภาพการดูดซับ กรดฮิวมิก

ตารางที่ ก.6 ผลการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่าง ๆ เมื่อ $Q = 100$ ml/min, $W = 20$ g และ $D_p = 0.51$ mm

No.	V (ml)	$C_o = 25$ mg/l			$C_o = 50$ mg/l			$C_o = 100$ mg/l			η (%)			Adsorption Capacity		
		Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	25 mg/l	50 mg/l	100 mg/l	25 mg/l	50 mg/l	100 mg/l
0	0	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	100.00	100.00	100.00	0.000	0.000	0.000
1	15	5.37	0.006	0.86	5.47	0.011	1.57	6.32	0.020	2.86	96.57	96.86	97.14	0.362	0.726	1.457
2	30	5.46	0.006	0.86	5.55	0.006	0.86	6.42	0.015	2.14	96.57	98.29	97.86	0.362	0.737	1.468
3	45	5.54	0.006	0.86	6.05	0.008	1.14	6.50	0.021	3.00	96.57	97.71	97.00	0.362	0.733	1.455
4	60	6.03	0.007	1.00	6.14	0.010	1.43	6.58	0.016	2.29	96.00	97.14	97.71	0.360	0.729	1.466
5	75	6.10	0.007	1.00	6.23	0.014	2.00	7.07	0.021	3.00	96.00	96.00	97.00	0.360	0.720	1.455
6	90	6.18	0.009	1.29	6.31	0.019	2.71	7.15	0.021	3.00	94.86	94.57	97.00	0.356	0.709	1.455
7	105	6.27	0.008	1.14	6.40	0.027	3.86	7.25	0.018	2.57	95.43	92.29	97.43	0.358	0.692	1.461
8	120	6.36	0.004	0.57	6.48	0.031	4.43	7.33	0.028	4.00	97.71	91.14	96.00	0.366	0.684	1.440
9	135	6.43	0.007	1.00	6.58	0.030	4.29	7.42	0.028	4.00	96.00	91.43	96.00	0.360	0.686	1.440
10	150	6.51	0.008	1.14	7.06	0.035	5.00	7.50	0.040	5.71	95.43	90.00	94.29	0.358	0.675	1.414
11	165	6.59	0.012	1.71	7.16	0.036	5.14	7.59	0.026	3.67	93.14	89.71	96.33	0.349	0.673	1.445

ตารางที่ ก.6 ผลการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่าง ๆ เมื่อ $Q = 100$ ml/min, $W = 20$ g และ $D_p = 0.51$ mm (ต่อ)

No.	V (ml)	$C_0 = 25$ mg/l			$C_0 = 50$ mg/l			$C_0 = 100$ mg/l			η (%)			Adsorption Capacity		
		Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	25 mg/l	50 mg/l	100 mg/l	25 mg/l	50 mg/l	100 mg/l
12	180	7.07	0.012	1.71	7.24	0.036	5.14	8.07	0.068	9.71	93.14	89.71	90.29	0.349	0.673	1.354
13	195	7.15	0.016	2.29	7.33	0.034	4.86	8.17	0.102	14.57	90.86	90.29	85.43	0.341	0.677	1.281
14	210	7.23	0.015	2.14	7.41	0.035	5.00	8.26	0.122	17.43	91.43	90.00	82.57	0.343	0.675	1.239
15	225	7.32	0.018	2.57	7.50	0.053	7.57	8.34	0.153	21.86	89.71	84.86	78.14	0.336	0.636	1.172
16	240	7.41	0.021	3.00	7.58	0.067	9.57	8.42	0.151	21.57	88.00	80.86	78.43	0.330	0.606	1.176
17	255	7.50	0.023	3.29	8.09	0.074	10.57	8.51	0.172	24.57	86.86	78.86	75.43	0.326	0.591	1.131
18	270	7.58	0.030	4.29	8.17	0.085	12.14	9.00	0.199	28.43	82.86	75.71	71.57	0.311	0.568	1.074
19	285	8.07	0.050	7.14	8.26	0.091	13.00	9.09	0.221	31.57	71.43	74.00	68.43	0.268	0.555	1.026
20	300	8.16	0.052	7.43	8.34	0.119	17.00	9.18	0.251	35.86	70.29	66.00	64.14	0.264	0.495	0.962
21	315	8.25	0.051	7.29	8.42	0.122	17.43	9.26	0.288	41.14	70.86	65.14	58.86	0.266	0.489	0.883
22	330	8.33	0.051	7.29	8.51	0.125	17.86	9.34	0.306	43.71	70.86	64.29	56.29	0.266	0.482	0.844
23	345	8.43	0.043	6.14	9.00	0.126	18.00	9.43	0.280	40.00	75.43	64.00	60.00	0.283	0.480	0.900
24	360	8.51	0.048	6.86	9.09	0.127	18.19	9.52	0.275	39.29	72.57	63.63	60.71	0.272	0.477	0.911
25	375	9.00	0.048	6.86	9.18	0.129	18.43	10.02	0.305	43.57	72.57	63.14	56.43	0.272	0.474	0.846

ตารางที่ ก.6 ผลการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่าง ๆ เมื่อ $Q = 100$ ml/min, $W = 20$ g และ $D_p = 0.51$ mm (ต่อ)

No.	V (ml)	$C_0 = 25$ mg/l			$C_0 = 50$ mg/l			$C_0 = 100$ mg/l			η (%)			Adsorption Capacity		
		Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	25 mg/l	50 mg/l	100 mg/l	25 mg/l	50 mg/l	100 mg/l
26	390	9.09	0.051	7.29	9.27	0.129	18.43	10.10	0.343	49.00	70.86	63.14	51.00	0.266	0.474	0.765
27	405	9.18	0.051	7.29	9.36	0.131	18.71	10.18	0.312	44.57	70.86	62.57	55.43	0.266	0.469	0.831
28	420	9.26	0.051	7.29	9.44	0.131	18.71	10.28	0.356	50.86	70.86	62.57	49.14	0.266	0.469	0.737
29	435	9.35	0.048	6.86	9.53	0.135	19.29	10.37	0.346	49.43	72.57	61.43	50.57	0.272	0.461	0.759
30	450	9.44	0.044	6.29	10.03	0.137	19.57	10.46	0.367	52.43	74.86	60.86	47.57	0.281	0.456	0.714
31	465	9.52	0.041	5.86	10.12	0.135	19.29	10.55	0.363	51.86	76.57	61.43	48.14	0.287	0.461	0.722
32	480	10.00	0.046	6.57	10.22	0.138	19.71	11.05	0.367	52.43	73.71	60.57	47.57	0.276	0.454	0.714
33	495	10.09	0.045	6.43	10.31	0.139	19.86	11.14	0.366	52.29	74.29	60.29	47.71	0.279	0.452	0.716
34	510	10.18	0.043	6.14	10.39	0.142	20.29	11.23	0.374	53.43	75.43	59.43	46.57	0.283	0.446	0.699
35	525	10.26	0.042	6.00	10.48	0.145	20.71	11.32	0.383	54.71	76.00	58.57	45.29	0.285	0.439	0.679
36	540	10.34	0.047	6.71	10.57	0.143	20.43	11.41	0.345	49.29	73.14	59.14	50.71	0.274	0.444	0.761
37	555	10.44	0.055	7.86	11.06	0.144	20.57	11.50	0.365	52.14	68.57	58.86	47.86	0.257	0.441	0.718
38	570	10.52	0.056	8.00	11.15	0.155	22.14	11.59	0.399	57.00	68.00	55.71	43.00	0.255	0.418	0.645
39	585	11.00	0.059	8.43	11.24	0.158	22.57	12.08	0.403	57.57	66.29	54.86	42.43	0.249	0.411	0.636

ตารางที่ ค.6 ผลการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับกรดฮิวมิกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่าง ๆ เมื่อ $Q = 100$ ml/min, $W = 20$ g และ $D_p = 0.51$ mm (ต่อ)

No.	V (ml)	$C_o = 25$ mg/l			$C_o = 50$ mg/l			$C_o = 100$ mg/l			η (%)			Adsorption Capacity		
		Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	Time (min)	Abs	C (mg/l)	25 mg/l	50 mg/l	100 mg/l	25 mg/l	50 mg/l	100 mg/l
40	600	11.08	0.061	8.71	11.31	0.154	22.00	12.17	0.404	57.71	65.14	56.00	42.29	0.244	0.420	0.634
41	615	11.16	0.063	9.00	11.39	0.164	23.43	12.26	0.406	58.00	64.00	53.14	42.00	0.240	0.399	0.630
42	630	11.24	0.061	8.71	11.47	0.165	23.57	12.34	0.403	57.57	65.14	52.86	42.43	0.244	0.396	0.636
43	645	11.32	0.066	9.43	11.55	0.168	24.00	12.43	0.395	56.43	62.29	52.00	43.57	0.234	0.390	0.654
44	660	11.42	0.069	9.86	12.03	0.168	24.00	12.52	0.423	60.43	60.57	52.00	39.57	0.227	0.390	0.594
45	675	11.50	0.073	10.43	12.12	0.178	25.43	13.00	0.427	61.00	58.29	49.14	39.00	0.219	0.369	0.585
46	690	12.00	0.085	12.14	12.22	0.185	26.43	13.09	0.427	61.00	51.43	47.14	39.00	0.193	0.354	0.585
47	705	12.09	0.089	12.71	12.31	0.181	25.86	13.17	0.435	62.14	49.14	48.29	37.86	0.184	0.362	0.568
48	720	12.28	0.083	11.86	12.41	0.182	26.00	13.25	0.433	61.86	52.57	48.00	38.14	0.197	0.360	0.572
											Total (mg)			13.956	25.377	46.310
											q_o (mg/g)			0.698	1.269	2.315

ค.4 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายหลังการดูดซับในระบบฟลูอิดไคซ์เบด

ค.4.1 สำหรับขนาดของเรซินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ใช้เป็นตัวดูดซับต่างกัน

ตารางที่ ค.7 ค่า pH ของสารละลายหลังการดูดซับที่ขนาดของเรซินมอนต์มอริลโลไนต์ต่าง ๆ เมื่อ

$C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $W = 15 \text{ g}$

No.	V (ml)	pH			หมายเหตุ
		Dp = 0.80 mm	Dp = 0.51 mm	Dp = 0.34 mm	
0	0	6.99	6.99	6.99	ก่อนดูดซับ
1	15	3.97	3.96	3.94	
11	165	4.09	4.02	4.05	
21	315	4.16	4.09	4.15	
31	465	4.26	4.26	4.26	
41	615	4.32	4.33	4.32	

ค.4.2 สำหรับปริมาณของเรซินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ใช้เป็นตัวดูดซับต่างกัน

ตารางที่ ค.8 ค่า pH ของสารละลายหลังการดูดซับที่ปริมาณของเรซินมอนต์มอริลโลไนต์ต่าง ๆ เมื่อ

$C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $Q = 100 \text{ ml/min}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$

No.	V (ml)	pH			หมายเหตุ
		W = 10 g	W = 15 g	W = 20 g	
0	0	6.99	6.99	6.99	ก่อนดูดซับ
1	15	4.03	3.96	3.98	
11	165	4.13	4.02	4.04	
21	315	4.25	4.09	4.11	
31	465	4.37	4.26	4.12	
41	615	4.46	4.33	4.21	

ก.4.3 สำหรับอัตราการไหลของสารละลายที่ถูกดูดซับต่างกัน

ตารางที่ ก.9 ค่า pH ของสารละลายหลังการดูดซับที่อัตราการไหลของสารละลายที่ถูกดูดซับ ต่าง ๆ เมื่อ $C_0 = 100 \text{ mg/l}$, $W = 15 \text{ g}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$

No.	V (ml)	pH			หมายเหตุ
		Q = 50 ml/min	Q = 100 ml/min	Q = 150 ml/min	
0	0	6.99	6.99	6.99	ก่อนดูดซับ
1	15	3.95	3.96	4.00	
11	165	3.97	4.02	4.03	
21	315	4.07	4.09	4.10	
31	465	4.22	4.26	4.24	
41	615	4.36	4.33	4.39	

ก.4.4 สำหรับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่ถูกดูดซับต่างกัน

ตารางที่ ก.10 ค่า pH ของสารละลายหลังการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่ถูกดูดซับ ต่าง ๆ เมื่อ $Q = 100 \text{ ml/min}$, $W = 20 \text{ g}$ และ $D_p = 0.51 \text{ mm}$

No.	V (ml)	pH			หมายเหตุ
		$C_0 = 25 \text{ mg/l}$	$C_0 = 50 \text{ mg/l}$	$C_0 = 100 \text{ mg/l}$	
0	0	6.57	6.67	6.99	ก่อนดูดซับ
1	15	4.02	4.08	3.98	
11	165	4.17	4.11	4.04	
21	315	4.19	4.19	4.11	
31	465	4.25	4.24	4.12	
41	615	4.27	4.28	4.21	

ภาคผนวก ง

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. อภิษฎา เจนการ และ รัตนวรรณ (วิบูลย์สวัสดิ์) เกียรติโกมล. (ตุลาคม 2550). การฟลูอิดิ-
ไดซ์ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) ในระบบหอดูดซับแบบฟลูอิดิไดซ์เบด. ใน การ
ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (หน้า FUO20_1-
FUO20_2). เชียงใหม่: ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และ
สมาคมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย.
2. Apichaya Chenkarl and Ratanawan (Wibulswas) Kiattikomol. (December 2006).
Adsorption behavior of Montmorillonite in fluidized bed system. In **Regional Symposium on
Chemical Engineering 2006 (13th RSCE)**. Singapore : Nanyang Technological University.
3. Apichaya Chenkarl and Ratanawan (Wibulswas) Kiattikomol. (in press). Humic acid
sorption behavior of Montmorillonite in fluidized bed. **Applied Clays Science** (Submitted).